

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DERİNER VE YUSUFELİ KEMER BARAJLARINDA YAPI-SIVI-ZEMİN
ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK YAPISAL DAVRANIŞLARIN
BELİRLENMESİ VE UZUN SÜRELİ YAPI SAĞLIĞI İZLEME

DOKTORA TEZİ

Ebru KALKAN OKUR

NİSAN 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DERİNER VE YUSUFELİ KEMER BARAJLARINDA YAPI-SIVI-ZEMİN
ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK YAPISAL DAVRANIŞLARIN
BELİRLENMESİ VE UZUN SÜRELİ YAPI SAĞLIĞI İZLEME**

Ebru KALKAN OKUR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :02/04/ 2024

Tezin Savunma Tarihi :26/04/ 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Deriner ve Yusufeli Kemer Barajlarında Yapı-Sıvı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Yapısal Davranışların Belirlenmesi ve Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tezin her aşamasında destek ve teşvikleri ile beni motive eden, öğrencisi olmaktan her zaman onur ve gurur duyacağım değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a destek ve emeklerini esirgemediği bu süreçte sabır ve anlayışından dolayı minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Akademik hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyip her konuda destek olan saygıdeğer Hocalarım Prof. Dr. Süleyman ADANUR, Prof. Dr. Şevket ATEŞ ve Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN’a çok teşekkür ederim.

Deneysel ölçümlerde yardım ve desteklerinden ötürü Dr. Öğr. Üyesi Ali Fuat GENÇ, Öğr. Gör. Dr. Fezayil SUNCA, Arş. Gör. Alihan BALTACI, Arş. Gör. Muhammed SARI’ya ve ortak çalışmalar yürüttüğümüz tüm çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalışması, “Doğu Karadeniz Bölgesindeki Stratejik Öneme Sahip Mühendislik Yapıları İçin Yapı Sağlığı İzleme Ağının Kurulması ve Yenilikçi Yöntemlerin Geliştirilmesi” başlıklı ve FAY-2021-9635 numaralı Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir. Gerekli desteği sağlayan Karadeniz Teknik Üniversitesi’ne çok teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında ilgili barajlarda arazi çalışmalarının yürütülmesi adına gerekli izinleri sağlayan Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü’ne, deneysel çalışmaların yürütülmesi hususunda her türlü destek ve kolaylığı sağlayan 26. Bölge DSİ Şube Müdürü Hasan Hüseyin ÖZTÜRK, Şube Müdürü Sezai YILDIZ ve Mustafa ANAR’a çok teşekkür ederim.

Koşulsuz sevgi, saygı ve sabrın ile hayatımın kuşkusuz en güzel dönemlerini yaşadığım değerli eşim Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi OKUR her adımda yanımda olup, güç ve motivasyon kaynağım olduğun için teşekkür ederim.

Destekleri ile her zaman yanımda olan babam Varol KALKAN, annem Güller KALKAN, kardeşlerim Emel, Esra, Mihran ve Zeynep Ada KALKAN’a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ebru KALKAN OKUR

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Deriner ve Yusufeli Kemer Barajlarında Yapı-Sıvı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Yapısal Davranışların Belirlenmesi ve Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/04/2024

Ebru KALKAN OKUR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XXI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XXV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kemer Barajlarla İlgili Literatür Çalışmaları	5
1.2.1. Sayısal Çalışmalar.....	5
1.2.2. Deneysel Çalışmalar	15
1.2.3. Yapı Sağlığı İzleme ile İlgili Çalışmalar.....	22
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı	30
1.4. Kemer Barajlar	33
1.5. Kemer Barajların Sonlu Eleman Yöntemiyle Modellenmesi.....	36
1.6. Baraj Rezervuarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi	37
1.6.1. Westergaard Ek Kütle Yaklaşımı.....	38
1.6.2. Euler Akışkan Eleman Yaklaşımı	39
1.6.3. Lagrange Akışkan Eleman Yaklaşımı.....	41
1.7. Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz	43
1.8. Deneysel Modal Analiz Yöntemi	45
1.9. Sonlu Eleman Model Güncelleme.....	48
1.10. Yapı Sağlığı İzleme	49
1.11. Yapı Sağlığı İzlemede Yapay Zeka ve Yapay Sinir Ağları.....	52
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	56
2.1. Deriner Barajı.....	56
2.1.1. Deriner Barajı’nda Gerçekleştirilen Arazi Çalışmaları.....	58
2.1.2. Deriner Barajı Sayısal Çalışmalar	64
2.2. Yusufeli Barajı	95

2.2.1. Yusufeli Barajında Gerçekleştirilen Arazi Çalışmaları	97
2.2.2. Yusufeli Barajı Sayısal Çalışmalar	108
2.3. Kemer Barajlarda Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme	225
2.3.1. Deriner Barajında Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme.....	226
2.3.2. Yusufeli Barajında Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme	240
2.4. Kemer Barajlardan Elde Edilen Uzun Süreli İzleme Verilerinin Yapay Sinir Ağları ile İşlenmesi.....	250
2.4.1. Deriner Barajında Yapay Sinir Ağları Uygulaması	251
2.4.2. Yusufeli Barajında Yapay Sinir Ağları Uygulaması.....	262
3. SONUÇLAR.....	278
4. ÖNERİLER.....	290
5. KAYNAKLAR	291
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

DERİNER VE YUSUFELİ KEMER BARAJLARINDA YAPI-SIVI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK YAPISAL DAVRANIŞLARIN BELİRLENMESİ VE UZUN SÜRELİ YAPI SAĞLIĞI İZLEME

Ebru KALKAN OKUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2024, 301 Sayfa

Kemer barajlar, eğrilikli yapıları sayesinde narin kesitlere sahiptirler. Bu barajların büyük hacimli, maliyetli olması ve yapımının uzun yıllar sürmesi yapının önemini arttırmaktadır. Bu tür yapıların inşası sırasında meydana gelebilecek hata ve/veya oluşabilecek kazalar sonrasında büyük can ve mal kayıpları ortaya çıkabilmektedir. Kemer barajların hacimleri, kütleleri ve narinlikleri göz önüne alındığında, değişen su basıncı, sıcaklık, rüzgar ve deprem gibi dinamik kuvvetlerden önemli ölçüde etkilenebilmektedirler. Bu etkilerin ne düzeyde olduğu ve barajı ne ölçüde etkilediği bilgisayar yardımıyla oluşturulan sonlu eleman modelde yapılacak analizler ile belirlenebilmektedir. Sonlu eleman analizlerin belirli kabullere dayandırılması nedeniyle elde edilen sonuçların deneysel yöntemler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması ve/veya doğrulanması gerekmektedir. Birçok mühendislik yapısında tercih edilen en uygun yöntemlerden bir tanesi Deneysel Modal Analiz yöntemidir. Tez kapsamında, Türkiye'nin en yüksek iki barajı olan Deriner ve Yusufeli Barajlarında yapısal davranışın deneysel olarak belirlenmesi amacıyla yapılara yerleştirilen hassas ivmeölçerler ile uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları yürütülmüştür. Her iki barajın projelerine uygun hazırlanan sonlu eleman modellerinin modal analizleri deneysel dinamik karakteristikler referans alınarak gerçekleştirilmiş ve doğrulanmıştır. Üç farklı rezervuar modelleme yaklaşımlarının etkinliğinin ve barajların statik/dinamik performanslarının belirlenmesi amacıyla Deriner Barajında maksimum su seviyesi için, Yusufeli Barajı'nda ise rezervuarın boş olması ve su tutma süreci boyunca seçilen sekiz farklı su seviyesi durumu için analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Deriner ve Yusufeli Barajlarına kurulan sensörler ile uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları yürütülerek elde edilen sonuçların Yapay Sinir Ağları ile eğitilmesi ile tahmini frekans haritaları oluşturulup tez kapsamında detaylı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kemer baraj, Sonlu eleman model, Yapı Sağlığı İzleme,

PhD. Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF STRUCTURAL BEHAVIOR AND LONG-TERM STRUCTURAL HEALTH MONITORING IN DERİNER AND YUSUFELİ ARCH DAMS BY CONSIDERING STRUCTURE-WATER-SOIL INTERACTION

Ebru KALKAN OKUR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2024, 301 Pages

Arch dams have slender sections thanks to their curvature structures. The fact that these dams are large in volume, costly and take many years to build increases the importance of the structure. Huge losses of life and property may occur as a result of errors and/or accidents that may occur during the construction of such structures. Considering the volume, mass and slenderness of arch dams, they can be significantly affected by dynamic forces such as changing water pressure, temperature, wind and earthquakes. The level of these effects and the extent to which they affect the dam can be determined by analysis in the finite element model created with the help of computers. Since Finite Element Analysis is based on certain assumptions, the results obtained must be compared and/or verified with the results obtained by experimental methods. One of the most suitable methods preferred in many engineering structures is the experimental modal analysis method. Within the scope of the thesis, long-term Structural Health Monitoring studies were carried out with sensitive accelerometers placed on the structures in order to experimentally determine the structural behavior of Deriner and Yusufeli Dams, the two highest dams in Turkey. Modal analyses of the finite element models prepared according to the projects of both dams were carried out and verified with reference to experimental dynamic characteristics. In order to determine the effectiveness of three different reservoir modeling approaches and the static/dynamic performances of the dams, analyzes were carried out for the maximum water level in Deriner Dam, and for the empty reservoir in Yusufeli Dam and for eight different water level conditions selected throughout the water retention process. In addition, long-term Structural Health Monitoring studies were carried out with the sensors installed in Deriner and Yusufeli Dams, and the results obtained were trained with Artificial Neural Networks, and estimated frequency maps were created and examined in detail within the scope of the thesis.

Key Words: Arch dam, Finite element model, Structural Health Monitoring

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tez kapsamında yapılan sayısal analizlere ait akış diyagramı	32
Şekil 2. Beton barajlara etkimesi muhtemel yük çeşitlerine ait görsel.....	34
Şekil 3. Beton barajlara etkimesi muhtemel yük çeşitlerine ait görsel.....	35
Şekil 4. Westergaard yaklaşımına göre hidrodinamik basınç dağılımı	38
Şekil 5. Çevresel ve Zorlanmış Titreşim testlerine ait akış diyagramı	46
Şekil 6. Barajlarda kullanılan sensörlere ait bazı örnekler	50
Şekil 7. Yapay sınır hücresine ait görsel (URL 1, 2024).....	53
Şekil 8. Deriner Barajı'na ait bazı görseller	57
Şekil 9. Deriner Barajında yapılan çevresel titreşim testine ait bazı görseller	59
Şekil 10. Deriner Barajında üç set halinde yapılan deneysel ölçümlere ait şematik gösterim, (a) Set-1, (b) Set-2, (c) Set-3.....	60
Şekil 11. Deriner Barajında her sette gerçekleştirilen referanslı ölçümler için yerleştirilen ivmeölçer yerleri (a) Set-1, (b) Set-2, (c) Set-3.....	61
Şekil 12. Deriner Barajının çevresel titreşim testlerinden elde edilen diyagramlar (a) Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri (SYM-TD) (b) Otomatik Spektral Yoğunlukların Ortalaması	63
Şekil 13. Deriner Barajının Set-1 ve Set-3 ölçümlerine ait bölgesel mod şekilleri ve kesikli çizgilerle tamamlanarak oluşturulan mod şekilleri (a) Birinci mod (b) İkinci mod (c) Üçüncü mod (d) Dördüncü mod	63
Şekil 14. Deriner Barajı'nın plan kesitlerine ait bazı görünüşler (a) +153m kotu, (b) düşey kesit, (c) + 264m kotu, (d) +397m kotu	66
Şekil 15. Deriner Barajı gövdesinin oluşturulma sürecine ait akış diyagramı	67
Şekil 16. Deriner Barajının sonlu eleman modeline ait görseller.....	68
Şekil 17. Deriner Barajının Westergaard ek kütle yaklaşımına göre baraj-rezervuar- temel etkileşimli sonlu eleman modeli	70
Şekil 18. Deriner Barajının Euler akışkan eleman yaklaşımına göre baraj-rezervuar- temel etkileşimli sonlu eleman modeli	71
Şekil 19. Deriner Barajının Lagrange akışkan eleman yaklaşımına göre baraj- rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli.....	72
Şekil 20. Deriner Barajına ait sonlu eleman model güncellemede baraj gövdesine ait malzeme dağılımı.....	75
Şekil 21. Deriner Barajı sonlu eleman modelinin modal analizi sonucu elde edilen ilk dört mod şekli	77

Şekil 22. Deriner Barajına ait deneysel ve sonlu eleman modelden elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması.....	78
Şekil 23. Deriner Barajının statik ve dinamik analiz sonuçlarının gösterimi için seçilen I-I ve II-II kesitleri.....	80
Şekil 24. Westergaard yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	81
Şekil 25. Lagrange yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	82
Şekil 26. Westergaard ve Lagrange yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme	83
Şekil 27. Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelerine ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum asal gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum asal gerilme.....	84
Şekil 28. 1999 Kocaeli depreminin EW ve NS bileşenlerine ait ivme kayıtları	87
Şekil 29. Westergaard yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	88
Şekil 30. Euler yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	89
Şekil 31. Lagrange yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	90
Şekil 32. Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme	91
Şekil 33. Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analizi sonucu elde edilen asal gerilmeleri ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum asal gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum asal gerilme.....	92
Şekil 34. Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analizi sonucu 2068 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	95
Şekil 35. Yusufeli Barajına ait bazı görseller	96

Şekil 36. Yusufeli Barajında yapılan çevresel titreşim testine ait bazı görseller	98
Şekil 37. Yusufeli Barajında gerçekleştirilen referanslı ölçümlere ait ivmeölçer yerleşimi (a) Referanslı ölçüm-1, (b) Referanslı ölçüm-2, (c) Tüm ölçüm durumu.....	99
Şekil 38. Yusufeli Barajının çevresel titreşim testlerinden elde edilen diyagramlar (a) Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri (SYMTD), (b) Otomatik Spetral Yoğunlukların Ortalaması	100
Şekil 39. Yusufeli Barajının çevresel titreşim testine ait mod şekilleri (a) Birinci mod, (b) İkinci mod, (c) Üçüncü mod, (d) Dördüncü mod, (e) Beşinci mod, (f) Altıncı mod	101
Şekil 40. Yusufeli Barajının 22 Kasım 2022 ile 15 Mart 2024 tarihleri arasında değişen rezervuar su yüksekliği.....	102
Şekil 41. Yusufeli Baraj rezervuarının su tutma sürecinde baraja yerleştirilen üç adet ivmeölçere ait bazı görseller (a) yerleşim planı, (b) Kurulum görselleri	103
Şekil 42. Yusufeli Baraj rezervuarının farklı su seviyelerine ait elde edilen Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri (a) 15m, (b) 36m, (c) 57m, (d) 78m, (e) 99m, (f) 126m, (g) 150m, (h) 172m	104
Şekil 43. Yusufeli Baraj rezervuarının farklı su seviyelerine ait çevresel titreşim testinden elde edilen frekans değerlerinin iki ve üç boyutlu grafiklerine ait görseller	107
Şekil 44. Yusufeli Barajının plan kesitlerine ait bazı görünüşler (a) +440m kotu, (b) + 555m kotu, (c) +715m kotu, (d) düşey kesit	109
Şekil 45. Yusufeli Barajı gövdesinin oluşturulma sürecine ait akış diyagramı.....	112
Şekil 46. Yusufeli Barajının sonlu eleman modeline ait görseller	113
Şekil 47. Yusufeli Barajının Westergaard ek kütle yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli.....	115
Şekil 48. Yusufeli Barajının Euler akışkan eleman yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli.....	116
Şekil 49. Yusufeli Barajının Euler akışkan eleman yaklaşımına göre farklı su seviyeleri için oluşturulan sonlu eleman modelleri	117
Şekil 50. Yusufeli Barajının Lagrange akışkan eleman yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli.....	119
Şekil 51. Yusufeli Barajının Lagrange akışkan eleman yaklaşımına göre farklı su seviyeleri için oluşturulan sonlu eleman modelleri	120
Şekil 52. Yusufeli Baraj gövdesinin her bir ano ve döküme ait 90 günlük beton basınç dayanımları	122
Şekil 53. Yusufeli Barajı sonlu eleman modeline ait malzeme dayanımı dağılımı.....	123
Şekil 54. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için deneysel ve sonlu eleman modelden elde edilen frekans değerlerine ait grafik	124

Şekil 55. Yusufeli Baraj rezervuarının 15m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	127
Şekil 56. Yusufeli Baraj rezervuarının 36m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	128
Şekil 57. Yusufeli Baraj rezervuarının 57m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	129
Şekil 58. Yusufeli Baraj rezervuarının 78m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	129
Şekil 59. Yusufeli Baraj rezervuarının 99m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	130
Şekil 60. Yusufeli Baraj rezervuarının 126m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	131
Şekil 61. Yusufeli Baraj rezervuarının 150m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	131
Şekil 62. Yusufeli Baraj rezervuarının 172m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği.....	132
Şekil 63. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su değişimine bağlı olarak ilk üç frekans değerinin deneysel ve sayısal olarak değişimi (a) Birinci mod, (b) İkinci mod, (c) Üçüncü mod	134
Şekil 64. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su değişimine bağlı olarak sayısal frekans değişimleri (a) Westergaard yaklaşımı, (b) Euler yaklaşımı, (c) Lagrange yaklaşımı.....	135
Şekil 65. Yusufeli Barajının sonlu eleman model analizi sonucu elde edilen ilk altı mod şekli.....	138
Şekil 66. Yusufeli Barajına ait deneysel ve sonlu eleman modelden elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması.....	140
Şekil 67. Yusufeli Barajının kret orta noktasında kaydedilen boyuna ve enine yer değiştirme değerleri	142
Şekil 68. Yusufeli Barajının sekiz farklı su yüksekliği durumu için kret orta noktasında elde edilen yer değiştirme değerleri	143
Şekil 69. Yusufeli Barajının statik ve dinamik analiz sonuçlarının gösterimi için seçilen I-I ve II-II kesitleri.....	144
Şekil 70. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	145
Şekil 71. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	146
Şekil 72. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen	

kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	147
şekil 73. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	148
şekil 74. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	149
şekil 75. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	150
şekil 76. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	151
şekil 77. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	152
şekil 78. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	153
şekil 79. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme.....	154
şekil 80. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme.....	156
şekil 81. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	160
şekil 82. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	161

Şekil 83. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	162
Şekil 84. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	163
Şekil 85. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	164
Şekil 86. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	165
Şekil 87. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	166
Şekil 88. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	167
Şekil 89. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme.....	168
Şekil 90. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme.....	170
Şekil 91. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	175
Şekil 92. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	176
Şekil 93. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	177

Şekil 94. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	178
Şekil 95. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	179
Şekil 96. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	180
Şekil 97. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	181
Şekil 98. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	182
Şekil 99. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	183
Şekil 100. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme.....	184
Şekil 101. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme	186
Şekil 102. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması ve Westergaard yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için dinamik analizi sonucu 2426 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	190
Şekil 103. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	191
Şekil 104. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	192

Şekil 105. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	193
Şekil 106. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	194
Şekil 107. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	195
Şekil 108. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	196
Şekil 109. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	197
Şekil 110. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	198
Şekil 111. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme.....	199
Şekil 112. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme.....	201
Şekil 113. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması ve Euler yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için dinamik analizi sonucu 2426 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	205
Şekil 114. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	206
Şekil 115. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	207

Şekil 116. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	208
Şekil 117. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	209
Şekil 118. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	210
Şekil 119. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	211
Şekil 120. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	212
Şekil 121. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme	213
Şekil 122. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler, (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme.....	214
Şekil 123. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme	216
Şekil 124. Yusufeli Baraj rezervuarının boş ve Lagrange yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için dinamik analizi sonucu 2426 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme.....	220
Şekil 125. Yusufeli Barajının dinamik analizi sonucu sekiz farklı su seviyesi için elde edilen yer değiştirme değerlerinin Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre karşılaştırılması	221
Şekil 126. Yusufeli Barajının dinamik analizi sonucu sekiz farklı su seviyesi için elde edilen maksimum asal gerilme değerlerinin Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre karşılaştırılması	222

Şekil 127. Yusufeli Barajının dinamik analizi sonucu sekiz farklı su seviyesi için elde edilen minimum asal gerilme değerlerinin Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre karşılaştırılması	223
Şekil 128. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesi için en üst galeri boşluğuna yerleştirilen ivme ölçerlerin genel yerleşim planı	227
Şekil 129. Deriner Barajında uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme için ivmeölçer kurulumuna ait bazı görseller	228
Şekil 130. Web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen Deriner Barajının gerçek zamanlı grafiklerine ait görsel.....	230
Şekil 131. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk dört moda ait frekans değerlerinin zamanla değişim grafiği	231
Şekil 132. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk dört moda ait frekans değerlerinin ayrı ayrı zamanla değişim grafikleri.....	231
Şekil 133. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk dört moda ait frekans değerlerinin histogram grafikleri (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4.....	232
Şekil 134. Deriner Barajında uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme süreci boyunca hava sıcaklıklarının zamanla değişim grafiği.....	233
Şekil 135. Deriner Barajından elde edilen uzun süreli frekans ve ortam sıcaklığı verilerinin frekans-sıcaklık dağılım grafikleri a) Mod 1, b) Mod 2, c) Mod 3, d) Mod 4.....	234
Şekil 136. Deriner Barajının on bir yıllık rezervuar su değişimi.....	235
Şekil 137. Deriner Barajının yıllık periyotlar halinde rezervuar su değişimi.....	236
Şekil 138. 2012-2023 yılları arasında Deriner Barajının bulunduğu bölgeye ait ortalama hava sıcaklığı verileri.....	238
Şekil 139. 2013-2023 yılları arasında Deriner Barajının bulunduğu bölgeye ait ortalama hava sıcaklığı ve rezervuar su seviyesinin değişimlerine ait grafik.....	238
Şekil 140. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ortam sıcaklığı, su yüksekliği ve frekans değerlerinin değişimine ait grafik.....	239
Şekil 141. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesi için kret kotuna yerleştirilen ivmeölçerlerin genel yerleşim planı	241
Şekil 142. Web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen Yusufeli Barajının gerçek zamanlı grafiklerine ait görsel.....	242
Şekil 143. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk altı moda ait frekans değerlerinin zamanla değişim grafiği.....	243
Şekil 144. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk altı moda ait frekans değerlerinin ayrı ayrı zamanla değişim grafikleri.....	244

Şekil 145. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk altı moda ait frekans değerlerinin histogram grafikleri a) Mod 1, b) Mod 2, c) Mod 3, d) Mod 4, e) Mod 5, f) Mod 6.....	245
Şekil 146. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen hava sıcaklıklarının zamanla değişim grafiği	246
Şekil 147. Yusufeli Barajından elde edilen uzun süreli frekans ve ortam sıcaklığı verilerinin frekans-sıcaklık dağılım grafikleri a) Mod 1, b) Mod 2, c) Mod 3, d) Mod 4, e) Mod 5, f) Mod 6.....	246
Şekil 148. Yusufeli Barajında izleme süreci boyunca meydana gelen rezervuar su değişimi.....	248
Şekil 149. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ortam sıcaklığı, su yüksekliği ve frekans değerlerinin değişimine ait grafik.....	249
Şekil 150. Deriner Barajı için oluşturulan Yapay Sinir Ağı modeli yapısı	252
Şekil 151. Deriner Barajının birinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	253
Şekil 152. Deriner Barajının birinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği.....	254
Şekil 153. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen birinci moduna ait frekans haritası	254
Şekil 154. Deriner Barajının ikinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	255
Şekil 155. Deriner Barajının ikinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği.....	256
Şekil 156. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen ikinci moduna ait frekans haritası	256
Şekil 157. Deriner Barajının üçüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	258
Şekil 158. Deriner Barajının üçüncü modu için oluşturulan ağın performans grafiği	258
Şekil 159. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen üçüncü moduna ait frekans haritası	259
Şekil 160. Deriner Barajının dördüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	260
Şekil 161. Deriner Barajının dördüncü modu için oluşturulan ağın performans grafiği.....	261
Şekil 162. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen dördüncü moduna ait frekans haritası	261
Şekil 163. Yusufeli Barajı için oluşturulan Yapay Sinir Ağı modeli yapısı	263
Şekil 164. Yusufeli Barajının birinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	264
Şekil 165. Yusufeli Barajının birinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği	265

Şekil 166. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen birinci moduna ait frekans haritası	265
Şekil 167. Yusufeli Barajının ikinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	266
Şekil 168. Yusufeli Barajının ikinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği	267
Şekil 169. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen ikinci moduna ait frekans haritası	267
Şekil 170. Yusufeli Barajının üçüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	269
Şekil 171. Yusufeli Barajının üçüncü modu için oluşturulan ağın performans grafiği	269
Şekil 172. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen üçüncü moduna ait frekans haritası	270
Şekil 173. Yusufeli Barajının dördüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	271
Şekil 174. Yusufeli Barajının dördüncü modu için oluşturulan ağın performans grafiği.....	272
Şekil 175. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen dördüncü moduna ait frekans haritası	272
Şekil 176. Yusufeli Barajının beşinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	273
Şekil 177. Yusufeli Barajının beşinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği	274
Şekil 178. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen beşinci moduna ait frekans haritası	274
Şekil 179. Yusufeli Barajının altıncı modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri.....	276
Şekil 180. Yusufeli Barajının altıncı modu için oluşturulan ağın performans grafiği	276
Şekil 181. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen altıncı moduna ait frekans haritası	277

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Deriner Barajının 12/06/2019 tarihli ölçümlerine ait Set-1 ve Set-3'ten elde edilen frekans değerleri.....	62
Tablo 2. Deriner Barajının farklı rezervuar modelleme yaklaşımlarına ait başlangıç sonlu eleman modeli için kullanılan malzeme ve eleman özellikleri	73
Tablo 3. Deriner Barajının deneysel ve sonlu eleman modellerine ait modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri.....	74
Tablo 4. Deriner Barajının sonlu eleman modellerine ait frekans değerlerinin deneysel olarak elde edilen frekans değerlerine göre hata oranları	74
Tablo 5. Deriner Barajının deneysel ve güncellenmiş sonlu eleman modellerine ait modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri	75
Tablo 6. Deriner Barajının güncellenmiş sonlu eleman modellerine ait frekans değerlerinin deneysel olarak elde edilen frekans değerlerine göre hata oranları	76
Tablo 7. Deriner Barajının deneysel ve rezervuarın boş olması durumu için elde edilen sonlu eleman modellerine ait edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	76
Tablo 8. Deriner Barajının Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan modellerinin statik analizi sonucu elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri.....	85
Tablo 9. Deriner Barajının Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan modellerinin dinamik analizi sonucu elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri.....	93
Tablo 10. Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumu için 26/09/2022 tarihinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testinden elde edilen frekans değerleri	100
Tablo 11. Yusufeli Barajının çevresel titreşim testi sonucu elde edilen frekans değerleri	106
Tablo 12. Yusufeli Baraj rezervuarının farklı su seviyelerine ait elde edilen frekansların rezervuarın boş olması durumuna göre değişim yüzdeleri	108
Tablo 13. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için kullanılan malzeme ve eleman özellikleri.....	123
Tablo 14. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için deneysel ve sonlu eleman modele ait modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri.....	124
Tablo 15. Yusufeli barajında baraj-rezervuar-temel etkileşimi dikkate alınarak modellenen sonlu eleman modeller için kullanılan malzeme ve eleman özellikleri	125

Tablo 16. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımı ile modellenen sonlu eleman modellerine ait frekans değerleri	126
Tablo 17. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımı ile modellenen sonlu eleman modellerine ait frekans değerleri	126
Tablo 18. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımı ile modellenen sonlu eleman modellerine ait frekans değerleri	126
Tablo 19. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 15m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	127
Tablo 20. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 36m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	128
Tablo 21. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 57m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	128
Tablo 22. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 78m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	129
Tablo 23. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 99m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	130
Tablo 24. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 126m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	130
Tablo 25. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 150m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	131
Tablo 26. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 172m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri	132
Tablo 27. Yusufeli Baraj kretinde farklı rezervuar su yüksekliği durumu için memba-mansap doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri	143
Tablo 28. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri	155
Tablo 29. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa).....	157
Tablo 30. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa).....	158
Tablo 31. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri	169
Tablo 32. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa).....	171
Tablo 33. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa).....	172

Tablo 34. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri	185
Tablo 35. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa).....	187
Tablo 36. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa)	188
Tablo 37. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri	200
Tablo 38. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa)	202
Tablo 39. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa)	203
Tablo 40. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri	215
Tablo 41. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa).....	217
Tablo 42. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa).....	218
Tablo 43. Deriner Barajı'nda rezervuar suyu seviyesinin değişiminin yıllara göre dağılımı.....	237
Tablo 44. Deriner Barajının birinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	252
Tablo 45. Deriner Barajı'nın ikinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	255
Tablo 46. Deriner Barajının üçüncü modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	257
Tablo 47. Deriner Barajının üçüncü modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	259
Tablo 48. Yusufeli Barajının birinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	263
Tablo 49. Yusufeli Barajının ikinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	266

Tablo 50. Yusufeli Barajı'nın üçüncü modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	268
Tablo 51. Yusufeli Barajının dördüncü modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	270
Tablo 52. Yusufeli Barajının beşinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	273
Tablo 53. Yusufeli Barajının altıncı modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları.....	275



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

m	: Tekil kütle
w_s	: Suyun birim hacim ağırlığı
g	: Yer çekimi ivmesi
z_s	: Su yüzeyinden itibaren derinlik
m_s	: Kütle matrisi
c_s	: Sönüm matrisi
k_s	: Rijitlik matrisi
$\ddot{U}$	: İvme vektörü
$\dot{U}$	: Hız vektörü
U	: Yer değiştirme vektörü
m_f	: Yüzey dalgalarının etkisinin ihmal edildiği sıvı kütlesi
c_f	: Sıvı sönümü
k_f	: Sıvı rijitliği
$[R]$	: Sıvı-yapı arayüzeyi matrisi
$\{\ddot{u}\}$	: Sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı ivmesi
F_f	: Sıvı tabanındaki yer ivmelerinden kaynaklı yük vektörü
$\{P\}$	: Hidrodinamik basınç vektörü
$\{\dot{P}\}$	: Vektörün zamana göre bir kez kısmı türevi
$\{\ddot{P}\}$	: Vektörün zamana göre iki kez kısmı türevi
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	: Sırasıyla x, y ve z doğrultularındaki şekil değiştirme bileşenleri
Δ	: Değişim operatörü
$U_{t+\Delta t}$	: $t + 1$ anındaki yer değiştirme vektörü
$\dot{U}_{t+\Delta t}$	: $t + 1$ anındaki hız vektörü
$\ddot{U}_{t+\Delta t}$	: $t + 1$ anındaki ivme vektörü
β ve γ	: İntegrasyon parametreleri
π_e	: Sıvının toplam şekil değiştirme enerjisi
R	: Dış yük vektörü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsanlık tarihi, suyun yaşamsal önemi etrafında şekillenmiştir. Bu hayati kaynak, medeniyetlerin doğuşundan itibaren toplumların gelişiminde merkezi bir rol oynamıştır. Su, sadece yaşamın sürdürülmesi için değil, aynı zamanda tarım, sanayi, enerji üretimi ve günlük yaşamın pek çok yönü için de vazgeçilmezdir. Bu bağlamda, su kaynaklarının yönetimi ve kullanımı, tarih boyunca insan topluluklarının öncelikleri arasında yer almıştır. İlk yerleşim yerlerinin nehir kenarlarında kurulması, suyun bu topluluklar için ne kadar hayati olduğunun bir göstergesidir. Tarımın başlamasıyla birlikte, insanlar suyun kontrolünü ve yönetimini öğrenmeye başlamışlardır. Su kaynaklarına erişim, sulama sistemlerinin geliştirilmesi ve suyun depolanması, bu dönemin temel mühendislik sorunlarından bazılarıydı.

Barajların tarihi, insanlığın suyu kontrol etme ve yönlendirme çabalarının bir yansımasıdır. İlk barajlar, tarım arazilerini sulamak ve yerleşim yerlerini su taşkınlarından korumak amacıyla inşa edilmiştir. Arkeolojik keşifler ve tarih öncesi mühendislik çalışmaları, baraj inşasının insanlık tarihinin çok erken dönemlerine dayandığını göstermektedir. Ürdün'deki Jawa Barajı, M.Ö. 3000 yıllarında inşa edildiği bilinen en eski baraj olarak kayıtlara geçmiştir. Antik Mısır'da, Nil Nehri'nin kuzey kıyısında M.Ö. 2650 yılında inşa edilen Sadd el-Kafara Barajı (Kafir Barajı), Anadolu topraklarında Hititlerin mühendislik becerilerinin bir göstergesi olarak hala aktif olan ve yaklaşık 3200 yıl öncesine dayanan Hitit Barajı (Alaca Höyük), suyun kontrolü ve yönetimi konusundaki insan çabalarının ne kadar eskiye dayandığının bir kanıtıdır (Üzen & Çetin, 2012). Bu yapılar, suyun depolanması ve yönetilmesi konusunda önemli bir dönüm noktası oluşturmuş, böylece insanların doğal su döngüsüne müdahale etme kapasiteleri artmıştır. Barajların tarihindeki bu evrimsel yolculuk, insanlık için suyun değerinin artmasına ve su kaynaklarının daha etkin kullanılmasına yol açmıştır.

Zaman içinde, barajların tasarımı ve işlevselliği büyük ölçüde gelişmiştir. Orta Çağ'da, Avrupa'da su gücünün kullanımı artmış ve bu, baraj inşaatının yaygınlaşmasına yol açmıştır. Özellikle, 13. yüzyılda Moğollar tarafından keşfedilen kemer barajı, daha az malzeme ile çok daha güçlü barajlar inşa etmeyi mümkün kılmıştır (Matthew, 2005). Baraj inşaatı teknolojisinin 20. yüzyılın başlarında evrim geçirmesi ile, barajlar daha karmaşık yapılar

haline gelmiş ve hidroelektrik enerji üretimi için önemli bir kaynak olarak görülmeye başlanmıştır. Beton ve çelik gibi malzemelerin kullanımı, daha büyük ve daha güçlü barajların inşasını mümkün kılmıştır. Bu dönemde inşa edilen Hoover Barajı ve Aswan Barajı gibi yapılar, mühendislik alanında önemli kilometre taşları olarak kabul edilir (Novokshchenov, 1997; Scott ve Molyneux, 2001; Giroux, 2010).

Coğrafi konum, jeolojik koşullar, suyun kullanım amacı ve çevresel etkiler gibi bazı faktörler inşa edilecek barajın tipini ve tasarımını belirlemektedir. Barajlar, gövde tiplerine göre dolgu ve beton barajlar olarak ikiye ayrılabilir. Dolgu barajlar, toprak ve kaya dolgu barajlar olarak; beton barajlar ise ağırlık, kemer, payandalı ve silindire sıkıştırılmış beton barajlar olarak sınıflandırılabilirler. Her bir baraj tipi, belirli jeolojik ve çevresel şartlara özgü avantajlar sunmaktadır.

Kemer barajlar, eğrilikli tasarımları ile betonun dayanımını etkin şekilde kullanan su tutma yapılarıdır. Bu barajların temel çalışma mantığı, suyun yarattığı hidrostatik basıncı kavisli yapısı aracılığıyla yamaçlara ve temele aktarmaktır. Bu nedenle barajın konumlanacağı temel ve yamaçların taşıma gücü yüksek olmalıdır (Gedik, 2013). Bu özellikler, kemer barajların özellikle dar ve sarp vadilerde tercih edilmesi ile bu coğrafi koşullarda diğer baraj tiplerine göre daha etkili ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Dar vadinin bir sayısal kıstası olarak Öziş (1993) tarafından yapılan çalışmada, kemer barajların kret uzunluğu baraj yüksekliğinin en fazla 6-10 katı olacak şekilde tasarıma izin veren vadilere inşa edilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Tek ve çift eğrilige sahip kemer barajlarda, planda eğrilige sahip barajlar tek eğrilikli, hem planda hem de düşey kesit boyunca eğrilige sahip barajlar ise çift eğrilikli olarak isimlendirilmektedir.

Günümüzde, barajların rolü yalnızca su depolama ve enerji üretimi ile sınırlı değildir; aynı zamanda rekreasyonel kullanım, su sporları ve vahşi yaşamın korunması gibi çeşitli amaçlara da hizmet etmektedir. Bununla birlikte, barajların çevresel etkileri ve sosyal sonuçları da yoğun bir şekilde tartışılmaktadır. Bu tartışmalar, barajların tasarımı ve işletilmesinde sürdürülebilirlik ve çevre koruma önlemlerinin entegrasyonunu zorunlu kılmıştır. Özellikle bu denli büyük su hacmi depolayan yapıların hasar alması durumunda işlevselliğini kaybederek devlet ekonomisine zarar verebileceği, ayrıca daha büyük hasar oluşması durumunda barajın yıkılması ile çok sayıda canlının hayatını kaybetmesine neden olabileceği göz önüne alındığında, bu yapıların tasarım ve projelendirme aşamasında statik ve dinamik davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesinin son derece önemli bir konu olduğu anlaşılmaktadır.

Kemer barajlar ve diğer tüm yapıların mevcut yapısal durumunu ifade eden doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları dinamik karakteristik olarak adlandırılmakta olup, statik ve dinamik etkilerin belirlenmesinde doğrudan etkilidir. Bu gibi yapıların dinamik karakteristikleri sayısal ve deneysel yöntemlerle belirlenebilmektedir. Sayısal yöntemlerde gelişen bilgisayar teknolojisi ile yapının dinamik karakteristikleri, sonlu eleman modelleme yaklaşımına göre iki-üç boyutlu modeli oluşturulan yapının malzeme özellikleri ve sınır koşulları tanımlanıp, serbest titreşim analizi uygulanması sonucu belirlenebilmektedir. Bu yöntemle göre yapıların sayısal dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi aşamasında bazı kabuller ve idealleştirmelerin yapılması, işçilik hataları, malzeme kusurları, mevsimsel değişikliklerin oluşturduğu etkiler vb. gibi inşaa sürecindeki belirsizliklerin oluşturduğu kusurlar yapıların inşaa edilmiş mevcut durumlarına ait dinamik koşulları tam olarak yansıtamayabilir (Miglietta, 1995). Bu nedenle, yapıların gerçek zamanlı durumlarını doğru bir şekilde yansıtan deneysel yöntemlere başvurmak gerekmektedir. Deneysel yöntemler, yapıları doğrudan etkileyen faktörleri dikkate alarak, sayısal yöntemlerle elde edilen verilerin doğruluğunu test eder ve gerçekçi bir yapısal değerlendirme sağlar.

Günümüzde, yapılarda dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için kullanılan Deneysel Modal Analiz Yöntemi, yapıların doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını yapının çeşitli noktalarına yerleştirilen hassas ivmeölçerler aracılığıyla belirlemektedir. İvmeölçerler aracılığı ile toplanan titreşim sinyalleri hem yapıdan hem de çevreden gelen sinyalleri içerdiğinden, filtreleme teknikleri kullanılarak ayrıştırılır ve yapıya ait sinyaller işlenerek yapıların deneysel dinamik karakteristikleri belirlenir (Freyman vd., 1996). Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi olarak iki alt yöntemden oluşan Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nde, Çevresel Titreşim Yöntemi yapının doğal etkiler altında titreşimine bağlı olarak elde edilen davranışı olup, yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Zorlanmış Titreşim Yönteminde ise yapının değeri bilinen belirli bir etki ile titreştirilmesi sonucu elde edilen davranışı dikkate alınır.

Yapıların dinamik karakteristiklerinin analizi, yapısal mühendislikte sürekli bir uyum ve gelişim sürecidir. Bu süreç hem sayısal modellerin geliştirilmesi hem de gerçek yapı koşullarında elde edilen deneysel verilerin entegrasyonunu gerektirir. Bu ikili yaklaşım, yapıların deprem gibi ekstrem durumlarda nasıl davranacaklarına dair daha doğru tahminler yapılmasını sağlayarak bu yapıların uzun vadeli güvenliğini ve işlevselliğini artırmaktadır. Bu entegrasyon işlemi bazı kabuller ve idealleştirmeler sonucu ortaya çıkan sonlu eleman model ve analizinin sonuçlarında meydana gelen farklılıkların/sapmaların minimuma

indirgenmesini sağlayarak gerçek yapıyı temsil eden en yakın sayısal modelin elde edilmesine olanak tanır. Sonlu eleman modelden elde edilen sayısal veriler ile deneysel veriler arasında oluşabilecek farklılıkların/sapmaların minimuma indirgenmesi işlemleri modelde belirli kısıtlar altında iyileştirmeler yapılması ile sağlanır. Modele ait sınır koşullar ve malzeme özellikleri iyileştirme yapılması aşamasında en çok kullanılan parametrelerdir. İyileştirme işlemi ile yapıyı temsil eden modelin elde edilmesi Sonlu Eleman Model Güncelleme olarak tanımlanmaktadır. Son yıllarda literatürde yeni bir kavram olarak ortaya çıkan Dijital İkiz (Digital Twin) oluşturmada amaç yapıyı temsil eden ikiz sayısal modelinin elde edilmesidir. Sonlu Eleman Model Güncellemede deneme yanılma yöntemi veya optimizasyona dayalı algoritmalar kullanılarak model iyileştirmesi/güncellemesi yapılabilmektedir.

Barajlar ve diğer önemli mühendislik yapılarının yapısal performanslarının değerlendirilmesi, mühendislik ve güvenlik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu değerlendirme süreci, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen dinamik karakteristiklerin belirlenmesi ve doğrulanması üzerine kuruludur. Doğrulanmış sonlu eleman model ile yapının statik ve dinamik yüklemeler altındaki davranışı belirlenebilmektedir. Statik analiz, yapıya uygulanan sabit yüklerin etkilerini incelerken, dinamik analiz, deprem, rüzgar gibi zamanla değişen yüklemelerin etkisini değerlendirir. Bu analizler, yapısal elemanlara ait yer değiştirme ve gerilme değerlerini elde edebilmeye, potansiyel zayıf bölgelerin ve genel yapısal güvenliğin tespit edilebilmesine olanak sağlar.

Mevcut ve işletme sürecindeki bir yapının yapısal güvenliğinin sürekli olarak tespiti amacıyla uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme Yöntemi (YSİ) kullanılmaktadır. Yapılarda uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme, sadece mühendislik açısından değil, aynı zamanda kamu güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu tür yapıların sürekli izlenmesi, potansiyel yapısal problemlerin erken tespit edilmesini, etkin risk yönetimini ve uzun vadeli yapısal bütünlüğün korunmasını sağlamaktadır. Özellikle kemer barajlar, genellikle karmaşık ve değişken çevresel koşullar altındaki büyük ölçekli yapılar olarak sürekli su basıncı, hidrolojik değişimler, sismik aktiviteler ve atmosferik koşullar gibi etkenlere maruz kalmaktadır. Bu etkenlerin uzun vadede yapı üzerinde oluşturduğu zorlanma, yapısal hasarlara ve hatta beklenmedik yıkımlara yol açabilmektedir. Uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme, gelişmiş sensör teknolojileri ve veri analizi yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu sistemler, yapısal hareketler, çatlaklar, sızıntılar ve diğer potansiyel problemleri sürekli olarak takip ederek elde edilen veriler, yapısal

bütünlüğün sürekli olarak değerlendirilmesine ve olası risklerin önceden tespit edilmesine olanak tanır. Kemer barajlar gibi kritik mühendislik yapılarının uzun süreli Yapı Sağlığının İzlenmesi, bu yapıların güvenli, etkin ve sürdürülebilir bir şekilde işletme sürecine devam edebilmesini sağlamak için hayati bir unsurdur. Bu izleme, yapısal bütünlüğün korunmasının yanı sıra, çevresel ve toplumsal güvenliğin de teminatıdır.

1.2. Kemer Barajlarla İlgili Literatür Çalışmaları

Gelişen bilgisayar teknolojisi ile sonlu eleman yöntemi kullanılarak kemer barajlarla ilgili yapılan sayısal çalışmalar oldukça fazla olmasına rağmen çok fazla zaman, ekip ve maliyet gerektiren deneysel çalışmalar daha az sayıdadır. Bu kısımda kemer barajların dinamik karakteristiklerini, deprem performansını belirleme ve yapısal durumunun sürekli izlenmesi amacıyla yürütülen Yapı Sağlığı İzleme ile ilgili güncel çalışmalara öncelikli olarak yer verilmektedir.

1.2.1. Sayısal Çalışmalar

Kemer barajların dinamik karakteristiklerini ve davranışını belirleyebilmek adına geçmiş yıllarda yapılan çalışmaların, günümüzde barajlarla ilgili yapılan tüm gelişmiş çalışmalara ışık tuttuğu yadsınamaz bir gerçektir (Hall & Chopra, 1980; Hall & Chopra 1983; Elkhodary, 1984; Fok & Chopra, 1985; Fok & Chopra, 1986; Dowling, 1988; Debessay, 1989; Dominguez & Maeso, 1993a; Dominguez & Maeso, 1993b; Maeso & Dominguez, 1993; USACE, 1994; Noruziaan, 1995; Tan, 1995; Tan & Chopra, 1995; Tan & Chopra, 1996; Hall, 1996; Feng vd., 1996; Lan & Yang, 1997a; Lang & Yang, 1997b; Silva & Julio, 1997; Kottenstette, 1997; Chanson & James, 1998; Hall, 1998; Ohmachi & Jalali, 1999; Malla & Wieland, 1999; Szczesiaka vd., 1999; Valliappan vd., 1999; Li vd., 2000; Tzenkov, 2001; Akköse ve Dumanoglu, 2003; Goodman vd., 2003; Chen vd., 2003; Mironov ve Pahl, 2004; Sultanbekov, 2005).

Camara (2000) tarafından geliştirilen bir yöntem, kemer baraj-rezervuar-temel sistemlerinin sismik tepkilerini anlamak için önemli bir araçtır. Bu metodoloji, baraj gövdesi sonlu elemanlar kullanılarak, rezervuar ve temel ise sınır elemanlar kullanılarak modellenmesine dayanmaktadır. Bu yöntemin pratikteki etkinliğini göstermek için Pacoima Barajı üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, 1971 San Fernando depreminin baraj

üzerindeki etkileri incelenmiş ve dinamik analiz sonucunda barajda herhangi bir çatlak veya hasar meydana gelmediği tespit edilmiştir.

Nasserzare vd. (2000) tarafından, kemer baraj-rezervuar-temel sistemleri için doğal frekansları ve titreşim modlarını tespit etmek amacıyla özgün bir metod geliştirilmiştir. Bu yeni yöntemin doğruluğunu test etmek üzere, öncelikle daha küçük ölçekli yapıların üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonuçları, bulunan doğal frekanslar ve mod şekillerinin mevcut literatürle uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, bu yeni metodun etkinliğini ve güvenilirliğini kanıtlar nitelikte olup, kemer barajlarının yapısal analizleri için önemli bir adımı temsil etmektedir.

Ahmadi vd. (2001) tarafından, kemer baraj-rezervuar sistemlerini analiz etmek için yeni bir lineer olmayan sonlu eleman modeli sunulmuştur. Kesme ve çekme davranışlarını içeren bu eleman modeli, özellikle kesme davranışı içermeyen durumlarda üstün sonuçlar sağlamaktadır. Araştırmacılar, bu yenilikçi modelin, özellikle deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerdeki kemer baraj projelerinde efektif bir şekilde kullanılabileceğini belirtmektedirler.

Lotfi ve Espandar (2002)'in yürüttüğü araştırma kapsamında, kemer barajlarda lineer olmayan deprem davranışı sırasında büzülme derz etkileri derinlemesine incelenmiştir. Bu analiz için özel bir sonlu eleman yazılımı geliştirilmiş ve bu yazılım aracılığıyla ince bir kemer baraj modelinin dinamik davranışları değerlendirilmiştir. Araştırma, farklı özelliklerdeki büzülme derzlerini içeren baraj modellerinin lineer olmayan dinamik analizlerine odaklanmıştır. Elde edilen maksimum çekme gerilmelerinin dağılımı, bağlantı noktalarının tanımlanmasında kullanılan parametrelerin uygunluğunu ortaya koymaktadır.

Akköse vd., (2004), kemer barajların karmaşık dinamik davranışlarını daha iyi anlamak için kapsamlı bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, baraj-rezervuar, baraj-temel ve baraj-rezervuar-temel etkileşimlerini içeren çeşitli senaryolar için detaylı sonlu eleman modelleri geliştirilerek hem lineer hem de lineer olmayan dinamik analizler yapmak için 1940 El Centro depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Çalışma, baraj yapısının yanı sıra, suyun dinamikleri ve zemin etkileşimlerinin de sismik performans üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Karaton (2004) tarafından hazırlanan çalışmada, Tip-5 kemer barajının deprem sırasında maruz kalabileceği hasarlar ve bu hasarların davranışları analiz edilmiştir. Bu analizde, baraj ve rezervuar arasındaki etkileşim özellikle dikkate alınmıştır. Çalışma, barajın hem boş hem de su ile dolu olduğu senaryolar için lineer ve lineer olmayan analizler

içermektedir. Sismik etkilerin değerlendirilmesinde, 1967 Koyna ve 1992 Erzincan depremlerine ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu çalışmada, sismik etkilere bağlı olarak kemer barajların hasar görebileceği bölgeler belirlenmiştir. Analiz sonuçları, hasarların özellikle barajın tabanı, yamaçları ve krete yakın bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu çalışma, kemer barajların deprem sırasında nasıl tepki verdiğini anlamada ve potansiyel zayıf noktaları tanımlamada kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür analizler, mühendislik uygulamalarında, özellikle sismik riskin yüksek olduğu bölgelerde, baraj güvenliği ve dayanıklılığının artırılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Mirzabozorg ve Ghaemian (2005), kemer barajların üç boyutlu lineer olmayan dinamik davranışını yayılı çatlak yaklaşımı ile, Alves ve Hall (2006a), Pacoima Kemer Barajı'nın sismik davranışını üniform ve üniform olmayan yer hareketleri ile, Sheibany ve Ghaemian (2006), İran'daki Karaj Kemer Barajı'nın inşası sırasında sıcaklık değişimlerinin baraj davranışına etkisini sonlu eleman yöntemi ile incelemişlerdir.

Sevim vd., (2006) tarafından yapılan araştırma tek ve çift eğrilikli kemer barajların dinamik davranışa olan etkisini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Bu çalışma, 1968'de İngiltere'de gerçekleştirilen "Kemer Barajlar" sempozyumunda tanıtılan, beş farklı geometriye sahip kemer barajların sonlu eleman modelleri SAP2000 programında oluşturularak dinamik analizleri gerçekleştirmiştir. Baraj-rezervuar etkileşimi Westergaard yaklaşımı ile sağlanmış olup, 1940 El-Centro depremi kullanılarak dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçları, çift eğrilikli kemer barajların, tek eğrilikli olanlara göre deprem yüklerine karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, çift eğrilikli barajların üzerlerine gelen yükleri yamaçlara daha verimli bir şekilde aktarabildiğini ve böylece geometrik açıdan çift eğriliğe sahip barajların, sismik yüklemelere karşı en uygun baraj tipi olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışma, kemer barajların tasarımında geometrinin önemini ve farklı geometrilerin sismik performans üzerindeki etkilerini vurgulayan önemli bir katkı olarak değerlendirilebilir ve mühendisler için gelecekteki baraj tasarımlarını şekillendirmede yol gösterici olabilir.

Akköse vd. (2007) tarafından, Tip-5 kemer barajının sismik davranışını detaylı bir şekilde incelemek için bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada, Lagrange yaklaşımı kullanılarak baraj-rezervuar etkileşimini dikkate alan bir model oluşturulmuş ve Wilson-θ yöntemiyle barajın elasto-plastik deprem davranışları analiz edilmiştir. Elasto-plastik malzeme modellemesinde, Drucker-Prager yaklaşımı tercih edilmiştir. Araştırmada, Tip-5 kemer barajının hem boş hem de dolu olduğu durumlar için hem lineer hem de elasto-plastik

dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve bu iki durumun sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, barajın sismik davranışlarının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca bu çalışma ile kemer barajların sismik analizine yönelik gelişmiş metodolojilerin ve malzeme modellerinin kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Akköse vd. (2008) tarafından yürütülen araştırmada, kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışları üzerinde rezervuar su seviyesi değişiminin etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, Tip-5 kemer barajının beş farklı su seviyesi için üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve 1940 Imperial Valley depremi altında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sırasında baraj-rezervuar etkileşimi Lagrange yaklaşımıyla, lineer olmayan malzeme davranışı ise Drucker-Prager yaklaşımıyla modellenmiştir. Bu çalışmanın bulguları, rezervuardaki su seviyesinin yükselmesiyle kemer barajlar üzerindeki yer değiştirmelerin ve gerilmelerin artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışlarının belirlenmesinde, rezervuardaki su seviyesinin önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, baraj mühendisliğinde rezervuar su seviyesinin barajın sismik performansı üzerindeki etkilerini dikkate almanın önemini vurgulayan önemli bir çalışma olarak değerlendirilmektedir. Bu tür bilgiler, özellikle deprem riski yüksek bölgelerde baraj tasarımı ve güvenlik değerlendirmeleri için hayati öneme sahiptir.

Long vd. (2008) tarafından, Çin'de bulunan çift eğrilikli Dagangshan Kemer Barajı üzerinde önemli bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada, 210 metre yüksekliğe ve 622 metre kret uzunluğuna sahip baraj-rezervuar-temel etkileşimli barajın lineer olmayan dinamik davranışları iki ayrı sonlu eleman modeli kullanılarak incelenmiştir. İlk modelde, barajın gövde kısmı sadece beton olarak modellenirken, ikinci modelde, baraj gövdesi betonun yanı sıra hem memba hem de mansap yüzeyini kaplayan betonarme çeliğin özelliklerine sahip ince membran elemanlarla tasarlanmıştır. Yapılan modal analizde her iki modelin frekans değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ancak, dinamik analiz sonuçlarına göre, çelik hasırla kaplı modelde depremden kaynaklanan yer değiştirme ve gerilmelerde önemli derecede azalmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, kemer barajların tasarımında farklı malzeme kombinasyonlarının sismik etkiler üzerindeki önemli etkilerini ortaya koyarak, baraj mühendisliği ve sismik güvenlik alanlarına önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu çalışma özellikle büyük ölçekli baraj projelerinde, yapısal elemanların seçiminin ve tasarımının, sismik performans üzerindeki etkilerini anlamada yeni bir perspektif sunmaktadır.

Zhong vd. (2009) tarafından, Çin'de bulunan ve 296 metre yüksekliğiyle dikkat çeken çift eğrilikli kemer baraj üzerinde önemli bir araştırma yürütülmüştür. Bu çalışma da, betonun davranışı Mohr-Coulomb kriteri ile baraj-rezervuar etkileşimi ise Westergaard yaklaşımı kullanılarak modellenmiş barajın lineer olmayan deprem davranışlarını incelemeye odaklanılmıştır. Dinamik analiz sürecinde maksimum değeri 0.408 g olan bir deprem kaydı kullanılmıştır. Bu çalışmada, barajda meydana gelen ilk çatlakların genellikle kretin orta noktasında oluştuğu ve zamanla yamaçlar ile orta bölgelere doğru yayıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, kemer barajların deprem sırasında hasar dağılımının anlaşılmasında kritik öneme sahiptir ve mühendislik uygulamalarında barajların tasarım ve güvenliğinin belirlenmesi açısından katkılar sağlamaktadır.

Wen vd. (2009) tarafından, Çin'deki Dagangshan Kemer Barajı'nın lineer olmayan davranışları kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analiz, sonlu eleman yöntemi kullanılarak oluşturulan özel bir beton hasar modeli, bağlantı noktaları modeli ve iki farklı deprem etki modeli üzerine kurulmuştur. Deprem modelleri olarak, kütsüz ve vizkoz-yay sınır modelleri tercih edilmiştir. Analiz sonuçları, kütsüz modelde %5 sönüm oranı kullanıldığında elde edilen yer değiştirme, bağlantı noktalarındaki açılma miktarları ve hasar seviyelerinin, aynı sönüm oranıyla oluşturulan vizkoz-yay sınır modelinden elde edilenlere göre daha büyük olduğunu göstermektedir. Ancak, %15-20 gibi daha yüksek sönüm oranlarına sahip kütsüz temel modellerin, %5 sönüm oranlı vizkoz-yay sınır modeline yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kemer barajların lineer olmayan davranışlarının belirlenmesinde viskoz-yay sınır modelinin daha uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, baraj mühendisliği ve sismik risk değerlendirmeleri alanında, deprem etkilerini modellemek için farklı yaklaşımların önemini vurgulayan ve bu alandaki anlayışı derinleştiren önemli bir çalışma olarak değerlendirilebilir.

Hariri Ardebili ve Mirzabozorg (2011, 2012a, 2012b) tarafından yapılan bir dizi çalışmada kemer barajların dinamik analizlerini gerçekleştirmek hususunda farklı özelliklere odaklanarak bu özelliklerin etkinliğini incelemek amaçlanmıştır. 2011 yılında yapılan çalışmada baraj rezervuarının yüzey dalgalanmasını, 2012a yakın fay deprem kayıtlarının etkisini, 2012b ise lineer olmayan malzeme davranışını ve düşey büzülme derzlerinin kemer barajların sismik performansa etkilerini irdeleyen değerli çalışmalardır.

Wang vd. (2012) tarafından yapılan çalışma, kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin lineer olmayan analizini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Bu çalışmada geliştirilen model, baraj-rezervuar ve baraj-temel arasındaki dinamik etkileşimleri, ayrıca

düşey büzülme derzlerinin açılıp kapanmasını, yarı-sonsuz temel kayasının yayılma sönüm özelliklerini, suyun sıkışabilirliğini ve yarı-sonsuz rezervuarın sönümünü içermektedir. Bu parametreler, barajın sismik davranışını anlamak için kritik öneme sahiptir. Çalışmada ayrıca, yüzey deprem kayıtlarının modelleme sürecine entegrasyonu için yeni bir eşdeğer yük şeması önerilmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım, deprem etkilerinin baraj üzerindeki etkisini daha doğru bir şekilde yansıtabilmek için tasarlanmıştır. Bu çalışma, sismik risk altındaki barajların analizi ve tasarımı konusunda derinlemesine bir anlayış sunarak, baraj mühendisliği ve güvenlik değerlendirmeleri alanlarında katkı sağlamakta olup, sismik analizlerde kullanılan geleneksel yaklaşımları genişleten ve barajların sismik performansını daha iyi anlamak için gelişmiş bir araç olarak değerlendirilebilir.

Chen vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen araştırma, kemer barajların deprem davranışları üzerinde sönüm oranının etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Bu çalışmada, rezervuarın etkisi, Westergaard eklenmiş kütle yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir, bu yöntem rezervuarın barajın dinamik tepkisine olan katkısını dikkate almaktadır. Araştırma temel kayasının farklı sönüm oranlarına sahip olabileceği üç farklı senaryo için ele alınmıştır. İlk senaryoda, temel kayası %5 sönümlü ve kütsüz olarak modellenmiştir; ikinci senaryoda, %10 sönümlü kütsüz bir model tercih edilmiştir; üçüncü ve son senaryoda ise, %5 sönümlü, kütleli ve sonsuz sınır şartlarına sahip bir model kullanılmıştır. Her bir model analiz edilerek kemer barajların sismik analizinde, temel kayasının sönüm özelliklerinin ve rezervuar etkileşiminin önemi ortaya koyulmuştur. Bu analizler, baraj tasarımı ve güvenlik değerlendirmelerinde, özellikle sismik riskin yüksek olduğu alanlarda, sönüm oranının ve rezervuar dinamiklerinin dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Tarinejad vd. (2013) ve Akbari vd. (2013) tarafından yapılan çalışmalar, kemer barajların deprem davranışlarında değişerek yayılan yer hareketi etkisini temel almaktadır, ancak her iki grup bu verileri farklı yöntemlerle elde etmektedir. Tarinejad vd. (2013)'nin yaklaşımı, sismik dalga saçılma analizleri yoluyla değişerek yayılan yer hareketi kayıtlarını elde etmeye dayanmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen yer değiştirme değerlerinin, kaydedilen yer hareketlerinden elde edilen yer değiştirme değerlerine yakın olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, sismik dalga saçılma analizlerinin, deprem sırasında barajların nasıl tepki vereceğini anlamada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Akbari vd. (2013) değişerek yayılan yer hareketi kayıtlarını Monte-Carlo Simülasyon tekniği kullanarak elde etmektedir. Yapılan analizler, değişerek yayılan yer

hareketlerinin baraj gövdesindeki gerilme değerlerini artırdığını ortaya koymaktadır. Bu durum, değişen yer hareketlerinin barajın yapısal bütünlüğü üzerindeki potansiyel etkilerini vurgulayarak, mühendislik tasarımlarında bu tür dinamik etkilerin dikkate alınmasının önemini göstermektedir.

Hariri Ardebili vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sismik güvenliği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu çalışmada, dört farklı su seviyesinde barajların sismik güvenilirliğini değerlendirmek için lineer analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, su seviyesi değişiminin barajın sismik davranışlarına ve buna bağlı olarak güvenilirlik seviyelerine nasıl etki ettiğini anlamaya odaklanılmıştır. Su seviyesi değişiminin, barajın sismik davranışları üzerindeki etkilerini anlamak, barajların tasarımı ve işletilmesi sırasında alınacak önlemler için kritik bilgiler sağlamaktadır. Bu tür analizler, baraj güvenliğinin artırılması ve risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Hariri Ardebili ve Kianoush (2014) tarafından yürütülen araştırma, yüksek kemer barajların sismik davranışlarını detaylı bir şekilde ele almaktadır. Bu çalışmada, barajların sismik tepkilerini anlamak için kapsamlı bir sonlu elemanlar modeli kullanılmış ve bu model, barajların tüm lineer olmayan davranışlarını içerecek şekilde tasarlanmıştır. Önemli bir adım olarak, deprem analizlerine başlamadan önce, bu modelin hem statik hem de termal açıdan kalibre işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kalibrasyon süreci, modelin gerçekçiliğini ve doğruluğunu artırmak için kritik öneme sahiptir. Araştırmanın analiz sonuçları, sonlu elemanlar modeline entegre edilen lineer olmayan etkilerin barajın sismik davranışları üzerindeki önemini vurgulamaktadır. Bu bulgular, yüksek kemer barajların sismik analizlerinde, lineer olmayan etkileşimlerin ve davranışların dikkate alınmasının ne kadar hayati öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Hariri-Ardebili ve Kianoush (2015)'un çalışmasında, kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sismik davranışları incelenirken, özellikle açılmış düşey derzler arasında meydana gelen basınç etkilerini dikkate alan bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu çalışmada, sismik analizler için suni olarak üretilen deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu yöntem, gerçekçi deprem senaryolarını simüle etmek ve barajların bu senaryolara tepkilerini anlamak için oldukça etkili bir araçtır. Araştırmada, açılmış düşey derzlerdeki basınç etkisinin sismik davranışlar üzerindeki rolüne odaklanılması, kemer barajlarının sismik güvenliğini değerlendirirken genellikle göz ardı edilen bir faktörü ön plana çıkarmaktadır. Bu etki, barajın yapısal bütünlüğü ve sismik dayanıklılığı üzerinde önemli bir rol

oynamaktadır. Bu çalışma, baraj mühendisliği alanında, özellikle sismik risk değerlendirmeleri ve güvenlik tasarımlarında, yeni bir bakış açısı ve metodoloji sunarak önemli bir katkı sağlamaktadır.

Hariri Ardebili vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sismik etkiler altında kademeli olarak nasıl hasar gördüğünü belirlemeye yönelik yenilikçi bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, barajların dinamik performansını değerlendirmek için sonlu elemanlar modeli kullanılmış ve bu model üzerinde lineer olmayan analizler yapılmıştır. Araştırmada, kemer barajların sismik hasar seviyelerini belirlemek için düşey derz hasarı, lokal malzeme hasarları, genel hasar, en üst düzey hasar olmak üzere dört ayrı limit durumu dikkate alınmaktadır. Bu limit durumlar, barajların sismik etkilere karşı ne zaman ve nasıl hasar göreceğini anlamak için önemli bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmada, iki farklı kemer baraj üzerinde gerçekleştirilen analizler, zaman-tanım alanında yapılan lineer olmayan analizlerle karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma, geliştirilen metodolojinin ve analiz sonuçlarının makul ve tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu araştırma, kemer barajların sismik güvenliğini değerlendirmede kullanılan yöntemlerin ve analizlerin geliştirilmesine katkıda bulunmuş olup, sismik risk altındaki barajların daha etkili bir şekilde değerlendirilmesi ve tasarlanması için önemli bir adım oluşturmaktadır.

Omidi ve Lotfi (2017) tarafından, baraj-rezervuar etkileşimli analizlerde sıkça kullanılan Euler yaklaşımı için, simetrik olmayan matrislerin çözümünde uygulanabilecek yeni ve daha etkin bir simetrik yöntem geliştirilmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım, özellikle kemer barajların dinamik analizlerinde zaman tasarrufu sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu çalışma, kemer barajların dinamik analizlerinde karşılaşılan zorlukları ele alarak, analiz süreçlerini daha verimli ve hızlı hale getirmeyi hedeflemektedir. Önerilen yeni simetrik yöntem, Euler yaklaşımının geleneksel uygulamalarında ortaya çıkan simetrik olmayan matris problemlerine alternatif bir çözüm sunarak, analiz süreçlerini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bu çalışma, sıvı-yapı etkileşim analizlerinde daha etkili yöntemlerin geliştirilmesine yönelik önemli bir adımı temsil ettiği düşünülmektedir.

Wang vd. (2018a) tarafından yapılan çalışmada, yüksek kemer barajların, değişerek yayılan yer hareketlerinin etkilerine odaklanılmıştır. Bu analizde, Tsinghua Üniversitesi tarafından geliştirilen kapsamlı bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem, yarı-sınırlı kanyonların ısıma sönümü, baraj-rezervuar etkileşimi, büzülme derzlerinin açılıp kapanma hareketleri, betonun sismik çatlak hasarı ve temel kayasının lineer olmayan davranışını

içermektedir. Bu çok yönlü yaklaşım, kemer barajların sismik etkilere karşı tepkilerini daha detaylı bir şekilde anlamaya olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, özellikle Pacoima kemer barajının üç boyutlu modeli üzerinde yoğunlaşmış ve bu model, 1994 Northridge depremi kullanılarak test edilmiştir. Analiz sonuçları, modelde tahmin edilen hasarın, deprem sırasında gerçekte meydana gelen hasar ile büyük ölçüde örtüştüğünü göstermektedir. Bu bulgu, kullanılan metodolojinin ve modellemenin doğruluğunu ve güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir. Yüksek kemer barajların sismik analizi ve tasarımı konusunda önemli bir ilerleme olarak kabul edilen bu çalışma, bu alanda daha sağlam ve güvenli yapıların inşası için yol gösterici bir rol oynamaktadır.

Wang vd. (2018b) tarafından, sismik bölgede yer alan 285,5 m yüksekliğindeki Xiluodu Kemer Barajı'nın sismik performansını belirlemek amacıyla analizler yapılmıştır. Bu bölgede tasarım ivmesinin yatay bileşenlerinin sırasıyla 0,355g ve 0,423g olduğu tahmin edilmekte olduğu belirtilmektedir. Barajın, tasarım depremi sırasında ve sonrasında küçük onarımlarla veya onarımlar olmadan çalışır durumda olması ve şiddetli bir deprem sırasında lokal ve global dayanımını korunması gerekmektedir. Kemer barajdaki gerilmeleri değerlendirmek için sönüm, büzülme derzi ve doğrusal olmayan malzeme göz önünde bulundurularak hem doğrusal elastik dinamik analiz hem de doğrusal olmayan dinamik analiz yapılmıştır. Dinamik analizler sonucu, maksimum basınç gerilmelerinin izin verilen seviyelerden daha az olduğu, sınırın üzerinde çekme gerilmesi olan alanın baraj yüzeyinin %15'inden az olduğu ve büzülme derzlerindeki maksimum açıklıkların 10 mm ile 25 mm arasında değiştiği ifade edilmektedir. Çalışmada bahsi geçen kemer barajın yeterli deprem kapasitesine sahip olduğu ve güvenlik gereksinimlerini karşıladığı belirtilmektedir. Bununla birlikte ekstra önlem olarak baraj tabanında ve baraj yüzeyindeki çekme gerilmesinin yüksek olduğu bölgelerde çelik takviyelerin uygulandığı ifade edilmektedir.

Lambarkia vd. (2018)'ne ait çalışma kapsamında, kemer barajların dinamik özelliklerini ve sismik davranışlarını anlamak adına analizler yapılmıştır. Kemer barajlar genellikle masif beton yapılardan oluşmakta olup, bunların stabilitesi ve güvenliği, betonun çekme davranışı ve çatlaması ile yakından ilgilidir. Barajlar, harçla doldurulmuş büzülme derzleriyle ayrılan dikey monolitler şeklinde inşa edilmekte ve bu derzler, bitişik monolitler arasında sadece sınırlı çekme gerilmeleri aktarabilmektedir. Bu çalışmada, 'Code-Aster' adlı açık kaynak kodlu bir yazılımda kullanılan doğrusal olmayan derzlere ait sayısal modellerin performansı ve güvenilirliği değerlendirilmektedir. Bir deprem sırasında, bu büzülme derzlerinin açılması ve kapanması, sismik girdi enerjisinin dağılmasına neden olmakta ve bu

nedenle, yapısal hasarın yerini belirlemek ve tahmin etmek için Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanı Analizi yapılmaktadır. Bu analizden elde edilen sonuçlar, büzülme derzlerinin açılmasının kemerdeki çekme gerilmelerini serbest bıraktığı ancak basınç gerilmelerini ve konsollardaki düşey gerilmeleri arttırdığını göstermektedir. Bu, betonun ezilmesine ve konsollarda beton kemerin çekme mukavemetini aşabilecek düşey gerilmelerin artmasına yol açabilmektedir. Barajın modellenmesi, tekil konsol monolitler olarak yapılmış olup bu monolitler ve eklemler, sismik hareket sırasında tekrar tekrar açılıp kapanabilen eklemlerle temsil edilmektedir. Bu çalışma, barajın dinamik tepkisinin ve potansiyel hasar bölgelerinin daha iyi anlaşılması için önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Baraj-Kaya arayüzünde ortaya çıkan yüksek çekme gerilmeleri ve bu gerilmelerin barajın bütünlüğü üzerindeki etkileri de analiz edilmiştir. Bu tür analizler, barajların depreme dayanıklı tasarımı ve yapısal sağlık izleme süreçlerinde kullanılabilecek önemli bilgiler sunmaktadır.

Liang vd. (2021), çift eğrilikli bir beton kemer barajın sonlu elemanlar modelinin geliştirilmesi sırasında, betonda oluşabilecek plastik hasarları ve düşey derzlerin açılma ihtimalini dikkate alan bir yaklaşım benimsemişlerdir. Bu analizde, sıvı-yapı etkileşiminin modellenmesi, analiz sürecini basitleştirmek amacıyla eklenmiş kütle yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Bu yaklaşım, sıvının dinamik etkilerini daha kolay bir şekilde modellemeyi sağlamaktadır. Araştırmada, baraj bölgesinin sismik aktivite düzeyine uygun olarak seçilen 14 farklı yer hareketi temel alınarak dinamik dayanıklılık analizi (DDA) yöntemi uygulanmıştır. Bu yer hareketlerinin yatay ve düşey ortalama tepki spektrumları, hedef spektrum olarak alınmış ve bunlara dayanarak zaman tanım aralığında dinamik dayanıklılık analiz fonksiyonları (DDAF) yani ivme kayıtları türetilerek analizler yapılmıştır. Bu çalışma çift eğrilikli beton kemer barajların sismik analizlerinde, plastik hasarların ve dinamik etkileşimlerin önemini vurgulayan ve bu etkileşimleri daha iyi anlamak için gelişmiş analitik araçlar sunan önemli bir katkıdır. Bu tür derinlemesine analizler, baraj tasarımı ve güvenlik değerlendirmelerinde kritik öneme sahiptir.

Başbolat (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma da hem beton ağırlık barajlar hem de beton kemer barajlar üzerinde yoğunlaşarak, bu yapıların sismik kırılabilirlik eğrilerini oluşturmayı hedeflemektedir. Bu araştırma, sismik risk analizinde kullanılan Drucker-Prager malzeme modeline dayanmaktadır. Kemer barajlarda kırılabilirlik eğrilerinin belirlenmesi için kullanılan çoklu seviye analizi yöntemi, barajların deprem etkilerine karşı kırılabilirlik seviyelerini daha detaylı ve kesin bir şekilde belirlemeye olanak tanımaktadır. Bu çalışma, beton barajların sismik davranışlarını anlamada ve bu yapıların deprem sırasındaki

potansiyel hasarlarını değerlendirmede kritik bir adımı temsil etmektedir. Çoklu seviye analizi yöntemi, sismik kırılgenlik eğrilerinin oluşturulmasında, barajların farklı sismik seviyelere göre nasıl tepki verebileceğini ve hangi noktalarda hasar görme olasılıklarının arttığını göstermektedir. Bu tür analizler, baraj güvenliği ve risk değerlendirmelerinde önemli bir rol oynayarak, mühendislik uygulamalarında daha güvenli ve dayanıklı yapıların tasarlanmasına katkı sağlamaktadır.

Duran (2022) tarafından hazırlanan tez çalışması kapsamında, Deriner Barajı'nın farklı su seviyeleri altında yer değiştirme, asal çekme ve basınç gerilmelerini hesaplamak ve bu sonuçları karşılaştırmak amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. ANSYS programında gerçekleştirilen analizlerde beş farklı su seviyesi dinamik analizler yürütülmüştür. Analiz sonuçlarına göre, baraj rezervuarının %50'sinin dolu olması durumuna kadar olan kısım için yer değiştirme ve gerilme değerlerin çok değişmediği, su seviyesi artmaya devam ettikçe değerin arttığı gözlemlenmiştir. Bu tez çalışması, barajların farklı su seviyelerindeki davranışlarının anlaşılmasına yönelik katkı sağlamakta ve baraj mühendisliği alanında, özellikle deprem analizi ve sıvı-yapı etkileşimi konularında bilgiler sunmaktadır. Bu tür analizler, barajların tasarımı ve güvenliği açısından kritik öneme sahip olup, risk değerlendirmeleri ve güvenlik önlemlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Kalkan Okur vd. (2023) yapılan çalışma kapsamında Yusufeli Barajı'nın farklı su yüksekliği durumunda frekans değerlerindeki değişimi sayısal olarak incelemek amacıyla proje verilerine dayalı olarak hazırlanan sonlu eleman modeli kullanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Baraj-rezervuar etkisini yansıtmak için Westergard yaklaşımı tercih edilmiştir. Modelleme sürecinde, barajın boş durumunu da içerecek şekilde toplam on üç su seviyesi durumu dikkate alınmış ve her bir model için barajın frekans değerleri hesaplanmıştır. Bu analizler ile, özellikle su seviyesinin artması durumunda barajın frekans ve mod şekillerinde nasıl bir değişim olduğu üzerinde durulmaktadır.

1.2.2. Deneysel Çalışmalar

Ziyad (1988) tarafından, Morrow Point Kemer Barajı'nın dinamik davranışını ve suyun sıkışabilirlik etkisini belirlemek amacıyla bir dizi sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışma, zorlanmış titreşim testleri ve sonlu eleman yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, barajın kretine iki sarsıcı yerleştirilerek, su seviyesinin kretten 3-4 metre aşağıda olduğu bir durumda zorlanmış titreşim testi uygulanarak barajın

frekans davranış fonksiyonları elde edilmiştir. Deneysel sonuçları daha iyi yorumlamak için barajın iki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sayısal modelden elde edilen doğal frekanslar, zorlanmış titreşim yöntemiyle elde edilen frekanslardan farklı çıktığında, barajın sonlu eleman modelinde, malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında gerekli düzenlemeler yapılarak model iyileştirilmiştir. Bu çalışma, kemer barajların dinamik analizlerinde hem deneysel hem de sayısal yaklaşımların birleştirilmesinin önemini vurgulayan ve o dönemin teknolojik sınırlamalarına rağmen önemli bulgular elde eden bir araştırma olarak değerlendirilebilir.

Ghanaat vd. (1992) tarafından yapılan çalışma için Dongjiang barajının dinamik davranışını deneysel olarak belirlemek amacıyla baraj gölü çevresinde patlayıcı madde patlatılarak gölde oluşan şok dalgasının oluşturduğu titreşimler üç eksenli sismograflar ile kaydedilmiştir. Deneysel sonuçlar oluşturulan sayısal modele ait analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu ifade edilmiştir. Chouinard vd (1995) ve Darbre (1995) tarafından yapılan deneysel çalışmalar ise çevresel titreşim testlerine dayalı olarak barajın dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Darbre vd. (2000), İsviçre'de yer alan 250m yüksekliğinde ve 520m kret uzunluğundaki Mauvoisin Kemer Barajı'nın dinamik davranışlarını, rezervuarın değişken su seviyeleri altında incelemişlerdir. Bu çalışmada, barajda 124 m ile 238 m arasında değişen yedi farklı su seviyesi için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, barajın ilk on beş doğal frekansının 0-10 Hz aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Doğal frekanslarda 124-180 m su seviyeleri için hafif azalmalar, 180-238 m arasındaki su seviyeleri için ise önemli artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, barajın doğal frekanslarını belirlemek için 1994 ve 1996 yıllarında meydana gelen üç deprem sırasında kaydedilen ivme kayıtları da kullanılmıştır. Bu depremler sırasında barajın su seviyesi sırasıyla 234, 138 ve 183 metre olarak kaydedilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında barajın SAP90 programı kullanılarak oluşturulan sayısal modelinin analizi de yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Ancak, su seviyesindeki farklılıkların hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda tam olarak temsil edilememesi (mevsimsel değişikliklerden kaynaklı sıcaklık etkileri vb.) nedeniyle sonuçlar arasında bazı farklılıklar ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Bu durum, baraj mühendisliği alanında, özellikle sismik analiz ve baraj güvenliği açısından, su seviyesi ve çevresel etkenlerin etkilerini dikkate alan kapsamlı bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır.

Zhou vd. (2000) tarafından yapılan çalışma, Çin'de inşa edilmesi planlanan ve dünyanın en yüksek kemer barajı olacak olan Xiao Wan Barajı'nın sismik davranışlarını ve potansiyel hasar senaryolarını anlamaya yöneliktir. Bu kapsamda, barajın 1:350 ölçeğinde 20 adet ölçekli modeli (83,4 cm yükseklik, 268,8 cm kret uzunluğu) laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Çalışmada, bu modeller dört farklı gruba ayrılmıştır: A grubu, monolit yapıda 9 model; B grubu, bağlantı noktaları içeren 7 model; C grubu, dolu savak içeren 2 model ve D grubu, hem dolu savak hem de bağlantı noktası içeren 2 model. Modellerin dinamik karakteristikleri, zorlanmış titreşim testleri uygulanarak belirlenmiş ve ardından modeller 3x3 m ebatlarında bir sarsma tablasına monte edilerek, temel mod esas alınarak titreştirilmişlerdir. Bu sürece modellerde çatlaklar oluşana kadar devam edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, çatlakların genellikle barajın orta bölgesinde ve kret yakınlarında meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca, bağlantı noktaları içeren modellerde daha fazla hasar olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kemer barajların lineer olmayan davranışlarının anlaşılmasında bağlantı noktalarının önemini vurgulamakta ve bu tür deneysel testlerin kullanımının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, kemer barajların sismik davranışlarını daha iyi anlamak için kapsamlı ve detaylı modelleme yaklaşımlarının önemini gösteren önemli bir araştırma olarak değerlendirilebilir.

Mivehchi vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada, İran'da bulunan iki büyük kemer baraj olan Shahid-Rajaei ve Saveh Kemer Barajları'nın dinamik özellikleri hem deneysel hem de analitik olarak incelenmiştir. Shahid-Rajaei Barajı ve Saveh Barajı sırasıyla 138 m ve 128 m yüksekliğe sahip olup, ölçümler sırasında su seviyesi Shahid-Rajaei Barajı'nda kret seviyesinin 18 m altında ve Saveh Barajı'nda ise 47,5 m altında iken gerçekleştirilmiştir. Titreşim testlerinde günlük değişen koşulları ifade etmek amacıyla (gece, gündüz ve rüzgarın farklı yönlerden estiği zamanlarda) çeşitli hava koşullarının etkileri dikkate alınmıştır. Araştırmada, baraj-rezervuar-temel etkileşimini içeren üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve bu modeller üzerinden analizler yapılmıştır. Bu çalışma, kemer barajların dinamik karakteristiklerini anlamada ve bu tür yapıların sismik analizlerinde kullanılabilecek metodolojilerin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak kabul edilebilir ve benzer yapıların değerlendirilmesinde referans olarak kullanılabilir.

Oliveira ve Faria (2006) tarafından yapılan çalışmada, kemer barajların potansiyel hasar seviyelerini anlamak için küçük ölçekli modeller üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalara odaklanılmıştır. Bu çalışmada, Portekiz'de yer alan Alto Lindoso ve Alqueva Kemer Barajlarının 1:250 ölçeğindeki modelleri laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Bu

modelleme sürecinde, bir baraj modelinde hasar oluşana kadar yüklemeler sistematik olarak artırılmış, diğer baraj modelinde ise belirlenen maksimum yer değiştirme değerine ulaşıncaya kadar yüklemeler uygulanmıştır. Deney sonrası modeller incelendiğinde her iki durumda da barajların kret seviyesinin biraz altındaki orta bölgelerinde yüklemelere bağlı olarak çatlaklar meydana geldiği görülmüştür. Bu deneysel çalışmanın sonuçları, bilgisayar ortamında oluşturulan sonlu eleman modelleri ile test edilmiş ve elde edilen bulguların deneysel sonuçlarla benzerlik gösterdiği ifade edilmiştir. Bu çalışma, kemer barajların hasar analizi ve risk değerlendirmesi alanlarına katkı sağlamaktadır.

Wang ve Li (2007)'nin çalışmalarında, 292 metre yüksekliğiyle dikkat çeken Xiao Wan Kemer Barajı'nın sismik davranışları laboratuvar ortamında ölçeklendirilmiş bir modelle deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmada, baraj modeli rezervuar ve temel etkileşimini içerecek şekilde tasarlanmış, barajın gövdesi briketlerle ve temeli ise özel bir kauçuk malzemeye inşa edilmiştir. Bu model, 5x5 metre ebatlarında bir sarsma tablası üzerine yerleştirilerek sismik testlere tabi tutulmuştur. Barajın sismik tepkileri, gövdesine yerleştirilen hassas ivmeölçerler aracılığıyla kaydedilmiş ve frekans davranış fonksiyonları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, düşük ve yüksek su seviyelerinde gerçekleşen çeşitli deprem hareketlerini içeren 18 farklı senaryo incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, sarsma testleri sırasında baraj modelinde toplamda on bir lokal çatlak oluştuğunu ve sistemin doğal frekansının %14 oranında azaldığını ortaya koymaktadır. Ancak, bu çatlaklara rağmen, modelin suyun hidrostatik basıncına karşı dayanımını koruduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, yüksek kemer barajların sismik davranışlarını anlamak ve bu tür yapıların deprem sırasındaki performansını değerlendirmek için önemli bir adım olarak kabul edilebileceği düşünülmekte ve benzer yapıların tasarımı ve güvenlik değerlendirmelerinde kullanılabilecek değerli bilgiler sunmaktadır.

Wang ve He (2007) tarafından yapılan çalışma kapsamında, kemer barajlarda meydana gelen çatlakların barajın doğal frekansları üzerindeki etkilerini incelemeye odaklanılmıştır. Bu amaçla, yüksekliği 80 m ve kret uzunluğu 209 m olan tek eğrilikli bir kemer barajın 1:100 ölçeğinde üç boyutlu modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Araştırmada, baraj gövdesinde farklı oranlarda (%25, %50, %75) çatlaklar oluşturulmuş ve her durum için zorlanmış titreşim testleri yapılarak baraj gövdesine yerleştirilen ivmeölçer ile doğal frekanslar belirlenmiştir. Aynı zamanda, barajın oluşturulan sonlu eleman modelinde istatistiksel sinir ağı yöntemi kullanılarak çatlaklar modellenmiş ve sayısal frekans değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, barajın hasarsız durumda ve %25

çatlak oranında olduğu durumlar için elde edilen frekanslar birbirine yakın çıkarken, %50 ve %75 çatlak oranında frekanslarda belirgin bir azalmanın tespit edildiği ifade edilmiştir. Bu bulgular, çatlakların barajın yapısal bütünlüğü ve dinamik davranışları üzerindeki etkisini göstermekte ve kemer barajların sismik tasarımı ve güvenliği açısından önemli içgörüler sunmaktadır. Bu çalışma, baraj mühendisliği alanında, özellikle sismik analizler ve yapı sağlığı izlemesi konularında, barajların davranışlarını daha iyi anlamak için değerli bir kaynak olarak değerlendirilebilir.

Sevim (2010) tarafından, kemer barajların dinamik davranışlarını anlamak için hem teorik hem de pratik yaklaşımları birleştiren bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışma, sonlu eleman analizi ve deneysel modal analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, Tip-1 kemer barajın laboratuvar ortamında ölçekli bir modeli inşa edilerek bu model üzerinde deneysel testler yapılmıştır. Ardından, elde edilen deneysel sonuçlar, ANSYS programı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modeli ile karşılaştırılmıştır. Bu araştırmanın bir diğer önemli yönü, yapı-zemin-rezervuar etkileşiminin incelenmesiydi. Bu kapsamda, farklı su seviyelerinde kemer barajın dinamik karakteristikleri gözlemlenmiştir. Sevim (2010) tarafından, teorik bulguların pratikteki uygulanabilirliğinin test edebilmesi için, Berke Barajı üzerinde de deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, kemer barajların dinamik analizinde teorik modellerin laboratuvar testleriyle doğrulanmasının ve gerçek uygulamalara adaptasyonunun önemini vurgulayan, mühendislik ve baraj güvenliği alanlarına önemli katkılarda bulunan bir araştırma olarak değerlendirilebilir. Ayrıca kemer barajların dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla bu tez çalışmasından elde edilen ve birçok değerli çalışma mevcuttur (Sevim vd., 2011a; Sevim vd., 2011b; Bayraktar vd., 2011; Sevim vd., 2012; Sevim vd., 2013; Sevim vd., 2014).

Loh vd. (2011) tarafından yapılan çalışma kapsamında, Fei-Tsui kemer barajının sismik tepki ve uzun vadeli statik verilerinin analiz edilmesi ve bu analizlere dayanarak barajın güvenliği için bir erken uyarı sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada, ilk olarak 84 deprem olayından elde edilen sismik veriler kullanılarak barajın farklı su seviyelerindeki modal özellikleri analiz edilmiştir. Elde edilen doğal frekanslar ve su seviyesi arasındaki ilişki, regresyon eğrileri aracılığıyla istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. İkinci aşamada, barajın uzun dönemli verilerinin özelliklerini elde etmek için iki farklı yöntem uygulanmıştır: otoregresif (Autoregressive Model: AR) modeli ve tekil spektrum analizi (Singular Spectrum Analysis: SSA-AR) ile doğrusal olmayan temel bileşen analizi (Nonlinear Principal Component Analysis: NPCA) kullanan otomatik ilişkili sinir ağı

yöntemi (Auto-Associate Neural Network Method: AANN). Bu yöntemler, tahmin edilen ve kaydedilen veriler arasındaki farkları kullanarak barajın statik deformasyonunun eşik seviyesini belirlemek için kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma baraj güvenliği için kritik öneme sahip erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmakta olup baraj mühendisliği alanında önemli bir referans kaynağı olarak kabul edilebilir. Bu analizler sayesinde, barajın sismik ve statik verileri daha iyi anlaşılır hale gelmekte ve olası risklerin erken tespiti için gerekli önlemler alınabilmektedir.

Wang vd. (2014) tarafından Çin'in güneybatı bölgesinde, hidroenerji kaynaklarının geliştirilmesi kapsamında inşa edilen kemer barajın deprem güvenliğini belirlemek amacıyla ölçekli baraj modelinin sarsma masasında test edilmesi ile ilgili çalışma yürütülmüştür. Çalışma, böyle bir deneyin avantaj ve zorluklarına yönelik açıklama ve tavsiyelerde bulunmakta olup benzer çalışmaları gerçekleştirmek isteyenler için yol gösterici niteliktedir. Özellikle, kemer barajların hasarına ilişkin deneysel çalışmalar, çok güçlü depremler sırasında barajların tepkileri hakkında nadir vakalara değerli katkılarda bulunmaktadır. Bu çalışmalar, hasarın gelişimi ve kemer barajlarının potansiyel hasarları hakkında somut kanıtlar ve yararlı veriler sunmaktadır. Bu tür bilgiler, baraj mühendisliği alanında, özellikle deprem riski altında bulunan yapıların tasarımı ve güvenlik değerlendirmeleri açısından büyük öneme sahiptir.

Garcia-Palacios vd. (2016) tarafından, 220m kret uzunluğu ve 62 m gövde yüksekliğine sahip çift eğrilikli Tajera Barajı'nda 10 V/g yüksek hassasiyetli kablosuz ivmeölçerler kullanılarak çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Bu ölçümler sonucu elde edilen barajın dinamik karakteristikleri oluşturulan sonlu eleman modelin güncellenmesi aşamasında kullanılarak gerçek yapıyı temsil eden modelin belirlenmesi sağlanmıştır. Yapılan karşılaştırmada, deneysel ve sayısal modelden elde edilen doğal frekanslar arasında yaklaşık %1, sönüm oranlarında ise %5 oranında farklılıkların olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, mod şekillerinin uyumunu belirlemek amacıyla hesaplanan MGK (Modal Güvence Katsayısı) değerlerinde %95 oranında bir benzerlik saptanmıştır. Bu analiz, Tajera Barajı'nın dinamik özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir adım olmuş ve barajın yapısal davranışları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır.

Yang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada Çin'deki işletme sürecinde olan Ertan Kemer Barajı'nın, sismik etkilere karşı dinamik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Baraj, 2001'den 2008'e kadar 20'ye yakın deprem olayını kaydedebilecek şekilde yüksek kalitede ivmeölçerlerle detaylı olarak izlenmiştir. Bu süre zarfında elde edilen veriler, barajın

doğal frekanslarını, sönüm oranlarını ve mod şekillerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu amaçla, en güçlü beş deprem hareketinin güç spektral yoğunluk fonksiyonları (Power Spectral Density; PSD) ve transfer fonksiyonları (Transfer Function; TF) kullanılarak analizi yapılmış ve çoklu giriş-tek çıkış (Multiple Input–Single Output; MISO) ve çoklu giriş-çoklu çıkış (Multiple Input–Multiple Output; MIMO) ARX (Autoregressive Exogenous) modelleri uygulanmıştır. Analiz sürecinde, barajın doğrusal sonlu eleman modeli ve büzülme derzlerinin etkisini dikkate alan doğrusal olmayan modeli, elde edilen frekansları doğru bir şekilde yansıtacak biçimde güncellenmiştir. Modal analiz sonuçları, barajın dinamik özelliklerinin doğrusal olmayan model ile daha iyi simüle edildiğini göstermektedir. Bu bulgular, kemer barajların depreme dayanıklı tasarımı ve yapı sağlığı izleme açısından önemli bilgileri sağlamaktadır. Özellikle, barajın dinamik davranışının daha doğru bir şekilde modellenmesi ve anlaşılması için doğrusal olmayan yaklaşımların etkinliği vurgulanmaktadır.

Lemos vd. (2019) tarafından hazırlanan çalışmada, beton kemer barajların sismik güvenlik değerlendirmesinde kullanılan ve rezervuar ile baraj arasındaki dinamik etkileşimi temsil etmeyi amaçlayan bir sayısal model ele alınmaktadır. Model, temeldeki potansiyel dinamik kaymaları temsil etmek için tasarlanan özel bir eleman formülasyonuna dayanmaktadır. Çalışmanın odak noktası, barajın ve rezervuarın dinamik etkileşiminin modellenmesidir. Çalışma ayrıca, Kuzey Portekiz'de yakın zamanda inşa edilen bir kemer barajın incelenmesini de içermektedir. Bu barajın dinamik tepkisi, rezervuar doldurulmadan önce ve sonra yapılan zorlanmış titreşim testleri ve baraja kurulan sürekli izleme sistemleri ile ölçülmüştür. Bu ölçümler, barajın dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine katkı sağlamakta ve sayısal modelin doğrulanmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışma, beton kemer barajların sismik güvenlik değerlendirmelerinde kullanılan sayısal prosedürlerin geliştirilmesine ve doğrulanmasına yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunmakta olup, bu alanda önemli bir referans kaynağı olarak kabul edileceği düşünülmektedir.

Pourgholi vd. (2023) tarafından hazırlanan çalışma kapsamında, barajlar gibi kritik yapıların sayısal modellerinin güncellenmesi için sismik verilere dayalı sistem tanımlama yöntemlerinin önemini ele alınmakta ve mevcut metodolojilerin bazı sınırlamalarını gidermeye yönelik bir yaklaşım sunulmaktadır. Çoğu sistem tanımlama yöntemi, beyaz gürültü ve durağan uyarım varsayımlarına dayandığı için, bu yöntemlerle tahmin edilen sistemler genellikle yüksek belirsizliklerle karşılaşmaktadır. Bu çalışmada, stokastik Altalan Belirleme (SAB) yönteminin hatalarını analiz etmek ve sistemlerin kötü koşullandırılmasını

izlemek için yeni bir figür önerilmektedir. Bu yeni figür, sistemin kötü koşullandırmasını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için tüm tekil değerleri kullanmaktadır. Çalışmada, Hankel matrisinin optimal boyutlarını belirleyerek ve frekans/sönümleme kümelemesi kullanılarak tanımlanan sistemin aşırı belirleme sorununu çözmek ve aykırı değerleri ortadan kaldırmak için yarı otomatik bir tanımlama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, Koyna Barajı'nın Sonlu Elemanlar Modelinden elde edilen sismik verilerle doğrulanmış ve yapısal modal karakteristikleri doğrulamak için modal şekillerin karmaşıklığı incelenmiştir. Algoritma, Pacoima Barajı'nın sismik izleme verilerini analiz etmek için de kullanılmış ve yüksek performans gösterdiği ifade edilmiştir. Bu yöntem, baraj gövdesinin yapısal modlarını (baraj-rezervuar-temel) sistemin diğer modlarından ayırmaya ve mevcut modelin doğrusal olmama durumunu belirlemeye yardımcı olmaktadır.

Hassan vd. (2024) tarafından hazırlanan bu çalışmada, Kenyir Barajı'nın dolu savağının titreşim özelliklerini analiz etmek için yapılan bir model deneyine odaklanılmaktadır. 1:50 ölçekli model, farklı dökülme olaylarının dolu savağın doğal frekansları ve mod şekilleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Froude yasasına dayalı bir benzerlik analizi kullanılarak hazırlanmıştır. Deneyde, 2,92 m ve 2,96 m olmak üzere iki farklı su seviyesi simüle edilmiş ve her su seviyesinde dolu savağın operasyonel sapma şekli (Operational Deflection Shape: ODS) analizi gerçekleştirilmiştir. En baskın mod şekli, dolu savağın mansap bölgesindeki duvarında gözlemlenmiş ve bu mod şekli 2,96 m'lik su seviyesinde 2801,1 Hz'lik bir doğal frekansa ve 0,353 m'lik bir genel sapma genliğine karşılık geldiği ifade edilmiştir. Deneysel sonuçlar, sayısal analiz ile karşılaştırılmış ve elde edilen verilerin %10'dan daha az bir yüzdesel farkla oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu, kabul edilebilir bir hata yüzdesinin altında bir sonucu ifade etmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma Kenyir Barajı dolu savağının fiziksel modelinin, deneysel doğal frekansları ve mod şekillerinin sayısal analizle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, baraj dolu savağının titreşim özelliklerini anlamada ve bu tür yapıların tasarım ve işletmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

1.2.3. Yapı Sağlığı İzleme ile İlgili Çalışmalar

Okuma vd. (2008) tarafından hazırlanan çalışma, 1963 yılında inşa edilen ve 130 metre yüksekliğe sahip olan eski Hitotsuse Kemer Barajının sismik güvenliğini değerlendirmek amacıyla yapılan kapsamlı bir çevresel titreşim testine odaklanmaktadır. Bu

test, bir yıldan uzun bir süre boyunca sürekli olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modelinin güncellenmesinde ve Yapı Sağlığı İzleme için temel verilerin toplanmasında kullanılmıştır. Çalışmada, barajın dinamik özelliklerini anlamak için iki farklı çevresel titreşim testi uygulanmıştır. İlk test, barajın mod şekillerini elde etmeyi amaçlayan çok sayıda sensörden oluşan bir titreşim testidir. İkinci test ise, doğal frekansların mevsimsel değişimlerini değerlendirmek için yapılan uzun vadeli sürekli titreşim ölçüm testidir. Bu çalışmada, özellikle barajın ilk üç mod şeklinin ve doğal frekanslarının mevsimsel değişimlerini tanımlayan test sonuçları sunulmaktadır. Ayrıca çalışmada, rezervuar su seviyesinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmekte ve mevcut ortam titreşim testi ile geçmişte yapılan zorlanmış titreşim testleri ve deprem kayıtlarından elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmaktadır. Bu karşılaştırma, barajın mevcut durumunun ve sismik güvenliğinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır ve eski beton kemer barajların sismik değerlendirilmesi için önemli bir referans sağlamaktadır.

Lei vd. (2009) tarafından hazırlanan çalışma kapsamında, büyük boyutlu yapıların yapı sağlığı izlemesi için tasarlanan yeni bir akıllı kablosuz algılama ağı sistemi ele alınmaktadır. Çalışmada, kablosuz algılama sensörlerinin donanım tasarımına ve yazılım mimarisine odaklanılmaktadır. Bu yeni kablosuz algılama üniteleri, bir dizi işlevsel modülden oluşmakta ve bu modüller arasında algılama arayüzü, sinyal koşullandırma, sinyal sayısallaştırma, hesaplama çekirdeği, kablosuz iletişim ve pil yönetimi yer almaktadır. Sistemin yazılım mimarisi, Zigbee iletişim protokolünü kullanan iki seviyeli bir küme ağacı mimarisine dayanmaktadır. Tasarımda güç tasarrufu ve hata toleransı gibi önemli hususlar dikkate alınmıştır. Ağdaki her kümenin, Yapı Sağlığı İzleme için gerekli olan hesaplama metodolojilerini uygulayabilecek kapasiteye sahip olduğu ifade edilmiştir. Bu özellikler, kablosuz algılama birimlerinin ve ağın "akıllı" nitelikler kazanmasını sağlamaktadır. Çalışmada, kablosuz sistem tarafından toplanan ölçüm verileri üzerinde yapılan ilk testler ve akıllı algılama ağının dağıtılmış hesaplama kapasitesi de sunulmaktadır. Sonuçlar, bu yeni tip akıllı kablosuz algılama ağının büyük boyutlu yapıların Yapı Sağlığı İzlemesinde etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, kablosuz algılama teknolojilerinin geliştirilmesi ve Yapı Sağlık İzleme alanında kablosuz sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılması konusunda önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Lu vd. (2010) tarafından hazırlanan çalışmada, Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) için kullanılan bir kablosuz algılama ünitesinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreci ele alınmaktadır. Stanford Üniversitesi'nden tarafından geliştirilen bu kablosuz algılama

ünitesinin prototipi, daha etkili ve güvenilir veri toplama için belirli iyileştirmelerden geçirilmiştir. Bu iyileştirmeler üç ana gereksinimi karşılamayı hedeflemektedir: sistem gücünün ve analog sinyal işlemenin iyileştirilmesi, sinyal çözünürlüğünün artırılması ve güvenilir kablosuz iletişim verilerinin sağlanması ve sürekli uzun vadeli izleme yeteneğinin geliştirilmesi. Bu iyileştirilmiş kablosuz algılama ünitesi, bir taban izolasyonlu binanın ortam titreşim analizi üzerinden test edilerek doğrulanmıştır. Bu yeni sistem ile, sürekli Yapı Sağlığı İzleme için daha güvenilir veriler sağlama potansiyeline sahip olunacağı ifade edilmiştir. Geliştirilen bu algılama sistemine, Stokastik Altalan Belirleme yöntemini kullanan bir yazılım entegre edilmiş, böylece daha akıllı bir YSİ sistemi oluşturulmuştur. Bu gelişmeler, YSİ alanında önemli bir ilerleme olarak kabul edilebilir ve Yapı Sağlığı İzleme ve değerlendirilmesinde önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Weng ve Loh (2010)'a ait bu çalışma ile, Fei-Tsui kemer barajının, kaydedilen sismik ve ortam titreşim verileri kullanılarak yapılan sistem tanımlaması ele alınmıştır. Barajın, 84 farklı deprem olayından alınan sismik verilerle analiz edilen rezervuar su seviyesine bağlı modal özellikleri incelenmiştir. Bu analizde, giriş uyarımının mekansal değişkenliğini dikkate alarak hem çok girişli hem de tek girişli sistem modelleri kullanılmıştır. Doğal frekanslar ve rezervuar su seviyesi arasındaki ilişki, regresyon eğrileri aracılığıyla istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Araştırmada ayrıca, barajın geçmişteki davranışlarıyla mevcut durumunu karşılaştırmak için çevresel titreşim deneyi yapılmış ve barajın güncel modal karakteristikleri, çıktıya dayalı Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemiyle elde edilmiştir. Bu tanımlama, regresyon eğrisi ile bir güvenlik değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Çalışmada, farklı tanımlama algoritmaları arasında bir karşılaştırma yapılmış ve yalnızca çıktıya dayalı Stokastik Altalan Belirleme yönteminin, girdi/çıkıtı Altalan Belirleme'ye göre daha iyi sonuçlar sunduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, barajın modal özelliklerinin tanımlanması için yalnızca çıktıya dayalı Stokastik Altalan Belirleme'nin en etkili yöntem olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca, barajın dinamik özelliklerinin izlenmesinde ortam titreşim ölçüm sisteminin kullanılması önerilmiş, ancak bu sistemin güvenilirliği için sürekli kayıt gerekliliği vurgulanmıştır. Sismik verilerle yapılan tanımlamada ise, tek girişli modelin çok girişli modele göre daha doğru sonuçlar verip vermediğinin daha fazla araştırmaya ihtiyacı olduğu belirtilmektedir. Makale, ayrıca rezervuar seviyesindeki değişikliklerle modal frekanslar arasındaki ilişkiyi belirlemek için sismik verilerin kullanımının önemini vurgulamakta ve gelecekteki çalışmalarda ortam

verileri kullanılarak tanımlama doğruluğunun artırılması ve sıcaklığın etkisinin dikkate alınması önerilmektedir.

Oliveira vd., (2012) tarafından 2008 yılından itibaren uzun süreli dinamik izleme sistemi ile izlenen 250 m yüksekliğe sahip Mauvoisin Barajı'nın, altı aylık bir dönem boyunca değişen su seviyeleri için toplanan ham sinyalleri kullanılarak çalışma yapılmıştır. Bu ham sinyallerin Zorlanmış ve Çevresel Titreşim Yöntemlerine göre işlenmesi ile baraja ait değişen su seviyesi durumlarında frekans değerleri elde edilerek değişimler gözlemlenmiştir. Test sonuçlarına göre, baraj haznesindeki su seviyesinin yükselmesiyle frekanslarda bir artış gözlemlendiği, ancak su seviyesi belirli bir noktaya ulaştıktan sonra frekanslarda azalma meydana geldiği ifade edilmiştir. Bu durumu, gövdedeki derzlerinin artan hidrostatik basınç altında büzülmesi ve barajın rijitliğinin artması ile meydana geldiği belirtilmiştir. Ancak, su seviyesi daha da yükseldiğinde, doğal frekanslar azalmaya başladığı ifade edilmiştir. Testler sırasında rüzgar etkisinin göz önünde bulundurulduğu ve ilk iki modun doğal frekanslarının üçüncü ve dördüncü modlardaki frekanslara kıyasla daha belirgin bir şekilde tespit edildiği belirtilmiştir. Bu tür bilgiler, baraj mühendisliği ve yapı sağlığı izleme alanlarında, özellikle deprem analizleri ve yapısal davranışların değerlendirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Mauvoisin Barajı üzerinde yapılan bu testler, benzer yapıların analizinde kullanılabilecek değerli veriler sunarak, baraj güvenliği ve risk yönetimi alanlarına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Lew ve Loh (2013) tarafından hazırlanan çalışmada, Tayvan'da yer alan ve sismik olarak aktif bir bölgede bulunan Fei-Tsui barajının Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) çalışmaları için geliştirilen yeni bir modelleme tekniği tanıtılmaktadır. Bu teknik ile, Fei-Tsui barajının uzun vadeli statik deformasyonunu etkileyen temel faktörler olan su seviyesi ve sıcaklık gibi fiziksel parametrelerin bir fonksiyonu olarak statik deformasyon karakterize edilmektedir. Çalışma ile önerilen modelleme yaklaşımı, ölçülen statik deformasyon ile model tarafından tahmin edilen deformasyon arasındaki farkların en aza indirgenmesi hedeflenilmiştir. Bu amaca ulaşmak için, hem doğrusal en küçük kareler yöntemi hem de doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi entegre edilmiştir. Önerilen modelleme tekniği, su seviyesi ve sıcaklık gibi ölçülen parametrelerin, barajın uzun vadeli deformasyonunu nasıl etkilediğini anlamak için kullanılmakta ve bu parametrelerin değişimine bağlı olarak barajın gelecekteki deformasyonlarının tahmin edilmesi için bir araç olarak hizmet edeceği ifade edilmiştir. Bu teknik, Fei-Tsui barajı gibi büyük yapıların yapısal bütünlüğünü sürekli izlemek ve

yönetmek için kritik önem taşımakta ve baraj mühendisliği ve güvenlik değerlendirmesi alanlarında önemli bir katkı sağlamaktadır.

Narayan vd. (2018) tarafından hazırlanan çalışmada, barajlar gibi büyük yapıların Yapı Sağlığı İzlemesi ve potansiyel arıza modu analizi (Potential Failure Mode Analysis-PFMA) ile ilgili kapsamlı bir değerlendirmesi ele alınmıştır. Barajların, fiziksel yaşlanma, yetersiz işletme ve bakım gibi faktörler nedeniyle zamanla bozulduğu ve Hindistan'daki nüfus artışının, baraj ihtiyacını ve bununla ilişkili güvenlik endişelerini artırdığı ifade edilmiştir. Bu bağlamda, barajların sürekli durum değerlendirmesi amacıyla izlenmesi ve performansa dayalı bakımının önemi vurgulanmaktadır. Yapı Sağlığı İzleme verileri, barajın mevcut performans seviyesini anlamada yardımcı olmakta ve zamanında erken müdahale için bilinçli kararlar alınmasına olanak tanımaktadır. Potansiyel arıza modu analizi, potansiyel arıza modlarının azaltılması ve bu modların erken tespitinin sağlanması için kullanılmakta ve barajın yıkılma riskini değerlendirilmesinde önemli bir araç olduğu ifade edilmektedir. SHM programı, genellikle potansiyel arıza modu analizi çalışmaları sırasında belirlenen tehditleri izlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında bu yaklaşımların entegrasyonu ile, barajların güvenliğini sağlama ve farklı çalışma koşulları altında yapının daha iyi anlaşılmasının amaçlandığı ifade edilmiştir.

Pereira vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Portekiz'in kuzeydoğusunda bulunan 123 metre yüksekliğindeki çift eğrilikli Baixo Sabor kemer barajının dinamik izleme sistemine ve bu sistemle yapılan analizlerine odaklanılmaktadır. Baraj, 20 tek eksenli ivmeölçer içeren gelişmiş bir dinamik izleme sistemine sahip olup bu sistem ile, internet bağlantısı üzerinden sahadan sürekli veri toplandığı ve işlendiği belirtilmiştir. Çalışmanın odak noktası, şiddetli yağmur sonrası dolusavak kapaklarının açılması gibi büyük olaylar sırasında ivme seviyelerinin incelenmesi ve barajın modal özelliklerinin (doğal frekanslar, modal sönüm oranları ve mod şekilleri) rezervuarın su dolumu sırasında nasıl değiştiğinin analizidir. Bu değerler sayısal modellerin kalibrasyonu için önemli veriler sağlamakta olup, su-yapı etkileşiminin etkilerini gözlemlemek açısından değerlidir. Çalışma, elde edilen sonuçların, zorlanmış titreşim testi sonuçları ve su etkisinin dikkate alındığı sayısal modellerle karşılaştırılmasını içermektedir.

Monteiro vd. (2020) tarafından hazırlanan çalışmada, Portekiz'de gerçekleştirilen büyük hidroelektrik projelerin bir parçası olarak, Baixo Sabor ve Feiticeiro barajlarının sismik izleme sistemleri ve bunların sismik risk yönetimindeki etkileri ele alınmıştır. Portekiz'de, son on yılda bu tür projelere önemli yatırımlar yapılmış olup, Baixo Sabor

hidroelektrik projesinin bu yatırımların en önemlilerinden biri olduğu ifade edilmiştir. Bu iki barajın, Portekiz'in kuzeydoğusunda, büyük bir jeolojik fay hattına yakın bir konumda yer aldığı belirtilmiştir. Bölgenin yüksek sismik riski göz önünde bulundurularak, barajların sismik izleme sistemleri tasarlanmıştır. Bu sistemler hem baraj galerilerinde hem de rezervuar boyunca yer alan istasyonları kapsamaktadır. Elde edilen deprem kayıtlarının verileri analiz edilmiştir. Çalışmada, Portekiz baraj güvenliği mevzuatı, bölgesel jeolojik ve tektonik ortamların tanımı ve sismik izleme sistemlerinin temel özellikleri açıklanmaktadır. Ayrıca, barajların ilk işletme döneminde elde edilen önemli sonuçları sunulmaktadır. Sonuçlarda, sismik ve dinamik yükler arasında doğrudan bir ilişki olduğu ifade edilmiştir. Elde edilen veriler hem boş hem de dolu rezervuar durumları için yapılan zorlanmış titreşim testlerinin sonuçlarıyla kalibre edilen sayısal modellerle karşılaştırılmıştır. Bu izleme sistemlerinin, deprem olayları sırasında baraj davranışının değerlendirilmesinde, sayısal modellerin geliştirilmesinde ve özellikle yeni davranış modellerinin oluşturulmasında önemli bilgiler sağladığı belirtilmektedir.

Pereira (2020) tarafından hazırlanan tez kapsamında, barajların dinamik davranışlarının değerlendirilmesi ve Yapı Sağlığı İzlemesi için sayısal ve deneysel yöntemlerin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Ana hedef, farklı özelliklere sahip barajlarda çevresel titreşim testlerinin yapılması ve yeni inşa edilen beton kemer barajlarda kurulan sürekli dinamik izleme sistemlerinin incelenmesidir. Çalışma, barajların yapısal bütünlüğünü doğrulamak için modal parametrelerin otomatik ve sürekli tanımlanmasına yönelik algoritmalar ve çevre koşullarının modal tahminler üzerindeki etkilerini en aza indirecek araçların kullanılmasını içermektedir. Sayısal simülasyonlar aracılığıyla oluşturulan hasar senaryolarının, hasar tespit araçlarının etkinliğinin test edilmesi için kullanıldığı ifade edilmektedir. Çevresel titreşim testlerinden elde edilen veriler, beton barajların işletme modal analizi ile uyumlu olup olmadığını belirlemek için değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı sensör türleri kullanılarak yapılan bu testlerin doğruluk düzeyi de incelenmektedir. Bu çalışmada, barajların dinamik davranışları ve Yapı Sağlığı İzleme ve değerlendirme konusunda kapsamlı bir yaklaşım sunulmakta ve baraj mühendisliği alanına önemli bir katkı sağlanmaktadır.

Fiorino vd. (2022) tarafından hazırlanan çalışma kapsamında, baraj gibi büyük yapıların Yapı Sağlığı İzlemesine odaklanılmakta ve yalnızca görsel denetimin kısıtları nedeniyle bu alanda yapılan araştırmaların artan popülaritesini ele aldığı ifade edilmektedir. Çalışmada, dünya çapında çeşitli barajlarda uygulanan iki temel izleme yöntemi olan statik

ve dinamik izleme yöntemlerinin avantajları ve sınırlamaları üzerine bir literatür taramasına değinilmiştir. Çalışmanın odak noktasının, betondaki çekme hasarıyla ilişkili olarak üç farklı parametre kullanılarak gerçekleştirilen bir duyarlılık analizi olduğu ifade edilmiştir. Bu analizde, elastisite modülündeki değişimlerin yapısal özellikler üzerinde en hassas etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bulguların, farklı su seviyelerine maruz bırakılarak yapılan yinelemelerle desteklendiği ve bu yinelemelerin, gelecekteki sismik olaylarda barajın hasar durumunu tahmin etmek için farklı senaryoların simülasyonunu mümkün kıldığı belirtilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, baraj yapısının çeşitli senaryolar altında modelleri oluşturulmuştur. Bu analiz ile, eleastisite modülündeki değişikliklerin, kütle yoğunluğu ve Poisson oranındaki değişikliklere kıyasla çıktı üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir. Su seviyesindeki artışın geometrik değişimleri ve tabandaki gerilimi artıracakları belirtilmiştir. Koyna Barajı örneğinden yola çıkılarak yapılan bu çalışma, ABAQUS baraj veri tabanı kullanılarak gelecekteki sismik olaylarda barajın hasar durumunu, yerini ve şiddetini tahmin etmek için önemli bir referans sağlamaktadır. Bu tür analizlerin, barajların yapı sağlığı izlemesinde ve gelecekteki risk yönetiminde kritik bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

Oliveira ve Alegre (2022) tarafından bu çalışma kapsamında, Portekiz'de bulunan ve sürekli izleme sistemi ile izlenen tarihi Cabril Barajı'nın modal parametreleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. 1954'ten itibaren işletilen çift eğrilikli kemer baraj rezervuarının ilk defa su ile doldurulması sırasında barajın mansap yüzeyinde yatay çatlakların meydana geldiği ifade edilmiştir. 2008 yılından itibaren bu yapısal sorunların haricinde barajın, sismik davranışını ve yapısal sağlık durumunu izlemek amacıyla barajın gelişmiş bir sürekli dinamik titreşim izleme sistemiyle donatıldığı belirtilmektedir. Çalışmada, barajın işletme esnasında ölçülen titreşimlerden elde edilen ana titreşim modlarının doğal frekansları ve mod şekilleri barajın sonlu elemanlar modeli kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalı modal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu süreç, baraj-rezervuar-temel sisteminin detaylı bir değerlendirmesini içermektedir. Sunulan bulgularda, barajın yatay çatlaklarının üzerindeki blokların hareketlerinden belirgin şekilde etkilenen belirli bir titreşim modunun olduğunu ifade edilmiştir. Ayrıca, yapılan karşılaştırmalı çalışma ile, özellikle yatay çatlakların baraj modeline entegrasyonu açısından, sonlu eleman modelinin kalibrasyonunu sağlamaktadır. Bu çalışmanın, Cabril Barajı gibi tarihi ve önemli yapıların sismik davranışlarının ve yapısal sağlığının daha iyi anlaşılması için önemli bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

Sarkar vd., (2023) tarafından yapılan çalışmada, Yapı Sağlığı İzlemenin büyük öneme sahip olduğu yapılardan biri olan barajlardaki etkisini yavaş ve geri döndürülemez bir şekilde memba yönünde hareket eden bir kemer baraj örneği ile incelemesi ele alınmıştır. Bu baraj, hidro-metrolojik, jeoteknik, jeodezik ve sismik izleme gibi çeşitli enstrümantasyon türleriyle donatılmıştır. Çalışmanın ana amacı, barajın yer değiştirmesini, sayısal modellerle karşılaştırarak bu modellerin güvenilirliğini doğrulamak ve bu sayede sayısal modellemeye bir güven düzeyi kazandırmaktır. Bu amaçla, baraj-rezervuar-temel etkileşimli üç boyutlu termo-mekanik analizi yapılmıştır. Ek olarak, barajın gelecekteki yer değiştirmesinin tahmin edilmesi için, barajın içindeki sensörlerden elde edilen verilere dayanan ve Hidrostatik Sezon-Zamanı (HST) modeli adı verilen bir istatistiksel modele başvurulmuştur. Çalışmanın bulguları, enstrümantasyon verilerine dayanarak gözlemlenen yer değiştirmeler ile sonlu eleman analizinden hesaplanan yer değiştirmeler arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ayrıca, HST modelinin, gözlemlenen verilerle yakın bir eşleşme sağladığı, gelecekteki baraj davranışı için iyi tahmin yetenekleri sunduğu ve baraj yer değiştirmesi üzerindeki farklı etkileri izole etmeye yardımcı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Yapı Sağlığı İzlemenin baraj gibi büyük yapıların yönetiminde ve bakımında kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır.

Giahi vd. (2023) tarafından hazırlanan bu çalışma kapsamında, beton kemer barajların Yapı Sağlığının İzlenmesine ve hasar tespit yöntemlerine odaklanılmıştır. Barajlardaki lokal hasarların tespit edilememesi, ani çökmelere ve ciddi can ve mal kayıplarına neden olabileceği için, bu çalışmanın önemli bir gereklilik olduğu belirtilmiştir. Araştırma için, bir beton kemer barajın sonlu elemanlar modeli kullanılarak iki farklı analiz yöntemi uygulanmıştır. İlk olarak, statik frekans analizi ve dalgacık dönüşümü yöntemleri ile barajda oluşabilecek çatlaklar incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Modal Güvence Kriteri (MAC) ile karşılaştırılmıştır. İkinci olarak, dinamik ivme kayıtlarının uygulandığı bir analiz gerçekleştirilmiş ve bu yöntemle 16 farklı hasar yeri ve üç farklı hasar seviyesi (malzeme özelliklerindeki değişimler) incelenilmiştir. Dinamik yüklerin uygulandığı bu analizlerde, modal ve dinamik analizlerden elde edilen yer değiştirmeler dalgacık dönüşümü için kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, dinamik yüklerin uygulanması ve dalgacık dönüşümü yönteminin kullanılmasının, barajlardaki hasarların daha etkili bir şekilde tespit edilmesini sağladığı ifade edilmektedir. Bu tür analizler, barajların güvenliğinin sağlanmasında ve olası hasarların erken aşamada tespit edilmesinde büyük önem taşımaktadır, böylece ani ve topyekûn çökmelerin önlenmesine katkıda bulunmaktadır.

1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

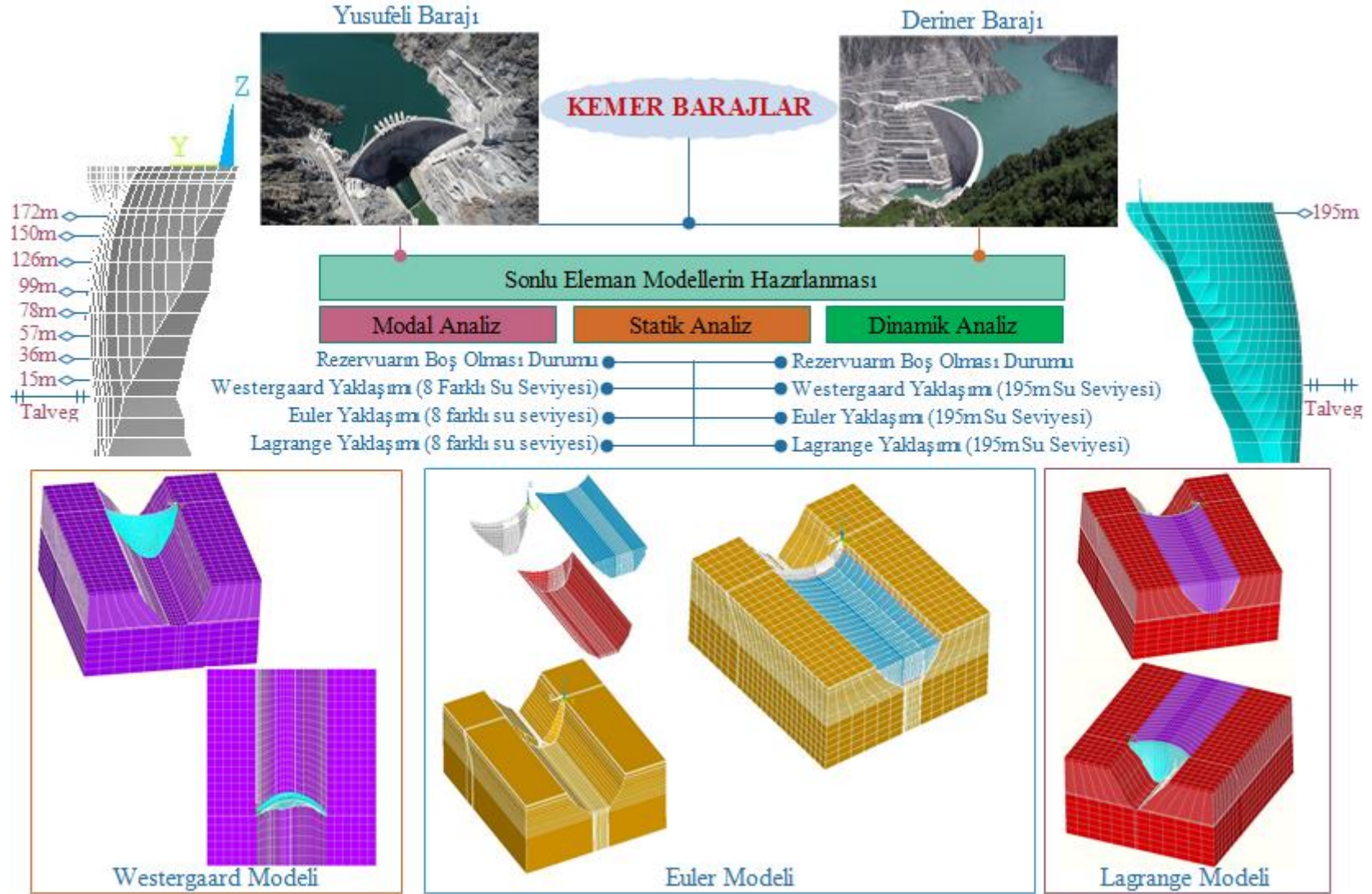
Yapılan literatür araştırmasında kemer barajların statik ve dinamik davranışlarını belirlemeye yönelik farklı yaklaşımların ele alındığı birçok sayısal çalışma bulunmaktadır. Rezervuar etkisini modellemek için genellikle literatürde bulunan ve işlem kolaylığı sağlaması adına Westergaard yaklaşımının oldukça sık kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca rezervuar modelleme yaklaşımlarının birlikte çözülerek karşılaştırıldığı çalışma sayısı yok denecek kadar azdır. Deneysel çalışmalar çoğunlukla kemer barajların dinamik karakteristiklerini belirlemek için uygulanmakta ve sayısal modellerin güncellenmesinde referans olarak kullanılmaktadır. Yapı Sağlığı İzleme alanında yapılan çalışmalar incelendiğinde ise genellikle belli başlı barajlar için kurulan sistemden elde edilen verilen farklı çalışmalar için kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra inşası tamamlanan ve su tutma sürecinden itibaren izlenen barajlara ait çalışma sayısı çok çok azdır. Mevcut olan çalışmalarda yüksekliği nispeten daha az sayılabilecek barajlarda gerçekleştirilmiştir.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez kapsamında, Türkiye'nin en yüksek iki kemer barajı olan Deriner ve Yusufeli Barajlarının yapısal davranışını rezervuar suyu etkisini dikkate alarak deneysel ve sayısal yöntemlerle analiz edilmesi ve barajlarda sıcaklık ve rezervuar su yüksekliğindeki değişim etkisinin belirlenebilmesi adına uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca uzun süreli izleme verilerinin yapay sinir ağları ile eğitilerek ortam sıcaklığı ve su seviyesine bağlı frekans değişim haritalarının oluşturulması hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde, kemer barajlar üzerine yapılan çalışmaların genel bir değerlendirmesi yapılmakta ve bu alandaki araştırmaların önemi vurgulanmaktadır. Tezin sayısal bölümü kapsamında, kemer barajların sonlu eleman modellemesi ve bu modellerde rezervuar etkileşimini tanımlamak için kullanılan Westergaard ek kütle, Euler akışkan eleman ve Lagrange akışkan eleman yaklaşımları ele alınmaktadır. Ayrıca, dinamik analizlerde Newmark yönteminin uygulanması ve kemer barajların deprem performansını değerlendirme kriterleri incelenmektedir. Tezin deneysel bölümünde ise, deneysel modal analiz teknikleri, ölçüm sistemleri ve yöntemleri ile Yapı Sağlığı İzleme sistemlerinin uygulamaları ve yapay sinir ağlarına ait içerikler detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Bu bölümde, kemer barajların yapısını ve davranışını daha iyi anlamak için gerekli olan sayısal ve deneysel yaklaşımlar kapsamlı bir şekilde sunulmaktadır.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölüm, deneysel/sayısal çalışmalar, Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları ve Yapay Sinir Ağları ile verilerin eğitilmesi olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır. Birinci kısımda uygulama olarak seçilen Deriner ve Yusufeli barajlarının çevresel titreşim testlerinin yapılması ve baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modellerinin oluşturularak modal, statik ve dinamik analizlerin uygulanmasından bahsedilmektedir. Bu kısımda, Deriner Barajı'nın maksimum su seviyesi durumu için, Yusufeli Barajı'nın ise rezervuarın boş olması ve su tutma süreci boyunca seçilen sekiz farklı su seviyesi durumu için analizleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı rezervuar modelleme yaklaşımı olan Westergaard ek kütlesi, Euler akışkan eleman ve Lagrange akışkan eleman yaklaşımlarına ait modal analiz sonucu elde edilen frekans ve mod şekilleri, barajların statik ve dinamik analizleri sonucu elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu bölümde yapılan sonlu eleman analizlerine ait akış diyagramı Şekil 1'de verilmektedir. Yapı Sağlığı İzleme çalışmalarının yer aldığı ikinci kısımda, Deriner ve Yusufeli Barajlarına ait uzun süreli izleme sonucu elde edilen frekans, sıcaklık ve su yüksekliğindeki değişimler detaylı olarak sunulmaktadır. Üçüncü kısımda ise uzun süreli izlemeye ait elde edilen frekans değerleri ve bu değerlerin elde edildiği tarih ve saate karşılık gelen ortam sıcaklığı ve su seviyesi değerleri kullanılarak yapay sinir ağları ile veri işleme yapılmıştır. Eğitilen veriler ile her iki barajın değişen su seviyesi ve ortam sıcaklığı değerlerine bağlı frekans değerlerini ifade eden frekans değişim haritaları oluşturulmuştur.

Üçüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.



Şekil 1. Tez kapsamında yapılan sayısal analizlere ait akış diyagramı

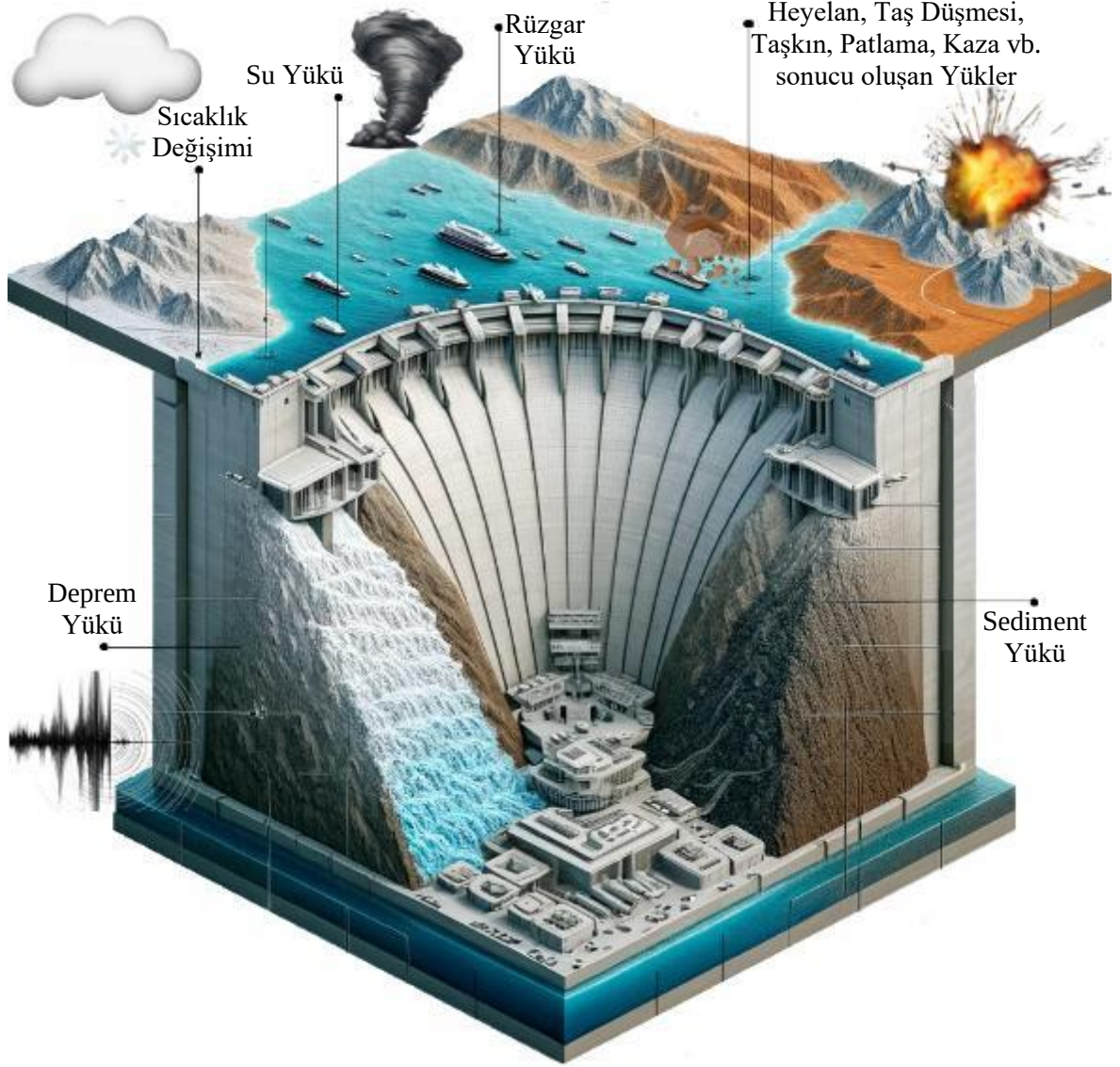
1.4. Kemer Barajlar

Kemer barajlar, stratejik, ekonomik ve sosyal açıdan büyük öneme sahiptir. Stratejik açıdan, bu barajlar bir ülkenin su kaynaklarını yönetme ve kontrol etme yeteneğinde kritik bir rol oynar. Özellikle su kıtlığı riski bulunan bölgelerde, kemer barajlar sayesinde suyun depolanması ve kurak dönemlerde kullanılması mümkün hale gelir. Ekonomik açıdan, kemer barajlar genellikle hidroelektrik enerji üretimi için kullanılır ve böylece yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak önemli bir katkı sağlarlar. Bu enerji üretimi, ulusal ekonomiler için stabil ve temiz bir enerji kaynağı oluştururken, enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltır ve enerji güvenliğini artırır. Sosyal açıdan, barajlar sulama, içme suyu temini ve sel kontrolü gibi hayati hizmetler sunarak toplumların yaşam kalitesini doğrudan etkiler. Özellikle tarım sektörü için su kaynaklarının yönetimi, gıda güvenliği ve kırsal kalkınma açısından hayati öneme sahiptir. Ayrıca, barajlar ve çevresindeki alanlar, rekreasyonel faaliyetler için popüler destinasyonlar haline gelerek yerel turizmi canlandırabilir. Bu çok yönlü faydaları ile kemer barajlar, sadece mühendislik harikaları olarak değil, aynı zamanda bir toplumun ekonomik ve sosyal gelişiminde de kilit bir role sahiptir.

Barajlar inşa sürecinden itibaren çevresel etkilere maruz kalmaya başlamakta olup, daha sonrasında rezervuarın su dolma süreci ile işletme koşulları altında bu duruma, rezervuar suyunun getirdiği ekstra etkilerde eklenmektedir. Kullanım ömrü boyunca ölü yük, rezervuar su yükü, taşkın yükü, kaldırma yükü, sediment yükü, buz yükü, sıcaklık, deprem yükü, dalga basıncı ve temelin tepkisi gibi kuvvetler beton barajları etkileyebilen başlıca yük çeşitleridir (Alçay, 2014). Baraja etkiyen yük çeşitlerine ait görsel Şekil 2’de verilmektedir.

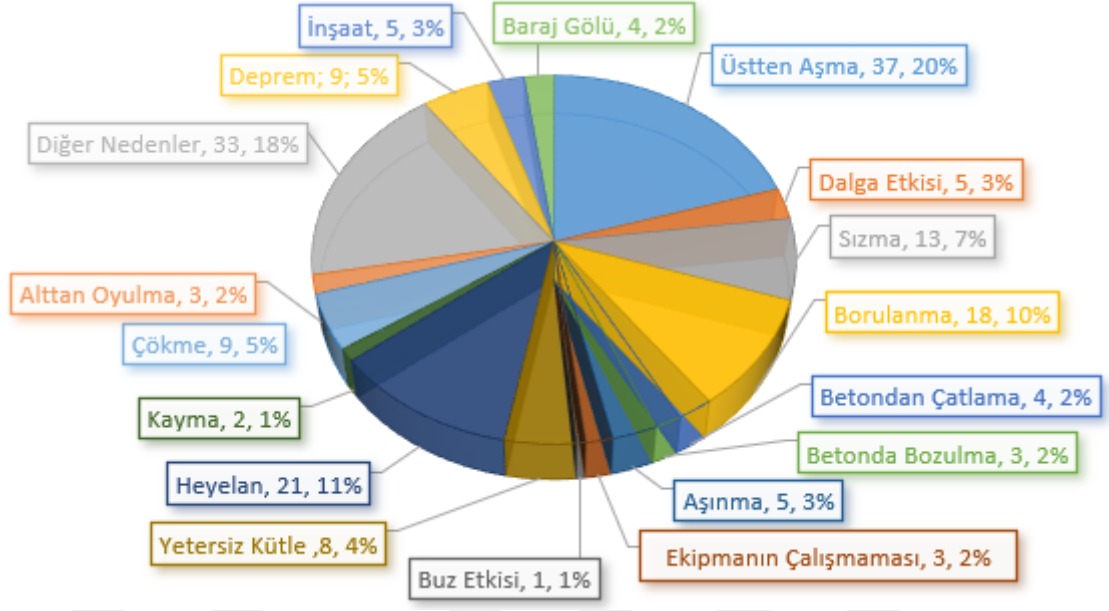
1929 yılında Berlin’de düzenlenen Dünya Enerji Konferansı, baraj mühendisliği alanında bir dönüm noktası olmuş ve bu konferansta paylaşılan geniş kapsamlı bilgiler, Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu’nun (ICOLD) kurulmasına ilham kaynağı olmuştur. ICOLD’un kuruluşu, dünya genelinde barajların performans izleme ve güvenlik yönetimi pratiklerinde uluslararası bir standart oluşturmayı hedeflemiştir. Bu girişimden etkilenen birçok ülke, ICOLD’un önerilerini temel alarak kendi ulusal komisyonlarını oluşturmuş ve bu komisyonlar aracılığıyla barajlarının güvenlik ve performansını sürekli olarak izleme altına almıştır. Bu ulusal komisyonlar arasında Avustralya’dan ANCOLD, Brezilya’dan BNCOLD, İspanya’dan SPANCOLD, İtalya’dan ITALCOLD, Amerika Birleşik Devletleri’nden USCOLD ve Türkiye’den TRCOLD gibi örnekler bulunmaktadır. Bu

komisyonlar, kendi ülkelerindeki barajların yönetimi, bakımı ve güvenliği konularında kritik rol oynayarak, uluslararası düzeyde kabul görmüş standartlara uyum sağlama çabalarını koordine etmektedirler (Ağırlioğlu, 2011).



Şekil 2. Beton barajlara etkimesi muhtemel yük çeşitlerine ait görsel

İnsanlık tarihi boyunca kayıtlı olan 300'den fazla barajın yıkıldığı bilinmektedir. Baraj yıkılmalarına ilişkin ilk ciddi çalışmalar 1967'de ICOLD tarafından 1850-1950 aralığını dikkate alarak 200 baraj örneği ile yapılmıştır. Barajların yıkılma nedenleri, yıkılan baraj sayısı ve yüzdesel gösterimleri Şekil 3'te özetlenmektedir (Erguvanlı vd., 2016).



Şekil 3. Beton barajlara etkimesi muhtemel yük çeşitlerine ait görsel

Tung ve Yen (1993) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, hidrolik yapıların yıkılma mekanizmaları iki ana kategori altında incelenmektedir: yapısal yıkılma ve performansa dayalı yıkılma. Yapısal yıkılma durumunda, yapının fiziksel hasar görmesi veya yapısal özelliklerinde değişiklik olması söz konusudur, bu da yapının tasarlanan işlevselliğini yerine getirememesine yol açar. Örneğin, bir barajın gövdesinde çatlaklar oluşması veya temelinde kaymalar meydana gelmesi yapısal yıkılma kapsamına girer. Diğer yandan, performansa dayalı yıkılma ise, yapının tasarlanmış performans sınırlarının aşılmasıyla ortaya çıkar. Bu durumda, yapının kendisi fiziksel olarak hasar görmeyebilir; ancak, aşırı su baskını gibi istenmeyen sonuçlar nedeniyle beklenen performansı sağlayamaz. Her iki yıkılma türü de hidrolik yapıların tasarımı ve işletilmesinde dikkate alınması gereken önemli risk faktörleridir.

Yüksek kemerli barajların nihai kapasitesini incelemek için hem sayısal yöntemler hem de deneysel model testleri kullanılmaktadır. Bu iki yaklaşımın bir araya getirilmesi, elde edilen sonuçların doğrulanması ve birbirlerini tamamlaması açısından önemlidir. Böylece, kemer baraj sistemlerinin nihai kapasiteleri hakkında daha kapsamlı ve somut bilgilere ulaşılabilir (Wang vd., 2014).

1.5. Kemer Barajların Sonlu Eleman Yöntemiyle Modellenmesi

Kemer barajların ince yapısal kesitleri, onların dinamik etkilere karşı hassasiyetini arttırır, bu yüzden bu yapıların davranışlarının detaylı bir şekilde incelenmesi için üç boyutlu sonlu eleman analizleri zorunludur. Özellikle sismik aktiviteler sırasında, kemer barajlar sadece üzerlerindeki su kütlesiyle değil, aynı zamanda konumlandırıldıkları vadilerin zemin yapısıyla da etkileşime girerler. Bu nedenle, kemer barajların analizi için kullanılan sonlu eleman modellemesi, bu üçlü etkileşimi; baraj-rezervuar-temel arasındaki dinamik ilişkileri kapsamlı bir şekilde ele almalıdır. Bu etkileşimlerin tam olarak modellenmesi, barajın sismik olaylarda göstereceği tepkinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi için kritik öneme sahiptir.

Kemer gövdenin sonlu eleman modellenmesinde, üç boyutlu katı veya kabuk elemanlar tercih edilebilmektedir. Bu modelleme sürecinde, genellikle detaylı geometrik ve yapısal analizler sağlayan 8 veya 20 düğüm noktasına sahip katı elemanlar kullanılmaktadır. Katı elemanlar kullanılarak oluşturulan bir kemer baraj modelinin eleman ağı, geometri ve yer değiştirmeleri daha karmaşık kuadratik fonksiyonlarla modelleyen kabuk elemanlara göre daha yoğun olmalıdır (USACE, 2003). Bu, analiz sonuçlarının hassasiyeti ve güvenilirliği açısından kritik bir faktördür. Sonuçların doğruluğunu etkileyen bir diğer önemli faktör ise sonlu eleman ağının seçimidir. Barajın tasarım özellikleri, özellikle kret uzunluğu, taban genişliği, eğrilik yarıçapı ve açısı gibi faktörler, kullanılacak eleman tipi ve düğüm noktası sayısı gibi parametrelerin belirlenmesinde temel alınır. Analiz sürecinde, lineer veya lineer olmayan analizler için farklı modellerin yanı sıra, dinamik davranış, gerilme ve yer değiştirme gibi fiziksel ve yapısal özelliklerin detaylı incelenmesi gerekir. Bu bağlamda, çeşitli eleman boyutları ve tipleriyle farklı sonlu eleman ağları deneyerek, en uygun yapısal modelin seçimi yapılır (USACE, 1994). Lineer davranışların inceleneceği durumlarda model genellikle tek parça halinde tasarlanabilirken, lineer olmayan davranışların incelenmesi gerektiğinde model içerisinde büzülme derzi gibi özel yapısal noktaların da dikkate alınması gerekir (Karaton, 2004; Lemos, 2008). Bu süreç, kemer barajların güvenli ve etkin bir şekilde analiz edilmesi için hayati öneme sahiptir ve bu nedenle modelleme ve analiz aşamalarında büyük bir dikkat ve uzmanlık gerektirir.

Barajın deprem performansı üzerinde temelin etkisi göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir. Temel ile baraj arasındaki etkileşim, barajın sınırlarında ekstra esneklik ve sönüm sağlayarak doğal frekanslardaki değişimlere yol açmakta ve böylece barajın deprem sırasındaki davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etkileşim, temeldeki sönüm ve

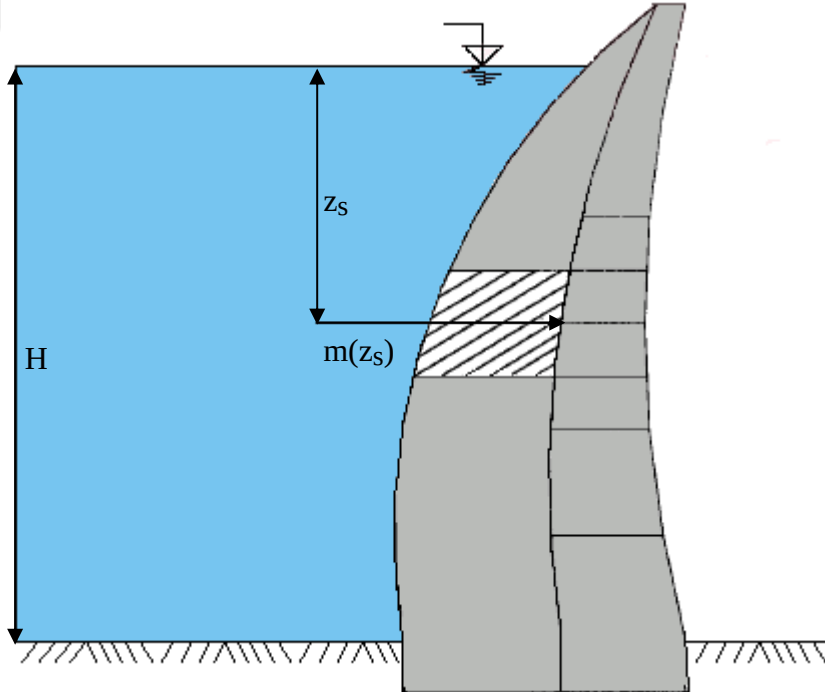
atalet kuvvetlerinin etkinliğini dikkate almayı gerektirir. Ancak, temelin sönümleme kapasitesini ve atalet etkilerini modellemek, bilgisayar tabanlı simülasyonlarda belirli zorluklar oluşturabilir. Bu nedenle, baraj-temel etkileşimini simüle etmek için sıklıkla kütsüz temel yaklaşımı kullanılır; bu yaklaşımda temel yalnızca esneklik sunar ve sönüm ile atalet etkileri göz ardı edilir. Bu durum, dinamik analiz sonuçları üzerinde beklenen etkilerin minimize edilmesi için, temelin baraj sınırlarının uygun bir mesafe boyunca genişletilmesini gerektirir. Bu genişletmenin uygun ölçüsü, literatürde temel ve barajın elastisite modüllerinin oranına (E_t / E_b) bağlı olarak belirlenebilmektedir (USACE, 2003). Eğer E_t / E_b oranı 1 veya daha büyükse temelin, barajın her iki yönüne ve yamaçlara doğru en az barajın yüksekliği kadar uzatılması önerilir. Ancak, bu oran 0.5 ile 0.25 arasında ise, daha esnek bir temel yapı söz konusu olduğundan, temelin her yönde baraj yüksekliğinin en az iki katı kadar genişletilmesi önerilir. Bu yaklaşımlar, temel-baraj etkileşiminin dinamik analizlerde etkili bir şekilde modellenmesini sağlayarak, barajların deprem sırasında beklenen performansının daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanır. Clough (1980) tarafından önerilen kütsüz temel modeli, literatürde barajların sismik analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu model, deprem ivme kayıtlarının, enerji emilimini hesaba katmadan doğrudan temel sınırlarından baraj gövdesine aktarılmasını sağlar. Bu yöntemle, yüzeyden alınan deprem ivme kayıtları doğrudan analizlerde kullanılabilir.

1.6. Baraj Rezervuarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi

Barajın sismik davranışının anlaşılmasında kritik bir rol oynayan rezervuar suyu etkisi, baraj arkasında oluşan hidrostatik ve hidrodinamik basınçlarla baraj gövdesine ek yükler ekler, bu da barajın sismik tepkisini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, sıvı-yapı etkileşimi veya diğer bir deyişle baraj-rezervuar etkileşimi, sonlu eleman modellemesinde dikkatle ve doğrulukla ele alınmalıdır. Baraj-rezervuar etkileşimi bazı kabuller ve idealleştirmeler yapılarak genellikle literatürde üç ana yaklaşım kullanılarak modellenmektedir. Bu yaklaşımlar, sıvı-yapı etkileşimini farklı derecelerde karmaşıklık ve doğrulukla ele alır ve her biri, barajın deprem sırasındaki davranışının analiz edilmesinde farklı avantajlar sunar. Bu yöntemlerin her biri, baraj tasarımı ve güvenliği açısından baraj-rezervuar sistemlerinin dinamik etkileşimini anlamak için kritik öneme sahiptir.

1.6.1. Westergaard Ek Kütle Yaklaşımı

Westergaard (1933) tarafından ortaya koyulan teorik yaklaşım, kemer barajların sismik analizleri için bir dönüm noktası oluşturmıştır. Bu metodoloji, baraj ve temelin mutlak rijit kabul edildiği, rezervuarın ise derinliğinin sabit ve teorik olarak sonsuz bir uzunluğa sahip olduğu varsayımlarına dayanır. Ayrıca, suyun sıkıştırılamaz bir akışkan olarak ele alındığı ve yüzey dalgalarının oluşmadığı kabulü yapılmaktadır. Bu çerçevede, Westergaard (1933), rezervuardaki su hareketinin, baraj gövdesi üzerinde dinamik bir yük oluşturduğunu ifade eder. Bu dinamik yük, esas olarak barajın düşey memba yüzeyine yatay dış yükler altında uygulanan harmonik kuvvetler şeklinde modellenir ve hidrodinamik basınç olarak adlandırılır. Westergaard tarafından geliştirilen bu "ek kütle" yaklaşımında, rezervuardaki suyun barajın sismik davranışına katkısı, suyun eklenmiş bir kütlesi olarak dikkate alınır. Bu ek kütle, baraj memba yüzeyindeki düğüm noktalarına, suyun birim hacim ağırlığı, yer çekimi ivmesi ve su derinliği temel alınarak eklenir. Bu süreçte, suyun her bir düğüm noktasındaki etkisi, tekil bir kütleye dönüştürülerek hesaplanmakta ve bu kütleler baraj modeline entegre edilmektedirler (Şekil 4, Denklem 1).



Şekil 4. Westergaard yaklaşımına göre hidrodinamik basınç dağılımı

$$m(z_s) = \frac{7}{8} \frac{w_s}{g} \sqrt{H_s z_s} \quad (1)$$

burada; m tekil kütleyi, w_s suyun birim hacim ağırlığını, g yerçekimi ivmesini, H_s su yüksekliğini ve z_s su yüzeyinden itibaren derinliği göstermektedir. Eğriliğe sahip yüzeylerde, deprem doğrultusu ile baraj memba yüzeyi normali arasındaki açı dikkate alınarak tekil kütleler hesaplanmaktadır (Prisco vd., 1985). Bu yaklaşım, barajın sismik analizi sırasında, rezervuardaki suyun baraj üzerinde oluşturduğu dinamik basınçların hesaplanmasını basitleştirir ve analizin daha pratik hale gelmesini sağlar.

Westergaard'ın önerdiği ek kütle yaklaşımında, barajın memba yüzeyine eklenen kütleler, baraj-rezervuar-temel sisteminin dinamik analizinde sadece kütle matrisine (m) doğrudan bir etkide bulunur. Bu ek kütle, sistemin sönüm (c) ve rijitlik matrislerini (k) etkilemez (Denklem 2). Bu durum, sistemin modal analizi sırasında, eklenen kütlelerin kütle matrisindeki etkisine bağlı olarak sistemin doğal frekanslarında bir düşüşe neden olur.

$$m_s \ddot{U} + c_s \dot{U} + k_s U = -1 m_s \ddot{U}_g \quad (2)$$

Burada hareket denkleminde; m_s , c_s , k_s sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\ddot{U}$, $\dot{U}$, U ise aynı sistemin rölatif ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini ifade etmektedir.

1.6.2. Euler Akışkan Eleman Yaklaşımı

Euler yaklaşımı (Dungar, 1978) temel olarak, barajın düğüm noktalarındaki yer değiştirme bilgileri ile rezervuarın düğüm noktalarındaki basınç bilgilerini birleştirerek, sıvı ve yapı arasındaki dinamik etkileşimi simüle eder. Euler yaklaşımında, baraj ve rezervuar arasındaki sınır yüzeyde özel arayüz denklemleri kullanılarak, bu iki farklı ortam arasındaki etkileşim modellenir. Bu, analiz sürecini karmaşık hale getirir çünkü oluşturulan sonlu eleman denklem sistemleri, geniş bant genişliklerine ve simetrik olmayan yapıya sahiptir. Ancak, bu yaklaşım sayesinde, sıvının dinamik davranışının ve baraj üzerinde oluşturduğu basınç değişimlerinin daha gerçekçi bir temsili mümkün olmaktadır. Euler formülasyonunda kullanılan akışkan elemanları, rezervuardaki sıvının davranışını simüle etmek için tasarlanmıştır. Bu elemanlar, sıvının kendi ağırlığı ve çevresel ivmeler gibi faktörlerden kaynaklanan basınç değişimlerini doğrudan hesaplayabilmektedir. Navier-Stokes denklemlerinin çözümü sayesinde, bu yaklaşım, sıvının hidrodinamik veya hidrostatik basınç değişimlerini kapsamlı bir şekilde modelleyebilmektedir. Bu yaklaşım, sıvının sıkışabilir olduğunu, viskoz sönümlemenin ihmal edildiğini ve sıvının yoğunluğunun tüm

rezervuar boyunca sabit olduğunu varsaymaktadır. Bu durum, sıvının dinamik basınç değişimlerini ve bunların baraj gövdesi üzerindeki etkilerini daha doğru bir şekilde yansıtmamıza yardımcı olmaktadır. Sıvının hareket denklemi hesaplanırken viskozitenin ihmal edilmesi ile Navier – Stokes teoremi Denklem 3’te ki gibi dikkate alınmaktadır.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0$$

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (3)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$$

Sonlu elemanlar analizinde sonlu sayıda ayırık değerlerle temsil edildiğinde;

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = N^T \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Yapı için hareket denklemi (Denklem 2) ve rezervuardaki sıvı için hareket denklemi (Denklem 3) birleştirildiğinde; Denklem 5 sıvı-yapı etkileşimi söz konusu olduğu durumda ortamın dinamik hareketini temsil eden sonlu eleman denklemini, Denklem 6 sıvı sistemine ait sonlu eleman hareket denklemini, Denklem 7 ise sıvı-yapı sistemine ait ortak hareket denklemini göstermektedir.

$$m_s \{\ddot{u}\} + c_s \{\dot{u}\} + k_s \{u\} = F_s + [R] \{p\} \quad (5)$$

$$m_f \{\ddot{P}\} + c_f \{\dot{P}\} + k_f \{P\} = F_f - \rho_w [R]^T \{\ddot{u}\} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ \rho_w [R]^T & m_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Burada; m_f yüzey dalgalarının etkisinin ihmal edildiği sıvı kütlesi, c_f rezervuar tabanı dalga sönümleme etkisinden dolayı ortaya çıkan sönümü içeren sıvı sönümü, k_f sıvı rijitliğini göstermektedir. $[R]$ sıvı-yapı arayüzeyi ile ilgili bir matris olup, yapı ortamında oluşan

ivmelerden sıvı yük vektörünü ve sıvı ortamında oluşan basınçlardan yapı düğüm noktası ilave kuvvetlerini belirleme kullanılır. $\{\ddot{u}\}$ sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı ivmelerini, F_f sıvı tabanındaki yer ivmelerinden dolayı ortaya çıkan yük vektörünü, $\{P\}$ hidrodinamik basınç vektörünü, $\{\dot{P}\}$ ve $\{\ddot{P}\}$ ise vektörün zamana göre bir ve iki kez kısmı türevini göstermektedir.

1.6.3. Lagrange Akışkan Eleman Yaklaşımı

Lagrange yaklaşımı, kemer barajlar ve rezervuarın dinamik analizinde kullanılan bir yöntemdir ve hem baraj hem de suyun yer değiştirme bazlı modellenmesine imkan tanır. Bu yaklaşımda rezervuar, lineer elastik özelliklere sahip, sıkışabilir, dönme hareketlerinin kısıtlandığı ve viskoz etkilerin ihmal edildiği bir ortam olarak kabul edilir. Bu sayede, suyun dinamik davranışı, basınç ve yer değiştirmeler üzerinden modellenenebilir, böylece barajın su kütlesi ile olan karmaşık etkileşimleri detaylı bir şekilde incelenebilir. Lagrange yaklaşımının kilit avantajlarından biri, yapı ve rezervuar arasında doğrudan etkileşimi sağlamanın yanı sıra, oluşturulan matematiksel modelin simetrik ve daha sıkı bir yapıya sahip olmasıdır. Ayrıca, Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılan analizlerde, baraj ve suyun etkileşimi arasındaki sınır koşullarını belirlemek için özel ara yüzey denklemlerine ihtiyaç duyulmaz. Bu özellik, sayısal çözümlerinin daha etkin ve hızlı yapılabilmesini sağlar, bu da özellikle büyük ölçekli mühendislik projelerinde zaman ve kaynak tasarrufu anlamına gelir. Analiz sürecinde, su elemanlarının yer değiştirmeleri, maddenin basınç altındaki davranışına göre modellenir. Bu, suyun dinamik basınçlarının ve barajın yapısına etkilerinin, suyun kendi ağırlığı ve çevresel ivmelerden kaynaklanan basınç değişimleri dikkate alınarak hesaplanmasını sağlar. Dolayısıyla, Lagrange yaklaşımı ile, kemer barajların ve rezervuarlarının dinamik analizinde, suyun etkisinin ve barajın sismik ve diğer dinamik yüklemelere tepkisinin detaylı bir şekilde incelenmesi mümkün olur. Hacimsel şekil değiştirme ε_v , kartezyen koordinatlardaki şekil değiştirme bileşenleri ile;

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (8)$$

$$\sigma_m = K \varepsilon_v \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ sırayla x, y ve z doğrultularındaki şekil değiştirme bileşenlerini göstermektedir. Sıvının toplam şekil değiştirme enerjisi;

$$\pi_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon_v K \varepsilon_v dV \quad (10)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Sonlu elemanlar analizinde sonlu sayıda ayırık değerlerle temsil edildiğinde toplam şekil değiştirme enerjisi;

$$\pi_e = \frac{1}{2} U^T K_f U \quad (11)$$

Burada U yer değiştirme vektörünü (u, v ve w) ve K_f rezervuardaki sıvının rijitlik matrisini temsil etmektedir (Denklem 12)

$$u = \frac{1}{4} (u_1(1-s)(1-t) + u_2(1+s)(1-t) + u_3(1+s)(1+t) + u_4(1-s)(1+t)) \quad (12)$$

$$v = \frac{1}{4} (v_1(1-s)(1-t) + v_2(1+s)(1-t) + v_3(1+s)(1+t) + v_4(1-s)(1+t))$$

$$K_f = \int \left(\begin{bmatrix} x_{1s} & Y_{1s} \\ x_{1t} & Y_{1t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{1,s} & N_{2,s} & N_{3,s} & N_{4,s} \\ N_{1,t} & N_{2,t} & N_{3,t} & N_{4,t} \end{bmatrix} \right) K x \quad (13)$$

$$= \int B^T K B dA$$

Lagrange yaklaşımına ait akışkan eleman için hareket denklemi;

$$m_f \ddot{U} + k_f U = R \quad (14)$$

Yapı için hareket denklemi Denklem 2 ve rezervuardaki sıvı için hareket denklemi Denklem 14 birleştirildiğinde;

$$m_c \ddot{u} + c_c \dot{u} + k_c u = -1 m_c \ddot{u}_g \quad (15)$$

Denklem 14'te memba yüzeyindeki yapıya ve rezervuara ait yer değiştirmelerin birbirine bağlı olduğu durum (constraint) dikkate alınmaktadır. Denklem 14 simetrik bir sistem olup, tek bağımsız değişken yer değiştirmedir.

1.7. Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Tez çalışması kapsamında Artvin Çoruh Nehri üzerine kurulu Dünya'nın sayılı en yüksek barajları listesinde ve Türkiye'nin en yüksek iki kemer barajı olan Yusufeli ve Deriner Barajlarının sonlu eleman modelleri ANSYS (2016) programında oluşturularak, deprem performansının belirlenmesi amacıyla dinamik analizler yine bu programda gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde Newmark yöntemi kullanılmış olup, hız ve yer değiştirmeler t ile $t + \Delta t$ zamanı arasında;

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + [(1 - \gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (16)$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t(\Delta t) + [(0,5 - \beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t}](\Delta t)^2 \quad (17)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bathe, 1996; Chopra, 2006). Burada U_t , $\dot{U}_t$ ve $\ddot{U}_t$ sırasıyla t anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörleridir. $U_{t+\Delta t}$, $\dot{U}_{t+\Delta t}$ ve $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ ise $t + 1$ anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörleridir. β ve γ integrasyon parametreleri yöntemin stabilite ve doğruluğunu belirleyen karakteristikler olup, Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini ifade etmektedir. Chopra (2006) $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ aralığında seçilmesinin uygun olduğunu belirtmektedir. Hareket denklemi;

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (18)$$

şeklinde ifade edilmekte olup burada; M , C ve K ortak sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, U , $\dot{U}$ ve $\ddot{U}$ ise sistemin rölatif yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini ifade etmektedir. R ise ortak sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür. Denklem 18'in t ve $t + 1$ anındaki dengesi dikkate alındığında;

$$M\ddot{U}_t + C\dot{U}_t + KU_t = R_t \quad (19)$$

$$M\ddot{U}_{t+1} + C\dot{U}_{t+1} + KU_{t+1} = R_{t+1} \quad (20)$$

denklemleri elde edilir. Denklem 43'ten Denklem 42 çıkarılırsa artımsal hareket denklemi

$$M\Delta\ddot{U}_t + C\Delta\dot{U}_t + K\Delta U_t = \Delta R_t \quad (21)$$

elde edilmektedir. Burada, Δ değişim operatörünü göstermek üzere;

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{U}_t &= \ddot{U}_{t+1} - \ddot{U}_t \\ \Delta\dot{U}_t &= \dot{U}_{t+1} - \dot{U}_t \\ \Delta U_t &= U_{t+1} - U_t \end{aligned} \quad (21)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (16) ve (17) artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{U}_t = (\Delta t)\ddot{U}_t + \gamma(\Delta t)\dot{U}_t \quad (22)$$

$$\Delta U_t = (\Delta t)\dot{U}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_t + \beta(\Delta t)^2\Delta\ddot{U}_t \quad (23)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (23)'ten $\Delta\ddot{U}_t$ çekilirse;

$$\Delta\ddot{U}_t = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta U_t - \frac{1}{\beta(\Delta t)}\dot{U}_t - \frac{1}{2\beta}\ddot{U}_t \quad (24)$$

denklemini elde edilmektedir. Denklem (24), Denklem (22)'de yerine koyulursa;

$$\Delta\dot{U}_t = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}\Delta U_t - \frac{\gamma}{\beta}\dot{U}_t + (\Delta t)\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{U}_t \quad (25)$$

olarak elde edilmektedir. (24) ve (25) denklemleri artımsal hareket denklemi (21)'de yerine yazılarak düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \left(K + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}M\right)\Delta U_t &= \Delta R_t + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)}M + \frac{\gamma}{\beta}C\right)\dot{U}_t \\ &+ \left[\frac{1}{2\beta}M + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)C\right]\ddot{U}_t \end{aligned} \quad (26)$$

ifadesi elde edilmektedir. Her Δt zaman aralığı içinde statik denge konumu sağlanarak dinamik hareket denklemi çözülmektedir. Her bir hesaplama adımında ilk önce ΔU_t Denklem (26)'dan hesaplanmaktadır. Ardından Denklem (24) ve (25) yardımıyla $\Delta \dot{U}_t$ ve $\Delta \ddot{U}_t$ elde edilmekte ve işlemler tüm çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

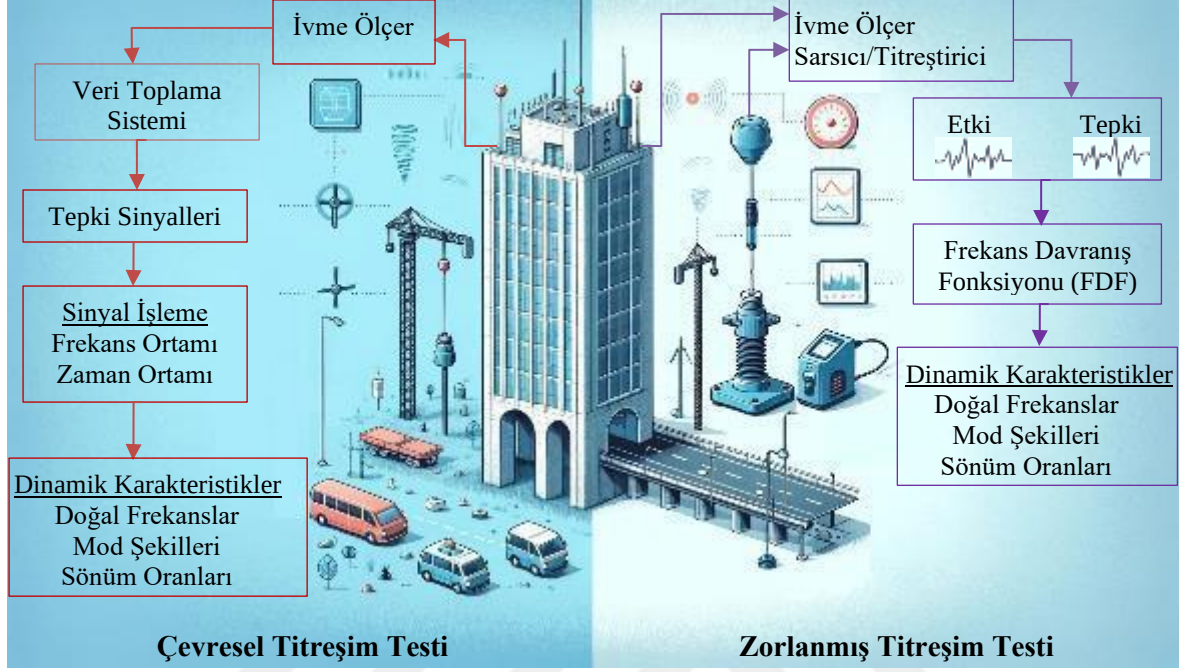
$$\begin{aligned} U_{t+1} &= U_t + \Delta U_t \\ \dot{U}_{t+1} &= \dot{U}_t + \Delta \dot{U}_t \\ \ddot{U}_{t+1} &= \ddot{U}_t + \Delta \ddot{U}_t \end{aligned} \quad (27)$$

1.8. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Deneysel Modal Analiz (DMA), yapısal dinamiklerin incelenmesi ve karakterize edilmesi için kullanılan bir test yöntemidir. Bu yöntem, 20. yüzyılın ortalarında, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerindeki karmaşık yapısal sistemlerin dinamik özelliklerini anlamak için geliştirilmeye başlanmıştır. 1960'lar ve 1970'ler, DMA'nın hızla geliştiği ve yaygınlaştığı yıllardır. Bu dönemde, dijital sinyal işleme teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte, modal analiz daha hassas ve erişilebilir hale gelmiştir. Deneysel Modal Analiz yöntemi, bir yapının veya sistemdeki elemanların doğal frekanslarını (rezonans frekansları), sönüm oranlarını ve mod şekillerini belirlemeyi amaçlar. Bu parametreler/dinamik karakteristikler, yapının dinamik davranışını anlamak ve mühendislik tasarımlarını doğrulamak için hayati öneme sahiptir. Deneysel Modal Analiz, genellikle bir yapının titreştirilmesi ve bu titreşime yanıt olarak oluşan hareketlerin ölçülmesi işlemini içermektedir. Titreşim, dış bir kuvvet (darbe çekiçleri, sarsıcılar vb.) kullanılarak veya doğal çevresel uyarımlar (rüzgar, trafik vb.) ile sağlanabilmektedir. Yapının tepkisi, ivmeölçerler, yer değiştirme sensörleri veya lazer Doppler vibrometreler (LDV) gibi cihazlarla kaydedilmektedir. Bu veriler daha sonra, yapının modal karakteristiklerini çıkarmak için analiz edilmektedir.

Deneysel Modal Analiz Yöntemi, uygulama ve uyarım olarak Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki yöntem de mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerini belirlemede değerli araçlardır. Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY), gerçek hizmet koşulları altında yapısal davranışı değerlendirmek için uygunken, Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY) daha kontrollü bir test ortamında detaylı analizler yapmak için idealdir. Hangi yöntemin kullanılacağı, test edilecek yapının

özelliklerine, erişilebilirliğine ve testin amaçlarına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5'te Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Testlerini özetleyen akış diyagramı verilmektedir.



Şekil 5. Çevresel ve Zorlanmış Titreşim testlerine ait akış diyagramı

Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY), yapıların doğal çevresel uyarımlara verdiği tepkileri ölçmek için kullanılır. Bu uyarımlar rüzgar, trafik, dalga etkisi gibi doğal kaynaklardan gelebilir ve herhangi bir dış kuvvet uygulanmasını gerektirmez. ÇTY’de yapı ölçülemeyen etki kuvvetlerine maruz kaldığı için Etki davranış Fonksiyonu belirlenememekte bu nedenle bu yöntem literatürde Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Analizi olarak isimlendirilmektedir (Brincker vd., 2003). Çevresel Titreşim Yönteminin avantajı, yapının operasyonel durumdayken, yani gerçek hizmet koşulları altında test edilmesidir. Bu, özellikle büyük ölçekli yapılar veya erişimi zor olan yapılar için önemlidir çünkü bu tür yapılar için zorlanmış titreşim testleri pratik olmayabilir. Çevresel titreşim testleri genellikle daha uzun süreli ölçümler gerektirir, çünkü doğal uyarımların yeterli enerji seviyesine ulaşması beklenir. Çevresel titreşim yönteminin bir diğer avantajı da yapının sönüm oranlarının daha doğru bir yaklaşımla tespit edilebilmesine imkan sağlamasıdır.

Çevresel Titreşim Yöntemi kapsamında yapılan analizlerde, yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi için hem frekans tanım alanı hem de zaman tanım alanı

algoritmaları etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu iki temel yaklaşım, yapısal tepkilerin ölçüm ve analiz süreçlerinde farklı metodolojilere dayanmaktadır. Frekans tanım alanındaki analizler, genellikle yapısal tepkilerin frekans spektrumundaki özelliklerini incelemeye yöneliktir. Bu yöntemler, yapıya etki eden kuvvetler ile yapıdan elde edilen tepkiler arasındaki ilişkiyi güç spektrum yoğunluğu (PSD) kullanarak inceler. Piklerin Seçilmesi yöntemi, tepki spektrumundaki belirgin pikleri tespit ederek doğal frekansları ve ilgili modları belirler. Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yöntemleri ise, daha karmaşık algoritmalar kullanarak yapısal tepkilerin frekans bileşenlerini daha ayrıntılı bir şekilde analiz eder ve yapısal dinamik özellikler hakkında daha derinlemesine bilgiler sağlar. Zaman tanım alanında yapılan analizler ise, yapısal tepkilerin zaman içindeki değişimini ve bu tepkilerin birbiriyle olan korelasyonunu inceler. Bu yöntemler, yapısal tepkilerin zaman serileri üzerinde çeşitli istatistiksel ve matematiksel işlemler uygulayarak, yapıya ait dinamik karakteristikleri ortaya çıkarır. En Büyük Olabilirlik Yöntemi, veri setindeki gürültüyü en aza indirgeyerek en uygun dinamik model parametrelerini belirler. Rastgele Azalım Yöntemi, tepki sinyallerinin zaman içindeki azalma oranlarından yola çıkarak sönüm oranları gibi parametreleri tespit eder. Rekürsif Teknikler ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri ise, zaman serisi verilerini sürekli güncelleyerek ve geliştirerek yapısal dinamik özelliklerin daha dinamik ve güncel bir analizini sunar (Ramos, 2007). Tez çalışması kapsamında yapıların dinamik davranışlarını elde etmek amacıyla, Çevresel Titreşim Yöntemlerinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi olan Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi (GFTAA) kullanılmıştır (Zahid vd., 2020).

Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY), yapının belirli frekanslarda dışarıdan bir kuvvet uygulanarak titreştirilmesi esasına dayanır. Ölçülebilen bu kuvvet, darbe çekiçleri, elektrodinamik sarsıcılar veya diğer mekanik aktüatörler kullanılarak sağlanabilir. Zorlanmış yapıdan ölçülen sinyaller frekans tanım alanında Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak, etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi gösteren matris yerine Transfer Matrisi olarak adlandırılan Frekans Davranış Fonksiyonu (FDF) kullanılmaktadır (Schwarz ve Richardson, 1999). Farklı sayısal teknikler ile Frekans Davranış Fonksiyonu kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilebilmektedir. Zorlanmış Titreşim Testleri, yapıya uygulanan kuvvetin büyüklüğü ve frekansı üzerinde tam kontrol sağlar, böylece spesifik modal parametrelerin daha hızlı ve verimli bir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır. Zorlanmış Titreşim Yöntemi, özellikle laboratuvar ortamında küçük ve orta

ölçekli yapılar için uygundur. Yapının dinamik davranışının detaylı bir analizi gerektiğinde tercih edilir. Bu yöntemle, doğal frekanslar ve mod şekilleri doğrudan ve hızlı bir şekilde belirlenebilir. Ancak, zorlanmış titreşim testleri, büyük yapılar için uygulanması zor ve maliyetli olabilmektedir.

Deneyisel Modal Analiz (DMA), yapısal mühendislikte kritik bir araçtır ve zamanla evrim geçirerek daha karmaşık yapıların incelenmesine olanak tanımıştır. Yöntemin geleceği, teknolojik ilerlemeler ve yeni bilimsel keşiflerle şekillenecek ve mühendislik tasarımı, doğrulama ve araştırma alanlarında daha etkili çözümler sunacak potansiyele sahiptir. Bu yöntem sayesinde, yapıların sismik davranışlarından uzay araçlarının titreşim kontrolüne kadar geniş bir yelpazede uygulama alanları bulunmaktadır ve bu alanlar, teknolojinin gelişimiyle birlikte genişlemeye devam edecektir. Özellikle, akıllı malzemelerin ve yapay zekanın yükselişi, DMA'nın uygulama alanlarını gün geçtikçe genişletecektir. Gelecek dönemlerde yeni sensör teknolojileri, daha hassas ve geniş alanlı ölçümler yapılmasını sağlayacak, böylece daha karmaşık yapıların ve malzemelerin analizi mümkün hale gelecektir.

1.9. Sonlu Eleman Model Güncelleme

Sonlu Eleman Model (SEM) güncelleme/iyileştirme, yapısal mühendislikte kritik bir öneme sahiptir. Bu süreç, gerçek yapıdan toplanan deneysel verileri, yani yapısal yer değiştirmeler, gerilmeler ve dinamik karakteristikler gibi ölçümsel verileri, sayısal sonlu eleman modelleriyle bütünleştirmeyi amaçlar. Sensörler aracılığıyla toplanan bu veriler, sayısal modelin daha doğru ve gerçeğe uygun hale getirilmesi için kullanılır. Temel amaç, sayısal analiz sonuçlarının deneysel bulgularla mümkün olduğunca uyumlu hale getirilerek, yapıların mevcut durumunun doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak ve olası hasarların yerini, büyüklüğünü ve şiddetini sayısal analizler ile öngörebilmektir. Bu süreç, yapıların performansını ve güvenliğini artırmak için hayati önem taşır.

Sonlu Eleman Model güncelleme/iyileştirme temel anlamda manuel ve otomatik olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Manuel güncelleme yöntemi, deneysel veriler ve gözlemler ışığında model parametrelerinde bilinçli değişiklikler yapılması durumudur. Bu süreçte, örneğin malzeme özellikleri, geometri veya mesnet koşulları gibi parametreler, deneysel sonuçlara daha iyi uyum sağlayacak şekilde belirli sınır koşulları altında değiştirilir. Manuel güncelleme, mühendisin deneyimi ve uzmanlığına büyük ölçüde bağlıdır ve

genellikle zaman alıcı bir süreçtir. Ancak, spesifik durumlar ve karmaşık problemler için özel çözümler geliştirmede etkili olabilmektedir. Otomatik güncelleme yöntemleri, deneysel verileri doğrudan kullanarak model parametrelerini sistemli bir şekilde değiştiren algoritmaları içermektedir (Altunışık vd. 2018). Bu süreç, genellikle optimizasyon teknikleri, istatistiksel yöntemler ve yapay zeka algoritmaları gibi çeşitli hesaplama araçlarını kullanmaktadır. Yapay Sinir Ağları, İstatistiksel Model Güncelleme, Genetik Algoritma, Optimum Matris Güncelleme ve Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme gibi çeşitli teknikler, literatürde otomatik sonlu eleman modeli güncellemesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Her biri, modelin farklı yönlerini iyileştirmeyi hedefler ve belirli durumlara ve veri setlerine göre avantajlar sunar.

Tez çalışması kapsamında, deneysel titreşim analizlerinden elde edilen dinamik karakteristikler referans alınarak manuel model güncelleme yöntemi kullanılmıştır.

1.10. Yapı Sağlığı İzleme

Yapı Sağlığı İzleme (YSİ), baraj ve tüm mühendislik yapılarının güvenliğini ve etkin bakımını sağlamak için hayati bir araç olarak işlev görmektedir. Bu süreç, sayısal modellerin güncellenmesine yardımcı olur, görsel denetimleri tamamlar ve bilinçli karar alma süreçlerine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, bakım ve rehabilitasyon programlarının planlanmasını kolaylaştırarak, yapının ömrü boyunca güvenliğinin sağlanmasına yardımcı olmaktadır (Sarkar vd., 2023).

Baraj ve rezervuarlar için sensör yerleşim ve izleme süreçlerinin baraj mühendisliğindeki önemini büyüktür. Baraj mühendisliğinin inceleme, planlama, tasarım, inşaat ve işletme olmak üzere her aşamasında yapısal davranışlarının izlenmesi için detaylı enstrümantasyon ve izleme yöntemleri gereklidir. Bu süreçler, barajların güvenliği ve performansının anlaşılması için hayati öneme sahip olup, aynı zamanda gelecekteki baraj tasarımları için değerli bilgiler sağlamaktadır. Barajların güvenliği ve etkin işletimi için, baraj gövdesi, temel, rezervuar ve nehir havzasına kapsamlı bir şekilde sensör yerleşimi yapılması ve izlenmesi gerekmektedir. Her tür baraj, rezervuar ve nehir havzası için farklı türde sensör yerleşimi ve izleme yöntemleri gerekmektedir. Barajlar etüt, tasarım ve inşaat aşamalarında dikkatle inşa edilmiş olsalar da geçmişte meydana gelen ciddi baraj kazaları, barajların sürekli olarak izlenmesinin ve güvenliklerinin değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, baraj ve rezervuarların işletimi sırasında, sürekli izleme ve

değerlendirme süreçleri baraj güvenliği için temel bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Bu süreçler, baraj mühendisliği ve kamu güvenliği açısından oldukça önemli olup, herhangi bir tehlike veya riskin erken tespiti için kritik bir rol oynamaktadır (Mizuno ve Hirose, 2009).

YSİ sisteminde, yapıdan gerçek zamanlı veri toplamak için çeşitli sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörlerin seçimi ve yerleştirilmesi, elde edilecek verilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından hayati öneme sahiptir. YSİ kapsamında kullanılan temel sensörler arasında ivme ölçerler, yer değiştirme ölçerler, şekil değiştirme ölçerler, eğim ölçerler, akustik emisyon ölçerler ve meteorolojik veri ölçerler gibi hassasiyeti yüksek cihazlar bulunmaktadır. Her bir sensör, Yapı Sağlığı İzleme sürecinde farklı bir görevi yerine getirmek ve yapısal performansın kritik yönlerini izlemek için tasarlanmıştır. Sensör seçimi, yapılan analizlerin ve değerlendirmelerin doğruluğunu doğrudan etkiler. Seçilen sensörler, yapının özelliklerine, izlenmek istenen parametrelere ve çevresel koşullara uygun olmalıdır. Sensörler, yapının kritik noktalarına, potansiyel hasar bölgelerine ve yapısal davranışın en iyi şekilde anlaşılmasını sağlayacak konumlara yerleştirilmelidir. Bu süreçte, yapısal modelleme ve önceden yapılan analizlerden elde edilen bilgiler, sensörlerin en uygun konumlara yerleştirilmesine yardımcı olur. Sensörlerin yerleştirilmesi hem yapısal hem de çevresel faktörleri dikkate alarak yapılmalıdır. Doğru sensör seçimi ve stratejik yerleştirilmesi, yapısal performansın doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak, potansiyel hasarların erken tespitine imkan sağlar (Şekil 6).



Şekil 6. Barajlarda kullanılan sensörlere ait bazı örnekler

Yapı Sağlığı İzleme teknikleri, yapıların bütünlüğünü değerlendirmek ve olası hasarları tespit etmek için kritik bir rol oynar. Bu teknikler, hasar tespiti ve yapısal durumun değerlendirilmesi için genellikle iki ana kategoride incelenir: Lokal ve global yöntemler. Lokal yöntemler, yapısal elemanların belirli bölgelerindeki hasarı tespit etmeye yönelik detaylı incelemeler yaparken, global yöntemler yapı genelindeki durum hakkında geniş kapsamlı bilgiler sunar.

Lokal yöntemler, yapısal elemanlarda meydana gelen hasarın, özellikle çatlak, delaminasyon ve korozyon gibi yerel problemlerin, doğrudan tespit edilmesine olanak tanır. Lokal yöntemlerin kullanımı, hasarın doğası ve yerinin kesin olarak belirlenmesini sağlar, bu da onarım ve bakım çalışmalarının daha etkin ve odaklanmış bir şekilde planlanmasına zemin oluşturur. Bu yöntemler arasında ultrasonik testler, eddy current teknikleri, sıvı penetrant testleri, radyografi, akustik emisyon ve görsel incelemeler bulunur (Pawar ve Ganguli, 2011). Lokal yöntemler, genellikle belirli bir bölgeye odaklandığı için testler zaman alıcı ve maliyetli olabilir. Ancak, bu yöntemler sayesinde yapısal elemanların bölgesel hasar durumları hakkında değerli bilgiler elde edilebilir.

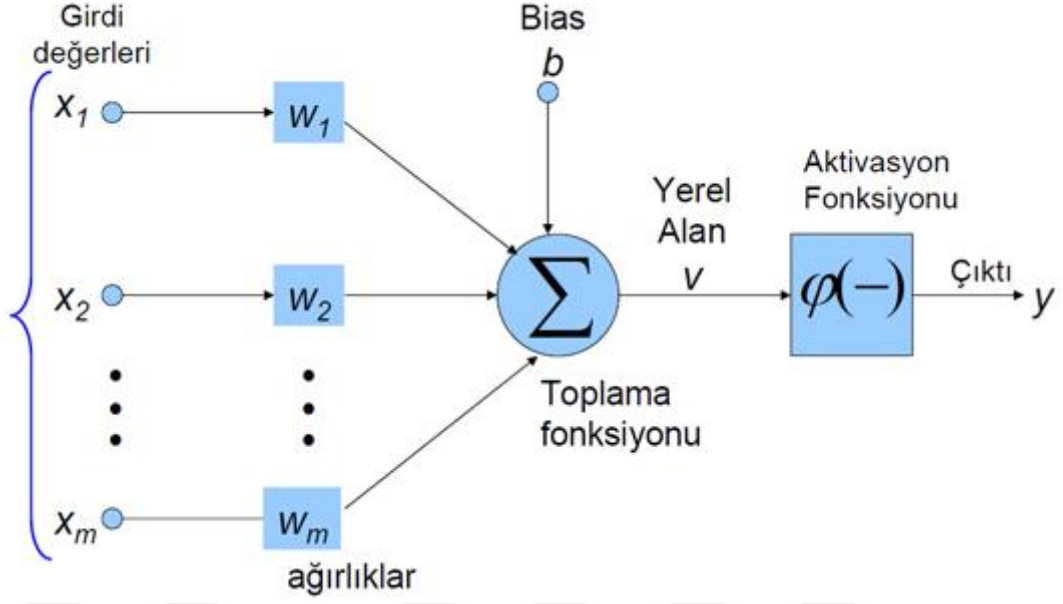
Global yöntemler ise yapının bütünü hakkında bilgi sağlayarak genel durum değerlendirmesi yapılmasına imkan tanır. Bu yöntemler, yapısal davranıştaki değişiklikleri tespit ederek, genel bir hasar varlığını veya performans düşüklüğünü belirlemeye yöneliktir. Bu yöntemler arasında optik inceleme, optoelektronik tarama, üç boyutlu lazer tarama ve özellikle titreşime dayalı yöntemler yer alır. Titreşime dayalı global yöntemler, yapısal elemanların dinamik davranışlarındaki değişikliklerden yola çıkarak hasarın varlığını ve genel yapısal sağlık durumunu tespit etmek için kullanılır (Boscato vd, 2019). Bu yöntemler, yapının karmaşıklığından bağımsız olarak genel bir hasar tespiti sağlamada oldukça etkilidir ve yapısal davranıştaki anormallikleri belirleyebilir.

Her iki yöntem grubu da Yapı Sağlığı İzleme’de kendine has avantajlara ve uygulama alanlarına sahiptir. Lokal yöntemler, detaylı hasar tespiti için tercih edilirken, global yöntemler genel yapısal durum değerlendirmesi ve hasar tespiti için geniş bir perspektif sunar. Bu nedenle, genellikle yapıların durumunu en kapsamlı şekilde değerlendirmek için her iki yöntem türü de bir arada kullanılabilir.

1.11. Yapı Sağlığı İzlemede Yapay Zeka ve Yapay Sinir Ağları

Yapay Zeka (YZ) ve Yapay Sinir Ağları (YSA), çağımızın en heyecan verici teknolojik gelişmelerinden biridir. Bu teknolojiler, bilgisayar sistemlerinin insan benzeri zeka ve öğrenme yetenekleri kazanmasını hedefler. Yapay Zeka ve Yapay Sinir Ağları, birçok endüstriyel, ticari ve akademik alanda kullanılan yenilikçi ve güçlü araçlar sunmaktadır. Yapay Zeka, bilgisayar sistemlerinin insan benzeri zeka göstermesini sağlayan bir bilim ve mühendislik alanıdır. Bu sistemler, karmaşık görevleri yerine getirebilmekte, desenleri tanıyabilmekte, kararlar alabilmekte ve hatta doğal dilde iletişim kurabilmektedir. Yapay Zeka, veri bilimi, makine öğrenimi, derin öğrenme ve semantik teknolojiler gibi alt alanları içerir. Yapay Zekanın bir kolu olan Yapay Sinir Ağları, biyolojik sinir ağlarının işleyişinden esinlenerek tasarlanmış matematiksel modellerdir. Bu ağlar, girdi verilerini işleyerek çıktı üretirler ve öğrenme süreci yoluyla veri arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenirler. YSA, desen tanıma, sınıflandırma, regresyon, öneri sistemleri ve daha birçok uygulamada kullanılmaktadır. YSA algoritmasında, öğrenme yeteneğine dayalı olarak eksik verileri, bulanık veya eksik bilgileri çözme yeteneği mevcuttur (Noor vd. 2019). Yapay Sinir Ağlarının temel bileşenleri şu şekilde sınıflandırılabilir (Şekil 7):

- **Nöronlar (Nodes):** Yapay sinir ağlarının temel birimi olan nöronlar, girdi verilerini alıp, işleyerek çıktı üretirler. Her nöron, ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonları kullanarak girdi sinyallerini işler.
- **Katmanlar (Layers):** Yapay Sinir Ağları genellikle birbirine bağlı katmanlardan oluşur. Giriş katmanı, verileri ağa ileten ve işleyen ilk katmandır. Gizli katmanlar, girdi verilerini işleyerek ara çıktılar üreten katmanlardır. Çıkış katmanı, sonuçları üreten ve ağın çıktılarını veren son katmandır.
- **Bağlantılar (Connections):** Her nöron, diğer katmandaki nöronlarla bağlantılıdır. Bu bağlantılar, ağırlıklar ve tahmin/önyargı (bias) değerleri aracılığıyla belirlenir. Ağırlıklar, bağlantıların gücünü ve önemini belirlerken, tahmin/önyargı (bias) değerleri nöronların aktivasyon eşiğini ayarlar.
- **Aktivasyon Fonksiyonları (Activation Functions):** Aktivasyon fonksiyonları, nöronların çıktılarını belirler. Bu fonksiyonlar, nöronların aktivasyon durumunu kontrol eder ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmek için gereklidir.



Şekil 7. Yapay sinir hücresine ait görsel (URL 1, 2024)

Yapay Sinir Ağı modelleri, genellikle temel işlevselliklerine göre dört ana grupta incelenebilir. Bunlar; tek katmanlı algılayıcılar, çok katmanlı algılayıcılar, ileri beslemeli yapay sinir ağları ve geri beslemeli yapay sinir ağlarıdır. Her bir model grubu, farklı özelliklere ve işlevlere sahiptir ve belirli problemlerin çözümü için optimize edilmiştir.

Tek katmanlı algılayıcılar, tek bir katmandan oluşur ve genellikle basit sınıflandırma problemleri için kullanılır. Tek katmanlı algılayıcılar, girdi verilerini doğrudan çıktıya bağlayan basit yapılarla karakterizedir. Basitliği ve hesaplama kolaylığı nedeniyle, bu modeller özellikle basit desen tanıma veya sınıflandırma görevlerinde tercih edilmektedir.

Çok katmanlı algılayıcılar, birden fazla katmandan oluşur ve genellikle daha karmaşık problemleri çözmek için kullanılır. Çok katmanlı algılayıcılar, girdi verilerini birbirine bağlı birden fazla katmandaki nöronlar aracılığıyla işler. Bu sayede, daha karmaşık ilişkileri modelleyebilir ve daha yüksek doğruluk oranları elde edebilirler. Örneğin, derin öğrenme modeli olarak bilinen bu yapılar, karmaşık görüntü veya ses verilerini işlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

İleri beslemeli yapay sinir ağları, verilerin yalnızca bir yönde, yani girdi katmanından başlayarak çıkış katmanına doğru ilerlediği yapıları ifade eder. İleri beslemeli ağlar, girdi verilerini işlerken herhangi bir geri bildirim döngüsü kullanmazlar. Bu nedenle, bir girdinin çıktıyı etkilemesi için geri bildirim döngüsü olmadığından, bu yapılar daha basit ve daha hızlıdır.

Geri beslemeli yapay sinir ağıları, çıkışın ağı geri besleme yapılarak tekrar girdiye aktarıldığı yapılardır. Geri beslemeli ağılar, zaman serisi verileri veya birbiriyle bağlantılı veri noktalarını işlerken kullanışlıdır. Geri beslemeli yapılar, daha karmaşık ve dinamik veri ilişkilerini modelleme yeteneğine sahiptir, ancak eğitimi ve işlenmesi daha zor olabilir.

Bu dört yapı, yapay sinir ağlarının geniş bir yelpazesini kapsar ve farklı problemlere uygun olarak tercih edilir. Her birinin avantajları ve dezavantajları vardır ve doğru modelin seçimi, belirli bir problemin gereksinimlerine ve veri yapısına bağlıdır.

Yapay Sinir Ağları ile çalışma yapmak isteyen araştırmacıların işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla ticari ve açık kaynak kodlu birçok programda hazır kütüphaneler bulunmaktadır. Yapılacak çalışmaya, veri setine ve elde edilmek istenen sonuçlara bağlı olarak uygun kütüphanenin seçilerek işlem yapılması kolaylık sağlamaktadır. Bu amaçla MATLAB (2018) programında Yapay Sinir Ağı bölümünden çok sayıda yöntemle ulaşılabilmektedir. Neural Network Fitting bunlardan biri olup, YSA'nın bir türü olan regresyon modeli eğitimi ifade eder. Bu süreç, veri setindeki girdi-çıkış ilişkilerini modellemek için bir Yapay Sinir Ağı kullanarak bir matematiksel fonksiyonun tahmin edilmesini içerir. Genellikle, veriler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri keşfetmek ve modellemek için kullanılır. Neural Network Fitting yöntemine dair izlenen işlem adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Veri Toplama ve Hazırlık: İlk adım, eğitim için kullanılacak verilerin toplanması ve hazırlanmasıdır. Bu adımda, giriş değişkenleri (özellikler) ve çıkış değişkenleri (hedefler) belirlenir ve veri seti uygun şekilde düzenlenir.
- Model Mimarisi Seçimi: Yapay sinir ağının mimarisi, giriş ve çıkış katmanları arasındaki katman sayısı ve her katmandaki nöron sayısını içerir. Bu, veri setinin karmaşıklığına ve modelin öğrenmesi gereken ilişkilere bağlı olarak belirlenir.
- Ağırlık ve Bias'ların İnisiyalizasyonu: Ağırlıklar ve bias'lar, yapay sinir ağının her bir nöronu arasındaki bağlantıları ve nöronların aktivasyon eşiklerini belirler. Bu değerler genellikle rastgele başlatılır ve eğitim sürecinde optimize edilir.
- İlerleme (Forward Propagation): İlerleme aşamasında, giriş verileri ağı beslenir ve her katmandaki nöronların aktivasyon değerleri hesaplanır. Bu, ağı girişten çıkışa doğru ilerletir.
- Hata Hesaplama: İlerleme aşamasında elde edilen çıktılar, gerçek çıktılarla karşılaştırılır ve ağın tahminlerinin ne kadar yanlış olduğunu ölçen bir hata fonksiyonu kullanılarak bir hata değeri hesaplanır.

- Geri Yayılım (Backpropagation): Geri yayılım aşamasında, hata değeri ağı her bir parametresine (ağırlıklar ve bias'lar) geriye doğru yayılır. Bu adım, ağı hata değerini azaltmak için ağırlıkları ve tahmin/önyargıların (bias) güncellenmesini sağlar.
- Optimizasyon: Ağı parametrelerini güncelledikten sonra, bir optimizasyon algoritması kullanılarak daha düşük bir hata değeri elde etmek için bu adımlar tekrarlanır. Bu durum, ağı daha iyi bir şekilde veriye uyum sağlamasını sağlar.
- Model Değerlendirmesi: Eğitim süreci tamamlandıktan sonra, modelin performansı test veri seti üzerinde değerlendirilir. Bu, modelin genelleme yeteneğini ölçer ve aşırı uydurma (overfitting) durumunu kontrol eder.
- Tahminlerin Yapılması: Son olarak, eğitilen model kullanılarak yeni giriş verileri üzerinde tahminler yapılır. Bu, modelin gerçek dünya verileri üzerinde nasıl performans gösterdiğini gözlemlemek için kullanılır.

Neural Network Fitting, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için güçlü bir araçtır. Bu süreç, veri analizi ve tahminle ilgilenen birçok alanda kullanılır ve doğru modelleme için veri hazırlığından tahmin sonuçlarının değerlendirilmesine kadar çeşitli adımları içermektedir.

Yapı Sağlığı İzleme sistemlerinden elde edilen verilerin yapının mevcut ve gelecek durumu hakkında bilgi sağlaması amacıyla kullanılması günümüzde oldukça yaygındır. Bu bağlamda, Yapay Zeka teknolojileri ve özellikle Yapay Sinir Ağları Yapı Sağlığı İzleme süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yapay Sinir Ağları, karmaşık ve büyük veri kümelerini işlemek ve karmaşık desenleri tanımak için ideal bir araçtır. Yapı Sağlığı İzleme süreçlerinde, Yapay Sinir Ağları, çeşitli sensörlerden elde edilen verileri analiz etmek, olası hasarları veya güvenlik risklerini tanımlamak ve altyapı sistemlerinin bakım ihtiyaçlarını belirlemek için kullanılabilir. Bu ağlar, altyapı sistemlerindeki değişiklikleri zamanında tespit etmek ve daha doğru bir bakım stratejisi oluşturmak için büyük ölçüde katkı sağlamaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Türkiye, enerji ihtiyaçlarını sürdürülebilir ve çevre dostu kaynaklardan karşılama hedefiyle, son yıllarda büyük çaplı hidroelektrik projelerine odaklanarak enerji sektöründe önemli adımlar atmaktadır. Bu çerçevede, Deriner ve Yusufeli Kemer Barajı, ülkenin enerji bağımsızlığına sağladıkları katkı ve sahip oldukları özellikler ile öne çıkan bir mühendislik başarısını temsil etmektedir. Bu büyük çaplı projeler, sadece enerji üretim kapasiteleriyle değil, aynı zamanda mükemmel mühendislik tasarımları ve çevresel sürdürülebilirlik anlayışlarıyla da dikkat çekmektedir. Deriner ve Yusufeli Barajları, bölgesel kalkınma, istihdam yaratma ve enerji bağımsızlığına sağladıkları katkılarla Türkiye'nin enerji sektöründe parlak bir geleceği şekillendirmede öncü bir rol oynamaktadır. Bu iki mühendislik harikası, sürdürülebilir enerji üretimi ve çevre koruma konularında ulusal ve uluslararası örnekler arasında yer almaktadır.

Bu tez kapsamında ülkemizin önemli stratejik yapılarından olan Deriner ve Yusufeli barajlarının deneysel testleri ve sonlu eleman analizleri yapılarak bu yapılarda uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu bölümde öncelikle aktif olarak enerji üretimine devam eden Deriner Barajında yapılan deneysel ve sonlu eleman model çalışmaları detaylı olarak açıklanıp ardından Yusufeli Barajındaki deneysel ve sonlu eleman model çalışmalarının detayları aktarılmıştır. Yusufeli Barajında çalışmalar rezervuarın boş olması durumu ve sekiz farklı rezervuar su yüksekliği durumu için gerçekleştirilmiştir. Bu kısımdaki farklı su seviyesine ait deneysel ve sonlu eleman model çalışmaları önem arz etmektedir. Son kısımda Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları başlığı altında her iki baraja kurulan sensörler yardımıyla uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmalarına ait elde edilen veriler ve bu verilerin Yapay Sinir Ağları ile eğitilerek elde edilen sonuçların yorumlanması üzerine çalışmalar sunulmaktadır. Bu kapsamlı araştırma ve test çalışmalarının, ülkenin enerji altyapısının güçlendirilmesinde kilit bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

2.1. Deriner Barajı

Deriner Barajı, çift eğrilikli beton kemer baraj olup, Çoruh Nehri üzerine inşa edilmiştir. Temelden itibaren gövde yüksekliği 249m ve kret uzunluğu 720m'dir. 1998 yılında başlanan baraj inşaatı tamamlanarak 2012 yılında su tutulmaya başlamıştır (Şekil 8).

Halen tam kapasiteli olarak elektrik üretmeye devam eden Deriner Barajı'nın yıllar içinde yapısal durumunda meydana gelen değişim ve ileriki yıllarda göstereceği yapısal davranışları değerlendirmek ve belirlemek amacıyla uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme sistemi ile deneysel çalışmalar ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deriner Barajı, Türkiye'nin önemli enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkan çift eğrilikli beton kemer tipinde bir barajdır. Baraj, Çoruh Nehri üzerine stratejik bir konumda inşa edilmiştir. Temelden itibaren yükselen gövde, etkileyici bir yüksekliğe sahip olup 249 metreye ulaşmaktadır. Aynı zamanda kret uzunluğu da 720 metredir, bu da barajın etkileyici boyutunu ortaya koymaktadır. İnşaatına 1998 yılında başlanan Deriner Barajı, titiz bir mühendislik sürecinin ardından 2012 yılında tamamlanarak su tutmaya başlamıştır. Bugün, hala tam kapasiteli olarak elektrik üretimine devam eden bu baraj, Türkiye'nin enerji ihtiyacına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Deriner Barajının uzun yıllar boyunca maruz kaldığı çeşitli çevresel etmenlere bağlı olarak yapısal durumunda meydana gelen değişimleri ve gelecekteki yapısal davranışlarını değerlendirmek amacıyla uzun süreli bir Yapı Sağlığı İzleme sistemi ile izleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu izleme sistemi, deneysel çalışmalar ve sonlu eleman analizleri kullanılarak barajın mevcut yapısal durumunun ve değişiminin değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalara olanak sunmaktadır.



Şekil 8. Deriner Barajı'na ait bazı görseller

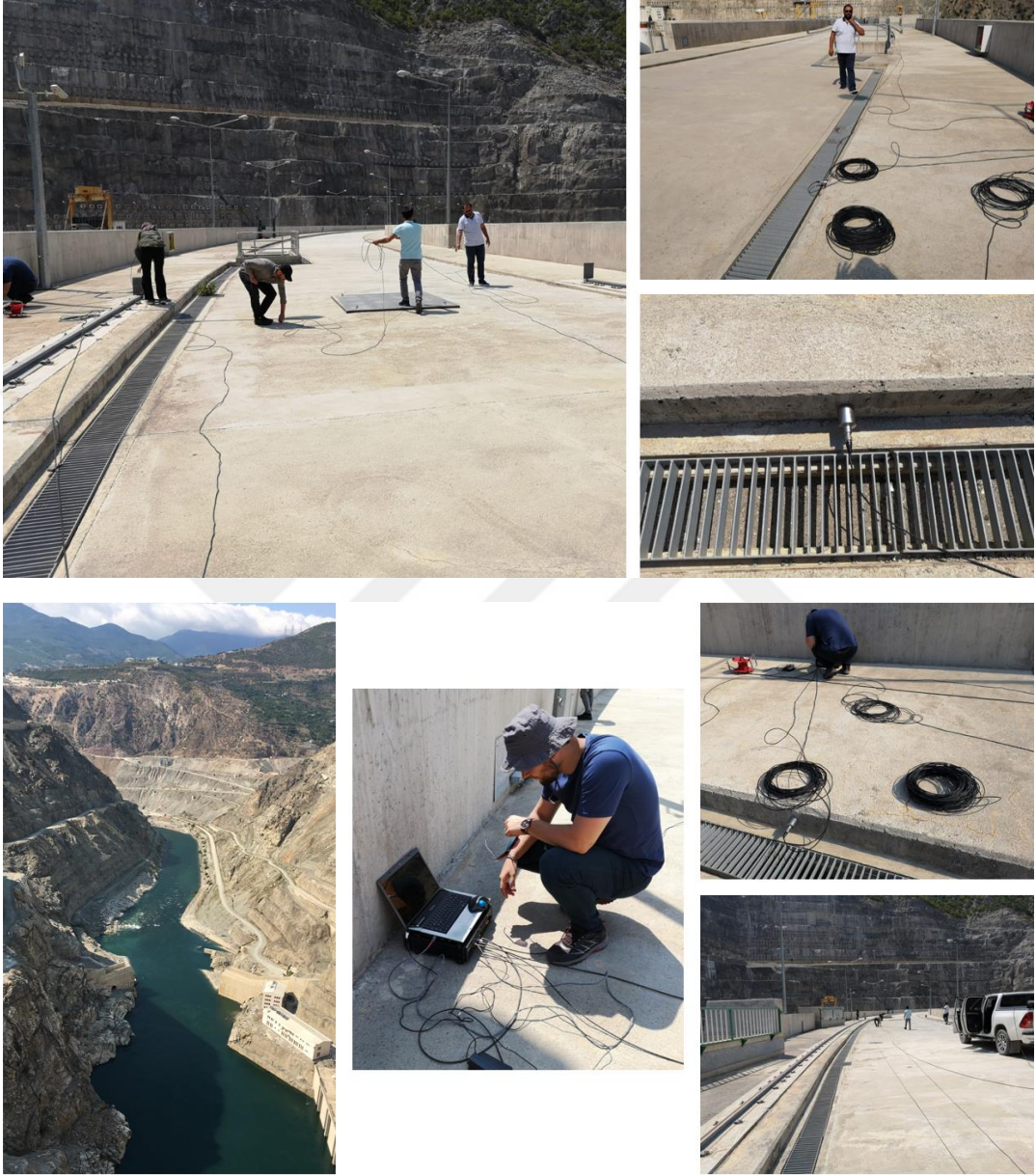
2.1.1. Deriner Barajı'nda Gerçekleştirilen Arazi Çalışmaları

Mühendislik yapılarında mevcut yapısal durum çevresel koşullara bağlı olarak değişebilmektedir. Deriner Barajının çevresel etkenlere bağlı mevcut yapısal durumunu yansıtan dinamik karakteristiklerin belirlenmesi amacıyla çevresel titreşimler altında detaylı bir şekilde analiz edilmesi için ivmeölçer sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörler, barajın belirlenen modal hareket noktalarına yerleştirilerek barajın çeşitli işletme koşulları altında maruz kaldığı çevresel etmenlere yanıt olarak oluşan doğal titreşimlerinin belirlenmesine ve bu titreşimlerin hassas bir şekilde ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Bu çevresel etmenler arasında mevsimsel olarak değişen su seviyesi, baraj gövdesine etki eden rüzgar kuvvetleri, yer hareketleri, kret üzerinden geçen ağır tonajlı araçlar ve diğer çevresel faktörler yer almaktadır. İvmeölçer sistemleri, bu çevresel etmenlere karşı yapısal bileşenlerin tepkilerini kaydederek, barajın güvenlik standartlarına uygunluğunu değerlendirmek ve gerektiğinde yapısal düzenlemeler yapmak için mühendisler için önemli veriler sunmaktadır.

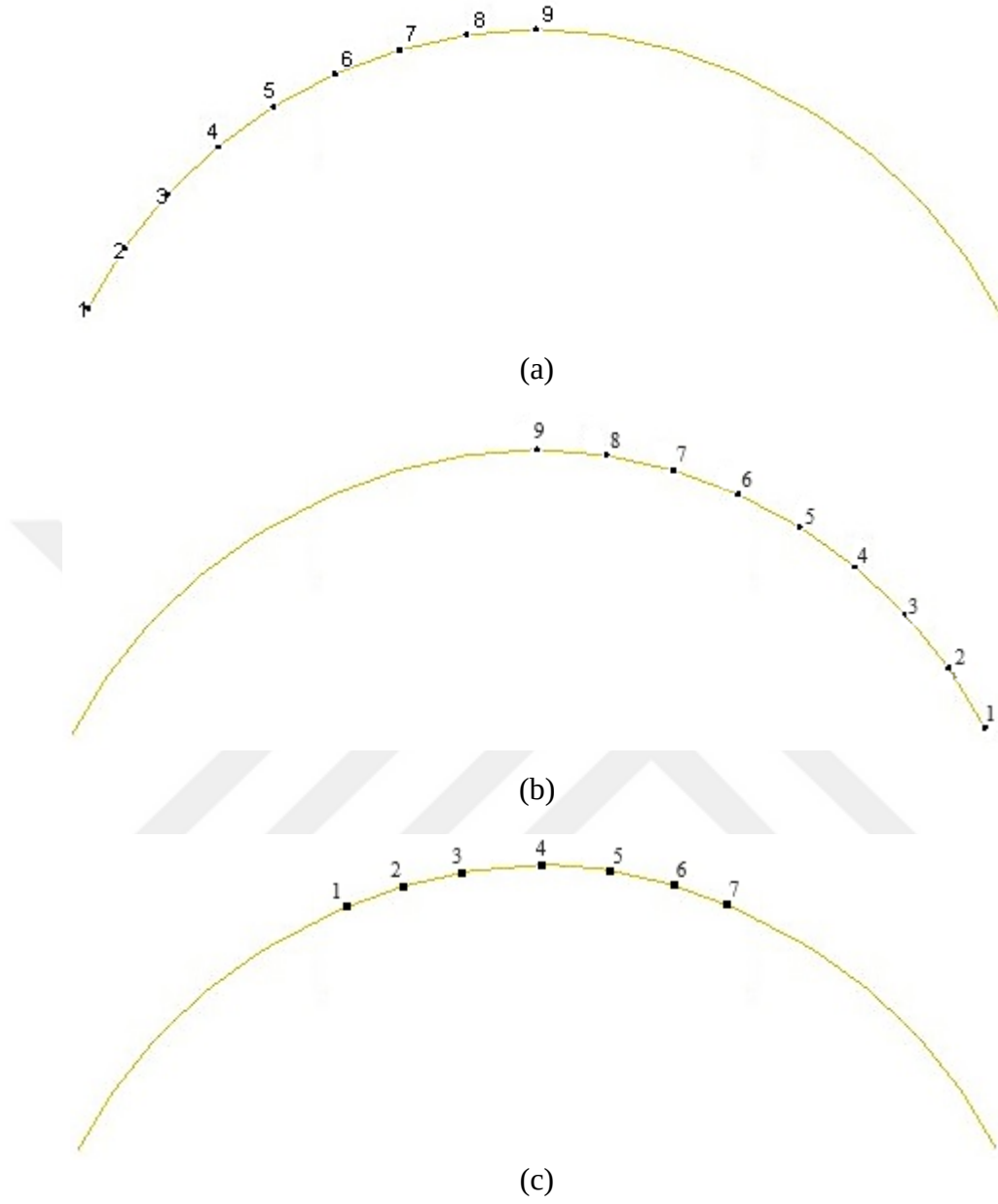
Bu testler sırasında elde edilen veriler, sonlu eleman analizleri ve diğer gelişmiş mühendislik yöntemleriyle birleştirilerek, Deriner Barajının uzun vadeli dayanımını ve yapısal bütünlüğünü değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. İvmeölçer sistemlerinden elde edilen dinamik karakteristiklerin değişimi, barajın çeşitli çalışma koşulları ve çevresel etkenler altında nasıl davrandığına dair detaylı bir anlayış elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu bilgiler barajın güvenli ve verimli bir şekilde işlevini devam ettirmesi hususunda önem arz etmektedir.

Deriner Barajında ilk çevresel titreşim testleri 12 Haziran 2019 tarihinde kret seviyesine yerleştirilen ivmeölçerler ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'da yapılan çevresel titreşim testine ait bazı görseller sunulmaktadır. Ölçüm yapılan tarihte rezervuar su kotu 390m ve hava sıcaklığı ortalama 28 °C olup bu değişkenler birer parametre olarak dikkate alınmıştır. Testlerde B&K 8340 tipi tek eksenli, 10 V/g hassasiyetine sahip kablolu ivmeölçerler kullanılmıştır. Test sırasında ivmeölçerler, baraj kretine memba-mansap doğrultusunda yerleştirilmiştir. Kret uzunluğunun fazla olması nedeniyle deneysel ölçümler üç set halinde alınmıştır (Şekil 10). Her bir set kendi içinde iki farklı ölçüm adımı oluşturularak referanslı ölçüm olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 11). İvmeölçerler arası mesafe 45m olarak belirlenip, Set-1 ve 2 de 9'ar adet, Set-3'te ise 7 adet ivme ölçer kullanılmıştır. Her bir ölçüm adımı 30 dakikalık ölçümler alınarak sinyaller toplanmıştır. İvmeölçerlerden gelen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanarak

PULSE (2006) yazılımına aktarılmıştır. Dinamik karakteristikler, OMA (2006) yazılımı kullanılarak belirlenmiştir.

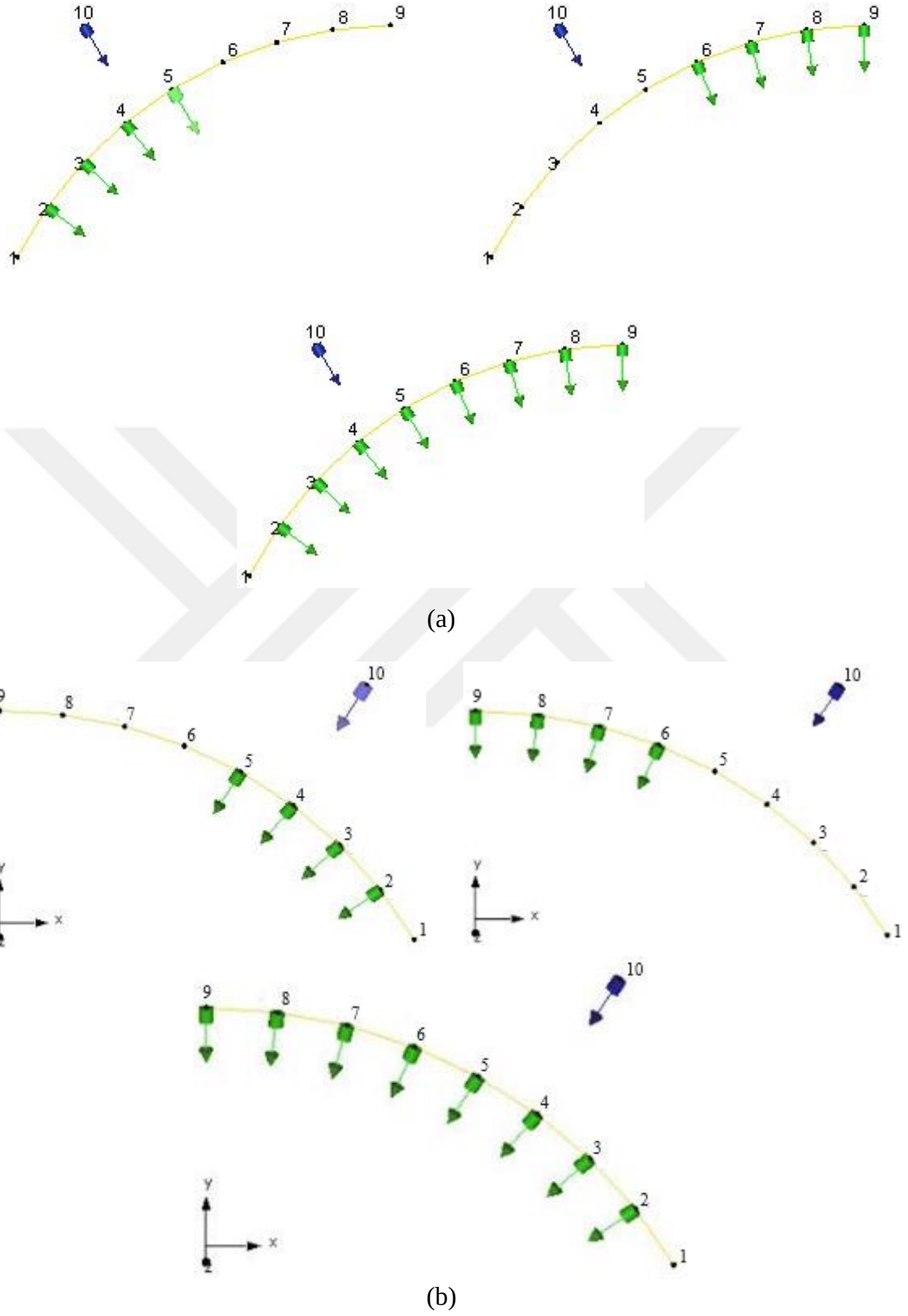


Şekil 9. Deriner Barajında yapılan çevresel titreşim testine ait bazı görseller



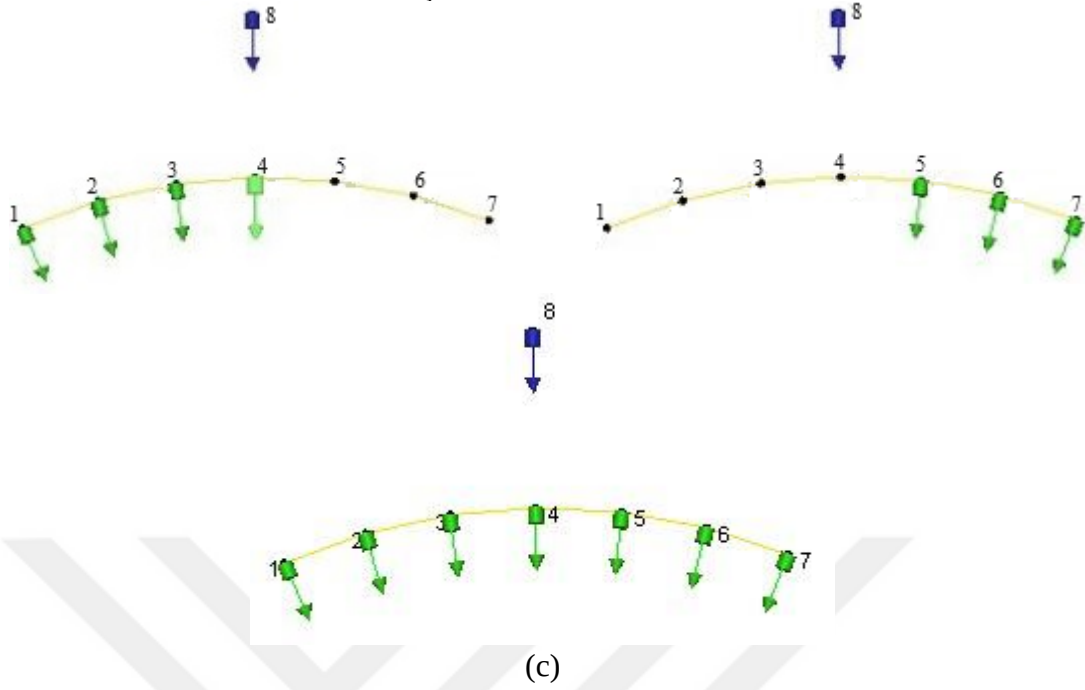
Şekil 10. Deriner Barajında üç set halinde yapılan deneysel ölçümlere ait şematik gösterim, (a) Set-1, (b) Set-2, (c) Set-3

Şekil 12 Deriner Barajının çevresel titreşim testleri ile Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemine göre frekans alanında elde edilen diyagramları göstermektedir. Tablo 1 Deriner Barajının 12/06/2019 tarihli ölçümüne ait Set-1 ve Set-3'ten elde edilen frekans değerlerini göstermektedir.



Şekil 11. Deriner Barajında her sette gerçekleştirilen referanslı ölçümler için yerleştirilen ivmeölçer yerleri (a) Set-1, (b) Set-2, (c) Set-3

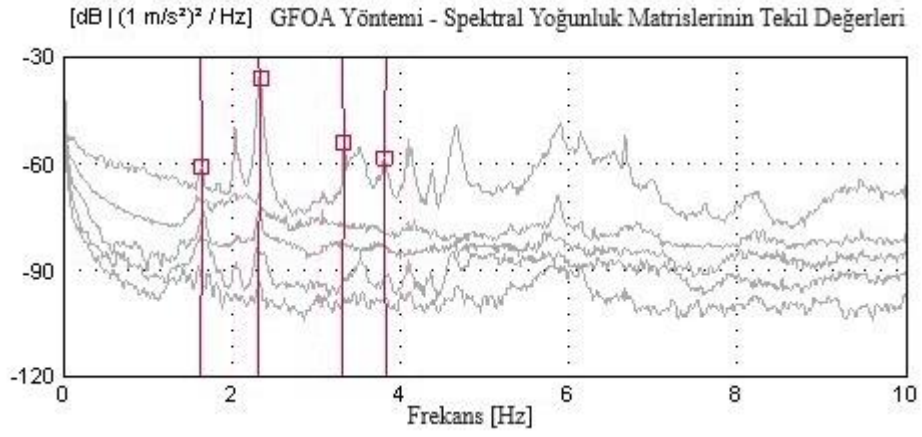
Şekil 11'in devamı



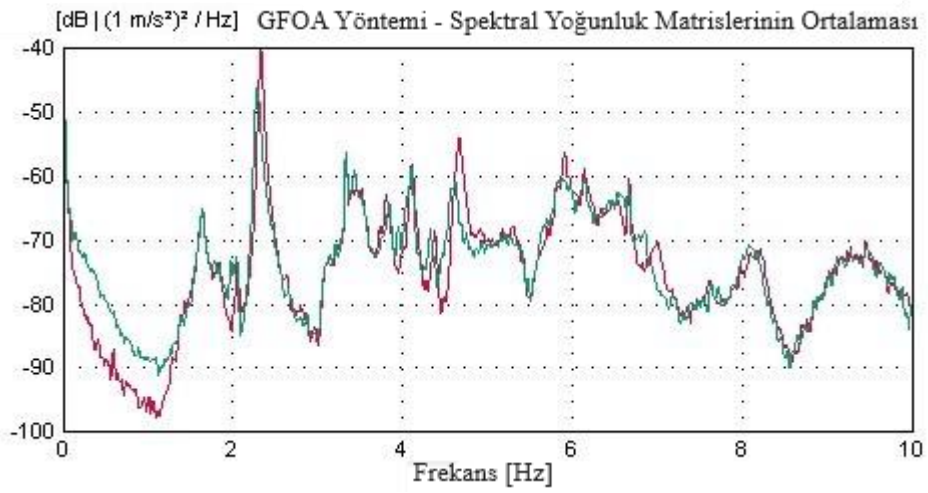
Tablo 1. Deriner Barajının 12/06/2019 tarihli ölçümlerine ait Set-1 ve Set-3'ten elde edilen frekans değerleri

Mod No	Frekans Değerleri (Hz)	
	Set-1	Set-3
1	1,638	1,638
2	2,310	2,286
3	3,322	3,498
4	3,831	3,950

Set-1 ve Set-3 için elde edilen bölgesel mod şekilleri birbirini tamamlayıcı şekilde olup bir bütün halde olması durumu için Set-3 için elde edilen mod şekilleri baz alınarak Set-1 ve Set-2 için mod şekilleri kesikli çizgilerle (Set-1 için mavi renk, Set-2 için kırmızı renk) çizilerek tamamlanmıştır. Literatürle uyumlu şekilde elde edilen ilk dört mod şekline ait görseller Şekil 13'te verilmektedir.

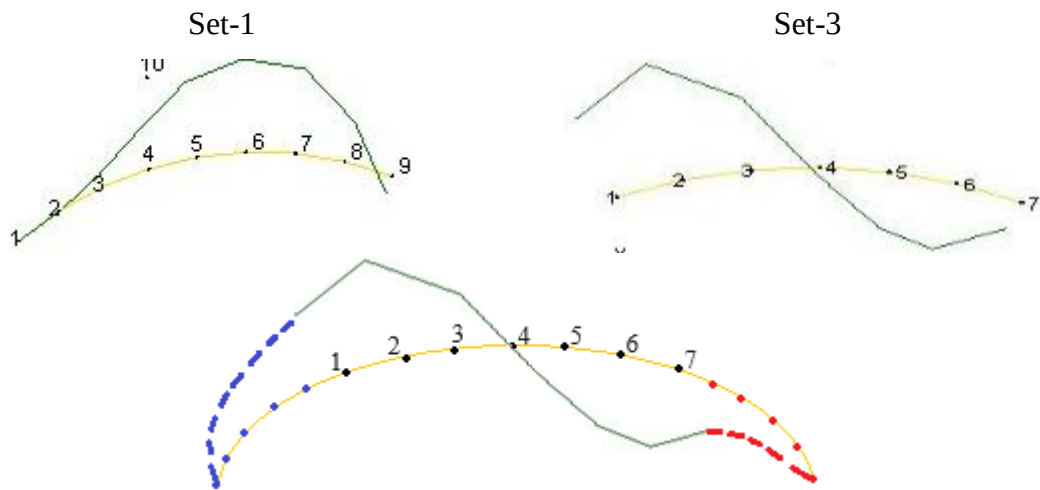


(a)



(b)

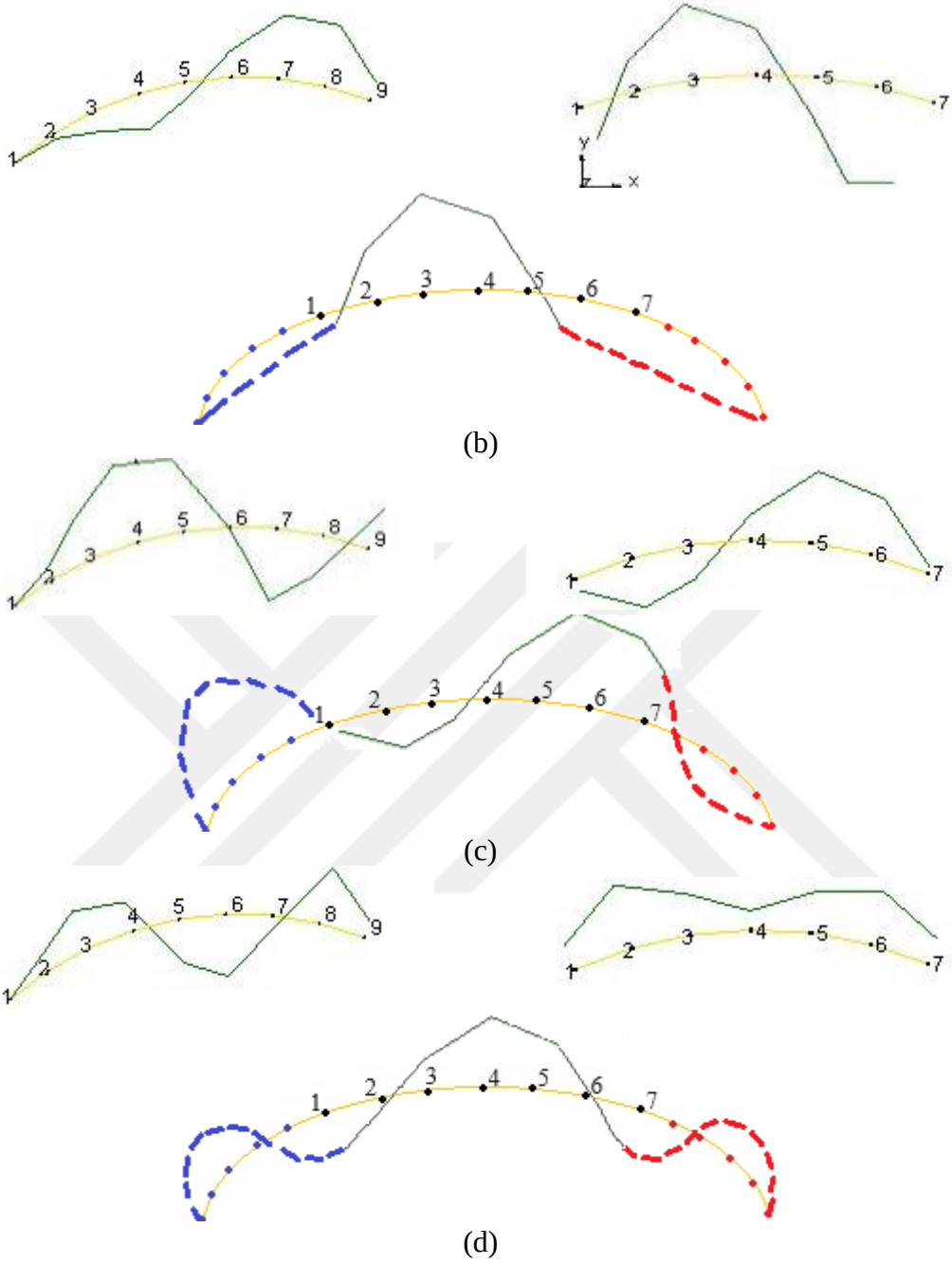
Şekil 12. Deriner Barajının çevresel titreşim testlerinden elde edilen diyagramlar (a) Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri (SYM) (b) Otomatik Spektral Yoğunlukların Ortalaması



(a)

Şekil 13. Deriner Barajının Set-1 ve Set-3 ölçümlerine ait bölgesel mod şekilleri ve kesikli çizgilerle tamamlanarak oluşturulan mod şekilleri (a) Birinci mod (b) İkinci mod (c) Üçüncü mod (d) Dördüncü mod

Şekil 13'ün devamı



2.1.2. Deriner Barajı Sayısal Çalışmalar

DSİ 26. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen proje dosyaları kullanılarak Deriner Barajının baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli ANSYS programında oluşturularak analizler yürütülmüştür. Deriner kemer barajının düşeyde ve yatayda eğrilikli yapıya sahip olması nedeniyle gövde yüzeylerindeki konkav geometri 19 farklı kottan (+153m, +168m, +180m, +198m, +216m, +222m, +243m, +252m, +264m +276m, +288m, +300m, +321m, +336m, +351m, +360m, +375m, +387m ve +397m kotları) alınan plan

kesitler kullanılarak Autocad programında modellenmiştir. Baraj gövdesinin +153m, +264m ve +397m kotlarına ait plan kesitleri ve düşey kesiti Şekil 14'te verilmektedir.

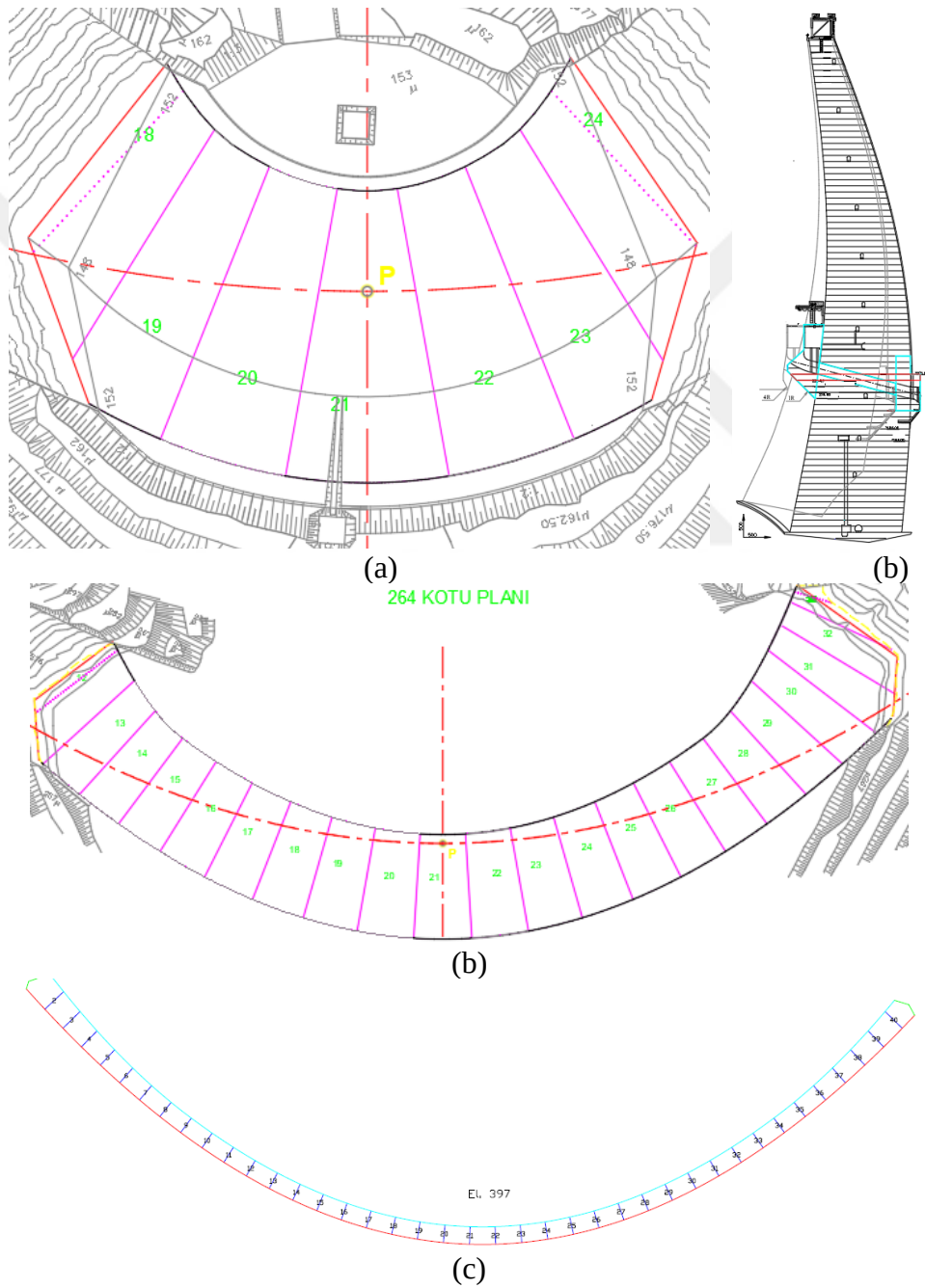
19 adet plan kesiti kullanılarak Deriner Barajının gövdesi Autocad programında katı model olarak oluşturulmuştur. Baraja ait projelerin plan kesitlerinde ve üç boyutlu modellerinde belirtilen düşey doğrultu boyunca büzülme derzi sayısı 40 adettir. Bu derz kısımları gövdenin sonlu eleman ağının oluşturulmasında baz alınan sınırlar olarak belirlenmiştir. Ortalama 18 m aralıklı büzülme derzi mesafesi bir baraj için uygun sonlu eleman ağı için yeterli bir değerdir. Düşey olarak büzülme derzine denk gelen kısımlar belirlenerek katı model düşey dilimlere ayrılmıştır. Yatayda ise dikkate alınan her bir plan kotu kendi içerisinde katı model olarak oluşturulduğu için yeniden dilimleme işlemi uygulanmamıştır. Autocad programında oluşturulan katı gövde modeli sonlu elemanlara bölünmüş şekli ile elde edilmiştir. Şekil 15 Deriner Baraj gövdesinin düşeydeki büzülme derzi bölgelerini ve Autocad programında oluşturulan sonlu elemanlara bölünmüş katı baraj gövdesine ait görselleri sunmaktadır.

Autocad programında eğrisel yapıdaki plan kesitlerine ait çizgilerin katı modele dönüştürülmesiyle oluşturulan gövdenin özellikle kenar bölgelerinde düzgün yapılı yüzeyler oluşmamaktadır. Sonlu eleman ağlara bölünerek Autocad programında hazırlanan bu katı model dışarı aktararak .sat uzantılı bir dosya ile ANSYS programına aktarılmıştır. ANSYS programına aktarılan sonlu eleman ağına ayrılmış katı modelde her bir katı eleman parçasına ait düğüm noktaları okunarak ilgili noktalar, ANSYS programında işlem yapılmasına olanak sağlayan txt formatındaki Logfile dosyasına tanıtılmıştır. Ayrıca ANSYS programında katı model oluşturulması için gerekli komut formatına uygun olarak seçilen düğüm noktaları ile baraja ait katı model yeniden oluşturulmuştur. Bu modelleme sürecinde Autocad programı eğrisel yüzeye sahip baraj gövdesinin daha kolay şekilde modellenerek istenilen mesafelerde sonlu elemanlara ayrılması hususunda kolaylık sağlamış olup ilgili eleman ağlarına ait düğüm noktalarının ve koordinatlarının elde edilmesinde etkili olmuştur. Şekil 15'teki görselde AutoCAD ve ANSYS programında oluşturulan baraj gövdesinin katı modeline ait detaylar verilmiştir.

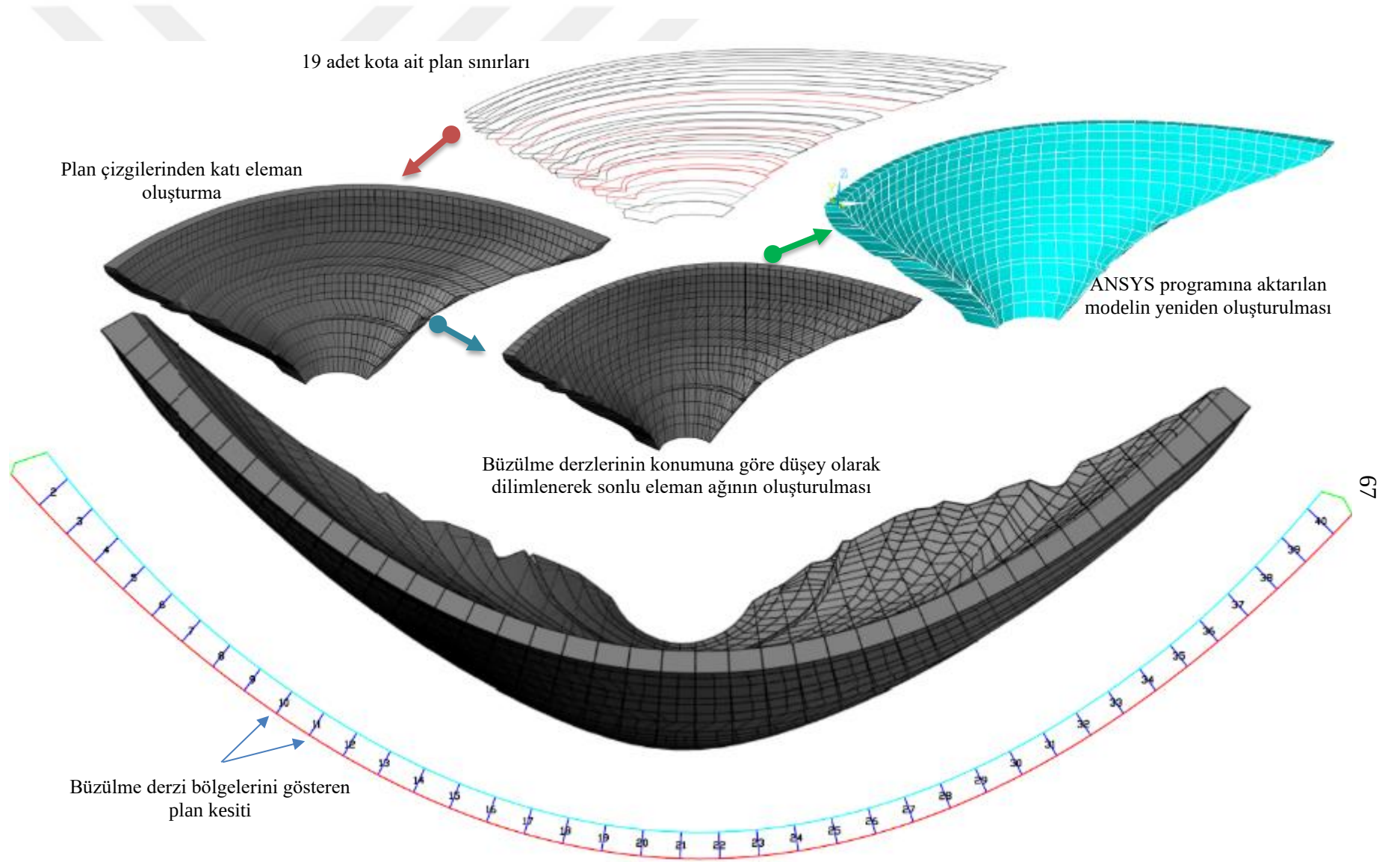
Deriner Baraj gövdesinin modellenmesinin ardından gövde ve rezervuarı kapsayacak temelin modellenme aşamasına geçilmiştir. Deriner Barajı gövde yüksekliği 249m olduğundan dolayı, rezervuar uzunluğu baraj yüksekliğinin üç katı kadar (750m) olup memba kısmındaki temelde rezervuar uzunluğu kadar seçilmiştir. Temel uzunluğu mansap yönünde, akış yönüne dik doğrultularda ve düşey yönde yaklaşık baraj yüksekliği kadar

(250m) uzatılmıştır. Deriner Barajına ait üç boyutlu baraj-temel modeli Şekil 16'da verilmektedir.

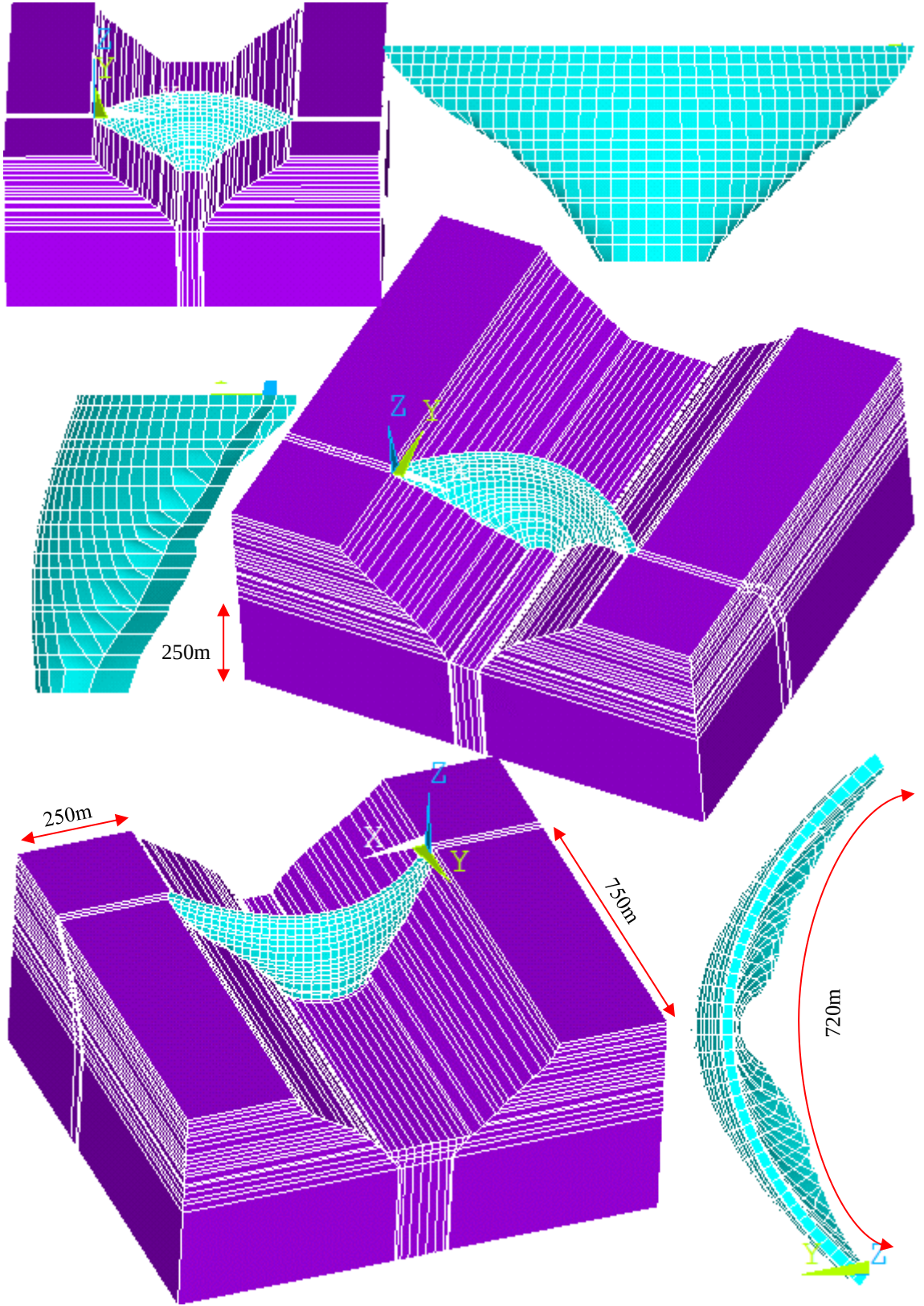
Deriner Barajının oluşturulan sonlu eleman modeli, sekiz farklı sonlu eleman ağı içerecek şekilde modellenerek modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen frekans değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüş olup, analiz süresinin daha kısa olması amacıyla Şekil 15'te oluşturulan modele ait sonlu eleman ağının kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 14. Deriner Barajı'nın plan kesitlerine ait bazı görüşler (a) +153m kotu, (b) düşey kesit, (c) + 264m kotu, (d) +397m kotu



Şekil 15. Deriner Barajı gövdesinin oluşturulma sürecine ait akış diyagramı



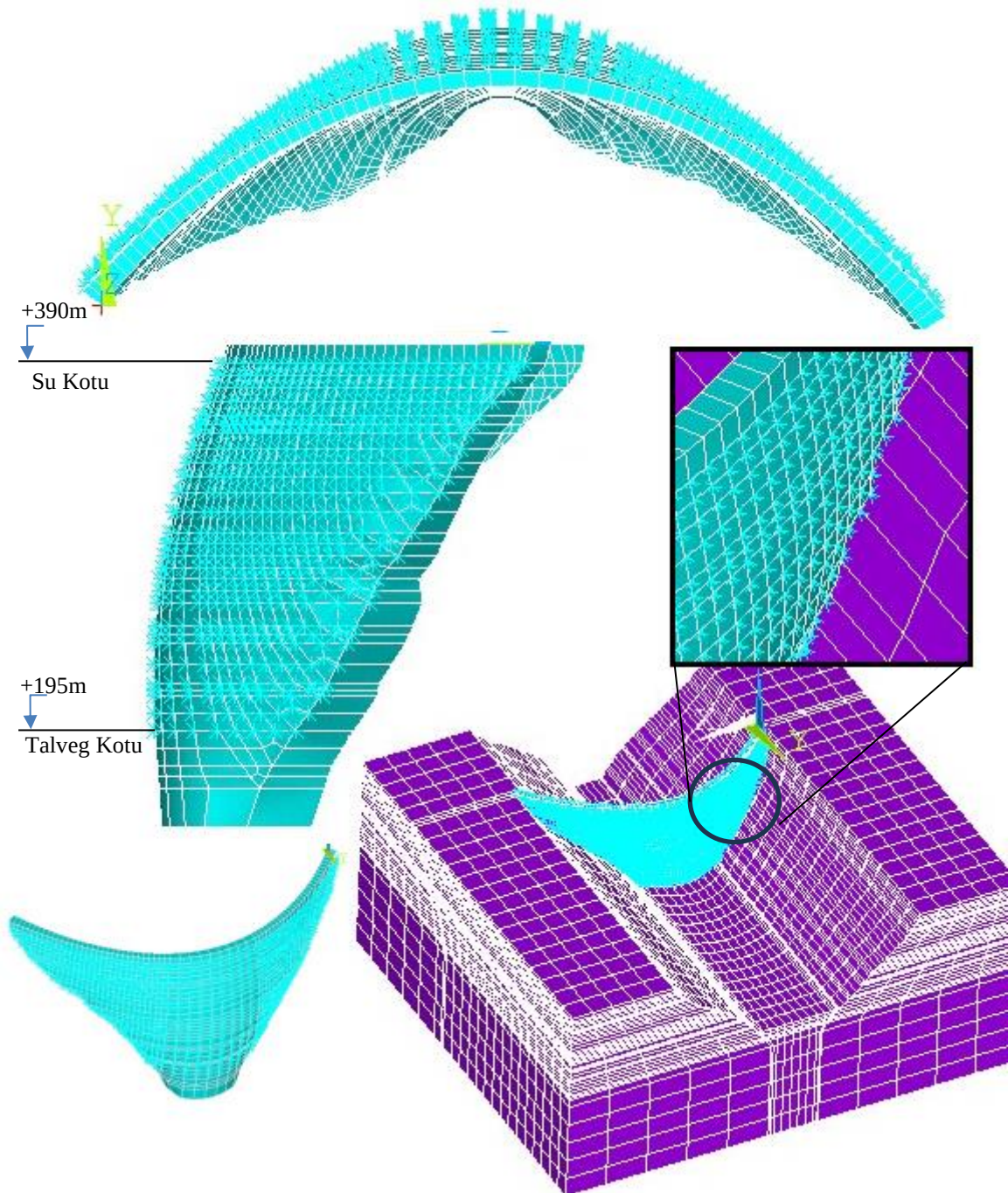
Şekil 16. Deriner Barajının sonlu eleman modeline ait görseller

Analizlerde barajın etkileşimde bulunduğu rezervuar etkisi de dikkate alınmıştır. Bu etkiyi yansıtmak amacıyla literatürde kullanılmakta olan farklı teknikler (Westergaard ek kütlesi, Euler akışkan elemanları ve Lagrange akışkan elemanları, vb.) bulunmaktadır. Bu yaklaşımların her biri kendi içerisinde bazı kabuller yapmaktadır. Barajların tasarımı aşamasında sıklıkla kullanılan bu farklı modelleme yaklaşımlarının barajların modal özelliklerine nasıl etki ettiğinin irdelenmesi amacıyla tez kapsamında rezervuar etkisi, Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları olmak üzere üç farklı model kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerde kütsüz olarak modellenen temelin dış sınırları ankastre olarak mesnetlenmiş. Baraj gövdesi ve temel için yapısal eleman tiplerinden biri olan 8 düğüm noktasına sahip SOLID185 kullanılmıştır. Tüm rezervuar modellerinde rezervuar su yüksekliği Deriner Barajında yapılan çevresel titreşim testi esnasındaki su yüksekliği olan 195m (390m su kotu) dikkate alınmıştır. Bu su seviyesi talveg kotu olan +195m'den itibaren olan su yüksekliğidir.

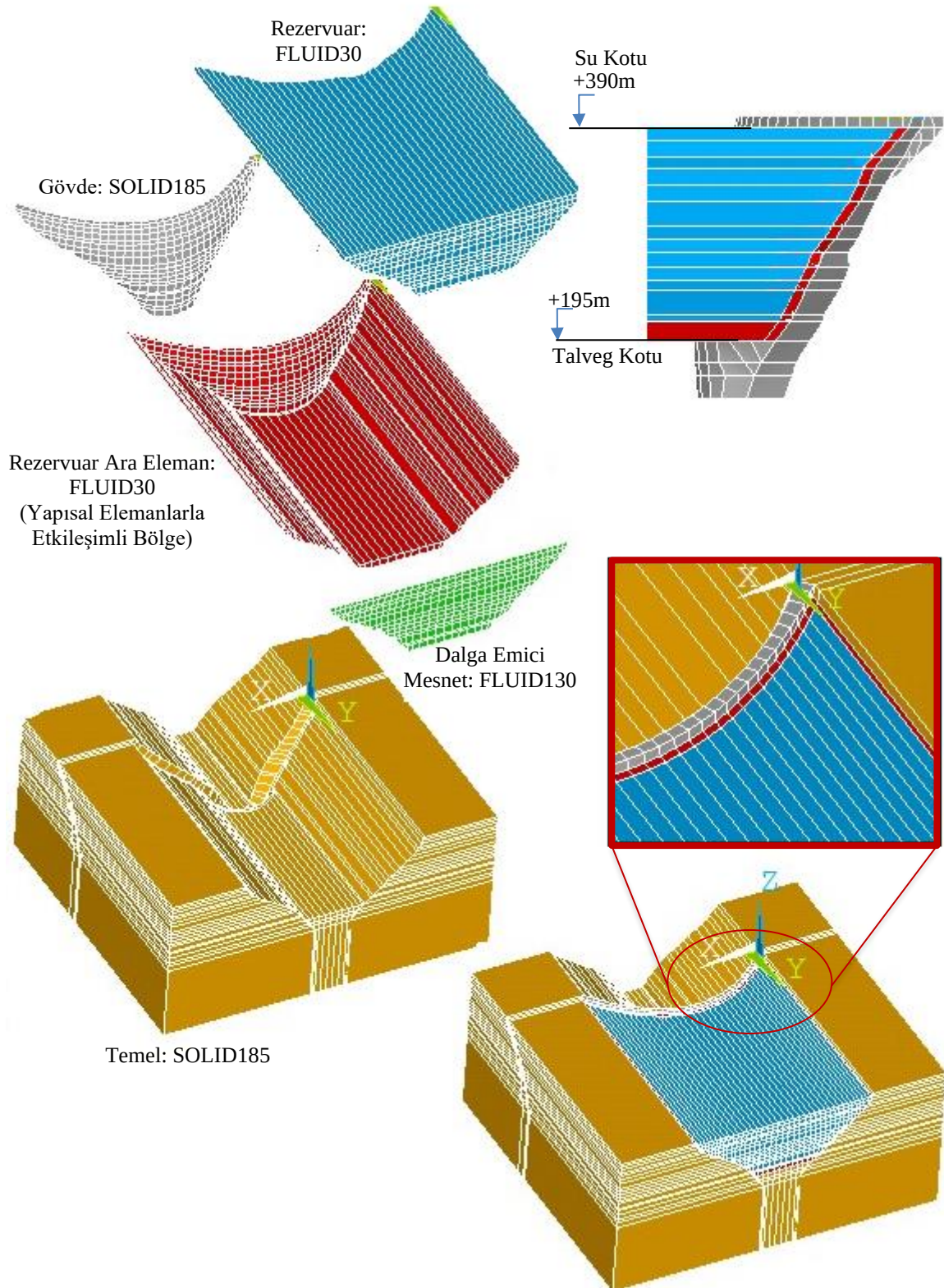
Westergaard ek kütlesi kullanılarak oluşturulan rezervuar etkisini içeren sayısal modelde, baraj gövdesinin eğimli memba yüzeyindeki düğüm noktalarına 195m su yüksekliği için hesaplanan kütle her üç eksen doğrultusunda ek kütle olarak tanımlanmıştır. Uygulanan kütle için MASS21 eleman tipi kullanılmıştır. Westergaard ek kütle yaklaşımına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modeline ait bazı görseller Şekil 17'de verilmektedir.

Rezervuardaki sıvının Euler akışkan elemanlarıyla temsil edildiği sayısal modelde rezervuar için FLUID30 akışkan eleman tipi kullanılmıştır. Yapısal elemanlar (SOLID185 vb.) ile akışkan elemanların (FLUID30 vb.) birleştiği komşu düğüm noktaları arasında bir uyumsuzluk oluşmaktadır. Bunun temel sebebi Euler akışkan elemanların basınç serbestlik derecesine sahipken yapısal elemanların deplasman serbestlik derecesine sahip olmasıdır. Düğüm noktaları arasında uygunluğun sağlanması amacıyla rezervuar elemanlarının yapısal elemanlarla birleştiği tüm yüzeylerdeki akışkan eleman tipinde hem basınç hem de deplasman serbestlik dereceleri aktive edilirken bu eleman tipinin çevrelediği ve iç kısımda kalan rezervuar kısmında sadece basınç serbestlik derecesi aktive edilmiştir. Bu durum Euler akışkan elemanları ile modellenen baraj-rezervuar-temel modelinin modal analizinde simetrik olmayan rijitlik matrisinin kullanılmasına neden olmaktadır. Euler akışkan elemanları ile modelleme yapılırken rezervuarın mevcut durumdan daha kısa modellenmiş olması rezervuarın bitiş kısmında dalgaların sonsuza yayılmasını önleyerek baraj gövdesine yansımaya sebep olmaktadır. Bu durumun engellenmesi için rezervuarın bitiminde sınır koşullarını doğru yansıtmak ve dalga yansımalarını engellemek için dalga hızının emilmesi

maksatlı iç sürtünme değeri maksimum değer alınarak dalga emici bir mesnet olarak FLUID130 elemanı kullanılmıştır. Euler akışkan elemanları yaklaşımına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modeline ait bazı görseller Şekil 18’de verilmektedir.

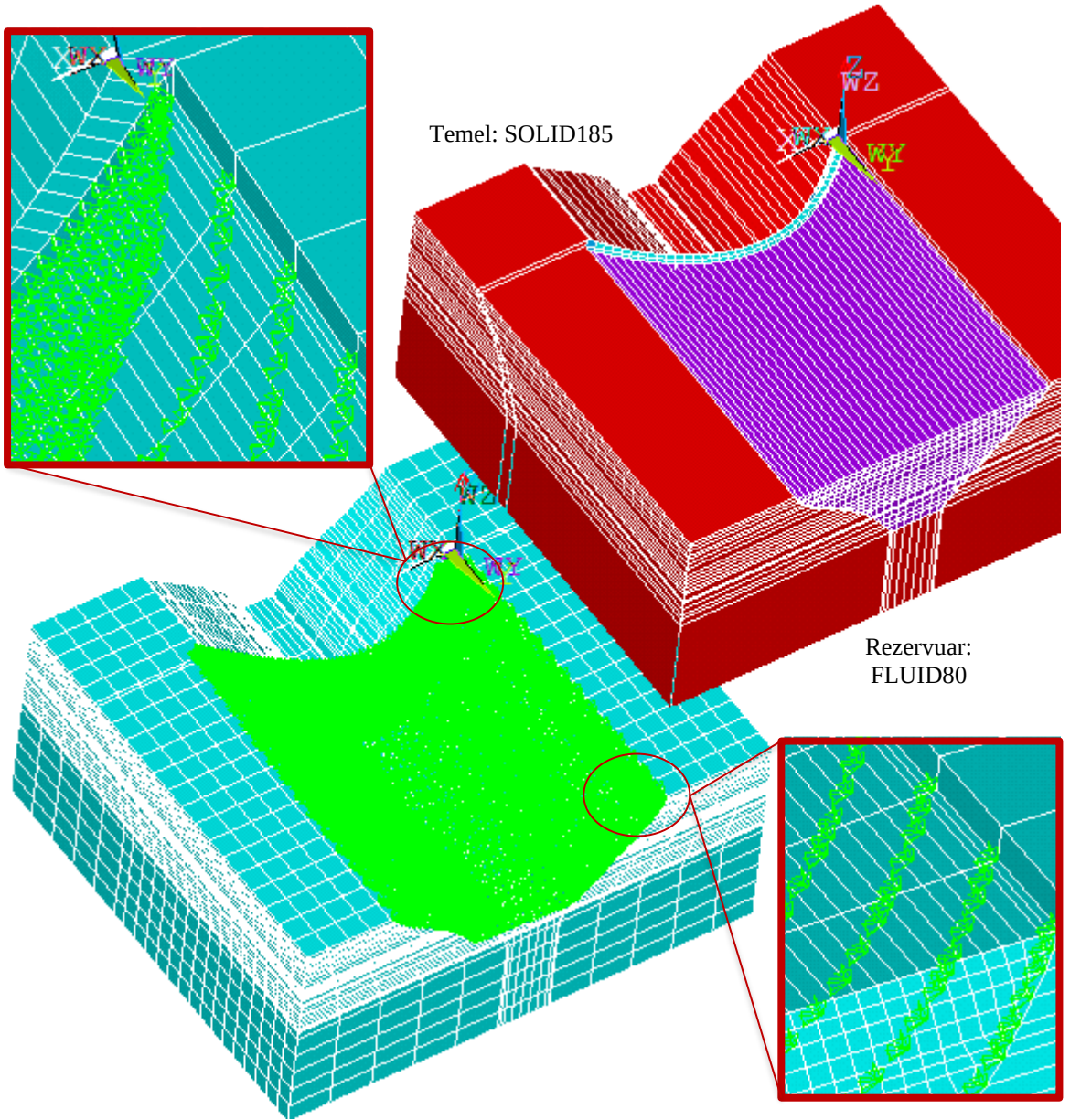


Şekil 17. Deriner Barajının Westergaard ek kütle yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli



Şekil 18. Deriner Barajının Euler akışkan eleman yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli

Lagrange akışkan elemanları yaklaşımı kullanılan modellerde ise akışkan elemanların (FLUID80) yapısal elemanlarla direk bağlantısı engellenmelidir. Bu amaçla rezervuar ve yapısal elemanların birleşim bölgelerinde düğüm noktaları arasında 0.001 m uzunluğuna sahip bağlantı elemanları kullanılmıştır. Bağlantı elemanlarının görevi, sıvı-yapı ara yüzeylerindeki düğüm noktalarının yüzey normali doğrultusundaki yer değiştirmelerini eşitlemektir. Rezervuarın bitim noktasındaki yüzeyde yatay yer değiştirmeler engellenmiş, düşey yer değiştirmeler serbest bırakılmıştır. Lagrange akışkan elemanları yaklaşımına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modeline ait bazı görseller Şekil 19’da verilmektedir.



Şekil 19. Deriner Barajının Lagrange akışkan eleman yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli

❖ Deriner Barajının Modal Analizi

Deriner Barajının rezervuarının boş olması durumu ve üç farklı rezervuar yaklaşım yöntemi kullanılarak hazırlanan sonlu eleman modeline ait malzeme ve eleman özellikleri Tablo 2’de özetlenmektedir. Deriner Barajının projesine ait malzeme özelliklerine ulaşamadığı için literatürde benzer barajlarda kullanılan malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modellerin her birine modal analiz uygulanarak frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Tablo 3 hem deneysel hem de her bir yaklaşım metoduna ait modellerin modal analiz sonucu elde edilen frekans değerlerini karşılaştırmaktadır. Tablo 4’te sonlu eleman model sonuçlarının deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında hata oranlarının %5’ten fazla olduğu görülmüştür. Bu durum analizlerde kullanılan ve literatüre göre seçilen malzeme özelliklerinin güncellenmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 2. Deriner Barajının farklı rezervuar modelleme yaklaşımlarına ait başlangıç sonlu eleman modeli için kullanılan malzeme ve eleman özellikleri

		Malzeme Özellikleri			
	ANSYS Elemen Tipi	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	Sonik Dalga Hızı (m/s)
<i>Boş Rezervuar Durumu için</i>					
Kemer	SOLID185	3,75E10	0,15	2400	----
Temel	SOLID185	5,68E10	0,3	----	----
<i>Euler Yaklaşımı için</i>					
Kemer	SOLID185	3,75E10	0,15	2400	----
Rezervuar	FLUID30	----	----	1000	1438,75
Ara Yüzey Elemanı	FLUID30	----	----	1000	1438,75
Euler Dalga Emici	SOLID130	----	----	1000	1438,75
Temel	SOLID185	5,68E10	0,3	----	----
<i>Lagrange Yaklaşımı için</i>					
Kemer	SOLID185	3,75E10	0,15	2400	----
Rezervuar	FLUID30	2,07E9	----	1000	----
Temel	SOLID185	5,68E10	0,3	----	----
<i>Westergaard Yaklaşımı için</i>					
Kemer	SOLID185	3,75E10	0,15	2400	----
Temel	SOLID185	5,68E10	0,3	----	----
Rezervuar	MASS21	----	----	----	----

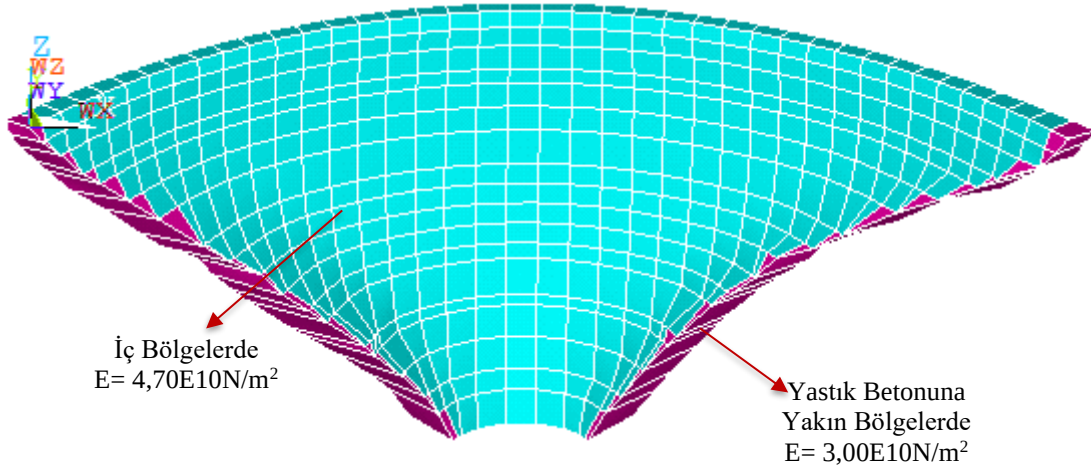
Tablo 3. Deriner Barajının deneysel ve sonlu eleman modellerine ait modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri

Mod No	Frekans Değerleri (Hz)			
	Deneysel Modal Analiz	Westergaard Yaklaşımı	Euler Yaklaşımı	Lagrange Yaklaşımı
1	1.638	1.1898	1.4481	1,3399
2	2.286	1.8358	2.2637	2,1385
3	3.498	2.9277	3.4770	3,4639
4	3.950	3.1051	3.8125	3,5854

Tablo 4. Deriner Barajının sonlu eleman modellerine ait frekans değerlerinin deneysel olarak elde edilen frekans değerlerine göre hata oranları

Mod No	Hata Oranları (%)		
	Westergaard Yaklaşımı	Euler Yaklaşımı	Lagrange Yaklaşımı
1	27,36	11,59	18,20
2	19,69	0,98	6,45
3	16,30	0,60	0,97
4	21,39	3,48	9,23

Sonlu eleman modellere ait analizler sonucunda her üç yaklaşım için elde edilen frekans değerleri deneysel olarak elde edilen frekanslar değerleri ile karşılaştırıldığında Tablo 3'ten de görüldüğü üzere bazı modlar hariç yüksek hata oranları hesaplanmıştır. Literatürde Euler yaklaşımının daha etkin olduğunu öne süren çalışmalar olduğu için ve deneysel sonuçlara da daha yakın olduğu için sonlu eleman model güncelleme işlemi Euler yaklaşımı kullanılarak hazırlanan model dikkate alınarak yapılmıştır. Euler yaklaşımı ile oluşturulan model güncellenerek elde edilen malzeme özellikleri Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan modellerde kullanılarak sonlu eleman model güncellemesi yapılmıştır. Sonlu eleman modellere ait frekans değerleri genel olarak deneysel frekanslara göre daha düşük geldiği için baraj gövdesinin elastisite modülü artırılarak deneysel sonuçlara göre yakınsama sağlanmıştır. Örnek teşkil etmesi amacıyla Yusufeli Barajının gövdesine ait malzeme dağılımı incelendiğinde yastık betonuna yakın bölgelerde daha düşük malzeme dayanımının kullanıldığı görülmüştür. Benzer dağılım Deriner Barajının gövdesi için kullanılmıştır. Şekil 20 manuel olarak güncellenmiş Deriner Baraj gövdesinde kullanılan malzeme özelliklerini ve dağılımını göstermektedir. Tüm rezervuarlı modellere ait analizlerde sadece gövdeye ait malzemeler Şekil 20'ye göre güncellenmiş olup, diğer malzeme özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 20. Deriner Barajına ait sonlu eleman model güncellemede baraj gövdesine ait malzeme dağılımı

Deriner Barajının güncellenmiş sonlu eleman modellerine ait modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri Tablo 5'te verilmektedir. Deneysel modal analiz sonucu elde edilen frekans değerlerine göre değişim oranları ise Tablo 6'da verilmektedir. Tablo 6'ya göre Euler yaklaşımı kullanılan modelin güncellenmesi sonucu elde edilen frekans değerleri deneysel sonuçlara literatürce kabul edilebilir sınırlar içerisinde elde edilmiştir. Euler yaklaşımı baz alınarak yapılan güncelleme işleminde Lagrange ve Westergaard yaklaşımlarına ait sayısal frekans ile deneysel frekans değerleri arasındaki farklılıkların fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Deriner Barajının deneysel ve güncellenmiş sonlu eleman modellerine ait modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri

Mod No	Frekans Değerleri (Hz)			
	Deneysel Modal Analiz	Westergaard Yaklaşımı	Euler Yaklaşımı	Lagrange Yaklaşımı
1	1,638	1,2914	1,5684	1,3570
2	2,286	2,0066	2,2245	1,9887
3	3,498	3,2013	3,5203	2,8586
4	3,950	3,4068	4,1782	3,4555

Frekans değerleri deneysel sonuçlar ile yakın ilişki içerisinde olan güncellenmiş baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modelin rezervuarın boş olması durumu için de modal analizleri gerçekleştirilerek frekans değerleri elde edilmiştir. Deriner Barajının inşasının tamamlanmasının ardından su tutma süreci başlamış olup bu süreçte herhangi bir

kurum/kuruluş ya da kişiler tarafından deneysel titreşim testi gerçekleştirilmemiştir. Deneysel olarak doğrulanan rezervuar etkileşimli sonlu eleman modelde rezervuar etkisi kaldırılarak rezervuarın boş olması durumu için olası frekans değerleri bu tez kapsamında elde edilerek literatüre kazandırılmıştır. Tablo 7’de 195m su seviyesine ait deneysel modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri ile rezervuarın boş olması durumunda elde edilen sonlu eleman model analizine ait frekans değerleri karşılaştırılarak, rezervuarın su ile dolması durumunda frekansların değişim oranları elde edilerek tabloda sunulmuştur. Tablo 7’ye göre rezervuarın boş olması durumunda frekans değerleri arasında değişimin maksimum %34 ile üçüncü modda olduğu görülmektedir.

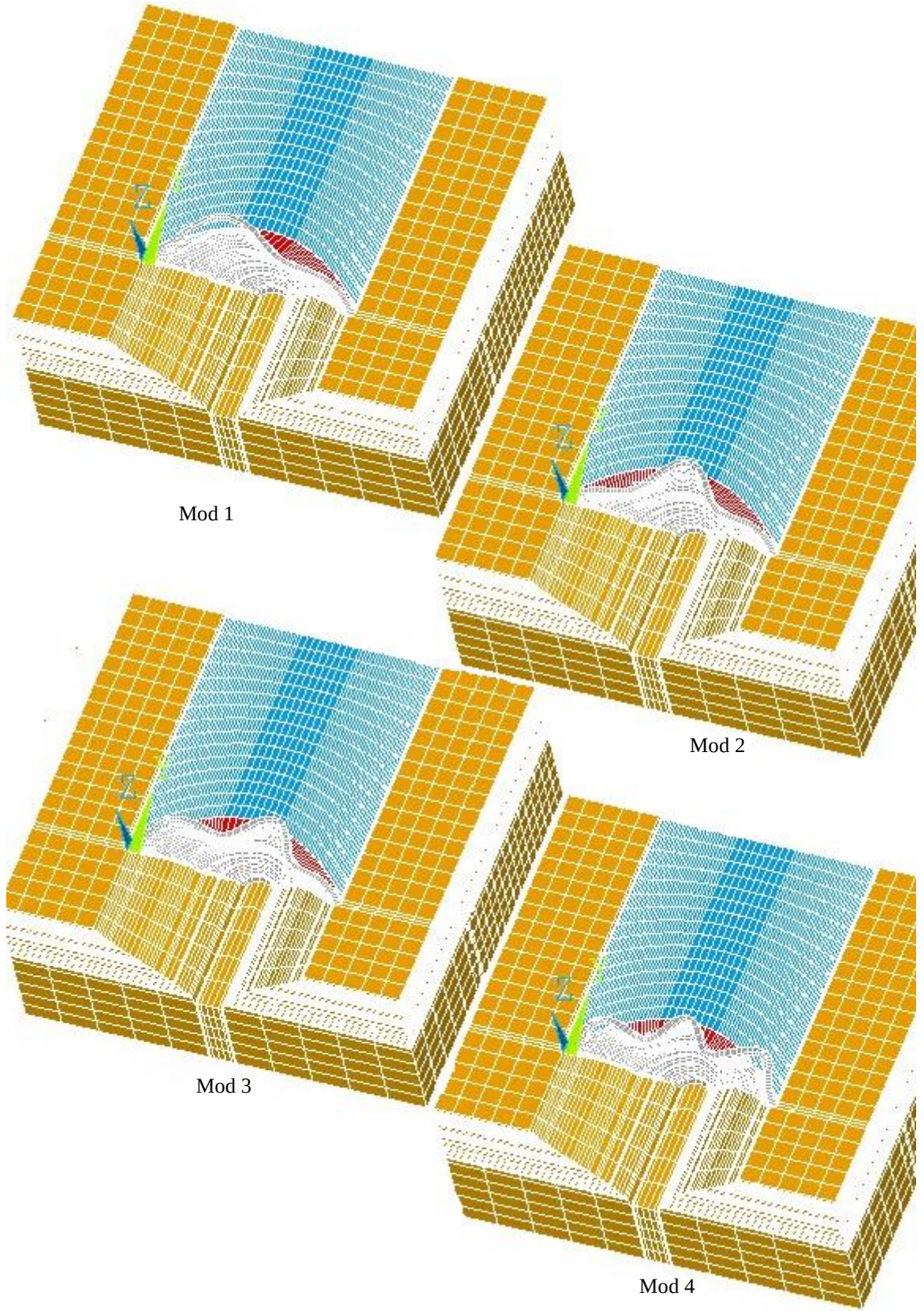
Tablo 6. Deriner Barajının güncellenmiş sonlu eleman modellerine ait frekans değerlerinin deneysel olarak elde edilen frekans değerlerine göre hata oranları

Mod No	Hata Oranları (%)		
	Westergaard Yaklaşımı	Euler Yaklaşımı	Lagrange Yaklaşımı
1	21,16	4,25	17,16
2	12,22	2,69	13,06
3	8,48	0,64	18,28
4	13,75	5,78	12,52

Tablo 7. Deriner Barajının deneysel ve rezervuarın boş olması durumu için elde edilen sonlu eleman modellerine ait edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

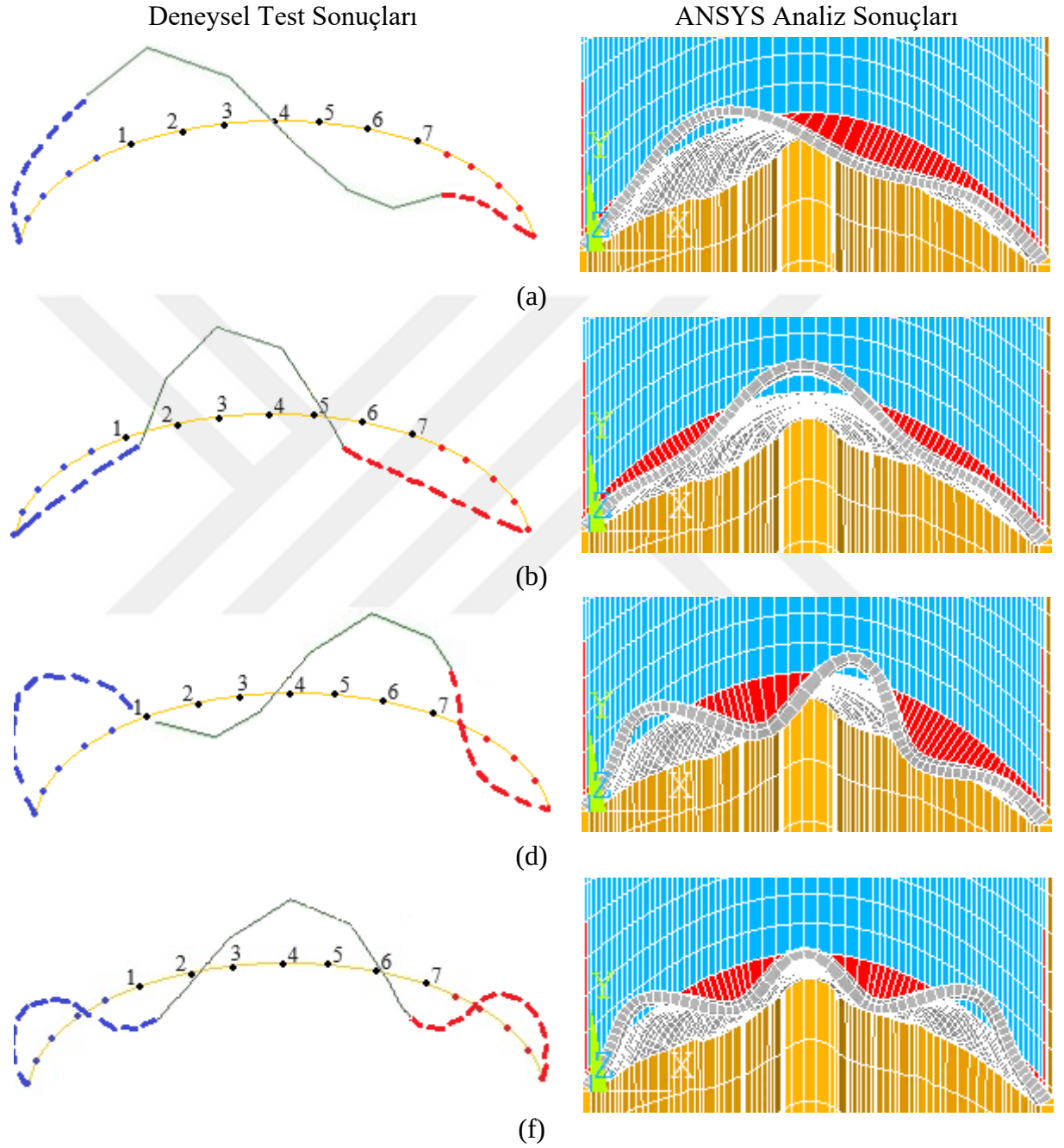
Mod No	Frekans Değerleri (Hz)		Fark (%)
	Deneysel (195m Su Seviyesi için)	ANSYS (Rezervuarın Boş Olması Durumu için)	
1	1,638	1,8792	14,73
2	2,286	2,8814	26,05
3	3,498	4,6815	33,83
4	3,950	4,7522	20,31

Rezervuarın boş olması ve üç farklı yaklaşıma göre rezervuar modellenmesi durumlarına ait modal analizler sonucu baraja ait ilk dört mod şekli elde edilmiştir. Tüm modelleme türlerine ait mod şekilleri aynı olup, Euler modeline ait ilk dört mod şekli Şekil 21’de verilmektedir.



Şekil 21. Deriner Barajı sonlu eleman modelinin modal analizi sonucu elde edilen ilk dört mod şekli

Deneysel test ve sonlu eleman modelin modal analizlerinden elde edilen ilk dört moda ait mod şekilleri Şekil 22’de verilmektedir. Şekil 22’ye göre deneysel ve sonlu eleman modele ait mod şekillerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

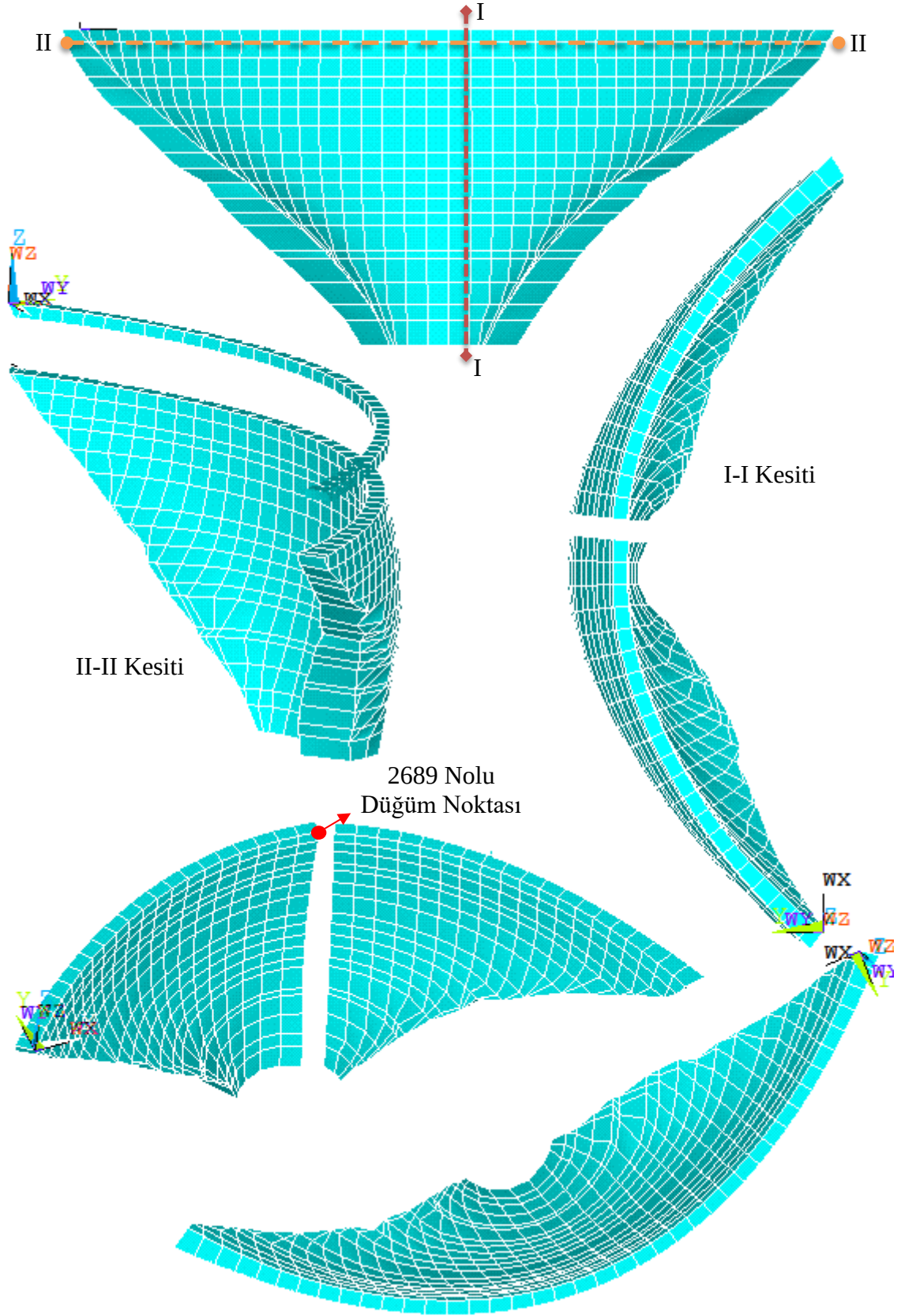


Şekil 22. Deriner Barajına ait deneysel ve sonlu eleman modelden elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması

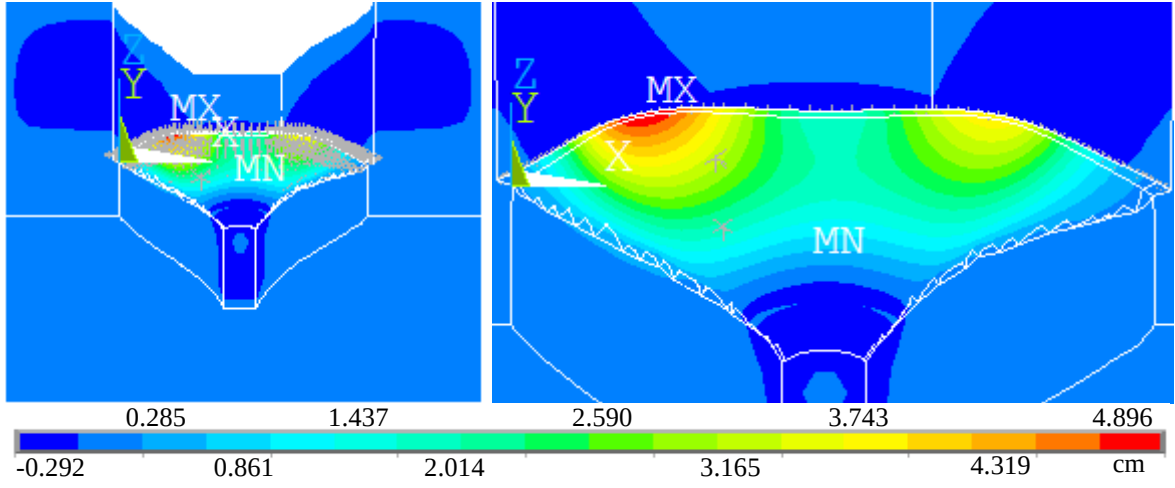
❖ Deriner Barajının Statik Analizi

Arazi ve sonlu eleman modellere ait frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılarak sonlu eleman modellerin doğrulanmasının ardından Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan sonlu eleman modellerin yer değiştirme ve gerilme değerlerinin elde edilmesi için statik analizler yapılmıştır. Euler yaklaşımında kullanılan FLUID30 eleman tipi statik analizde kullanılmadığı için bu yaklaşıma ait modelin sonuçları bu kısımda elde edilememektedir. Analiz sonuçlarının ifade edilmesinde Şekil 23'te verilen I-I ve II-II kesitleri kullanılmıştır. Şekil 24 ve 25'te sırasıyla rezervuarı Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen barajın gövdesinde oluşan yer değiştirme ve gerilmelere ait kontur diyagramları verilmektedir.

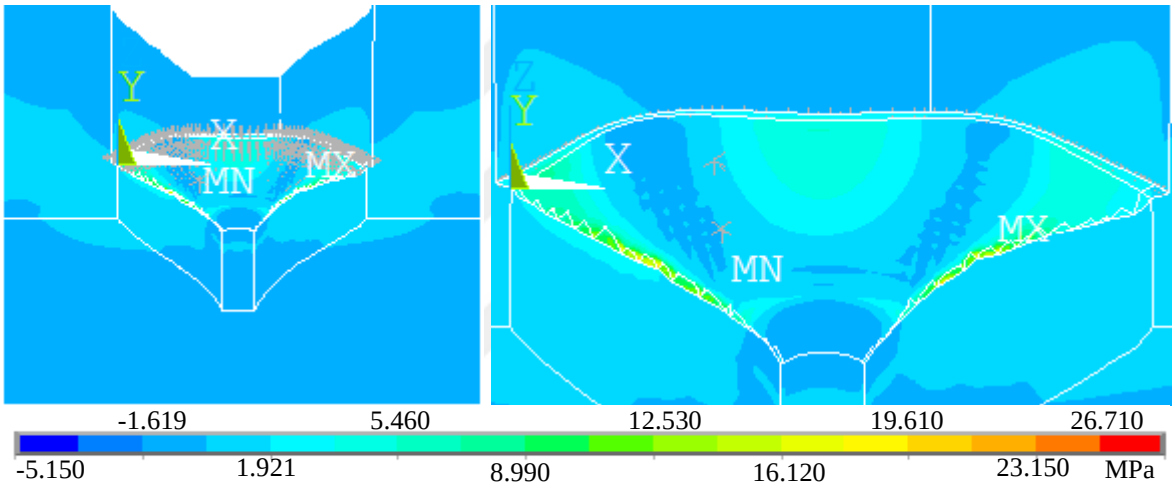
Şekil 24 ve 25'te rezervuarın Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenmiş sonlu eleman modellerine ait statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 26'da asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 27'de ve ilgili değerler Tablo 8'de verilmektedir.



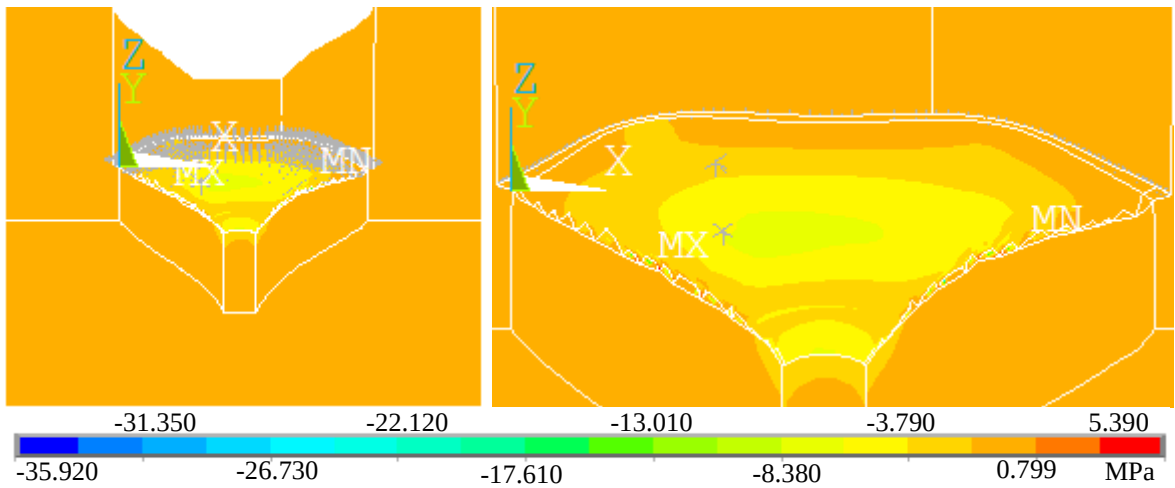
Şekil 23. Deriner Barajının statik ve dinamik analiz sonuçlarının gösterimi için seçilen I-I ve II-II kesitleri



(a)

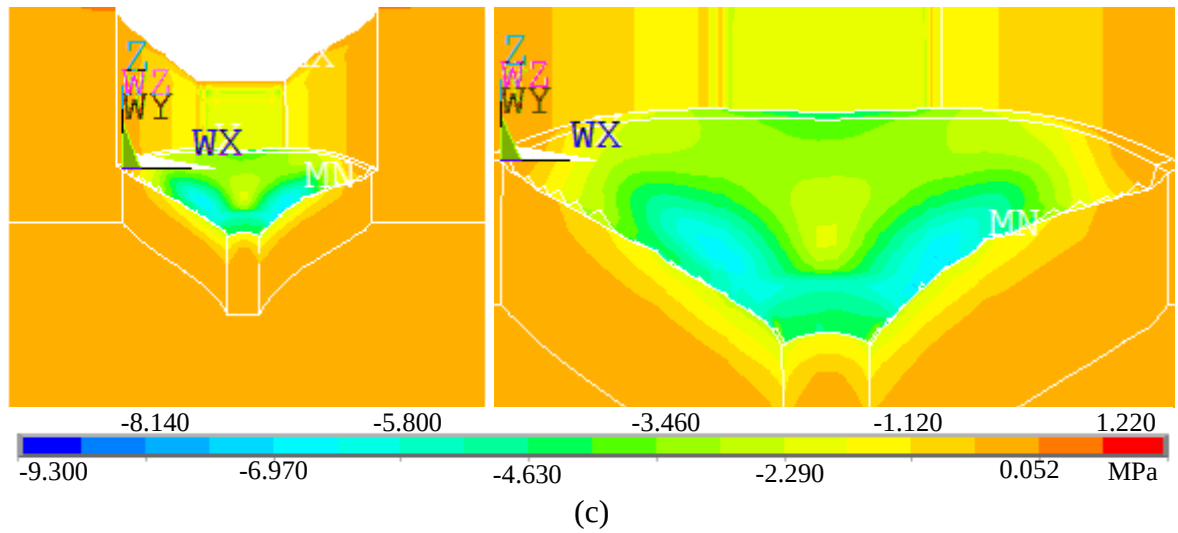
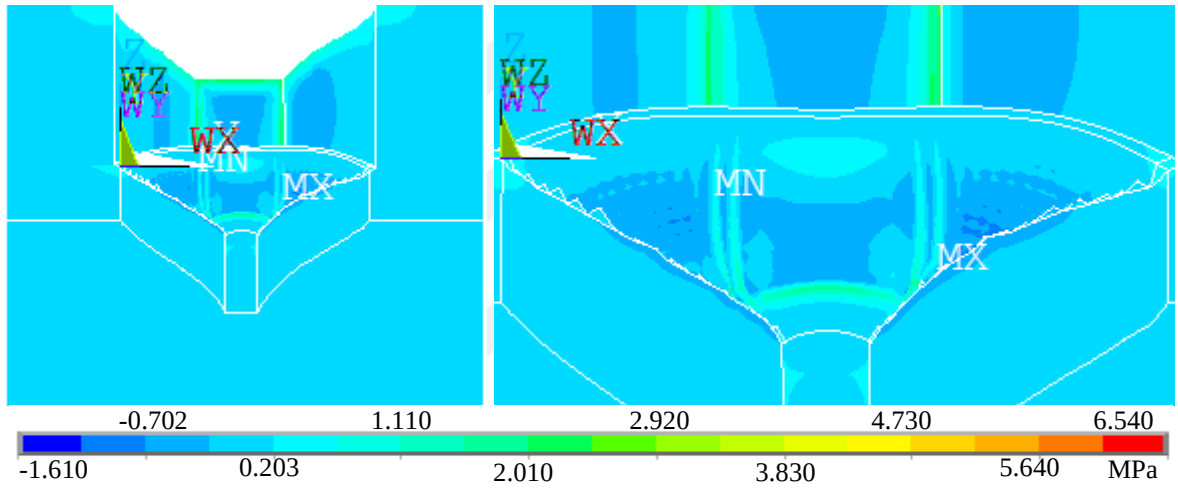
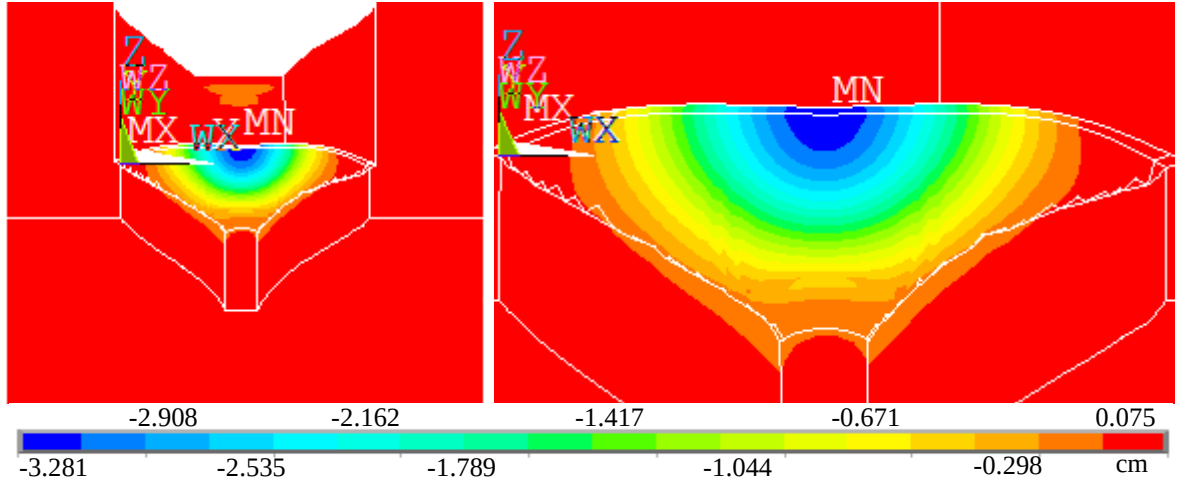


(b)

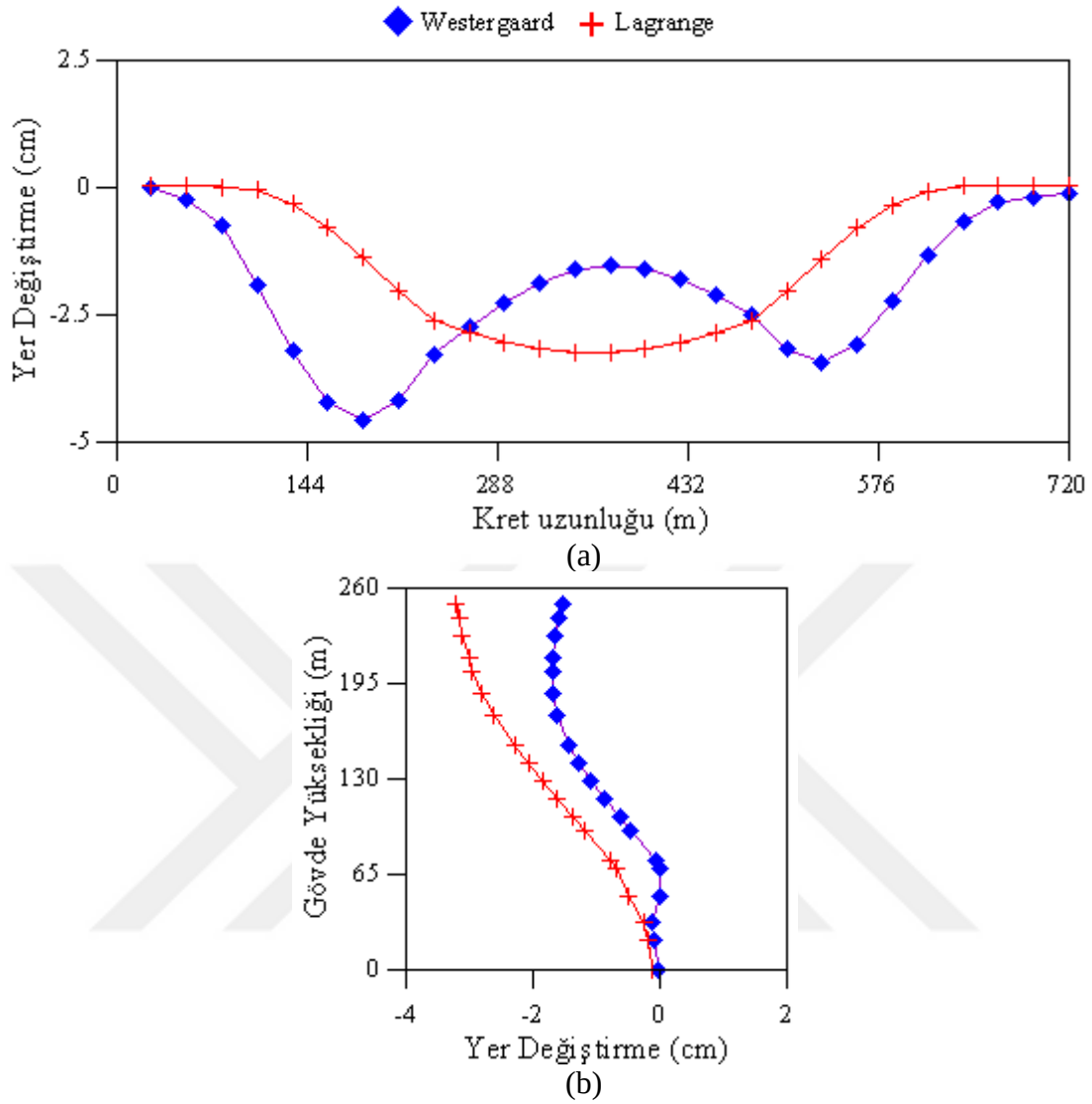


(c)

Şekil 24. Westergaard yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

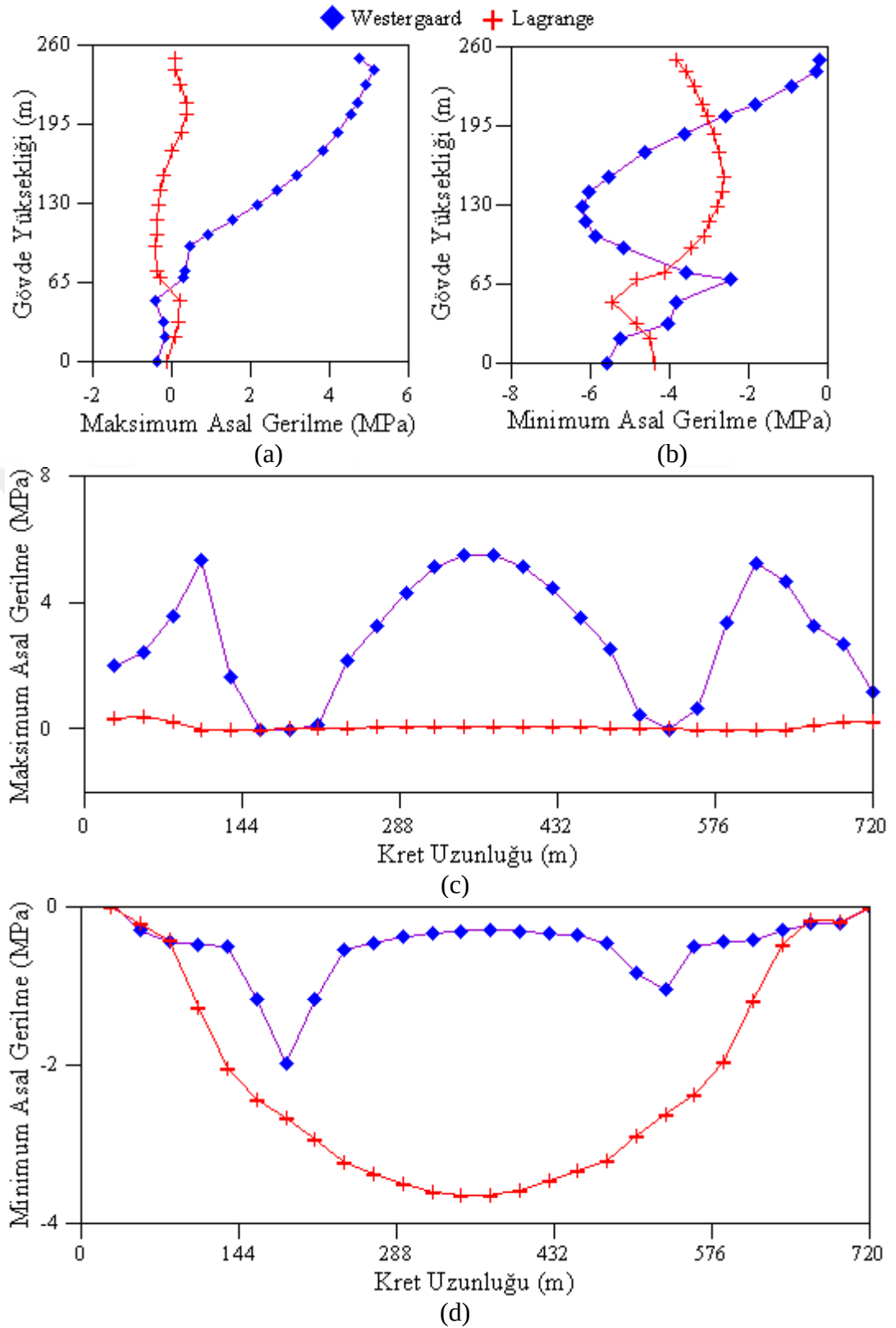


Şekil 25. Lagrange yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 26. Westergaard ve Lagrange yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme

Deriner Barajının Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modelinin statik analizi sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri Şekil 26 (a) ve (b)'den görüldüğü üzere II-II kesiti boyunca Westergaard yaklaşımına ait durumda yer değiştirme baraj yamaçlarında minimum değerde iken barajın çeyrek bölgesine denk gelen kısımlarda maksimum değerlere ulaşmış, kretin tam ortasında kadar azalma eğiliminde olduğu, Lagrange yaklaşımına ait modelde ise yer değiştirme değerlerinin yamaçtan itibaren kret orta bölgesine doğru artış eğiliminde olduğu görülmektedir. I-I kesiti boyunca ise her iki yaklaşımda da temelde minimum olan yer değiştirme değerlerinin gövde yüksekliği arttıkça artma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 27. Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının statik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelerine ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum asal gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum asal gerilme

Tablo 8. Deriner Barajının Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan modellerinin statik analizi sonucu elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri

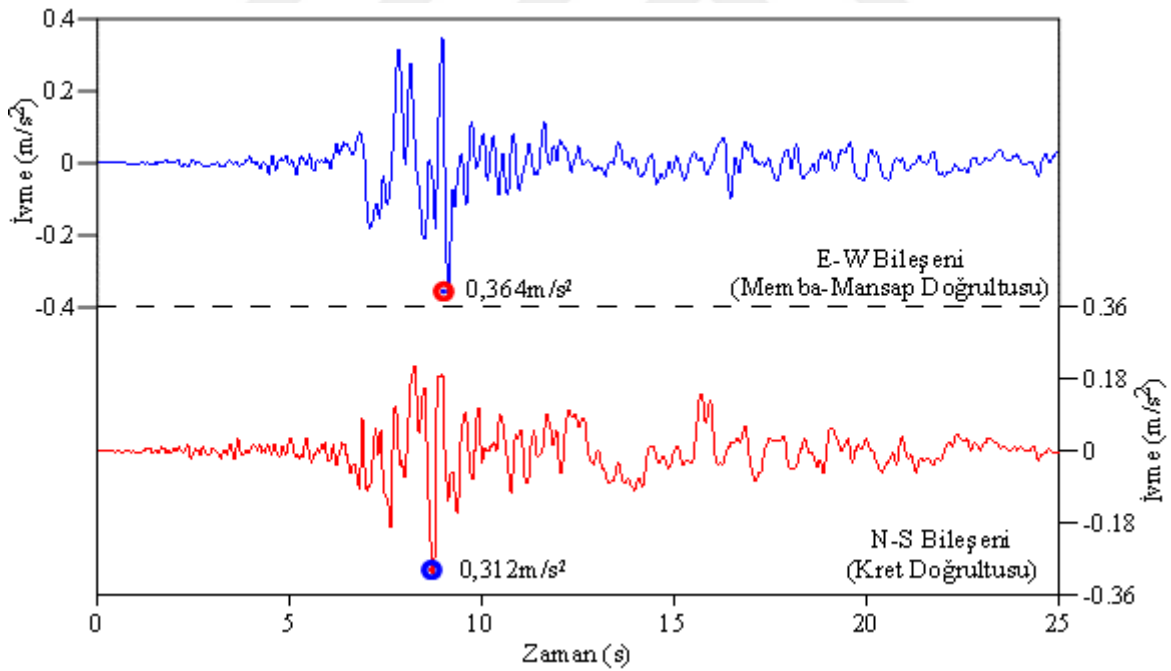
Kesit Düğüm Noktaları	Yer değiştirme		Maksimum Asal Gerilme		Minimum Asal Gerilme	
	Westergaard	Lagrange	Westergaard	Lagrange	Westergaard	Lagrange
<i>I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)</i>						
2689	-1.551	-3.219	4.752	0.054	-0.228	-3.860
2473	-1.604	-3.179	5.120	0.076	-0.311	-3.585
2193	-1.657	-3.129	4.904	0.210	-0.939	-3.402
1929	-1.700	-3.010	4.700	0.348	-1.824	-3.188
1681	-1.712	-2.974	4.514	0.357	-2.600	-3.072
1449	-1.695	-2.820	4.206	0.220	-3.641	-2.901
1241	-1.625	-2.624	3.820	-0.005	-4.634	-2.762
1057	-1.433	-2.293	3.146	-0.226	-5.554	-2.641
889	-1.277	-2.081	2.658	-0.308	-6.042	-2.695
737	-1.088	-1.857	2.134	-0.360	-6.208	-2.794
629	-0.875	-1.625	1.543	-0.386	-6.136	-3.007
537	-0.645	-1.388	0.892	-0.403	-5.889	-3.152
417	-0.465	-1.204	0.454	-0.434	-5.195	-3.465
313	-0.073	-0.789	0.321	-0.400	-3.577	-4.123
217	-0.009	-0.681	0.281	-0.314	-2.458	-4.828
137	-0.005	-0.498	-0.439	0.177	-3.824	-5.477
73	-0.134	-0.269	-0.243	0.162	-4.035	-4.862
27	-0.091	-0.195	-0.195	0.055	-5.268	-4.501
25	-0.027	-0.119	-0.381	-0.141	-5.601	-4.406
<i>II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)</i>						
2331	-0.019	0.027	1.976	0.329	0.046	-0.005
2329	-0.248	0.032	2.401	0.398	-0.308	-0.222
2081	-0.751	0.007	3.568	0.220	-0.448	-0.432
2365	-1.941	-0.066	5.306	-0.024	-0.479	-1.268
2381	-3.226	-0.337	1.611	-0.027	-0.509	-2.039
2397	-4.227	-0.801	-0.018	-0.020	-1.176	-2.440
2413	-4.575	-1.397	-0.045	-0.001	-1.983	-2.671
2429	-4.193	-2.037	0.135	-0.008	-1.176	-2.943
2445	-3.281	-2.616	2.160	0.024	-0.550	-3.232
2453	-2.759	-2.852	3.235	0.060	-0.456	-3.377
2457	-2.276	-3.040	4.307	0.064	-0.388	-3.504
2461	-1.885	-3.172	5.097	0.075	-0.340	-3.603
2465	-1.631	-3.241	5.483	0.081	-0.310	-3.650
2469	-1.537	-3.243	5.479	0.080	-0.299	-3.645
2473	-1.604	-3.179	5.120	0.076	-0.311	-3.585
2477	-1.814	-3.050	4.422	0.065	-0.346	-3.471
2481	-2.129	-2.864	3.501	0.063	-0.361	-3.338
2485	-2.506	-2.626	2.519	0.031	-0.474	-3.210
2497	-3.192	-2.045	0.453	-0.004	-0.845	-2.898
2513	-3.442	-1.402	-0.013	0.003	-1.057	-2.622
2529	-3.078	-0.805	0.631	-0.017	-0.506	-2.379
2545	-2.237	-0.351	3.362	-0.026	-0.450	-1.960
2561	-1.321	-0.091	5.238	-0.023	-0.427	-1.188
2577	-0.673	0.015	4.649	-0.015	-0.304	-0.486
2593	-0.300	0.035	3.241	0.096	-0.224	-0.164
2601	-0.191	0.029	2.668	0.225	-0.218	-0.189
2609	-0.127	0.022	1.150	0.236	0.003	-0.028

Deriner Barajına ait asal gerilmelerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla Şekil 27 (a) ve (b) incelendiğinde, maksimum asal gerilmelerin Westergaard yaklaşımına ait modelde baraj yüksekliği boyunca genellikle arttığı, kretten yaklaşık 10 m aşağıda en büyük değeri aldığı ve krette ise biraz azaldığı görülmektedir. Lagrange yaklaşımına ait analiz sonuçlarında seçilen kesit boyunca önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Minimum asal gerilmeler incelendiğinde ise iki yönteme ait sonuçların tam tersi bir davranış gösterdiği, zeminden itibaren kesit boyunca Westergaard yaklaşımına göre ilk 65m ye kadar gerilmelerin arttığı ardından azalmaya başlayarak 130 m yüksekliğinde minimum değere ulaştığı ve ardından tekrar artmaya başladığı görülmektedir. Lagrange yaklaşımına göre ise ilk 65m ye kadar gerilmelerin azaldığı ardından artmaya başlayarak 130 m yüksekliğinde maksimum değere ulaştığı ve ardından tekrar azalmaya başlamaktadır. Şekil 27 (c) ve (d)'den görüldüğü üzere, maksimum asal gerilmeler yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 100 m'lik mesafede artmakta; 100 m'den sonra azalmaya başlayarak 150 m'den itibaren sabitlenmekte ve 210 m'den itibaren kretin orta bölgesine kadar tekrar artış eğilimi göstermektedir. Lagrange yaklaşımına göre ise seçilen kesit boyunca maksimum asal gerilmelerin değişmediği görülmektedir. Minimum asal gerilmeler ise yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 144 m'lik mesafede sabit devam etmekte; 144 m'den 180 m'ye kadar hızla artmakta ve ardından azalma eğilimine girerek kret orta bölgesinde sabit kalmaktadır. Lagrange yaklaşımına göre minimum asal gerilmelerin yamaçtan itibaren kret orta bölgesine doğru azalan bir eğilimde devam edip minimum değere ulaştığı görülmektedir.

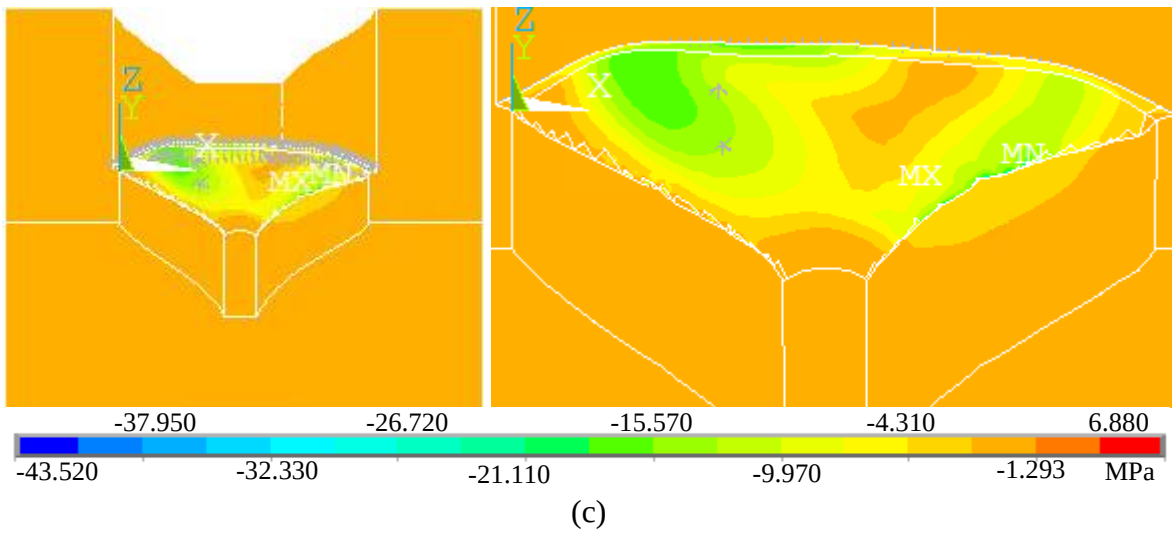
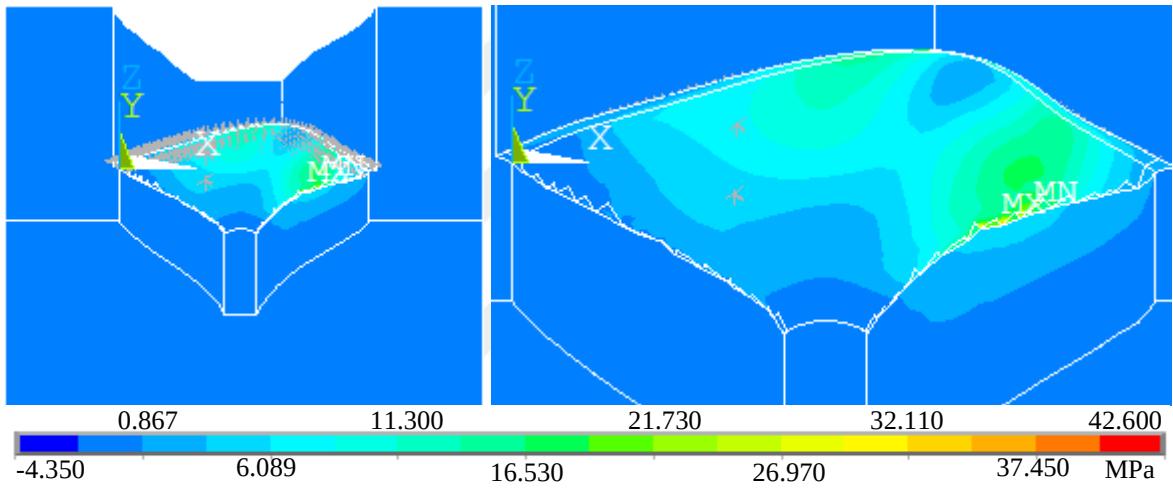
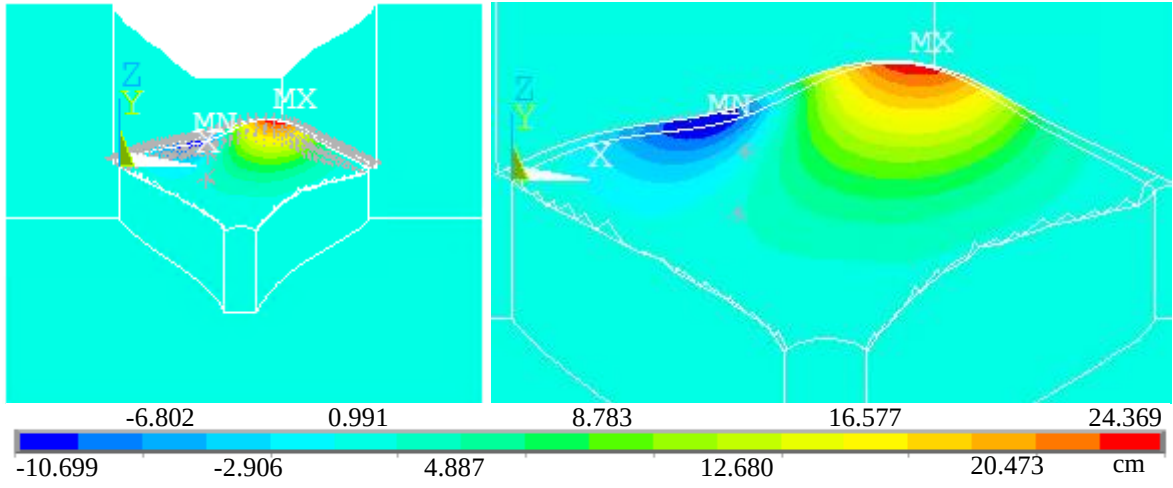
❖ Deriner Barajının Dinamik Analizi

Deriner Barajının hem deprem davranışını/yapısal performansını belirlemek için hem de farklı rezervuar modelleme yaklaşımlarının deprem etkisi altında nasıl davranış göstereceğini belirlemek ve karşılaştırmak amacıyla zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak hazırlanan sonlu eleman modellere uygulanmıştır. Deprem kaydının seçilmesinde Wieland vd. (2007) tarafında yapılan çalışma Deriner Barajının 0,35g büyüklüğündeki bir depreme göre tasarlandığını ifade etmektedir. Bu tez kapsamındaki analizler içinde ülkemizde daha önce meydana gelmiş benzer büyüklüğe sahip deprem kaydı kullanılmıştır. Deriner Barajının deprem analizlerinde barajın tasarım aşamasında kullanılan maksimum ivme büyüklüğü dikkate alınarak seçilen yer hareketi 1999 yılında meydana

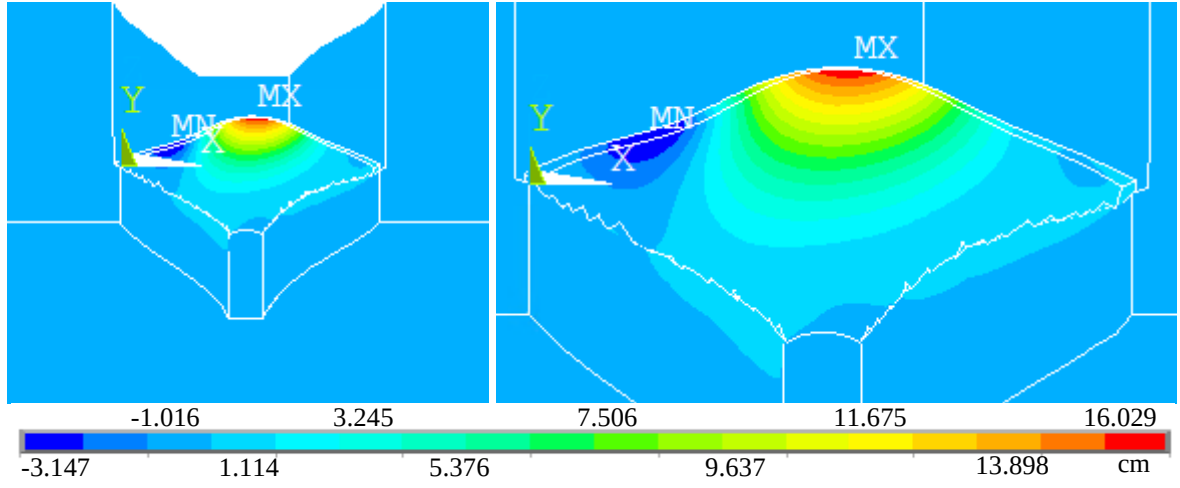
gelen Kocaeli depreminin Gebze istasyonundan elde edilen ivme kayıtlarıdır. Bu depreme ait EW ve NS bileşenleri sırasıyla baraja memba-mansap ve kret doğrultusunda olmak üzere iki doğrultuda uygulanmıştır. Kocaeli depreminin EW ve NS bileşenlerine ait ivme grafiği Şekil 28’de verilmektedir. Barajın zaman tanım alanındaki lineer analizlerinde, eleman matrisleri Gauss sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır (Bathe, 1996). Dinamik hareket denkleminin çözümünde ise Newmark Yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde Rayleigh sönüm katsayıları %5 sönüm oranı için hesaplanarak dikkate alınmıştır. Analizler çok uzun zaman aldığı ve fazla bilgisayar hafızası kapladığı için, işlem kolaylığı açısından yer hareketinin etkin olan ilk 20 s’si dikkate alınmıştır. Şekil 29-31’de rezervuarın Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenmiş sonlu eleman modellere ait dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 32’de, asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 33’te ve ilgili değerler Tablo 9’da verilmektedir.



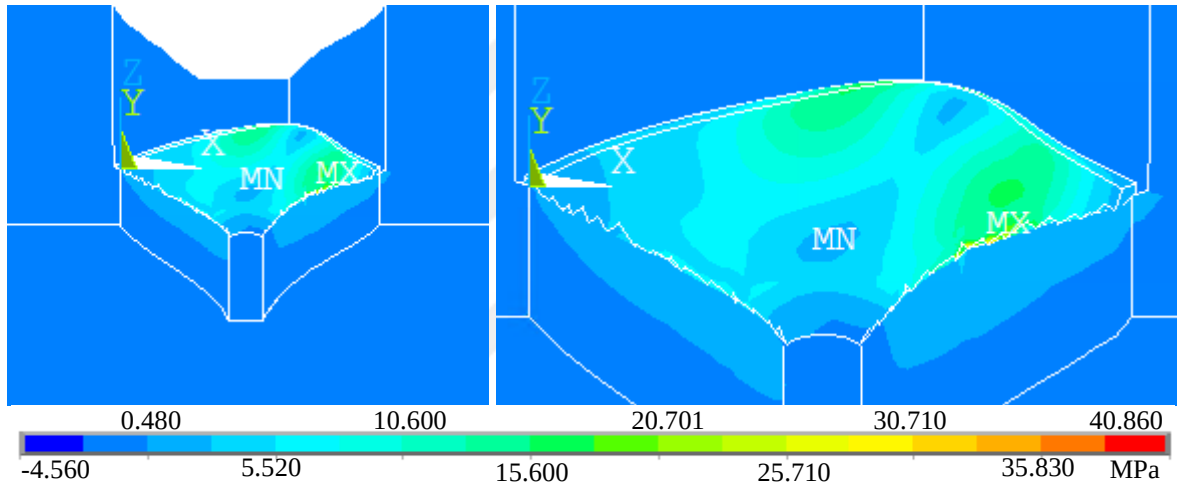
Şekil 28. 1999 Kocaeli depreminin EW ve NS bileşenlerine ait ivme kayıtları



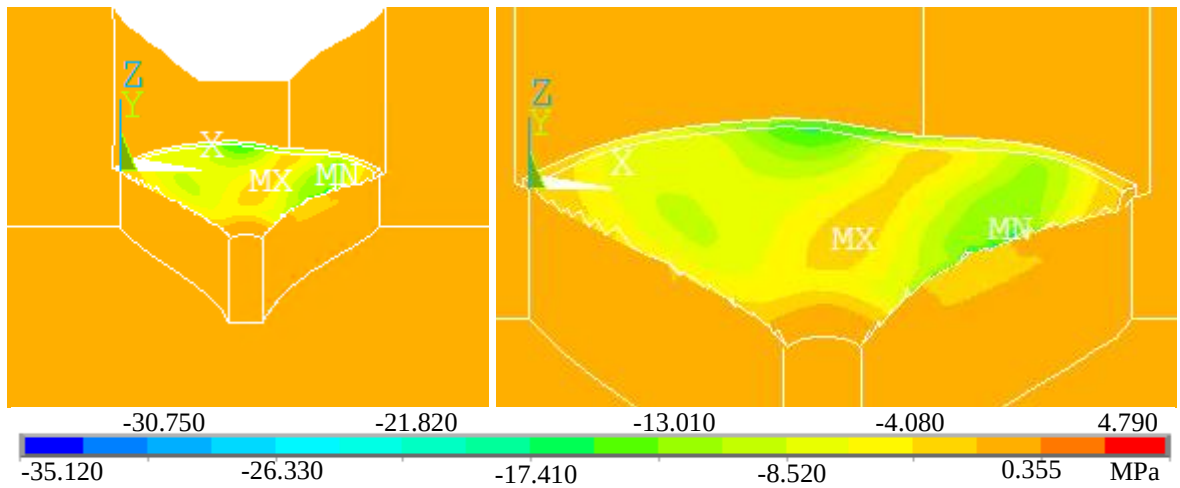
Şekil 29. Westergaard yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



(a)

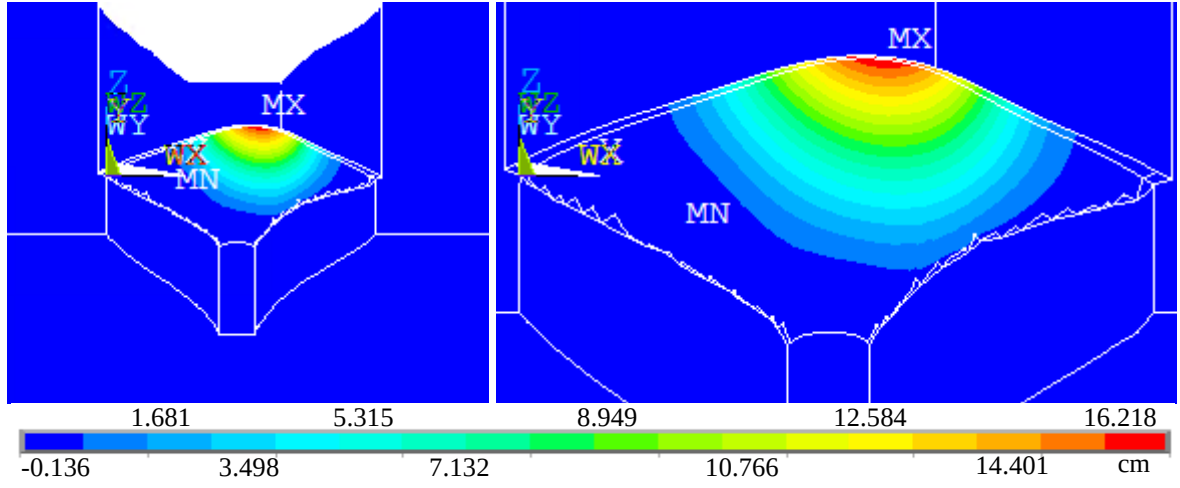


(b)

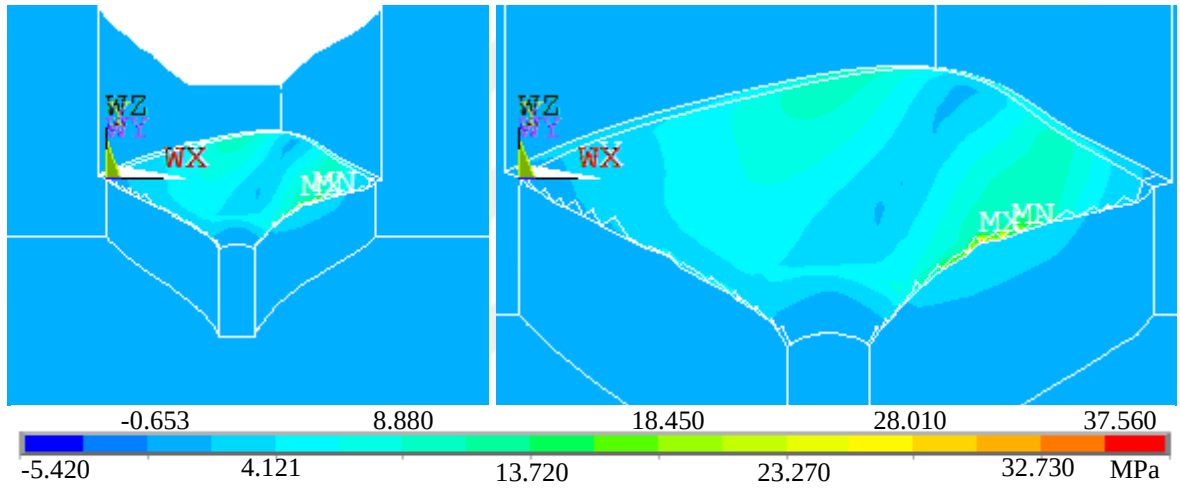


(c)

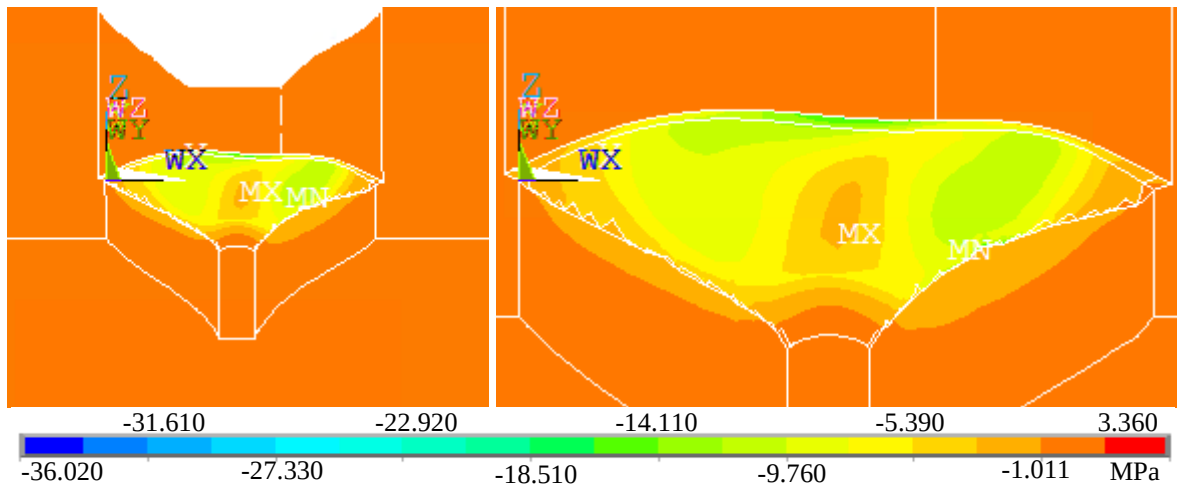
Şekil 30. Euler yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



(a)

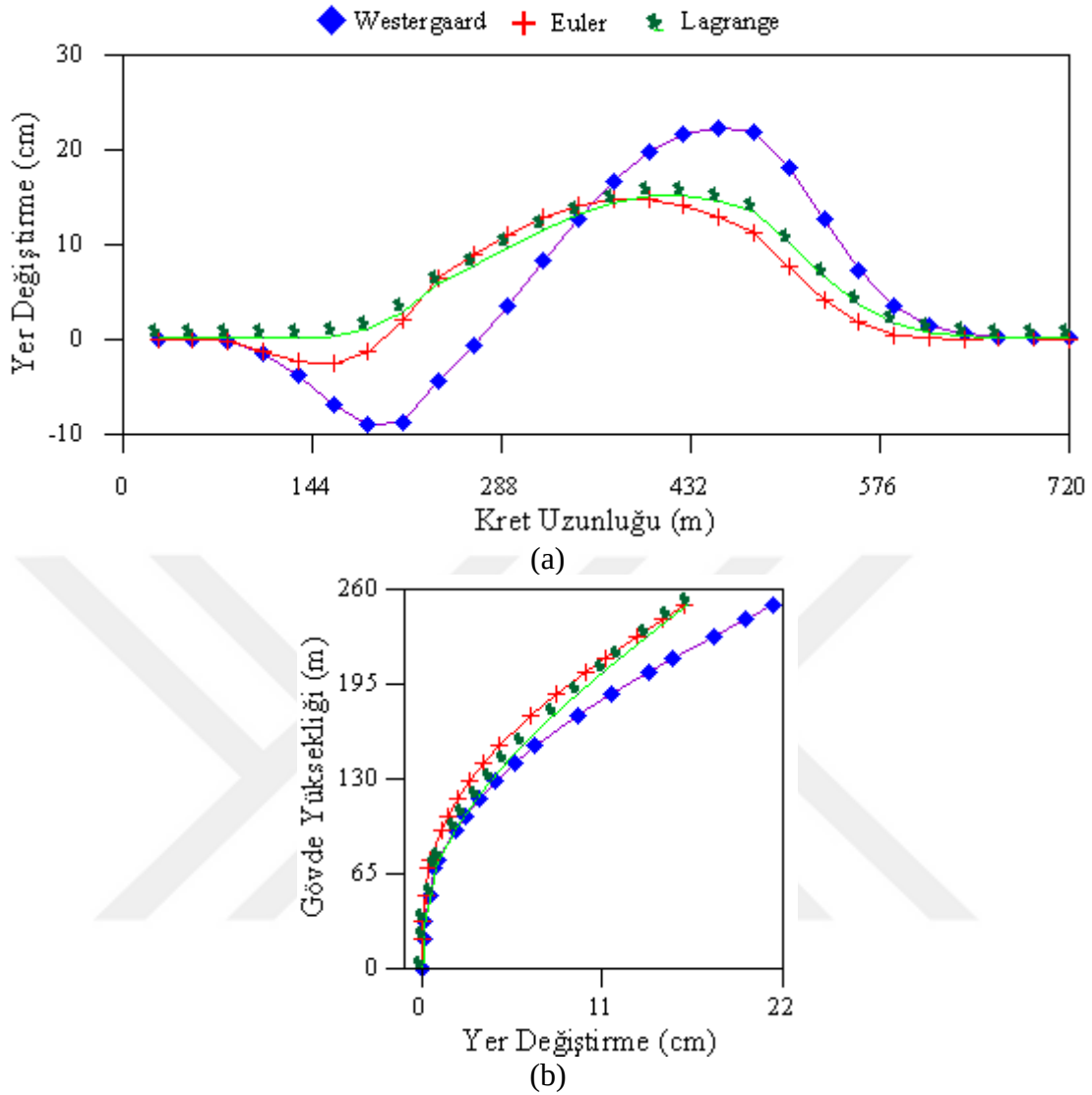


(b)



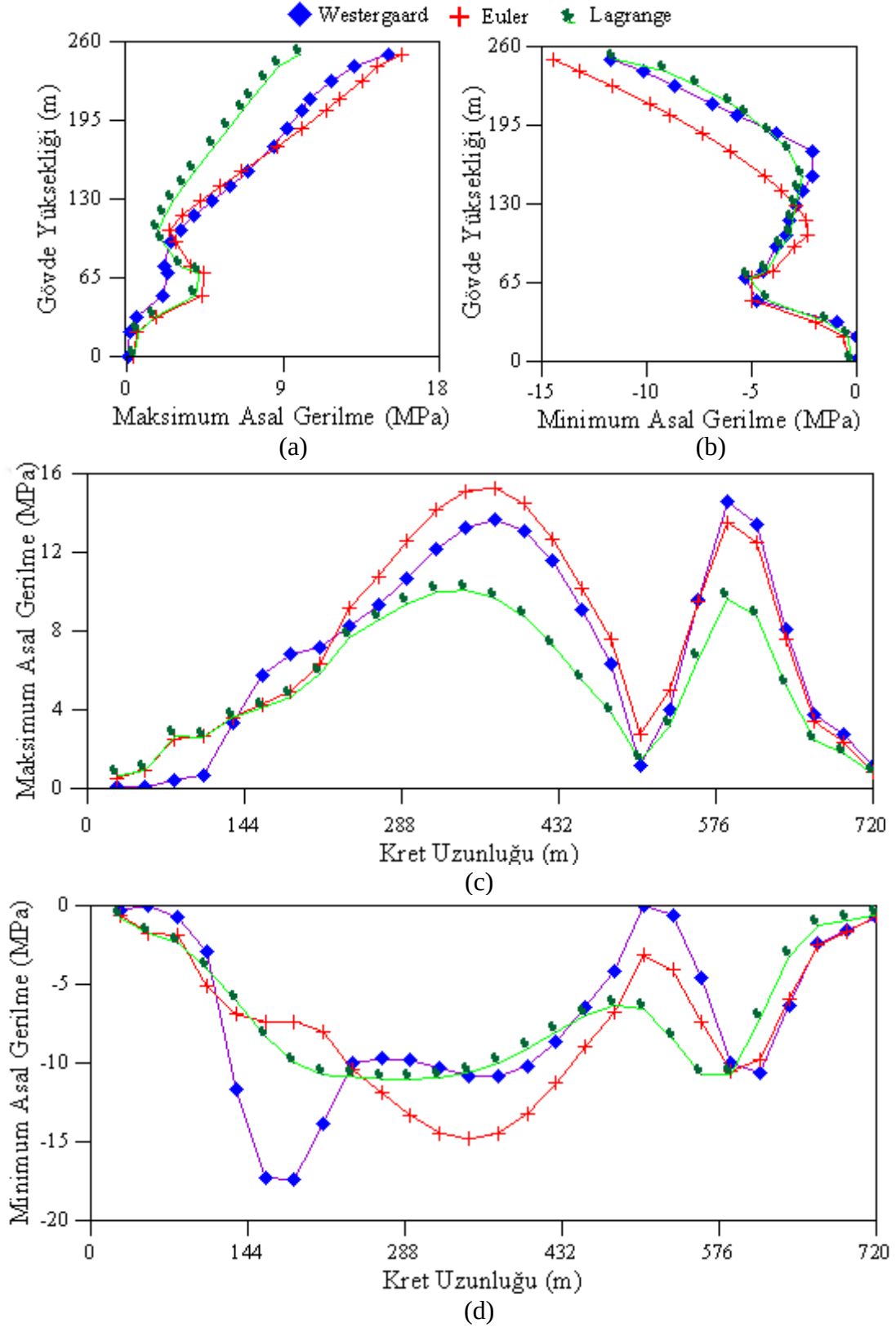
(c)

Şekil 31. Lagrange yaklaşımına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 32. Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme

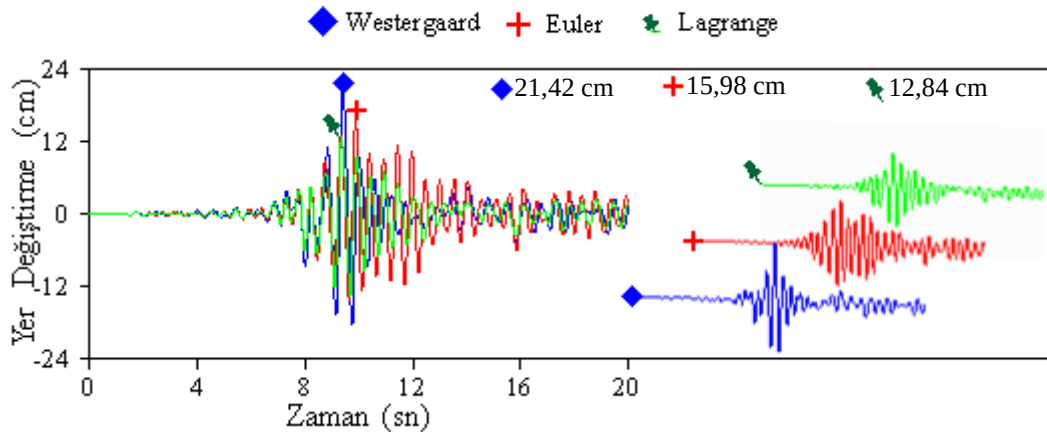
Deriner Barajının Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modelinin dinamik analizleri sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri Şekil 32 (a) ve (b)'de verilmektedir. II-II kesiti boyunca her üç yaklaşıma ait analizler sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri benzer eğilimde değişmekte olup, Westergaard yaklaşımına ait yer değiştirme değerlerinin daha büyük olduğu, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. I-I kesiti boyunca ise her üç yaklaşımda da temelde minimum olan yer değiştirme değerlerinin gövde yüksekliği boyunca arttığı, Westergaard yaklaşımına ait yer değiştirme değerlerinin diğer iki yaklaşıma göre daha büyük olduğu belirlenmiştir.



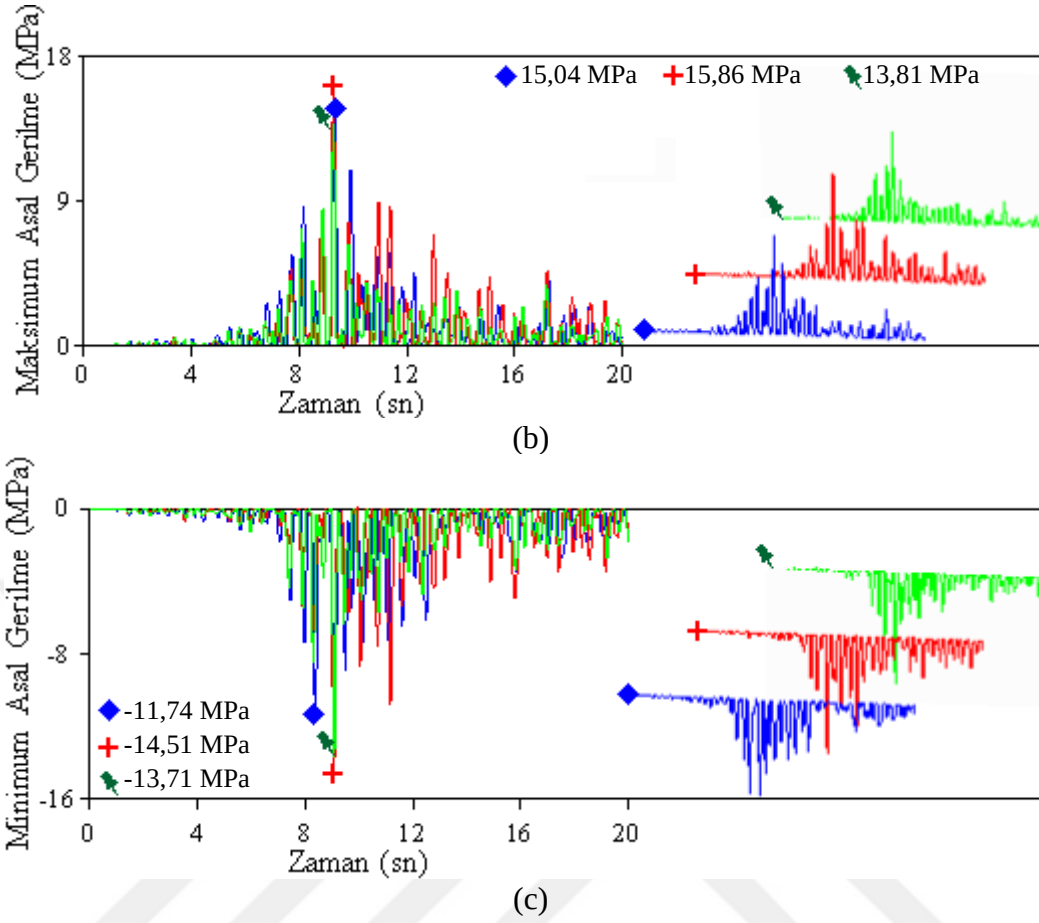
Şekil 33. Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analizi sonucu elde edilen asal gerilmeleri ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum asal gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum asal gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum asal gerilme

Deriner Barajına ait asal gerilmelerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla Şekil 33 (a) incelendiğinde, her üç yaklaşımdan elde edilen maksimum asal gerilmeler benzer eğilimde davranış göstermekte ve gövde yüksekliği boyunca artmaktadır. Lagrange yaklaşımına ait maksimum asal gerilmelerin diğer iki yaklaşımdan elde edilen sonuçlara göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. Minimum asal gerilmeler incelendiğinde (Şekil 33 (b)) ise üç yaklaşıma ait sonuçların yine benzer eğilimde hareket ettiği ancak Euler yaklaşımına ait sonuçların diğer iki yaklaşıma ait sonuçlara göre daha düşük olduğu ve minimum asal gerilmenin Euler yaklaşımına ait modelde olduğu görülmektedir. Şekil 33 (c)'den görüldüğü üzere, maksimum asal gerilmeler yamaçtan itibaren kretin orta bölgesine kadar artmakta; Orta bölgeyi geçtikten sonra azalmaya başlamakta ve yamaçtan itibaren yaklaşık 500 m'de minimum değere ulaşp yeniden artmaya başlamaktadır. Maksimum asal gerilmeler 600 m'de yeniden maksimum noktaya ulaştıktan sonra yamaca kadar azalma eğilimine devam etmektedir. Her üç yaklaşımda benzer davranışı göstermekte olup, kret ortasında maksimum asal gerilme Euler yaklaşımında oluşurken bir sonraki oluşan maksimum değer Westergaard yaklaşımında oluşmuştur. Minimum asal gerilmeler (Şekil 33 (d)) ise maksimum asal gerilmelere benzer eğilimde olup, negatif değerli halidir. Burada farklı olarak Westergaard yaklaşımında ilk 150 m'lik mesafede minimum asal gerilmelerin olduğu ardından kret boyunca ilerledikçe diğer yaklaşımlarla benzer eğilimde devam ettiği görülmektedir.

Deprem analizi boyunca 2689 nolu düğüm noktasında Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşım modellerinden elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 34'te verilmektedir.



(a)



Şekil 34. Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Deriner Barajının dinamik analizi sonucu 2068 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

2.2. Yusufeli Barajı

Yusufeli Barajı, Türkiye'nin kuzeydoğusundaki Artvin iline bağlı Yusufeli ilçesinde Çoruh Nehri üzerinde yer almaktadır. Bu devasa projenin 26 Şubat 2013 yılında temeli atılarak inşasına başlanmış ve 2022 yılında inşası tamamlanmış olup, temelden 275 metre gövde yüksekliği ile Türkiye'nin en yüksek barajı olma özelliğini taşımaktadır. Talvegden yüksekliği 220m ve kret uzunluğu 490m olan Yusufeli kemer barajı 22 Kasım 2022'de su tutmaya başlamıştır. Barajın kret kotu +715m olup, su tutma süreci +701m kotuna kadar devam ederek 17 Kasım 2023 tarihinde barajda elektrik üretimi başlamıştır. 540 MW kurulu güç ile yılda ortalama 1,8 milyar kWh enerji üretme kapasitesine sahip çift eğrilikli Yusufeli kemer barajının gölü, 270 milyon metreküp su kapasitesi ile sadece enerji üretiminde değil, aynı zamanda sulama ve taşkın kontrolü gibi alanlarda da stratejik bir rol üstlenmektedir. Yusufeli Barajı, çift eğrilikli beton kemer kategorisinde dünyanın en yüksek üçüncü, genel

kategoride dünyanın en yüksek yedinci ve ülkemizin ise en yüksek barajı konumundadır. Şekil 35'te Yusufeli Barajına ait rezervuarın boş olması durumu ve su tutmaya başladıktan sonra farklı su seviyesi durumlarını gösteren görseller verilmektedir.



Şekil 35. Yusufeli Barajına ait bazı görseller

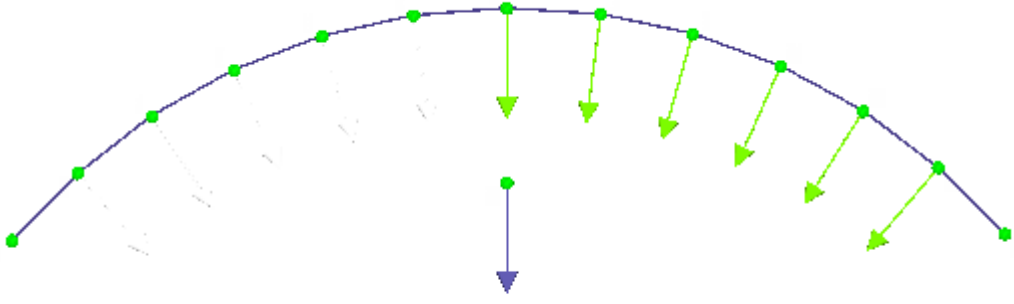
2.2.1. Yusufeli Barajında Gerçekleştirilen Arazi Çalışmaları

Barajlar, enerji üretimi ve su yönetimi konularında kritik bir rol oynayarak, Türkiye'nin çevre dostu enerji hedeflerine katkı sağlamaktadır. Ancak, bu büyük mühendislik yapılarının, değişen çevresel koşullara bağlı olarak yapısal durumunda zaman içinde çeşitli değişiklikler meydana gelebilmektedir. Bu değişen çevresel etkilerin barajda meydana getirdiği çevresel titreşimleri ölçmek amacıyla çevresel titreşim yöntemi kullanılmıştır. Barajın modal hareket noktalarına yerleştirilen ivmeölçerler, barajın çeşitli işletme koşulları altında maruz kaldığı çevresel etmenlere bağlı olarak oluşan doğal titreşimleri kaydetmektedir. Bu etmenler arasında su seviyelerindeki mevsimsel değişimler, rüzgar kuvvetleri, yer hareketleri, ağır tonajlı araçların geçişi gibi faktörler bulunmaktadır. İvmeölçer sistemleri, bu çevresel etmenlere karşı yapısal bileşenlerin tepkilerini hassas bir şekilde ölçerek, barajın dinamik karakteristiklerini belirlemede kullanılmaktadır.

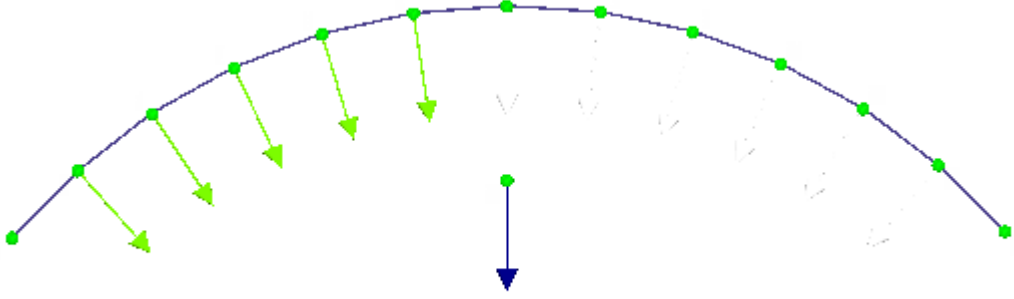
Yusufeli Barajının inşasının tamamlanmasının ardından rezervuarın boş olması durumu için sadece temel-gövde etkileşimini belirlemek amacıyla çevresel titreşim testleri yapılmıştır. 26 Eylül 2022 tarihinde kret üzerine yerleştirilen 7 adet hassas ivmeölçer ile ilk önce baraj kretinin sağ yarısı, ardından sol yarısında test adımları gerçekleştirilerek referanslı ölçümler alınmış ve baraj gövdesinin tamamının modal davranışı elde edilmiştir. Testlerde Sara SL06 tipi üç eksenli, 156dB dinamik aralığına ve 0-1500Hz frekans aralığına sahip ivmeölçer kullanılmıştır. Test sırasında ivmeölçerler, baraj kretine memba-mansap doğrultusunda yerleştirilmiştir. 7 adet ivmeölçer arasında eşzamanlı bağlantı kurularak referanslı ölçümün her bir adımında 30'ar dakika boyunca ölçümler gerçekleştirilmiş ve ham sinyal verileri toplanmıştır. Barajın dinamik karakteristikleri, toplanan ham sinyal verilerinin OMA (2023) yazılımında işlenmesi ile elde edilmiştir. Çevresel titreşim testine ait bazı görseller Şekil 36'da ivmeölçerlere ait kurulum şeması ise Şekil 37'de verilmektedir. Şekil 38 Yusufeli Barajının çevresel titreşim testlerinden Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemine göre frekans alanında elde edilen diyagramları göstermektedir. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için yapılan çevresel titreşim sonucu elde edilen ilk altı doğal frekans değeri 1,881-5.191Hz aralığında değişmekte olup, ilgili modlara karşılık gelen frekans değerleri Tablo 10'da verilmektedir. Şekil 39'da ise Yusufeli Barajının çevresel titreşim testi sonucu elde edilen ilk altı moduna ait mod şekilleri gösterilmektedir.



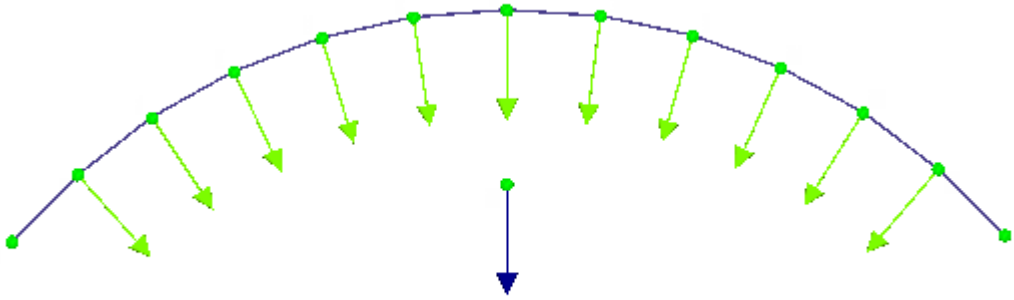
Şekil 36. Yusufeli Barajında yapılan çevresel titreşim testine ait bazı görseller



(a)

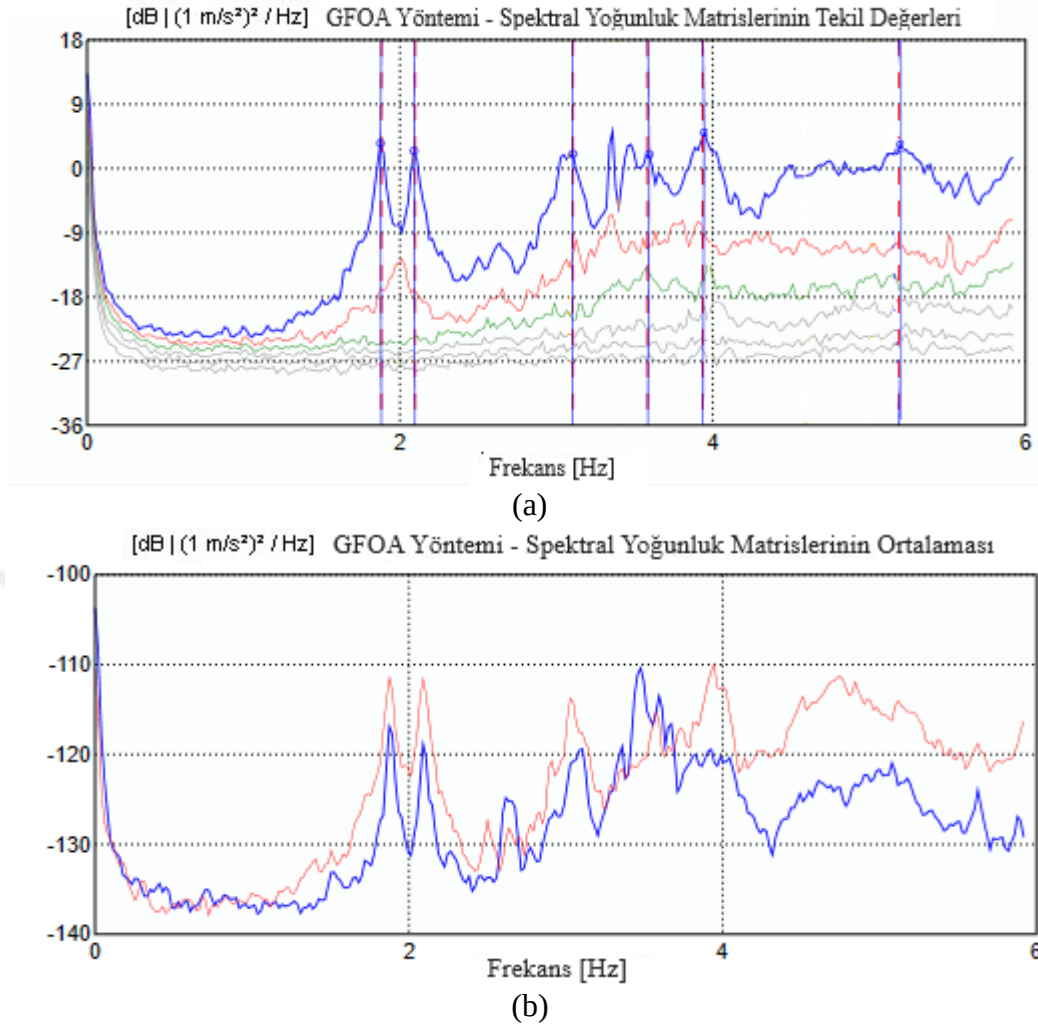


(b)



(c)

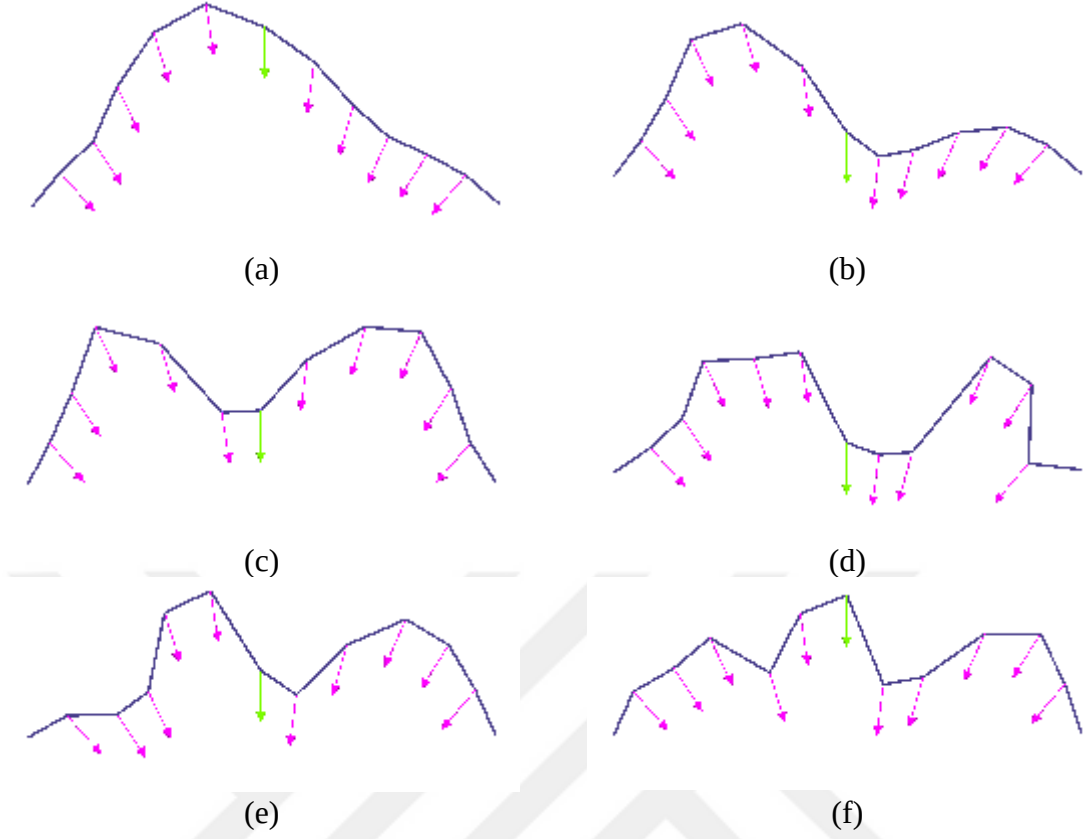
Şekil 37. Yusufeli Barajında gerçekleştirilen referanslı ölçümlere ait ivmeölçer yerleşimi
 (a) Referanslı ölçüm-1, (b) Referanslı ölçüm-2, (c) Tüm ölçüm durumu



Şekil 38. Yusufeli Barajının çevresel titreşim testlerinden elde edilen diyagramlar (a) Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri (SYM-TD), (b) Otomatik Spektral Yoğunlukların Ortalaması

Tablo 10. Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumu için 26/09/2022 tarihinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testinden elde edilen frekans değerleri

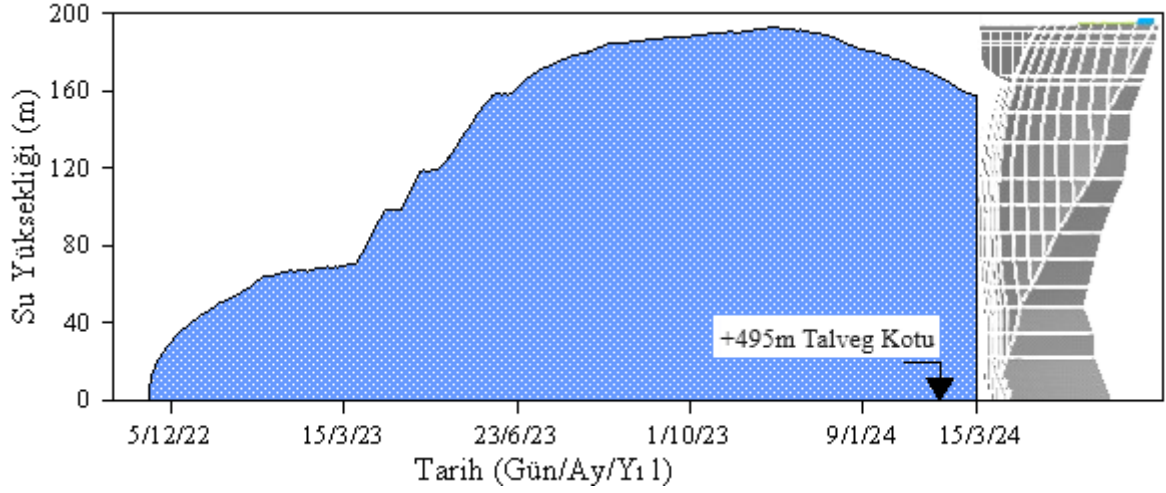
Mod No	Frekans Değerleri (Hz)
1	1,881
2	2,095
3	3,105
4	3,584
5	3,936
6	5,191



Şekil 39. Yusufeli Barajının çevresel titreşim testine ait mod şekilleri (a) Birinci mod, (b) İkinci mod, (c) Üçüncü mod, (d) Dördüncü mod, (e) Beşinci mod, (f) Altıncı mod

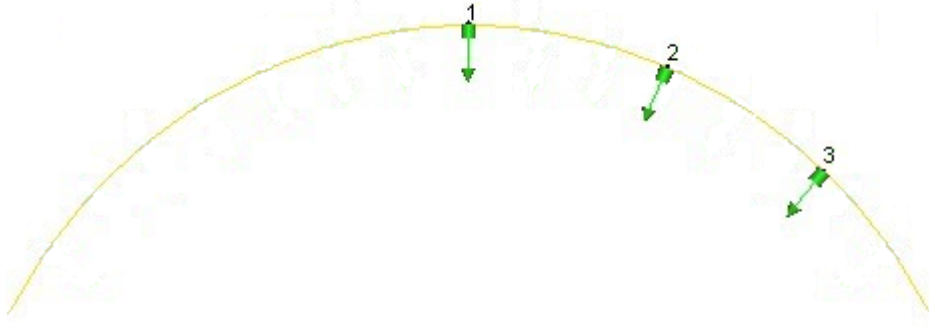
Yusufeli Barajında detaylı olarak gerçekleştirilen çevresel titreşim testinin tamamlanmasından kısa bir süre sonra baraj rezervuarının su tutma süreci 22 Kasım 2022 tarihinde başlamıştır. Talveg kotu olan +495m kotundan başlayan su seviyesi 17 Kasım 2023 tarihinde +701 m kotuna geldiğinde enerji üretimi başlamıştır. Ocak 2024 tarihinde maksimum seviye olan +703m kotuna çıkan su seviyesi enerji üretimi nedeniyle ilk defa azalmaya başlamıştır. Tez çalışması kapsamında 15 Mart 2024 tarihine kadar baraj rezervuarının günlük su seviyesindeki değişim dikkate alınmış olup, bu tarihler arasındaki su değişimini ifade eden grafik Şekil 40'ta verilmektedir.

Baraj rezervuarının su ile dolarak yükselmesi sürecinde belirlenen 15m, 36m, 57m, 78m, 99m, 126m, 150m ve 172m olmak üzere toplam sekiz farklı su seviyesi baraj için oluşturulan sonlu eleman modellerde de uygun bir şekilde kullanılabilme amacıyla seçilmiştir. Bu sekiz farklı su seviyesi için elde edilen frekans değerleri rezervuar su yüksekliğinin artması ile meydana gelen değişimin gözlemlenmesi açısından önem arz etmektedir.



Şekil 40. Yusufeli Barajının 22 Kasım 2022 ile 15 Mart 2024 tarihleri arasında değişen rezervuar su yüksekliği

Rezervuar suyunun yükselmesiyle birlikte barajın dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla, baraj kretine üç adet ivmeölçer kalıcı olarak yerleştirilmiştir. Bu süreçte, rezervuar boşken gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri, barajın mod şekillerini ve frekans değerlerini detaylı bir şekilde belirlemek için bir referans ölçümü kabul edilmiştir. Belirlenen farklı rezervuar suyu seviyelerinde üç adet ivmeölçerle yapılan ölçümler, modlara ait frekans değerlerini içeren grafikleri ortaya koymaktadır. Ancak, sadece üç ivmeölçerden elde edilen veriler, frekans değerlerini elde etmek için yeterli olsa da barajın mod şekillerini anlamak için eksik kalmaktadır. Bu bağlamda, rezervuarın boş olması durumunda detaylı olarak belirlenen mod şekilleri ve frekans değerleri, rezervuar suyunun yükselme aşamasında yapılan ölçümler için bir referans oluşturarak daha kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Bu yaklaşım, barajın dinamik özelliklerini hem değişen su seviyelerine göre referans noktasıyla hem de süreç içinde elde edilen verilerle daha derinlemesine anlama fırsatı sağlamaktadır. Rezervuarın su tutma sürecinde baraj kretine kalıcı olarak yerleştirilen üç adet ivmeölçerin yerleşim planı ve kurulum aşamasına ait bazı görseller Şekil 41’de verilmektedir. Şekil 41’den görüldüğü üzere üç adet ivmeölçerden toplanan ham sinyal verileri kablolarla ana merkezde toplanarak buradan tarafımıza iletimi internet data hattı sayesinde online olarak sağlanmıştır. Baraj kretine kurulan tüm cihaz ve sensörler koruma kabinleri içerisine yerleştirilerek güvenlik tedbirleri alınmıştır.



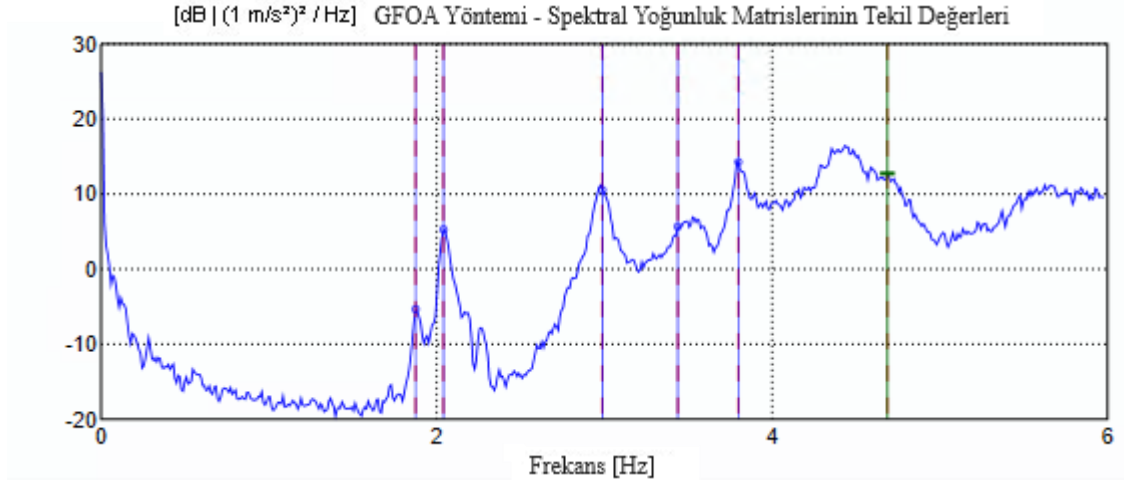
(a)



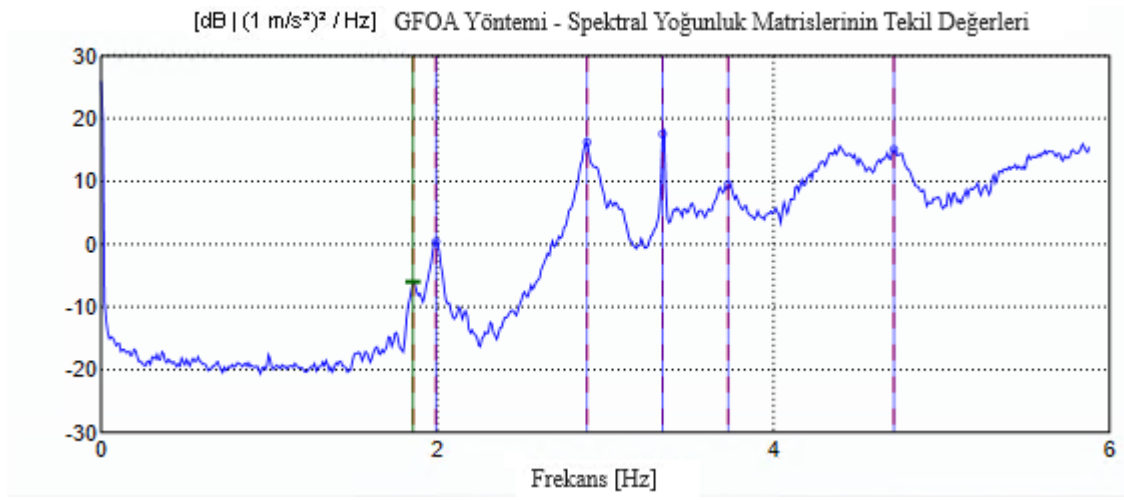
(b)

Şekil 41. Yusufeli Baraj rezervuarının su tutma sürecinde baraja yerleştirilen üç adet ivmeölçere ait bazı görseller (a) yerleşim planı, (b) Kurulum görselleri

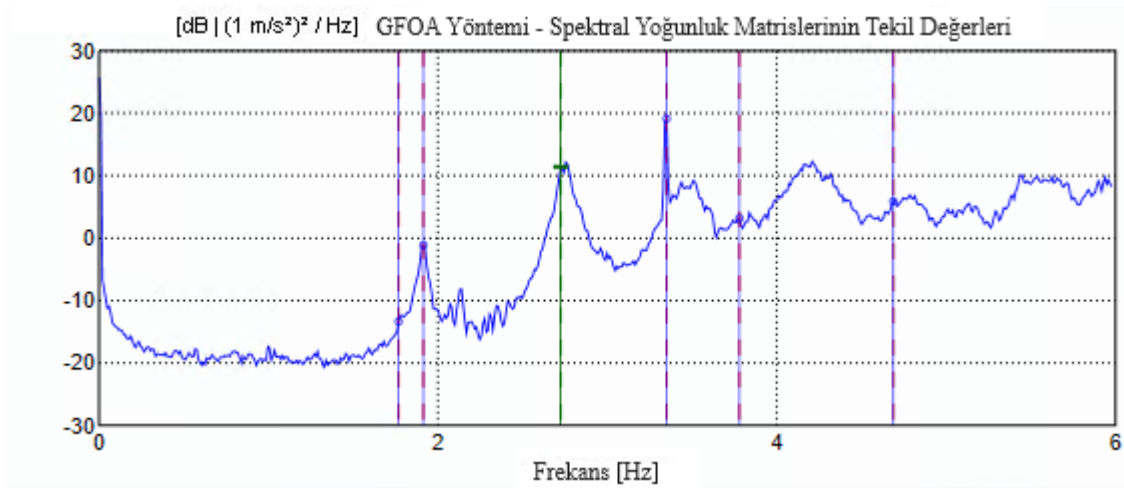
Baraj rezervuarının su dolması ile belirlenen sekiz farklı su seviyesi için ivmeölçerler tarafından toplanan ham sinyaller OMA (2023) yazılımında işlenmiştir. Boş rezervuar durumuna ait detaylı ölçüm sonuçları referans alınarak her su seviyesi için Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri grafiği elde edilmiş, uygun pikler seçilmiş ve barajın ilgili su seviyesine ait ilk altı doğal frekans değeri elde edilmiştir (Şekil 42).



(a)



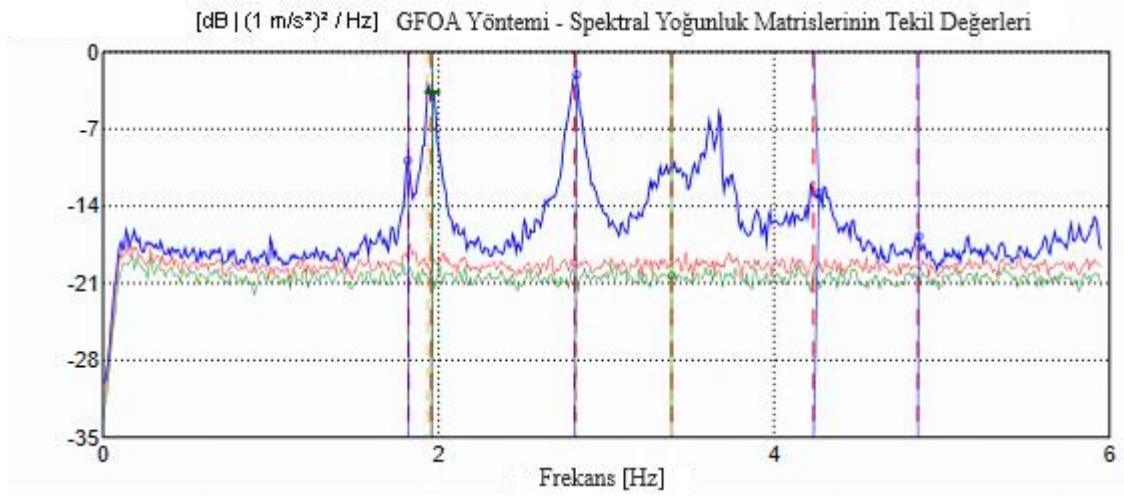
(b)



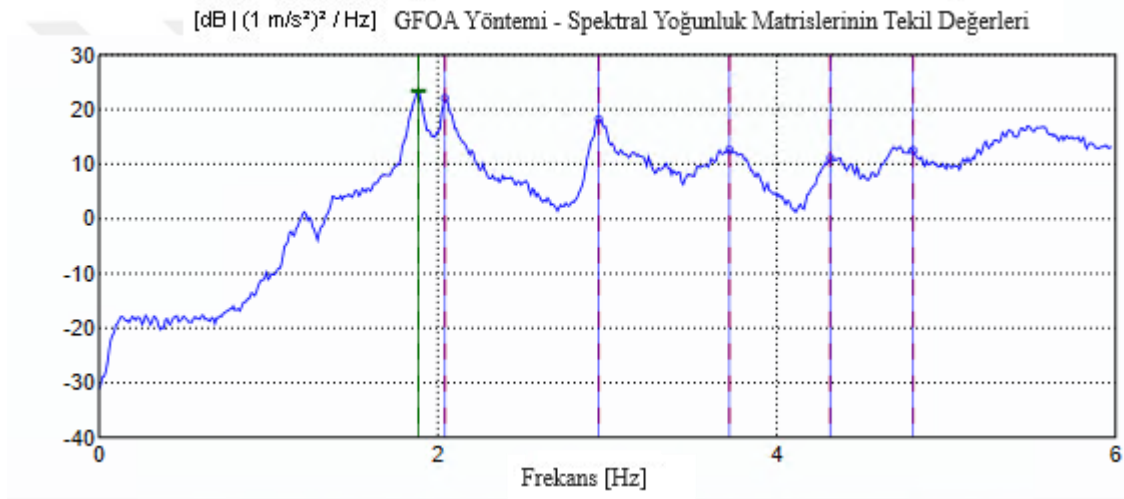
(c)

Şekil 42. Yusufeli Baraj rezervuarının farklı su seviyelerine ait elde edilen Spektral Yoğunluk Matrislerinin Tekil Değerleri (a) 15m, (b) 36m, (c) 57m, (d) 78m, (e) 99m, (f) 126m, (g) 150m, (h) 172m

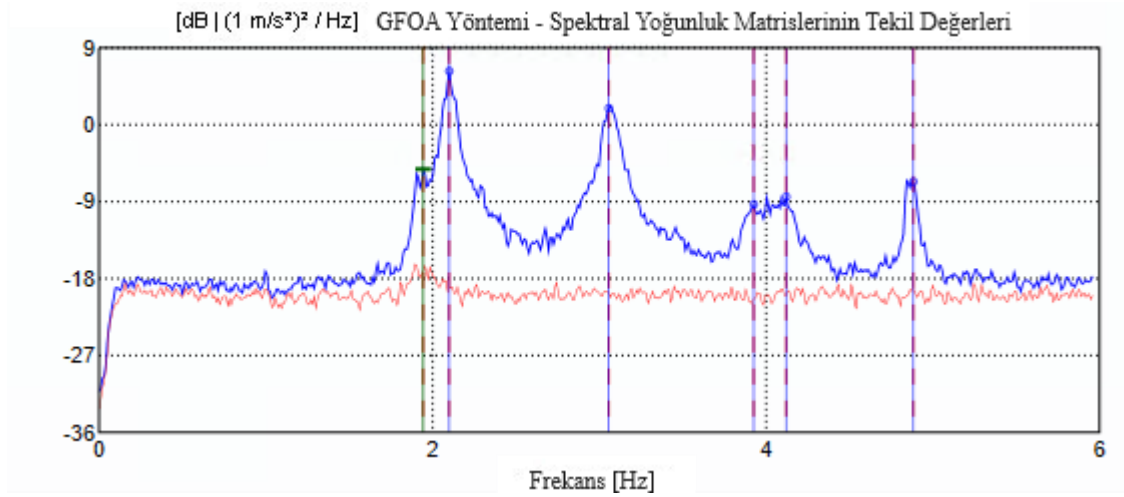
Şekil 42'nin devamı



(d)

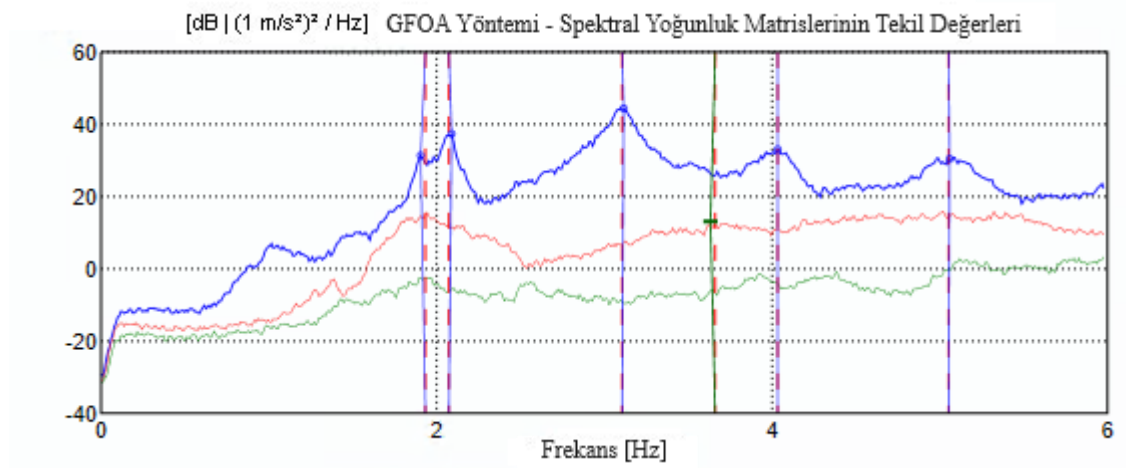


(e)

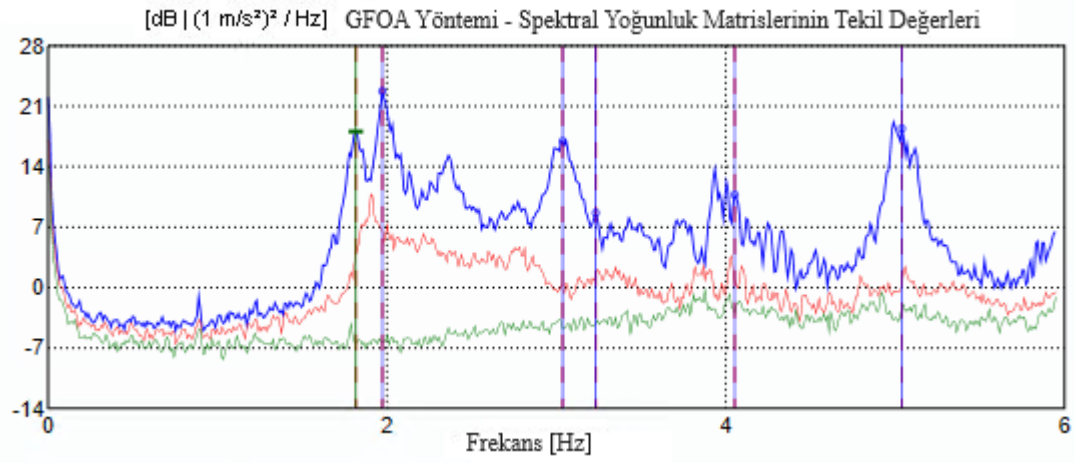


(f)

Şekil 42'nin devamı



(g)

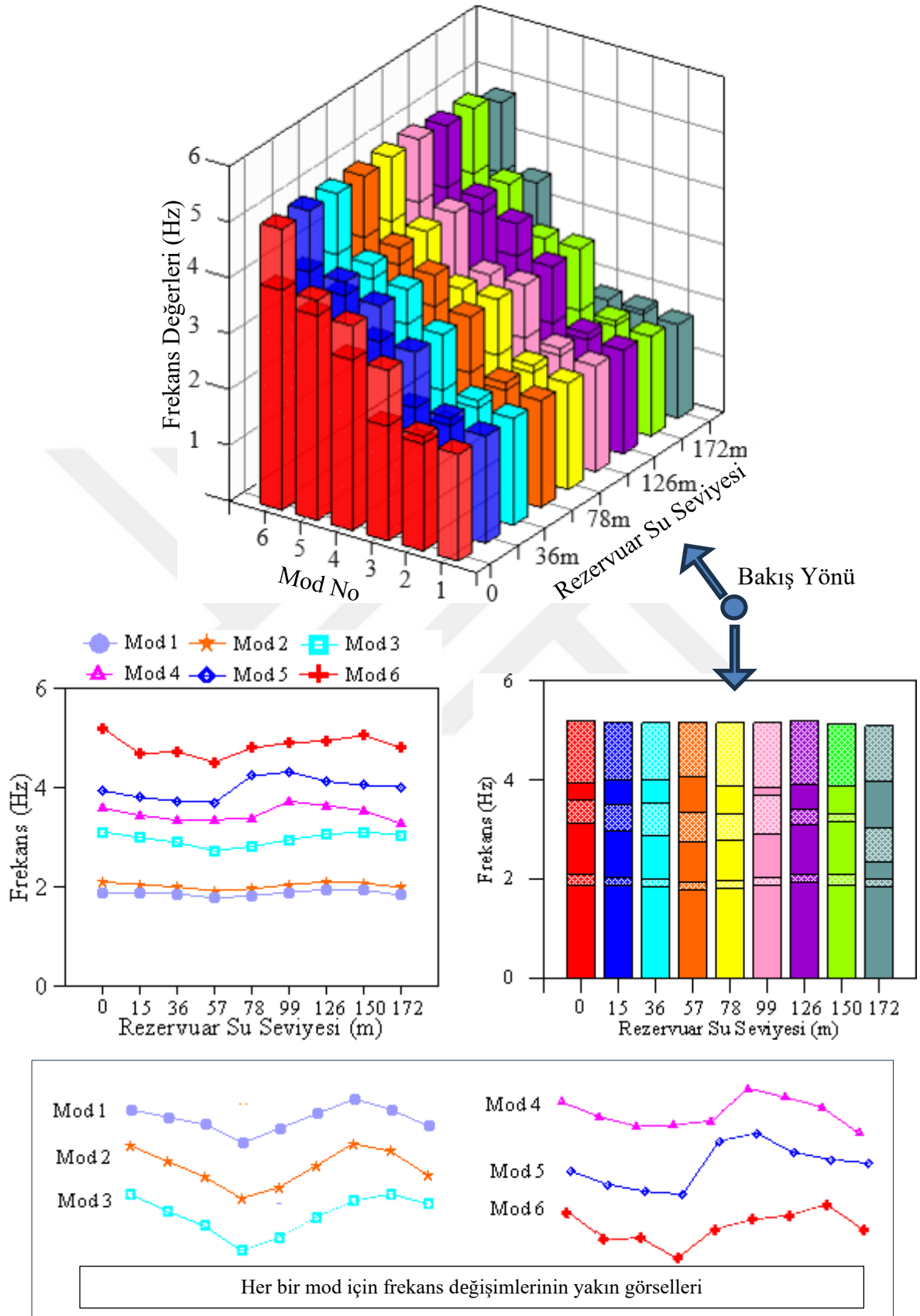


(h)

Sekiz farklı su seviyesine ait frekans değerleri Tablo 11 ve Şekil 43'te verilmektedir.

Tablo 11. Yusufeli Barajının çevresel titreşim testi sonucu elde edilen frekans değerleri

Mod No	Değişen Rezervuar Su Yüksekliğine göre Frekans Değerleri								
	Boş	15m	36m	57m	78m	99m	126m	150m	172m
1	1,881	1,875	1,855	1,768	1,821	1,885	1,943	1,933	1,828
2	2,095	2,041	1,992	1,914	1,957	2,041	2,100	2,073	1,982
3	3,105	2,988	2,891	2,725	2,812	2,949	3,057	3,105	3,039
4	3,584	3,438	3,340	3,350	3,389	3,721	3,632	3,533	3,272
5	3,936	3,799	3,730	3,700	4,235	4,316	4,121	4,050	4,013
6	5,191	4,688	4,717	4,510	4,800	4,900	4,940	5,052	5,099



Şekil 43. Yusufeli Baraj rezervuarının farklı su seviyelerine ait çevresel titreşim testinden elde edilen frekans değerlerinin iki ve üç boyutlu grafiklerine ait görseller

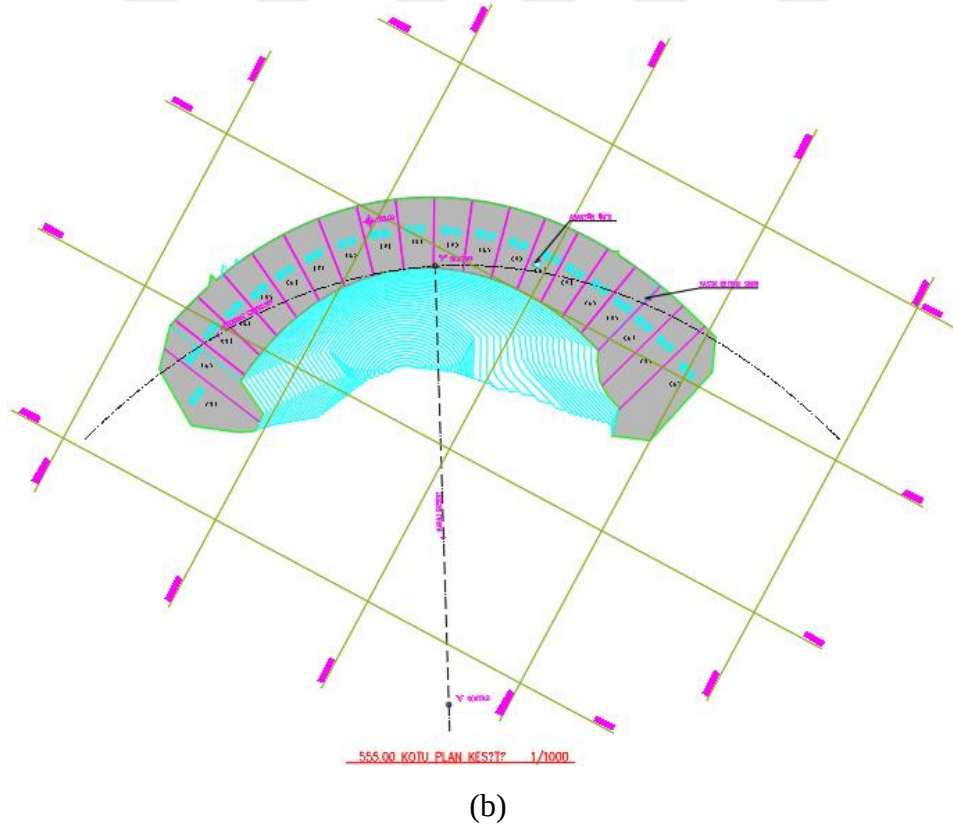
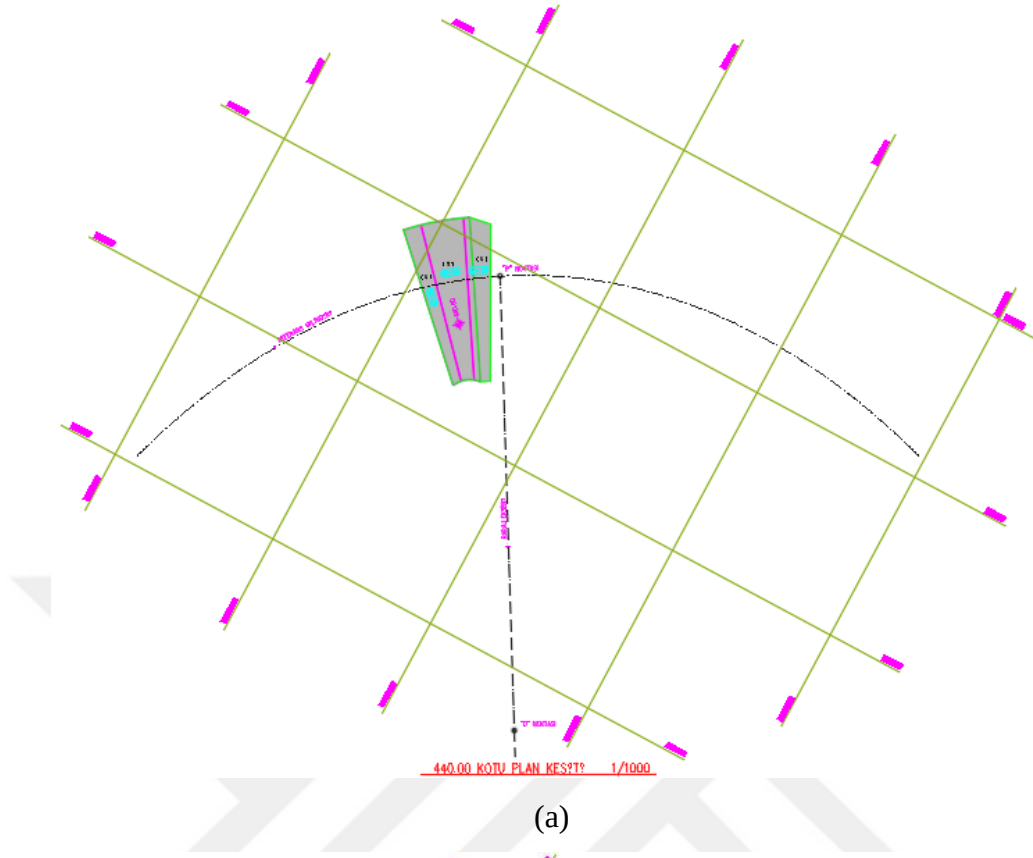
Yusufeli Barajının sekiz farklı su seviyesi için çevresel titreşim testlerinden elde edilen her bir moda ait frekans değerlerinin değişimi Şekil 43'te detaylı şekilde görülmektedir. Tüm modlara ait frekans değişimleri benzer eğilim göstermekte olup, bu frekans değerlerinin ilk 57m'ye kadar azaldığı, ardından yükselişe geçerek 126m'ye kadar artışın devam ettiği ve bu su seviyesinden itibaren tekrar azalmaya başladığı görülmektedir. Tablo 12'de sekiz farklı su seviyesi durumunda elde edilen frekans değerlerinin rezervuarın boş olması durumu için elde edilen frekans değerlerine göre değişimi yüzdesel olarak ifade edilmektedir. Tabloya göre maksimum fark 78m su seviyesi durumunda beşinci mod için elde edilmiştir. Genel anlamda tüm su seviyeleri için elde edilen maksimum farkların oluştuğu modlar değişkenlik göstermektedir.

Tablo 12. Yusufeli Baraj rezervuarının farklı su seviyelerine ait elde edilen frekansların rezervuarın boş olması durumuna göre değişim yüzdeleri

Mod No	Rezervuar Su Yüksekliğine göre Frekansların Değişim Yüzdeleri (%)							
	15m	36m	57m	78m	99m	126m	150m	172m
1	0,32	1,07	4,69	3,00	3,51	3,08	0,51	5,43
2	2,58	2,40	3,92	2,25	4,29	2,89	1,29	4,39
3	3,77	3,25	5,74	3,19	4,87	3,66	1,57	2,13
4	4,07	2,85	0,30	1,16	9,80	2,38	2,74	7,39
5	3,48	1,82	0,80	14,46	1,91	4,52	1,72	0,91
6	9,69	0,62	4,39	6,43	2,08	0,82	2,27	4,99

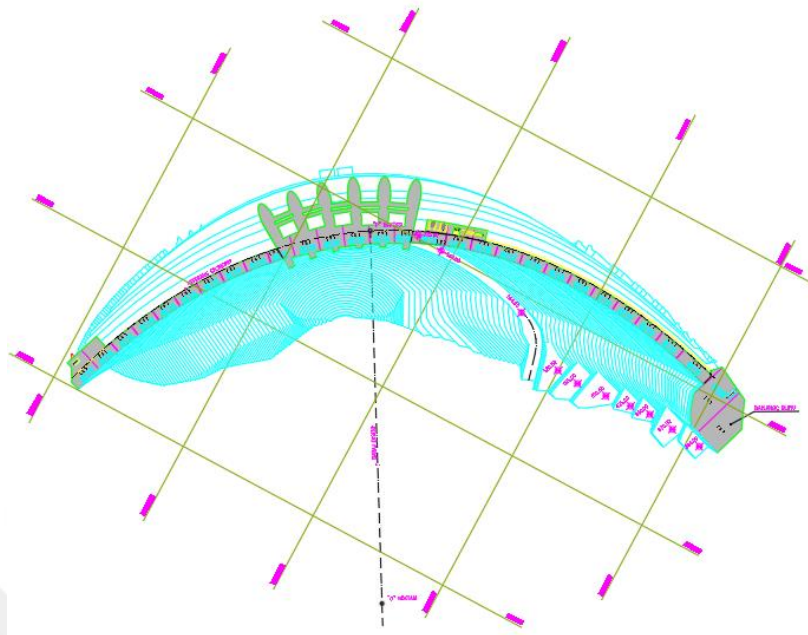
2.2.2. Yusufeli Barajı Sayısal Çalışmalar

DSİ 26. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen proje dosyaları kullanılarak Yusufeli Barajının baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli ANSYS programında oluşturularak analizler yürütülmüştür. Deriner Barajının düşeyde ve yatayda eğrilikli yapıya sahip olması nedeniyle gövde yüzeylerindeki konkav geometri 14 farklı kottan (+440m, +459m, +477m, +498m, +513m, +534m, +555m, +576m, +597m +624m, +648m, +675m, +699m ve +715m kotları) alınan plan kesitler kullanılarak Autocad programında modellenmiştir. Baraj gövdesinin +440m, +555m ve +715m kotundaki plan kesitleri ve düşey kesiti Şekil 44'te verilmektedir.

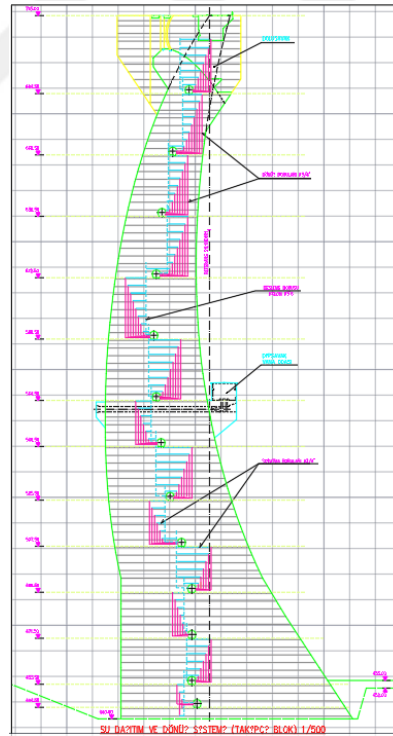


Şekil 44. Yusufeli Barajının plan kesitlerine ait bazı görüşler (a) +440m kotu, (b) +555m kotu, (c) +715m kotu, (d) düşey kesit

Şekil 44'ün devamı



(c)



(d)

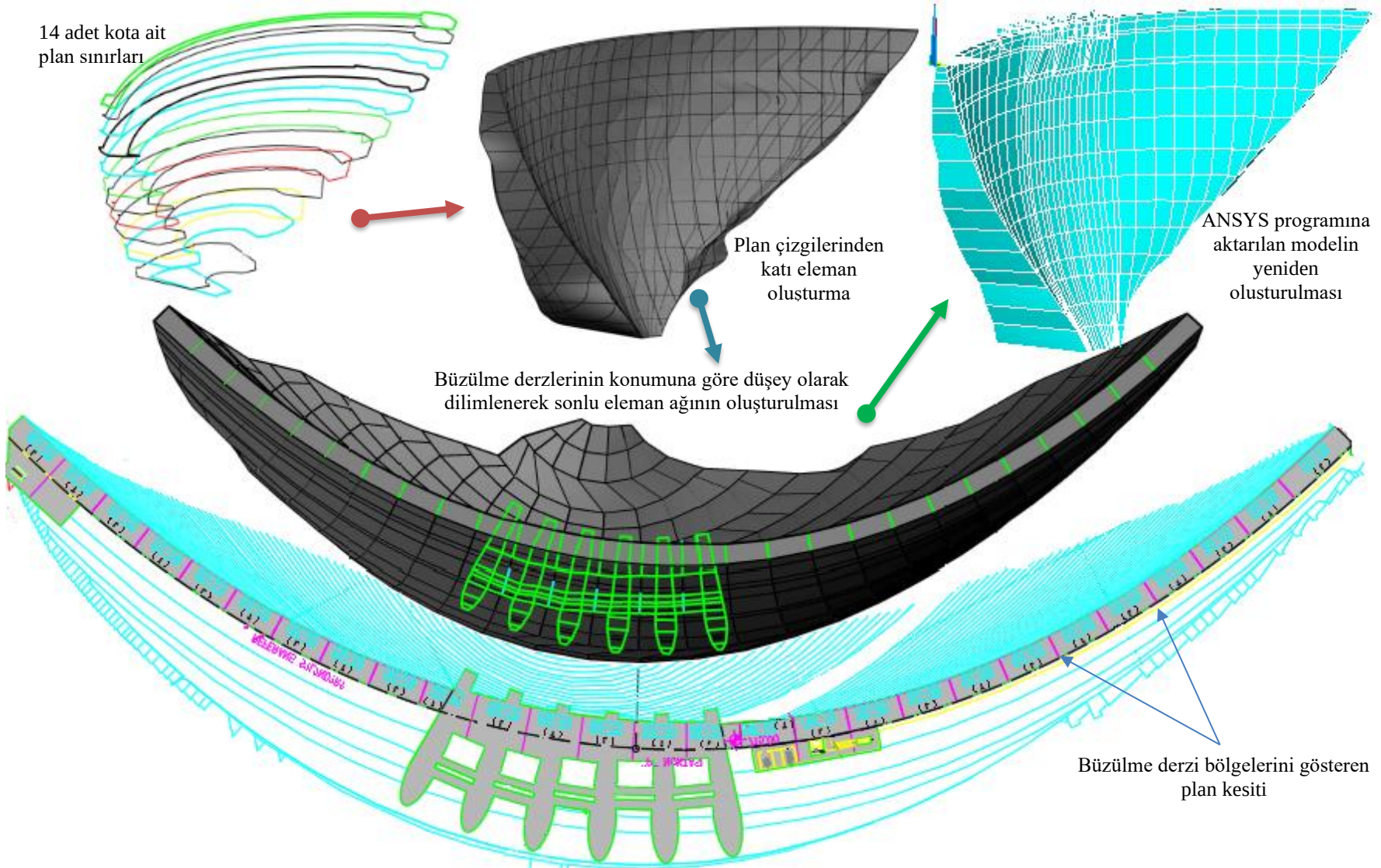
14 adet plan kesiti kullanılarak Autocad programında Yusufeli Barajının gövdesi katı model olarak oluşturulmuştur. Baraja ait projelerin plan kesitlerinde ve üç boyutlu modellerinde belirtilen düşey doğrultu boyunca büzülme derzi sayısı 26 adettir. Bu derz kısımları gövdenin sonlu eleman ağının oluşturulmasında baz alınan sınırlar olarak belirlenmiştir. Ortalama 18 m aralıklı büzülme derzi mesafesi bir baraj için uygun sonlu

eleman ağı için yeterli bir değerdir. Düşey olarak büzülme derzine denk gelen kısımlar belirlenerek katı model düşey dilimlere ayrılmıştır. Yatayda ise dikkate alınan her bir plan kotu kendi içerisinde katı model olarak oluşturulduğu için yeniden dilimleme işlemi uygulanmamıştır. Autocad programında oluşturulan katı gövde modeli sonlu elemanlara bölünmüş şekli ile elde edilmiştir. Şekil 45 Yusufeli Baraj gövdesinin düşeydeki büzülme derzi bölgelerini ve Autocad programında oluşturulan sonlu elemanlara bölünmüş katı baraj gövdesine ait görselleri sunmaktadır.

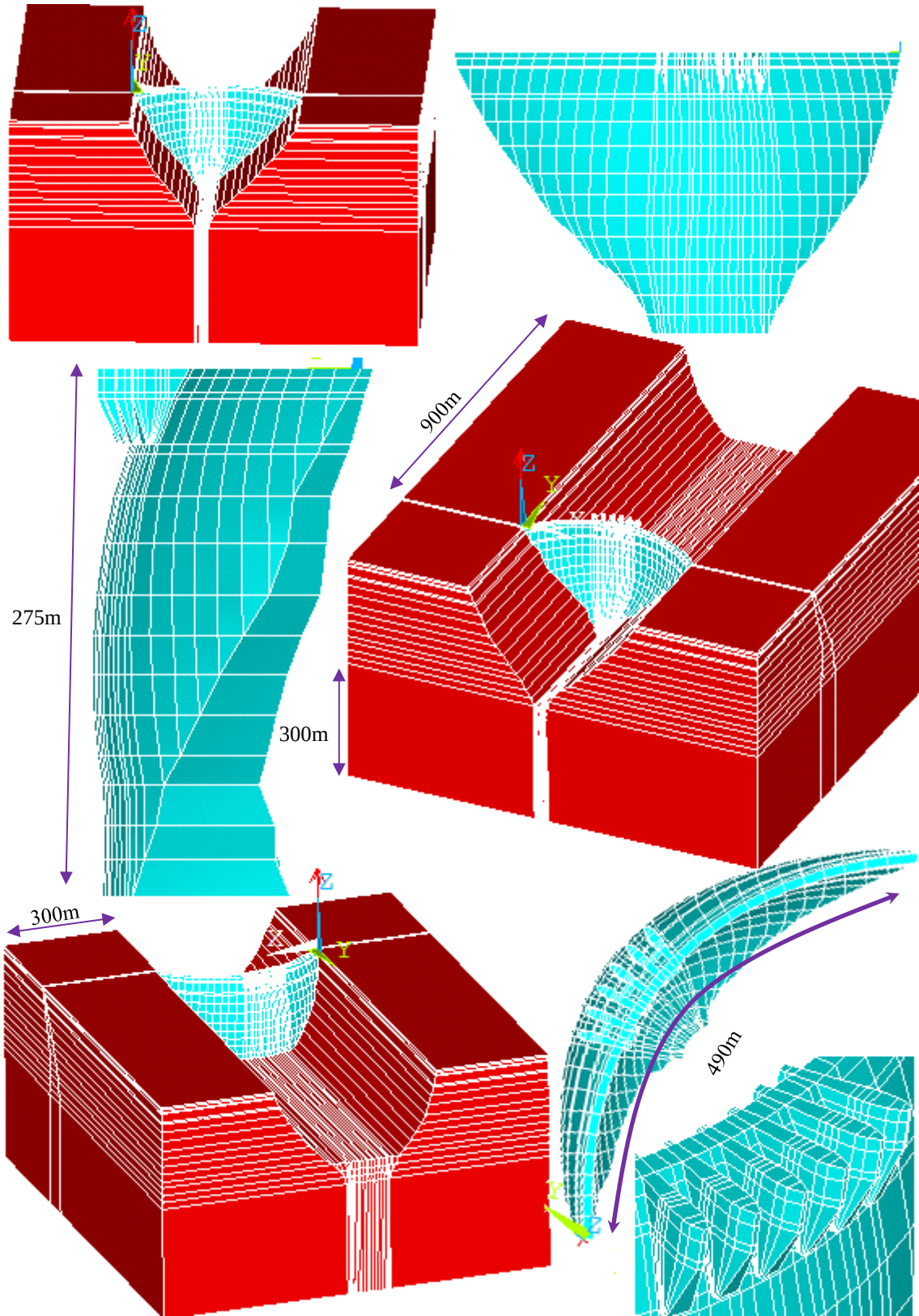
Autocad programında eğrisel yapıdaki plan kesitlerine ait çizgilerin katı modele dönüştürülmesiyle oluşturulan gövdenin özellikle kenar bölgelerinde düzgün yapılı yüzeyler oluşmamaktadır. Sonlu eleman ağlara bölünerek Autocad programında hazırlanan bu katı model dışarı aktarılacak .sat uzantılı bir dosya ile ANSYS programına aktarılmaktadır. ANSYS programına aktarılan sonlu eleman ağına ayrılmış katı modelde her bir katı eleman parçasına ait düğüm noktaları okunarak ilgili noktalar, ANSYS programında işlem yapılmasına olanak sağlayan txt formatındaki Logfile dosyasına tanıtılmıştır. Ayrıca ANSYS programında katı model oluşturulması için gerekli komut formatına uygun olarak seçilen düğüm noktaları ile baraja ait katı model yeniden oluşturulmuştur. Bu modelleme sürecinde Autocad programı eğrisel yüzeye sahip baraj gövdesinin daha kolay şekilde modellenerek istenilen mesafelerde sonlu elemanlara ayrılması hususunda kolaylık sağlamış olup ilgili eleman ağlarına ait düğüm noktalarının ve koordinatlarının elde edilmesinde etkili olmuştur. Şekil 45'teki görselde AutoCAD ve ANSYS programında oluşturulan baraj gövdesinin katı modeline ait detaylar verilmiştir.

Yusufeli baraj gövdesinin modellenmesinin ardından gövde ve rezervuarı kapsayacak temelin modellenme aşamasına geçilmiştir. Yusufeli gövde yüksekliği 275m olduğundan dolayı, rezervuar uzunluğu baraj yüksekliğinin yaklaşık üç katı kadar (900m) olup memba kısmındaki temelde rezervuar uzunluğu kadar seçilmiştir. Temel uzunluğu mansap yönünde, akış yönüne dik doğrultularda ve düşey yönde yaklaşık baraj yüksekliği kadar (300m) uzatılmıştır. Yusufeli kemer barajına ait üç boyutlu baraj-temel modeli Şekil 46'da verilmektedir.

Yusufeli Barajının oluşturulan sonlu eleman modeli, sekiz farklı sonlu eleman ağı içerecek şekilde modellenerek modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen frekans değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüş olup, analiz süresinin daha kısa olması amacıyla Şekil 45'te oluşturulan modele ait sonlu eleman ağının kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 45. Yusufeli Barajı gövdesinin oluşturulma sürecine ait akış diyagramı

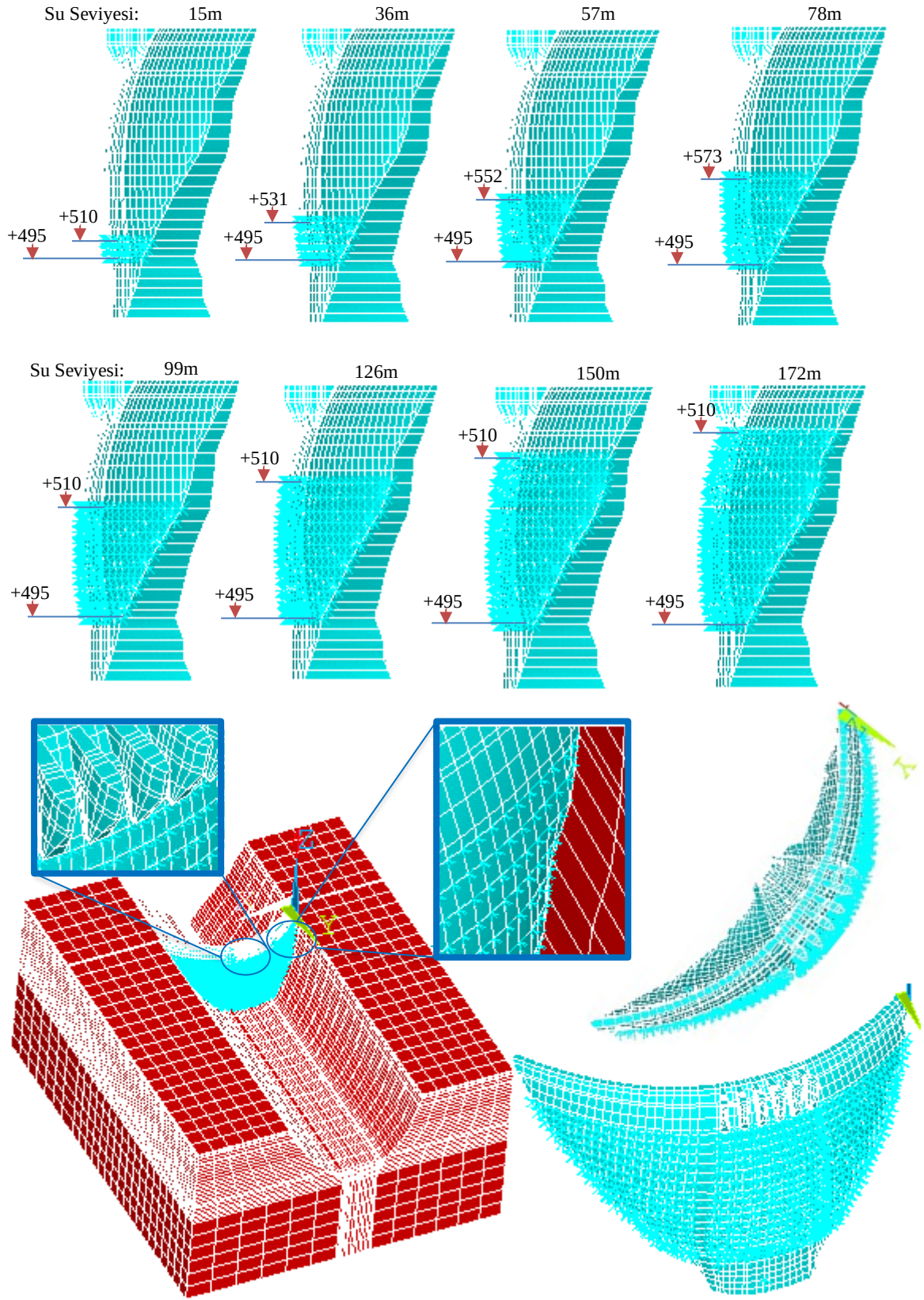


Şekil 46. Yusufeli Barajının sonlu eleman modeline ait görseller

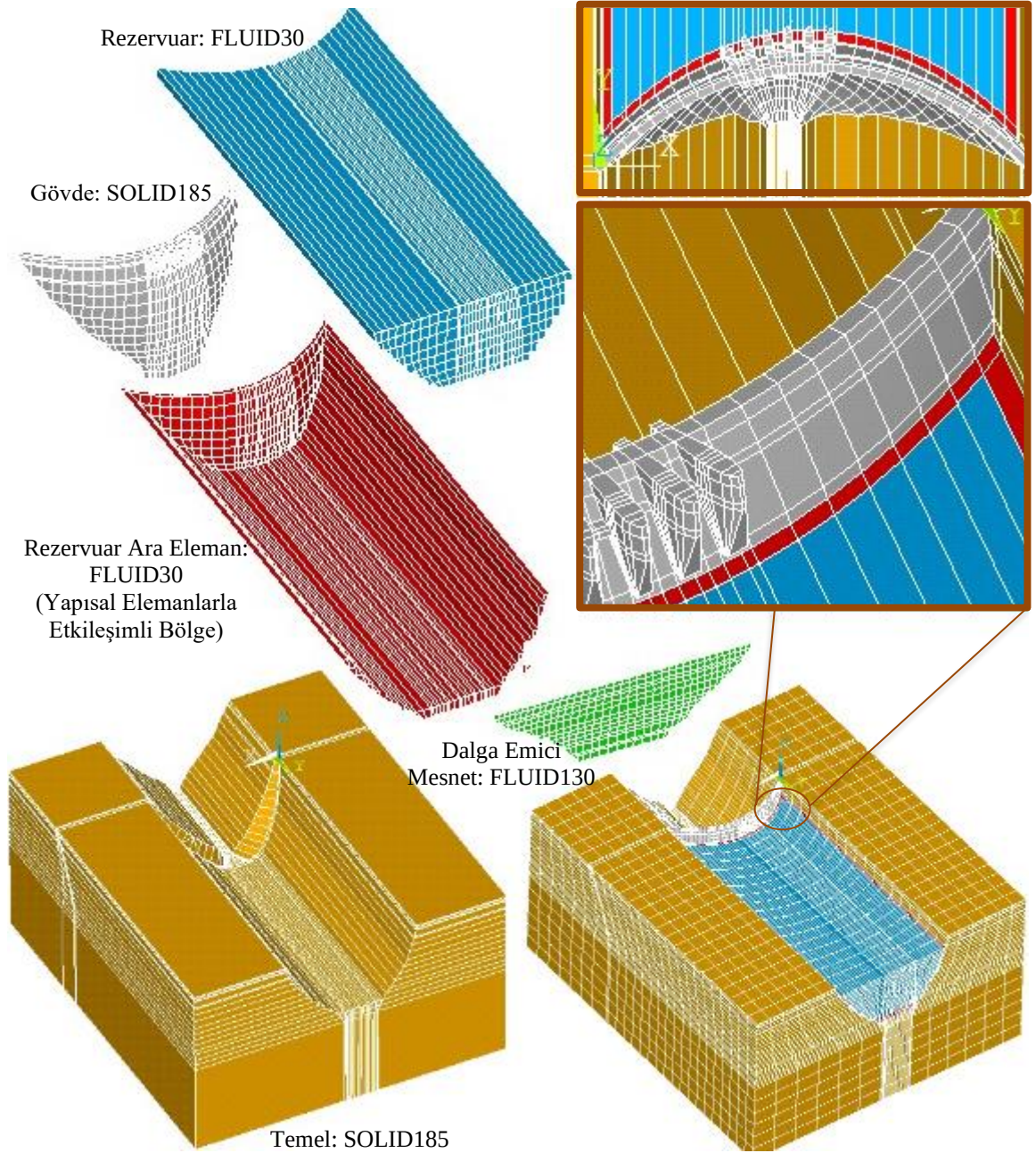
Analizlerde barajın etkileşimde bulunduğu rezervuar etkisi de dikkate alınmıştır. Bu etkiyi yansıtmak amacıyla literatürde kullanılmakta olan farklı teknikler (Westergaard ek kütlesi, Euler akışkan elemanları ve Lagrange akışkan elemanları, vb.) bulunmaktadır. Bu yaklaşımların her biri kendi içerisinde bazı kabuller yapmaktadır. Barajların tasarımı aşamasında sıklıkla kullanılan bu farklı modelleme yaklaşımlarının barajların modal özelliklerine nasıl etki ettiğinin irdelenmesi amacıyla tez kapsamında rezervuar etkisi, Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları olmak üzere üç farklı model kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerde kütsüz olarak modellenen temelin dış sınırları ankastre olarak mesnetlenmiş. Baraj gövdesi ve temel için yapısal eleman tiplerinden biri olan 8 düğüm noktasına sahip SOLID185 kullanılmıştır. Yusufeli Barajının çevresel titreşim testleri 15m, 36m, 57m, 78m, 99m, 126m, 150m ve 172m olmak üzere sekiz farklı su seviyesi durumu için gerçekleştirilmiş olup, sonlu eleman modellerde de tüm su seviyeleri dikkate alınarak modeller her üç yaklaşım yöntemine göre oluşturulmuştur. İlk su seviyesi talveg kotu olan +495m'den itibaren dikkate alınmıştır.

Westergaard ek kütlesi kullanılarak oluşturulan rezervuar etkisini içeren sayısal modelde, baraj gövdesinin eğimli memba yüzeyindeki düğüm noktalarına sekiz farklı su yüksekliği durumunda etkiyen su kuvveti hesaplanarak her üç eksen doğrultusunda ek kütle olarak tanımlanmıştır. Uygulanan kütle için MASS21 eleman tipi kullanılmıştır. Westergaard ek kütle yaklaşımına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modeline ait bazı görseller Şekil 47'de verilmektedir.

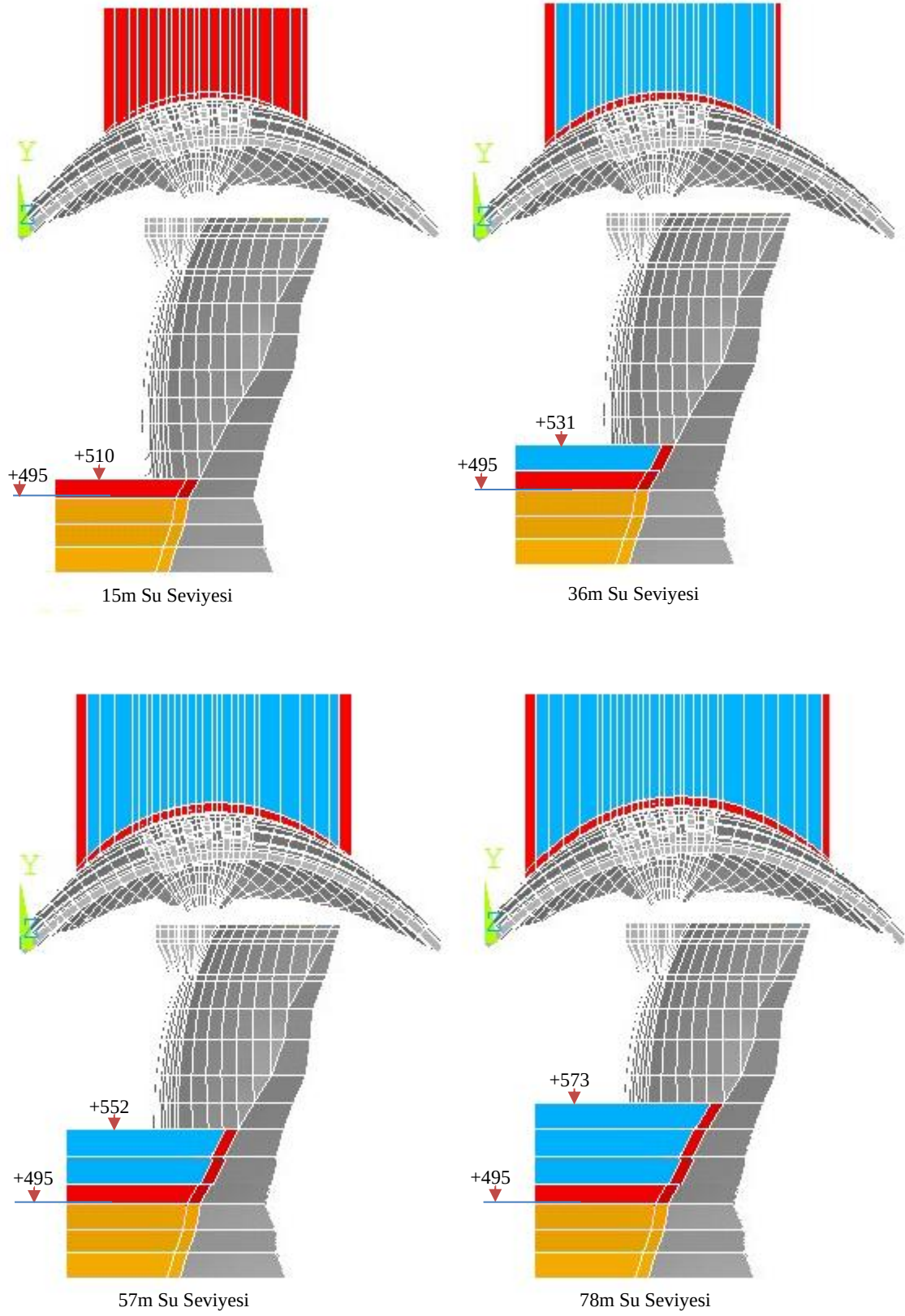
Rezervuardaki sıvının Euler akışkan elemanlarıyla temsil edildiği sayısal modelde rezervuar için FLUID30 akışkan eleman tipi kullanılmıştır. Yapısal elemanlar (SOLID185 vb.) ile akışkan elemanların (FLUID30 vb.) birleştiği komşu düğüm noktaları arasında bir uyumsuzluk oluşmaktadır. Bunun temel sebebi Euler akışkan elemanların basınç serbestlik derecesine sahipken yapısal elemanların deplasman serbestlik derecesine sahip olmasıdır. Düğüm noktaları arasında uygunluğun sağlanması amacıyla rezervuar elemanlarının yapısal elemanlarla birleştiği tüm yüzeylerdeki akışkan eleman tipinde hem basınç hem de deplasman serbestlik dereceleri aktive edilirken bu eleman tipinin çevrelediği ve iç kısımda kalan rezervuar kısmında sadece basınç serbestlik derecesi aktive edilmiştir. Bu durum Euler akışkan elemanları ile modellenen baraj-rezervuar-temel modelinin modal analizinde simetrik olmayan rijitlik matrisinin kullanılmasına neden olmaktadır.



Euler akışkan elemanları ile modelleme yapılırken rezervuarın mevcut durumdan daha kısa modellenmiş olması rezervuarın bitiş kısmında dalgaların sonsuza yayılmasını önleyerek baraj gövdesine yansımaya sebep olmaktadır. Bu durumun engellenmesi için rezervuarın bitiminde sınır koşullarını doğru yansıtmak ve dalga yansımalarını engellemek için dalga hızının emilmesi maksatlı iç sürtünme değeri maksimum değer alınarak dalga emici bir mesnet olarak FLUID130 elemanı kullanılmıştır (Şekil 48). Euler akışkan elemanları yaklaşımına göre sekiz farklı su seviyesi için oluşturulan baraj-rezervuar-temel modellerine ait görseller Şekil 49’da verilmektedir.

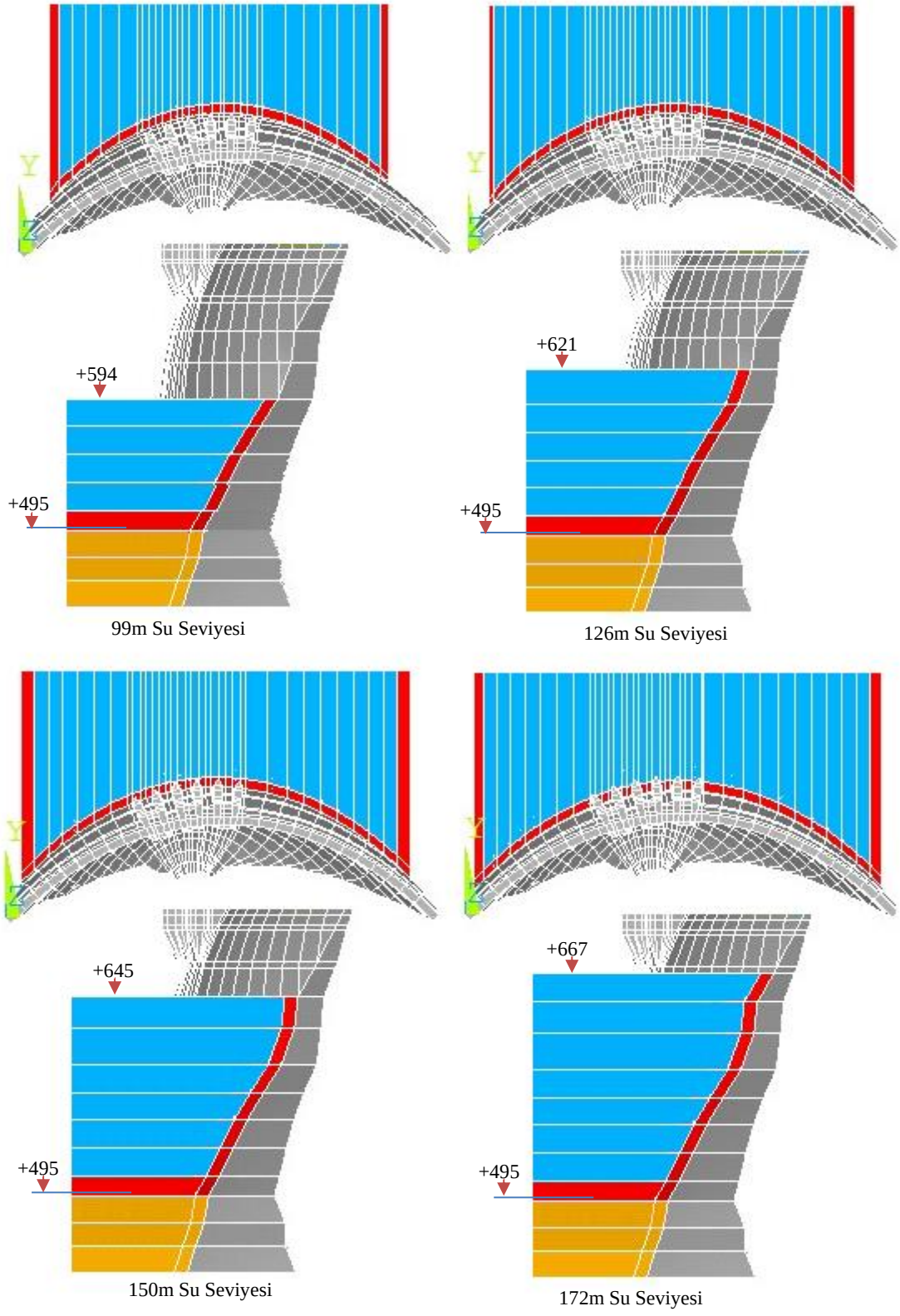


Şekil 48. Yusufeli Barajının Euler akışkan eleman yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli

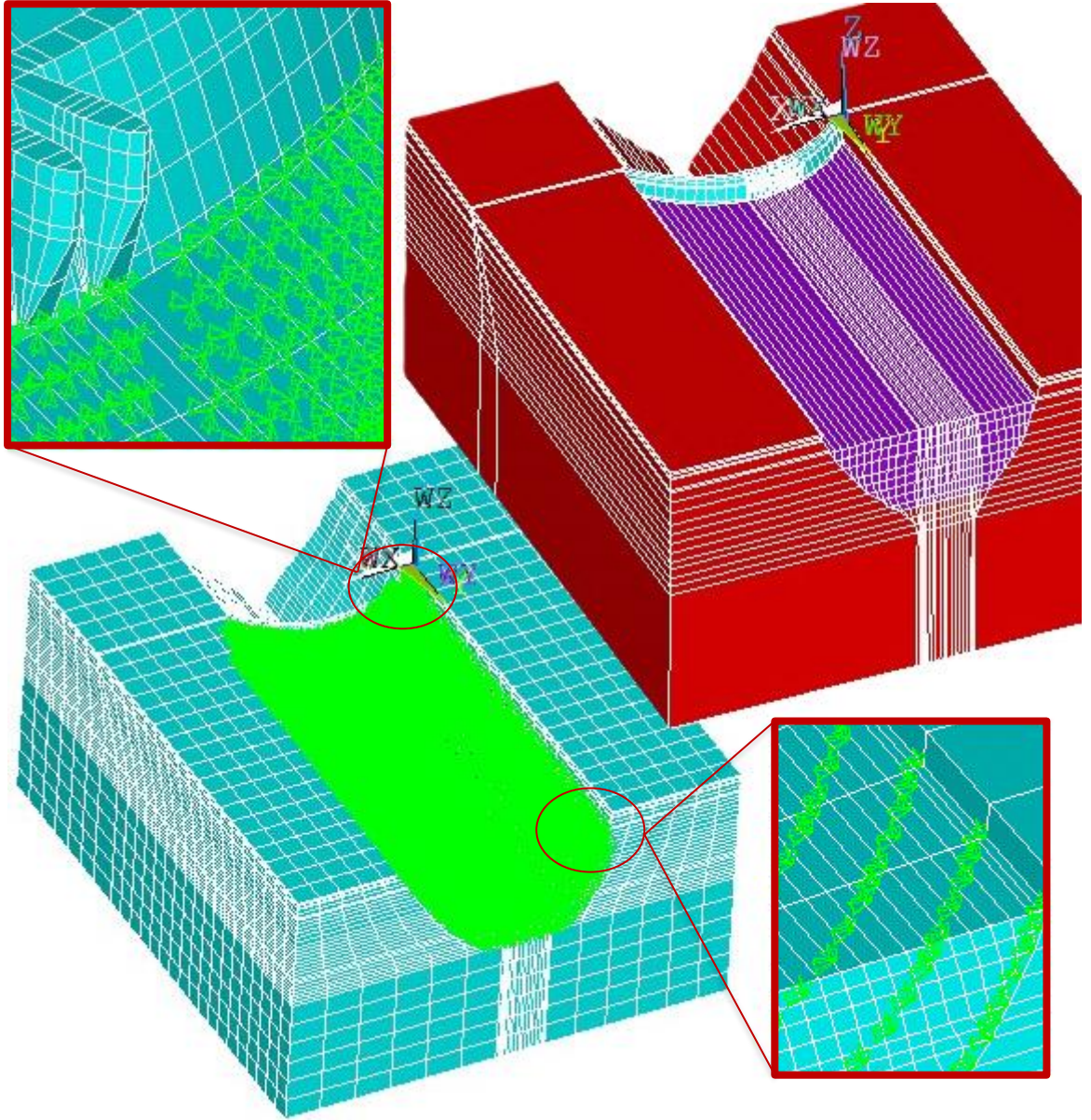


Şekil 49. Yusufeli Barajının Euler akışkan eleman yaklaşımına göre farklı su seviyeleri için oluşturulan sonlu eleman modelleri

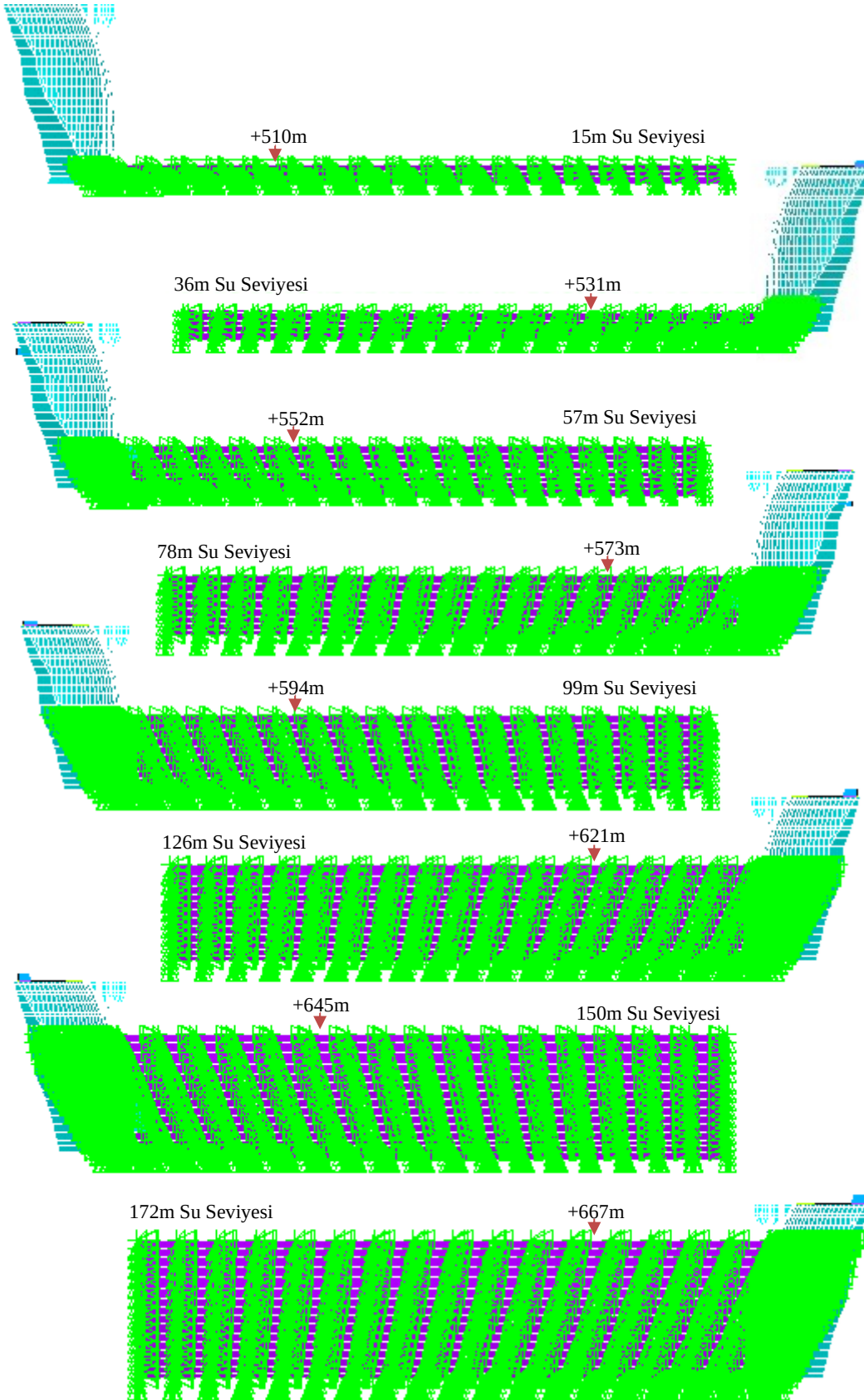
Şekil 49'un devamı



Lagrange akışkan elemanları yaklaşımı kullanılan modellerde ise akışkan elemanların (FLUID80) yapısal elemanlarla direk bağlantısı engellenmelidir. Bu amaçla rezervuar ve yapısal elemanların birleşim bölgelerinde düğüm noktaları arasında 0.001 m uzunluğuna sahip bağlantı elemanları kullanılmıştır. Bağlantı elemanlarının görevi, sıvı-yapı ara yüzeylerindeki düğüm noktalarının yüzey normali doğrultusundaki yer değiştirmelerini eşitlemektir. Rezervuarın bitim noktasındaki yüzeyde yatay yer değiştirmeler engellenmiş, düşey yer değiştirmeler serbest bırakılmıştır. Lagrange akışkan elemanları yaklaşımına göre sekiz farklı su seviyesi için oluşturulan baraj-rezervuar-temel modellerine ait bazı görseller Şekil 50 ve 51’de verilmektedir.



Şekil 50. Yusufeli Barajının Lagrange akışkan eleman yaklaşımına göre baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman modeli



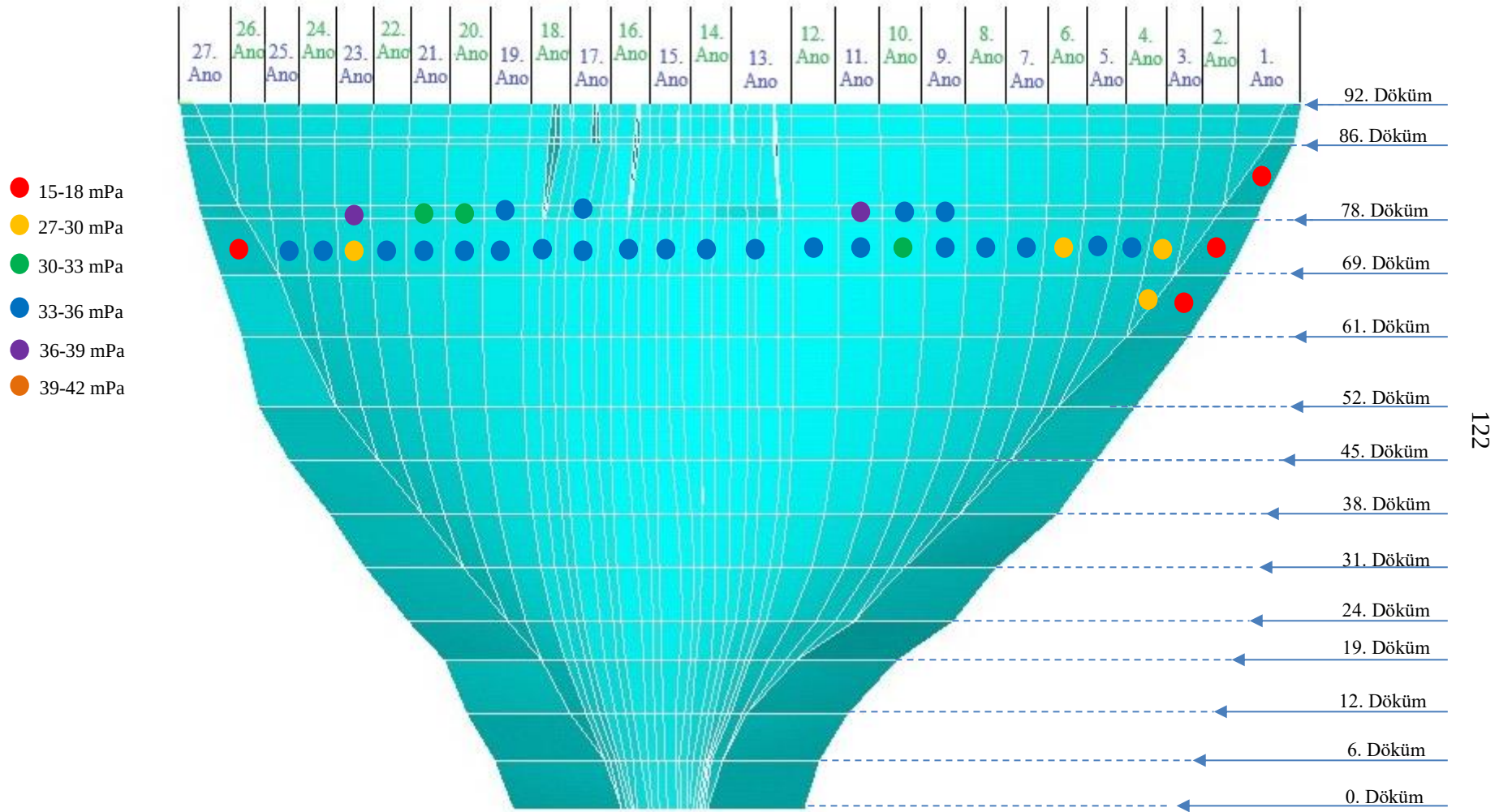
Şekil 51. Yusufeli Barajının Lagrange akışkan eleman yaklaşımına göre farklı su seviyeleri için oluşturulan sonlu eleman modelleri

❖ Yusufeli Barajının Modal Analizi

Yusufeli Barajının sonlu eleman modellerine ait modal analizlerin yapılabilmesi için DSİ 26. Şube Müdürlüğünden temin edilen baraj gövdesine ait karot numune değerleri incelenmiştir. Gövde betonu her bir anoya 3'er metrelik yükseklikte dökümler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Gövde betonunun tüm anolarında her bir döküm için 150x300mm ve 250x500mm olmak üzere iki farklı boyutta numune örneği alınmıştır. Bu numune örneklerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına ait değerler detaylı olarak raporlanmıştır. Şantiye beton numune kayıt formlarının tamamının incelenmesi ile her bir anodaki dökümlere ait 250x500mm ölçülere sahip numune örneklerinin 90 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 52'de özetlenmiştir. Gövdenin sonlu eleman modeli düşeyde 16 farklı kesitte modellenmiş olup, her bir kesitin denk geldiği döküm numarası belirlenmiştir. Ardından o döküm aralıkları içerisinde her 3 metre döküm için ayrı ayrı elde edilmiş basınç dayanım değerlerinin ortalaması alınarak Şekil 52'ye işlenmiştir.

ANSYS programında baraj modelinin analizinin gerçekleştirilmesi için Şekil 52'de gerçek proje verilerine ait malzeme dayanımlarından faydalanılmıştır. Ancak farklı aralıklara sahip birçok değer olmasına karşın özellikle orta bölgede değerlerin yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yastık betonuna yakın kenar kısımlar ise orta bölgeye göre oldukça düşük olup, tüm kenarlar bölgelerdeki bu değerlerin de birbirine yakın olduğu görülmektedir. ANSYS programında malzemenin tanımlaması ve atanması hususunda kolaylık sağlanmak amacıyla orta bölgeler için 35MPa, kenar bölgeler için 18MPa değerleri dikkate alınmıştır (Tablo 13). ANSYS programında dikkate alınan malzeme özelliklerine göre baraj gövdesinin malzeme özelliklerinin tanımlanmış durumuna ait görsel Şekil 53'te verilmektedir.

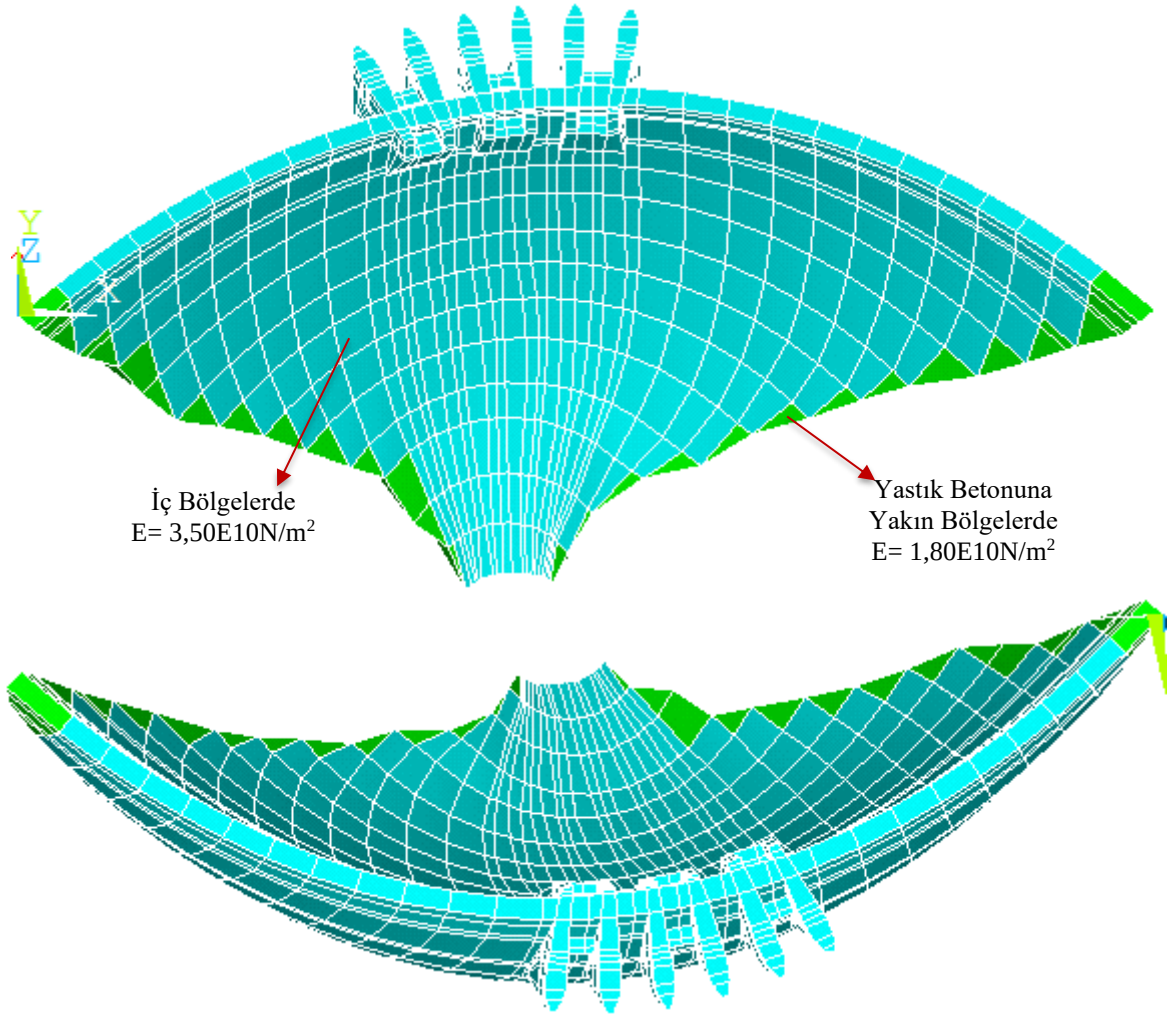
İlk olarak Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumuna ait sonlu eleman modelin modal analizi yapılarak elde edilen frekans ve mod şekilleri baraj rezervuarının boş olması durumu için gerçekleştirilen deneysel modal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumuna ait sonlu eleman ve deneysel modal analizleri sonucu elde edilen frekans değerleri ve bu değerler arasındaki farklar Tablo 14'te gösterilmektedir. Tabloya göre elde edilen deneysel ve sonlu eleman model arasındaki frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu ve maksimum farkın %3,12 ile altıncı modda olduğu görülmektedir. Sonuçlar arasındaki fark literatüre uygun olduğu için gövdeye ait seçilen malzeme özellikleri rezervuar etkili baraj modellerinde de kullanılabilir.



Şekil 52. Yusufeli Baraj gövdesinin her bir ano ve döküme ait 90 günlük beton basınç dayanımları

Tablo 13. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için kullanılan malzeme ve eleman özellikleri

	ANSYS Elemen Tipi	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)
Kemer Orta Bölge	SOLID185	3,50E10	0,15	2400
Kemer Kenar Bölge	SOLID185	1,80E10	0,15	2400
Temel	SOLID185	5,68E10	0,30	----

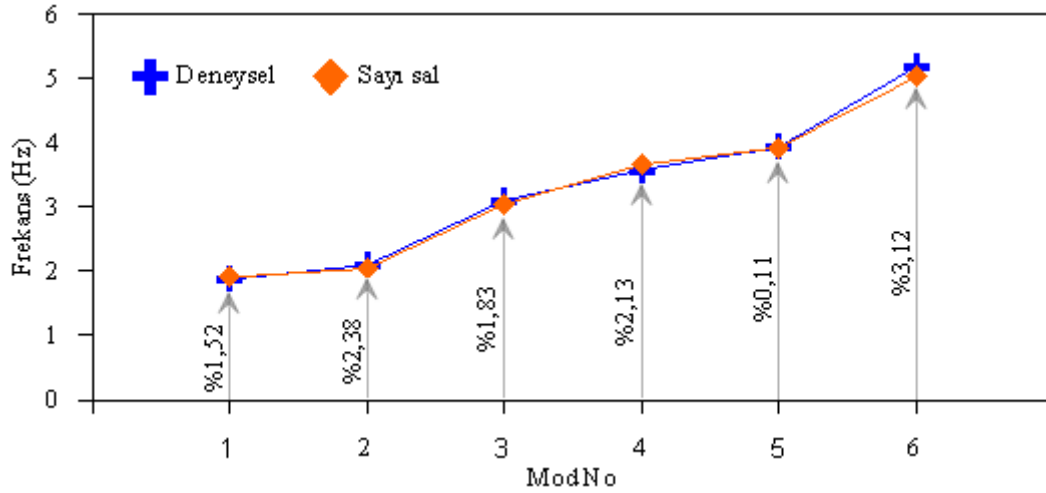


Şekil 53. Yusufeli Barajının sonlu eleman modeline ait malzeme dayanımı dağılımı

Tablo 14. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için deneysel ve sonlu eleman modele ait modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri

Mod No	Frekans Değerleri (Hz)		
	Deneysel Modal Analiz	ANSYS Modal Analiz	Fark (%)
1	1,881	1,9095	1,52
2	2,095	2,0452	2,38
3	3,105	3,0481	1,83
4	3,584	3,6604	2,13
5	3,936	3,9315	0,11
6	5,191	5,0293	3,12

Yusufeli kemer baraj rezervuarının boş olması durumuna göre elde edilen frekans değerleri Şekil 54'te grafik olarak gösterilmektedir. Elde edilen bu grafiğe göre her bir mod birbiri ile uyum içerisinde olup, benzer eğilime sahiptir.



Şekil 54. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için deneysel ve sonlu eleman modelden elde edilen frekans değerlerine ait grafik

Baraj rezervuarının boş olması durumu için elde edilen frekans değerlerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olmasının ardından rezervuar etkileşimli baraj modellerinin malzeme özellikleri için Tablo 15'te özetlenen değerler kullanılmıştır.

Tablo 15. Yusufeli barajında baraj-rezervuar-temel etkileşimi dikkate alınarak modellenen sonlu eleman modeller için kullanılan malzeme ve eleman özellikleri

	ANSYS Elemen Tipi	Malzeme Özellikleri			
		Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	Sonik Dalga Hızı (m/s)
<i>Euler Yaklaşımı için</i>					
Kemer Orta Bölge	SOLID185	3,50E10	0,15	2400	----
Kemer Kenar Bölge	SOLID185	1,80E10	0,15	2400	----
Rezervuar	FLUID30	----	----	1000	1438,75
Ara Yüzey Elemanı	FLUID30	----	----	1000	1438,75
Euler Dalga Emici	SOLID130	----	----	1000	1438,75
Temel	SOLID185	5,68E10	0,3	----	----
<i>Lagrange Yaklaşımı için</i>					
Kemer Orta Bölge	SOLID185	3,50E10	0,15	2400	----
Kemer Kenar Bölge	SOLID185	1,80E10	0,15	2400	----
Rezervuar	FLUID30	2,07E9	----	1000	----
Temel	SOLID185	5,68E10	0,3	----	----
<i>Westergaard Yaklaşımı için</i>					
Kemer Orta Bölge	SOLID185	3,50E10	0,15	2400	----
Kemer Kenar Bölge	SOLID185	1,80E10	0,15	2400	----
Temel	SOLID185	5,68E10	0,3	----	----
Rezervuar	MASS21	----	----	----	----

Yusufeli Barajının Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen rezervuar etkileşimli sonlu eleman modellerine ait modal analiz sonucu sekiz farklı su seviyesi için frekans değerleri elde edilmiştir. Tablo 16, 17 ve 18 sırasıyla Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına ait elde edilen sonuçları göstermektedir.

Tablo 16. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımı ile modellenen sonlu eleman modellerine ait frekans değerleri

Mod No	Değişen Rezervuar Su Yüksekliğine göre Frekans Değerleri (Hz)								
	Boş	15m	36m	57m	78m	99m	126m	150m	172m
1	1,9095	1,9093	1,9092	1,9086	1,9060	1,8988	1,8778	1,8164	1,7005
2	2,0452	2,0449	2,0445	2,0436	2,0396	2,0291	2,0002	1,9223	1,7910
3	3,0481	3,0480	3,0478	3,0472	3,0444	3,0349	2,9979	2,8747	2,6970
4	3,6604	3,6546	3,6498	3,6320	3,5739	3,4611	3,2944	3,1421	3,0133
5	3,9315	3,9300	3,9289	3,9251	3,9152	3,9001	3,8677	3,8709	3,6746
6	5,0293	5,0283	5,0266	5,0222	5,0088	4,9781	4,9624	4,8732	4,6000

Tablo 17. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımı ile modellenen sonlu eleman modellerine ait frekans değerleri

Mod No	Değişen Rezervuar Su Yüksekliğine göre Frekans Değerleri (Hz)								
	Boş	15m	36m	57m	78m	99m	126m	150m	172m
1	1,9095	1,9095	1,9094	1,9092	1,9084	1,9058	1,8945	1,8651	1,8066
2	2,0452	2,0465	2,0465	2,0462	2,0446	2,0409	2,0246	1,9837	1,9052
3	3,0481	3,0467	3,0467	3,0465	3,0457	3,0418	3,0361	2,9910	3,0017
4	3,6604	3,6899	3,6883	3,6794	3,6408	3,4682	3,4289	3,1396	3,3505
5	3,9315	3,9342	3,9336	3,9305	3,9191	3,8618	3,7236	3,8561	3,8616
6	5,0293	5,0279	5,0271	5,0225	5,0295	5,0269	5,0075	4,8629	4,9656

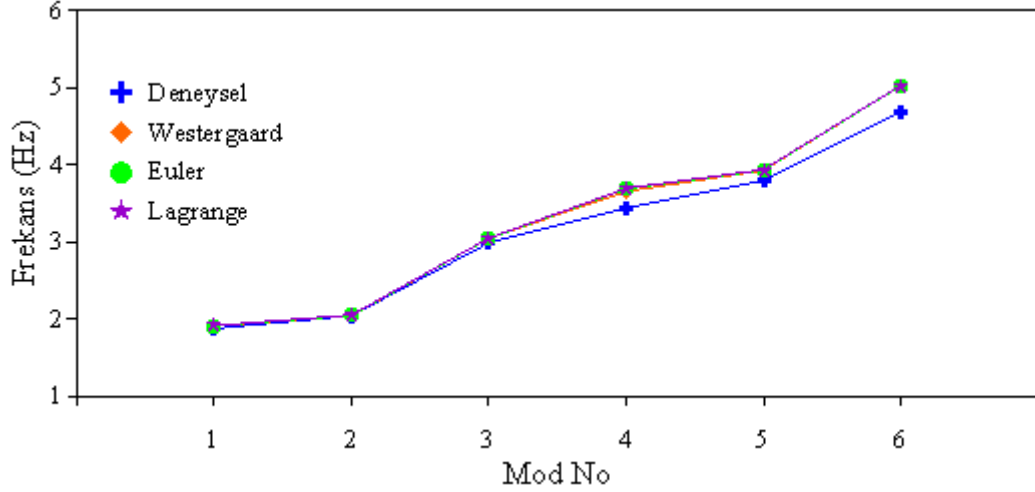
Tablo 18. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımı ile modellenen sonlu eleman modellerine ait frekans değerleri

Mod No	Değişen Rezervuar Su Yüksekliğine göre Frekans Değerleri								
	Boş	15m	36m	57m	78m	99m	126m	150m	172m
1	1,9095	1,9125	1,9119	1,9101	1,9053	1,8938	1,8563	1,7835	1,6742
2	2,0452	2,0502	2,0494	2,0464	2,0393	2,0225	1,9706	1,8762	1,7493
3	3,0481	3,0492	3,0487	3,0468	3,0391	2,9759	2,9853	2,9845	2,6712
4	3,6604	3,6945	3,6756	3,6097	3,6305	3,4605	3,5727	3,1430	2,9815
5	3,9315	3,9393	3,9340	3,9187	3,8892	3,9081	3,8473	3,7834	3,4821
6	5,0293	5,0339	5,0249	5,0196	5,0351	5,0387	4,9632	4,9573	4,7358

Tablo 16- 18’de elde edilen sayısal frekansların deneysel frekans değerleri ile daha detaylı karşılaştırılabilmesi amacıyla her rezervuar su seviyesi için deneysel ve numerik olarak elde edilen frekans değerleri ve sayısal-deneysel frekans değerleri arasındaki fark yüzdesel olarak detaylı bir şekilde Tablo 19-26’da incelenmiştir. Her bir tabloda verilen frekans değerlerinin değişimi Şekil 55-62 ile görselleştirilmiştir.

Tablo 19. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 15m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

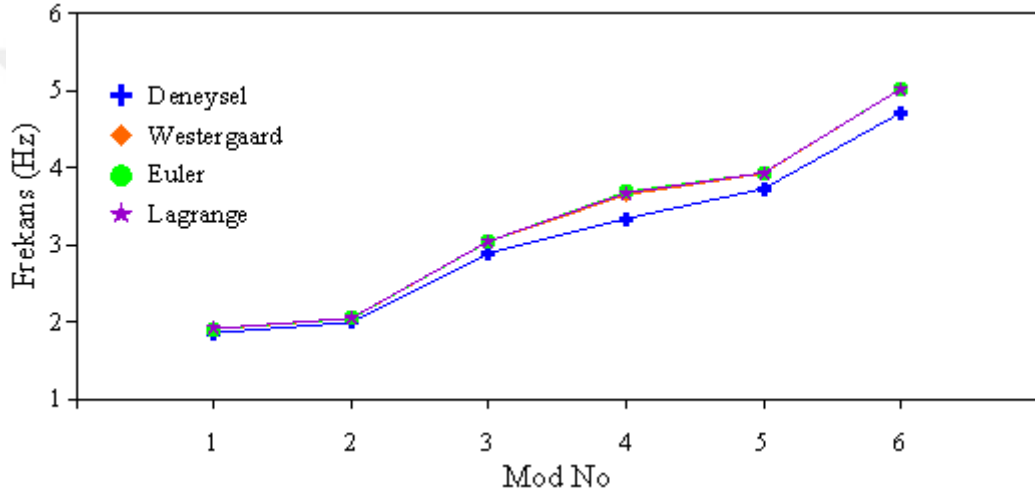
Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,8750	1,9093	1,83	1,9095	1,84	1,9125	2,00
2	2,0410	2,0449	0,19	2,0465	0,27	2,0502	0,45
3	2,9880	3,0480	2,01	3,0467	1,96	3,0492	2,05
4	3,4380	3,6546	6,30	3,6899	7,33	3,6945	7,46
5	3,7990	3,9300	3,45	3,9342	3,56	3,9393	3,69
6	4,6880	5,0283	7,26	5,0279	7,25	5,0339	7,38



Şekil 55. Yusufeli Baraj rezervuarının 15m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 20. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 36m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

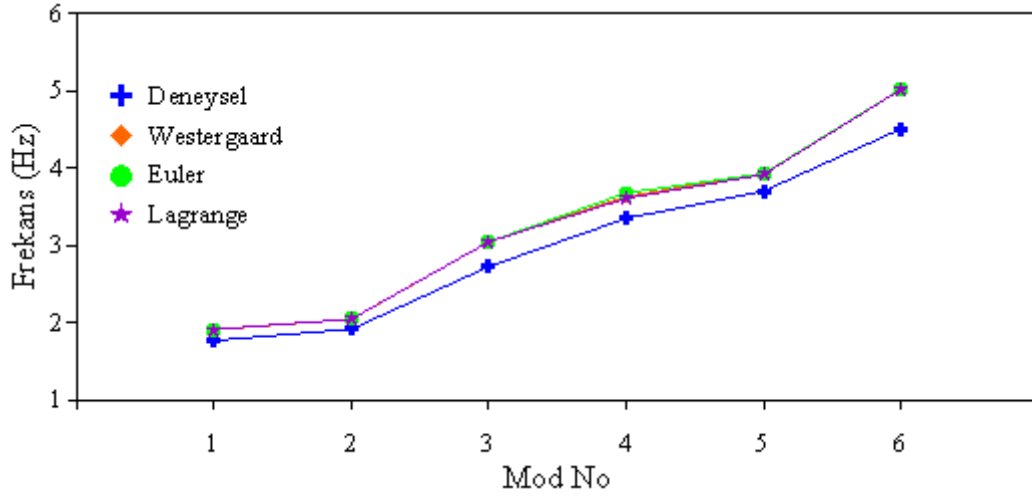
Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,8550	1,9092	2,92	1,9094	2,93	1,9119	3,07
2	1,9920	2,0445	2,64	2,0465	2,74	2,0494	2,88
3	2,8910	3,0478	5,42	3,0467	5,39	3,0487	5,45
4	3,3400	3,6498	9,28	3,6883	10,43	3,6756	10,05
5	3,7300	3,9289	5,33	3,9336	5,46	3,934	5,47
6	4,7170	5,0266	6,56	5,0271	6,57	5,0249	6,53



Şekil 56. Yusufeli Baraj rezervuarının 36m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 21. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 57m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

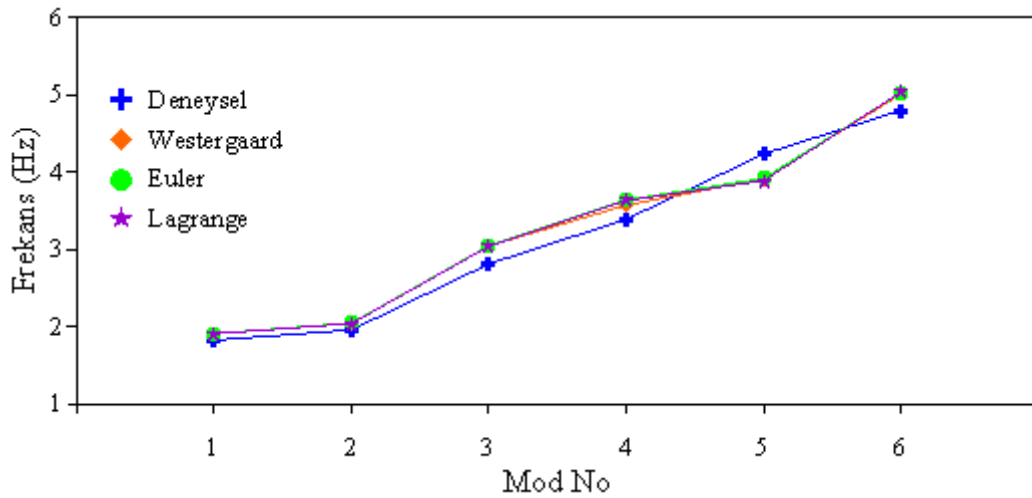
Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,7680	1,9086	7,95	1,9092	7,99	1,9101	8,04
2	1,9140	2,0436	6,77	2,0462	6,91	2,0464	6,92
3	2,7250	3,0472	11,82	3,0465	11,80	3,0468	11,81
4	3,3500	3,6320	8,42	3,6794	9,83	3,6097	7,75
5	3,7000	3,9251	6,08	3,9305	6,23	3,9187	5,91
6	4,5100	5,0222	11,36	5,0225	11,36	5,0196	11,30



Şekil 57. Yusufeli Baraj rezervuarının 57m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 22. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 78m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

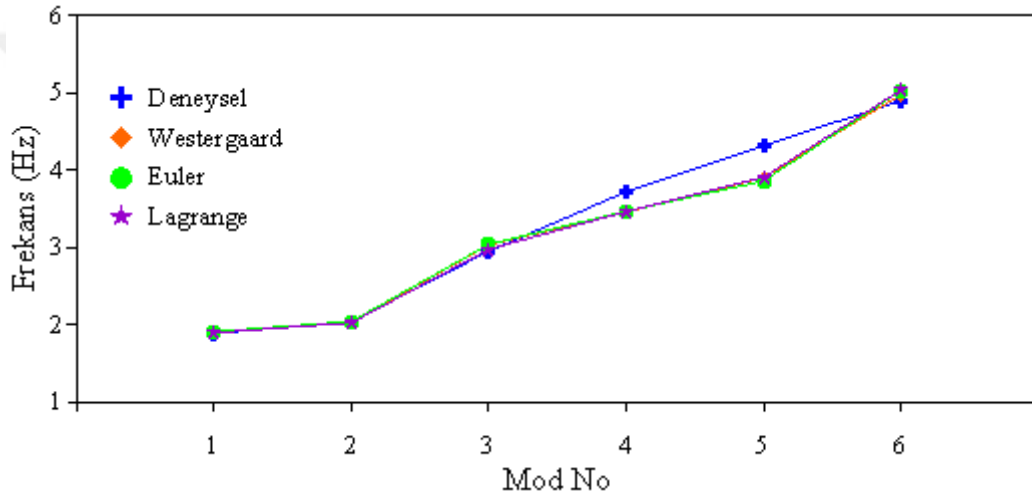
Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,8210	1,9060	4,67	1,9084	4,80	1,9053	4,63
2	1,9570	2,0396	4,22	2,0446	4,48	2,0393	4,21
3	2,8120	3,0444	8,26	3,0457	8,31	3,0391	8,08
4	3,3890	3,5739	5,46	3,6408	7,43	3,6305	7,13
5	4,2350	3,9152	-7,55	3,9191	-7,46	3,8892	-8,17
6	4,8000	5,0088	4,35	5,0295	4,78	5,0351	4,90



Şekil 58. Yusufeli Baraj rezervuarının 78m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 23. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 99m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

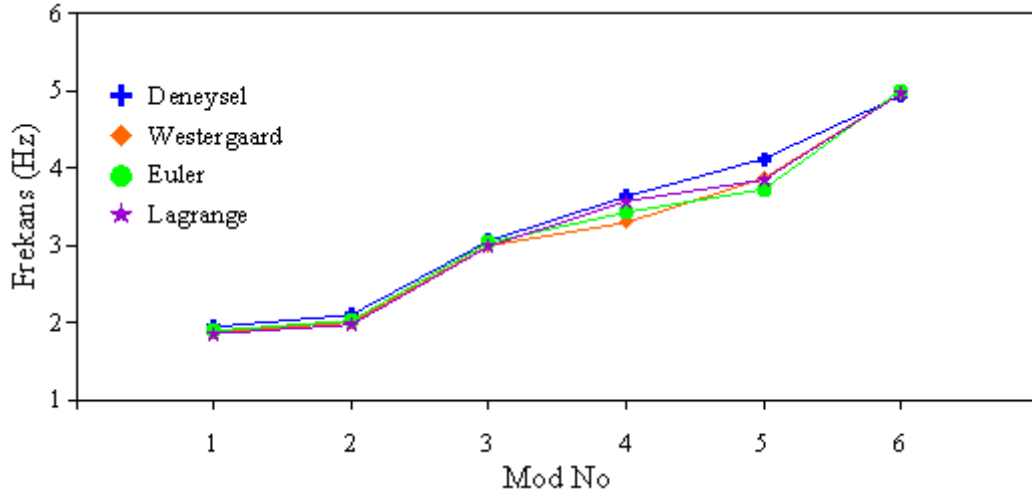
Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,8850	1,8988	0,73	1,9058	1,10	1,8938	0,47
2	2,0410	2,0291	-0,58	2,0409	0,00	2,0225	-0,91
3	2,9490	3,0349	2,91	3,0418	3,15	2,9759	0,91
4	3,7210	3,4611	-6,98	3,4682	-6,79	3,4605	-7,00
5	4,3160	3,9001	-9,64	3,8618	-10,52	3,9081	-9,45
6	4,9000	4,9781	1,59	5,0269	2,59	5,0387	2,83



Şekil 59. Yusufeli Baraj rezervuarının 99m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 24. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 126m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

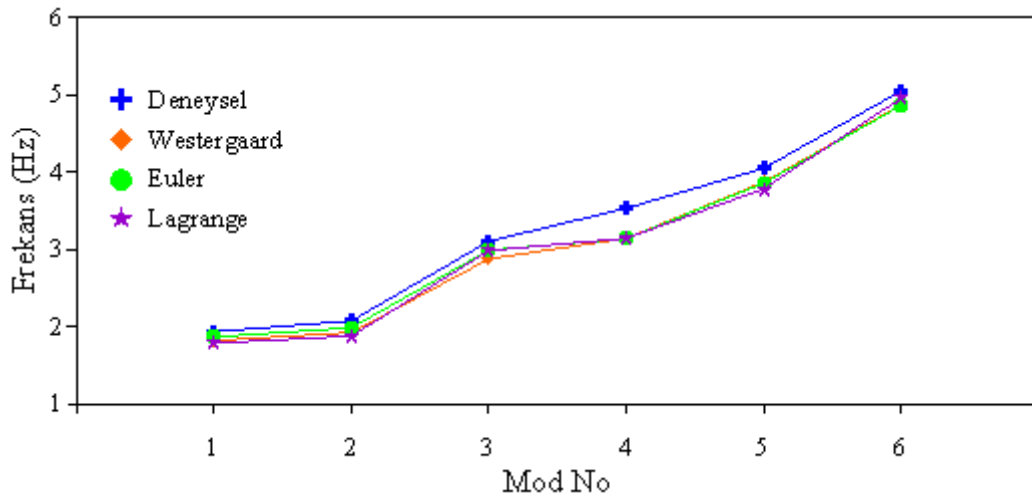
Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,9430	1,8778	-3,36	1,8945	-2,50	1,8563	-4,46
2	2,1000	2,0002	-4,75	2,0246	-3,59	1,9706	-6,16
3	3,0570	2,9979	-1,93	3,0361	-0,68	2,9853	-2,35
4	3,6326	3,2944	-9,31	3,4289	-5,61	3,5727	-1,65
5	4,1210	3,8677	-6,15	3,7236	-9,64	3,8473	-6,64
6	4,9400	4,9624	0,45	5,0075	1,37	4,9632	0,47



Şekil 60. Yusufeli Baraj rezervuarının 126m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 25. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 150m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

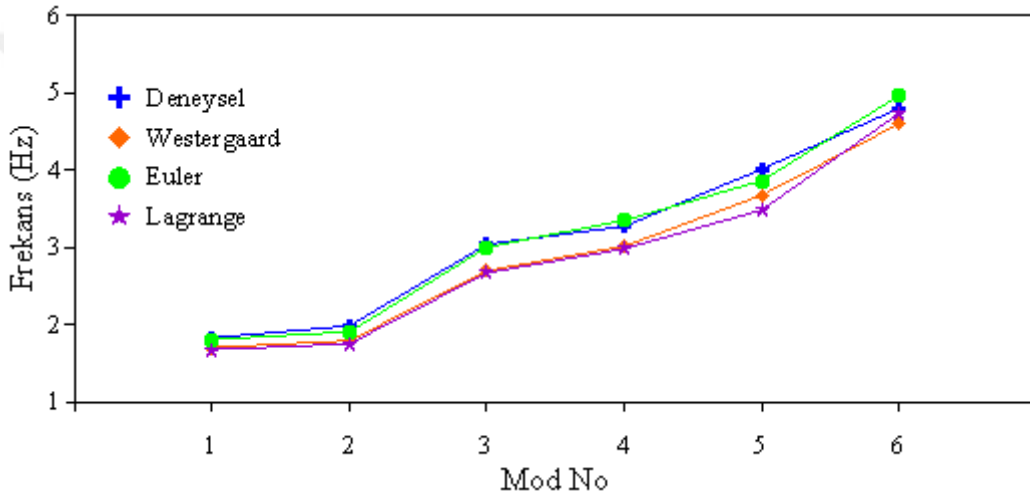
Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,9330	1,8164	-6,03	1,8651	-3,51	1,7835	-7,73
2	2,0730	1,9223	-7,27	1,9837	-4,31	1,8762	-9,49
3	3,1050	2,8747	-7,42	2,991	-3,67	2,9845	-3,88
4	3,5330	3,1421	-11,06	3,1396	-11,14	3,1430	-11,04
5	4,0500	3,8709	-4,42	3,8561	-4,79	3,7834	-6,58
6	5,0520	4,8732	-3,54	4,8629	-3,74	4,9573	-1,87



Şekil 61. Yusufeli Baraj rezervuarının 150m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 26. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su seviyesinin 172m olması durumunda elde edilen deneysel ve sayısal frekans değerleri

Mod No	Deneysel	Westergaard		Euler		Lagrange	
		Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)	Frekans (Hz)	Fark (%)
1	1,8280	1,7005	-6,97	1,8066	-1,17	1,6742	-8,41
2	1,9820	1,7910	-9,64	1,9052	-3,87	1,7493	-11,74
3	3,0390	2,6970	-11,25	3,0017	-1,23	2,6712	-12,10
4	3,2720	3,0133	-7,91	3,3505	2,40	2,9815	-8,88
5	4,0130	3,6746	-8,43	3,8616	-3,77	3,4821	-13,23
6	4,8000	4,6000	-4,17	4,9656	3,45	4,7358	-1,34



Şekil 62. Yusufeli Baraj rezervuarının 172m olması durumuna ait deneysel ve sonlu eleman modellerden elde edilen frekans değerleri grafiği

Tablo 19'da verilen deneysel ve farklı rezervuar modelleme yaklaşımlarına ait sonuçlar 15m su seviyesi içindir. Bu su seviyesinde Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonuçlar deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu ve aralarındaki farkların yaklaşık maksimum %7 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlara ait değerler Şekil 55'te görselleştirildiğinde tüm sonuçların aynı eğilimde olduğu görülmektedir.

Tablo 20'de verilen değerler incelendiğinde elde edilen farkların tüm rezervuar yaklaşım modellerinin dördüncü modunda %9'un üzerinde olduğu, diğer modlarda ise yaklaşık maksimum %5-6 civarında olduğu görülmektedir. Şekil 56'da deneysel ve sayısal sonuçlara ait grafik çizgilerinin uygun ve benzer eğilimde değiştiği görülmektedir.

Tablo 21 57m'lik rezervuar su seviyesine ait frekans değerlerini göstermekte olup tüm modlarda her üç yaklaşım için elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara göre %6-11 aralığında değiştiği görülmektedir. şekil 57 deneysel ve sayısal sonuçların benzer eğilimde ancak ilgili modlar arasında farklılıklar olduğunu göstermektedir.

78m'lik rezervuar su seviyesinin deneysel ve sayısal sonuçlarını ifade eden Tablo 22'de farkların bir önceki su seviyesine göre azaldığı ancak nc, dördüncü ve beşinci modlarda farkların yaklaşık %7-8 seviyesinde olduğu görülmektedir. şekil 58'de verilen grafik modlara ait değerlerin aynı eğilimde uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tablo 23'te 99m'lik su seviyesi için deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farkların daha da azaldığı, dördüncü ve beşinci modlar için değerlerin %6-10 aralığında olduğu görülmekte olup, şekil 59 ile sonuçlar görselleştirilmiştir.

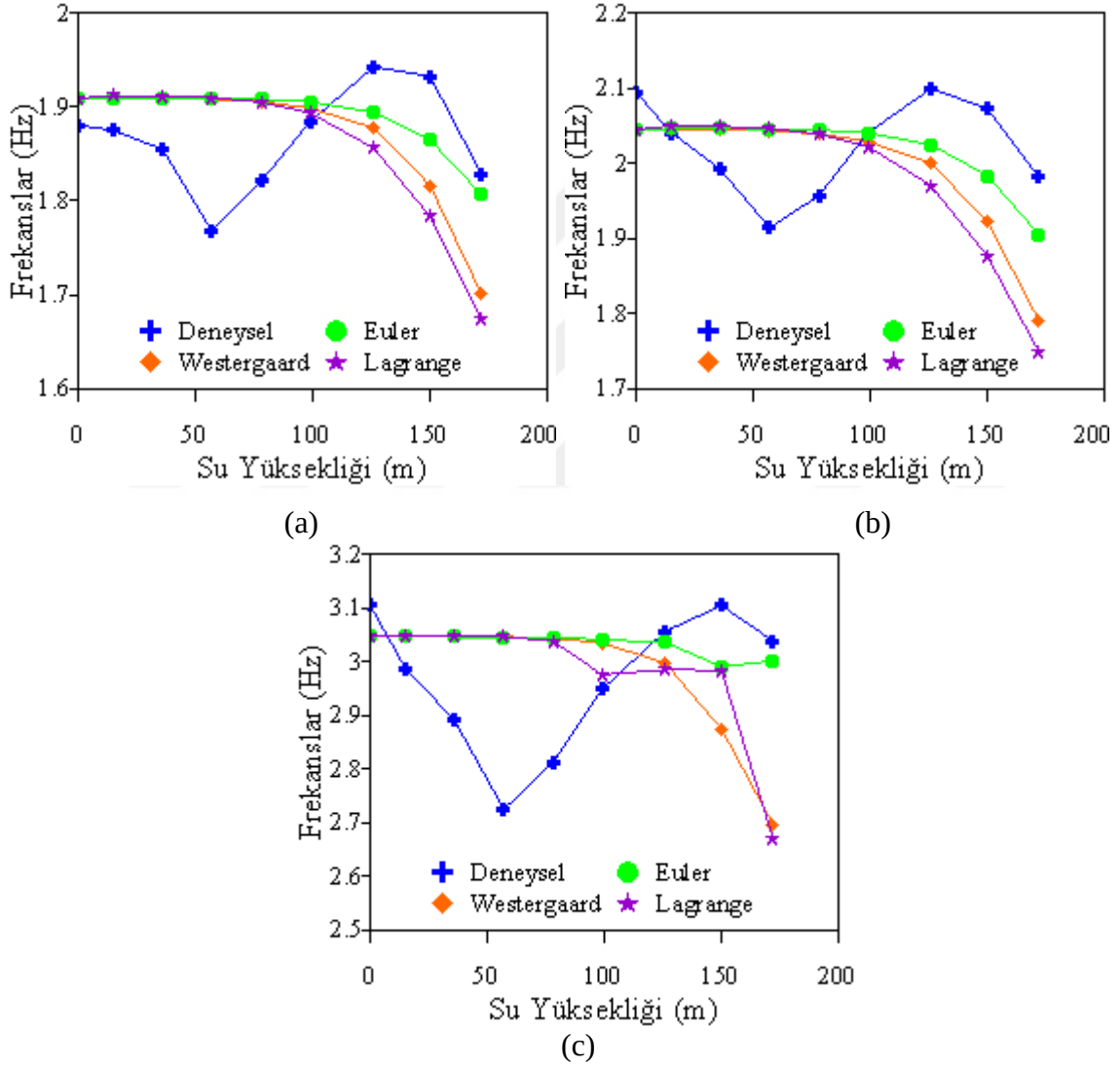
Tablo 24'te değerler karşılaştırıldığında genel anlamda uyumlu sonuçlar olup, bazı modlarda hata oranlarının maksimum %9 seviyelerine çıktığı görülmektedir. Bu uyum ve farklar şekil 60 ile görselleştirilmiştir.

Tablo 25'te değerler karşılaştırıldığında genel anlamda uyumlu sonuçlar olup, her üç yaklaşım içinde dördüncü moda ait değerlerde hata oranlarının maksimum %11 seviyelerine çıktığı görülmektedir. Bu uyum ve farklar şekil 61 ile görselleştirilmiştir.

Tablo 26 maksimum su seviyesine ait frekans değerlerini göstermekte olup, bu aşamada sonuçlar arasındaki farklılıkların diğer su seviyelerine göre biraz daha fazla olduğu görülmektedir. şekil 62 ile modlar arasındaki farklar daha açık bir şekilde görülebilmektedir.

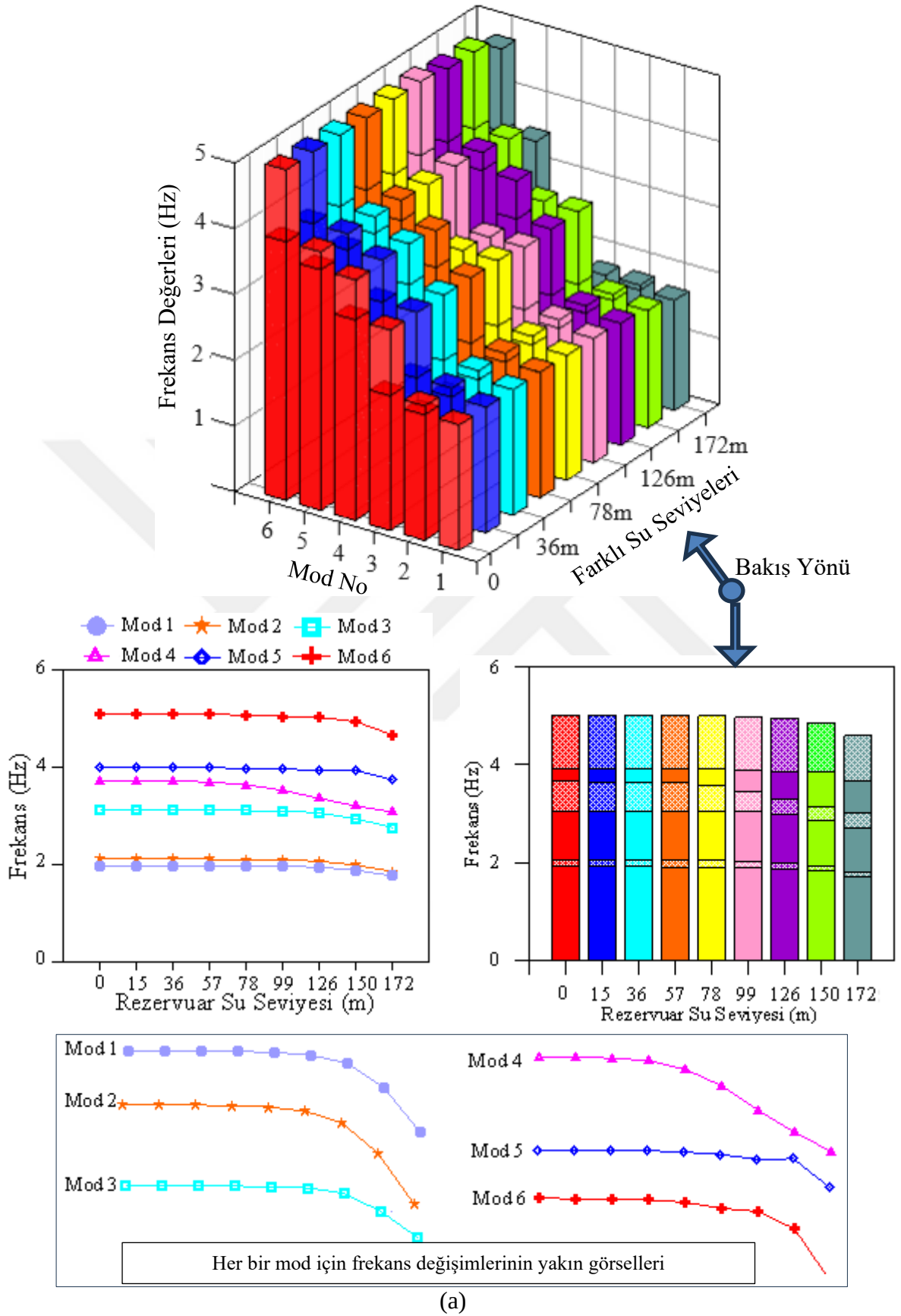
Su seviyesindeki değişimin deneysel ve sayısal yöntemlere göre elde edilen frekans değerlerine etkisinin daha detaylı incelenmesi amacıyla ilk üç modun ayrı ayrı su seviyesine göre değişimleri şekil 63'te verilmektedir. Deneysel sonuçların değişen su seviyelerinde her üç mod içinde ilk 50m'lik su seviyesine kadar azalan eğilimde olduğu ardında 130m'ye kadar değişen su seviyesi ile frekans değerlerinin arttığı daha sonra maksimum su seviyesine ulaşana kadar tekrar azaldığı görülmektedir. Ancak sayısal analizlerde her üç yaklaşıma ait sonuçların benzer eğilimde olduğu yaklaşık 90m'lik su seviyesine kadar değişimin çok az olduğu sonrasında ise artan su seviyesi ile frekansların azalmaya başladığı görülmektedir. Numerik analizlerde rezervuar suyunun modellenmesi amacıyla kullanılan her üç yöntemde kendi içerisinde kabulleri olan formüllerle temsil edilmektedir. Ayrıca deneysel sonuçların elde edilmesi süreci yaklaşık bir yıllık bir süreci kapsamakta olup, özellikle hava ve rezervuar su sıcaklığının değişimi ve diğer çevresel koşullar sayısal analizlerde dikkate alınamadığı için ekstra farklılıkların oluşması olağan kabul edilmektedir. Deneysel frekans

değerlerindeki değişim su seviyesi ve sıcaklık değişimlerinin yanı sıra baraj gövdesinin eğrilikli yapısının yükleme etkisi ile değişmesinden kaynaklı ekstra etkilere de maruz kalmaktadır. Baraj gövdesi düşeyde büzülme derzlerine sahip olacak şekilde inşa edilmiş olup, bu derzler yükleme etkisi ile belirli sınırlar içerisinde açılıp kapanabilme hareketi gösterebilmektedir. Derzlerin açılması durumunda gövdenin rijitliğinde azalma olması ile frekans değerlerinde düşüş, derzlerin sıkışarak kapalı konuma gelmesi ile gövde rijitliğinin artması ile frekans değerlerinde yükseliş görülmesi literatürde kabul gören bir gerçektir.



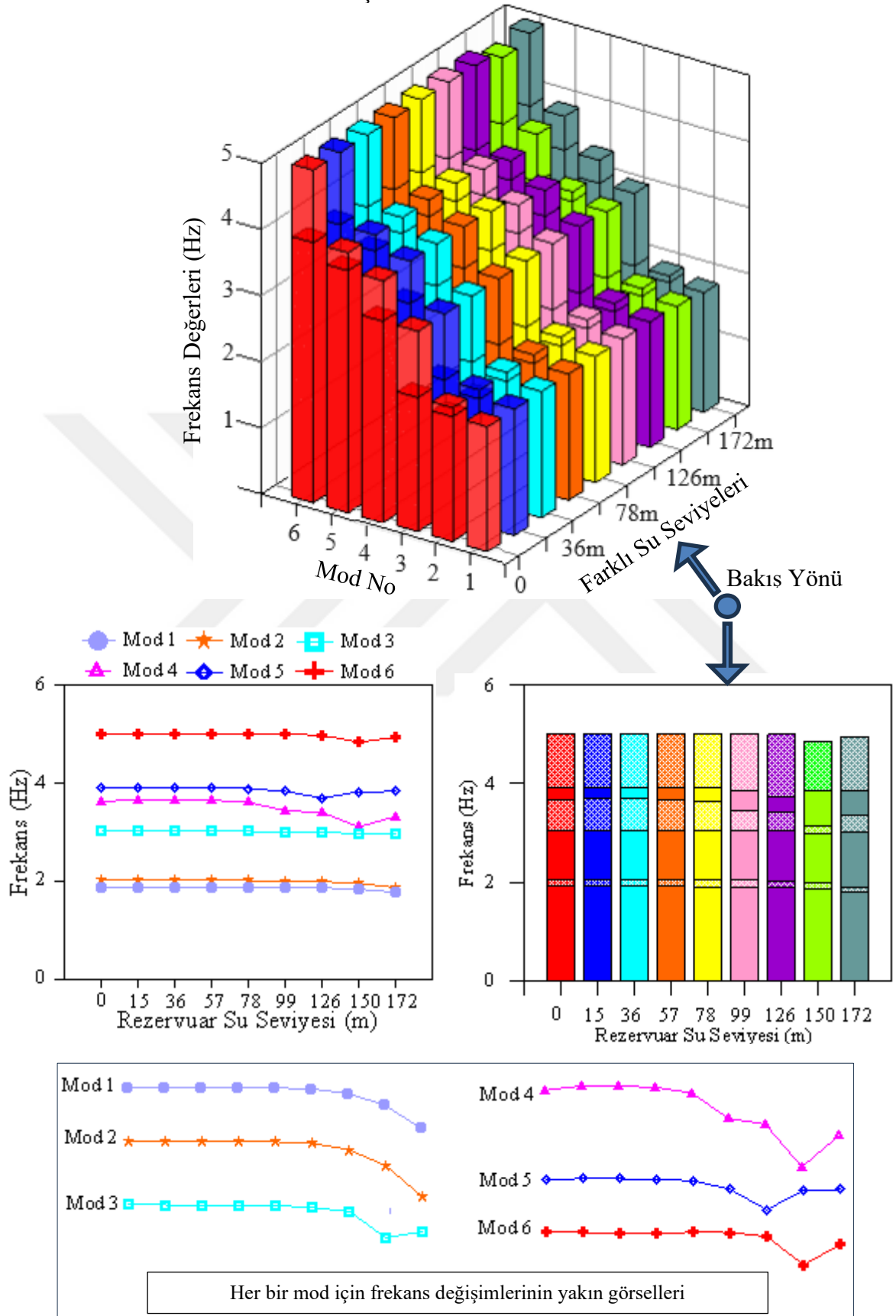
Şekil 63. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su değişimine bağlı olarak ilk üç frekans değerinin deneysel ve sayısal olarak değişimi (a) Birinci mod, (b) İkinci mod, (c) Üçüncü mod

Deneysel ve sayısal frekans değerlerinin su seviyesine göre değişimi Şekil 64'te verilen üç boyutlu grafikler ile görselleştirilmektedir.



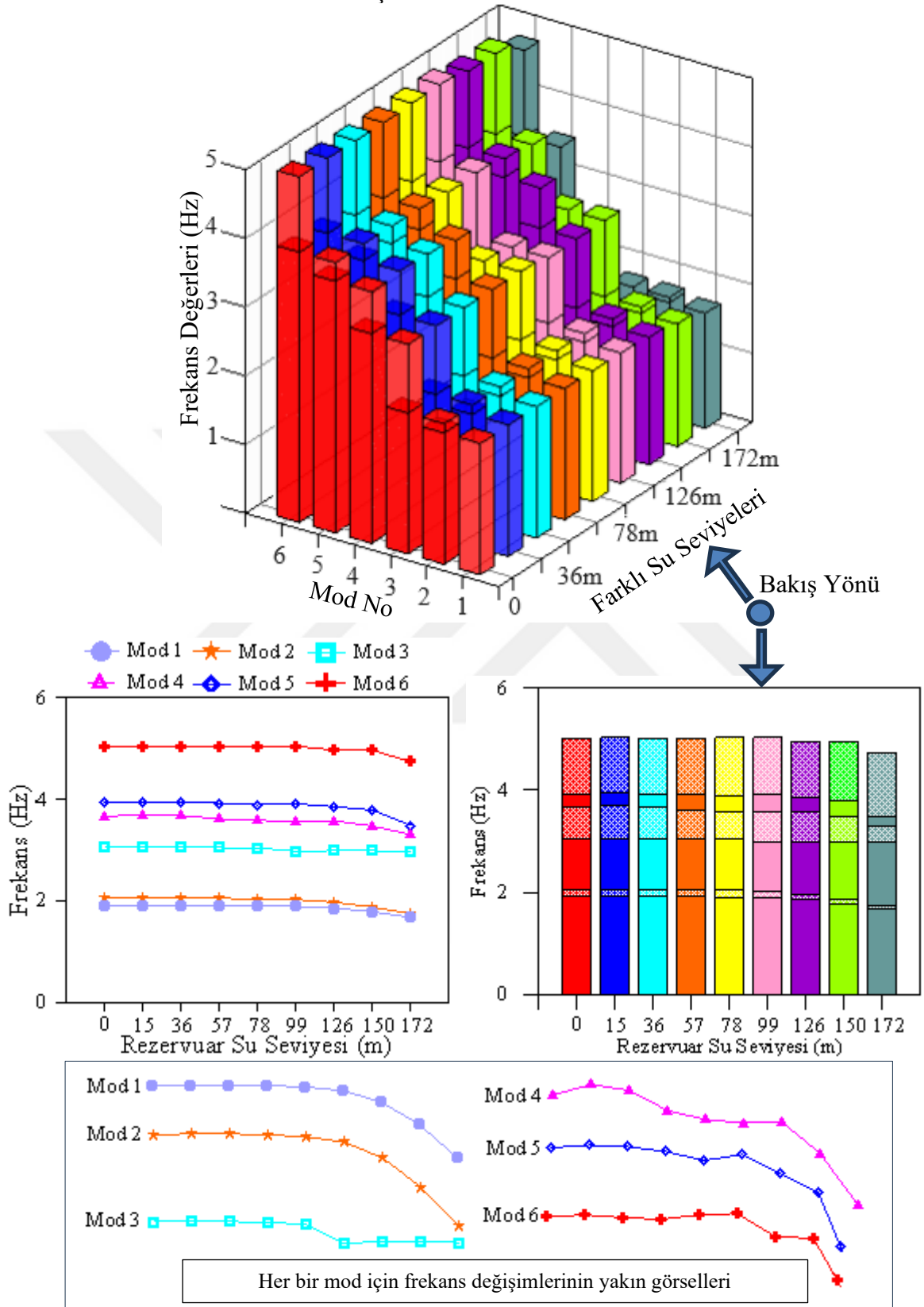
Şekil 64. Yusufeli Baraj rezervuarındaki su değişimine bağlı olarak sayısal frekans değişimleri (a) Westergaard yaklaşımı, (b) Euler yaklaşımı, (c) Lagrange yaklaşımı

Şekil 64'ün devamı



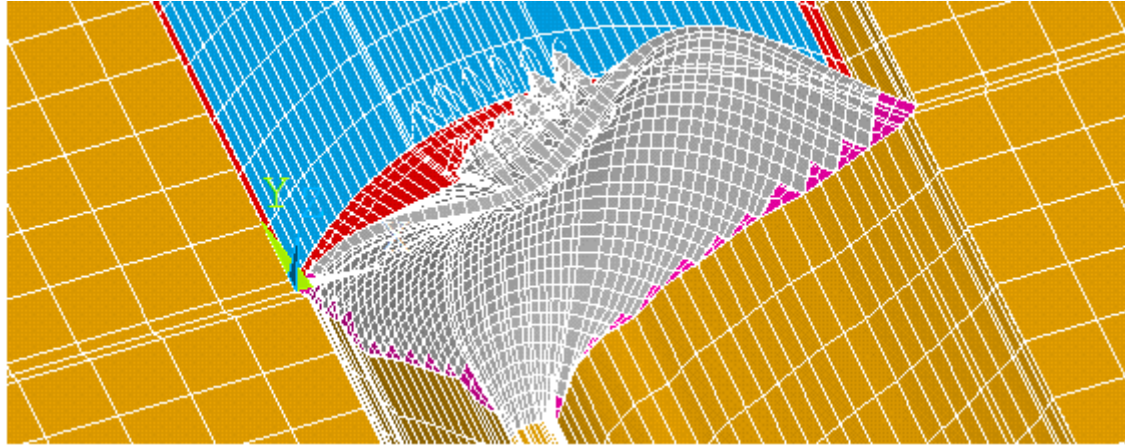
(b)

Şekil 64'ün devamı

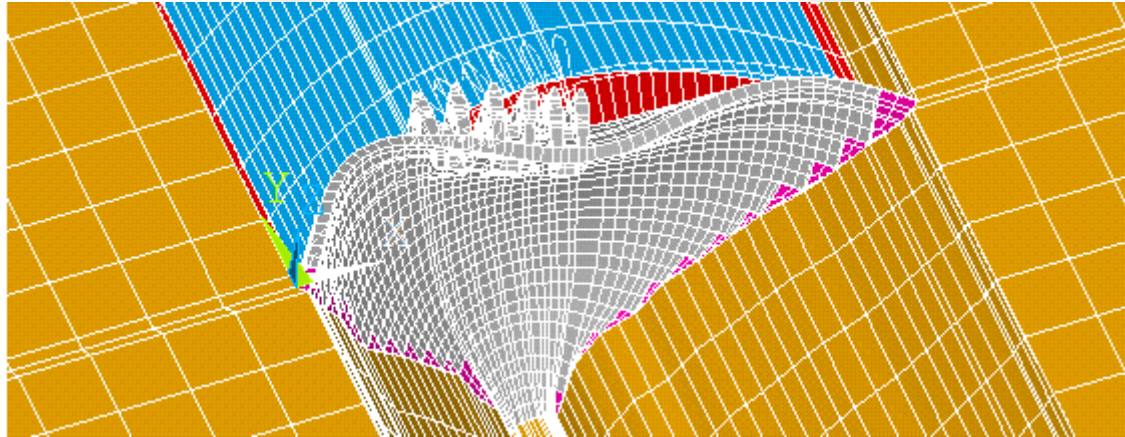


(c)

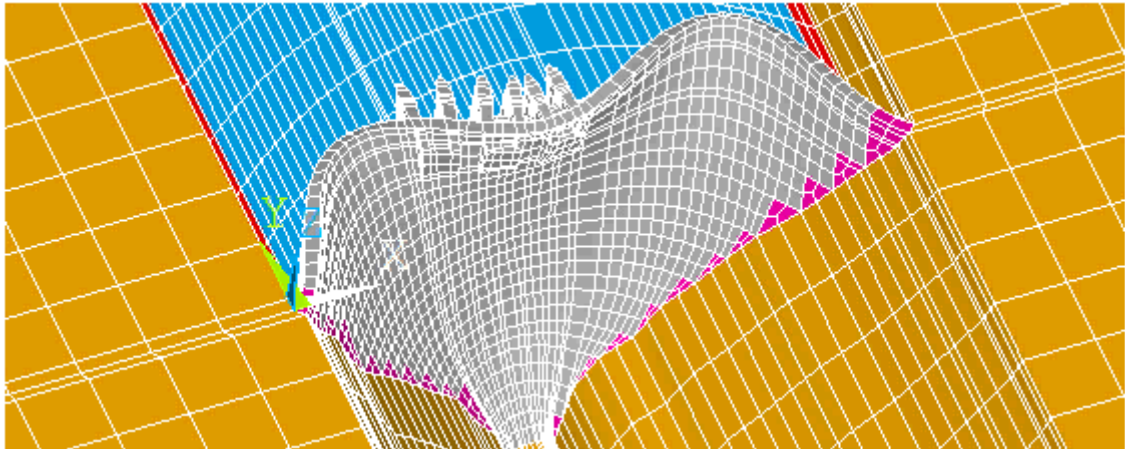
Rezervuarın boş olması ve üç farklı yaklaşıma göre rezervuar modellenmesi durumlarına ait modal analizler sonucu baraja ait ilk altı mod şekli elde edilmiştir. Tüm modelleme türlerine ait mod şekilleri aynı olup, Euler modeline ait ilk altı mod şekli Şekil 65'te verilmektedir. Şekil 66'da ise deneysel ve sonlu eleman modele ait analizlerden elde edilerek karşılaştırılan mod şekillerinin uyumlu olduğu görülmektedir.



Mod 1



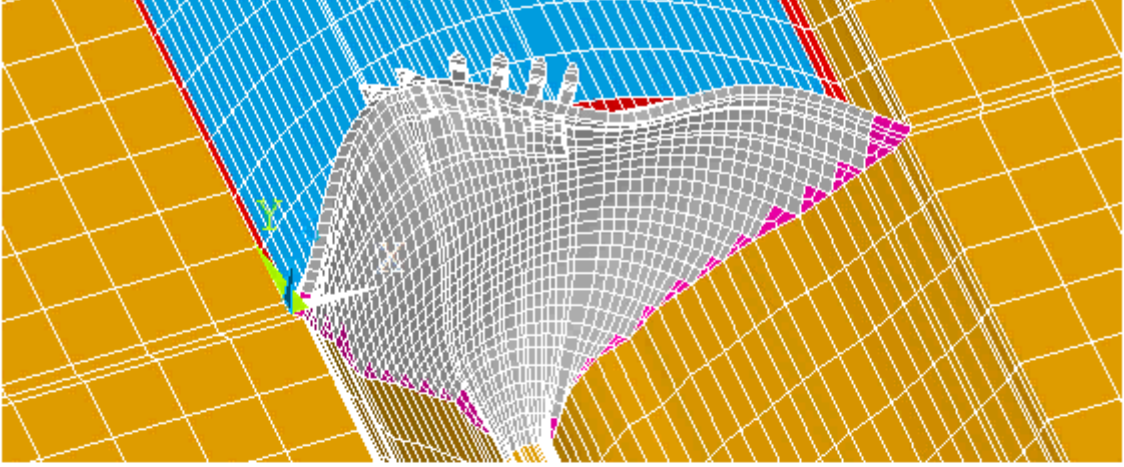
Mod 2



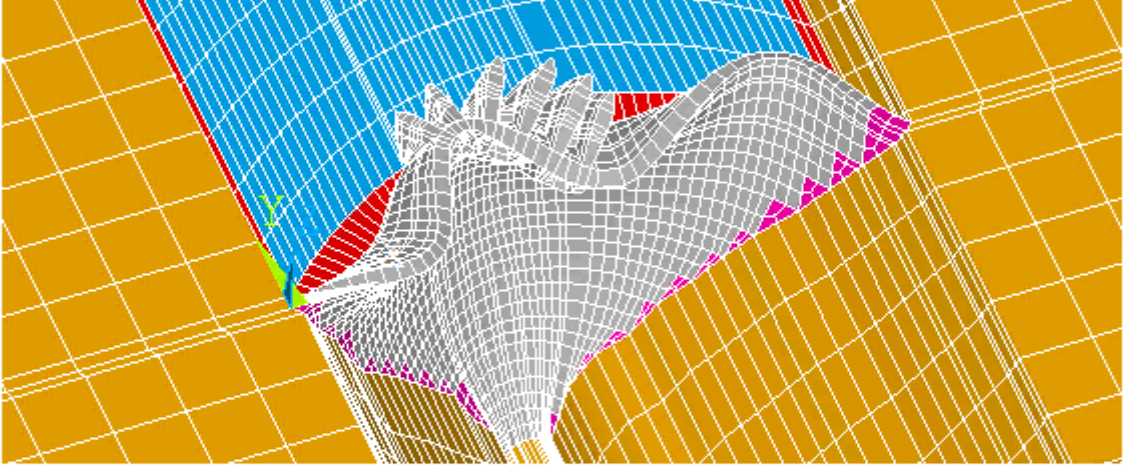
Mod 3

Şekil 65. Yusufeli Barajının sonlu eleman model analizi sonucu elde edilen ilk altı mod şekli

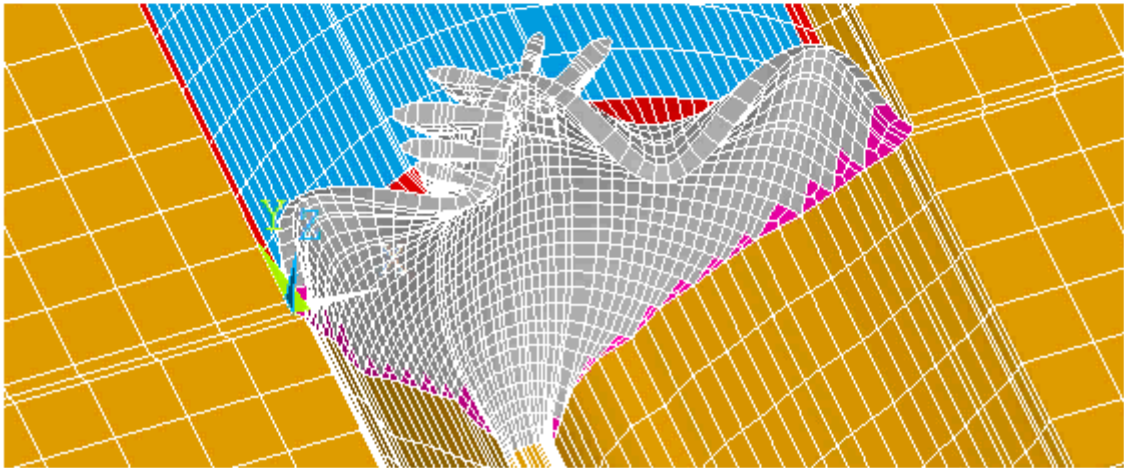
Şekil 65'in devamı



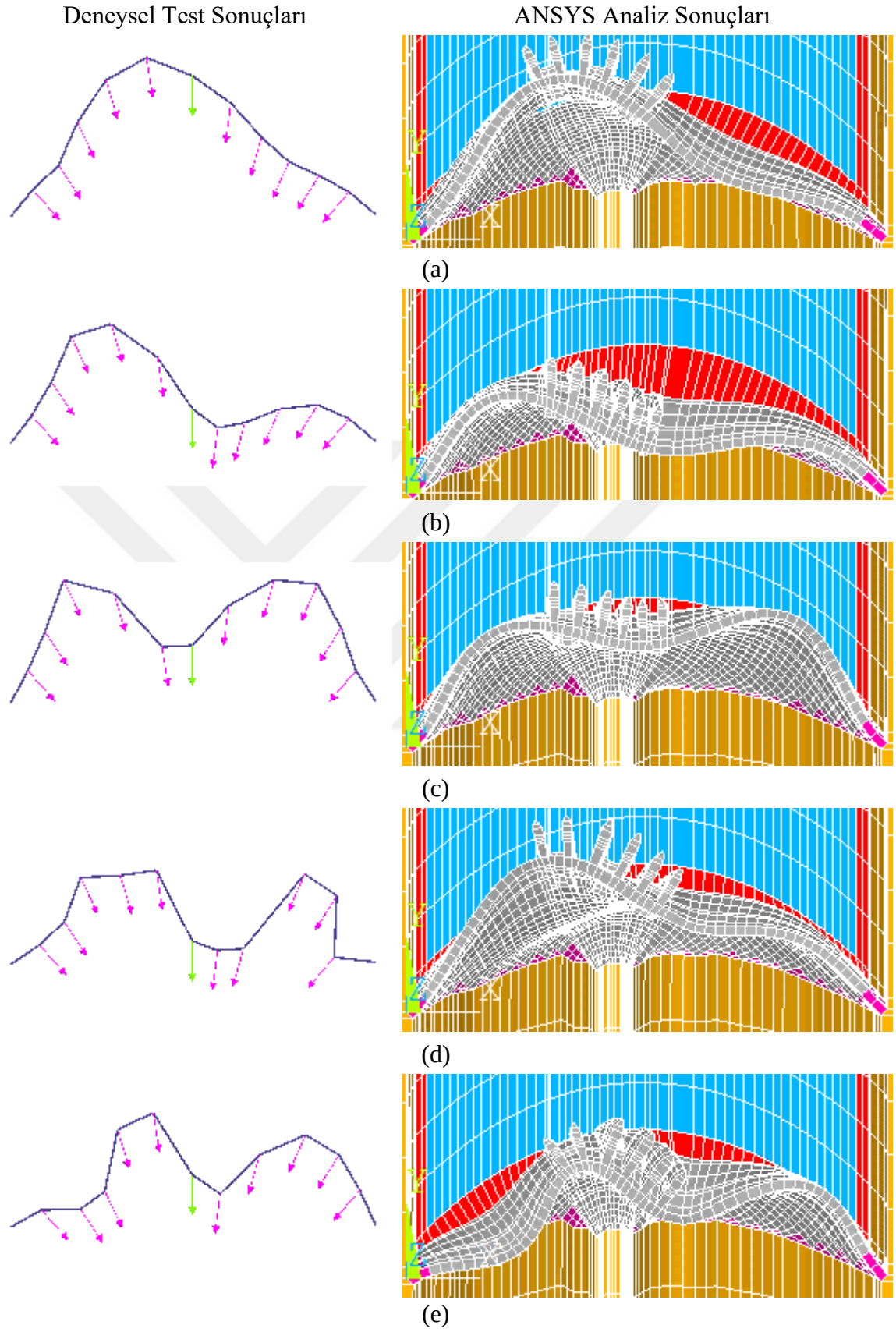
Mod 4



Mod 5

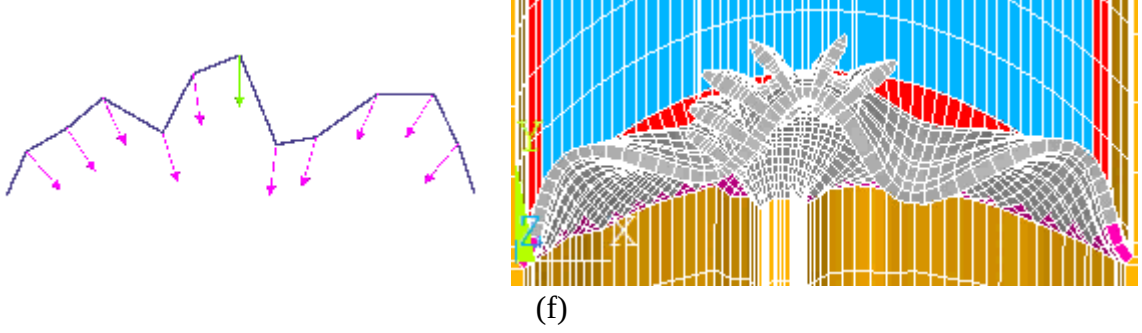


Mod 6



Şekil 66. Yusufeli Barajına ait deneysel ve sonlu eleman modelden elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması

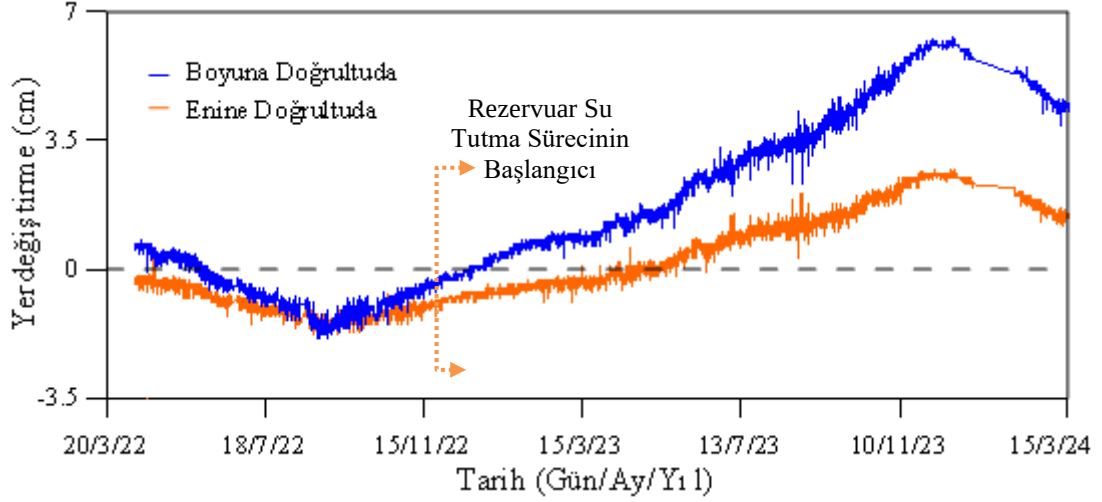
Şekil 66'nın devamı



Yusufeli kemer barajının farklı su seviyelerine ait deneysel testlerinden elde edilen frekans değerleri baz alınarak baraja ait sonlu eleman modellere modal analiz uygulanmış ve bu sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum baraja ait sonlu eleman modelin mevcut yapıyı temsil ettiğinin önemli bir göstergesidir.

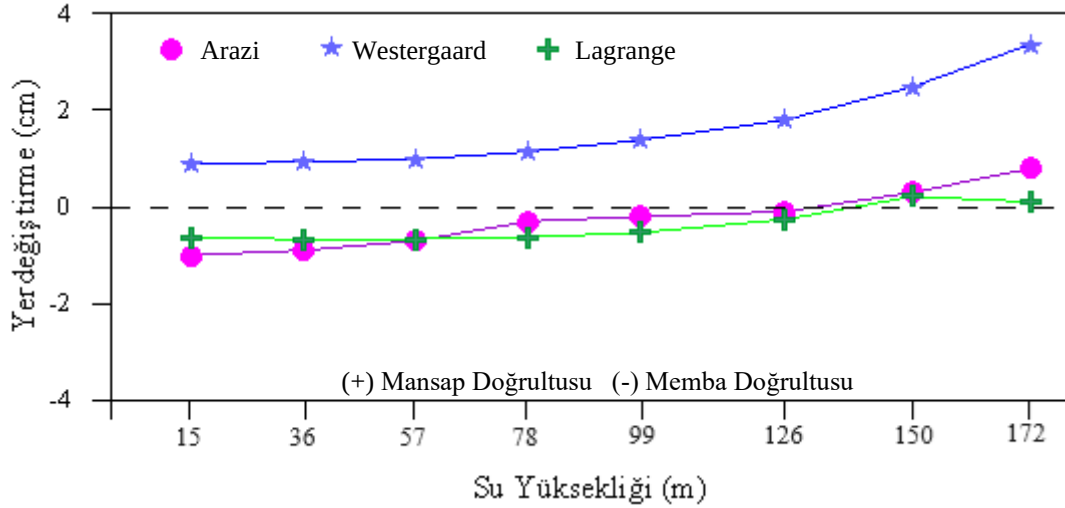
❖ Yusufeli Barajının Statik Analizi

Yusufeli Baraj inşasının tamamlanmasının ardından kret bölgesinden alınan referans bir noktanın yer değiştirme değeri rezervuarın su dolumu süreci boyunca izlenmiştir. Stabil durumdaki baraj gövdesinin zamanla yükselen su seviyesi ile kret bölgesinin yer değiştirme değerleri gövdenin yapısal davranışı hakkında bilgi sahibi olma açısından önemlidir. Ayrıca baraj gövdesine ait gerçek yer değiştirme değerleri, sonlu eleman modellerin statik analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme değerleri ile karşılaştırılarak sonlu eleman modelin gerçek sonuçları ne kadar yansıttığının izahını yapabilmek adına değerli bir veridir. DSİ tarafından sağlanan yer değiştirme verileri 11 Nisan 2022 tarihinde kaydedilmeye başlanmış ve hala kayıt alınmaya devam edilmektedir. Bu tez kapsamında 15 Mart 2024 tarihine kadar kaydedilen yer değiştirme verileri dikkate alınmıştır. Referans alınan noktaya ait memba-mansap doğrultusu boyunca doğrultu olarak dikkate alınmış olup, kret doğrultusu boyunca elde edilen yer değiştirmeler enine doğrultu olarak isimlendirilmiştir. Şekil 67'de 11 Nisan 2022 ile 15 Mart 2024 tarihleri arasında kaydedilen yer değiştirme değerlerinin değişimi verilmektedir. Şekil 67'de hem boyuna hem de enine doğrultudaki yer değiştirme değerlerinin benzer davranış gösterdiği, rezervuarın su tutmaya başladığı 22 Kasım 2022 tarihinden itibaren rezervuar su seviyesi yükseldikçe elde edilen yer değiştirme değerlerinin de sürekli artan bir eğilimde olduğu görülmektedir.



şekil 67. Yusufeli Barajının kret orta noktasında kaydedilen boyuna ve enine yer değiştirme değerleri

Yusufeli Barajının farklı yaklaşım modellerine göre oluşturulan sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçların arazi ölümünden elde edilen yer değiştirme değerleri ile karşılaştırmak amacıyla statik analizler yapılmıştır. Bu durum sekiz farklı su seviyesi için hazırlanan baraj-rezervuar-temel modellerinin statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerinin hangi rezervuar modelleme yaklaşımında etkili sonuç verdiğinin tespitine olanak sağlayacaktır. Euler yaklaşım modelinde kullanılan FLUID30 dinamik analizler için uygun olup, statik analizlerde etkinlik göstermediği için sadece Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonuçlar irdelenmiştir. şekil 68’de sekiz farklı su seviyesi durumunda arazi ölümünden elde edilen yer değiştirme değerleri ile Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonlu eleman modellerden elde edilen sonuçlar verilmektedir. şekil 68’den görüldüğü üzere rezervuar su seviyesi arttı Westergard ve Lagrange yaklaşım modellerine ait yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir. Lagrange yaklaşımına ait sonuçların arazi ölümüne ait sonuçlarla daha uyumlu ve yakın olarak elde edildiği, Westergaard yaklaşımına ait sonuçlarda ise su seviyesi yüksekliği arttı özellikle 78m su seviyesinden sonraki durumlarda kret yer değiştirme değeri katlanarak artmaktadır. Tablo 27’de arazi lm, Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına ait sekiz farklı su seviyesi durumu için yer değiştirme değerleri ve bu yaklaşım metotlarından elde edilen yer değiştirme değerlerinin arazi ölümünden elde edilen değerlere bölünmesiyle elde edilen oranlar verilmektedir.



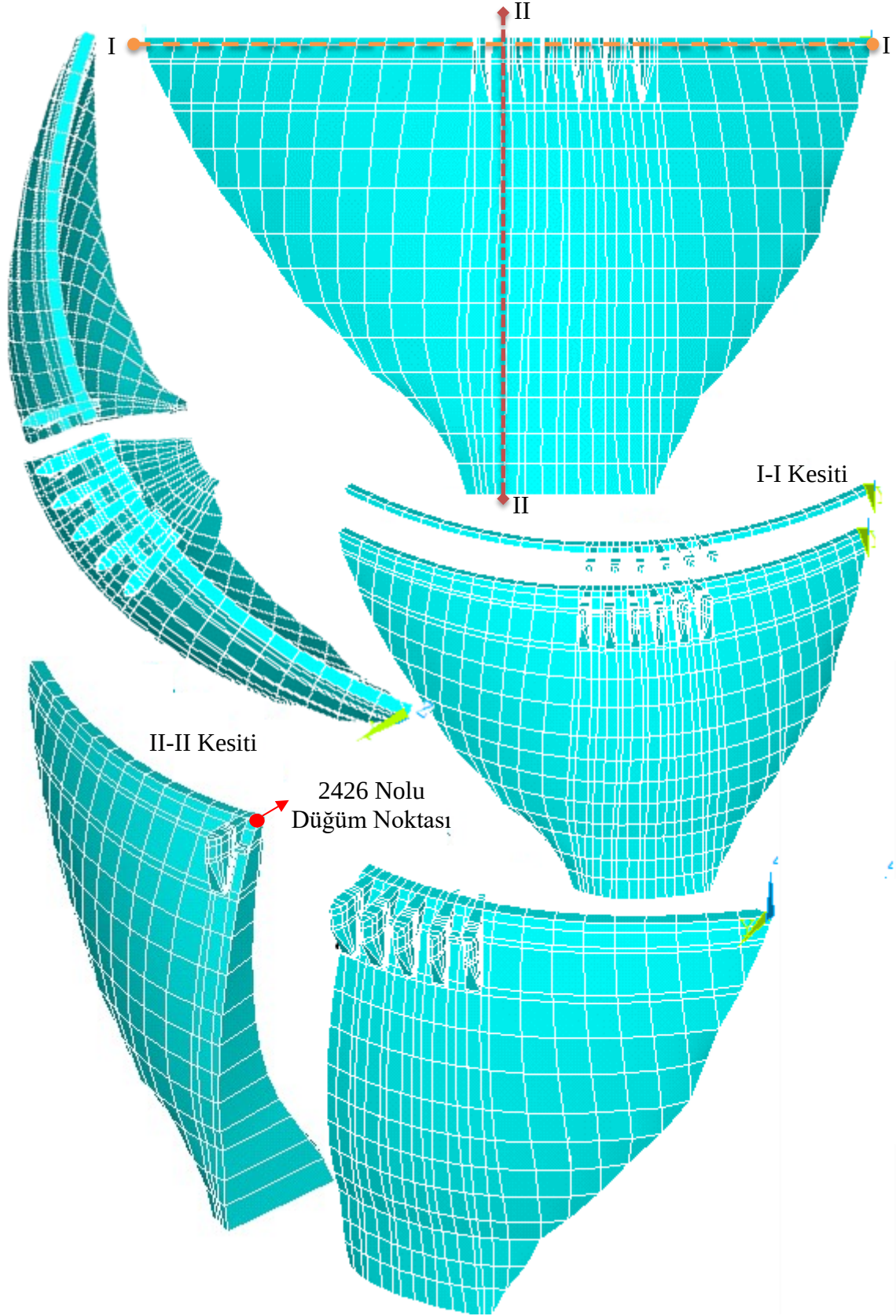
Şekil 68. Yusufeli Barajının sekiz farklı su yüksekliği durumu için kret orta noktasında elde edilen yer değiştirme değerleri

Tablo 27. Yusufeli Baraj kretinde farklı rezervuar su yüksekliği durumu için memba-mansap doğrultusunda elde edilen yer değiştirme değerleri

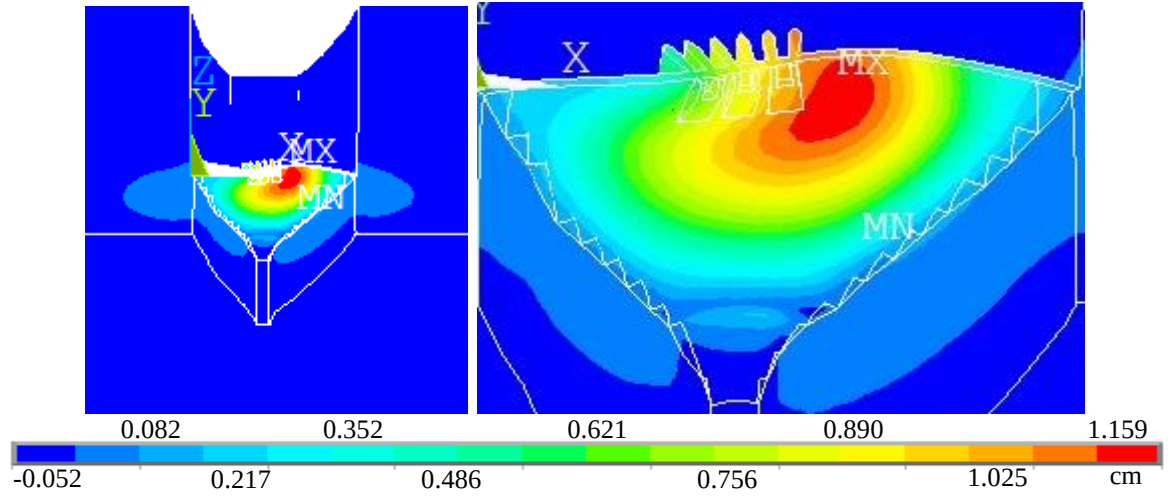
Tarih	Rezervuar Su Seviyesi	Memba-Mansap Doğrultusunda Yer Değiştirme Değerleri (cm)				
		Arazi	Westergaard	W/A Oranı	Lagrange	L/A Oranı
25/11/2022	15m	-0,40	0,88	2,20	-0,65	1,63
12/12/2022	36m	-0,20	0,93	4,65	-0,67	3,35
17/1/2023	57m	0,50	0,99	1,98	-0,66	1,32
27/3/2023	78m	0,90	1,14	1,27	-0,63	0,70
17/4/2023	99m	1,40	1,39	0,99	-0,53	0,38
16/5/2023	126m	1,70	1,80	1,06	-0,26	0,15
2/6/2023	150m	2,20	2,49	1,13	0,22	0,10
7/9/2023	172m	3,50	3,37	0,96	0,10	0,03

W: Westergaard, L: Lagrange, A: Arazi

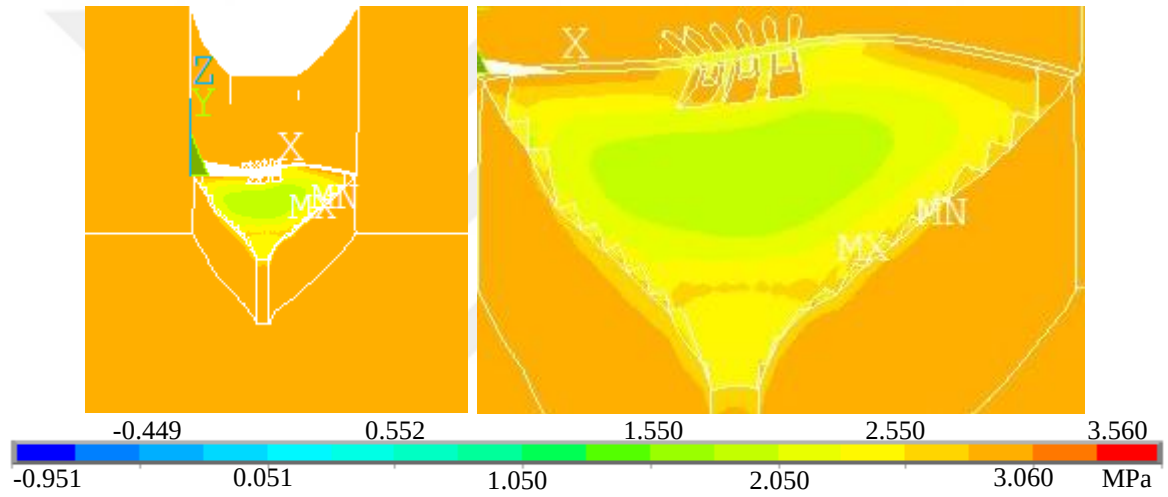
Arazi ve sonlu eleman modellere ait statik olarak elde edilen yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılarak doğrulanmasının ardından statik analiz sonucu Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre sekiz farklı rezervuar su yüksekliği için oluşturulan sonlu eleman modellerden elde edilen yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Euler yaklaşımında kullanılan FLUID30 eleman tipi statik analizde kullanılmadığı için bu yaklaşıma ait modellerin sonuçları bu kısımda elde edilememektedir. Analiz sonuçlarının ifade edilmesinde Şekil 69'da verilen I-I ve II-II kesitleri kullanılmıştır. Şekil 70'te rezervuarın boş olması durumu için, Şekil 71-78'de ise Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su seviyeleri için baraj gövdesinde oluşan yer değiştirme ve gerilmelere ait kontur diyagramları verilmektedir.



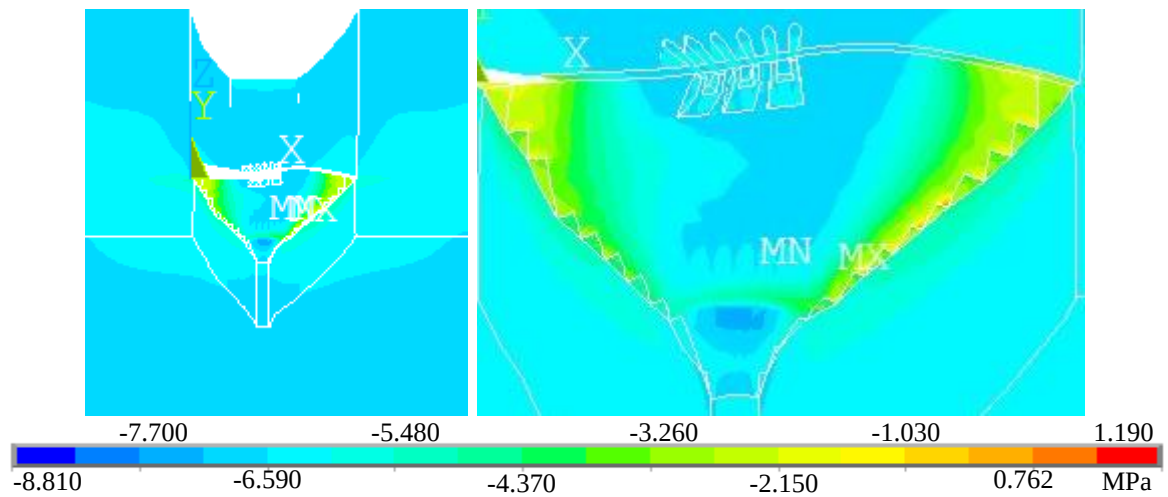
Şekil 69. Yusufeli Barajının statik ve dinamik analiz sonuçlarının gösterimi için seçilen I-I ve II-II kesitleri



(a)

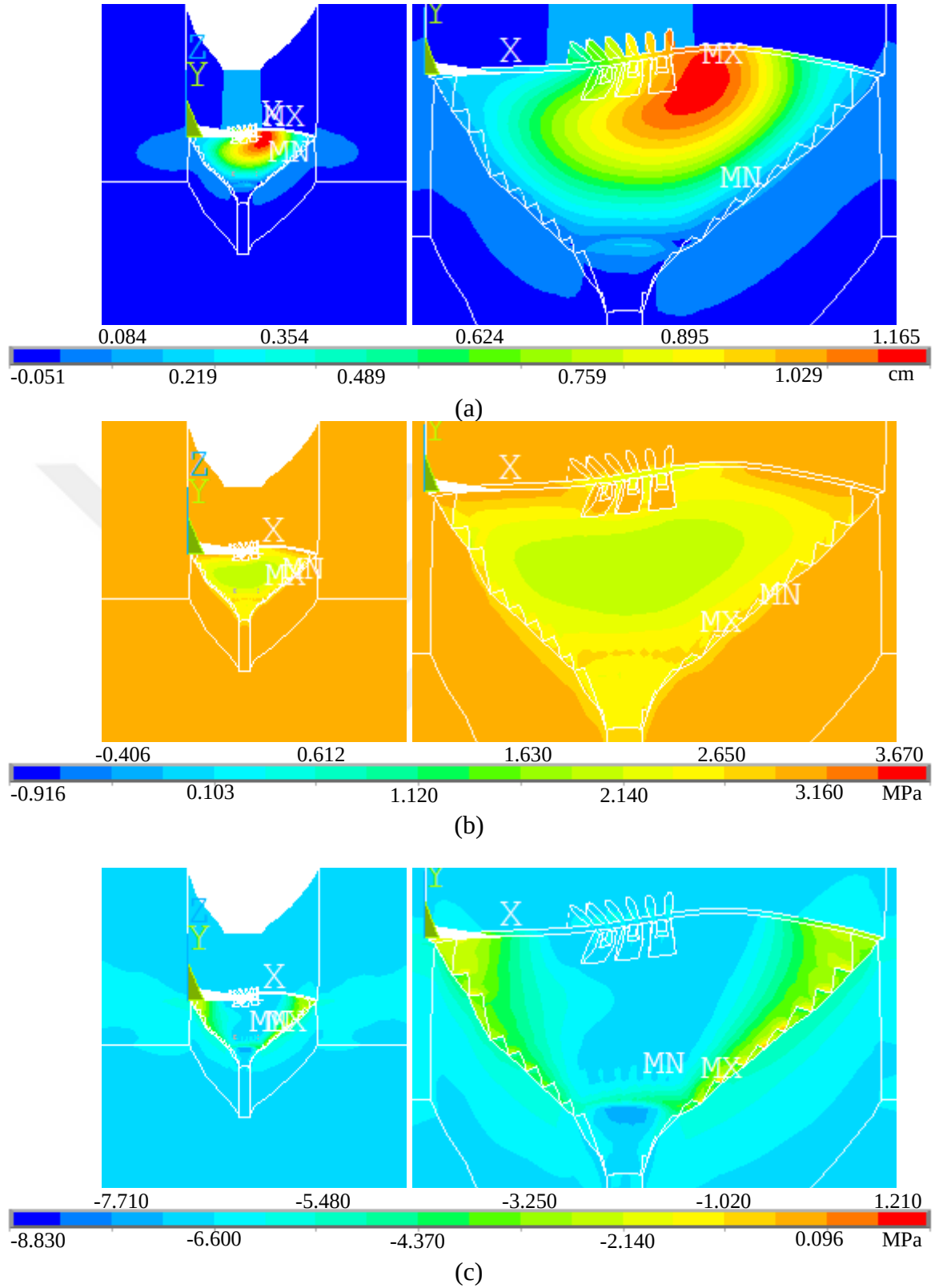


(b)

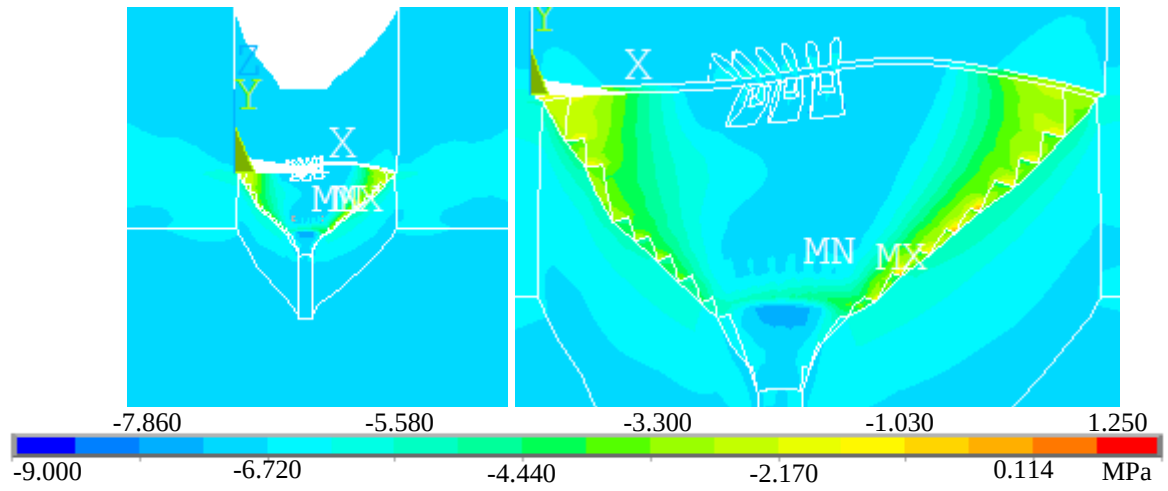
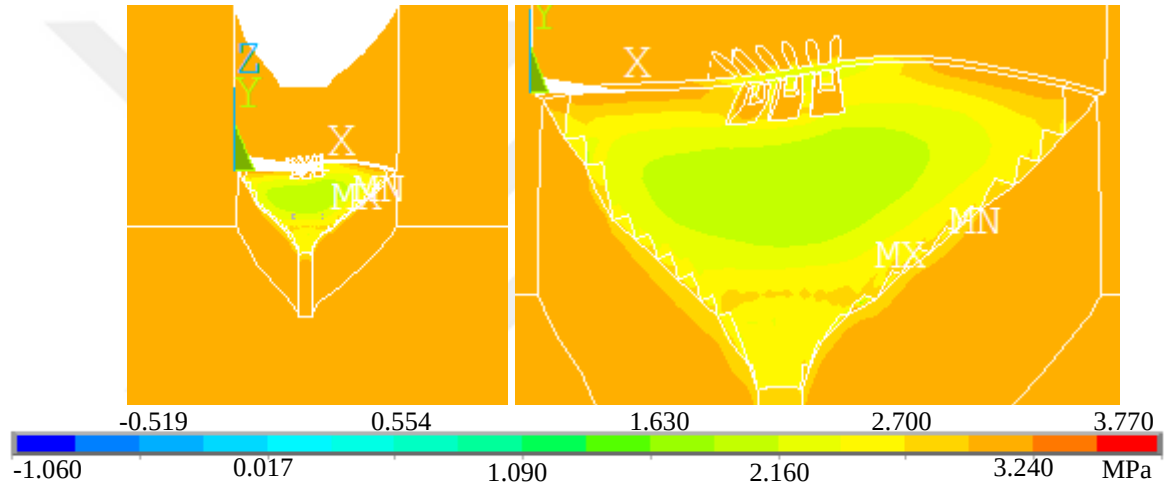
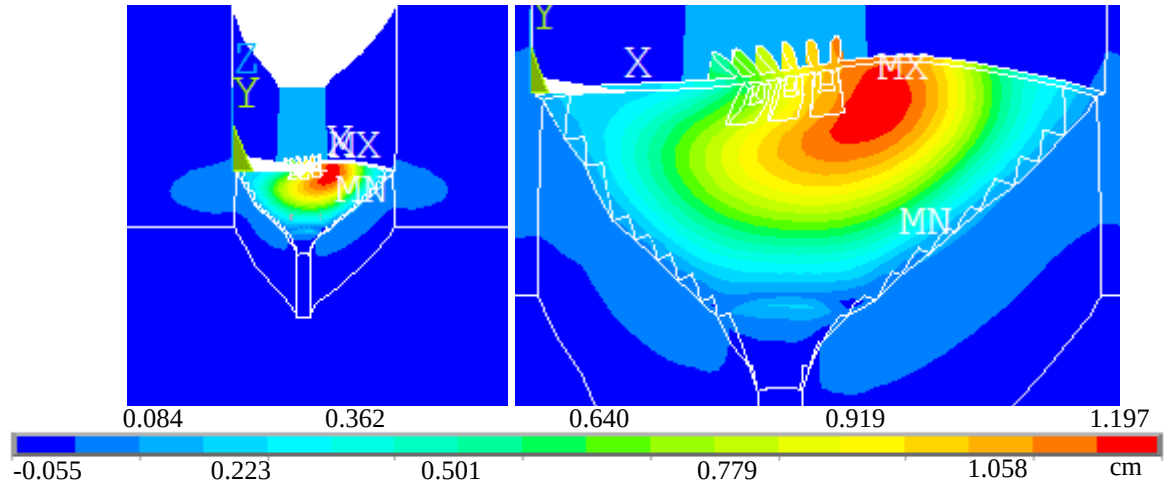


(c)

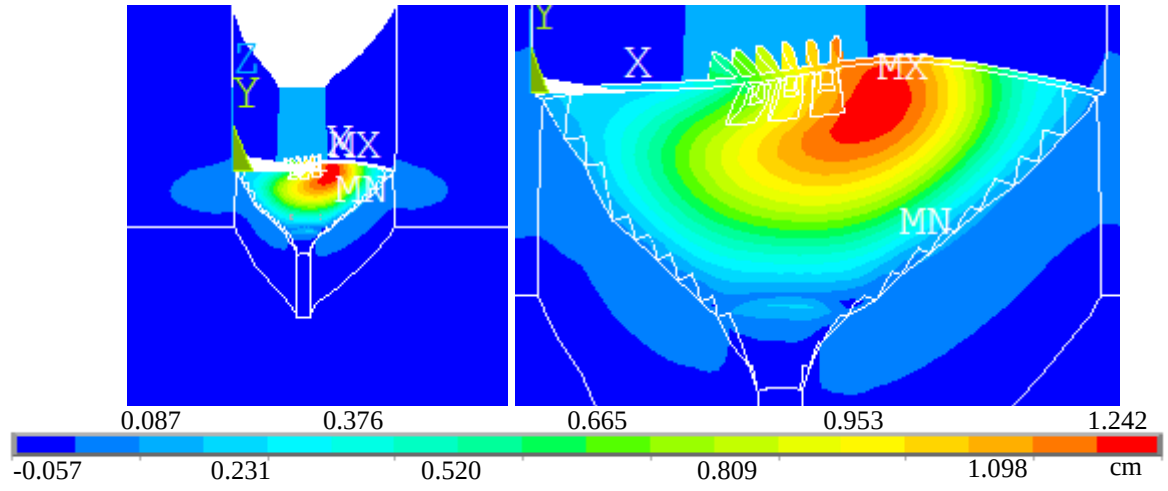
Şekil 70. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



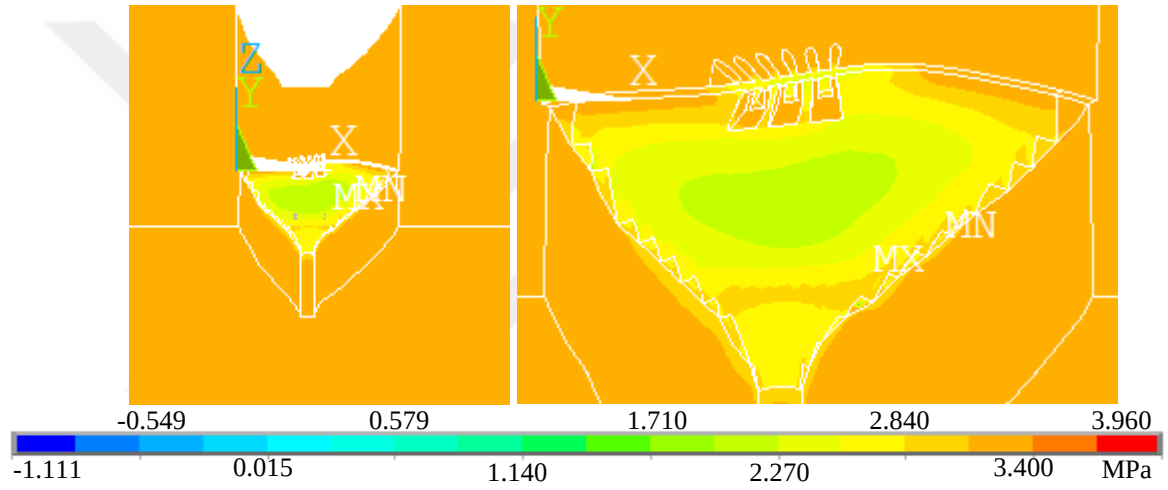
Şekil 71. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



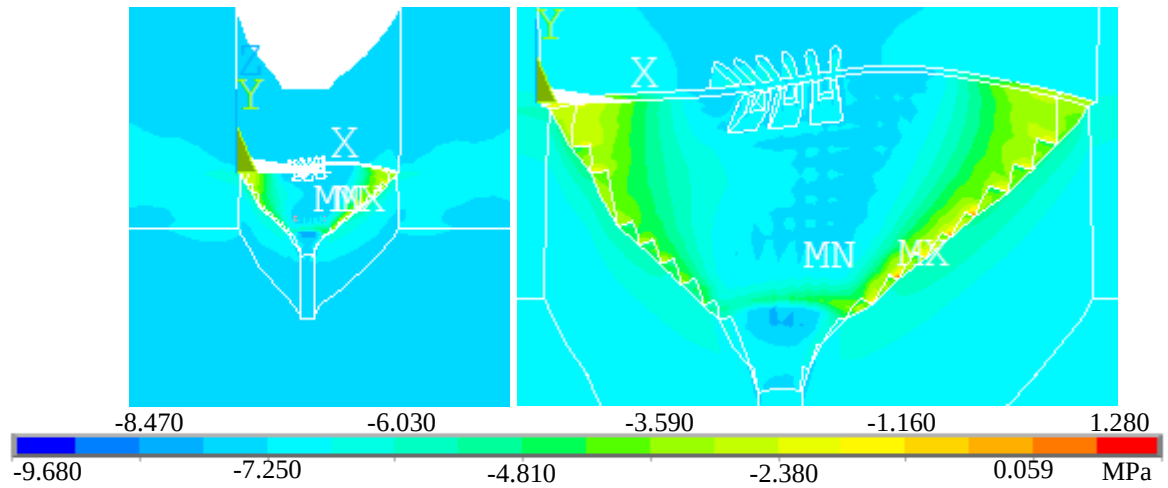
Şekil 72. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



(a)

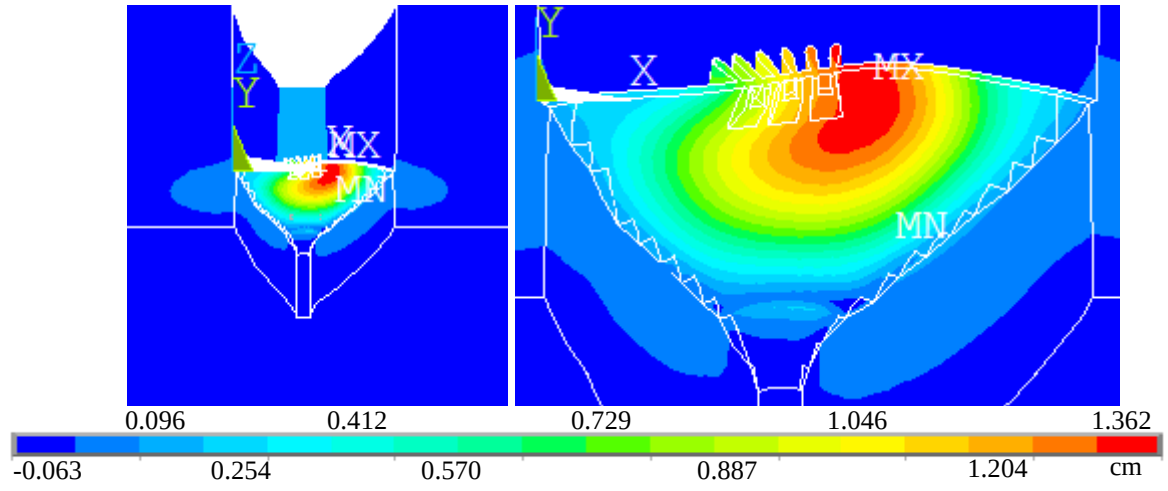


(b)

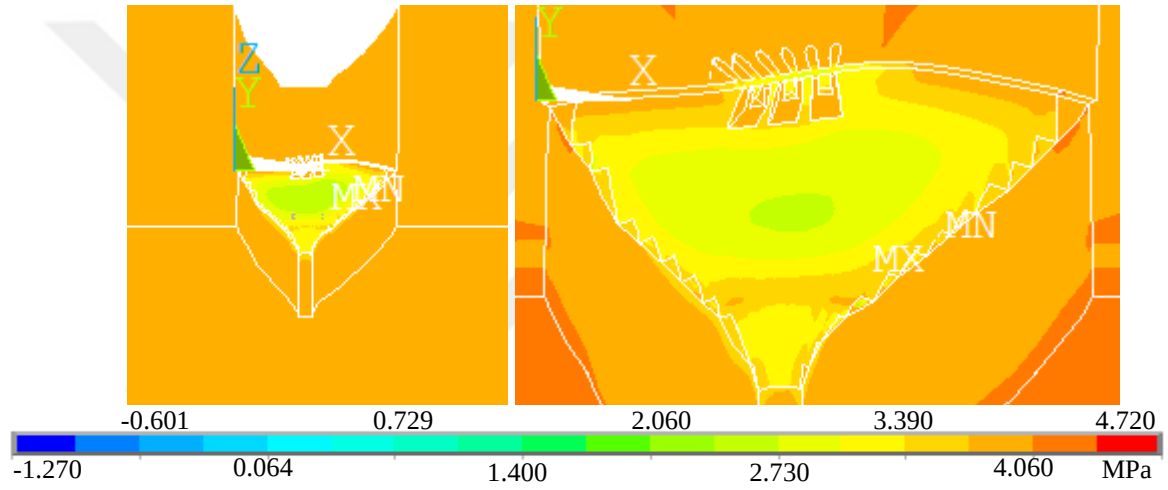


(c)

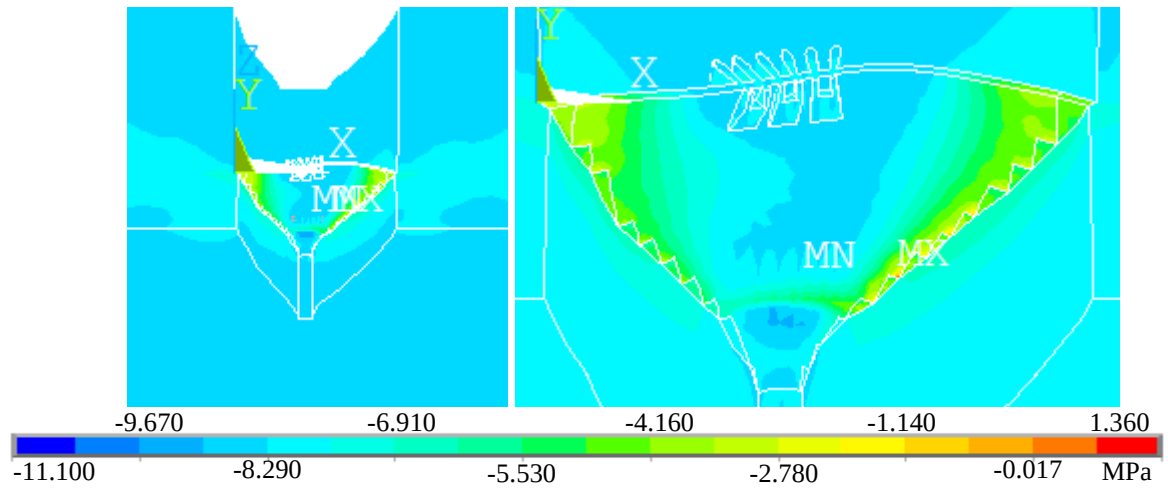
Şekil 73. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliğinde statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



(a)

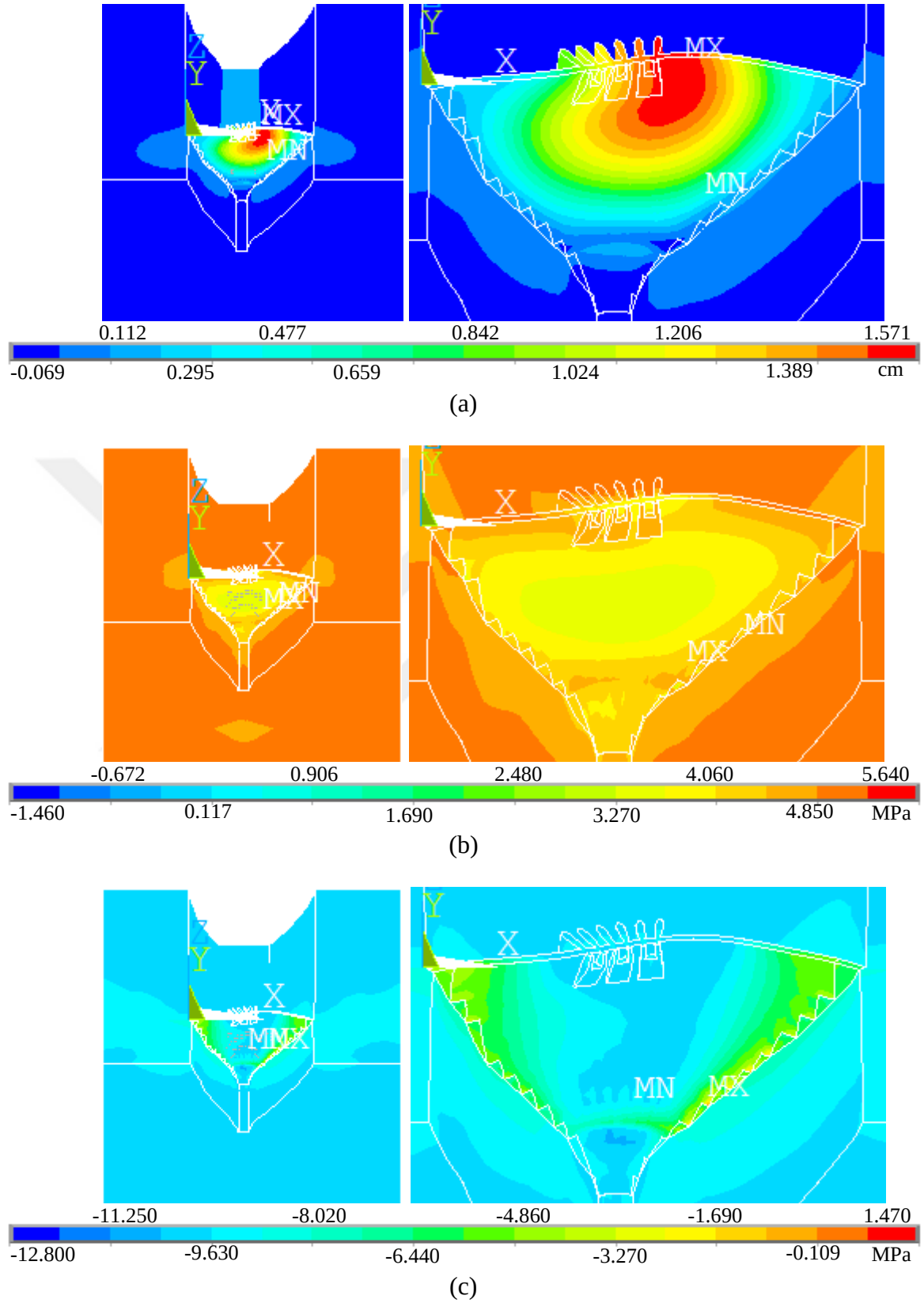


(b)

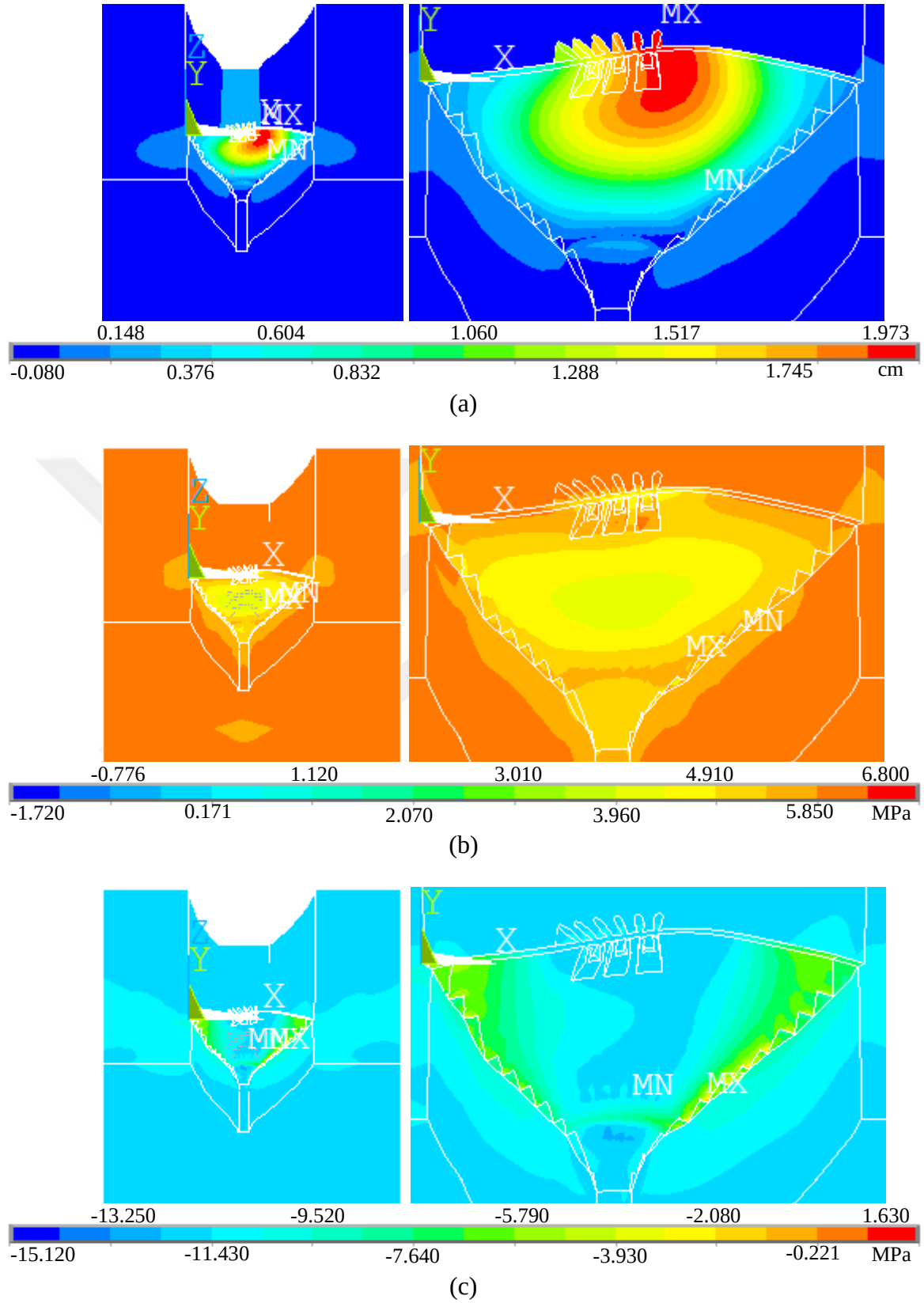


(c)

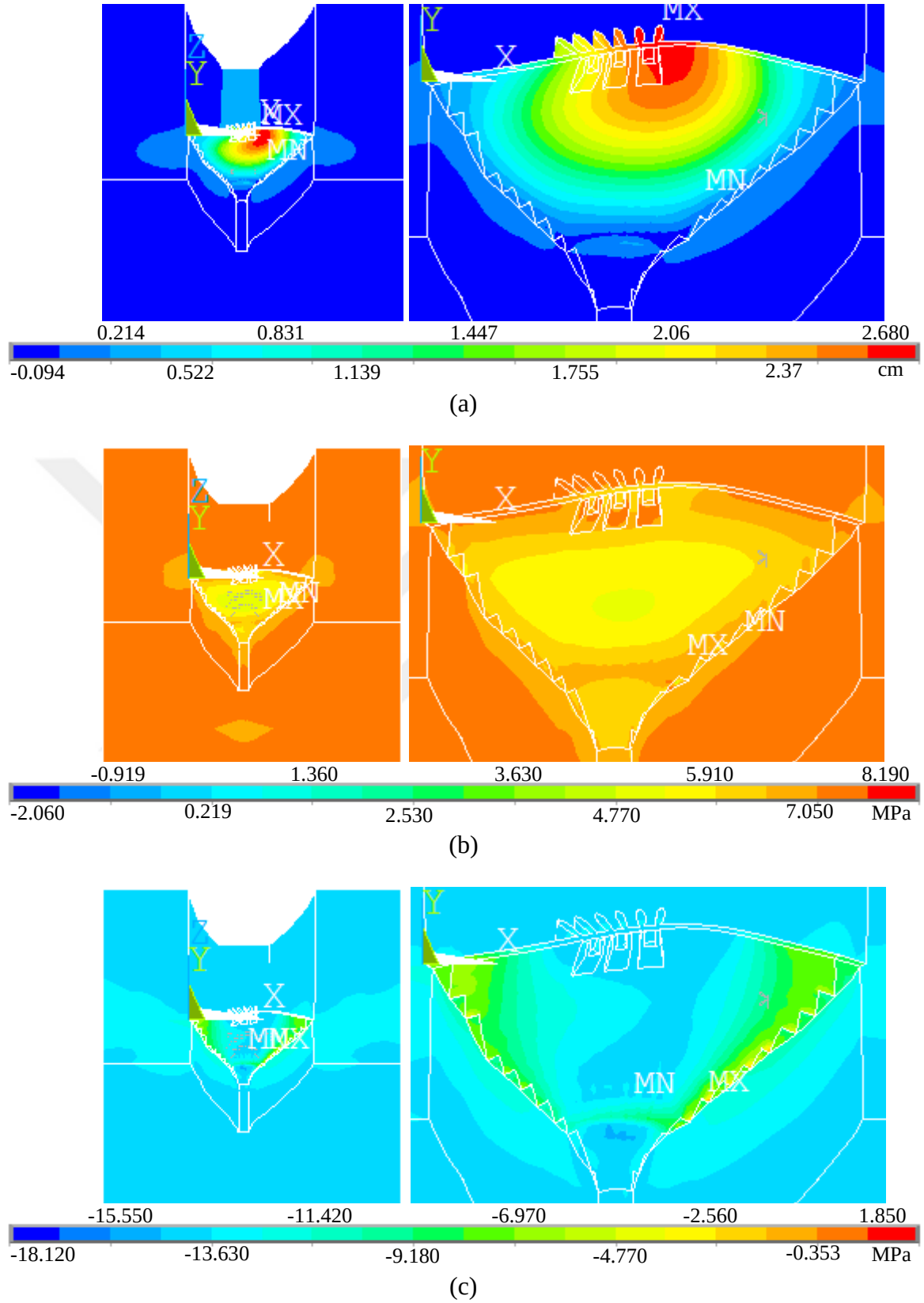
Şekil 74. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



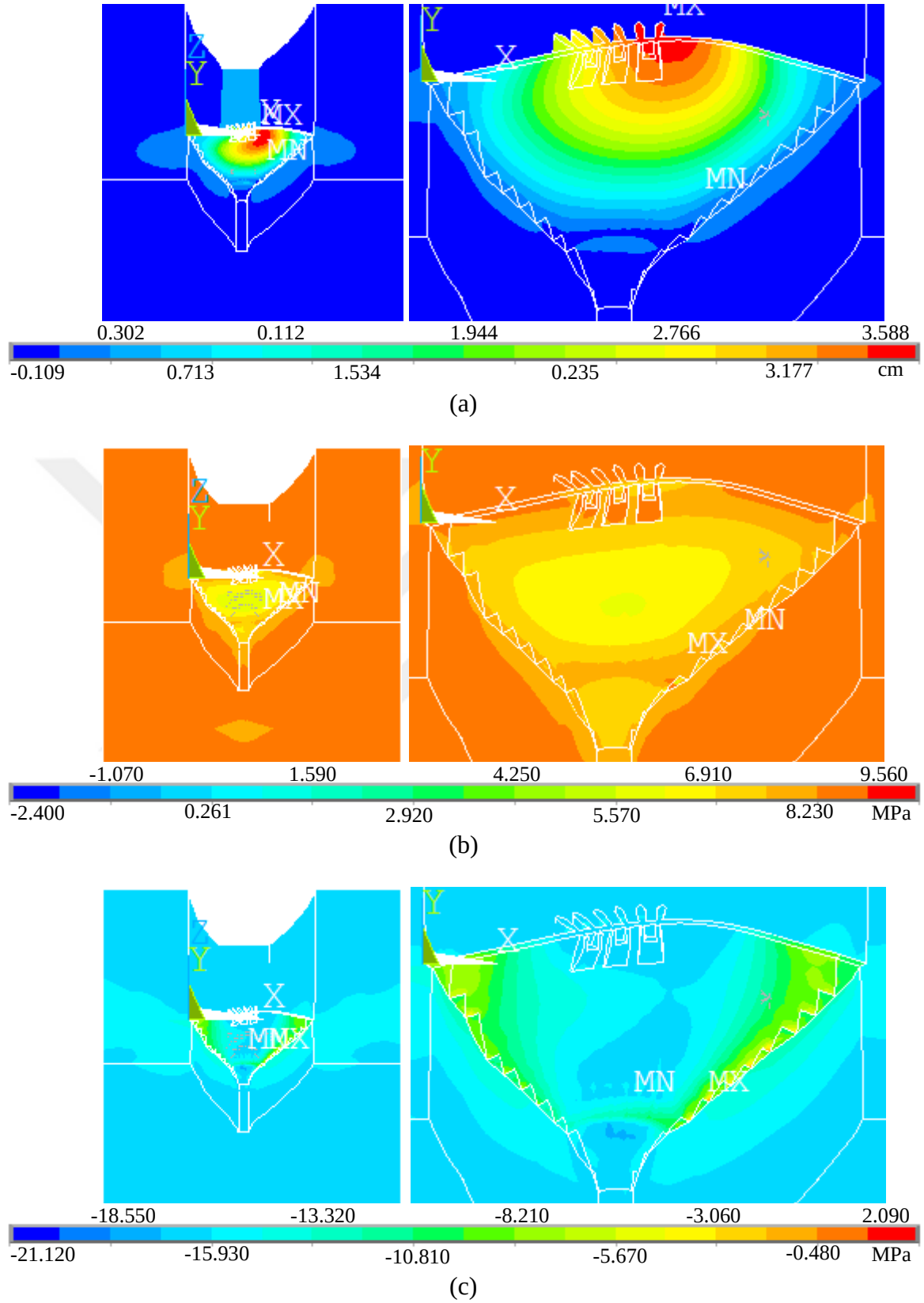
Şekil 75. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 76. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değıştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

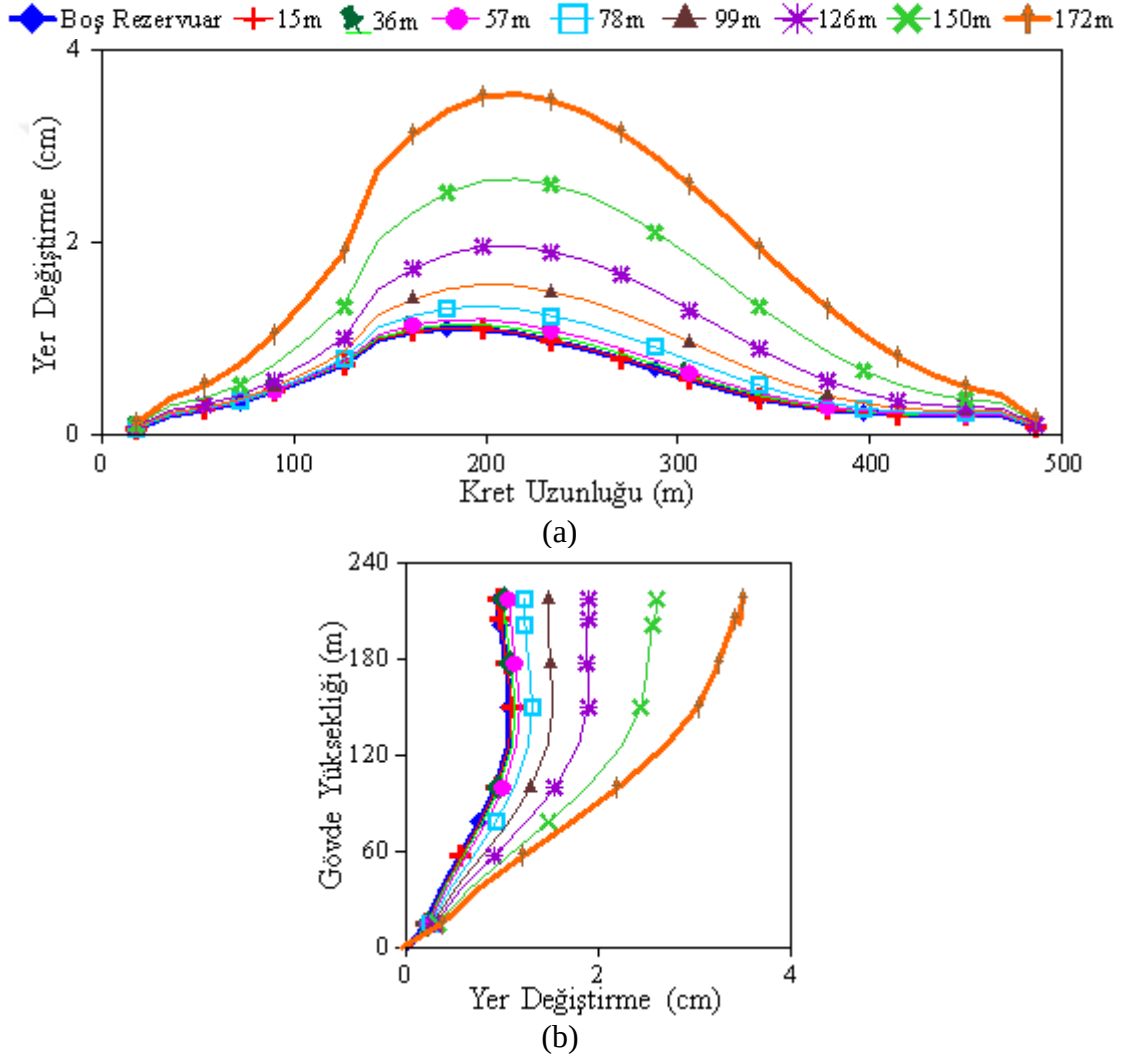


Şekil 77. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 78. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değıştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

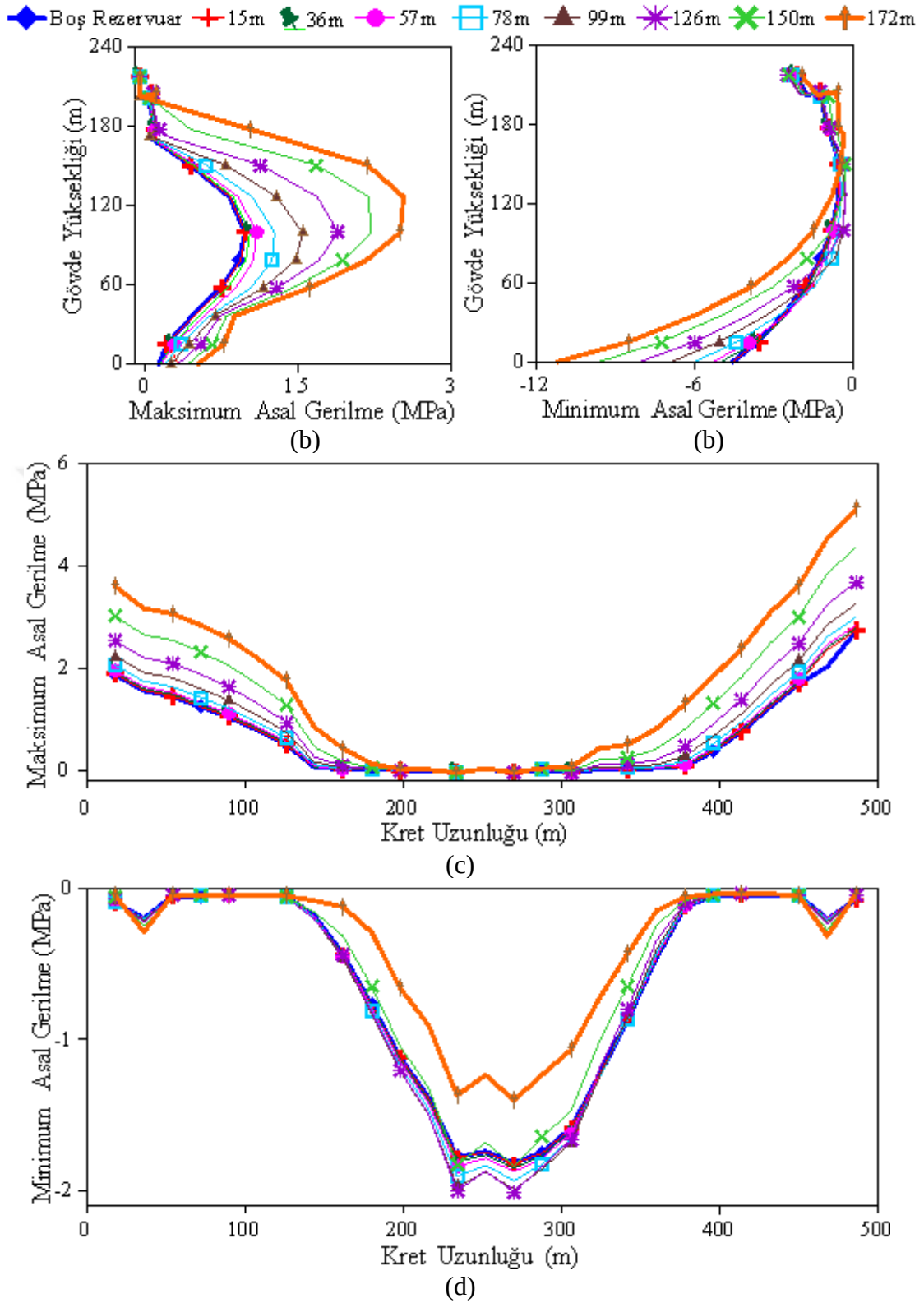
Şekil 71-78’de rezervuarın boş olması durumu ve sekiz farklı rezervuar su seviyesi olması durumu için Westergaard yaklaşımına göre modellenmiş sonlu eleman modellere ait statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 79’da ve ilgili değerler Tablo 28’de, asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 80’de ve ilgili değerler Tablo 29 ve Tablo 30’da verilmektedir.



Şekil 79. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme

Tablo 28. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	0,959	0,966	1,015	1,073	1,227	1,476	1,897	2,603	3,499
2304	0,970	0,976	1,025	1,081	1,233	1,479	1,896	2,592	3,468
2182	0,982	0,988	1,035	1,090	1,238	1,479	1,889	2,569	3,413
2007	0,987	0,994	1,040	1,094	1,241	1,481	1,887	2,562	3,393
1820	1,037	1,043	1,084	1,135	1,271	1,498	1,884	2,513	3,246
1657	1,054	1,060	1,099	1,149	1,284	1,508	1,890	2,507	3,217
1437	1,060	1,102	1,138	1,186	1,314	1,528	1,888	2,445	3,035
1233	1,063	1,069	1,103	1,149	1,272	1,473	1,796	2,254	2,707
1037	0,925	0,933	0,964	1,007	1,120	1,293	1,546	1,872	2,197
857	0,759	0,768	0,796	0,836	0,933	1,069	1,253	1,486	1,723
693	0,564	0,574	0,597	0,628	0,701	0,792	0,911	1,062	1,220
545	0,368	0,378	0,393	0,414	0,456	0,506	0,571	0,654	0,743
413	0,209	0,220	0,228	0,235	0,254	0,275	0,302	0,338	0,379
297	0,027	0,045	0,025	0,022	0,015	0,005	-0,008	-0,024	-0,037
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,059	0,059	0,060	0,061	0,065	0,070	0,080	0,096	0,116
2351	0,197	0,198	0,200	0,203	0,212	0,226	0,251	0,300	0,375
2347	0,256	0,256	0,257	0,260	0,267	0,280	0,309	0,377	0,507
2343	0,338	0,339	0,339	0,342	0,349	0,365	0,405	0,512	0,725
2339	0,450	0,450	0,451	0,456	0,467	0,492	0,555	0,724	1,042
2335	0,584	0,584	0,587	0,595	0,615	0,658	0,759	1,007	1,440
2331	0,728	0,729	0,734	0,749	0,783	0,851	1,001	1,338	1,886
2323	0,984	0,987	1,004	1,035	1,110	1,246	1,508	2,021	2,761
2319	1,065	1,069	1,094	1,133	1,232	1,403	1,718	2,303	3,109
2315	1,101	1,106	1,139	1,187	1,307	1,509	1,870	2,511	3,363
2312	1,093	1,099	1,139	1,193	1,331	1,557	1,951	2,629	3,505
2310	1,048	1,055	1,100	1,157	1,305	1,546	1,958	2,654	3,538
2304	0,970	0,976	1,025	1,081	1,233	1,479	1,896	2,592	3,468
2298	0,887	0,894	0,944	0,999	1,150	1,395	1,806	2,488	3,341
2292	0,784	0,791	0,839	0,890	1,035	1,268	1,663	2,317	3,137
2286	0,677	0,683	0,728	0,774	0,907	1,124	1,492	2,108	2,887
2280	0,565	0,570	0,611	0,649	0,765	0,958	1,290	1,858	2,588
2271	0,465	0,469	0,504	0,535	0,633	0,798	1,090	1,601	2,276
2267	0,374	0,377	0,405	0,428	0,506	0,640	0,885	1,330	1,938
2263	0,308	0,310	0,331	0,347	0,404	0,508	0,704	1,080	1,616
2259	0,260	0,261	0,276	0,286	0,326	0,402	0,552	0,856	1,314
2255	0,227	0,228	0,238	0,244	0,271	0,323	0,432	0,666	1,038
2251	0,209	0,210	0,216	0,220	0,238	0,273	0,350	0,521	0,805
2247	0,202	0,203	0,208	0,211	0,224	0,249	0,303	0,421	0,621
2243	0,202	0,203	0,207	0,210	0,222	0,242	0,282	0,362	0,490
2238	0,199	0,199	0,203	0,207	0,219	0,238	0,271	0,328	0,406
2239	0,077	0,077	0,079	0,081	0,086	0,094	0,108	0,129	0,156



Şekil 80. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme

Tablo 29. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa)

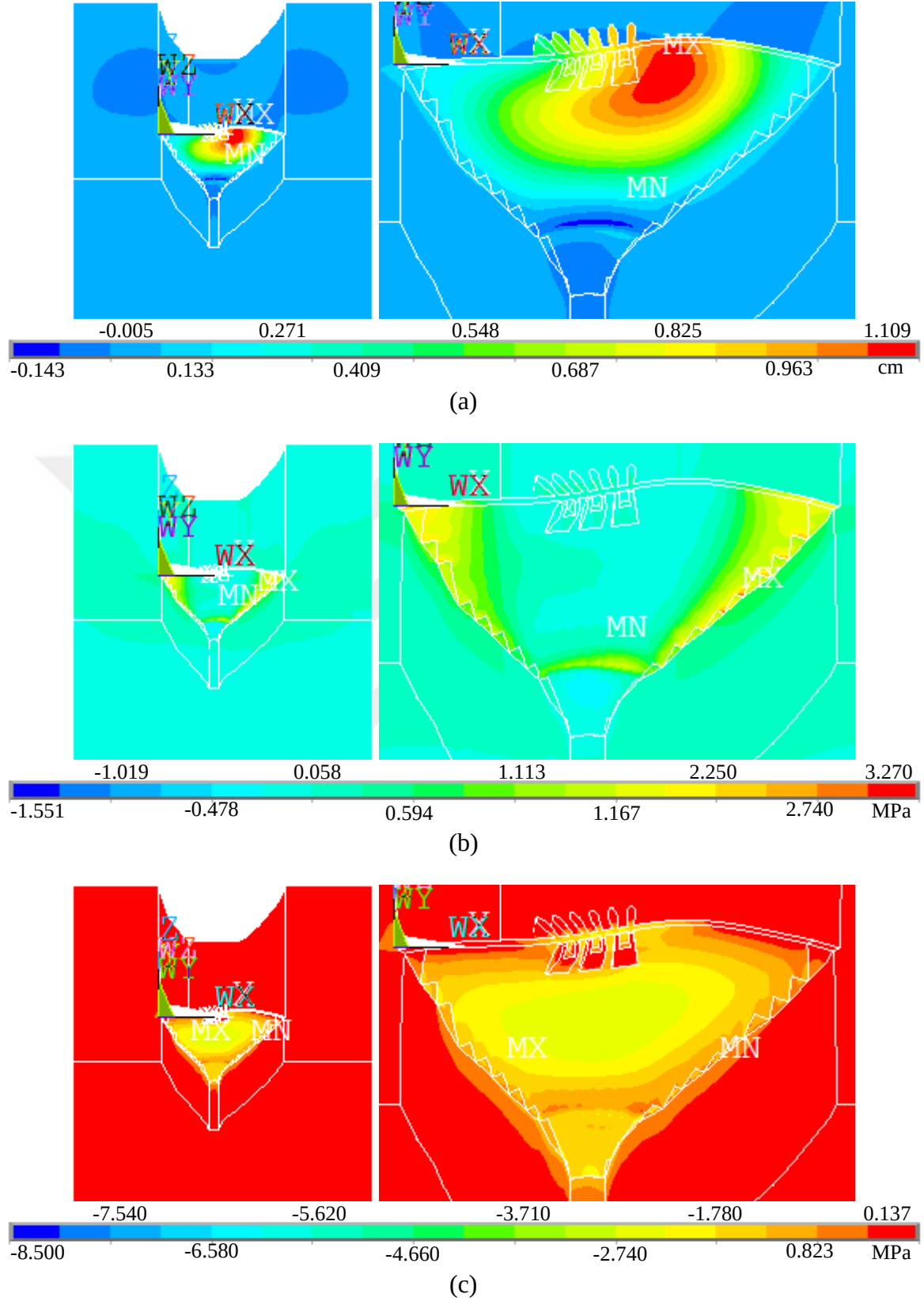
Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	-0,054	-0,054	-0,055	-0,055	-0,056	-0,056	-0,057	-0,056	-0,055
2304	-0,048	-0,048	-0,049	-0,050	-0,052	-0,054	-0,055	-0,054	-0,049
2182	0,068	0,068	0,069	0,069	0,070	0,072	0,077	0,090	0,113
2007	0,030	0,031	0,036	0,039	0,048	0,058	0,062	0,045	0,000
1820	0,099	0,099	0,100	0,101	0,104	0,110	0,139	0,448	1,032
1657	0,032	0,032	0,033	0,034	0,036	0,045	0,204	0,672	1,256
1437	0,446	0,449	0,469	0,504	0,604	0,789	1,129	1,685	2,183
1233	0,828	0,833	0,863	0,913	1,052	1,293	1,691	2,193	2,534
1037	0,979	0,989	1,030	1,097	1,270	1,542	1,893	2,216	2,500
857	0,924	0,938	0,987	1,063	1,247	1,477	1,702	1,942	2,168
693	0,740	0,758	0,812	0,887	1,033	1,157	1,295	1,449	1,610
545	0,463	0,484	0,533	0,581	0,637	0,685	0,738	0,798	0,875
413	0,220	0,210	0,277	0,293	0,361	0,440	0,542	0,663	0,780
297	0,135	0,328	0,153	0,161	0,200	0,255	0,331	0,429	0,523
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	1,872	1,877	1,908	1,947	2,052	2,226	2,524	3,012	3,594
2351	1,553	1,557	1,590	1,629	1,735	1,908	2,194	2,643	3,161
2347	1,443	1,448	1,482	1,522	1,631	1,807	2,096	2,543	3,059
2343	1,237	1,241	1,275	1,314	1,420	1,591	1,871	2,308	2,833
2339	1,032	1,036	1,068	1,104	1,203	1,362	1,623	2,042	2,569
2335	0,777	0,780	0,809	0,841	0,928	1,068	1,299	1,680	2,185
2331	0,501	0,504	0,529	0,555	0,627	0,743	0,938	1,274	1,749
2323	0,054	0,055	0,064	0,075	0,105	0,157	0,253	0,456	0,836
2319	0,017	0,017	0,020	0,022	0,030	0,046	0,080	0,167	0,421
2315	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,010	0,016	0,039	0,126
2312	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,004	0,020
2310	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,005	0,007	0,010
2304	-0,048	-0,048	-0,049	-0,050	-0,052	-0,054	-0,055	-0,054	-0,049
2298	0,026	0,026	0,028	0,029	0,032	0,036	0,039	0,037	0,027
2292	-0,051	-0,051	-0,052	-0,052	-0,053	-0,054	-0,053	-0,050	-0,041
2286	0,019	0,019	0,020	0,021	0,023	0,026	0,028	0,028	0,034
2280	-0,048	-0,048	-0,049	-0,049	-0,049	-0,048	-0,046	-0,031	0,054
2271	0,019	0,019	0,022	0,025	0,036	0,057	0,102	0,206	0,427
2267	0,022	0,022	0,025	0,029	0,041	0,064	0,115	0,237	0,498
2263	0,036	0,037	0,041	0,047	0,067	0,107	0,196	0,411	0,810
2259	0,076	0,078	0,094	0,113	0,170	0,271	0,455	0,796	1,294
2255	0,367	0,371	0,398	0,432	0,520	0,661	0,898	1,296	1,834
2251	0,759	0,764	0,797	0,837	0,943	1,110	1,384	1,821	2,381
2247	1,239	1,245	1,285	1,333	1,460	1,660	1,983	2,480	3,081
2243	1,682	1,689	1,732	1,783	1,919	2,134	2,480	3,004	3,609
2238	2,024	2,351	2,399	2,453	2,603	2,844	3,239	3,847	4,533
2239	2,709	2,717	2,768	2,826	2,985	3,245	3,675	4,347	5,102

Tablo 30. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa)

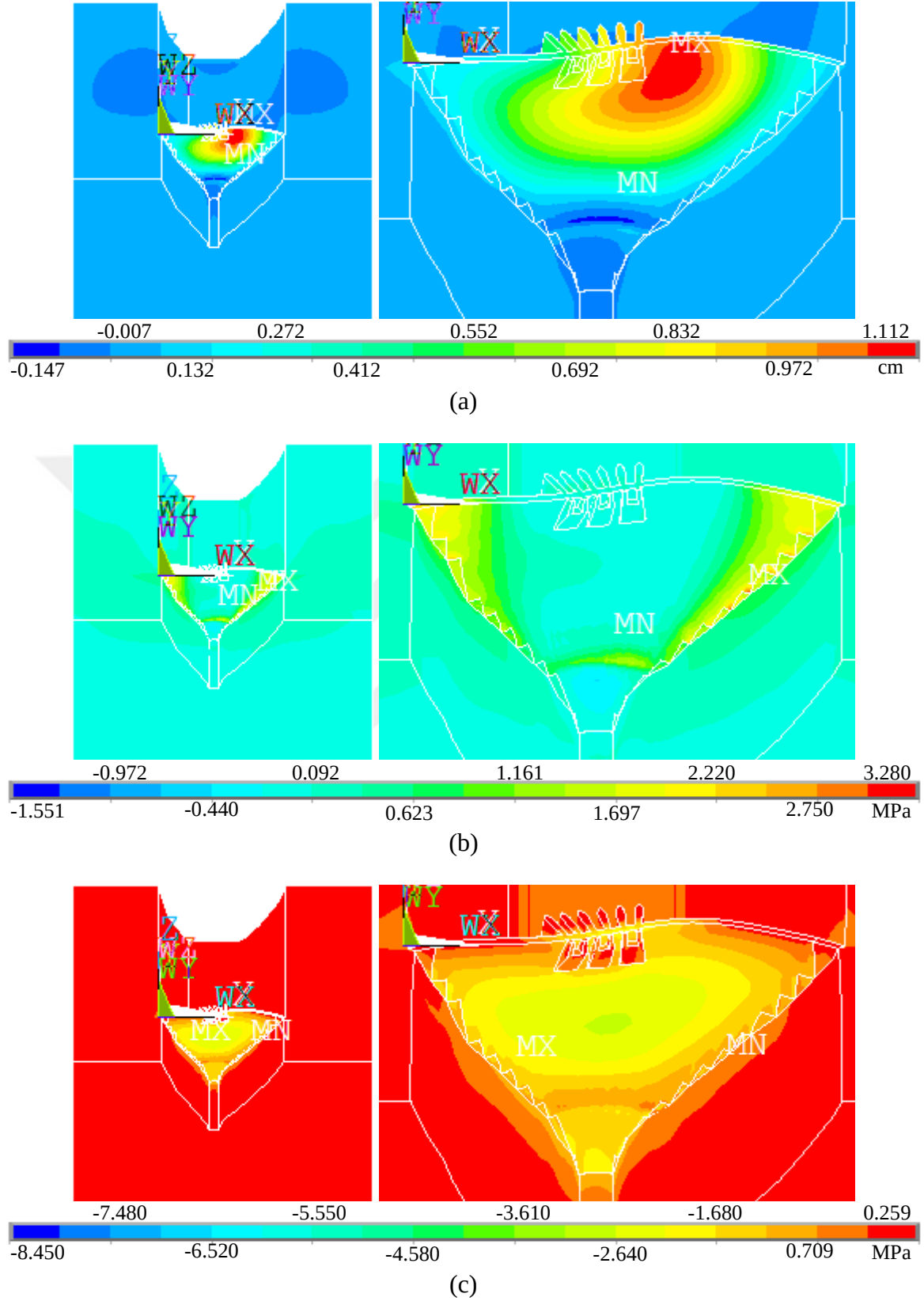
Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	-2,133	-2,139	-2,175	-2,218	-2,316	-2,431	-2,518	-2,406	-1,957
2304	-1,780	-1,785	-1,811	-1,841	-1,907	-1,977	-2,004	-1,834	-1,371
2182	-1,215	-1,218	-1,231	-1,243	-1,268	-1,278	-1,230	-1,005	-0,572
2007	-1,227	-1,229	-1,241	-1,247	-1,260	-1,253	-1,182	-0,941	-0,593
1820	-0,945	-0,946	-0,949	-0,948	-0,947	-0,933	-0,885	-0,754	-0,539
1657	-0,862	-0,863	-0,866	-0,867	-0,866	-0,850	-0,785	-0,598	-0,361
1437	-0,521	-0,522	-0,518	-0,512	-0,492	-0,440	-0,337	-0,282	-0,437
1233	-0,535	-0,536	-0,521	-0,499	-0,433	-0,320	-0,266	-0,378	-0,780
1037	-0,816	-0,815	-0,780	-0,726	-0,573	-0,353	-0,387	-0,830	-1,510
857	-1,227	-1,223	-1,163	-1,069	-0,823	-0,690	-1,030	-1,714	-2,468
693	-1,806	-1,796	-1,703	-1,570	-1,453	-1,706	-2,214	-3,004	-3,837
545	-2,632	-2,612	-2,481	-2,499	-2,758	-3,218	-3,912	-4,886	-5,895
413	-3,609	-3,580	-3,601	-3,923	-4,417	-5,083	-6,013	-7,248	-8,518
297	-4,554	-4,547	-5,006	-5,299	-5,995	-6,874	-8,071	-9,614	-11,193
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	-0,098	-0,098	-0,096	-0,094	-0,089	-0,080	-0,068	-0,054	-0,050
2351	-0,198	-0,198	-0,199	-0,201	-0,205	-0,212	-0,226	-0,252	-0,290
2347	-0,055	-0,055	-0,055	-0,054	-0,053	-0,052	-0,050	-0,049	-0,049
2343	-0,054	-0,054	-0,053	-0,053	-0,052	-0,052	-0,051	-0,050	-0,048
2339	-0,049	-0,049	-0,048	-0,048	-0,048	-0,047	-0,046	-0,045	-0,044
2335	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,048	-0,045
2331	-0,053	-0,053	-0,054	-0,054	-0,056	-0,058	-0,061	-0,061	-0,052
2323	-0,186	-0,186	-0,186	-0,190	-0,198	-0,206	-0,205	-0,159	-0,083
2319	-0,441	-0,441	-0,442	-0,448	-0,457	-0,464	-0,443	-0,317	-0,124
2315	-0,771	-0,772	-0,778	-0,789	-0,811	-0,832	-0,817	-0,652	-0,291
2312	-1,121	-1,123	-1,133	-1,149	-1,180	-1,211	-1,205	-1,044	-0,660
2310	-1,387	-1,391	-1,404	-1,423	-1,462	-1,500	-1,497	-1,324	-0,908
2304	-1,780	-1,785	-1,811	-1,841	-1,907	-1,977	-2,004	-1,834	-1,371
2298	-1,744	-1,748	-1,768	-1,789	-1,835	-1,878	-1,874	-1,683	-1,238
2292	-1,821	-1,826	-1,852	-1,877	-1,937	-1,996	-2,011	-1,838	-1,404
2286	-1,749	-1,753	-1,771	-1,787	-1,826	-1,858	-1,841	-1,649	-1,233
2280	-1,587	-1,591	-1,609	-1,623	-1,658	-1,687	-1,667	-1,474	-1,069
2271	-1,234	-1,237	-1,243	-1,246	-1,253	-1,248	-1,196	-1,014	-0,726
2267	-0,866	-0,868	-0,870	-0,868	-0,866	-0,852	-0,798	-0,645	-0,431
2263	-0,461	-0,462	-0,458	-0,449	-0,432	-0,403	-0,347	-0,248	-0,148
2259	-0,125	-0,125	-0,123	-0,118	-0,112	-0,106	-0,097	-0,080	-0,058
2255	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,048	-0,045	-0,040
2251	-0,042	-0,042	-0,042	-0,042	-0,041	-0,041	-0,040	-0,037	-0,035
2247	-0,043	-0,043	-0,043	-0,043	-0,042	-0,042	-0,041	-0,040	-0,038
2243	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,050
2238	-0,203	-0,199	-0,201	-0,203	-0,210	-0,222	-0,242	-0,276	-0,318
2239	-0,076	-0,076	-0,074	-0,072	-0,067	-0,059	-0,048	-0,038	-0,042

Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modelinin statik analizi sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri Şekil 79'dan görüldüğü üzere rezervuarın boş olması durumunda minimum değerde iken, rezervuar su seviyesi arttıkça yer değiştirme değerleri de artmaktadır. Yusufeli kemer barajına ait asal gerilmelerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla Şekil 80 (a) ve (b) incelendiğinde, maksimum asal gerilmelerin baraj yüksekliği boyunca genellikle arttığı, talvegden yaklaşık 120 m yüksekliğinde en büyük değeri aldığı ve krette ise biraz azaldığı görülmektedir. Minimum asal gerilmelerin ise baraj yüksekliği boyunca genellikle azaldığı, talvegden yaklaşık 120 m yüksekliğinde en küçük değeri aldığı ve krette ise biraz arttığı görülmektedir. Şekil 80 (c) ve (d)'den görüldüğü üzere, maksimum asal gerilmeler yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 150 m'lik mesafede artmakta; 150 m'den 300 m'ye kadar sabit değerde devam edip sonrasında tekrar azalmaya başlamaktadır. Minimum asal gerilmeler ise yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 150 m'lik mesafede sabit devam etmekte; 150 m'den 250 m'ye kadar hızla artmakta ve anahtar kesitte maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başlamaktadır.

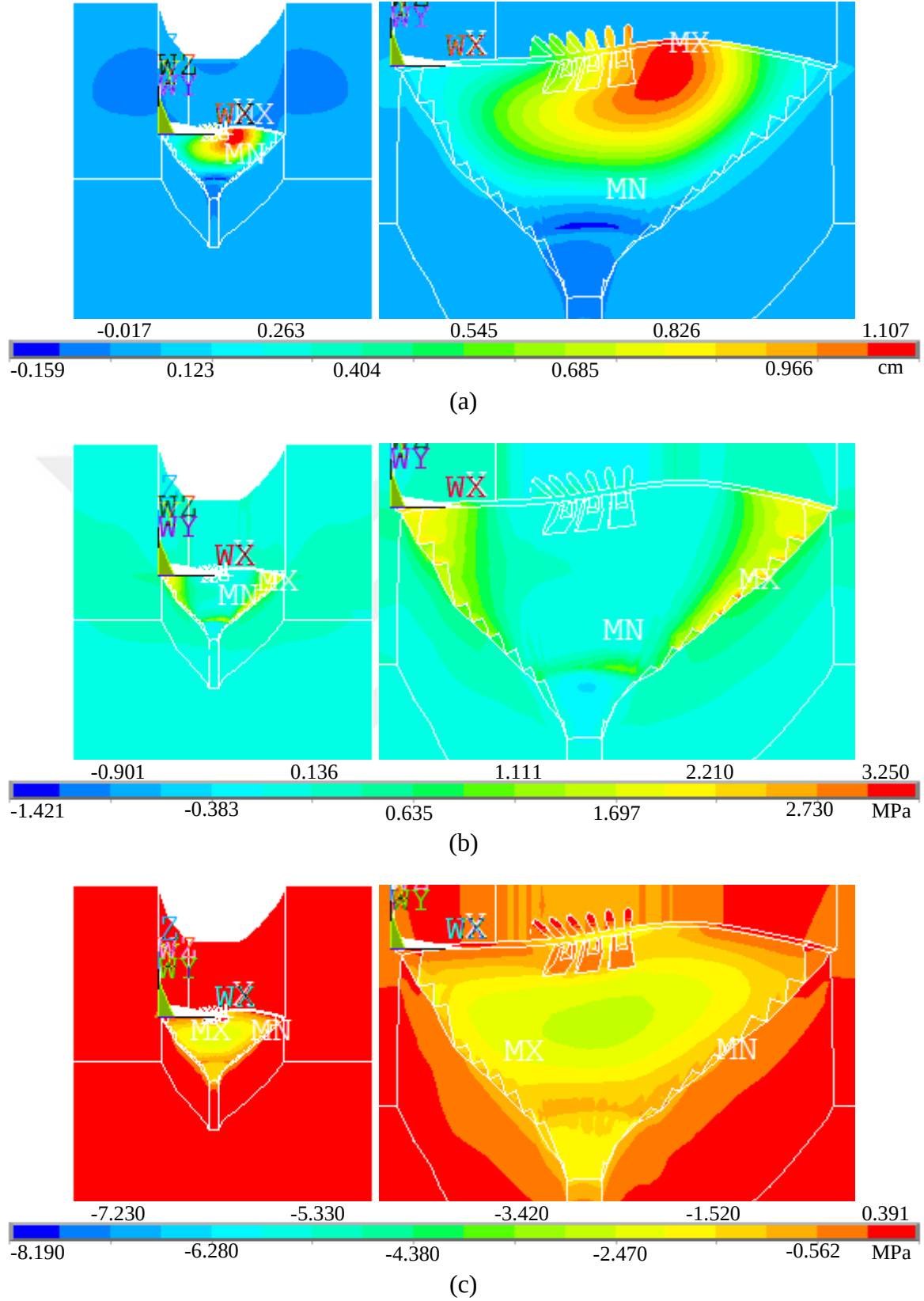
Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenmiş farklı rezervuar su seviyelerine ait sonlu eleman modellerde statik analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 81-88'de Lagrange yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı rezervuar su seviyeleri için baraj gövdesinde oluşan yer değiştirme ve gerilmelere ait kontur diyagramları verilmektedir.



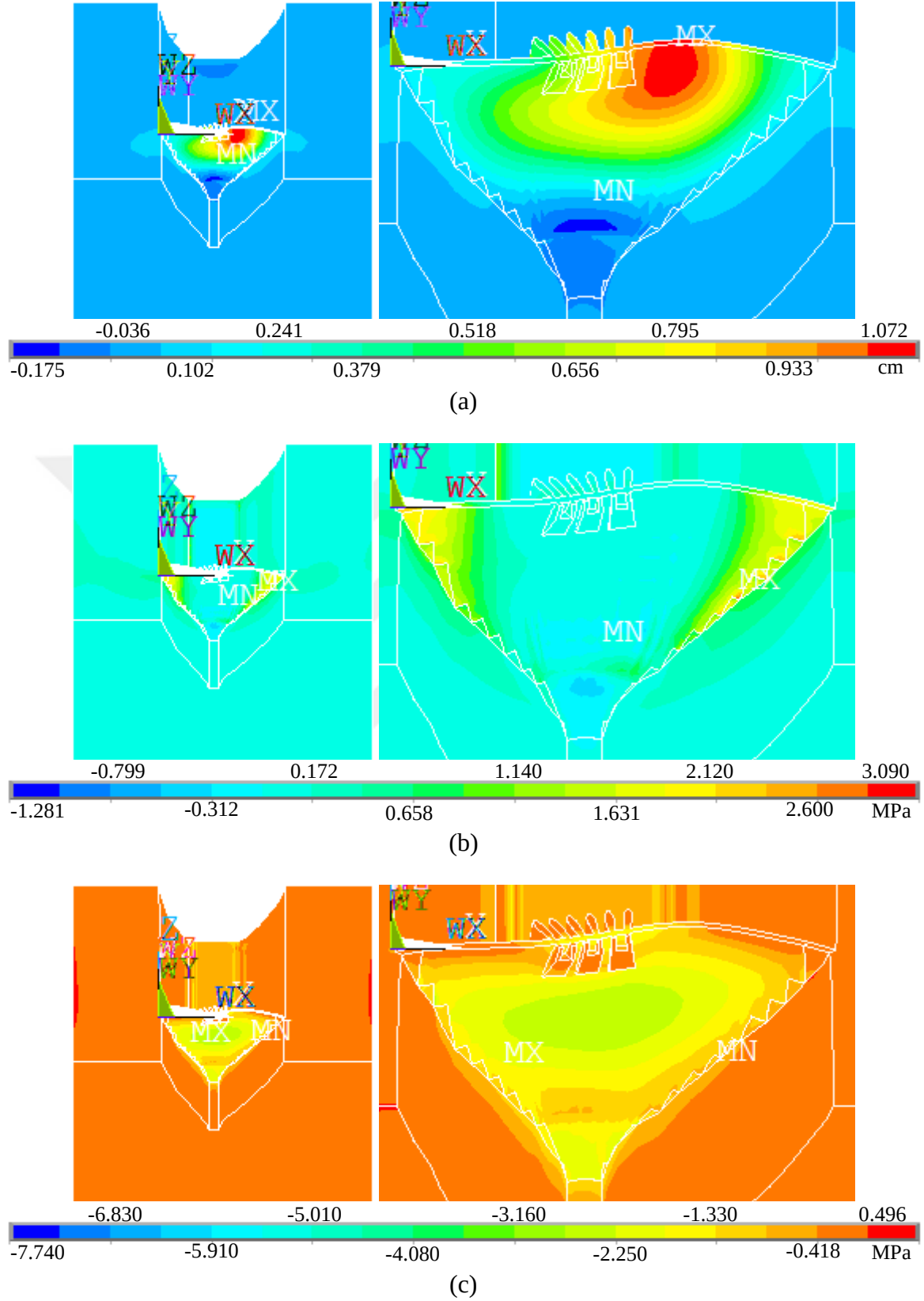
Şekil 81. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



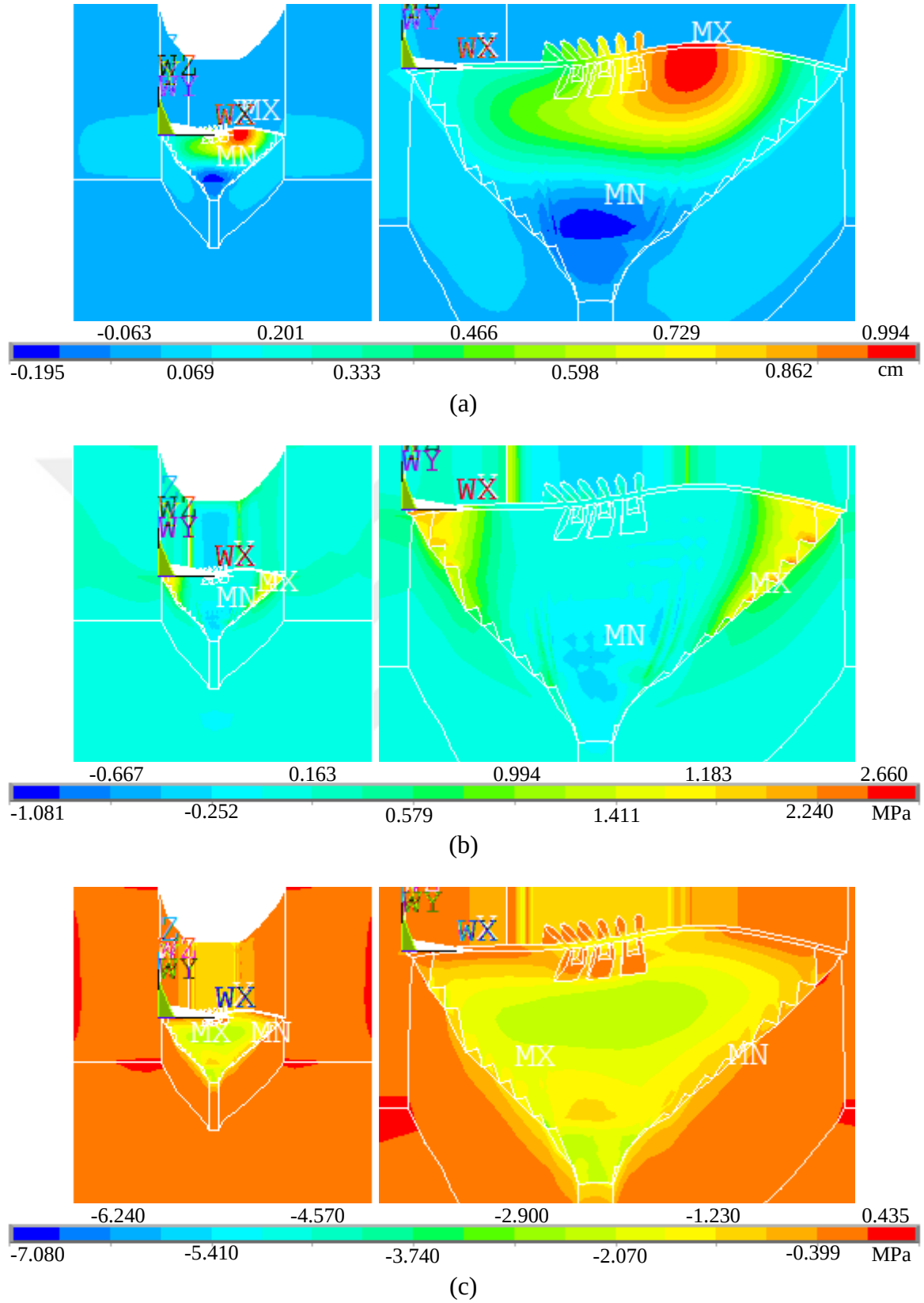
Şekil 82. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



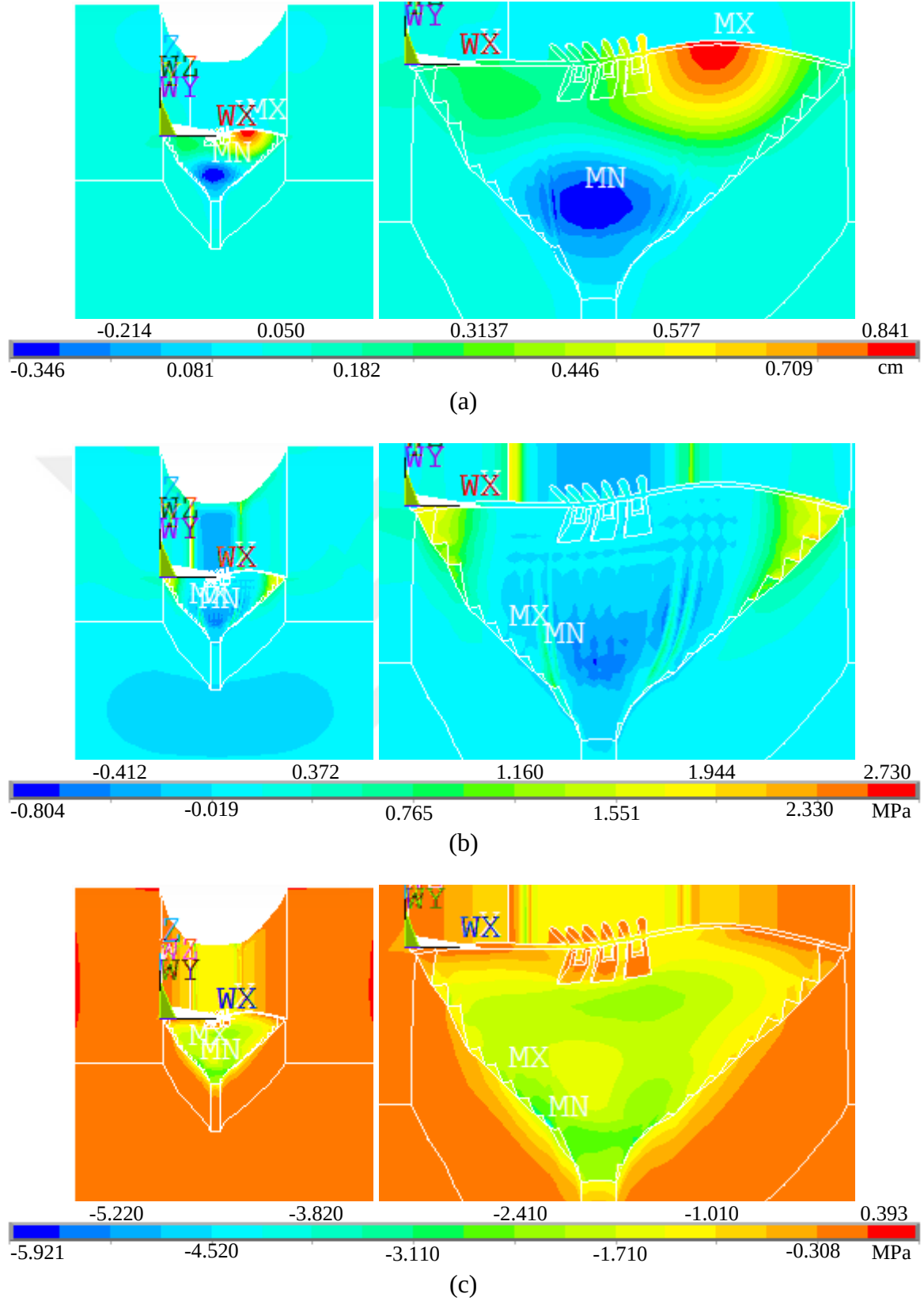
Şekil 83. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



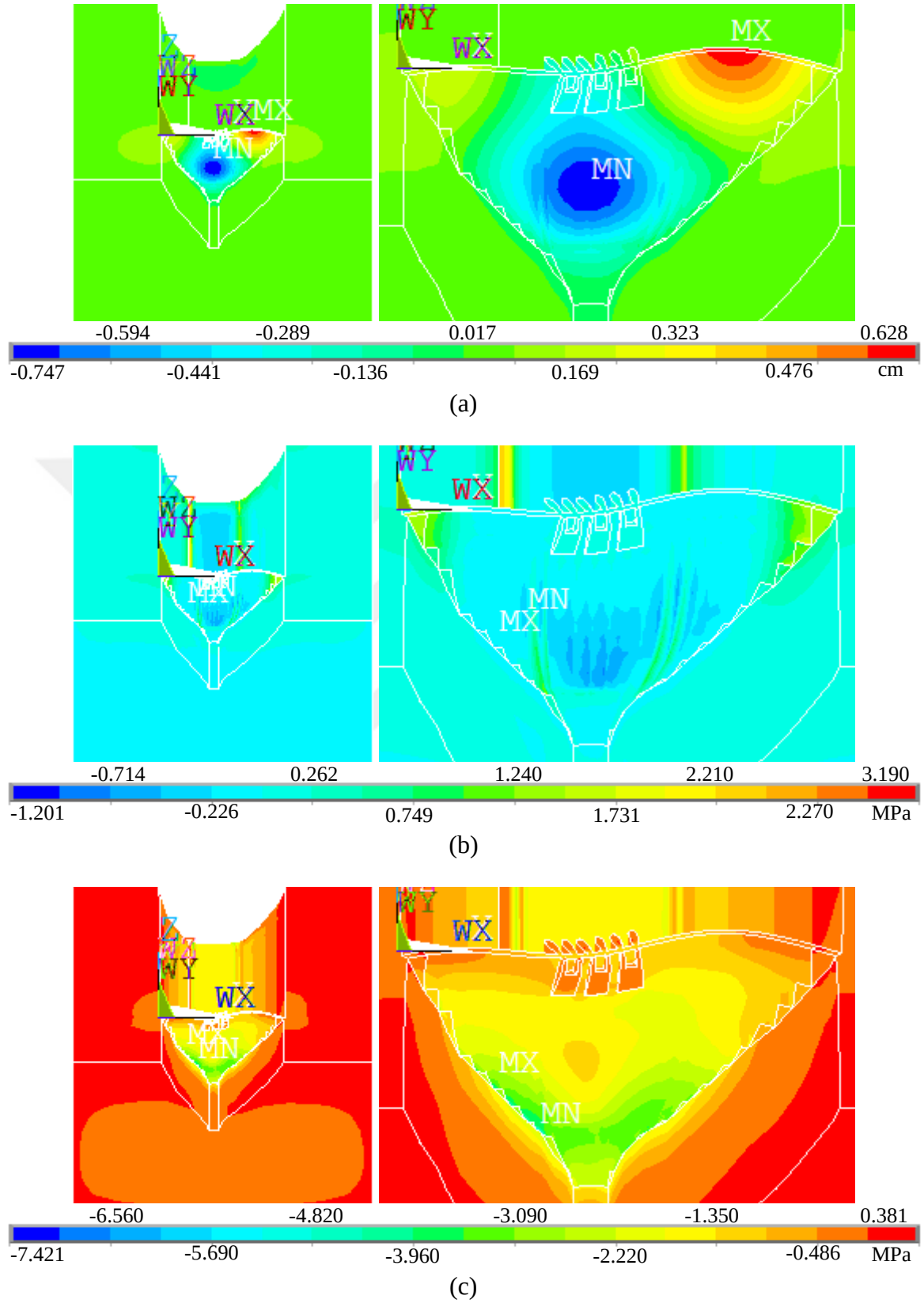
Şekil 84. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



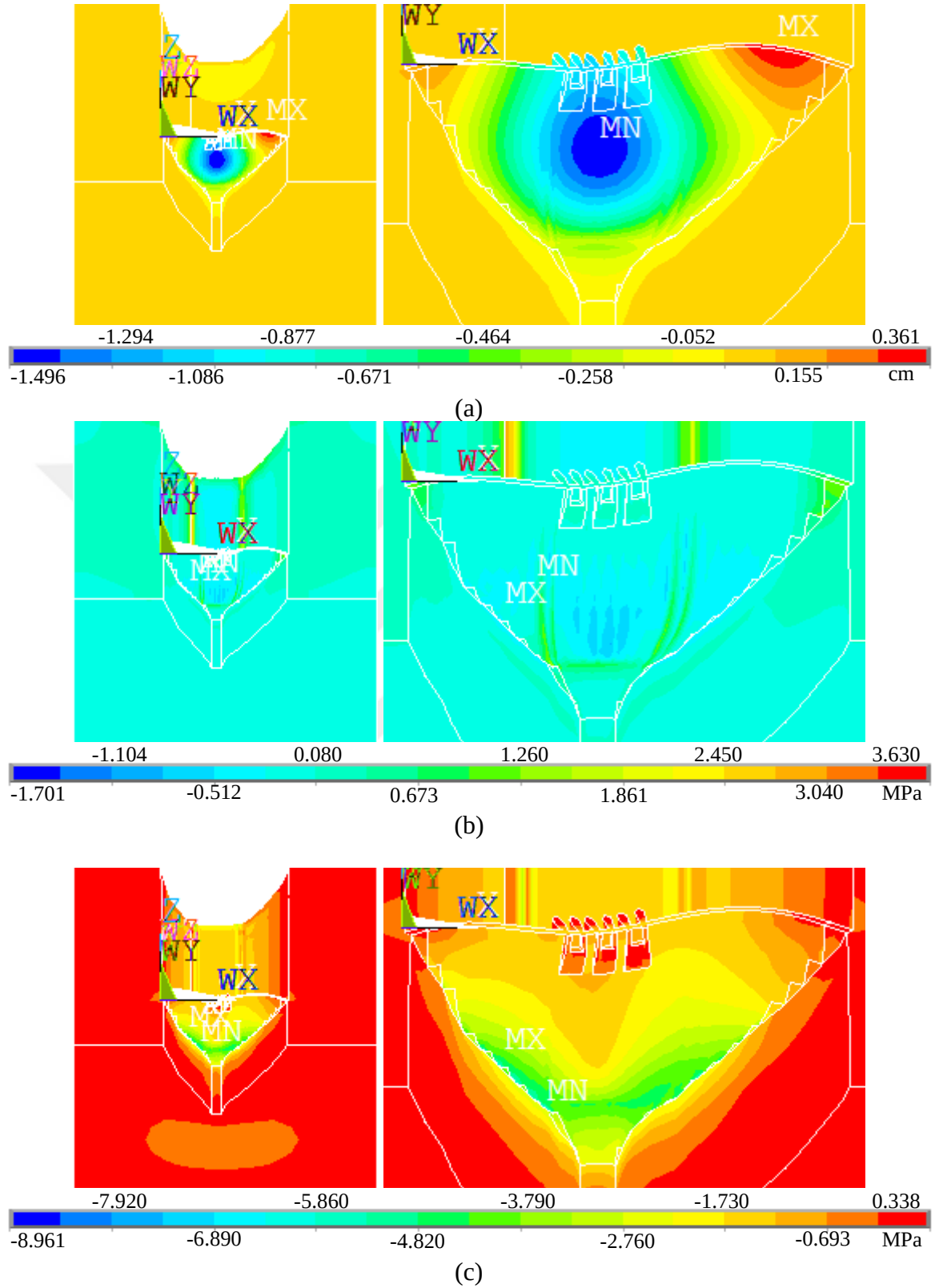
Şekil 85. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 86. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

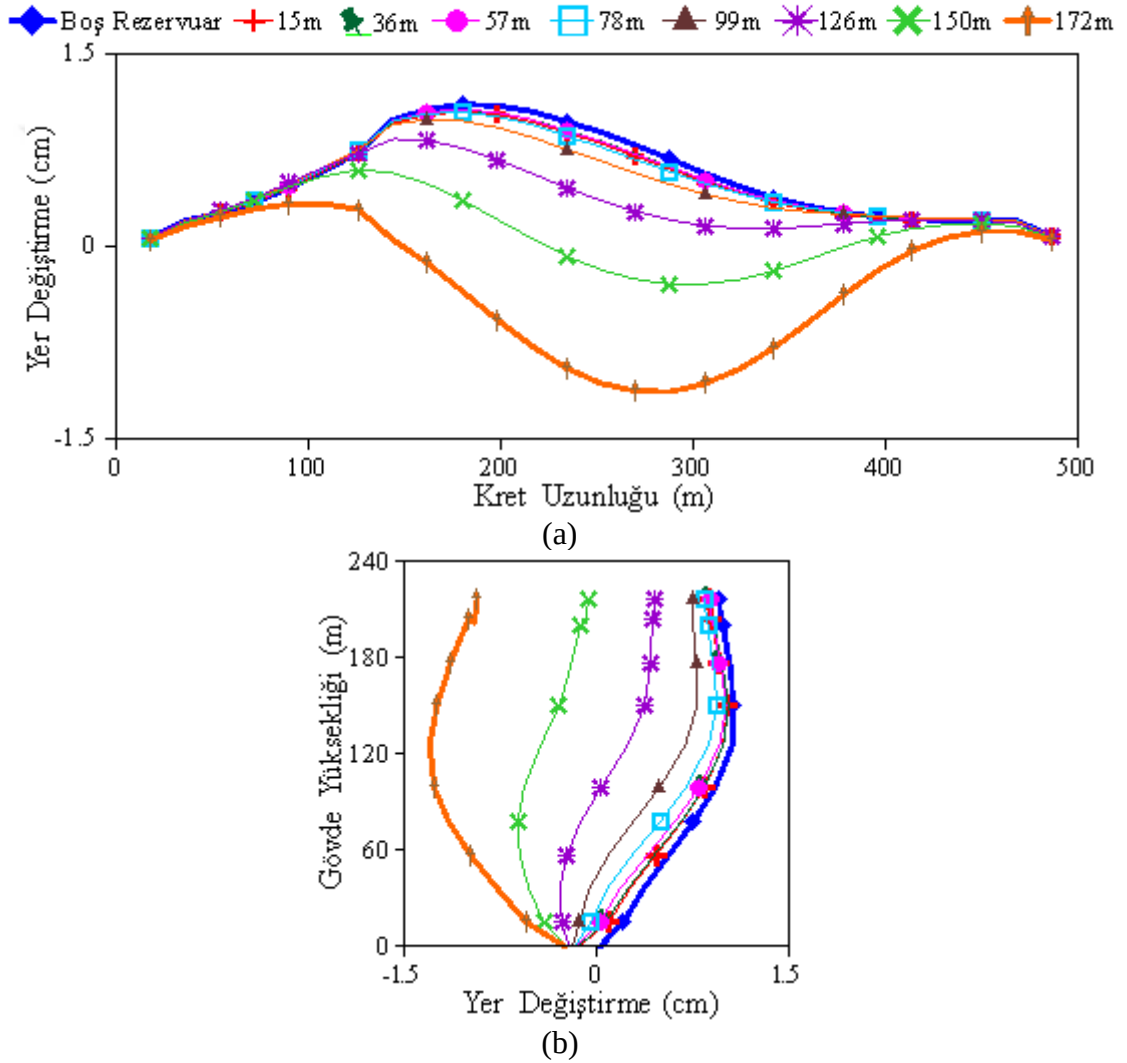


Şekil 87. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 88. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

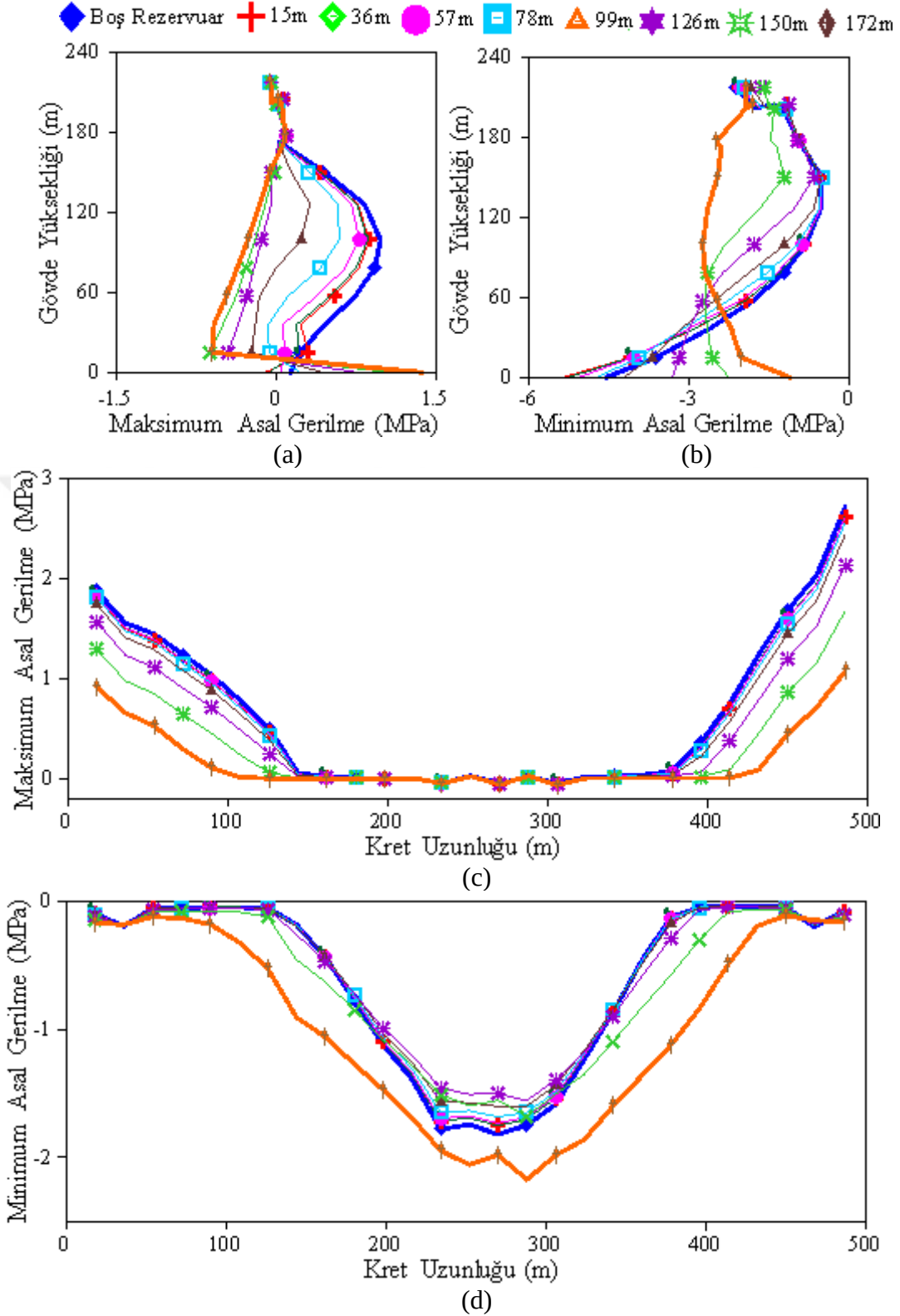
Şekil 70 ve Şekil 81-88’de rezervuarın boş olması durumu ve sekiz farklı rezervuar su seviyesi olması durumu için Lagrange yaklaşımına göre modellenmiş sonlu eleman modellere ait statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 89’da ve ilgili değerler Tablo 31’de, asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 90’da ve ilgili değerler Tablo 32 ve 33’te verilmektedir.



Şekil 89. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme

Tablo 31. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	0,959	0,870	0,889	0,888	0,849	0,747	0,456	-0,063	-0,928
2304	0,970	0,882	0,901	0,898	0,857	0,751	0,452	-0,079	-0,953
2182	0,982	0,898	0,914	0,910	0,866	0,755	0,442	-0,108	-0,998
2007	0,987	0,904	0,920	0,915	0,870	0,756	0,438	-0,118	-1,014
1820	1,037	0,962	0,973	0,962	0,907	0,776	0,416	-0,197	-1,139
1657	1,054	0,979	0,990	0,978	0,920	0,784	0,416	-0,208	-1,157
1437	1,060	1,025	1,031	1,012	0,942	0,786	0,375	-0,291	-1,243
1233	1,063	0,990	0,992	0,963	0,877	0,695	0,246	-0,431	-1,300
1037	0,925	0,845	0,841	0,801	0,696	0,493	0,035	-0,565	-1,263
857	0,759	0,671	0,662	0,613	0,498	0,289	-0,121	-0,611	-1,151
693	0,564	0,466	0,453	0,398	0,278	0,094	-0,232	-0,596	-0,980
545	0,368	0,262	0,245	0,185	0,084	-0,055	-0,283	-0,524	-0,769
413	0,209	0,099	0,074	0,026	-0,043	-0,132	-0,269	-0,408	-0,545
297	0,027	-0,144	-0,147	-0,157	-0,170	-0,186	-0,208	-0,227	-0,244
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,059	0,058	0,060	0,062	0,064	0,064	0,062	0,056	0,046
2351	0,197	0,195	0,198	0,200	0,201	0,200	0,194	0,179	0,151
2347	0,256	0,255	0,258	0,262	0,266	0,269	0,272	0,262	0,222
2343	0,338	0,340	0,343	0,348	0,355	0,364	0,373	0,360	0,287
2339	0,450	0,452	0,456	0,463	0,473	0,484	0,491	0,459	0,327
2335	0,584	0,584	0,590	0,598	0,609	0,618	0,613	0,543	0,329
2331	0,728	0,723	0,730	0,739	0,748	0,751	0,720	0,596	0,284
2323	0,984	0,957	0,969	0,977	0,974	0,947	0,833	0,568	0,046
2319	1,065	1,024	1,037	1,043	1,031	0,984	0,821	0,482	-0,137
2315	1,101	1,044	1,059	1,063	1,041	0,973	0,762	0,355	-0,353
2312	1,093	1,022	1,039	1,039	1,009	0,923	0,670	0,206	-0,575
2310	1,048	0,966	0,984	0,983	0,946	0,848	0,566	0,060	-0,778
2304	0,970	0,882	0,901	0,898	0,857	0,751	0,452	-0,079	-0,953
2298	0,887	0,798	0,816	0,813	0,770	0,661	0,354	-0,186	-1,071
2292	0,784	0,698	0,716	0,714	0,672	0,567	0,269	-0,260	-1,132
2286	0,677	0,598	0,616	0,614	0,577	0,480	0,201	-0,301	-1,137
2280	0,565	0,498	0,514	0,515	0,486	0,404	0,158	-0,297	-1,074
2271	0,465	0,411	0,426	0,429	0,408	0,342	0,136	-0,262	-0,960
2267	0,374	0,334	0,348	0,353	0,340	0,293	0,132	-0,197	-0,795
2263	0,308	0,280	0,292	0,299	0,294	0,265	0,150	-0,105	-0,594
2259	0,260	0,242	0,252	0,260	0,261	0,247	0,174	-0,009	-0,384
2255	0,227	0,217	0,225	0,232	0,236	0,233	0,193	0,075	-0,191
2251	0,209	0,202	0,209	0,215	0,220	0,222	0,204	0,134	-0,037
2247	0,202	0,197	0,202	0,207	0,211	0,213	0,204	0,165	0,065
2243	0,202	0,196	0,200	0,203	0,205	0,205	0,195	0,170	0,113
2238	0,199	0,192	0,196	0,198	0,197	0,193	0,179	0,153	0,113
2239	0,077	0,075	0,078	0,080	0,081	0,080	0,075	0,064	0,048



Şekil 90. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme

Tablo 32. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	-0,054	-0,054	-0,054	-0,053	-0,053	-0,052	-0,051	-0,051	-0,053
2304	-0,048	-0,046	-0,046	-0,046	-0,045	-0,043	-0,041	-0,042	-0,048
2182	0,068	0,066	0,067	0,067	0,066	0,064	0,059	0,044	0,017
2007	0,030	0,019	0,020	0,018	0,012	0,003	-0,006	0,003	0,052
1820	0,099	0,098	0,098	0,098	0,097	0,096	0,092	0,087	0,085
1657	0,032	0,030	0,030	0,029	0,027	0,025	0,024	0,037	0,073
1437	0,446	0,413	0,409	0,382	0,305	0,140	-0,039	-0,021	-0,059
1233	0,828	0,766	0,757	0,708	0,581	0,319	-0,046	-0,101	-0,152
1037	0,979	0,876	0,858	0,779	0,592	0,234	-0,134	-0,199	-0,266
857	0,924	0,777	0,751	0,647	0,415	0,001	-0,206	-0,287	-0,367
693	0,740	0,543	0,507	0,382	0,111	-0,156	-0,273	-0,374	-0,467
545	0,463	0,230	0,195	0,065	-0,072	-0,195	-0,357	-0,498	-0,584
413	0,220	0,303	0,202	0,077	-0,067	-0,229	-0,452	-0,622	-0,602
297	0,135	-0,100	-0,065	0,046	0,218	0,434	0,756	1,069	1,370
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	1,872	1,817	1,829	1,829	1,804	1,741	1,569	1,293	0,916
2351	1,553	1,494	1,505	1,503	1,474	1,406	1,232	0,974	0,657
2347	1,443	1,382	1,392	1,388	1,358	1,286	1,106	0,846	0,526
2343	1,237	1,176	1,185	1,181	1,150	1,079	0,901	0,639	0,294
2339	1,032	0,973	0,982	0,977	0,948	0,881	0,711	0,448	0,105
2335	0,777	0,724	0,732	0,727	0,701	0,640	0,484	0,233	0,012
2331	0,501	0,456	0,462	0,458	0,436	0,385	0,249	0,054	0,001
2323	0,054	0,040	0,042	0,041	0,037	0,029	0,018	0,010	-0,001
2319	0,017	0,014	0,015	0,014	0,014	0,013	0,012	0,008	-0,001
2315	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,007	0,002
2312	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,003	-0,007
2310	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,003
2304	-0,048	-0,046	-0,046	-0,046	-0,045	-0,043	-0,041	-0,042	-0,048
2298	0,026	0,023	0,023	0,022	0,020	0,017	0,012	0,012	0,022
2292	-0,051	-0,050	-0,050	-0,049	-0,049	-0,048	-0,048	-0,051	-0,060
2286	0,019	0,017	0,017	0,016	0,014	0,012	0,009	0,011	0,026
2280	-0,048	-0,047	-0,047	-0,047	-0,046	-0,046	-0,047	-0,053	-0,067
2271	0,019	0,016	0,016	0,016	0,016	0,014	0,011	0,008	0,004
2267	0,022	0,017	0,018	0,018	0,017	0,014	0,010	0,006	0,004
2263	0,036	0,029	0,030	0,030	0,027	0,023	0,016	0,009	0,003
2259	0,076	0,052	0,056	0,055	0,049	0,037	0,023	0,013	0,003
2255	0,367	0,315	0,321	0,315	0,287	0,222	0,065	0,017	0,003
2251	0,759	0,693	0,700	0,692	0,656	0,576	0,377	0,090	0,005
2247	1,239	1,157	1,166	1,156	1,112	1,016	0,785	0,450	0,088
2243	1,682	1,593	1,603	1,592	1,545	1,442	1,199	0,857	0,445
2238	2,024	1,931	1,942	1,931	1,883	1,775	1,518	1,154	0,709
2239	2,709	2,608	2,621	2,611	2,557	2,435	2,131	1,672	1,072

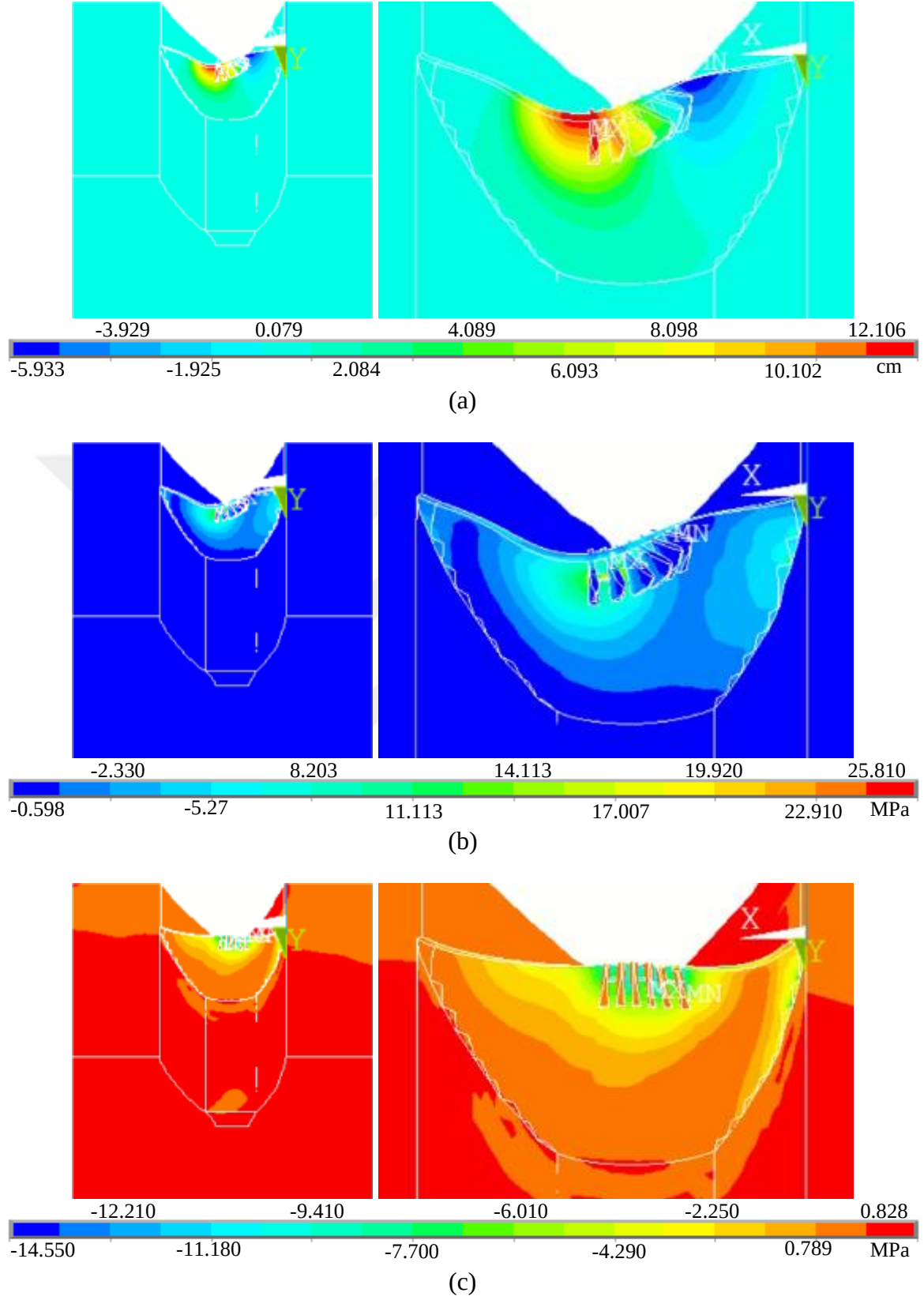
Tablo 33. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda statik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	-2,133	-2,046	-2,047	-2,020	-1,950	-1,829	-1,639	-1,585	-1,924
2304	-1,780	-1,716	-1,716	-1,697	-1,646	-1,564	-1,460	-1,510	-1,946
2182	-1,215	-1,179	-1,179	-1,169	-1,147	-1,118	-1,124	-1,295	-1,805
2007	-1,227	-1,195	-1,196	-1,189	-1,173	-1,160	-1,197	-1,402	-1,936
1820	-0,945	-0,933	-0,932	-0,928	-0,922	-0,918	-0,975	-1,466	-2,481
1657	-0,862	-0,848	-0,846	-0,840	-0,829	-0,820	-0,853	-1,347	-2,391
1437	-0,521	-0,514	-0,510	-0,505	-0,503	-0,521	-0,654	-1,220	-2,464
1233	-0,535	-0,538	-0,534	-0,536	-0,564	-0,660	-1,030	-1,676	-2,650
1037	-0,816	-0,846	-0,844	-0,868	-0,963	-1,206	-1,789	-2,332	-2,741
857	-1,227	-1,299	-1,301	-1,360	-1,542	-1,884	-2,370	-2,643	-2,699
693	-1,806	-1,947	-1,959	-2,062	-2,286	-2,540	-2,743	-2,706	-2,476
545	-2,632	-2,897	-2,918	-3,018	-3,123	-3,152	-2,998	-2,652	-2,200
413	-3,609	-4,084	-4,074	-4,042	-3,926	-3,688	-3,182	-2,573	-2,035
297	-4,554	-5,360	-5,254	-5,056	-4,718	-4,214	-3,303	-2,249	-1,105
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	-0,098	-0,101	-0,101	-0,101	-0,104	-0,109	-0,122	-0,143	-0,171
2351	-0,198	-0,196	-0,197	-0,197	-0,197	-0,196	-0,192	-0,187	-0,183
2347	-0,055	-0,056	-0,056	-0,056	-0,057	-0,059	-0,067	-0,084	-0,124
2343	-0,054	-0,054	-0,054	-0,054	-0,055	-0,057	-0,063	-0,080	-0,133
2339	-0,049	-0,049	-0,049	-0,050	-0,051	-0,053	-0,061	-0,082	-0,181
2335	-0,049	-0,049	-0,050	-0,050	-0,051	-0,053	-0,061	-0,088	-0,322
2331	-0,053	-0,053	-0,053	-0,054	-0,055	-0,056	-0,064	-0,124	-0,526
2323	-0,186	-0,186	-0,187	-0,187	-0,190	-0,200	-0,262	-0,457	-0,907
2319	-0,441	-0,439	-0,438	-0,437	-0,433	-0,432	-0,470	-0,632	-1,062
2315	-0,771	-0,757	-0,757	-0,752	-0,739	-0,720	-0,721	-0,849	-1,270
2312	-1,121	-1,095	-1,095	-1,086	-1,062	-1,025	-0,991	-1,081	-1,472
2310	-1,387	-1,352	-1,352	-1,338	-1,305	-1,254	-1,198	-1,277	-1,690
2304	-1,780	-1,716	-1,716	-1,697	-1,646	-1,564	-1,460	-1,510	-1,946
2298	-1,744	-1,694	-1,693	-1,677	-1,637	-1,575	-1,509	-1,598	-2,057
2292	-1,821	-1,753	-1,754	-1,733	-1,683	-1,602	-1,503	-1,556	-1,982
2286	-1,749	-1,700	-1,700	-1,685	-1,650	-1,599	-1,558	-1,680	-2,174
2280	-1,587	-1,538	-1,539	-1,524	-1,490	-1,438	-1,394	-1,508	-1,984
2271	-1,234	-1,210	-1,209	-1,201	-1,184	-1,165	-1,181	-1,351	-1,861
2267	-0,866	-0,853	-0,853	-0,850	-0,844	-0,844	-0,896	-1,096	-1,598
2263	-0,461	-0,464	-0,463	-0,464	-0,469	-0,491	-0,585	-0,832	-1,361
2259	-0,125	-0,130	-0,130	-0,133	-0,143	-0,173	-0,295	-0,579	-1,124
2255	-0,049	-0,048	-0,048	-0,049	-0,050	-0,052	-0,069	-0,302	-0,838
2251	-0,042	-0,042	-0,042	-0,042	-0,043	-0,044	-0,049	-0,085	-0,491
2247	-0,043	-0,043	-0,043	-0,043	-0,044	-0,045	-0,049	-0,064	-0,196
2243	-0,049	-0,049	-0,049	-0,049	-0,050	-0,051	-0,055	-0,067	-0,113
2238	-0,203	-0,194	-0,195	-0,195	-0,193	-0,189	-0,178	-0,163	-0,150
2239	-0,076	-0,079	-0,079	-0,080	-0,083	-0,089	-0,105	-0,129	-0,162

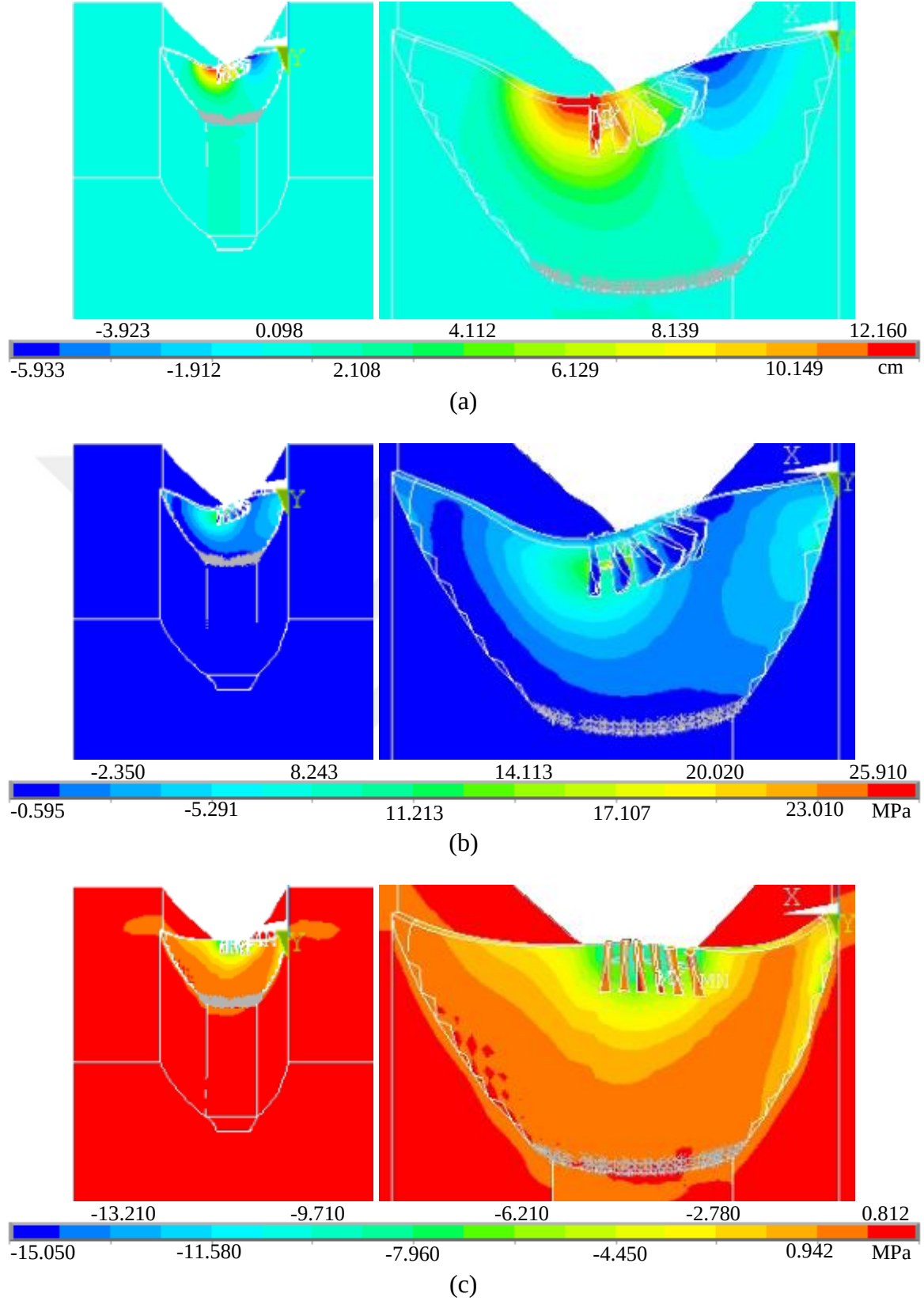
Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modelinin statik analizi sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri Şekil 89'dan görüldüğü üzere rezervuarın boş olması durumunda memba doğrultusuna doğru yönelimi var iken, rezervuar su seviyesi arttıkça yer değiştirme yönü mansap doğrultusuna doğru ilerlediği ve artarak devam ettiği görülmektedir. Yusufeli kemer barajına ait asal gerilmelerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla Şekil 90 (a) ve (b) incelendiğinde, maksimum asal gerilmelerin rezervuar su seviyesi arttıkça azalmaya başladığı, 99m su yüksekliği için yaklaşık olarak sıfırlandığı su seviyesi artmaya devam ettikçe gerilmelerin eksi doğrultuda birim olarak artmaya devam ettiği görülmektedir. Baraj gövdesinde gerilme değerlerinin okunduğu memba yüzeyi artan su seviyesi ile su yüküne maruz kalmaktadır. Memba yüzeyinin maruz kaldığı su yükünün baraj gövdesinde meydana getirdiği ekstra gerilmeler, boş rezervuar durumunda baraj yüzeyinde oluşan gerilmeleri değiştirmektedir. İlk 99m su yüksekliğine kadar baraj yüksekliği boyunca maksimum gerilmelerin genellikle arttığı, talvegden yaklaşık 110 m yüksekliğinde en büyük değeri aldığı ve krete doğru ise azaldığı görülmektedir. 99m'den sonraki su seviyelerinde ise gerilmelerin eksi yönde artış gösterdiği ancak maksimum değerlerin talvegden 20m yükseklikte olduğu, krete doğru azalarak devam ettiği görülmektedir. Minimum asal gerilmelerin ise 99m'ye kadar olan rezervuar su seviyesinde baraj yüksekliği boyunca genellikle azaldığı, talvegden yaklaşık 120 m yüksekliğinde en küçük değeri aldığı ve krette ise arttığı görülmektedir. 99m'den itibaren artan su seviyelerinde ise daha belirgin gerilme değişimlerinin olduğu, minimum gerilmelerin 172m su seviyesinde baraj yüksekliği boyunca artan bir eğilimde olduğu görülmüştür. Şekil 90 (c) ve (d)'den görüldüğü üzere, maksimum asal gerilmeler yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 150 m'lik mesafede azalmakta; 150 m'den 300 m'ye kadar sabit değerde devam edip sonrasında tekrar artmaya başlamaktadır. Minimum asal gerilmeler ise yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 150 m'lik mesafede sabit devam etmekte; 150 m'den 250 m'ye kadar hızla artmakta ve anahtar kesitte maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başlamaktadır.

❖ Yusufeli Barajının Dinamik Analizi

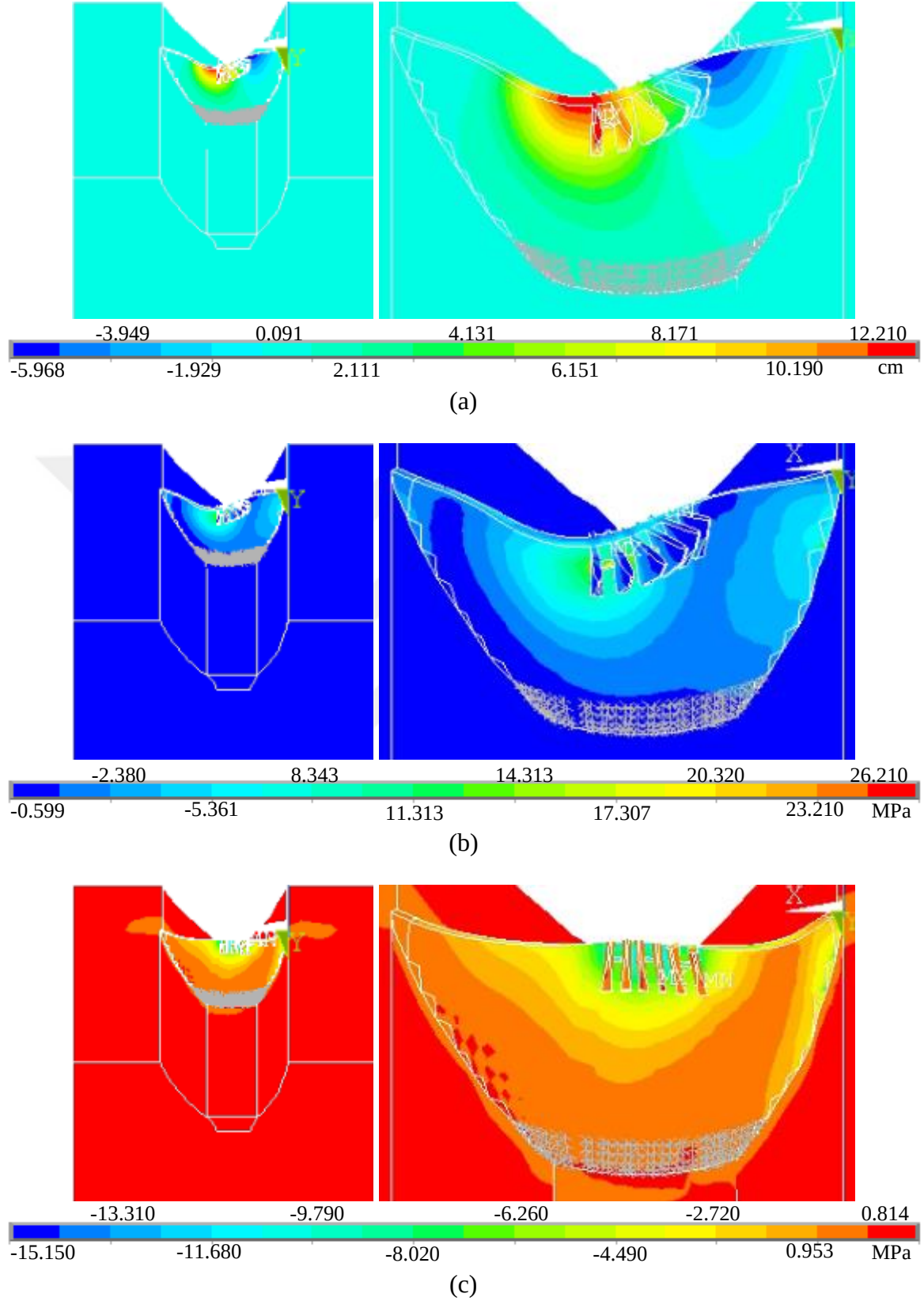
Yusufeli Barajının deprem davranışını/yapısal performansını ve farklı rezervuar modelleme yaklaşımlarının deprem etkisi altında davranışını belirlemek ve karşılaştırmak amacıyla zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sekiz farklı su seviyesi durumunda baraj gövdesinin davranışı incelenmiş olup, her bir modele ait sonuçlar detaylı olarak elde edilmiştir. Bu durum su tutma süreci boyunca baraj gövdesinin yapısal değişimi hakkında bilgi sahibi olmak açısından önem arz etmektedir. Deprem analizleri, Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak hazırlanan sonlu eleman modellere uygulanmıştır. Deprem analizleri için Deriner Barajı ile Yusufeli Barajının aynı bölgede bulunması, birbirine yakın olması ve ayrıca Deriner Barajının tasarım ivmesinin bilinmesi nedeniyle aynı deprem kaydı kullanılmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Deprem analizlerinde yer hareketi olarak 1999 yılında meydana gelen Kocaeli depreminin Gebze istasyonundan elde edilen EW ve NS bileşenleri sırasıyla baraja memba-mansap ve kret doğrultusunda olmak üzere iki doğrultuda uygulanmıştır. Kocaeli depreminin EW ve NS bileşenlerine ait ivme grafiği Şekil 28’de verilmektedir. Barajın zaman tanım alanında lineer analizlerinde, eleman matrisleri Gauss sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır (Bathe, 1996). Dinamik hareket denkleminin çözümünde ise Newmark Yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde Rayleigh sönüm katsayıları %5 sönüm oranı için hesaplanarak dikkate alınmıştır. Analizler çok uzun zaman aldığı ve fazla bilgisayar hafızası kapladığı için, işlem kolaylığı açısından yer hareketinin etkin olan ilk 20 s’si dikkate alınmıştır. Şekil 91’de rezervuarın boş olması durumu için, Şekil 92-99’da rezervuarın Westergaard yaklaşımına göre modellenmiş sonlu eleman modellerine ait dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 100’de, asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 101’de ve ilgili değerler Tablo 72’de verilmektedir.



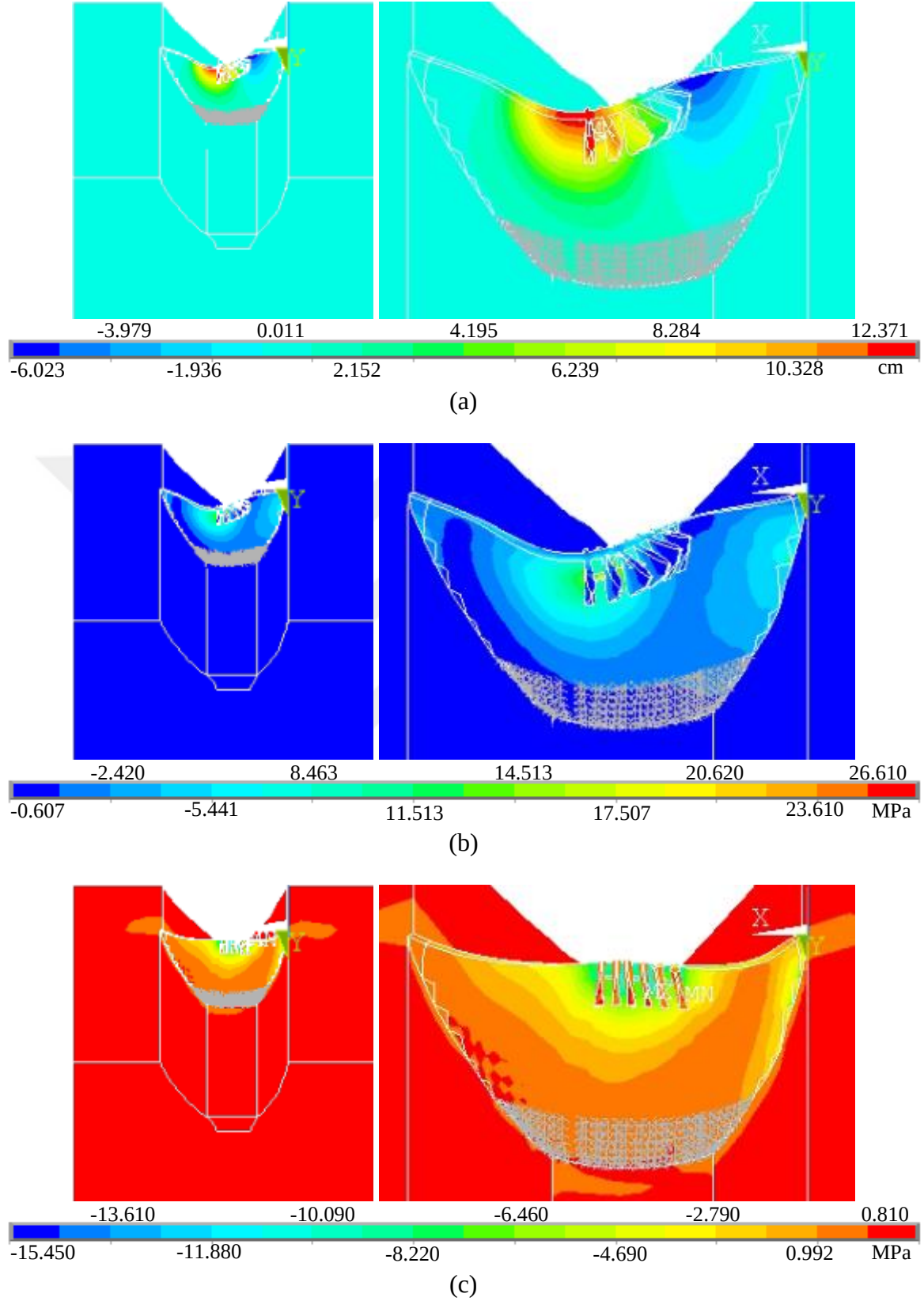
Şekil 91. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



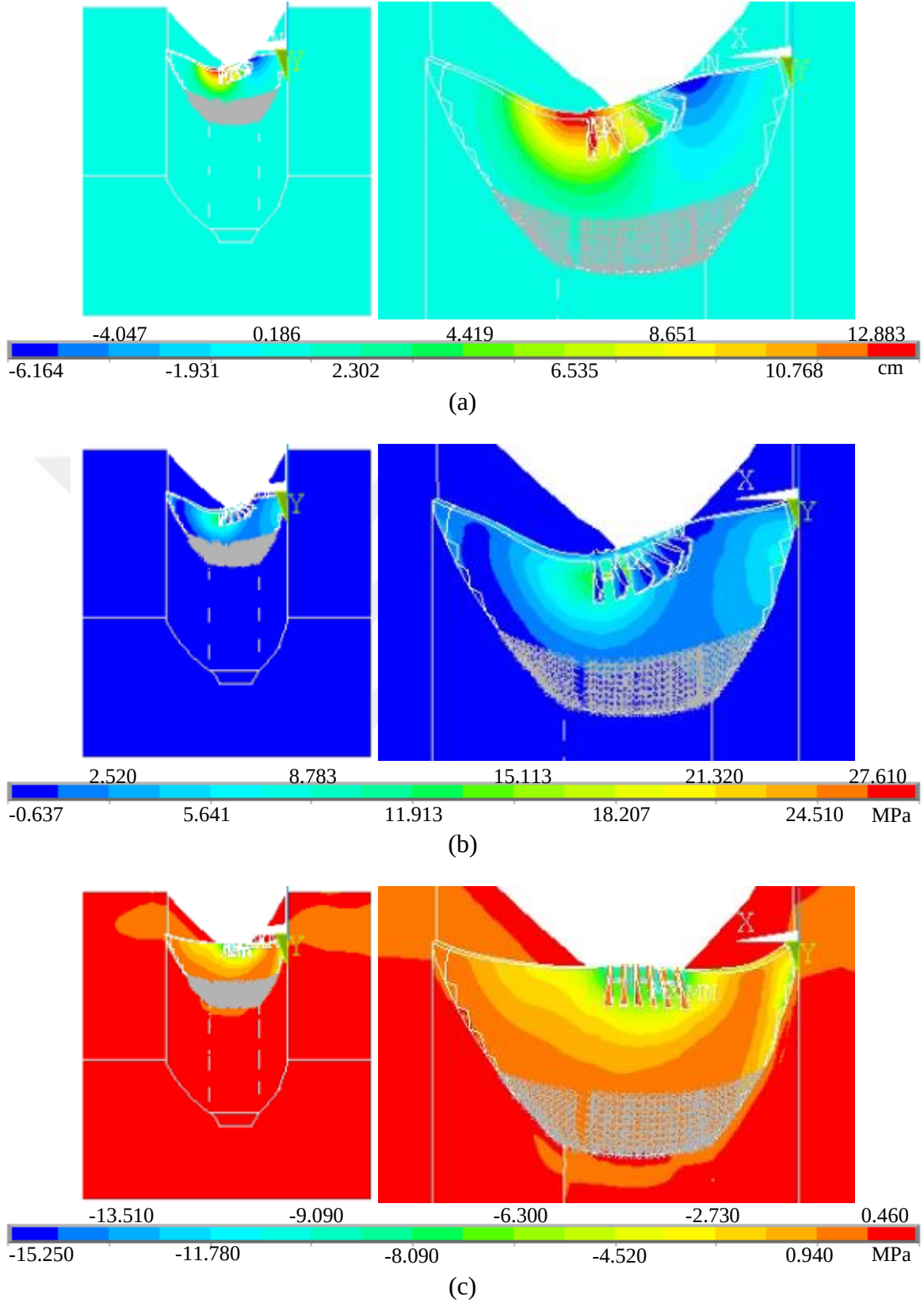
Şekil 92. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



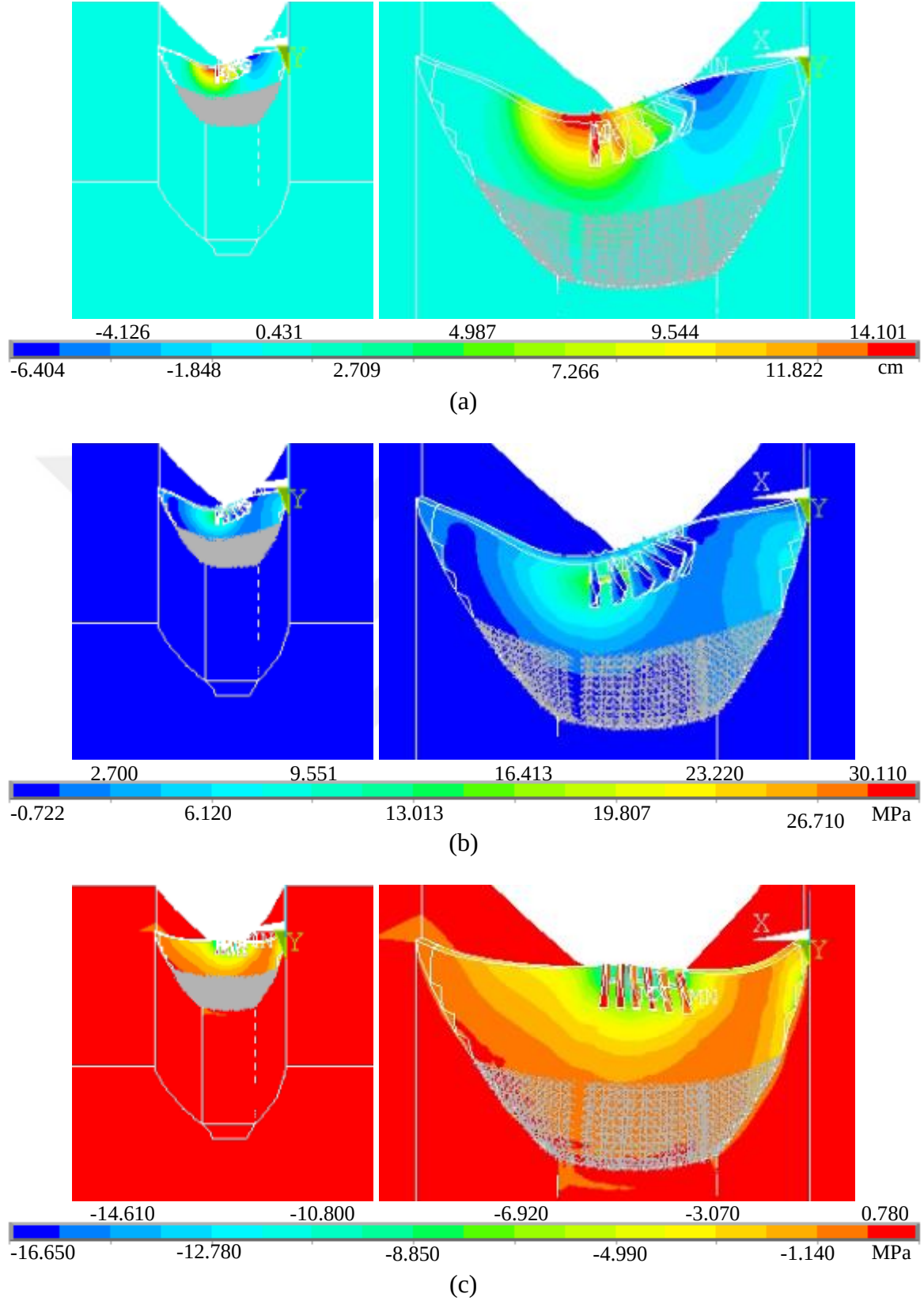
Şekil 93. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



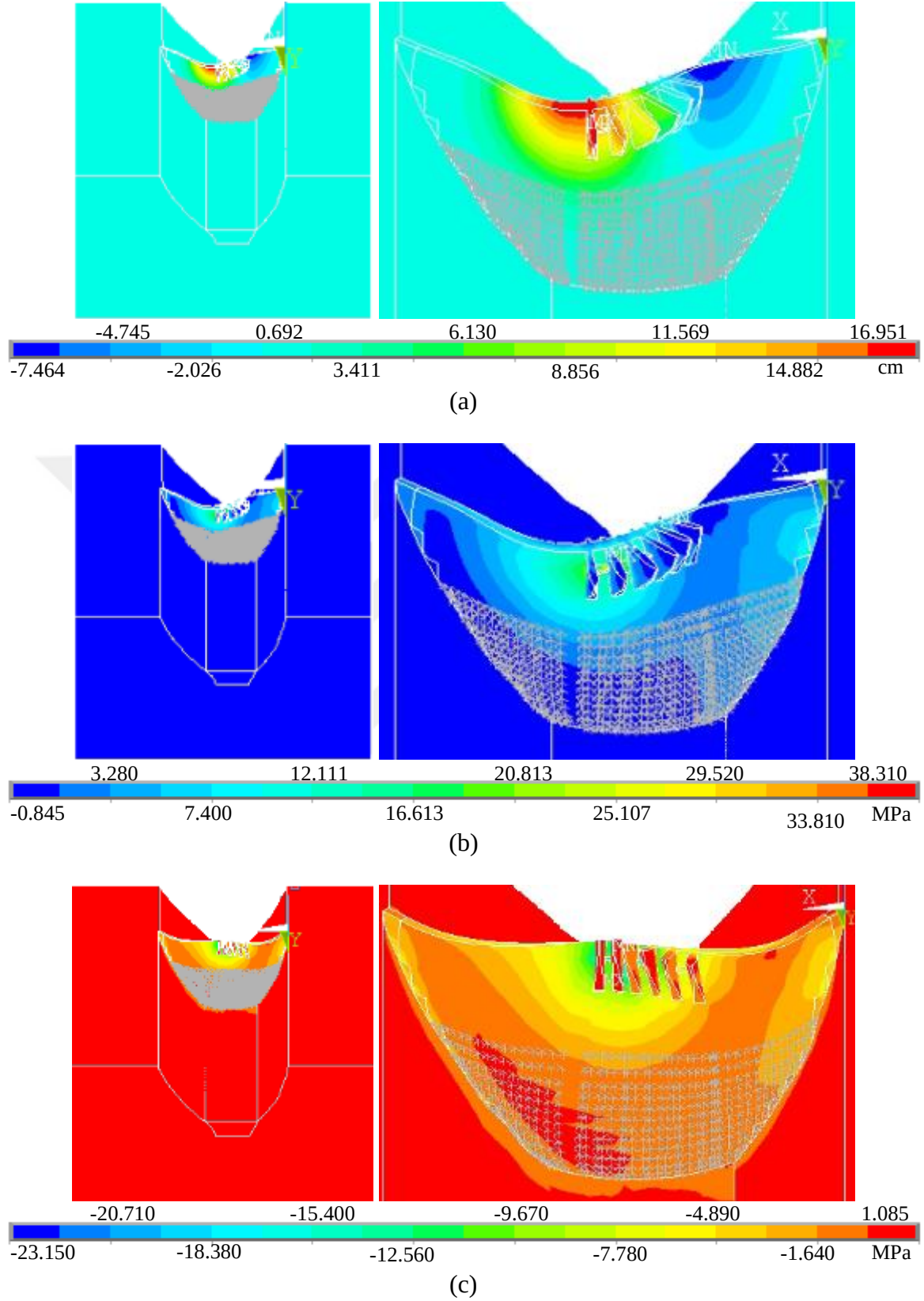
Şekil 94. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



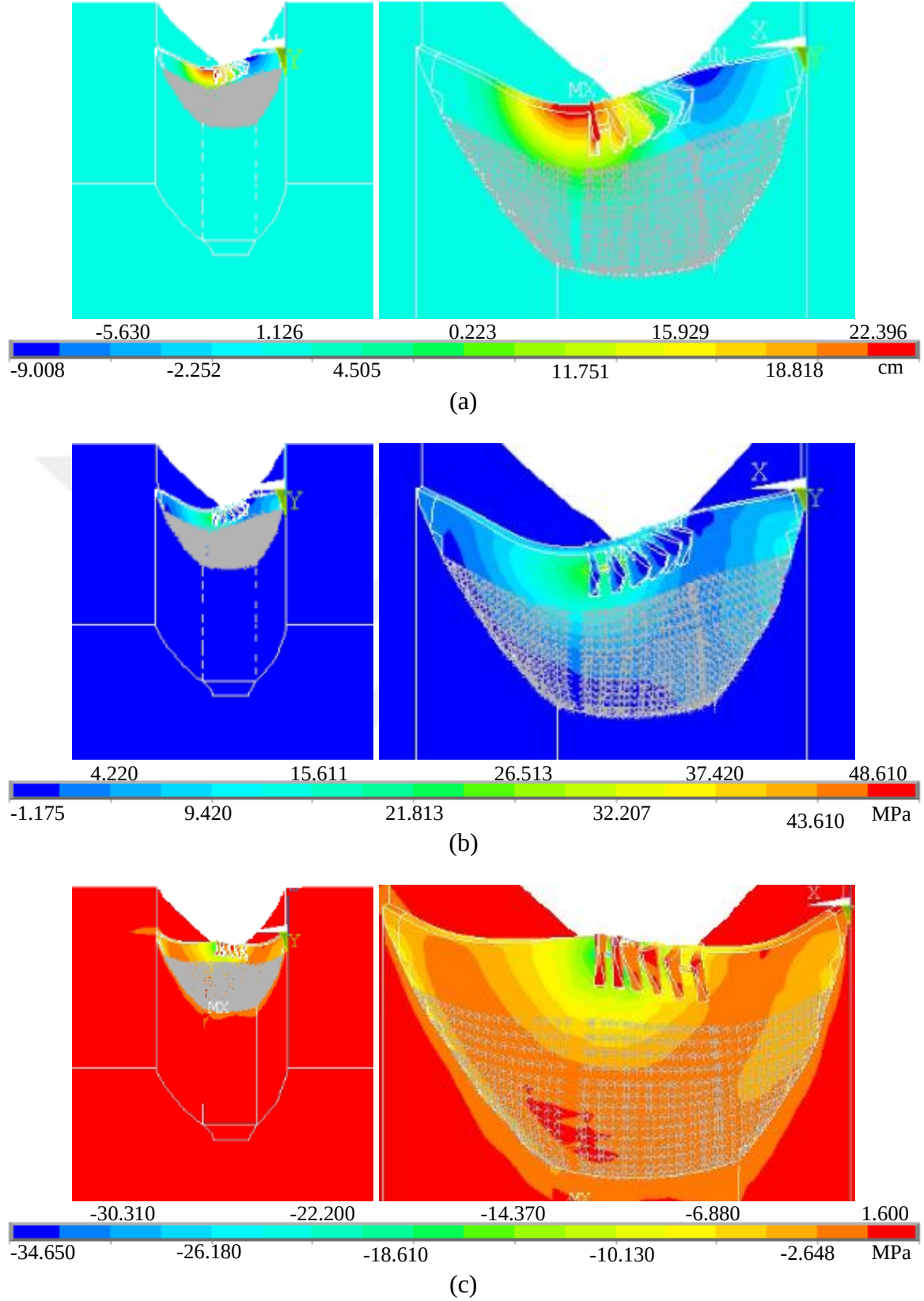
Şekil 95. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



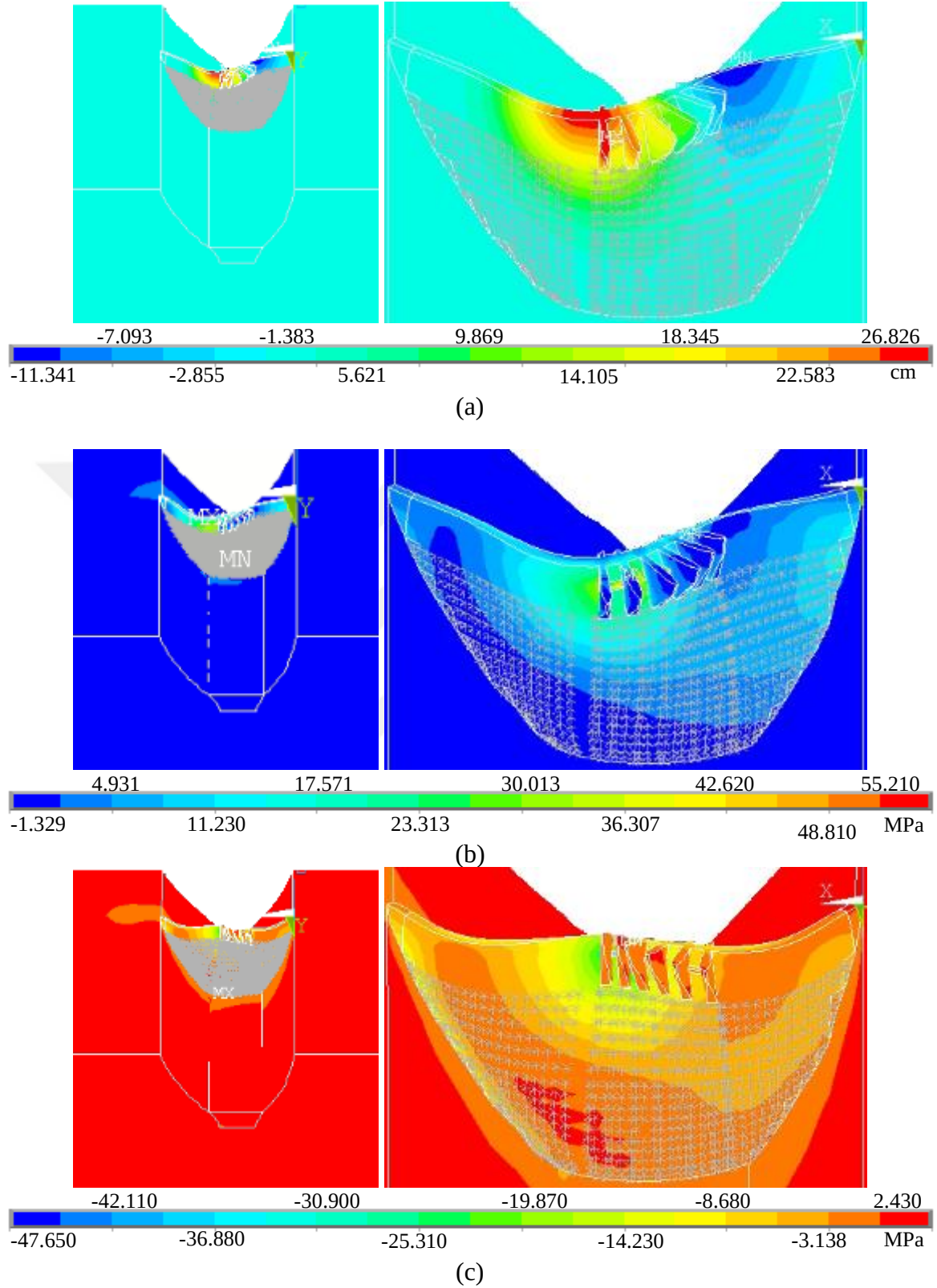
Şekil 96. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 97. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

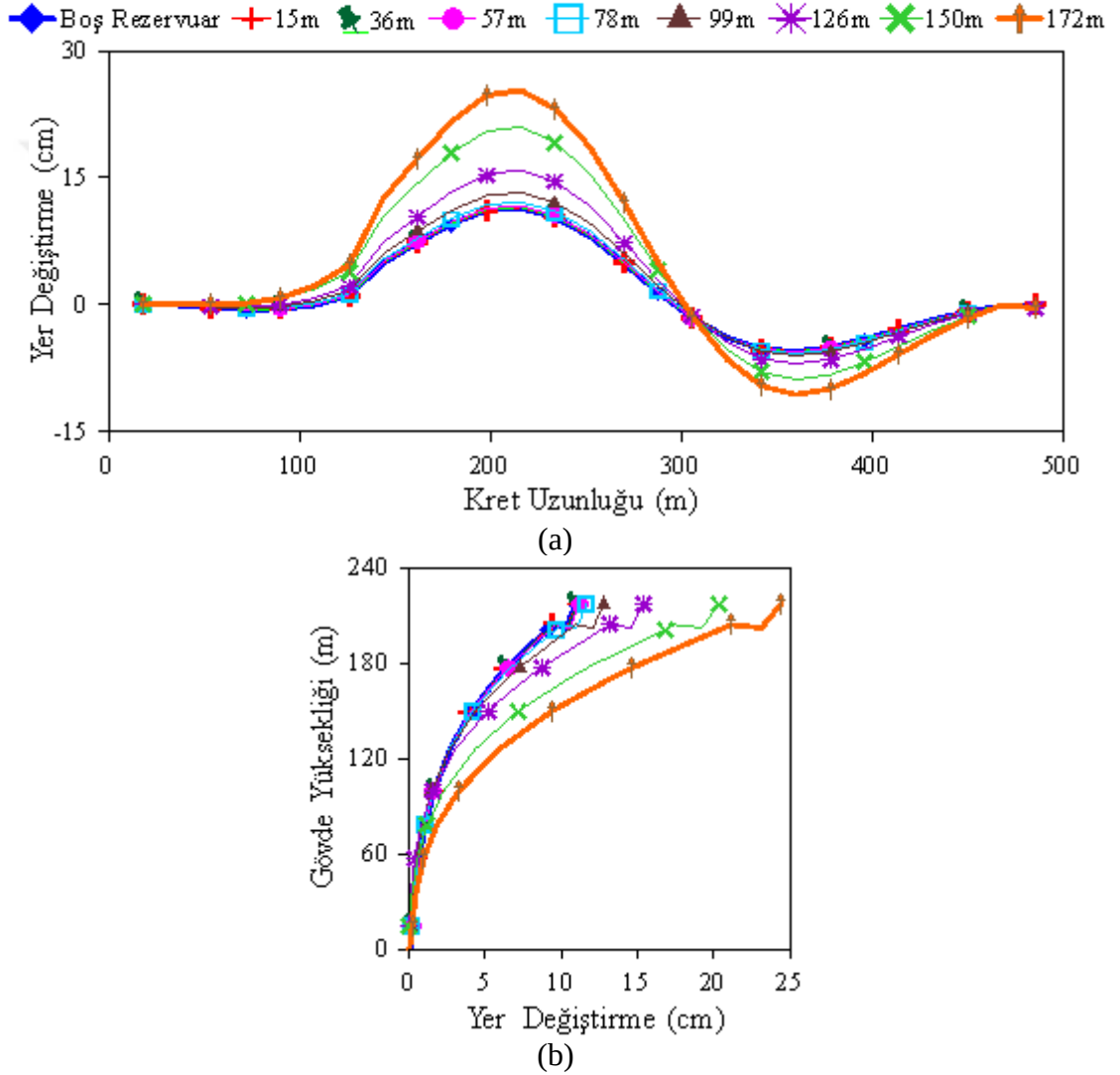


Şekil 98. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 99. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

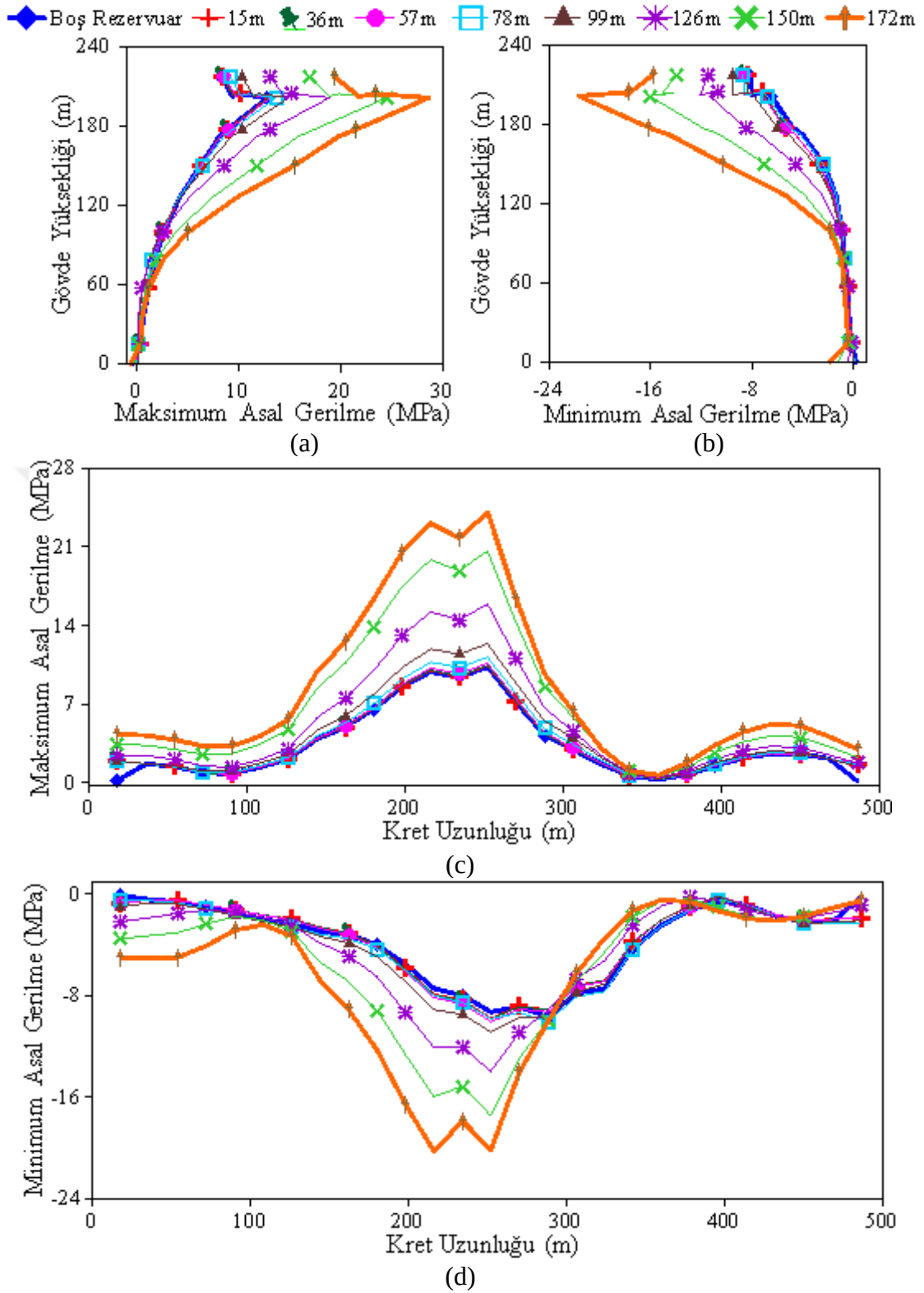
Şekil 92-99'da rezervuarın boş olması durumu ve sekiz farklı rezervuar su seviyesi olması durumu için Westergaard yaklaşımına göre modellenmiş sonlu eleman modellere ait dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 100'de ve ilgili değerler Tablo 34'te, asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 101'de ve ilgili değerler Tablo 35 ve Tablo 36'da verilmektedir.



Şekil 100. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme

Tablo 34. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	10,909	10,967	11,008	11,163	11,657	12,794	15,414	20,326	24,386
2304	10,320	10,373	10,409	10,551	11,008	12,069	14,533	19,202	23,109
2182	9,394	9,437	9,468	9,589	9,988	10,930	13,148	17,436	21,103
2007	9,070	9,110	9,139	9,252	9,629	10,528	12,659	16,810	20,393
1820	6,421	6,436	6,446	6,498	6,705	7,252	8,674	11,721	14,634
1657	5,946	5,956	5,964	6,006	6,181	6,663	7,954	10,793	13,579
1437	4,116	4,114	4,114	4,121	4,181	4,411	5,192	7,202	9,420
1233	2,704	2,699	2,696	2,686	2,665	2,698	3,078	4,379	5,949
1037	1,646	1,645	1,641	1,629	1,566	1,469	1,556	2,246	3,223
857	1,082	1,086	1,084	1,075	1,006	0,864	0,823	1,193	1,840
693	0,680	0,688	0,687	0,683	0,624	0,478	0,383	0,557	0,974
545	0,398	0,409	0,409	0,409	0,365	0,245	0,148	0,215	0,472
413	0,217	0,230	0,231	0,230	0,201	0,118	0,046	0,069	0,220
297	0,069	0,088	0,078	0,078	0,063	0,021	-0,014	-0,014	0,046
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,035	0,035	0,035	0,035	0,037	0,039	0,048	0,077	0,098
2351	-0,026	-0,026	-0,027	-0,026	-0,020	-0,006	0,035	0,149	0,194
2347	-0,294	-0,295	-0,297	-0,294	-0,276	-0,237	-0,165	0,044	0,072
2343	-0,513	-0,514	-0,514	-0,505	-0,463	-0,379	-0,253	0,129	0,178
2339	-0,482	-0,482	-0,476	-0,455	-0,377	-0,223	-0,005	0,658	0,814
2335	-0,001	0,002	0,019	0,055	0,181	0,430	0,799	1,875	2,268
2331	1,066	1,073	1,101	1,157	1,337	1,706	2,301	3,934	4,730
2323	4,944	4,960	5,008	5,100	5,388	6,054	7,368	10,476	12,598
2319	7,350	7,370	7,422	7,528	7,868	8,692	10,455	14,359	17,301
2315	9,601	9,628	9,680	9,801	10,191	11,163	13,370	17,982	21,697
2312	11,147	11,183	11,233	11,369	11,807	12,889	15,433	20,497	24,733
2310	11,433	11,479	11,524	11,669	12,134	13,255	15,902	20,996	25,306
2304	10,320	10,373	10,409	10,551	11,008	12,069	14,533	19,202	23,109
2298	8,110	8,164	8,188	8,315	8,728	9,647	11,676	15,522	18,654
2292	4,900	4,951	4,960	5,061	5,398	6,104	7,467	10,114	12,131
2286	1,422	1,465	1,458	1,525	1,761	2,216	2,835	4,155	4,962
2280	-1,587	-1,554	-1,573	-1,543	-1,420	-1,210	-1,258	-1,168	-1,450
2271	-3,853	-3,831	-3,859	-3,864	-3,850	-3,854	-4,414	-5,313	-6,429
2267	-5,205	-5,196	-5,229	-5,265	-5,345	-5,509	-6,384	-7,955	-9,574
2263	-5,519	-5,521	-5,555	-5,610	-5,748	-5,984	-6,955	-8,813	-10,58
2259	-5,039	-5,049	-5,080	-5,143	-5,298	-5,535	-6,438	-8,257	-9,898
2255	-4,064	-4,078	-4,104	-4,164	-4,307	-4,499	-5,231	-6,773	-8,106
2251	-2,896	-2,909	-2,930	-2,980	-3,092	-3,224	-3,747	-4,884	-5,828
2247	-1,756	-1,766	-1,780	-1,816	-1,890	-1,967	-2,287	-2,994	-3,548
2243	-0,799	-0,804	-0,813	-0,832	-0,873	-0,910	-1,063	-1,394	-1,624
2238	-0,166	-0,168	-0,171	-0,178	-0,194	-0,210	-0,027	-0,038	-0,027
2239	-0,005	-0,005	-0,006	-0,007	-0,012	-0,018	-0,255	-0,337	-0,360



Şekil 101. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler
 (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme

Tablo 35. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	8,260	8,335	8,413	8,602	9,158	10,355	13,048	17,014	19,355
2304	9,389	9,463	9,536	9,718	10,256	11,445	14,514	18,868	21,777
2182	10,138	10,187	10,256	10,404	10,856	11,945	15,166	19,812	23,465
2007	12,812	12,857	12,981	13,152	13,648	14,906	18,902	24,498	28,614
1820	8,882	8,910	8,940	9,044	9,409	10,295	13,068	17,436	21,500
1657	8,110	8,129	8,151	8,234	8,544	9,318	11,812	15,868	19,852
1437	6,248	6,246	6,250	6,273	6,415	6,871	8,576	11,849	15,493
1233	4,228	4,214	4,211	4,187	4,159	4,292	5,179	7,462	9,871
1037	2,630	2,611	2,606	2,553	2,392	2,246	2,505	3,742	4,972
857	1,774	1,758	1,751	1,695	1,485	1,208	1,196	1,871	2,535
693	1,153	1,144	1,136	1,087	0,884	0,576	0,476	0,849	1,188
545	0,677	0,677	0,670	0,641	0,485	0,226	0,170	0,383	0,560
413	0,296	0,303	0,312	0,293	0,213	0,105	0,115	0,224	0,389
297	-0,398	0,066	-0,070	-0,054	0,026	0,169	-0,279	-0,287	-0,583
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,246	1,937	1,943	1,949	1,942	1,972	2,487	3,428	4,324
2351	1,691	1,689	1,688	1,687	1,673	1,696	2,419	3,351	4,231
2347	1,462	1,460	1,454	1,452	1,442	1,478	2,077	2,981	3,841
2343	0,885	0,885	0,874	0,880	0,915	1,049	1,505	2,514	3,287
2339	0,832	0,836	0,839	0,860	0,940	1,147	1,402	2,581	3,262
2335	1,396	1,399	1,413	1,437	1,523	1,749	2,059	3,421	4,152
2331	2,124	2,128	2,150	2,179	2,282	2,558	3,056	4,736	5,641
2323	3,889	3,893	3,926	3,974	4,156	4,639	5,790	8,387	9,871
2319	4,966	4,974	5,011	5,074	5,318	5,951	7,532	10,655	12,551
2315	6,558	6,576	6,622	6,713	7,046	7,883	10,032	13,861	16,357
2312	8,566	8,606	8,667	8,799	9,235	10,269	13,089	17,472	20,533
2310	9,889	9,955	10,031	10,203	10,732	11,912	15,201	19,843	23,090
2304	9,389	9,463	9,536	9,718	10,256	11,445	14,514	18,868	21,777
2298	10,297	10,379	10,436	10,623	11,172	12,377	15,903	20,640	24,058
2292	7,166	7,234	7,284	7,449	7,925	8,887	11,111	14,272	16,418
2286	4,241	4,291	4,325	4,456	4,847	5,522	6,654	8,611	9,716
2280	2,955	2,993	3,017	3,123	3,456	4,020	4,584	5,845	6,376
2271	1,652	1,680	1,688	1,754	1,962	2,257	2,410	3,019	3,072
2267	0,599	0,611	0,617	0,644	0,709	0,778	0,828	1,045	1,067
2263	0,314	0,315	0,322	0,329	0,333	0,329	0,434	0,553	0,695
2259	0,732	0,726	0,732	0,737	0,759	0,854	1,065	1,360	1,766
2255	1,552	1,543	1,548	1,557	1,619	1,804	2,119	2,700	3,380
2251	2,203	2,197	2,202	2,216	2,291	2,481	2,863	3,664	4,542
2247	2,615	2,613	2,618	2,634	2,697	2,840	3,264	4,213	5,236
2243	2,594	2,597	2,600	2,613	2,639	2,690	3,119	4,056	5,087
2238	2,159	2,165	2,164	2,168	2,157	2,131	2,477	3,228	4,119
2239	0,160	1,699	1,696	1,692	1,623	1,475	1,767	2,286	2,997

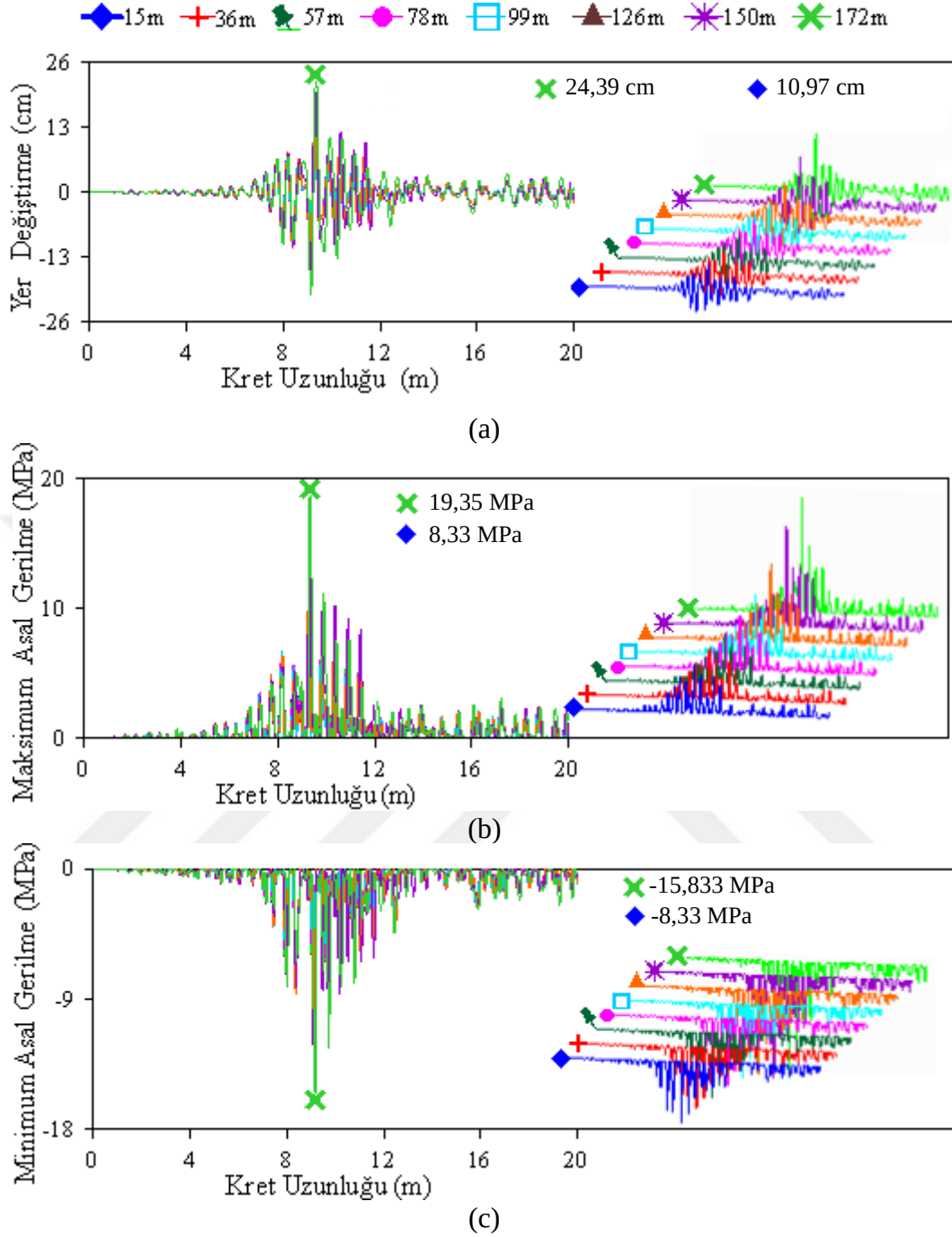
Tablo 36. Yusufeli Barajının Westergaard yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	-8,213	-8,333	-8,429	-8,675	-8,793	-9,498	-11,50	-13,96	-15,833
2304	-7,980	-8,333	-8,414	-8,639	-8,530	-9,467	-12,08	-15,15	-17,876
2182	-6,734	-7,170	-7,221	-7,382	-7,138	-8,055	-10,74	-14,11	-17,738
2007	-6,485	-6,960	-7,002	-7,152	-6,839	-7,860	-11,36	-16,07	-21,665
1820	-4,779	-5,369	-5,357	-5,405	-5,033	-5,997	-8,545	-11,94	-16,112
1657	-4,021	-4,585	-4,564	-4,588	-4,219	-5,107	-7,415	-10,56	-14,563
1437	-2,357	-2,804	-2,767	-2,732	-2,406	-3,071	-4,640	-7,033	-10,287
1233	-1,391	-1,629	-1,600	-1,556	-1,357	-1,746	-2,454	-3,838	-5,385
1037	-0,892	-0,945	-0,935	-0,912	-0,841	-0,998	-1,045	-1,546	-1,860
857	-0,691	-0,653	-0,656	-0,656	-0,664	-0,708	-0,528	-0,796	-0,942
693	-0,531	-0,449	-0,461	-0,479	-0,543	-0,517	-0,383	-0,616	-0,742
545	-0,358	-0,270	-0,287	-0,319	-0,397	-0,333	-0,323	-0,488	-0,574
413	-0,179	-0,113	-0,132	-0,149	-0,226	-0,164	-0,191	-0,385	-0,404
297	0,200	-0,040	0,001	0,018	0,095	0,008	-0,411	-1,226	-1,854
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	-0,087	-0,730	-0,730	-0,743	-0,528	-0,989	-2,154	-3,501	-5,068
2351	-0,424	-0,434	-0,430	-0,437	-0,505	-0,684	-1,860	-3,273	-4,984
2347	-0,600	-0,513	-0,510	-0,518	-0,691	-0,790	-1,504	-3,027	-4,991
2343	-1,034	-0,832	-0,832	-0,845	-1,157	-1,190	-1,248	-2,341	-4,056
2339	-1,517	-1,241	-1,245	-1,266	-1,671	-1,692	-1,385	-1,758	-2,830
2335	-1,957	-1,629	-1,637	-1,668	-2,134	-2,160	-1,854	-2,047	-2,408
2331	-2,344	-1,968	-1,983	-2,027	-2,540	-2,574	-2,439	-2,920	-3,296
2323	-2,908	-2,585	-2,620	-2,698	-3,162	-3,321	-3,857	-5,362	-6,806
2319	-3,211	-3,056	-3,098	-3,195	-3,512	-3,843	-4,846	-6,873	-9,123
2315	-3,969	-4,028	-4,080	-4,206	-4,344	-4,922	-6,516	-9,141	-12,297
2312	-5,540	-5,856	-5,921	-6,092	-6,015	-6,904	-9,30	-12,65	-16,583
2310	-7,423	-7,870	-7,953	-8,175	-8,011	-9,110	-12,08	-15,96	-20,264
2304	-7,980	-8,333	-8,414	-8,639	-8,530	-9,467	-12,08	-15,15	-17,876
2298	-9,288	-9,778	-9,852	-10,07	-9,826	-10,87	-13,96	-17,46	-20,160
2292	-8,872	-8,799	-8,868	-9,062	-9,340	-9,695	-10,90	-12,93	-14,042
2286	-9,686	-9,075	-9,136	-9,290	-10,07	-9,802	-9,150	-9,910	-10,050
2280	-7,778	-7,188	-7,228	-7,346	-8,104	-7,731	-6,678	-6,867	-6,262
2271	-7,476	-6,772	-6,788	-6,861	-7,670	-7,075	-5,232	-4,549	-3,445
2267	-4,231	-3,693	-3,696	-3,730	-4,333	-3,821	-2,387	-1,815	-1,271
2263	-2,443	-2,033	-2,028	-2,039	-2,481	-2,043	-0,918	-0,531	-0,446
2259	-1,264	-0,953	-0,944	-0,938	-1,243	-0,868	-0,251	-0,365	-0,601
2255	-0,488	-0,239	-0,227	-0,210	-0,410	-0,171	-0,528	-1,057	-1,333
2251	-0,845	-0,821	-0,819	-0,810	-0,842	-0,932	-1,249	-1,746	-1,928
2247	-1,705	-1,612	-1,614	-1,615	-1,753	-1,828	-1,809	-2,046	-2,107
2243	-2,187	-2,015	-2,019	-2,028	-2,262	-2,283	-1,887	-1,801	-1,754
2238	-2,202	-1,950	-1,954	-1,962	-2,270	-2,189	-1,472	-1,174	-1,080
2239	-0,241	-1,854	-1,858	-1,869	-2,331	-2,078	-0,924	-0,558	-0,533

Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumu ve Westergaard yaklaşımına göre oluşturulan sekiz farklı su seviyesi durumuna ait modellerin dinamik analizleri sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri Şekil 100 (a) ve (b)'de verilmektedir. II-II kesiti boyunca elde edilen yer değiştirme değerleri benzer eğilimde değişmekte olup, maksimum yer değiştirmenin 172 m olan maksimum su seviyesinde olduğu görülmektedir. İlk beş su seviyesine ait yer değiştirmelerin rezervuarın boş durumuna ait sonuçlara oldukça yakın olduğu ancak su seviyesinin 126m, 150m ve 172m olması durumlarında yer değiştirme değerlerinin daha fazla artış gösterdiği elde edilmiştir. I-I kesiti boyunca ise tüm su seviyelerinde temelde minimum olan yer değiştirme değerlerinin gövde yüksekliği boyunca arttığı, seçilen kesit boyunca su seviyesindeki artışın yer değiştirme değerlerini de arttırdığı görülmektedir.

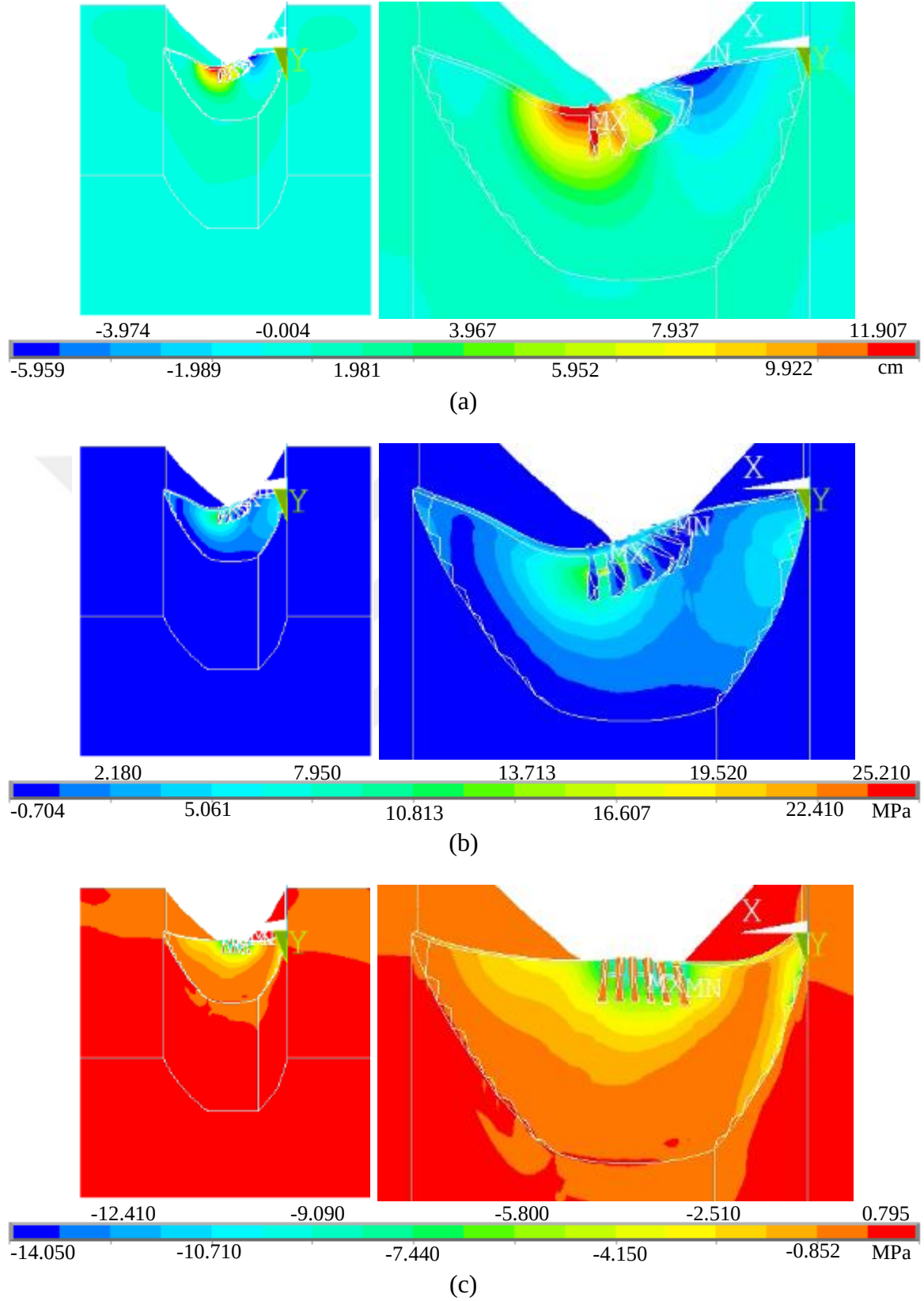
Yusufeli Barajı'na ait asal gerilmelerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla Şekil 101 (a) incelendiğinde, rezervuarın boş ve Westergaard yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesinde elde edilen maksimum asal gerilmeler benzer eğilimde davranış göstermekte ve gövde yüksekliği boyunca artmakta, krete yakın bölgede azalmaktadır. Minimum asal gerilmeler incelendiğinde (Şekil 101 (b)) ise ilk 99 m'lik su seviyesine kadar değerlerin benzer eğilimde ve birbirine yakın olduğu ancak 126m, 150m ve 172m su seviyeleri için minimum gerilmelerin gövdede hızlı bir şekilde azaldığı kret bölgesinde ise arttığı elde edilmiştir. II-II kesiti için, Şekil 101 (c)'den görüldüğü üzere, maksimum asal gerilmeler yamaçtan itibaren 100 m'lik mesafeden sonra kretin orta bölgesine kadar artmakta, orta bölgeyi geçtikten sonra azalmaya başlamaktadır. Tüm su seviyelerinde benzer eğilim gösteren maksimum asal gerilmelerin 126m'lik su seviyesinden itibaren daha fazla artış gösterdiği ve maksimum değer 172m'lik su seviyesinde olduğu görülmektedir. II-II kesiti boyunca minimum asal gerilmeler (Şekil 101 (d)) ilk 99 m'lik su seviyesi için aynı eğilimdedir. 126m, 150m ve 172m'lik su seviyelerinde ise minimum gerilme değerlerinin olduğu bölgenin bir miktar kaydığı ve mutlak değerce maksimum olan minimum asal gerilmelerin 172 m su seviyesinde olduğu görülmektedir.

Rezervuarın boş ve Westergaard yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için yapılan deprem analizi boyunca 2426 nolu düğüm noktasında elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 102'de verilmektedir.

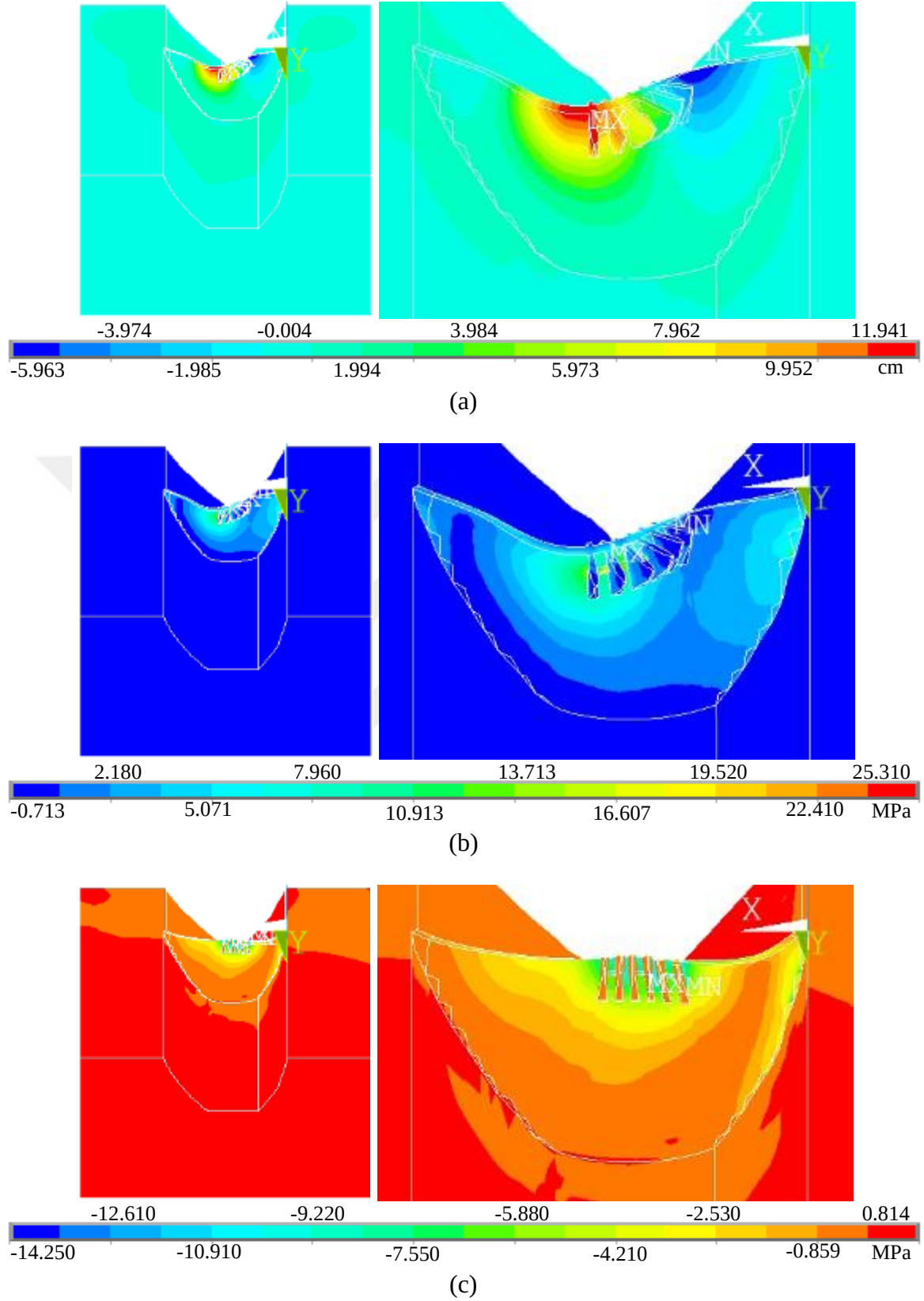


Şekil 102. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması ve Westergaard yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için dinamik analizi sonucu 2426 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

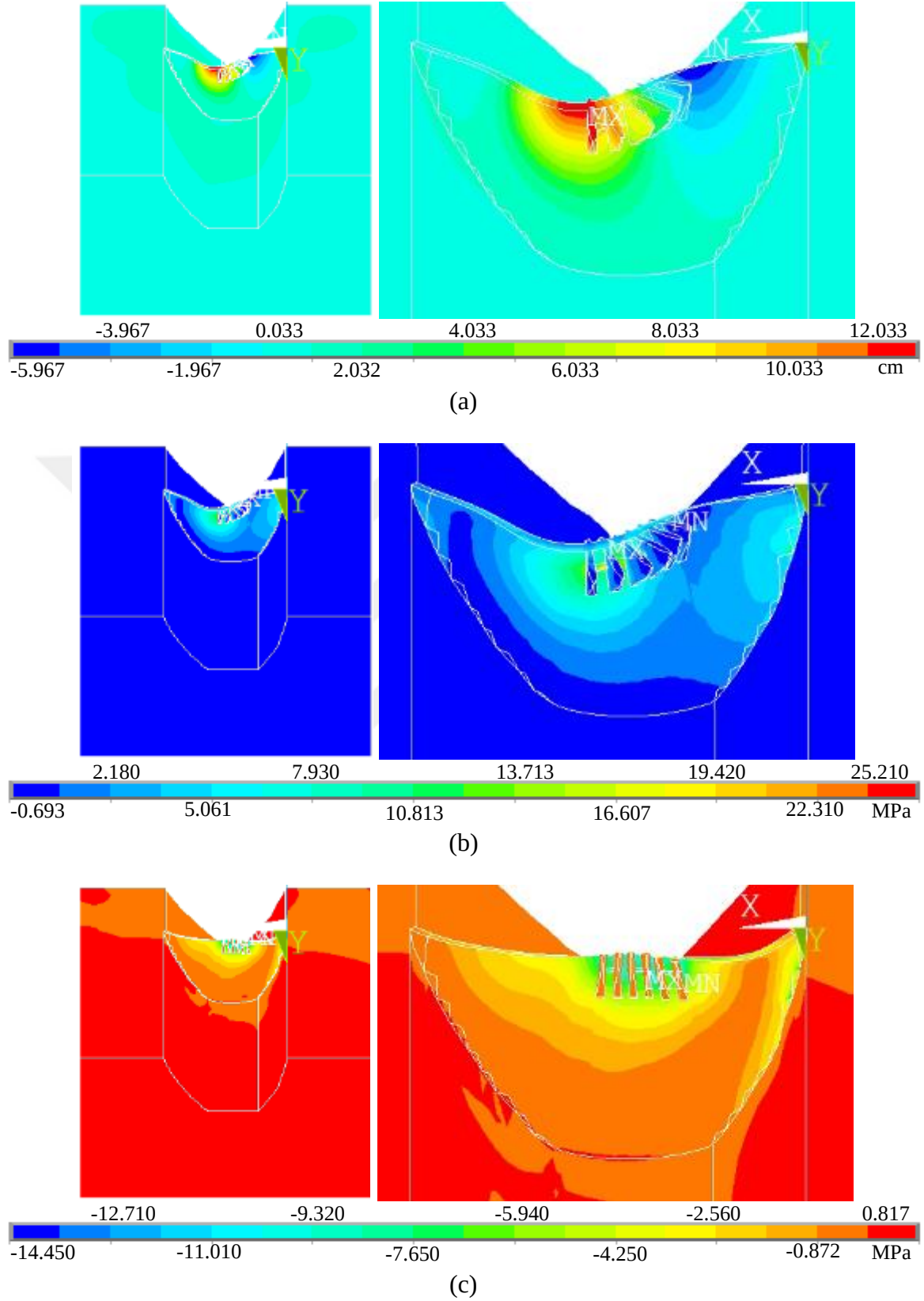
Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre oluşturulmuş farklı rezervuar su seviyelerine ait sonlu eleman modellerinde dinamik analizler tekrar edilmiştir. Şekil 103-110'da Euler yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı rezervuar su seviyeleri için baraj gövdesinde oluşan yer değiştirme ve gerilmelere ait kontur diyagramları verilmektedir.



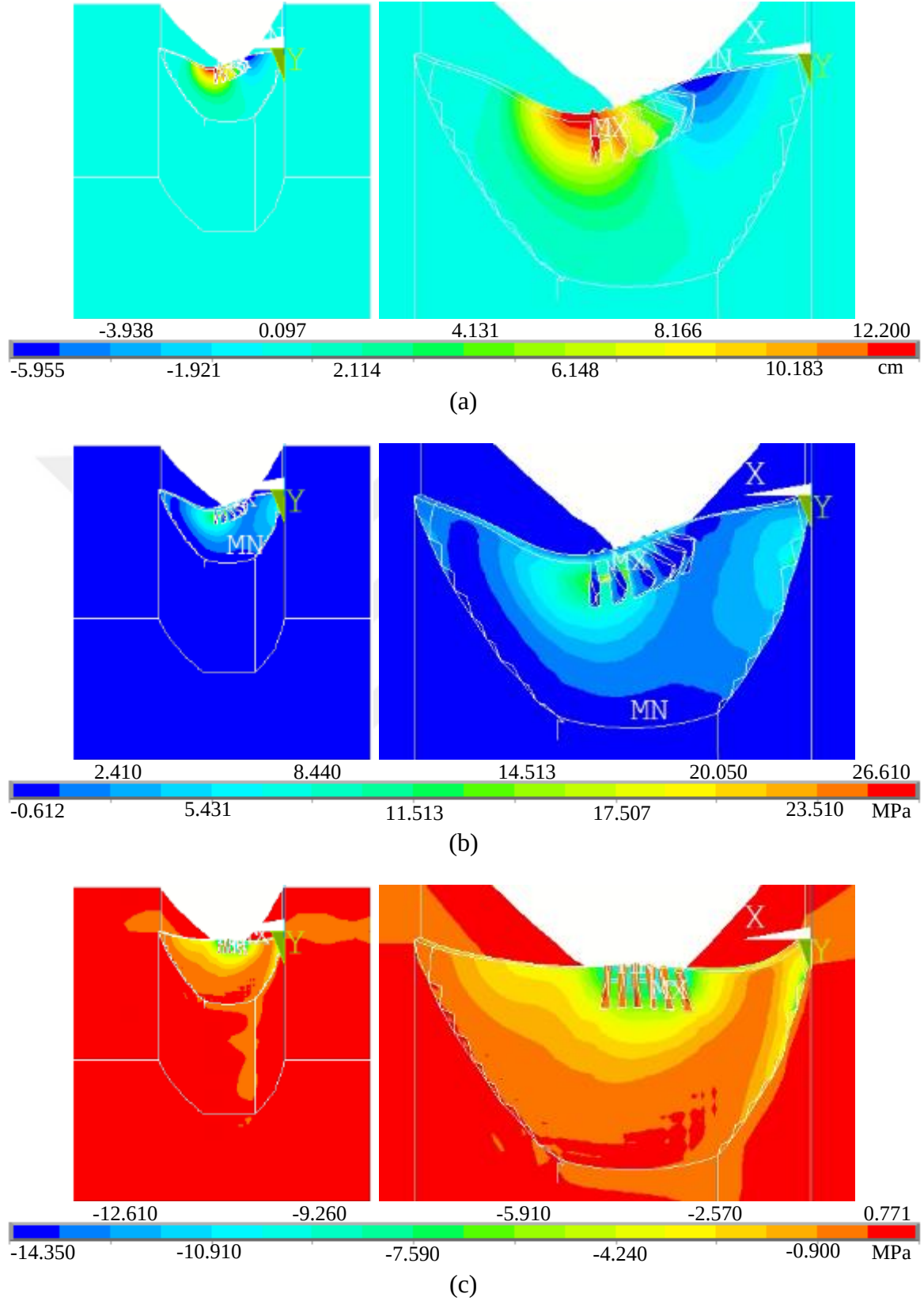
Şekil 103. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



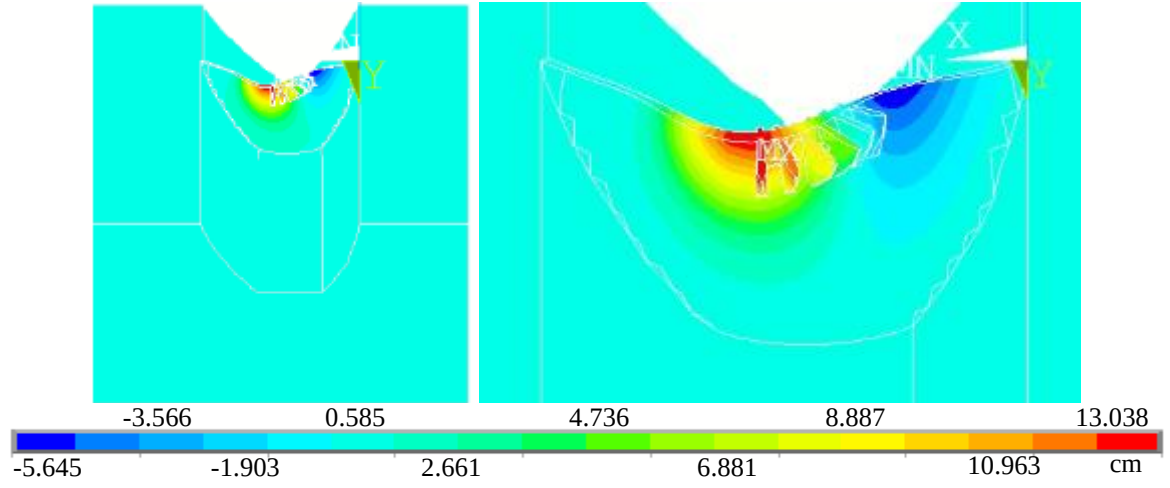
Şekil 104. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



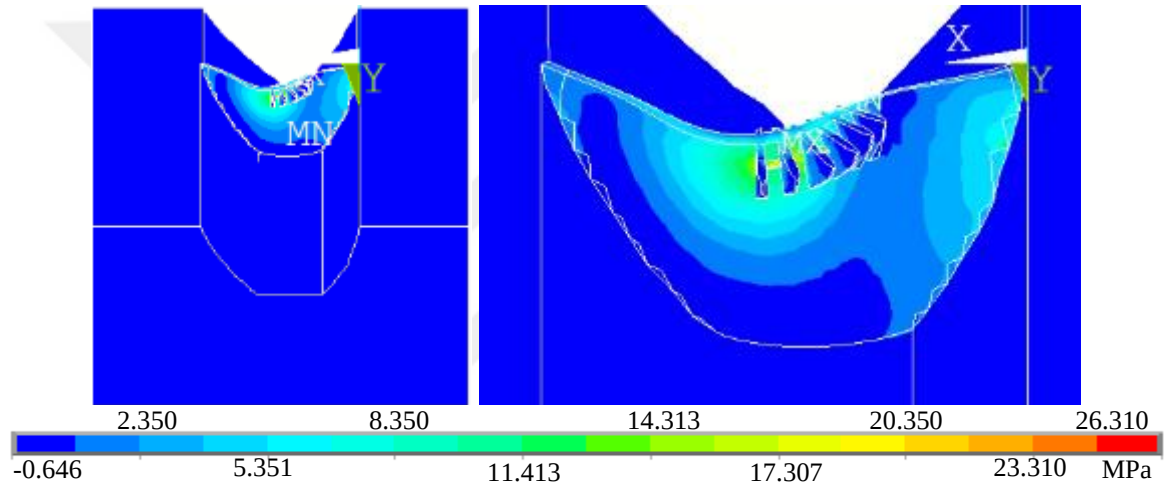
Şekil 105. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



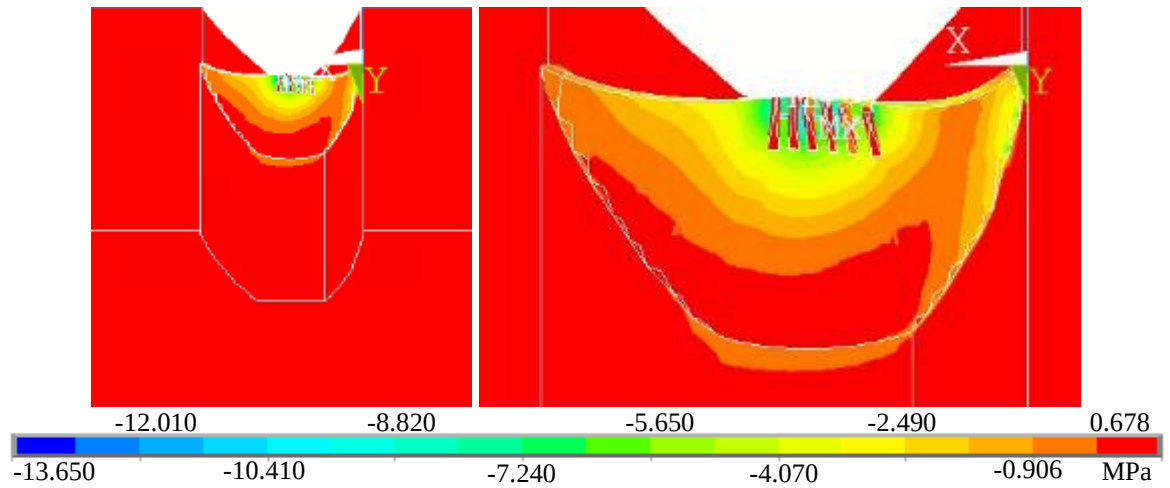
Şekil 106. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



(a)

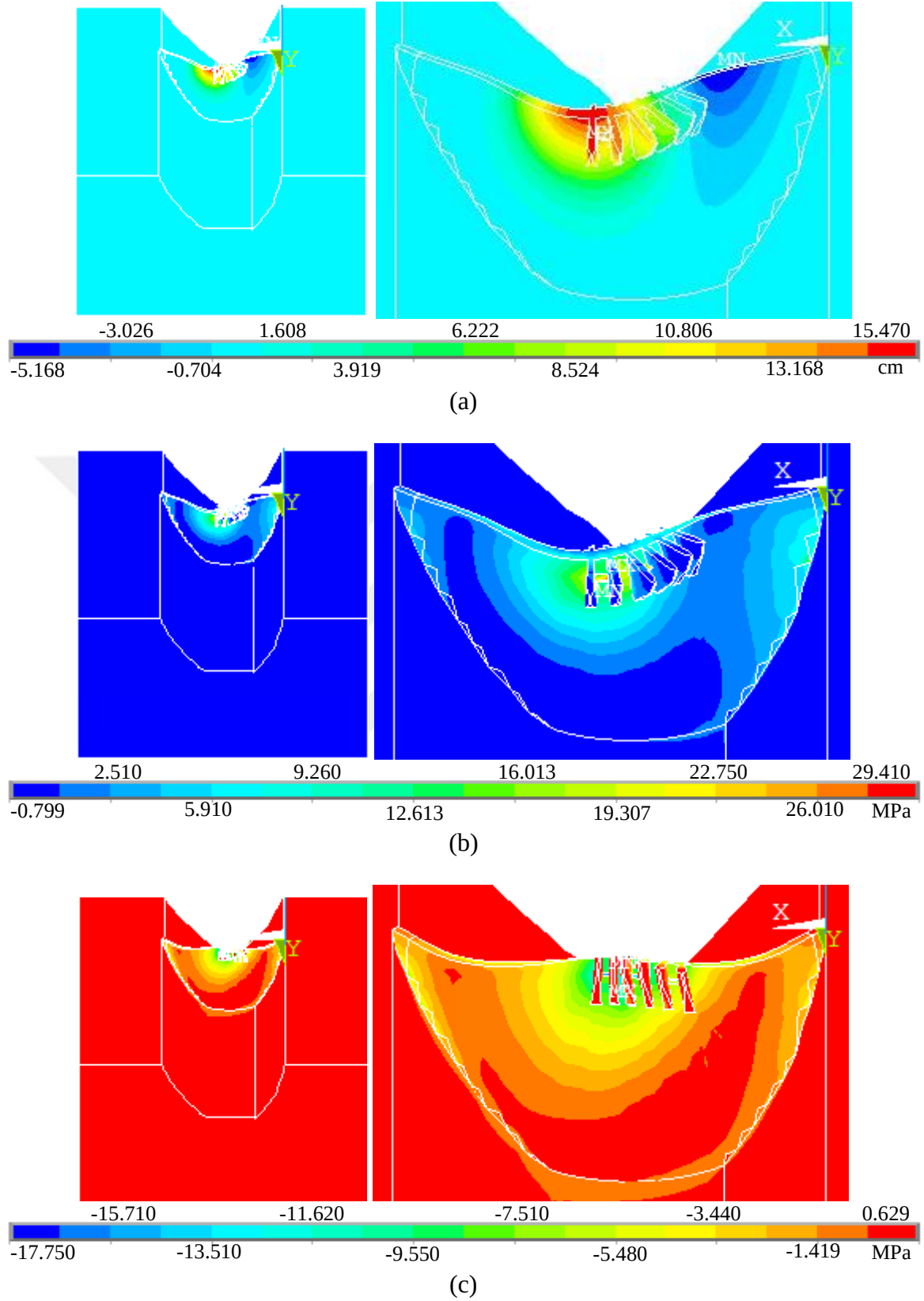


(b)

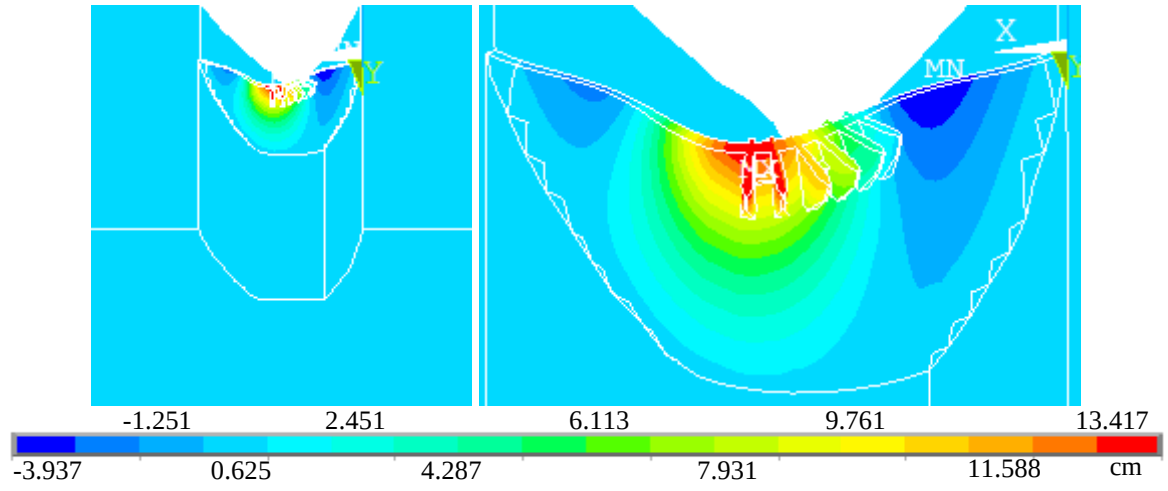


(c)

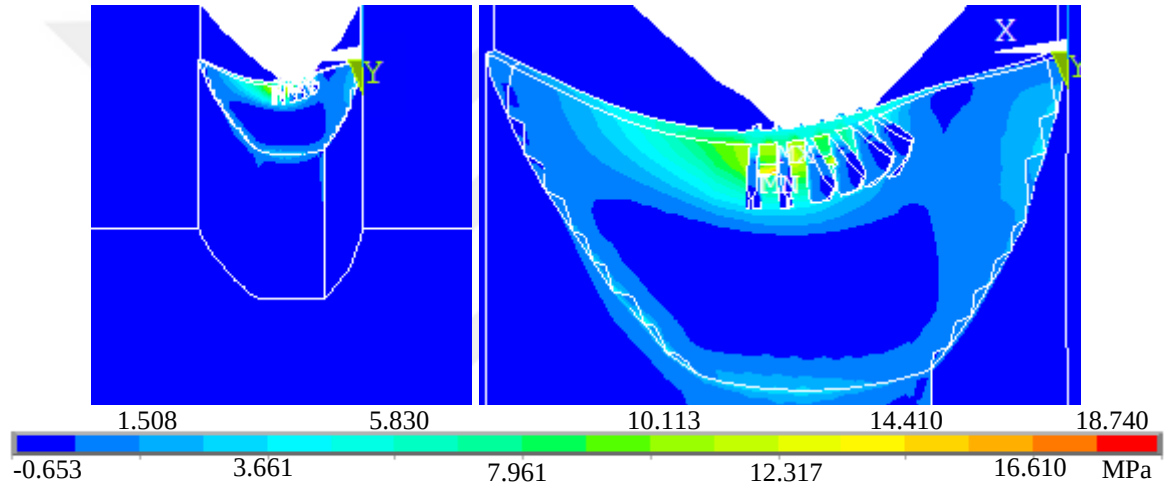
Şekil 107. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



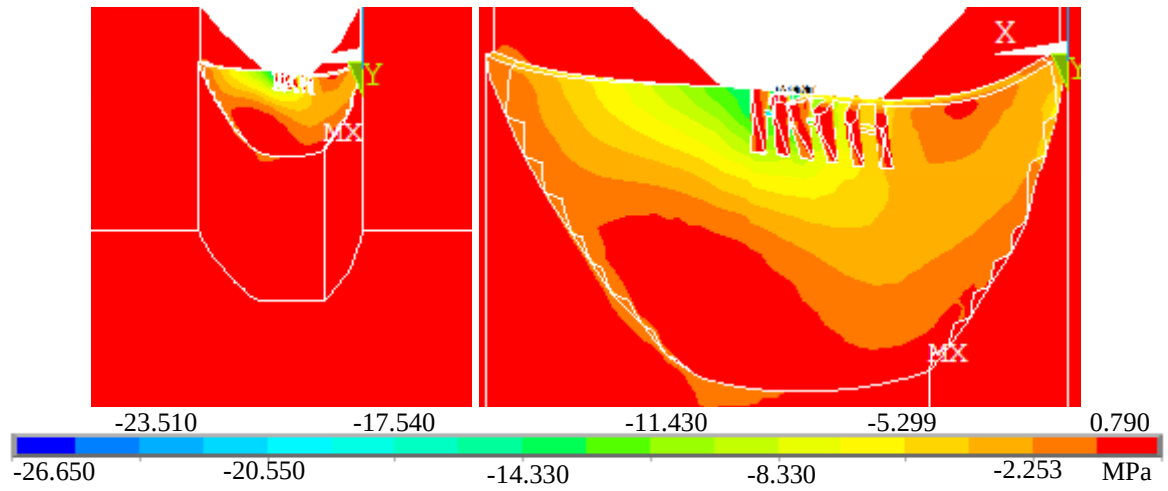
şekil 108. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



(a)

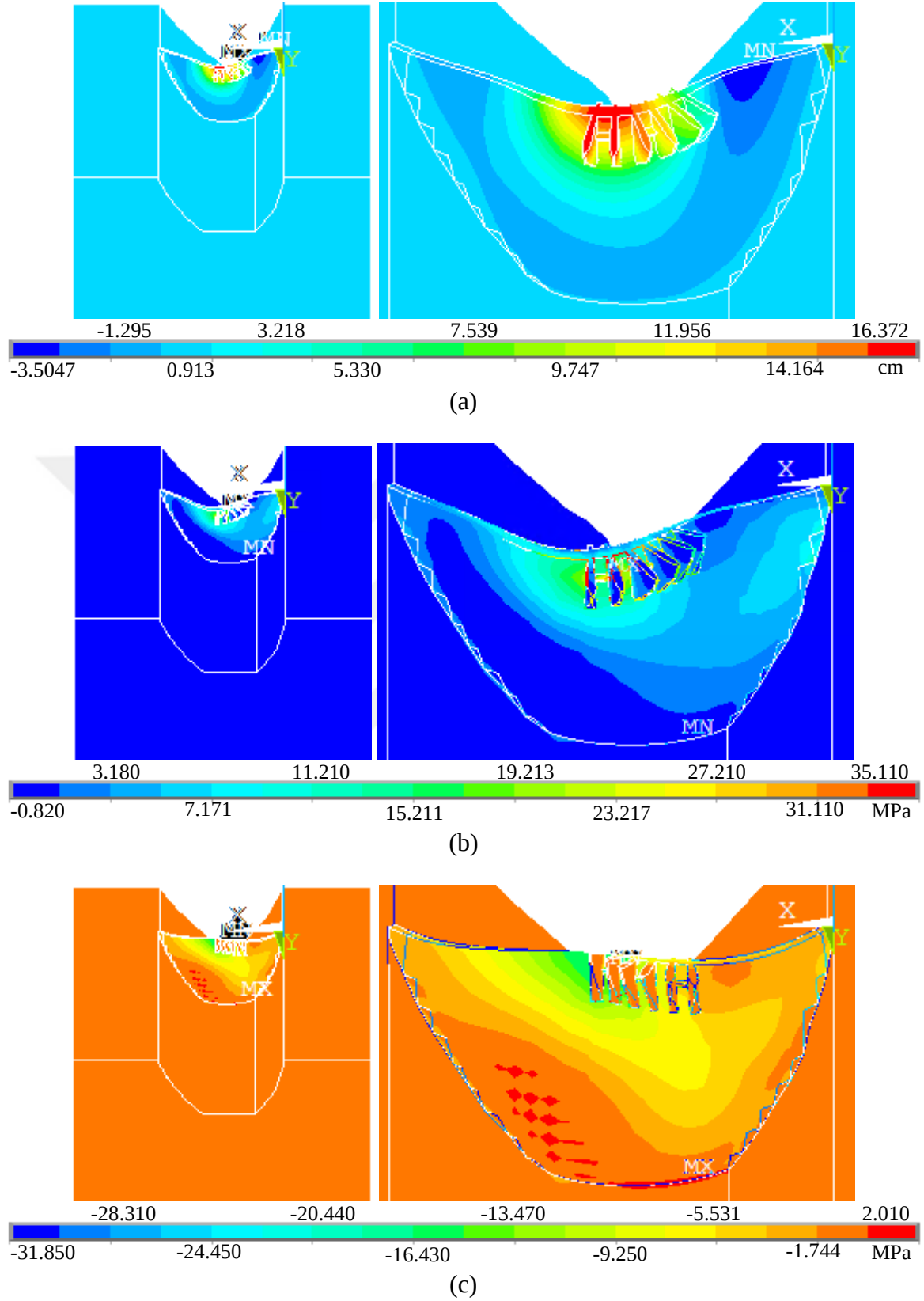


(b)



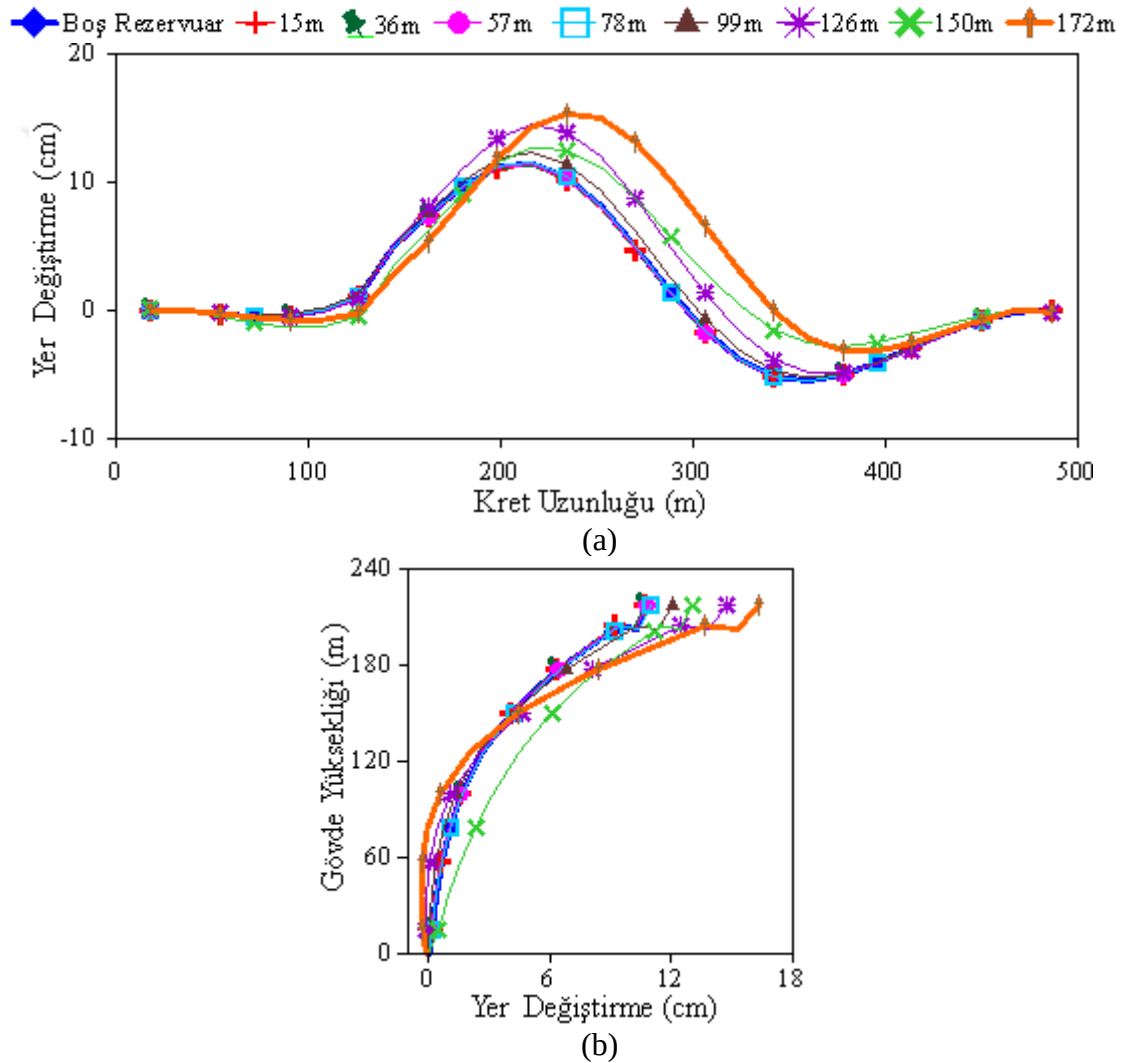
(c)

Şekil 109. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



şekil 110. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

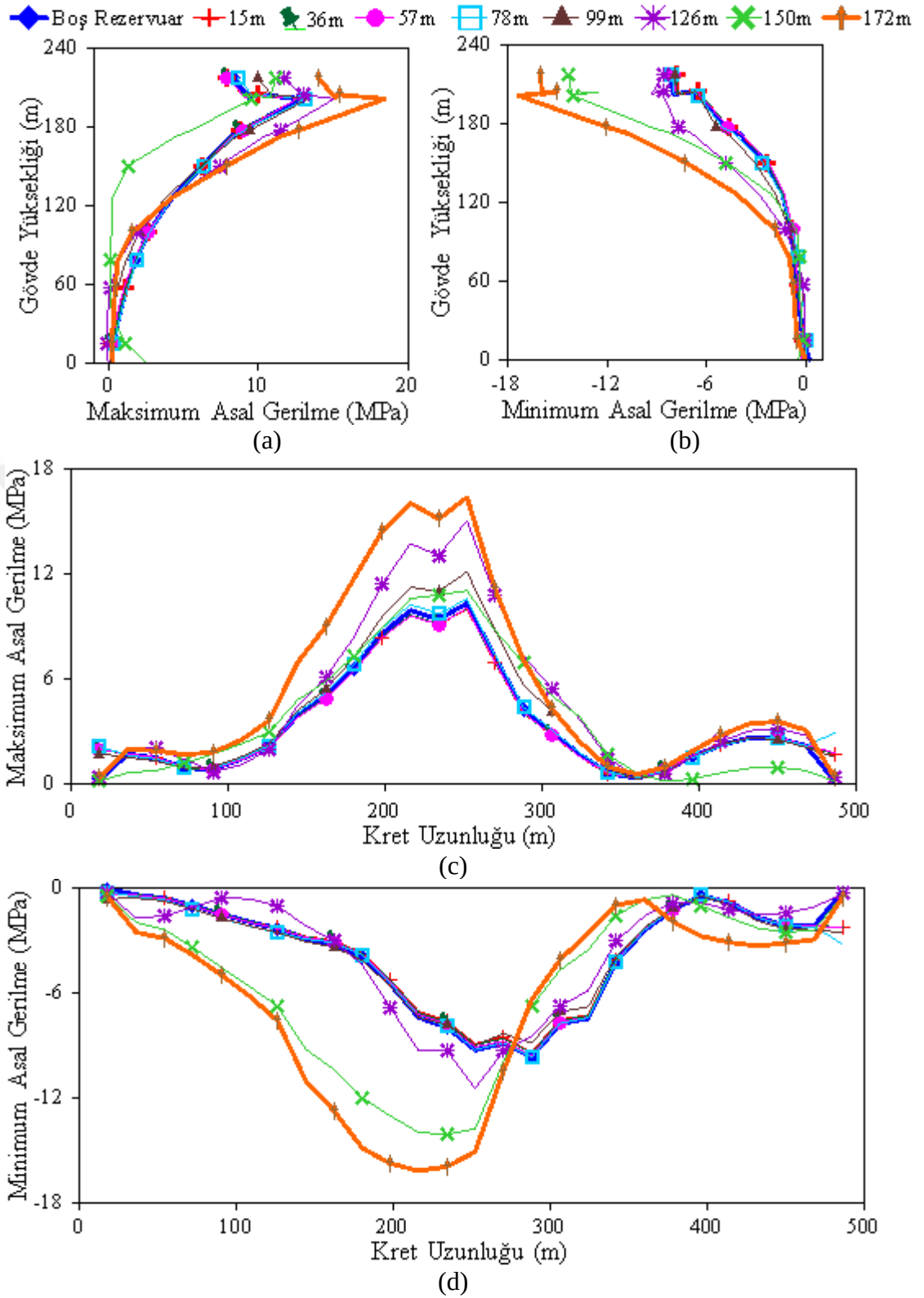
Şekil 91 ve Şekil 103-110'da rezervuarın boş olması durumu ve sekiz farklı rezervuar su seviyesi olması durumu için Euler yaklaşımına göre modellenmiş sonlu eleman modellere ait dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 111'de ve ilgili değerler Tablo 37'de, asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 112'de ve ilgili değerler Tablo 38 ve Tablo 39'da verilmektedir.



Şekil 111. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme

Tablo 37. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	10,909	10,684	10,717	10,817	10,987	12,059	14,752	13,044	16,325
2304	10,320	10,114	10,143	10,235	10,404	11,374	13,880	12,445	15,298
2182	9,394	9,218	9,240	9,320	9,487	10,298	12,506	11,499	13,683
2007	9,070	8,905	8,925	9,001	9,166	9,918	12,018	11,165	13,101
1820	6,421	6,342	6,344	6,386	6,539	6,831	8,076	8,473	8,442
1657	5,946	5,880	5,880	5,915	6,061	6,274	7,362	7,982	7,595
1437	4,116	4,094	4,087	4,096	4,214	4,143	4,650	6,088	4,448
1233	2,704	2,696	2,691	2,680	2,767	2,515	2,585	4,538	2,121
1037	1,646	1,630	1,632	1,611	1,672	1,341	1,116	3,195	0,575
857	1,082	1,054	1,061	1,041	1,088	0,762	0,442	2,333	-0,041
693	0,680	0,641	0,650	0,636	0,676	0,392	0,072	1,598	-0,300
545	0,398	0,351	0,361	0,355	0,384	0,172	-0,090	0,994	-0,344
413	0,217	0,164	0,174	0,171	0,191	0,056	-0,121	0,534	-0,270
297	0,069	-0,012	-0,008	-0,011	-0,001	-0,035	-0,082	0,029	-0,115
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,035	0,034	0,034	0,035	0,035	0,032	0,028	0,037	0,012
2351	-0,026	-0,032	-0,032	-0,032	-0,021	-0,011	-0,016	-0,073	-0,043
2347	-0,294	-0,304	-0,305	-0,309	-0,275	-0,227	-0,267	-0,516	-0,285
2343	-0,513	-0,530	-0,532	-0,538	-0,482	-0,391	-0,507	-1,022	-0,575
2339	-0,482	-0,512	-0,512	-0,519	-0,450	-0,319	-0,545	-1,362	-0,789
2335	-0,001	-0,048	-0,046	-0,053	0,018	0,179	-0,151	-1,267	-0,751
2331	1,066	1,000	1,005	1,000	1,064	1,243	0,875	-0,500	-0,263
2323	4,944	4,849	4,865	4,871	4,929	5,139	5,124	3,393	2,740
2319	7,350	7,245	7,264	7,285	7,355	7,616	8,033	6,196	5,339
2315	9,601	9,482	9,504	9,547	9,642	10,008	11,000	9,093	8,511
2312	11,147	11,003	11,029	11,095	11,222	11,765	13,387	11,478	11,772
2310	11,433	11,256	11,285	11,370	11,523	12,289	14,455	12,688	14,264
2304	10,320	10,114	10,143	10,235	10,404	11,374	13,880	12,445	15,298
2298	8,110	7,885	7,911	8,000	8,176	9,286	11,953	11,120	14,955
2292	4,900	4,674	4,694	4,768	4,941	6,095	8,716	8,701	13,062
2286	1,422	1,213	1,228	1,281	1,442	2,534	4,927	5,791	10,119
2280	-1,587	-1,758	-1,749	-1,714	-1,584	-0,656	1,319	2,890	6,568
2271	-3,853	-3,974	-3,970	-3,951	-3,864	-3,153	-1,686	0,377	3,073
2267	-5,205	-5,266	-5,267	-5,262	-5,222	-4,764	-3,870	-1,547	-0,113
2263	-5,519	-5,529	-5,535	-5,541	-5,544	-5,283	-4,878	-2,576	-2,219
2259	-5,039	-5,017	-5,025	-5,040	-5,073	-4,934	-4,882	-2,824	-3,173
2255	-4,064	-4,028	-4,037	-4,057	-4,105	-4,029	-4,174	-2,505	-3,173
2251	-2,896	-2,863	-2,871	-2,892	-2,938	-2,891	-3,096	-1,867	-2,557
2247	-1,756	-1,733	-1,739	-1,756	-1,793	-1,761	-1,930	-1,128	-1,669
2243	-0,799	-0,789	-0,792	-0,802	-0,825	-0,807	-0,894	-0,455	-0,791
2238	-0,166	-0,164	-0,165	-0,167	-0,179	-0,175	-0,004	0,044	-0,007
2239	-0,005	-0,004	-0,004	-0,004	-0,009	-0,011	-0,183	0,004	-0,159



Şekil 112. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme

Tablo 38. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	8,260	7,924	7,966	7,907	8,596	9,966	11,730	11,147	13,974
2304	9,389	9,073	9,114	9,085	9,698	10,967	13,029	10,766	15,113
2182	10,138	9,938	9,968	9,980	10,407	11,118	13,066	8,866	15,396
2007	12,812	12,600	12,631	12,596	13,165	13,324	15,068	9,558	18,439
1820	8,882	8,783	8,785	8,931	9,079	9,450	11,476	5,546	12,695
1657	8,110	8,050	8,047	8,196	8,276	8,495	10,330	4,442	11,399
1437	6,248	6,274	6,259	6,367	6,342	6,150	7,382	1,276	7,865
1233	4,228	4,281	4,265	4,270	4,288	3,799	4,280	0,241	4,226
1037	2,630	2,671	2,662	2,571	2,693	2,019	1,839	0,168	1,546
857	1,774	1,786	1,784	1,659	1,856	1,140	0,677	0,080	0,593
693	1,153	1,129	1,134	1,012	1,256	0,593	0,066	0,075	0,402
545	0,677	0,618	0,626	0,533	0,766	0,250	-0,099	0,187	0,319
413	0,296	0,233	0,251	0,208	0,344	0,051	-0,132	1,110	0,188
297	-0,398	0,033	0,031	0,035	0,041	0,061	-0,056	2,446	0,271
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,246	1,931	1,935	1,944	2,118	1,705	0,329	0,150	0,374
2351	1,691	1,691	1,692	1,705	1,610	1,483	2,073	0,604	1,955
2347	1,462	1,468	1,467	1,489	1,402	1,280	1,995	0,750	1,875
2343	0,885	0,888	0,886	0,924	0,888	0,857	1,378	1,162	1,649
2339	0,832	0,802	0,806	0,817	0,872	0,954	0,672	1,671	1,786
2335	1,396	1,349	1,355	1,343	1,430	1,523	1,075	2,250	2,482
2331	2,124	2,064	2,071	2,043	2,175	2,271	1,923	2,951	3,603
2323	3,889	3,806	3,814	3,768	4,039	4,180	4,436	4,771	6,918
2319	4,966	4,865	4,875	4,829	5,179	5,392	6,077	5,818	8,974
2315	6,558	6,421	6,437	6,391	6,840	7,194	8,361	7,285	11,714
2312	8,566	8,355	8,381	8,334	8,881	9,536	11,389	8,948	14,406
2310	9,889	9,587	9,625	9,570	10,219	11,223	13,696	10,569	16,014
2304	9,389	9,073	9,114	9,085	9,698	10,967	13,029	10,766	15,113
2298	10,297	9,961	10,002	10,023	10,536	12,085	15,014	11,018	16,351
2292	7,166	6,880	6,911	6,936	7,338	8,731	10,726	8,730	11,095
2286	4,241	4,006	4,024	4,040	4,352	5,598	7,310	6,882	7,050
2280	2,955	2,763	2,775	2,782	3,074	4,136	5,428	5,007	4,279
2271	1,652	1,515	1,526	1,533	1,748	2,525	3,670	3,810	2,377
2267	0,599	0,545	0,550	0,563	0,641	0,859	1,419	1,631	0,937
2263	0,314	0,313	0,313	0,334	0,315	0,252	0,414	0,589	0,526
2259	0,732	0,755	0,752	0,783	0,692	0,649	0,545	0,125	0,923
2255	1,552	1,570	1,566	1,596	1,489	1,569	1,554	0,261	1,874
2251	2,203	2,209	2,205	2,232	2,144	2,230	2,394	0,613	2,761
2247	2,615	2,606	2,606	2,633	2,571	2,606	3,011	0,877	3,418
2243	2,594	2,579	2,582	2,613	2,572	2,521	3,139	0,922	3,542
2238	2,159	2,151	2,156	2,188	2,148	2,058	2,757	0,738	3,055
2239	0,160	1,697	1,707	1,754	2,879	1,528	0,329	0,150	0,374

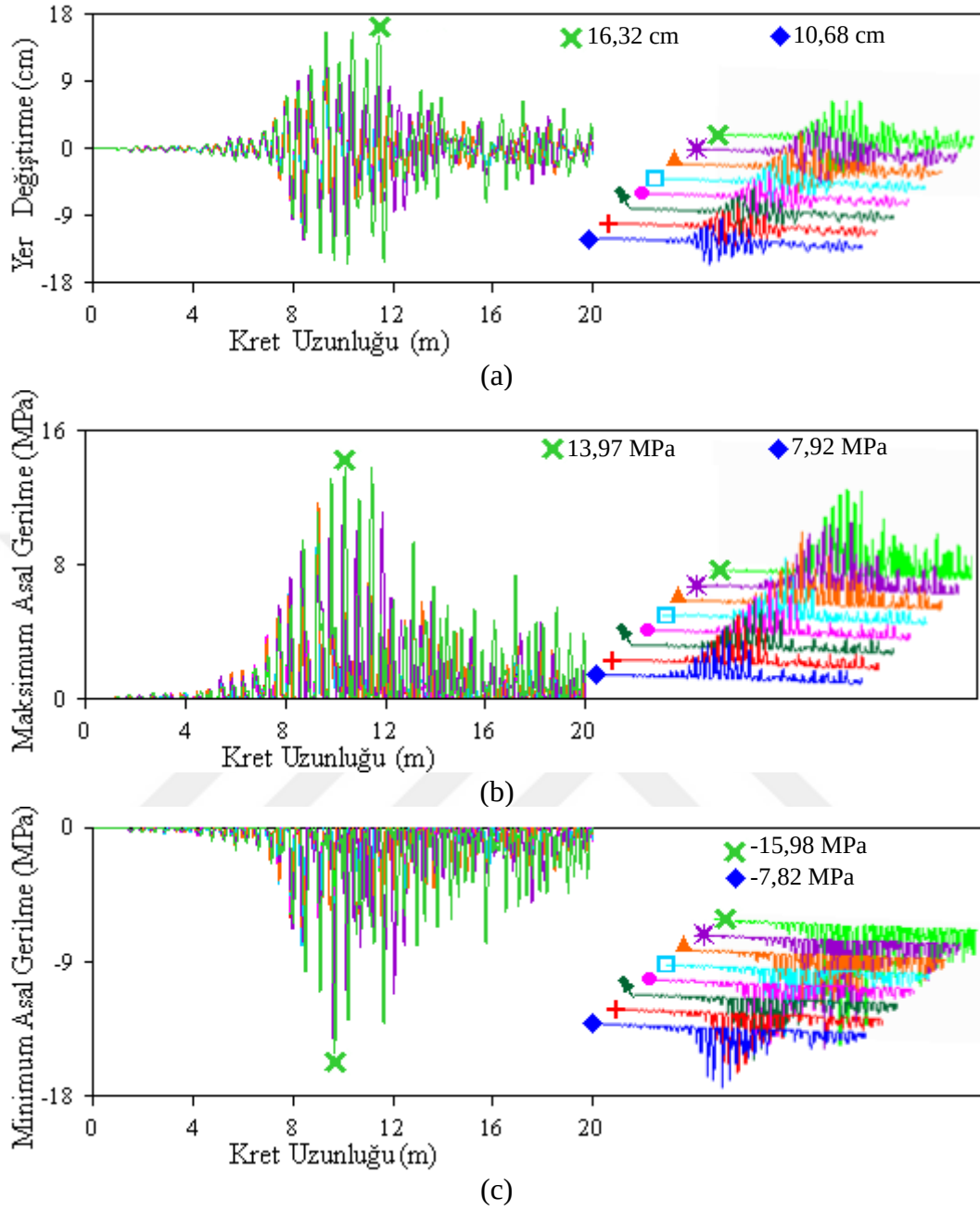
Tablo 39. Yusufeli Barajının Euler yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	-8,213	-7,824	-7,914	-8,042	-8,106	-7,880	-8,584	-14,33	-15,987
2304	-7,980	-7,624	-7,699	-7,817	-7,935	-7,823	-9,317	-14,11	-15,945
2182	-6,734	-6,480	-6,528	-6,620	-6,788	-6,703	-8,604	-12,46	-14,987
2007	-6,485	-6,253	-6,296	-6,373	-6,510	-6,470	-8,608	-14,07	-17,355
1820	-4,779	-4,675	-4,649	-4,677	-5,036	-5,389	-7,731	-9,367	-12,018
1657	-4,021	-3,952	-3,917	-3,928	-4,294	-4,683	-6,884	-8,093	-10,690
1437	-2,357	-2,362	-2,319	-2,269	-2,605	-3,068	-4,810	-4,777	-7,255
1233	-1,391	-1,408	-1,389	-1,293	-1,481	-1,846	-2,833	-2,099	-4,175
1037	-0,892	-0,891	-0,898	-0,791	-0,787	-0,973	-1,297	-0,551	-1,872
857	-0,691	-0,668	-0,686	-0,600	-0,473	-0,526	-0,547	-0,355	-1,005
693	-0,531	-0,488	-0,507	-0,455	-0,250	-0,233	-0,153	-0,355	-0,768
545	-0,358	-0,303	-0,318	-0,306	-0,081	-0,064	-0,059	-0,296	-0,658
413	-0,179	-0,131	-0,143	-0,151	-0,007	-0,052	-0,077	-0,177	-0,520
297	0,200	-0,221	-0,241	-0,255	-0,017	-0,105	-0,191	-0,451	-0,010
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	-0,087	-0,390	-0,388	-0,424	-0,267	-0,659	-0,353	-0,462	-0,567
2351	-0,424	-0,417	-0,412	-0,441	-0,522	-0,604	-1,757	-2,015	-2,560
2347	-0,600	-0,596	-0,590	-0,621	-0,731	-0,783	-1,626	-2,405	-2,902
2343	-1,034	-1,032	-1,025	-1,062	-1,231	-1,240	-1,119	-3,430	-3,849
2339	-1,517	-1,513	-1,506	-1,547	-1,761	-1,746	-0,601	-4,561	-4,980
2335	-1,957	-1,944	-1,943	-1,982	-2,213	-2,193	-0,649	-5,646	-6,192
2331	-2,344	-2,312	-2,318	-2,355	-2,567	-2,568	-1,049	-6,783	-7,606
2323	-2,908	-2,789	-2,812	-2,850	-2,941	-3,099	-2,191	-9,234	-11,039
2319	-3,211	-3,037	-3,067	-3,107	-3,148	-3,406	-3,051	-10,40	-12,758
2315	-3,969	-3,738	-3,778	-3,826	-3,860	-4,171	-4,415	-12,01	-14,883
2312	-5,540	-5,251	-5,308	-5,380	-5,451	-5,665	-6,861	-13,05	-15,773
2310	-7,423	-7,074	-7,152	-7,259	-7,383	-7,432	-9,340	-13,99	-16,182
2304	-7,980	-7,624	-7,699	-7,817	-7,935	-7,823	-9,317	-14,11	-15,945
2298	-9,288	-8,922	-8,997	-9,131	-9,276	-9,014	-11,47	-13,79	-15,096
2292	-8,872	-8,554	-8,627	-8,773	-8,874	-8,345	-9,340	-9,950	-10,492
2286	-9,686	-9,408	-9,474	-9,621	-9,711	-8,873	-8,493	-6,800	-6,414
2280	-7,778	-7,536	-7,594	-7,696	-7,768	-7,095	-6,806	-4,716	-4,143
2271	-7,476	-7,286	-7,349	-7,436	-7,456	-6,819	-5,892	-3,558	-2,583
2267	-4,231	-4,114	-4,147	-4,193	-4,219	-3,878	-3,063	-1,594	-1,014
2263	-2,443	-2,364	-2,381	-2,406	-2,424	-2,265	-1,625	-0,689	-0,697
2259	-1,264	-1,203	-1,211	-1,221	-1,228	-1,182	-0,853	-0,421	-1,955
2255	-0,488	-0,430	-0,429	-0,426	-0,425	-0,475	-0,865	-1,045	-2,783
2251	-0,845	-0,824	-0,810	-0,807	-0,823	-1,032	-1,280	-1,728	-3,141
2247	-1,705	-1,693	-1,682	-1,691	-1,717	-1,908	-1,567	-2,326	-3,340
2243	-2,187	-2,183	-2,175	-2,194	-2,220	-2,403	-1,460	-2,563	-3,171
2238	-2,202	-2,199	-2,192	-2,213	-2,236	-2,426	-1,129	-2,419	-2,981
2239	-0,241	-2,273	-2,268	-2,298	-3,236	-2,577	-0,353	-0,462	-0,567

Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumu ve Euler yaklaşımına göre oluşturulan sekiz farklı su seviyesi durumuna ait modellerin dinamik analizleri sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri Şekil 111 (a) ve (b)'de verilmektedir. II-II kesiti boyunca elde edilen yer değiştirme değerleri benzer eğilimde değişmekte olup, maksimum yer değiştirmenin 172 m olan maksimum su seviyesinde olduğu görülmektedir. İlk beş su seviyesine ait yer değiştirmelerin rezervuarın boş durumuna ait sonuçlara oldukça yakın olduğu ancak su seviyesinin 126m, 150m ve 172m olması durumlarında yer değiştirme değerlerinin daha fazla artış gösterdiği elde edilmiştir. I-I kesiti boyunca ise tüm su seviyelerinde temelde minimum olan yer değiştirme değerlerinin gövde yüksekliği boyunca arttığı, seçilen kesit boyunca su seviyesindeki artışın yer değiştirme değerlerini de arttırdığı görülmektedir. Yatay ve düşey kesitlerdeki yer değiştirmeler incelendiğinde 150m'lik su seviyesine ait yer değiştirme değerlerinde bir miktar azalım olduğu görülmektedir. Bu durum 150m ve 172m ye ait yer değiştirme bölgelerinin barajın orta bölgesinden bir miktar sapmasından kaynaklanabilir.

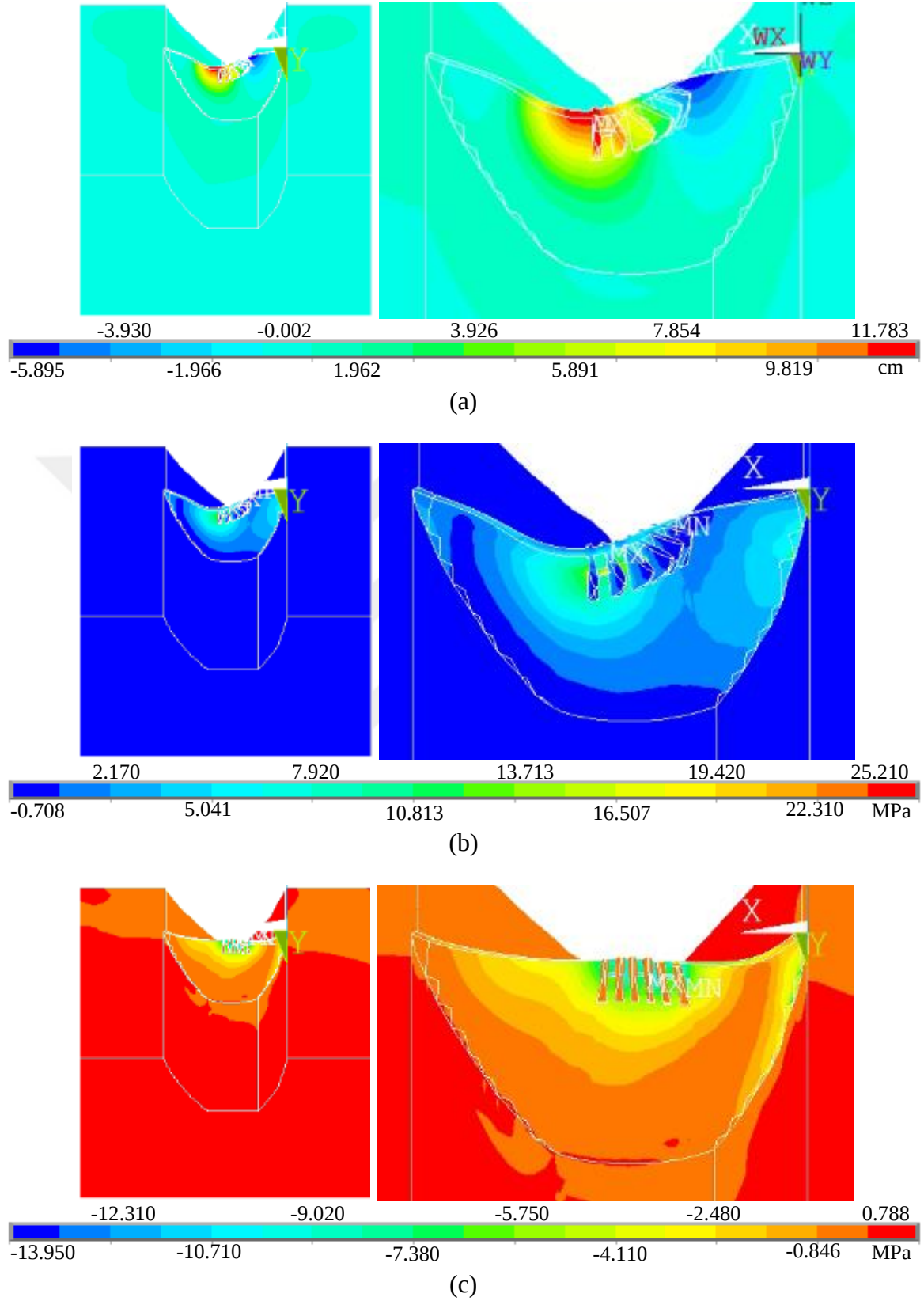
Yusufeli Barajı'na ait asal gerilmelerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla Şekil 112 (a) incelendiğinde, rezervuarın boş ve Euler yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesinde elde edilen maksimum asal gerilmeler benzer eğilimde davranış göstermekte ve gövde yüksekliği boyunca artmakta, krete yakın bölgede azalmaktadır. Maksimum asal gerilme su seviyesinin maksimum olduğu 172 m'de olduğu görülmektedir. Minimum asal gerilmeler incelendiğinde (Şekil 112 (b)) ise ilk 99 m'lik su seviyesine kadar değerlerin benzer eğilimde ve birbirine yakın olduğu ancak 126, 150 ve 172 m su seviyeleri için minimum gerilmelerin hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. II-II kesiti için, Şekil 112 (c)'den görüldüğü üzere, maksimum asal gerilmeler yamaçtan itibaren 100 m'lik mesafeden sonra kretin orta bölgesine kadar artmakta, orta bölgeyi geçtikten sonra azalmaya başlamakta olup, maksimum değerlerin 172 m'lik su seviyesinde olduğu görülmektedir. II-II kesiti boyunca minimum asal gerilmeler (Şekil 112 (d)) ilk 126 m'lik su seviyesi için aynı eğilimdedir. 150m ve 172m'lik su seviyesinde ise minimum gerilme değerlerinin ani bir şekilde azaldığı ve mutlak değerce maksimum olan minimum asal gerilmelerin 172 m su seviyesinde olduğu görülmektedir.

Rezervuarın boş olması durumu ve Euler yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için yapılan deprem analizi boyunca 2426 nolu düğüm noktasında elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 113'te verilmektedir.

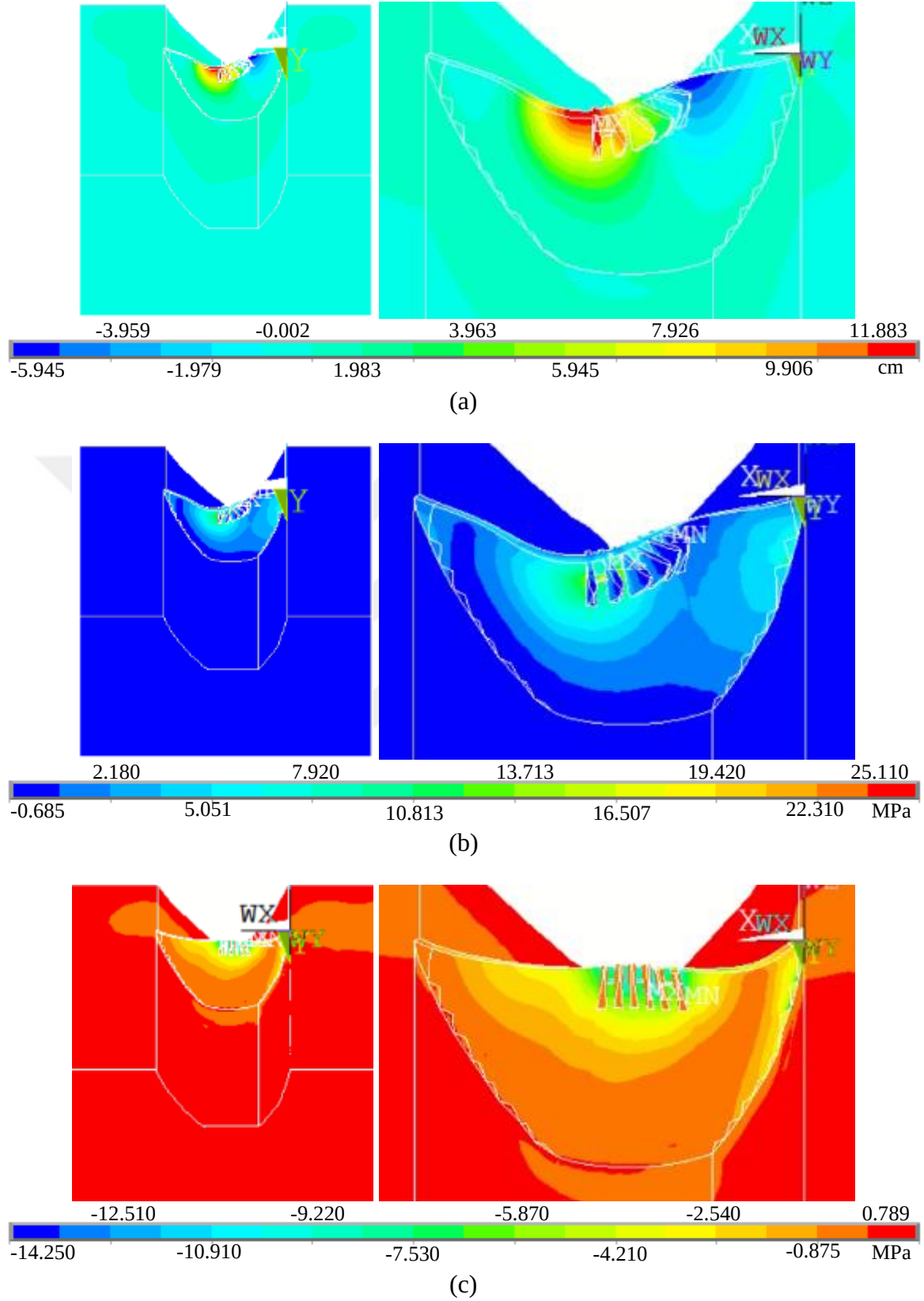


Şekil 113. Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması ve Euler yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için dinamik analizi sonucu 2426 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

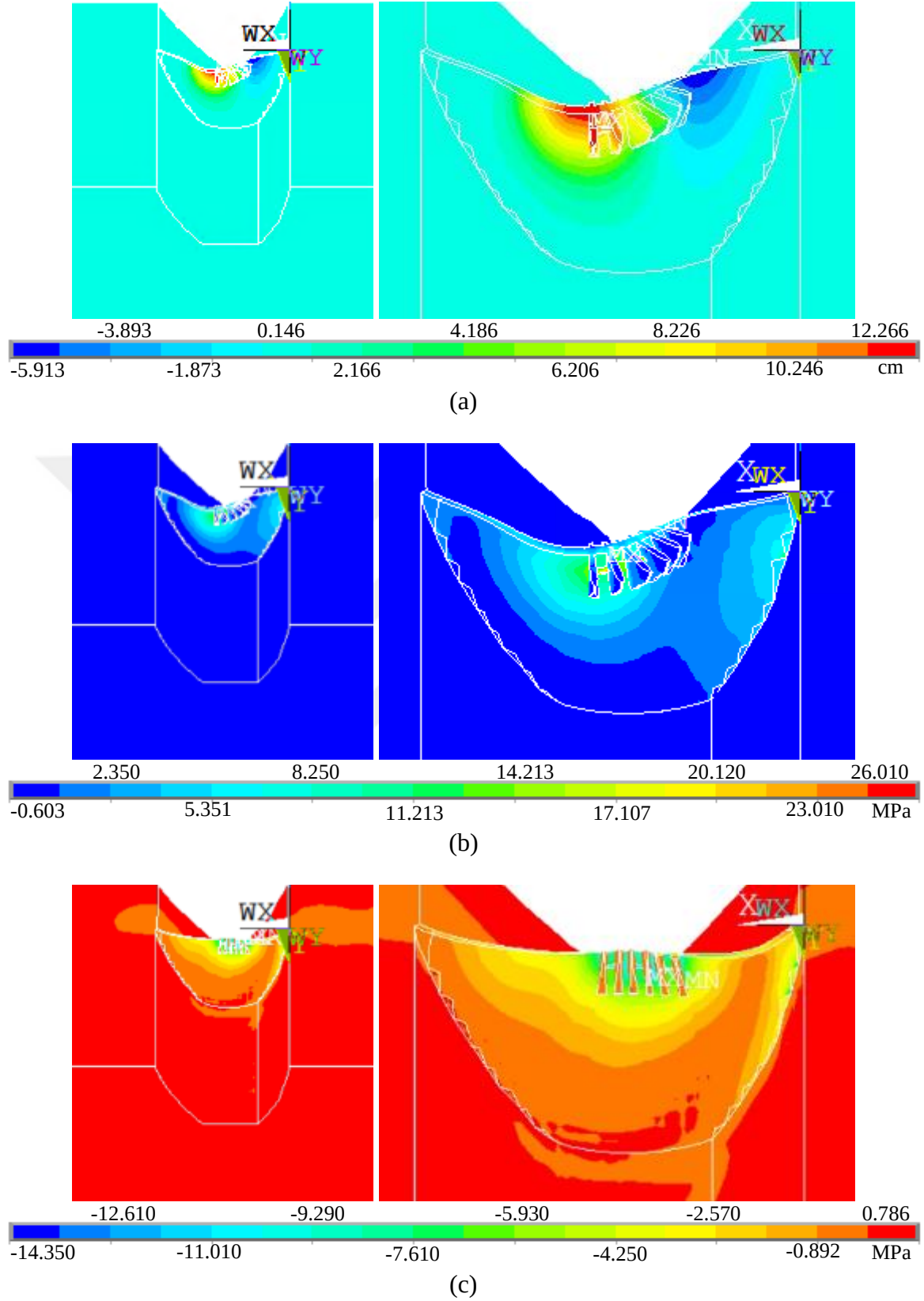
Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre oluşturulmuş farklı rezervuar su seviyelerine ait sonlu eleman modellerinde dinamik analizler tekrar edilmiştir. Şekil 114-121’de Lagrange yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı rezervuar su seviyeleri için baraj gövdesinde oluşan yer değiştirme ve gerilmelere ait kontur diyagramları verilmektedir.



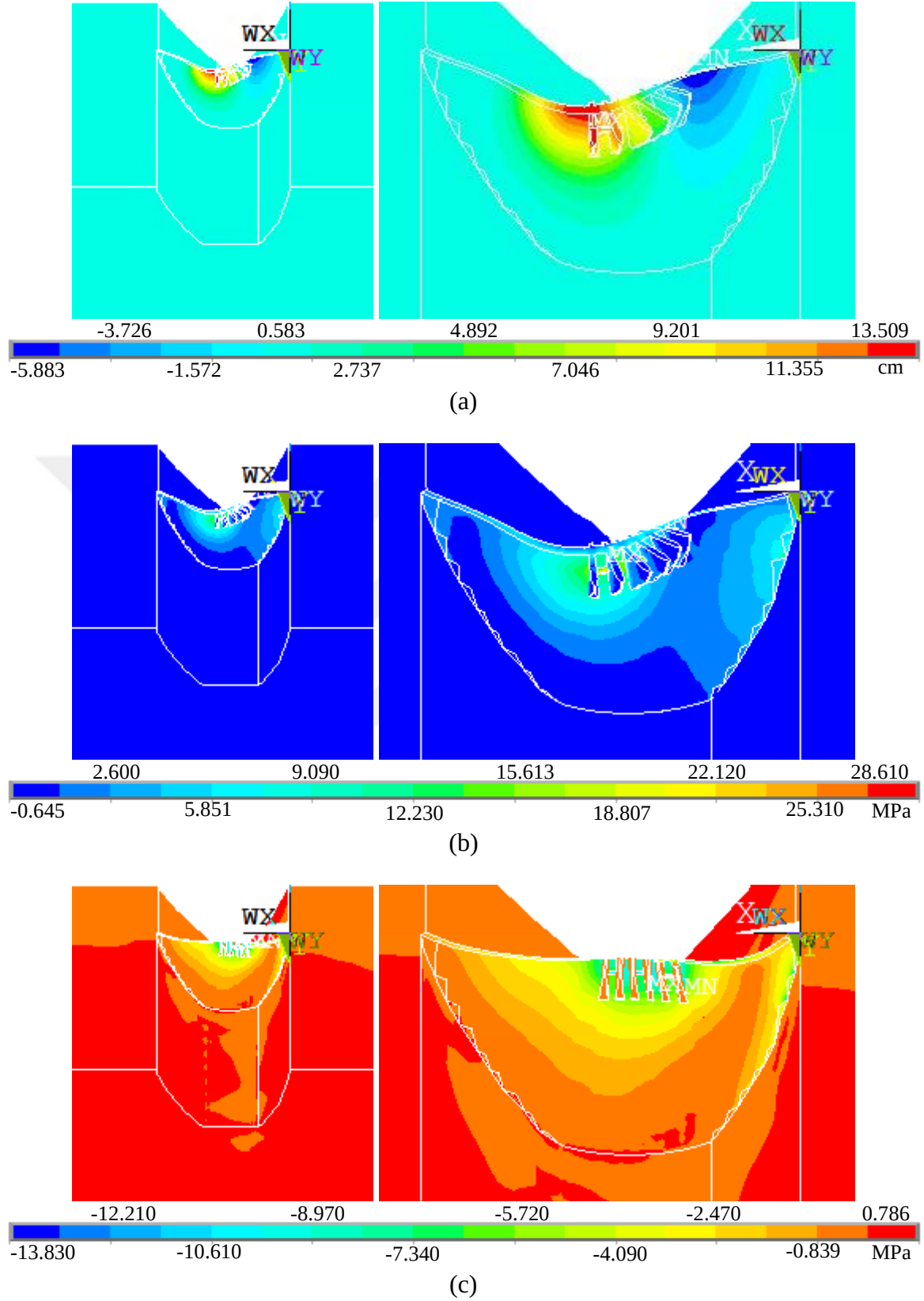
Şekil 114. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 15m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



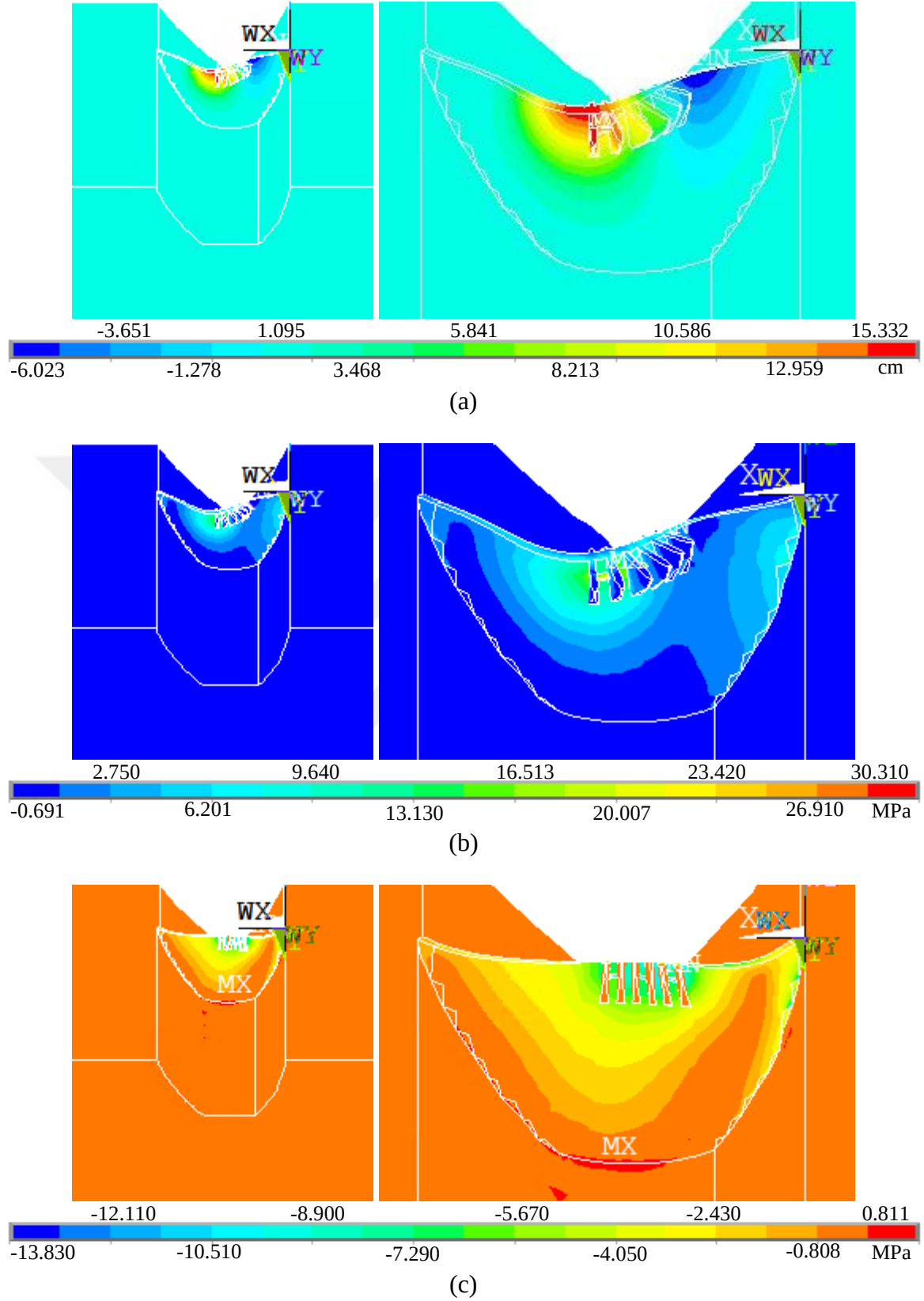
Şekil 115. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 36m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



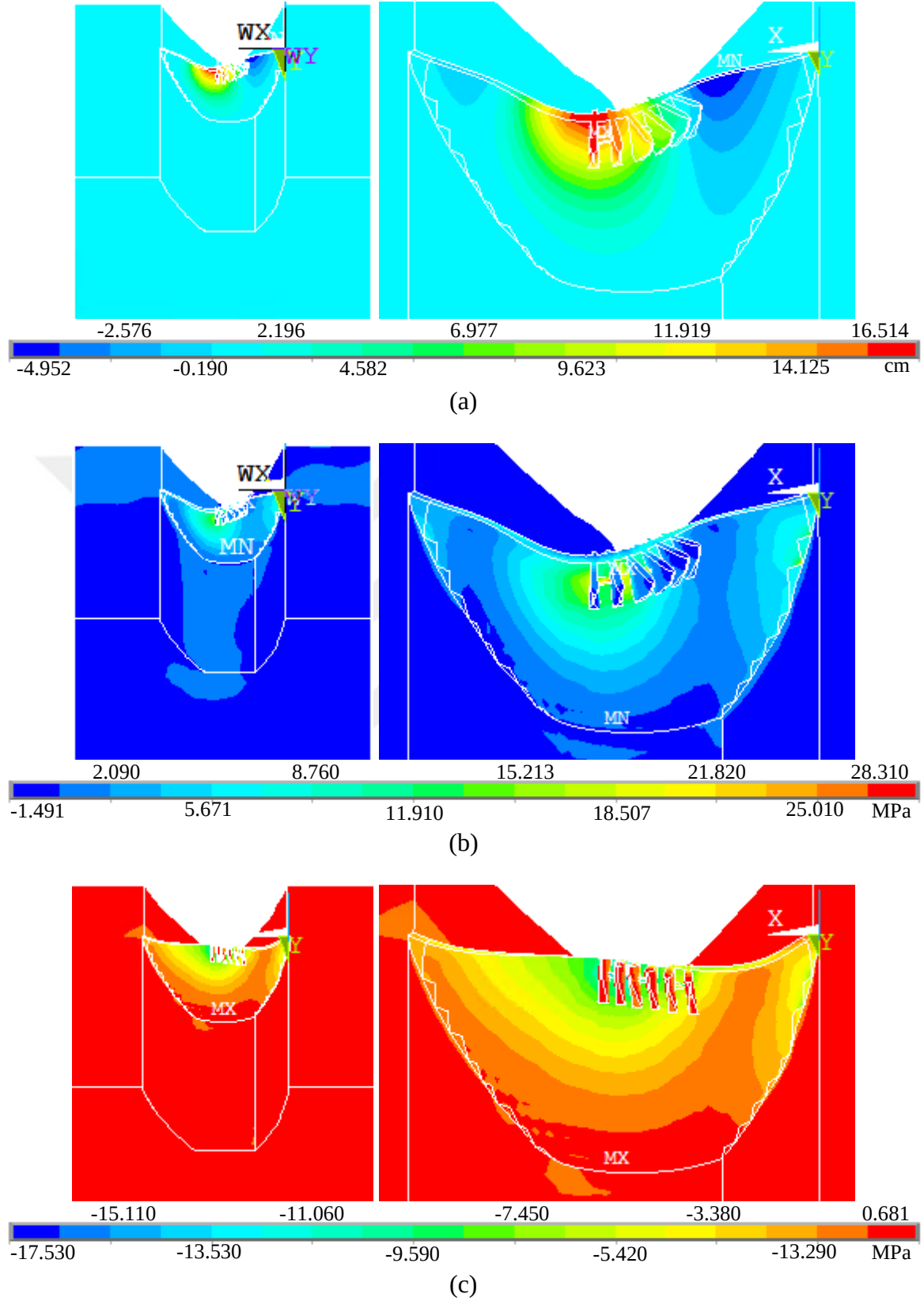
Şekil 116. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 57m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



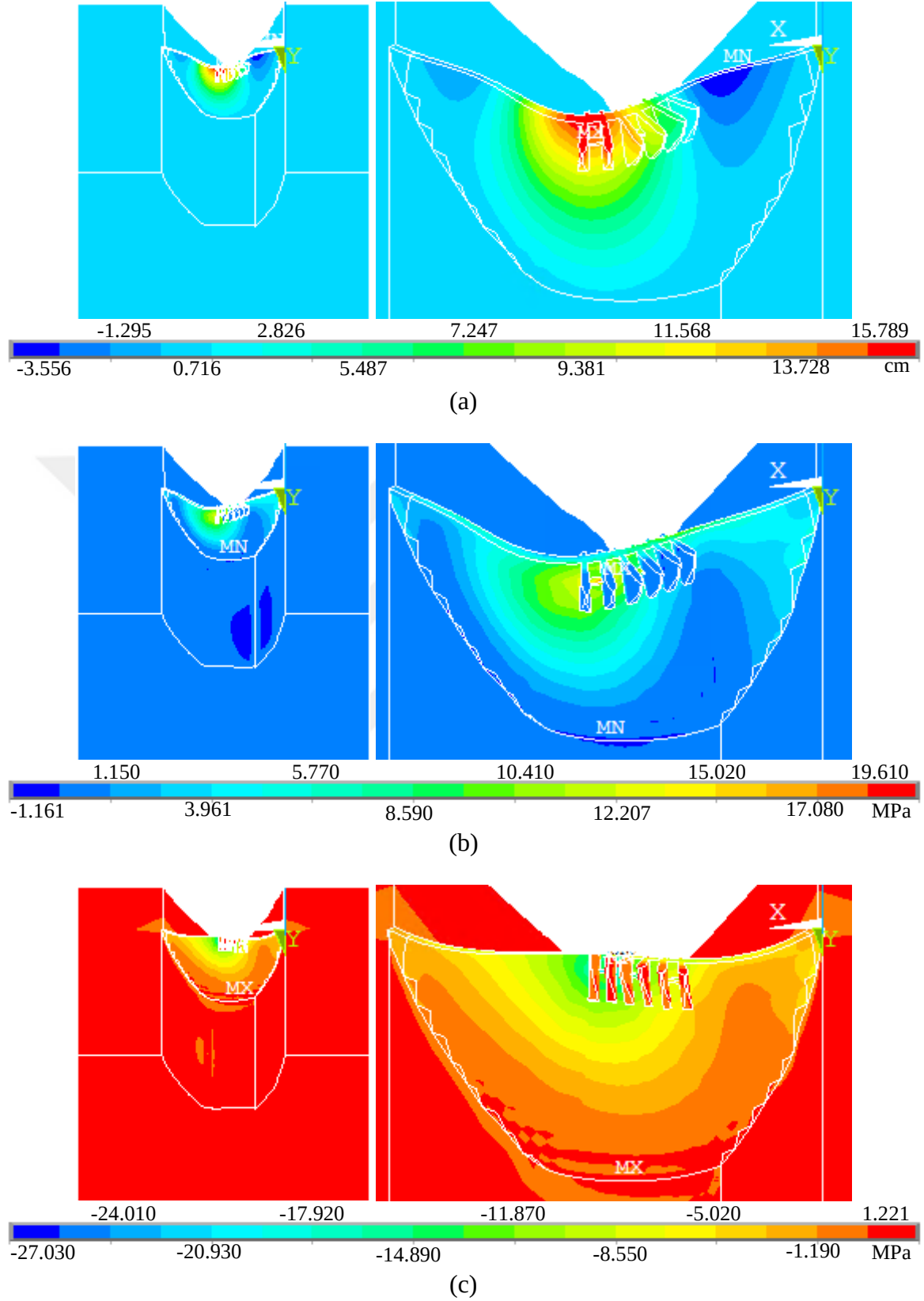
Şekil 117. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 78m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



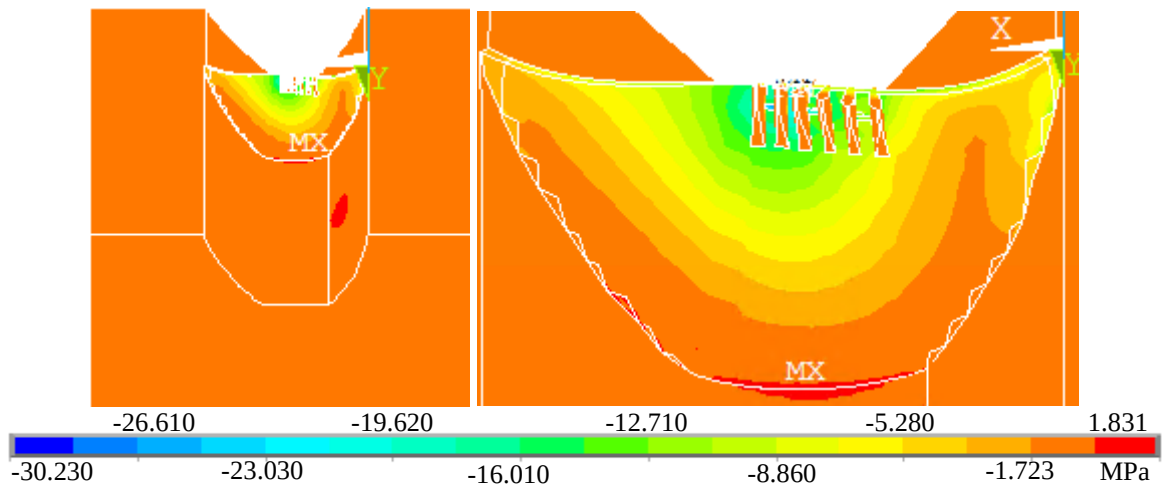
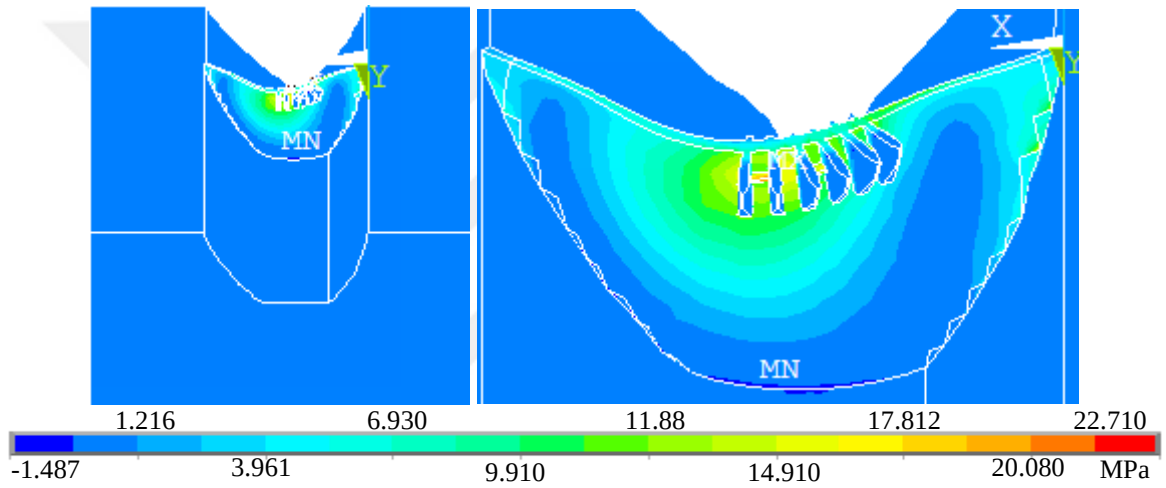
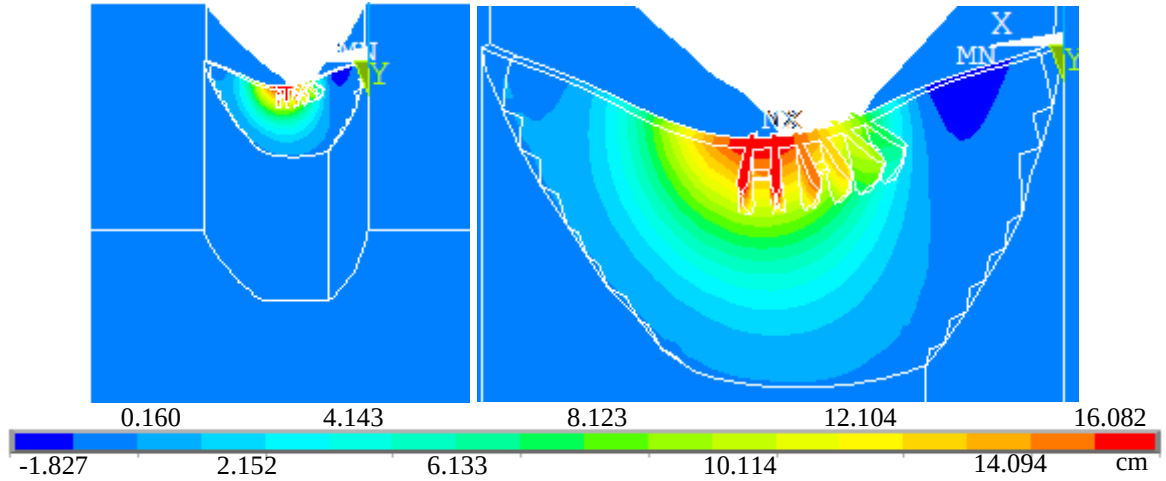
Şekil 118. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 99m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 119. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 126m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

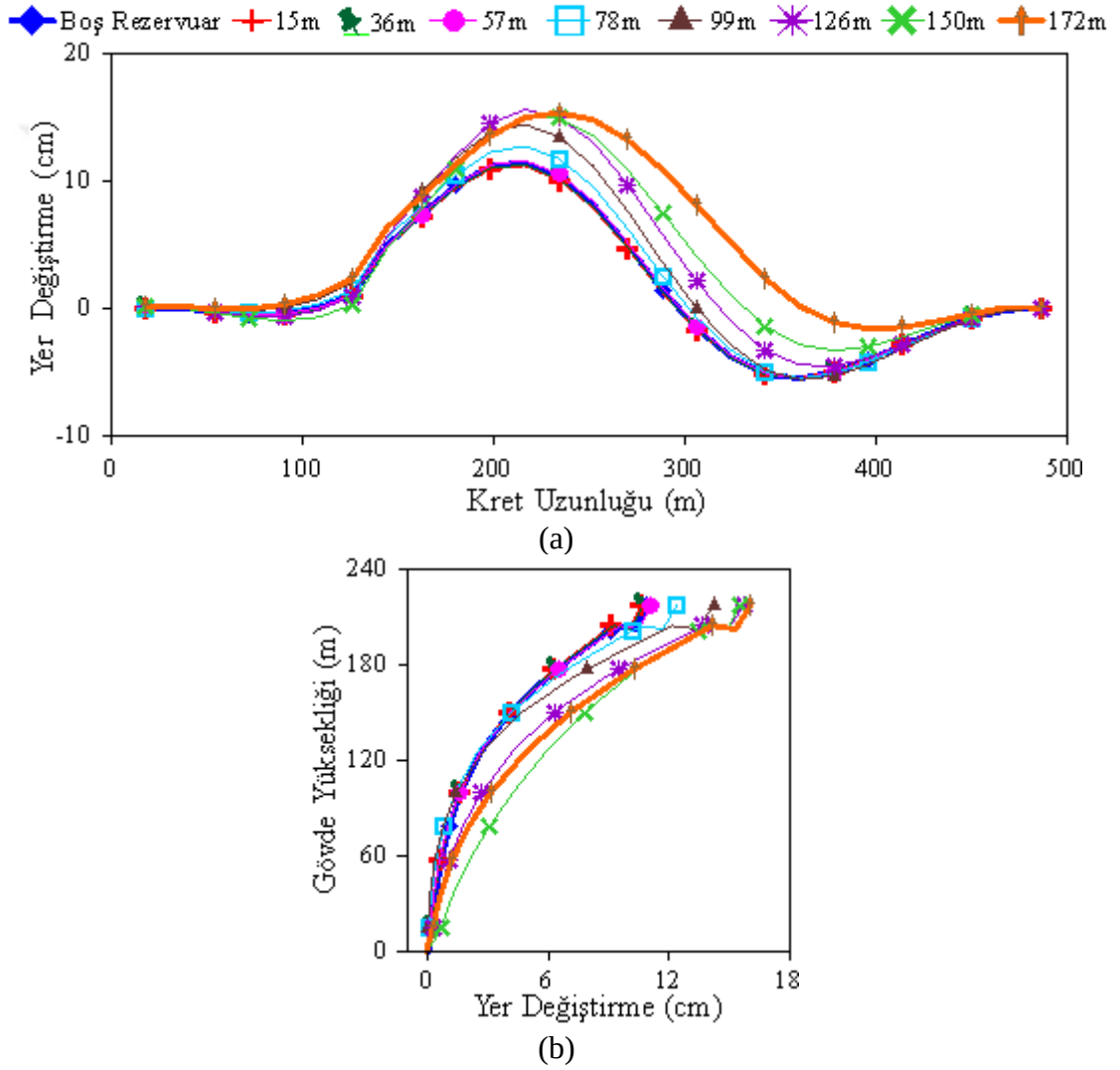


Şekil 120. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 150m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme



Şekil 121. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen 172m rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen kontur diyagramları (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

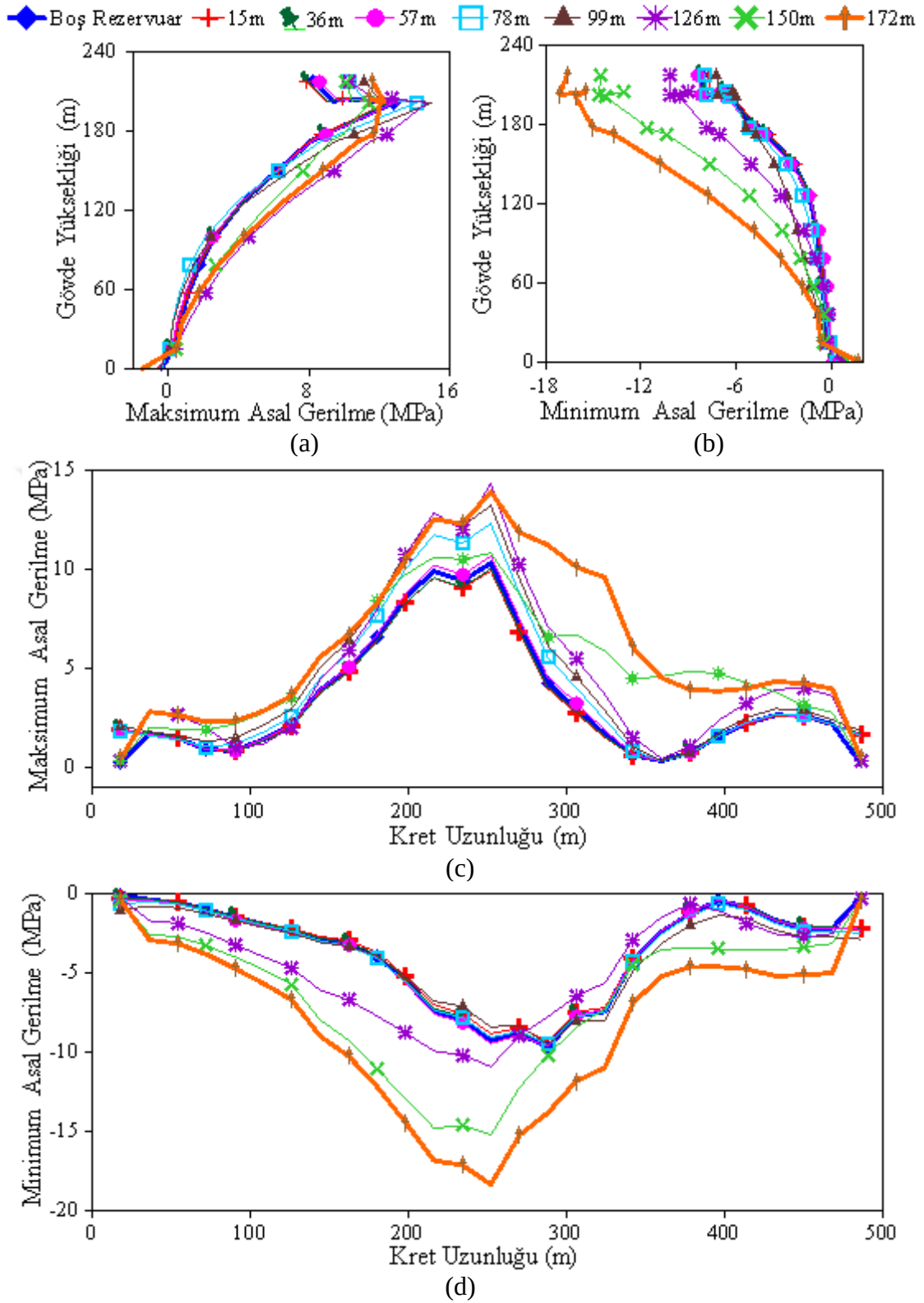
Şekil 91 ve Şekil 114-121’de rezervuarın boş olması durumu ve sekiz farklı rezervuar su seviyesi olması durumu için Lagrange yaklaşımına göre modellenmiş sonlu eleman modellere ait dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme kontur diyagramlarındaki değişimler görülmektedir. Değerler arasındaki değişimlerin daha detaylı incelenebilmesi adına I-I ve II-II kesitleri boyunca yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil 122’de ve ilgili değerler Tablo 40’ta, asal gerilmelere ait grafikler ise Şekil 123’te ve ilgili değerler Tablo 41 ve Tablo 42’de verilmektedir.



Şekil 122. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler, (a) II-II kesiti boyunca yer değiştirme, (b) I-I kesiti boyunca yer değiştirme

Tablo 40. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	10,909	10,581	10,698	11,121	12,420	14,235	15,754	15,546	16,067
2304	10,320	10,015	10,128	10,517	11,703	13,412	14,940	14,887	15,319
2182	9,394	9,126	9,231	9,567	10,578	12,120	13,657	13,849	14,144
2007	9,070	8,815	8,918	9,234	10,180	11,661	13,202	13,481	13,714
1820	6,421	6,271	6,351	6,515	6,952	7,942	9,532	10,522	10,293
1657	5,946	5,813	5,886	6,025	6,375	7,274	8,865	9,974	9,654
1437	4,116	4,043	4,086	4,136	4,182	4,729	6,302	7,823	7,134
1233	2,704	2,661	2,673	2,669	2,538	2,805	4,269	5,950	4,967
1037	1,646	1,609	1,598	1,570	1,369	1,433	2,659	4,217	3,118
857	1,082	1,042	1,023	0,991	0,795	0,768	1,749	3,068	2,035
693	0,680	0,634	0,617	0,587	0,423	0,357	1,075	2,083	1,223
545	0,398	0,349	0,336	0,311	0,194	0,123	0,593	1,277	0,641
413	0,217	0,168	0,163	0,139	0,072	0,016	0,279	0,681	0,272
297	0,069	-0,007	-0,009	-0,013	-0,023	-0,042	-0,018	0,039	-0,063
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,035	0,034	0,034	0,034	0,034	0,042	0,047	0,055	0,075
2351	-0,026	-0,029	-0,030	-0,025	-0,004	0,034	0,002	-0,009	0,109
2347	-0,294	-0,300	-0,303	-0,286	-0,218	-0,135	-0,308	-0,389	-0,044
2343	-0,513	-0,529	-0,535	-0,501	-0,365	-0,208	-0,602	-0,794	-0,054
2339	-0,482	-0,519	-0,525	-0,473	-0,254	0,007	-0,654	-0,995	0,253
2335	-0,001	-0,069	-0,075	-0,003	0,306	0,698	-0,209	-0,727	1,018
2331	1,066	0,960	0,958	1,048	1,446	1,993	0,946	0,242	2,302
2323	4,944	4,764	4,783	4,915	5,492	6,411	5,633	4,636	6,311
2319	7,350	7,138	7,176	7,341	8,022	9,152	8,782	7,741	8,757
2315	9,601	9,360	9,421	9,633	10,447	11,798	11,947	10,966	11,256
2312	11,147	10,876	10,960	11,237	12,208	13,764	14,455	13,657	13,471
2310	11,433	11,137	11,241	11,583	12,697	14,388	15,554	15,073	14,937
2304	10,320	10,015	10,128	10,517	11,703	13,412	14,940	14,887	15,319
2298	8,110	7,813	7,924	8,335	9,511	11,117	12,969	13,480	14,755
2292	4,900	4,633	4,728	5,129	6,206	7,587	9,668	10,811	13,168
2286	1,422	1,206	1,275	1,631	2,533	3,605	5,801	7,503	10,861
2280	-1,587	-1,735	-1,697	-1,421	-0,748	-0,018	2,077	4,067	8,048
2271	-3,853	-3,928	-3,921	-3,741	-3,314	-2,917	-1,051	0,998	5,140
2267	-5,205	-5,206	-5,230	-5,153	-4,972	-4,875	-3,348	-1,464	2,287
2263	-5,519	-5,468	-5,514	-5,511	-5,505	-5,609	-4,457	-2,880	0,147
2259	-5,039	-4,963	-5,020	-5,056	-5,142	-5,347	-4,549	-3,323	-1,139
2255	-4,064	-3,986	-4,043	-4,088	-4,203	-4,426	-3,915	-3,021	-1,630
2251	-2,896	-2,833	-2,881	-2,919	-3,020	-3,207	-2,893	-2,272	-1,512
2247	-1,756	-1,714	-1,748	-1,772	-1,843	-1,969	-1,770	-1,358	-1,037
2243	-0,799	-0,779	-0,797	-0,808	-0,849	-0,908	-0,768	-0,511	-0,447
2238	-0,166	-0,161	-0,167	-0,170	-0,190	-0,200	0,030	0,084	0,054
2239	-0,005	-0,004	-0,005	-0,007	-0,014	-0,013	-0,088	0,069	0,025



Şekil 123. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen asal gerilmelere ait grafikler (a) I-I kesiti boyunca maksimum gerilme, (b) I-I kesiti boyunca minimum gerilme, (c) II-II kesiti boyunca maksimum gerilme, (d) II-II kesiti boyunca minimum gerilme

Tablo 41. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen maksimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	8,260	7,876	7,903	8,605	10,297	11,122	10,291	10,104	11,719
2304	9,389	9,024	9,078	9,707	11,308	12,172	11,958	10,490	12,271
2182	10,138	9,883	9,932	10,319	11,501	12,331	12,708	10,414	11,459
2007	12,812	12,542	12,524	12,894	14,128	15,029	14,740	11,414	12,056
1820	8,882	8,733	8,895	9,002	9,688	10,607	12,453	9,982	11,743
1657	8,110	8,003	8,160	8,195	8,707	9,566	11,517	9,216	10,817
1437	6,248	6,226	6,336	6,235	6,297	7,022	9,418	7,704	8,828
1233	4,228	4,238	4,252	4,131	3,904	4,435	6,878	5,877	6,525
1037	2,630	2,634	2,557	2,475	2,095	2,426	4,596	3,995	4,273
857	1,774	1,754	1,642	1,599	1,200	1,414	3,211	2,718	2,849
693	1,153	1,103	0,989	0,979	0,643	0,756	2,103	1,671	1,713
545	0,677	0,598	0,503	0,512	0,270	0,311	1,170	0,822	0,805
413	0,296	0,258	0,195	0,176	0,062	0,034	0,425	0,422	0,493
297	-0,398	-0,620	-0,575	-0,544	-0,380	-0,458	-1,185	-1,193	-1,478
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	0,246	1,914	1,910	1,867	1,829	2,075	0,336	0,353	0,458
2351	1,691	1,690	1,691	1,635	1,580	1,789	2,739	2,012	2,791
2347	1,462	1,473	1,484	1,418	1,376	1,586	2,676	1,900	2,620
2343	0,885	0,891	0,922	0,883	1,014	1,286	1,970	1,876	2,284
2339	0,832	0,781	0,795	0,853	1,162	1,484	0,992	2,168	2,315
2335	1,396	1,321	1,314	1,406	1,750	2,108	1,152	2,725	2,825
2331	2,124	2,031	2,007	2,132	2,525	2,936	2,003	3,489	3,607
2323	3,889	3,763	3,719	3,925	4,499	5,038	4,410	5,551	5,562
2319	4,966	4,818	4,775	5,035	5,752	6,360	5,890	6,771	6,682
2315	6,558	6,368	6,335	6,676	7,619	8,328	7,931	8,368	8,294
2312	8,566	8,298	8,293	8,763	9,997	10,790	10,722	9,707	10,426
2310	9,889	9,532	9,554	10,172	11,706	12,581	12,839	10,582	12,521
2304	9,389	9,024	9,078	9,707	11,308	12,172	11,958	10,490	12,271
2298	10,297	9,898	10,000	10,647	12,274	13,184	14,304	10,794	13,884
2292	7,166	6,827	6,920	7,486	8,782	9,535	10,256	8,731	11,840
2286	4,241	3,956	4,039	4,543	5,527	6,134	7,110	6,562	11,210
2280	2,955	2,717	2,786	3,235	4,004	4,584	5,441	6,674	10,092
2271	1,652	1,486	1,543	1,860	2,386	2,860	3,701	5,852	9,572
2267	0,599	0,539	0,563	0,653	0,837	1,035	1,500	4,441	6,029
2263	0,314	0,317	0,329	0,290	0,295	0,320	0,420	4,579	4,502
2259	0,732	0,757	0,773	0,700	0,661	0,727	1,027	4,835	3,905
2255	1,552	1,559	1,584	1,550	1,552	1,738	2,357	4,727	3,833
2251	2,203	2,187	2,220	2,215	2,249	2,489	3,245	4,247	3,969
2247	2,615	2,578	2,617	2,623	2,666	2,945	3,906	3,792	4,324
2243	2,594	2,551	2,589	2,584	2,610	2,883	3,986	3,105	4,212
2238	2,159	2,126	2,159	2,137	2,130	2,386	3,589	2,760	3,963
2239	0,160	1,671	1,702	1,638	1,588	1,835	0,336	0,353	0,458

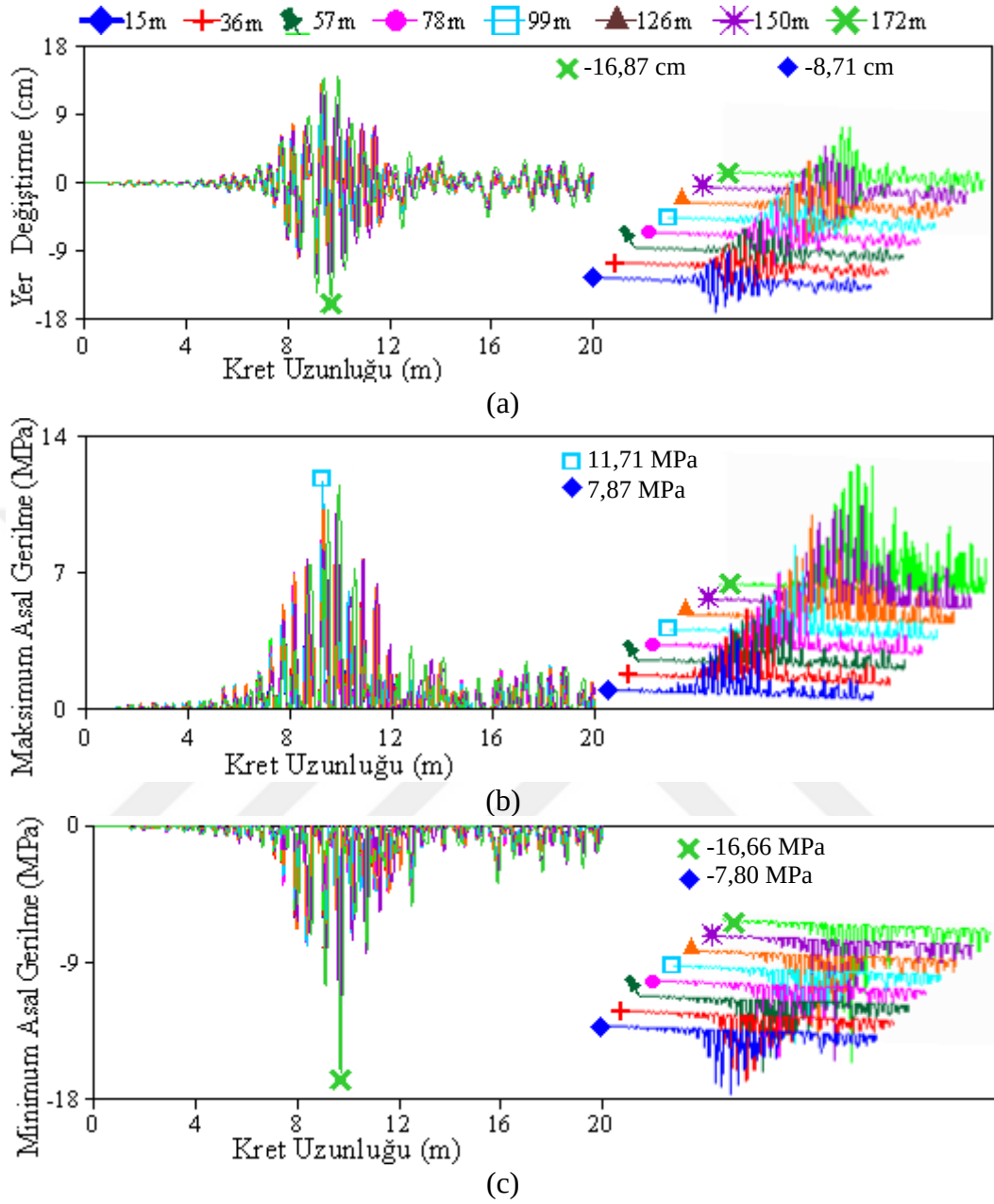
Tablo 42. Yusufeli Barajının Lagrange yaklaşımına göre modellenen farklı rezervuar su yüksekliği durumunda dinamik analiz sonucu elde edilen minimum asal gerilme değerleri (MPa)

Kesit Düğüm Noktaları	Boş Rezervuar Durumu	Rezervuar Su Yüksekliği (m)							
		15	36	57	78	99	126	150	172
I-I Kesiti (Gövde Yüksekliği Boyunca Düşey Kesit)									
2426	-8,213	-7,796	-8,057	-8,387	-7,981	-7,214	-10,13	-14,54	-16,662
2304	-7,980	-7,590	-7,829	-8,183	-7,839	-7,148	-10,20	-14,66	-17,156
2182	-6,734	-6,442	-6,618	-6,922	-6,682	-6,211	-9,036	-13,12	-15,475
2007	-6,485	-6,214	-6,373	-6,647	-6,434	-6,013	-9,578	-14,28	-16,154
1820	-4,779	-4,619	-4,731	-5,042	-5,192	-5,347	-7,861	-11,60	-15,038
1657	-4,021	-3,897	-3,984	-4,270	-4,477	-4,734	-6,999	-10,37	-13,690
1437	-2,357	-2,307	-2,317	-2,520	-2,918	-3,563	-5,018	-7,648	-10,789
1233	-1,391	-1,361	-1,316	-1,408	-1,877	-2,756	-3,214	-5,187	-7,744
1037	-0,892	-0,859	-0,789	-0,765	-1,208	-2,163	-1,750	-3,107	-4,911
857	-0,691	-0,650	-0,585	-0,494	-0,869	-1,744	-0,995	-1,919	-3,165
693	-0,531	-0,480	-0,437	-0,311	-0,590	-1,288	-0,503	-1,067	-1,852
545	-0,358	-0,305	-0,285	-0,158	-0,326	-0,788	-0,187	-0,444	-0,817
413	-0,179	-0,154	-0,125	-0,038	-0,093	-0,358	-0,262	-0,461	-0,706
297	0,200	0,260	0,253	0,159	0,378	0,811	0,685	1,188	1,735
II-II Kesiti (Gövde Kreti Boyunca Yatay Kesit)									
2355	-0,087	-0,388	-0,386	-0,418	-0,659	-1,034	-0,341	-0,441	-0,481
2351	-0,424	-0,395	-0,396	-0,467	-0,555	-0,827	-1,738	-2,592	-2,950
2347	-0,600	-0,568	-0,572	-0,664	-0,708	-0,933	-1,888	-2,757	-3,180
2343	-1,034	-0,991	-1,004	-1,143	-1,122	-1,303	-2,499	-3,301	-3,856
2339	-1,517	-1,461	-1,484	-1,668	-1,593	-1,750	-3,263	-4,025	-4,745
2335	-1,957	-1,886	-1,922	-2,132	-2,023	-2,161	-4,000	-4,819	-5,693
2331	-2,344	-2,251	-2,301	-2,521	-2,407	-2,531	-4,727	-5,739	-6,725
2323	-2,908	-2,739	-2,831	-3,018	-3,016	-3,099	-6,113	-8,003	-9,023
2319	-3,211	-3,000	-3,116	-3,290	-3,348	-3,362	-6,747	-9,269	-10,278
2315	-3,969	-3,711	-3,857	-4,058	-4,107	-3,972	-7,751	-11,09	-12,213
2312	-5,540	-5,226	-5,406	-5,674	-5,606	-5,223	-8,815	-12,96	-14,474
2310	-7,423	-7,046	-7,265	-7,611	-7,405	-6,805	-9,959	-14,82	-16,868
2304	-7,980	-7,590	-7,829	-8,183	-7,839	-7,148	-10,20	-14,66	-17,156
2298	-9,288	-8,866	-9,104	-9,479	-9,094	-8,435	-10,95	-15,25	-18,372
2292	-8,872	-8,504	-8,729	-8,973	-8,695	-8,340	-8,963	-12,27	-15,270
2286	-9,686	-9,343	-9,546	-9,671	-9,541	-9,536	-7,807	-10,20	-13,848
2280	-7,778	-7,488	-7,647	-7,706	-7,767	-8,060	-6,489	-8,454	-11,855
2271	-7,476	-7,235	-7,356	-7,337	-7,520	-8,019	-5,665	-7,319	-11,010
2267	-4,231	-4,089	-4,156	-4,131	-4,345	-4,895	-2,936	-4,513	-6,907
2263	-2,443	-2,353	-2,390	-2,367	-2,590	-3,164	-1,521	-3,569	-5,237
2259	-1,264	-1,201	-1,217	-1,200	-1,420	-2,026	-0,677	-3,436	-4,666
2255	-0,488	-0,434	-0,430	-0,426	-0,685	-1,390	-1,101	-3,517	-4,641
2251	-0,845	-0,809	-0,795	-0,863	-1,064	-1,599	-1,887	-3,525	-4,794
2247	-1,705	-1,663	-1,660	-1,726	-1,923	-2,348	-2,571	-3,623	-5,218
2243	-2,187	-2,142	-2,150	-2,207	-2,401	-2,761	-2,777	-3,381	-5,159
2238	-2,202	-2,156	-2,166	-2,215	-2,419	-2,786	-2,559	-3,180	-5,033
2239	-0,241	-2,213	-2,231	-2,284	-2,511	-2,907	-0,341	-0,441	-0,481

Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumu ve Lagrange yaklaşımına göre oluşturulan sekiz farklı su seviyesi durumuna ait modellerin dinamik analizleri sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri Şekil 122 (a) ve (b)'de verilmektedir. II-II kesiti boyunca elde edilen yer değiştirme değerleri benzer eğilimde değişmekte olup, yer değiştirme değerlerinin 172 m'lik su seviyelerinde maksimum değere ulaştığı ve maksimum değeri aldığı bölgenin kret orta bölgesinden saptığı görülmektedir. I-I kesiti boyunca ise tüm su seviyelerinde temelde minimum olan yer değiştirme değerleri gövde yüksekliği boyunca artmakta, seçilen kesit boyunca maksimum yer değiştirme değeri 172m su seviyesinde oluşmaktadır.

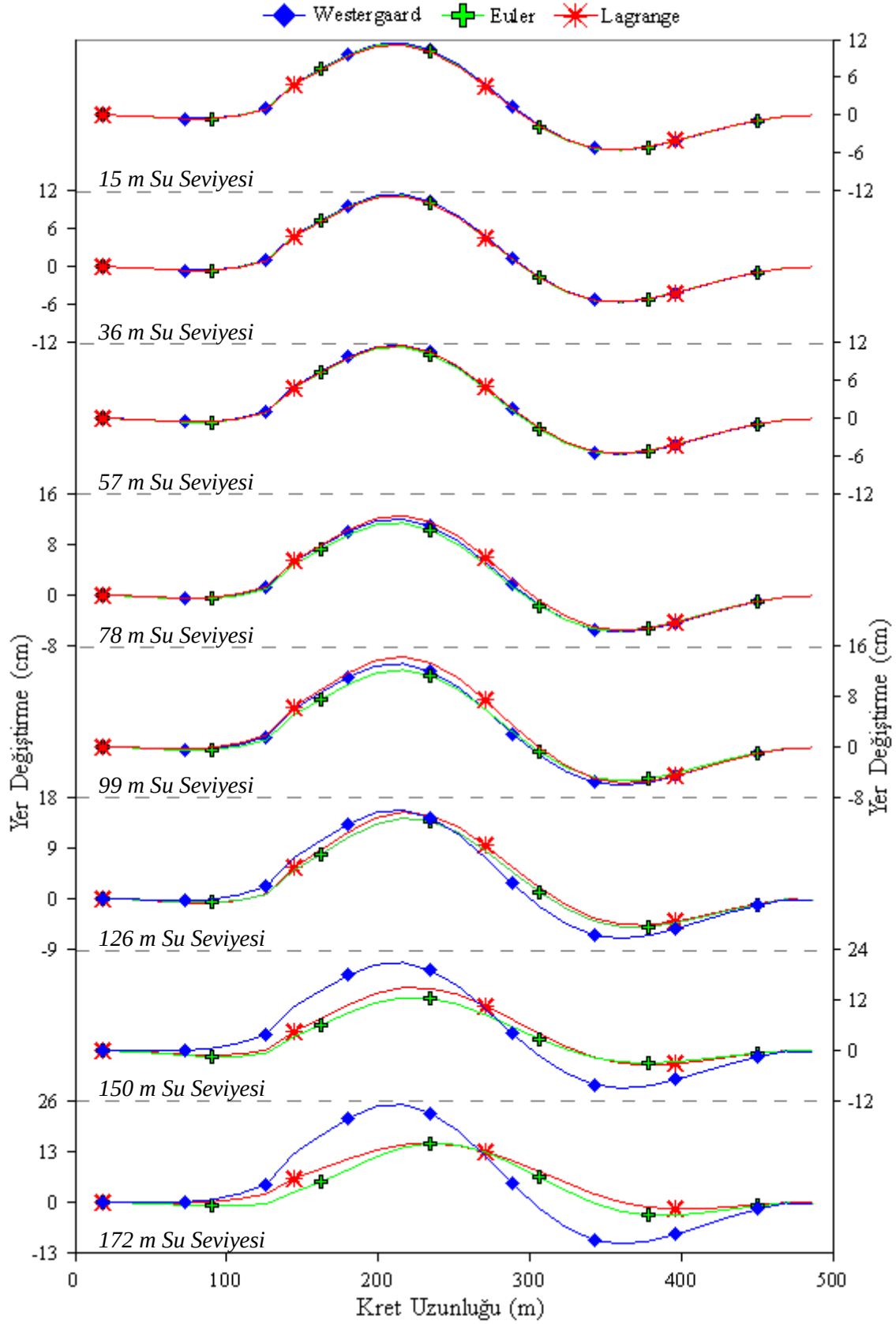
Yusufeli Barajına ait asal gerilmelerdeki değişimin belirlenmesi amacıyla Şekil 123 (a) incelendiğinde, rezervuarın boş ve Lagrange yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesinde elde edilen maksimum asal gerilmeler benzer eğilimde davranış göstermekte ve gövde yüksekliği boyunca artmakta, krete yakın bölgede azalmaktadır. 126 m'ye kadar su seviyesi arttıkça gerilmelerinde arttığı ancak 150 m ve 172 m su seviyesinde ise gerilmelerin seçilen kesit için azaldığı görülmektedir. Minimum asal gerilmeler incelendiğinde (Şekil 123 (b)) ise ilk 99 m'lik su seviyesine kadar değerlerin benzer eğilimde ve birbirine yakın olduğu ancak 126 m, 150 m ve 172 m su seviyeleri için minimum gerilmelerin hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. II-II kesiti için, Şekil 123 (c)'den görüldüğü üzere, maksimum asal gerilmeler yamaçtan itibaren 100 m'lik mesafeden sonra kretin orta bölgesine kadar artmakta, orta bölgeyi geçtikten sonra azalmaya başlamaktadır. 126 m'lik su seviyesine kadar gerilmelerin su seviyesindeki artışa bağlı olarak arttığı ancak 150m'lik su seviyesinde ise gerilmelerin özellikle kret orta bölgesi civarında hızla düştüğü görülmektedir. II-II kesiti boyunca minimum asal gerilmeler (Şekil 123 (d)) ilk 99 m'lik su seviyesi için aynı eğilimdedir. 126 m, 150 m ve 172 m'lik su seviyelerinde ise minimum gerilme değerlerinin mutlak değerce hızla arttığı görülmektedir.

Rezervuarın boş ve Lagrange yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için yapılan deprem analizi boyunca 2426 nolu düğüm noktasında elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 124'te verilmektedir.

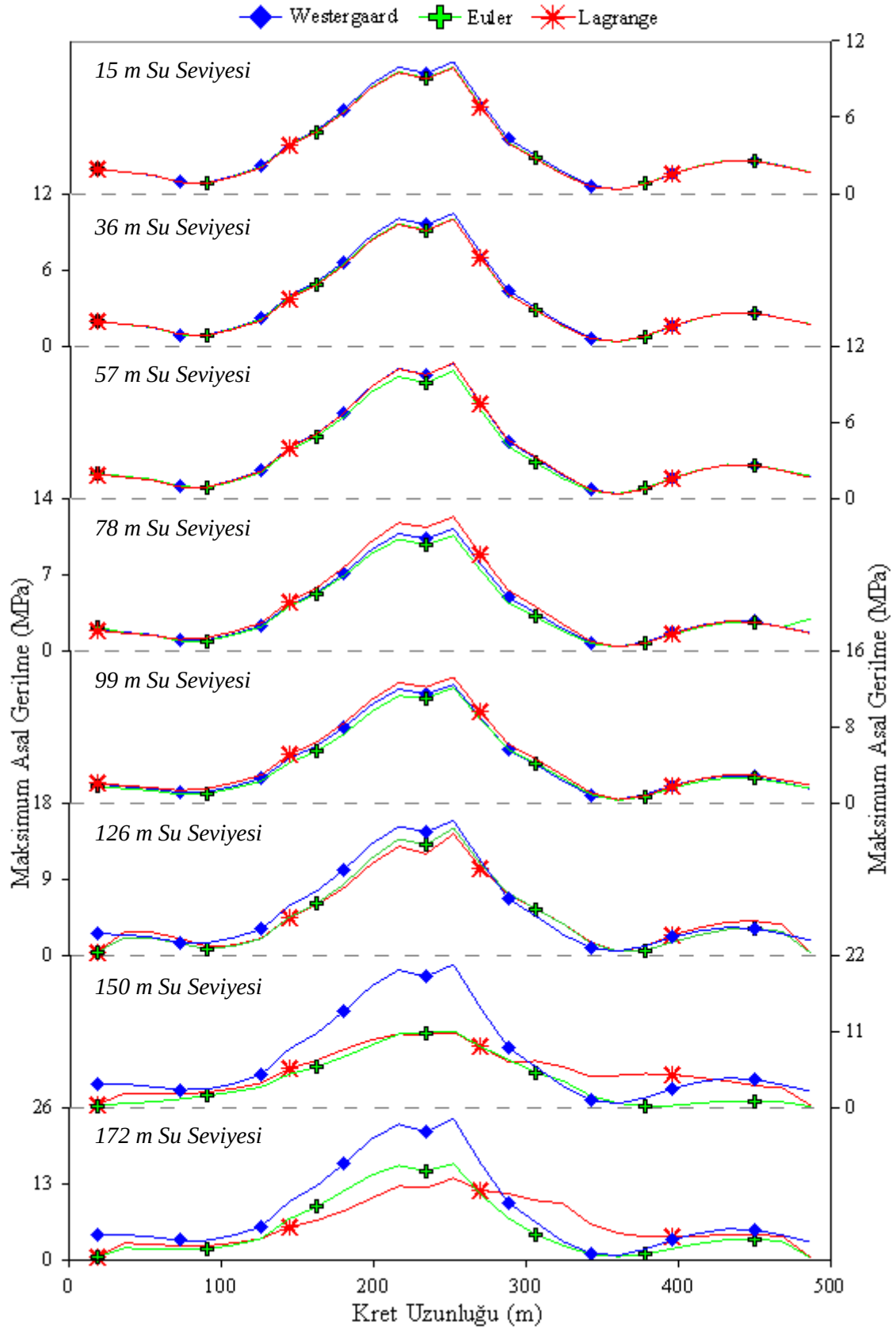


Şekil 124. Yusufeli Baraj rezervuarının boş ve Lagrange yaklaşımına göre modellenen sekiz farklı su seviyesi durumu için dinamik analizi sonucu 2426 nolu düğüm noktasına ait grafikler (a) Yer değiştirme, (b) Maksimum asal gerilme, (c) Minimum asal gerilme

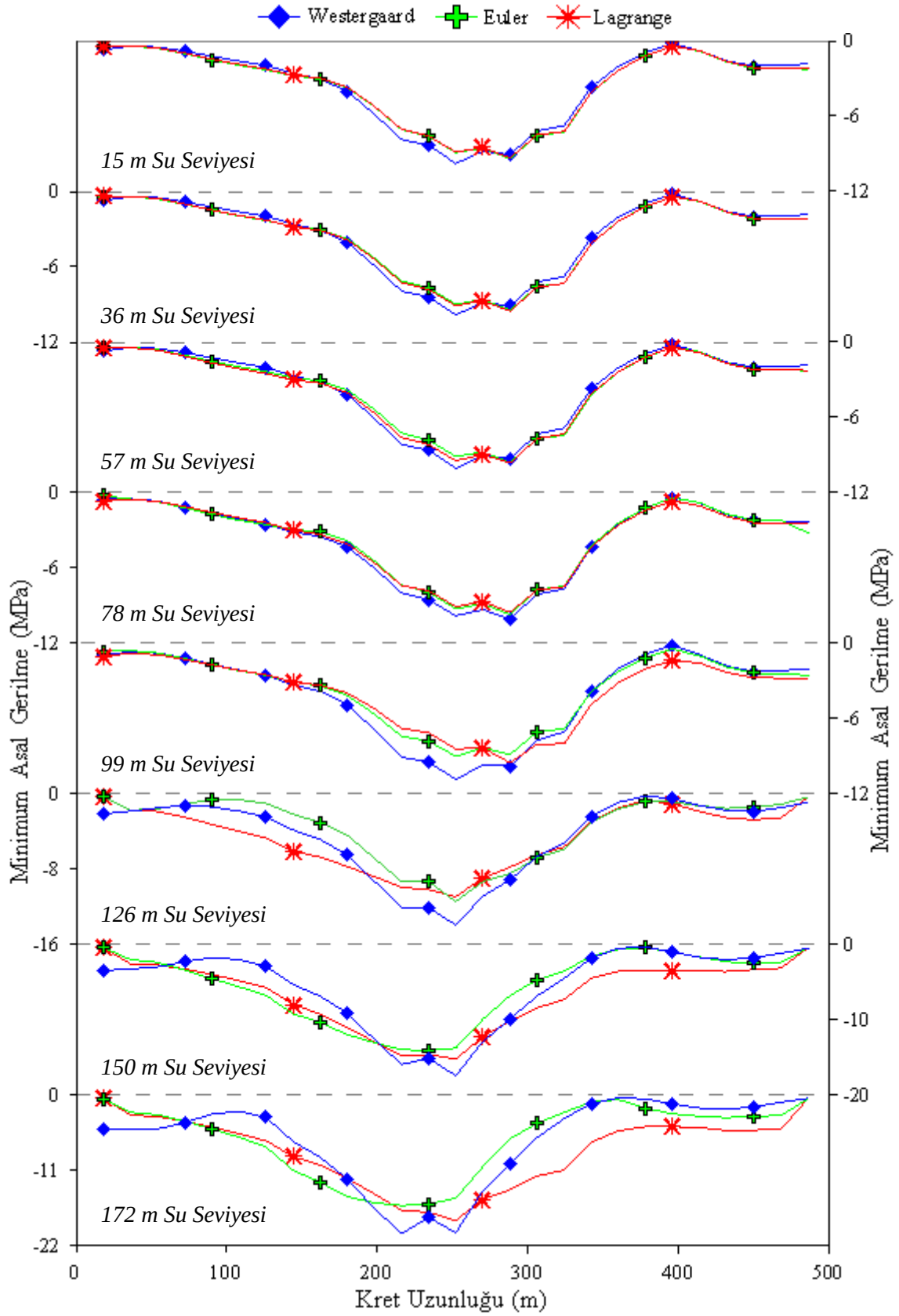
Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları ile rezervuar modelleri oluşturulan Yusufeli Barajının rezervuar su seviyesinin aynı olması durumunda deprem analizine ait sonuçların değişiminin irdelenebilmesi için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 125-127’de sırasıyla yer değiştirme, maksimum asal gerilmeler ve minimum asal gerilmeler her su seviyesi için ayrı ayrı verilmektedir.



Şekil 125. Yusufeli Barajının dinamik analizi sonucu sekiz farklı su seviyesi için elde edilen yer değiştirme değerlerinin Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre karşılaştırılması



Şekil 126. Yusufeli Barajının dinamik analizi sonucu sekiz farklı su seviyesi için elde edilen maksimum asal gerilme değerlerinin Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre karşılaştırılması



Şekil 127. Yusufeli Barajının dinamik analizi sonucu sekiz farklı su seviyesi için elde edilen minimum asal gerilme değerlerinin Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre karşılaştırılması

Yusufeli Barajının dinamik analizlerinin ardından Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre elde edilen yer değiştirme değerleri Şekil 125'te farklı su seviyeleri için ayrı ayrı karşılaştırılarak gösterilmektedir. Şekil 125 incelendiğinde her üç yaklaşım için ilk 78 m'lik su seviyesine kadar barajın kret boyunca yer değiştirme değerlerinin aynı olduğu ve çizilen grafik çizgilerinin aynı eğilimde ve çakışık olduğu görülmektedir. 99 m'lik su seviyesinde ise Lagrange yaklaşımına ait sonuçların kret orta bölgesinde diğer iki yöntemle göre biraz daha fazla olduğu görülmektedir. 150 m'den itibaren ise Euler ve Lagrange yaklaşımına ait sonuçların benzer eğilimde devam ettiği, Westergaard yaklaşımına ait sonuçların daha fazla arttığı ve eğiliminin değiştiği gözlemlenmektedir. 172 m'lik maksimum su seviyesinde yer değiştirme değerlerinin en yüksek 25,31cm ile Westergaard, 15,32 cm ile Lagrange ve en düşük değer olan 15,30cm Euler yaklaşımından elde edildiği görülmektedir. Westergaard yaklaşımına göre elde edilen yer değiştirme değerinin Euler yaklaşımından elde edilen değere göre yaklaşık %65 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Şekil 126 incelendiğinde Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre elde edilen maksimum asal gerilme değerleri barajın kret eksenini boyunca her üç yaklaşım için ilk 99 m'lik su seviyesine kadar neredeyse aynı olduğu ve çizilen grafik çizgilerinin aynı eğilimde olduğu görülmektedir. 126 m'lik su seviyesinden itibaren ise yaklaşımlara ait sonuçların aynı eğilimde devam ettiği ancak değerler arasındaki farkların artmaya başladığı görülmekte olup, maksimum su seviyesi olan 172 m'de maksimum asal gerilmeler oluşmaktadır. Yaklaşımlara ait en yüksek maksimum asal gerilmeler 24,06 MPa ile Westergaard, 16,35 MPa ile Euler ve en düşük değer olan 13,88 MPa Lagrange yaklaşımına göre elde edilmektedir. Westergaard yaklaşımına göre elde edilen maksimum asal gerilme değerinin Lagrange yaklaşımından elde edilen değere göre yaklaşık %73 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 127 incelendiğinde Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre elde edilen minimum asal gerilme değerleri barajın kret eksenini boyunca her üç yaklaşım için ilk 78 m'lik su seviyesine kadar neredeyse aynı olduğu ve çizilen grafik çizgilerinin aynı eğilimde olduğu görülmektedir. 99 m'lik su seviyesinde ise yaklaşımlara ait sonuçların aynı eğilimde devam ettiği ancak değerler arasındaki farklılıkların artmaya başladığı görülmekte olup, minimum asal gerilme değerleri Westergaard yaklaşımında oluşmakta diğer iki yaklaşımlara ait sonuçlar birbirine yakın değerlerdedir. 126 m'lik su seviyesinden itibaren her üç yaklaşıma ait sonuçlar arasındaki farklar açılmaktadır. 172 m'lik maksimum su seviyesinde minimum asal gerilme değerlerinin mutlak değerce en yüksek 20,26 MPa ile

Westergaard, 18,37 MPa ile Lagrange ve en düşük değer olan 16,18 MPa Euler yaklaşımından elde edildiği görülmektedir. Westergaard yaklaşımına göre elde edilen minimum asal gerilme değerinin Euler yaklaşımından elde edilen değere göre yaklaşık %25 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

2.3. Kemer Barajlarda Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme

Sürekli izleme sistemleri, barajın işletme koşullarındaki değişikliklere, çevresel olaylara ve diğer potansiyel tehditlere karşı hızlı bir şekilde önlem alma imkanı sağlamaktadır. Bu önemli yapılarda olası risklerin önceden tespit edilebilmesi ve gerekli önlemlerin alınarak zamanında müdahale edebilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, izleme sistemleri, barajın kullanım ömrü boyunca oluşabilecek yapısal değişiklikleri takip ederek, uzun vadeli sürdürülebilirliği sağlamak adına kritik bilgilerde sunmaktadır. Mühendislik teknolojisindeki son gelişmeler ile bu büyük yapıların güvenliği, dayanımı ve verimliliğini maksimize etmeyi amaçlayan uzun süreli izleme sistemleri, su kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamak adına kritik bir rol oynayarak, kemer baraj projelerinin başarısını güvence altına almaktadır.

Barajlara kurulan sensörler ile baraja ait ivme, yer değiştirme, eğim, sıcaklık, su seviyesi vb. gibi çeşitli parametrelerin ölçümlerinin yapılması ile gerçekleştirilen yapısal durumun izlenmesi sırasında bu verilerde oluşabilecek farklılıkların tespiti ile barajda normal olmayan bir durumun belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca, bu sensörler, yapının uzun vadeli performansını anlamak ve olası riskleri önceden tahmin etmek için sürekli olarak veri sağlamaktadır. Sürekli izleme sistemlerinin temelini oluşturan ivme l  erler, değişen su, sıcaklık, rüzgar, yer hareketleri ve dış yükler gibi çevresel etkiler altında barajda oluşan titreşimleri anlık olarak tespit edebilmektedir. Yapının mevcut yapısal durumunun bir ifadesi olan dinamik karakteristiklerin belirlenmesi ve izlenmesinde yaygın olarak kullanılan ivme  l  erler en etkili ve güvenilir sonuçların elde edilmesine imkan sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında Deriner ve Yusufeli barajlarının çevresel koşullar altında yapısal davranışlarındaki değişimlerin sürekli olarak izlenmesi amacıyla yapıya yerleştirilen ivme  l  er sensör sistemleri ile uzun süreli izlenme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deriner barajı elektrik üretimi devam eden bir baraj olup yerleştirilen ivme  l  er sistemi ile barajın, ortam sıcaklığı ve mevsimsel olarak değişen su seviyeleri altında dinamik karakteristiklerinin değişimi incelenmiştir. Yusufeli Barajının inşasının tamamlanmasının ardından rezervuarın

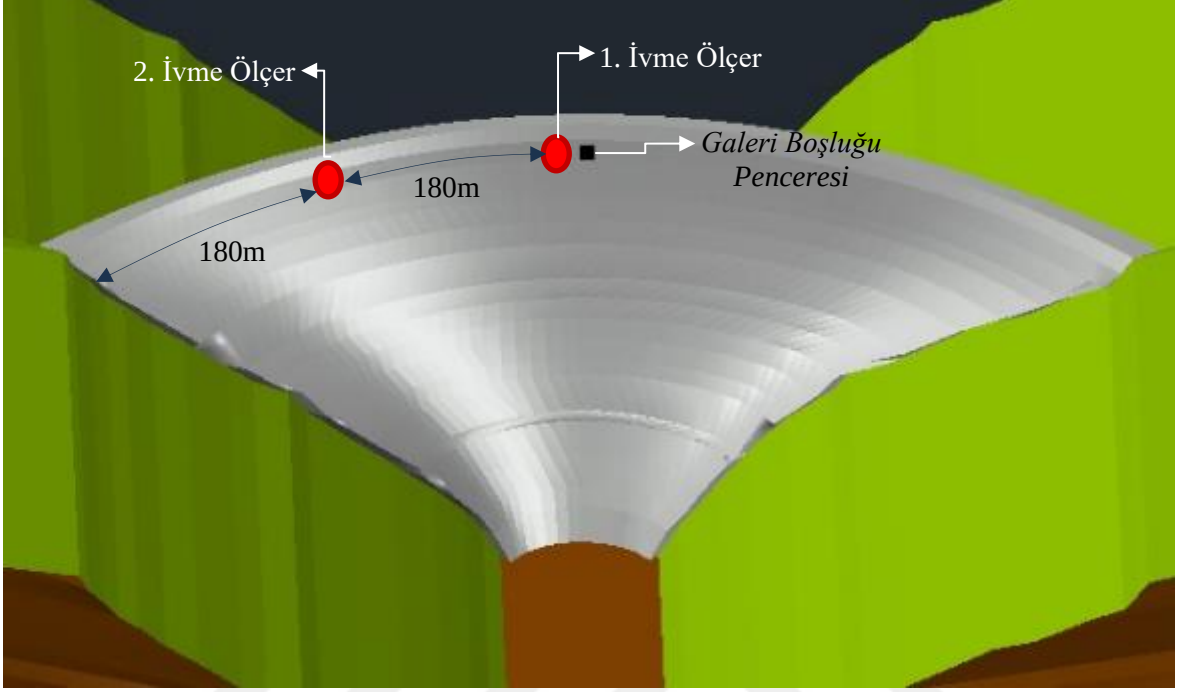
su tutmaya başladığı andan itibaren baraj gövdesinin dinamik karakteristiklerinin değişimini izlemek amacıyla barajın kret bölgesine ivme ölçerler yerleştirilerek su tutma süreci tamamlanana dek izleme gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Deriner Barajında Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme

249m gövde yüksekliği ve 720m kret uzunluğu ile Türkiye'nin en yüksek ikinci kemer barajı olan Deriner Barajının değişen mevsim koşulları altında yapısal durumunun belirlenmesi amacıyla uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışması yürütülmüştür. Bölüm 2.1'de Deriner Barajında gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri detaylı olarak paylaşılmıştır. Bu testler günü birlik olarak baraja gidilerek belirlenen ölçüm noktalarına yerleştirilen ivme ölçerlerden elde edilen ham sinyallerin işlenmesi ile elde edilmiştir. Ardından ölçüm sensörleri toplanarak ölçüm işlemi tamamlanmıştır. Ancak bu aşama hem baraj kretinin çok uzun olması hem de değişen hava şartlarının durumu zorlaştırması ile ölçüm sürecinin uzamasına sebep olmuş hem de insan gücü gerektiren sensör kurulum aşamasının aynı tempoda düzenli ve sürekli olarak gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığını göstermiştir. Bu durum sürekli izleme amacıyla sensörlerin baraja kalıcı olarak yerleştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Sürekli izleme amacıyla barajın en üst galeri boşluğuna iki adet Sara SL06 tipi üç eksenli, 156dB dinamik aralığına ve 0-1500Hz frekans aralığına sahip ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bölüm 2.1'de tüm kret boyunca detaylı olarak yerleştirilen ivmeölçerler ile yapılan deneysel testlerden elde edilen grafikler referans olarak dikkate alınmış olup, sürekli izleme sürecinde yalnızca iki adet ivmeölçer kullanımının frekans ve mod şekillerini elde etmede yeterli olacağı kanaatine varılmıştır. Mod şekillerinin simetrik olması nedeniyle baraj gövdesinin yarısı dikkate alınarak sensör yerleşim planı gerçekleştirilmiştir. Şekil 128 Deriner Barajının en üst galeri boşluğuna yerleştirilen iki adet ivme ölçere ait genel yerleşim planını göstermektedir.

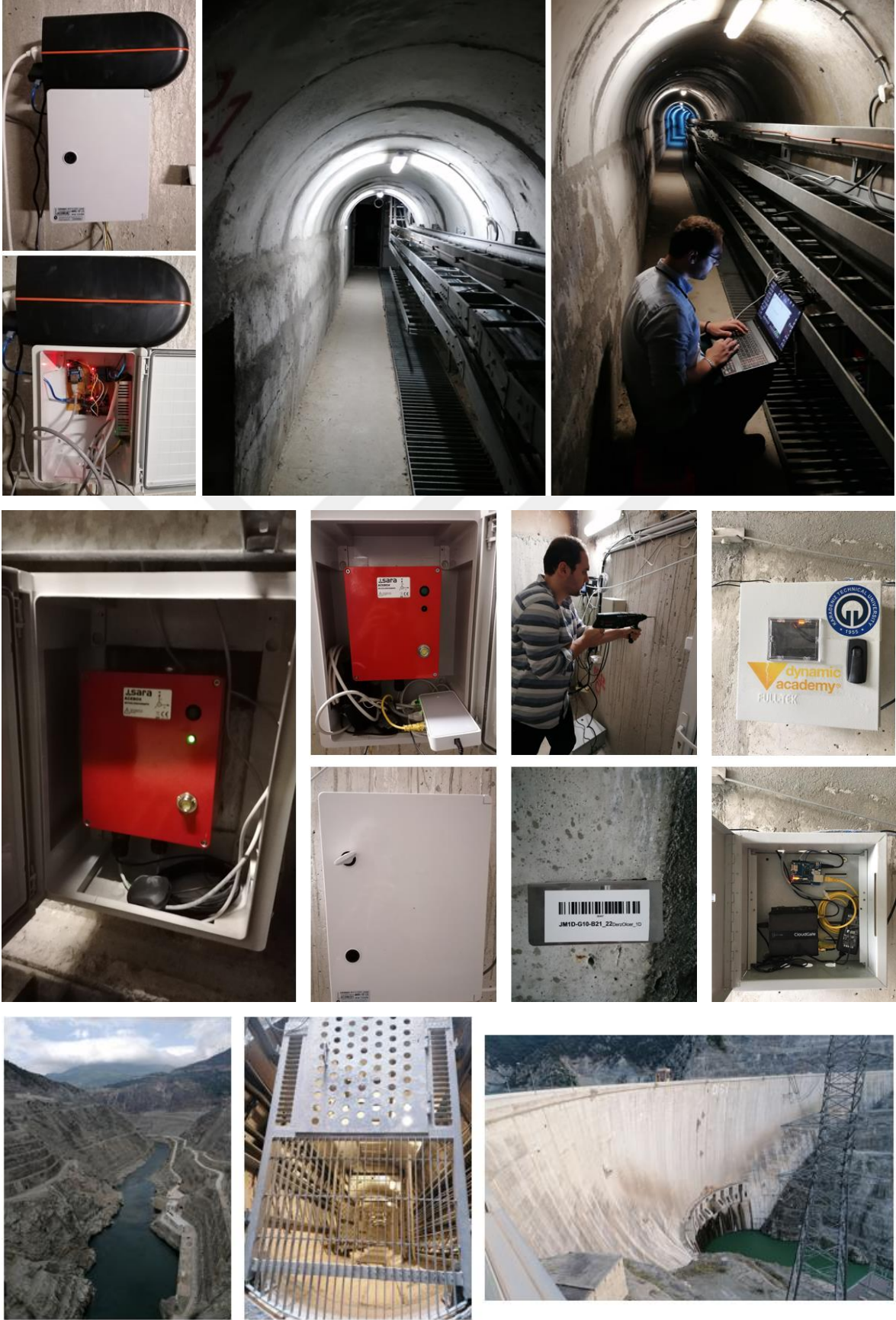
Şekil 128'den görüldüğü üzere 384,50 m kotunda bulunda bulunan en üstteki galeri boşluğuna ivmeölçer kurulumu yapılmıştır. Galeri boşluğunda baraj gövdesinin tam orta hizasına denk gelen yerde dış ortama açılan bir pencere bulunmaktadır. Bu pencerenin hemen yan kısmında 21 nolu pendulum odası isimli küçük bir oda bulunmakta. Bu oda da barajın inşası sırasında baraja kurulan pendulumun bulunduğu bir kısımdır. Bu odanın konumu baraj gövdesinin tam orta noktası/merkezinine yakın olduğu için Birinci ivmeölçer

buraya yerleştirilmiştir. İkinci ivmeölçer ise gövdenin ilk çeyrek kısmına denk gelmesi adına birinci ivmeölçerden itibaren 180 m ilerlenerek baraj duvarına monte edilmiştir.



Şekil 128. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesi için en üst galeri boşluğuna yerleştirilen ivme ölçerlerin genel yerleşim planı

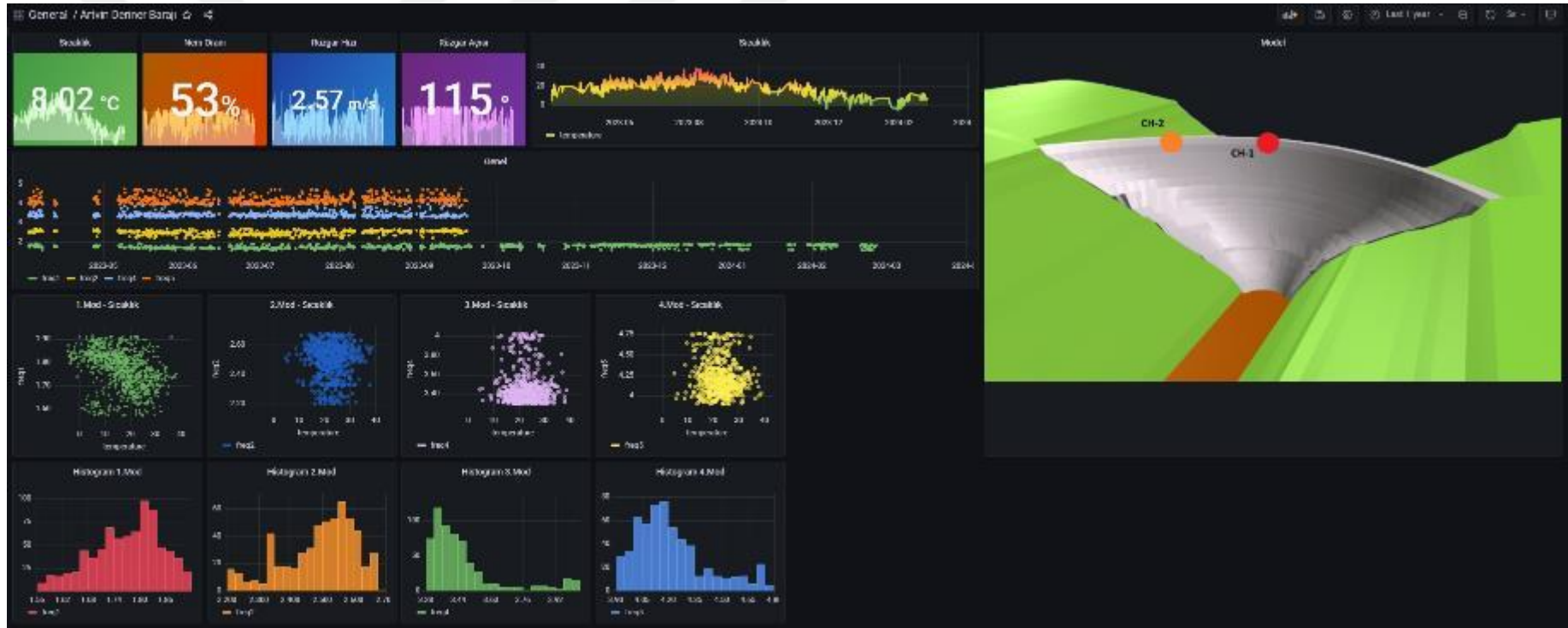
İvmeölçerlere kesintisiz güç sağlanması adına 21 nolu pendulum odasında kesintisiz güç kaynağı ve ivmeölçerleri belirli aralıklarla açıp kapatması için sinyal gönderen bir kit Okur (2023) tarafından hazırlanan doktora tezi kapsamında tasarlanarak yerleştirilmiştir. Böylece verilerin uzaktan kontrolünü sağlayabilmek ve veri kesintisi olması durumunda ivmeölçerleri resetleyerek yeniden veri toplamaya hazır hale getirilmesi sağlanmıştır. İvmeölçerden toplanan verinin internet aracılığı ile anlık olarak bize ulaşımı sağlanmıştır. Galerî boşluğu penceresi sayesinde dış ortamla temas kurulabildiği için galerî boşluğunda sim kart ve internet erişiminin sağlanabildiği tek yer burasıdır. Bu nedenle bu bölgeye endüstriyel modeme kurulmuştur. Endüstriyel modemın içerisine aylık 100gb internet kotası bulunan bir sim kart yerleştirilmiştir. Modemin elektriği, 21 nolu pendulum odasına kurulan kesintisiz güç kaynağı kabini ile sağlanmıştır. Her iki ivmeölçerin modem ile bağlantısı ethernet kablolarıyla gerçekleştirilmiştir. Deriner Barajına kurulan ivmeölçer sistemine ait bazı görseller Şekil 129'da verilmektedir.



Şekil 129. Deriner Barajında uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme için ivmeölçer kurulumuna ait bazı görseller

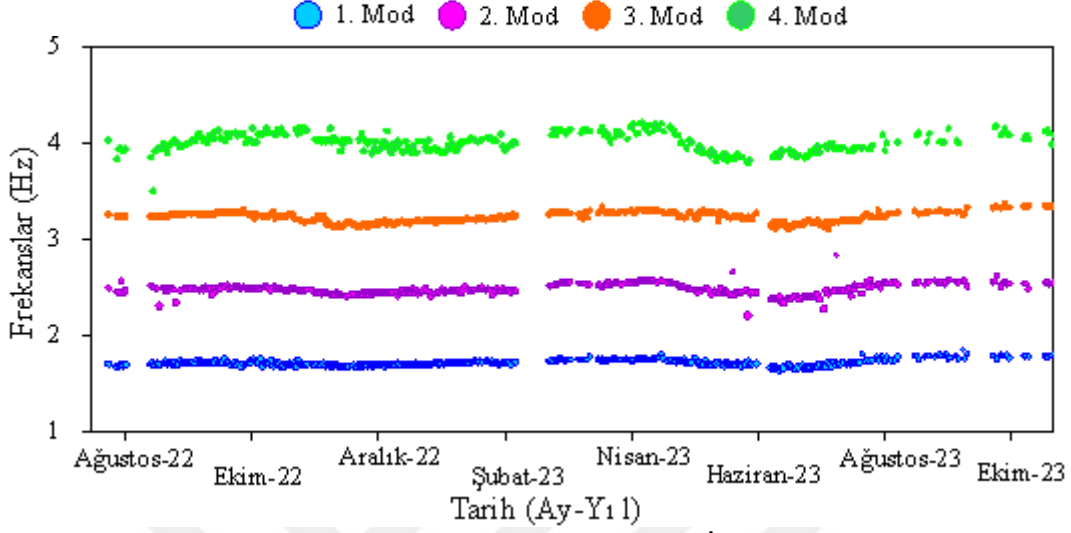
Deriner Barajının Yapı Sağlığı İzlemesi amacıyla baraja kurulan iki ivmeölçerden toplanan ham sinyaller internet data hattı ile Okur (2023) tarafından tez kapsamında hazırlanan online web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme programına aktarılmıştır. Okur (2023) tarafından hazırlanan ve ticarileştirilen bu YSİ programı uzun süreli olarak izlenen yapıların tüm bilgilerini ve ham sinyal verilerinin depolanması, verilerin işlenmesi, yorumlanması, grafiklendirilmesi, raporlandırılması ve istenilen tarihteki verilere kolaylıkla ulaşılabilmesi gibi gelişmiş birçok işlevi yapmaktadır. Tüm verilerin anlık olarak işlenip grafikleştirilmesi ile yapının mevcut durumuna ait sinyal verilerinin dinamik grafikler üzerinden takip edilmesine imkan sağlamaktadır. Bu program, Miniseed (.msd), Seismic Analysis Code (.sac), Technical Data Management Streaming (.tdsms), Text File (.txt) gibi çeşitli dosya formatlarına sahip ham sinyal verilerini sürekli olarak PostgreSQL veritabanında depolayabilmektedir. Ayrıca, ham sinyallerin zaman serilerine bağlı görsel grafiklerini oluşturabilme ve belirlenen eşik değerlere ulaşıldığında uyarı verebilme yeteneğine sahiptir. Dinamik özelliklerin otomatik olarak belirlenebilmesi için özel yeni bir metodoloji geliştirilerek programa entegre edilmiştir. Programda, çevresel değişikliklerden kaynaklanan belirsizlikleri yönetebilmek için Bayes Sinir Ağları ile güven aralıkları hesaplanabilmektedir. Anormalliklerin tespiti için geliştirilen otokodlayıcı tabanlı derin öğrenme metodolojisi, platformun analitik kabiliyetlerini zenginleştirmekte ve yapının durumunu sürekli olarak izleyerek olası riskleri önceden belirleyebilmektedir. Her yapıya özgü uyarlanabilen bu programda yapıya farklı özelliklerde sensörler uygulanması durumunda da tüm sensörlere ait oluşturulan özel grafikler ile izleme süreci yürütülebilmektedir. Şekil 130'da Yapı Sağlığı İzleme programında Deriner Barajı için hazırlanmış arayüz ekranına ait bir görüntü sunulmaktadır.

Okur (2023) tarafından geliştirilen program kapsamına entegre edilen yazılım ile ivmeölçerlere ait ham sinyal verileri işlenerek belirlenen mod sayısına ait frekans değerlerini otomatik olarak hesaplayabilmektedir. Ayrıca program yapının bulunduğu bölgedeki hava sıcaklığına ait verilere de otomatik olarak erişebilmektedir. Şekil 131'de otomatik olarak elde edilen ilk dört doğal frekans değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri verilmektedir. Görseldeki grafiklerin daha net şekilde görselleştirilmesi amacıyla veri tabanından alınan grafiklere ait veriler kullanılarak grafikler yeniden oluşturulmuştur. Şekil 132'de tez kapsamında Yapı Sağlığı İzleme amacıyla Deriner Barajına yerleştirilen iki adet ivmeölçerden elde edilen 15 Ağustos 2022 - 15 Mart 2024 aralığına ait ilk dört doğal frekans değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği verilmektedir.

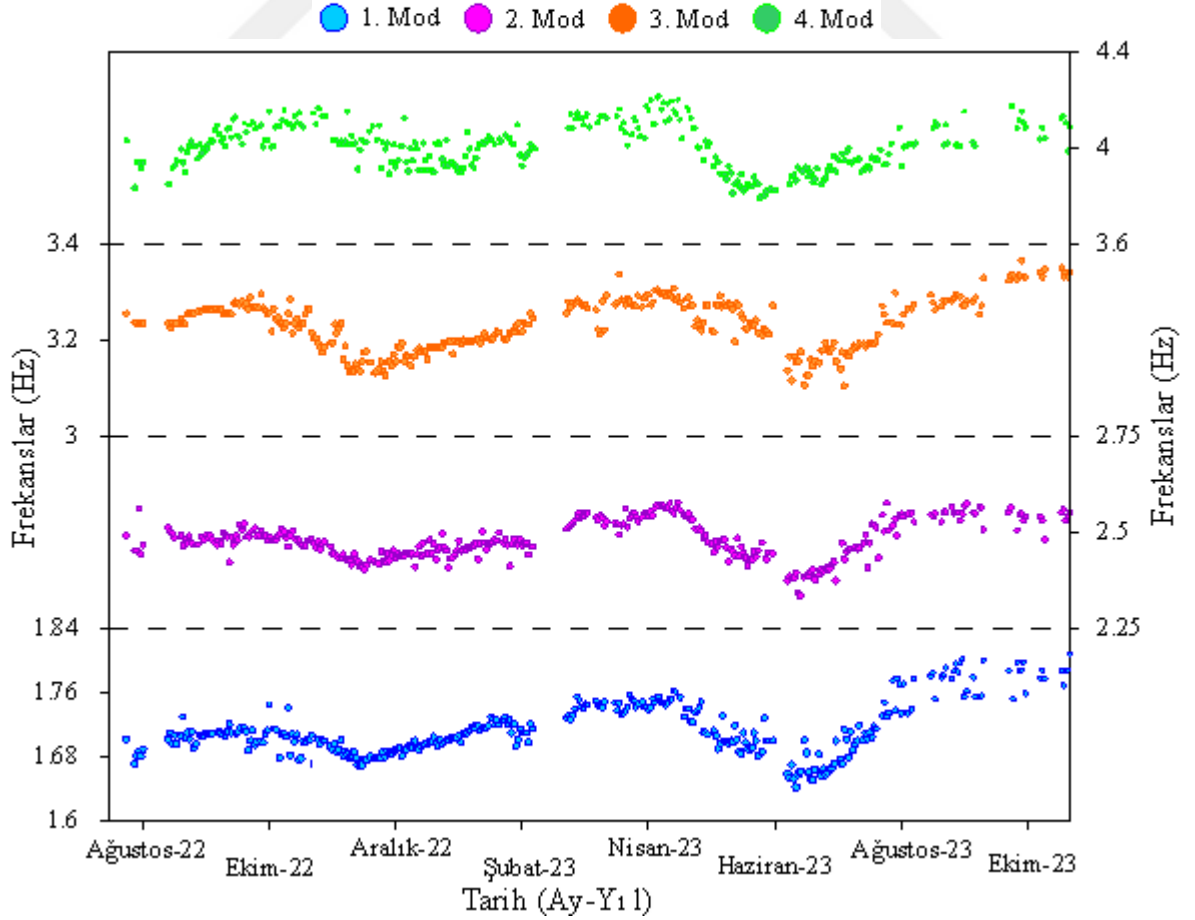


Şekil 130. Web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen Deriner Barajının gerçek zamanlı grafiklerine ait görsel

Her bir moda ait frekans değişimlerinin zamanla nasıl bir eğilim izlediğinin detaylı incelemesi adına her bir mod Şekil 132’de ayrı ayrı verilmiştir.

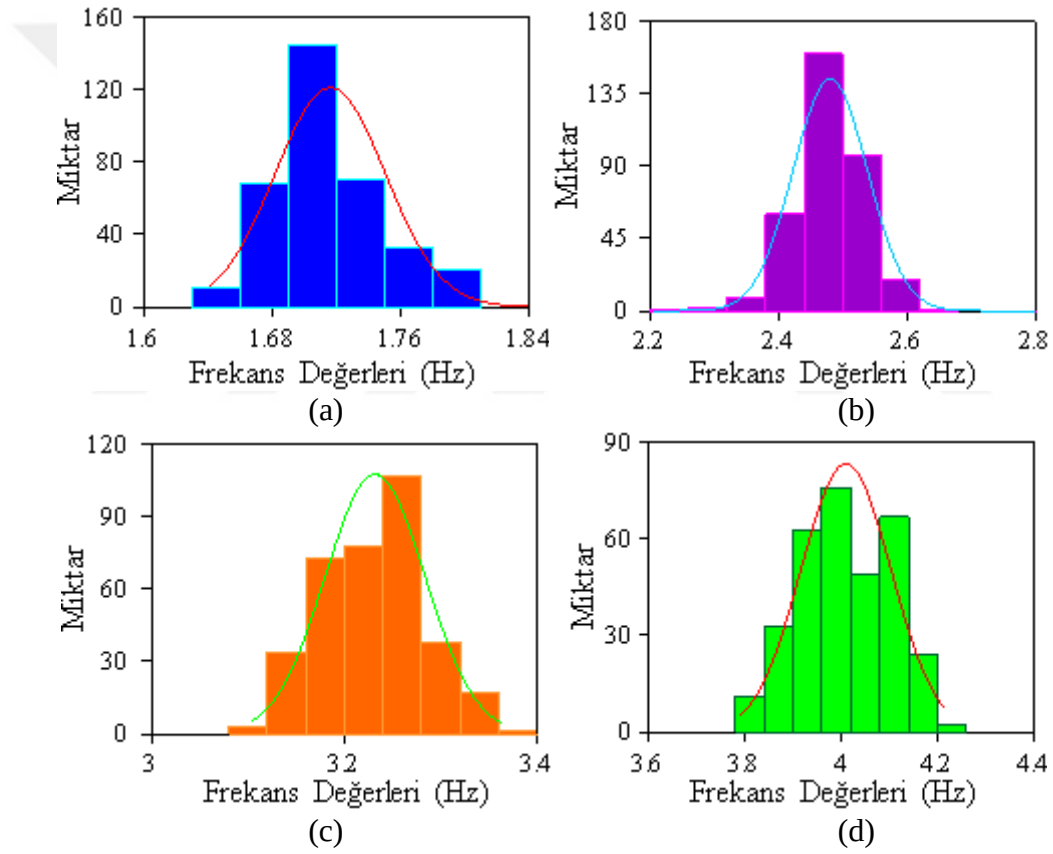


Şekil 131. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk dört moda ait frekans değerlerinin zamanla değişim grafiği



Şekil 132. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk dört moda ait frekans değerlerinin ayrı ayrı zamanla değişim grafikleri

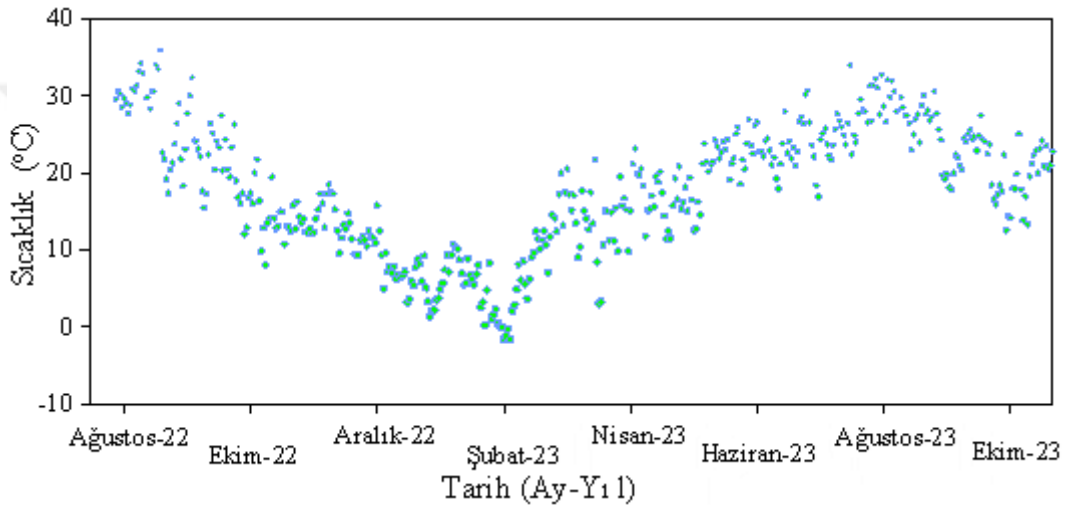
Şekil 132’de her bir moda ait frekans değerlerinin zamana göre değişimi daha detaylı olarak incelendiğinde, zamana bağlı olarak dört moda ait frekans değerlerinin benzer eğilimde değişim gösterdiği görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere frekans değerleri dört mod içinde Ağustos-2022 tarihinde artmaya başlayıp, Aralık-2022 tarihinde minimum değere inmiştir. Ardından yeniden artmaya başlayan frekans değerleri Nisan-2023 tarihinde maksimum değerlere ulaşp daha sonra azalma eğilimine geçmiştir. Frekans değerleri Temmuz-2023’te minimum değere ulaşp yeniden artmaya başlamaktadır. Her bir mod için normal dağılım değerlerini gösteren histogram grafikleri Şekil 133’te verilmektedir. Burada her bir mod için ağırlıklı olarak elde edilen frekans değerleri görülmektedir.



Şekil 133. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk dört moda ait frekans değerlerinin histogram grafikleri (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4

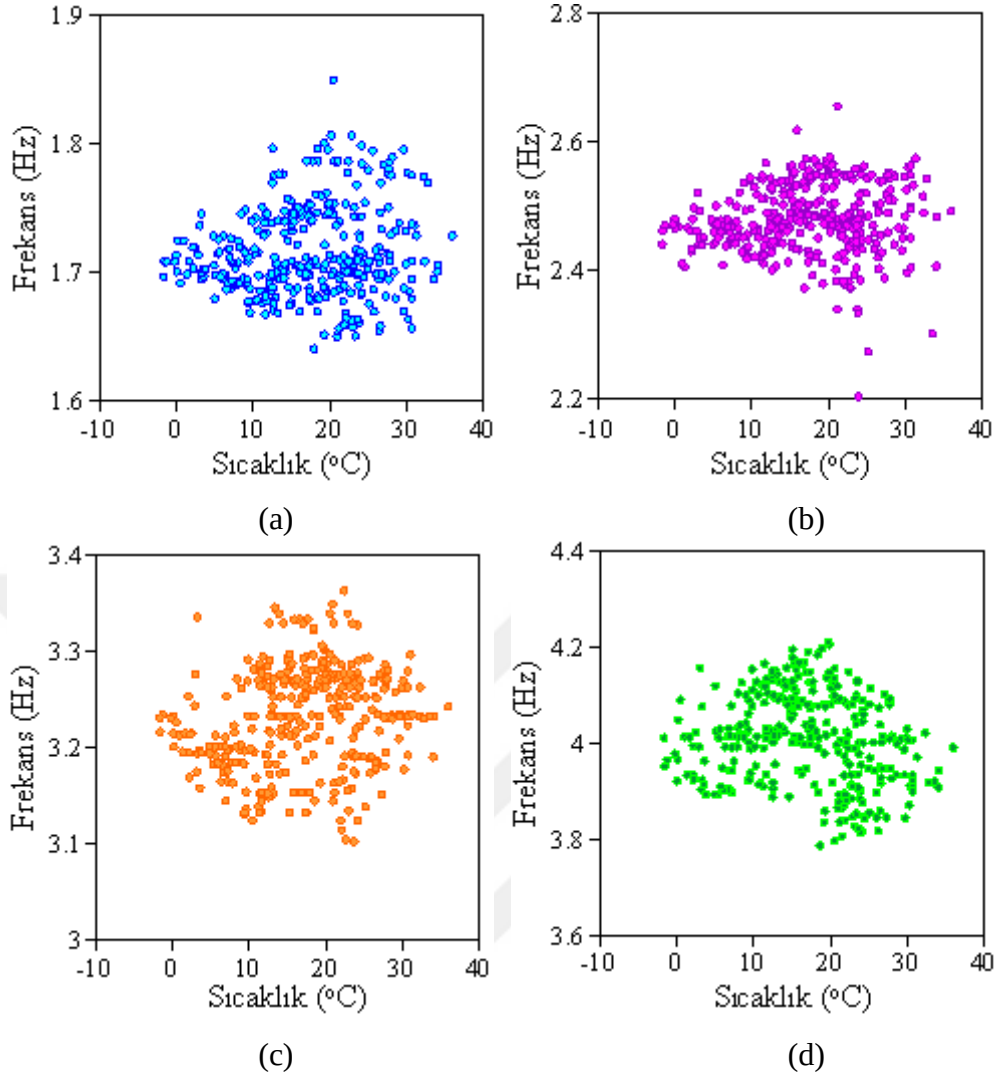
Şekil 133’te her bir mod için frekans değerlerinin normal dağılım grafikleri çizilmiş olup, frekans değerlerinin birinci modda 1,69-1,72 Hz, ikinci modda 2,4-2,5Hz, üçüncü modda 3,2-3,3 Hz ve dördüncü modda 3,9-4,1 Hz aralığında yoğunlaştığı görülmektedir.

Web tabanlı YSI programı tarafından otomatik olarak çekilen Deriner Barajının bulunduğu bölgeye ait hava sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim grafiği 15 Ağustos 22 ile 31 Ekim 2023 aralığını kapsayan frekans değerlerine karşılık gelen değerler alınarak oluşturulmuştur. Ham verilerin işlenmesi ile elde edilen frekans değerlerinin ilgili saatteki hava sıcaklığı verilerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 134'te verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere sıcaklıklar kış mevsiminde azalma yaz mevsimine doğru artma eğiliminde olup, maksimum sıcaklık 35,9 °C ile 3 Eylül 2022 tarihinde, minimum sıcaklık ise -1,67 °C ile 16 Şubat 2023 tarihlerinde elde edilmiştir.



Şekil 134. Deriner Barajında uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme süreci boyunca hava sıcaklıklarının zamanla değişim grafiği

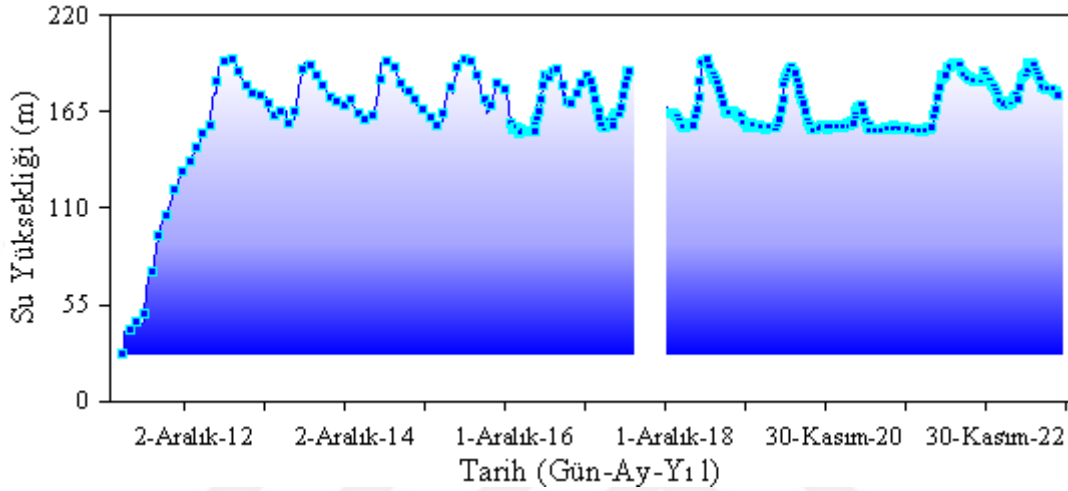
Doğal frekans değerlerinin sıcaklığa bağlı dağılımlarının belirlenmesi amacıyla Şekil 135'te her bir mod için frekans-sıcaklık dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Literatürde yapısal doğal frekansların sıcaklığa bağlı olarak genellikle azaldığı görülmektedir. Bu genel eğilim, malzemelerin termal genleşmesi ve mekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi nedeniyle meydana gelmektedir. Sıcaklık arttıkça, çoğu malzemenin genleşmesi ve elastisite modülünün (genellikle) azalması söz konusudur. Bu durum, yapısal elemanların daha az rijitliğe ve dolayısıyla daha düşük doğal frekanslara sahip olmasına neden olmaktadır. Bu durum sıcaklık ve malzemenin homojen olması gibi çeşitli parametrelere göre de değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle sıcaklık faktörünün izlenmesi ve değişen frekans değerlerine göre etkinliğinin belirlenebilmesi önemli bir husustur.



Şekil 135. Deriner Barajından elde edilen uzun süreli frekans ve ortam sıcaklığı verilerinin frekans-sıcaklık dağılım grafikleri a) Mod 1, b) Mod 2, c) Mod 3, d) Mod 4

26. Bölge Artvin DSİ'nin arşivinden temin edilen rezervuar su seviyeleri incelenerek grafikleştirilmiştir. Temin edilen rezervuar su seviyeleri 1 Mart 2012 ile 31 Ekim 2023 tarihleri arasını kapsamaktadır. Şekil 136 yaklaşık on bir yıllık rezervuar su değişimini ifade etmektedir. 1 Temmuz – 31 Aralık 2018 tarihleri arasındaki altı aylık bir veri kaybı mevcut olup o bölge grafikte boş bırakılmıştır. Deriner Barajı inşasının tamamlanmasının ardından 2012 Şubat ayında rezervuarı su tutmaya başlamıştır. Şekil 136 incelendiğinde, 1 Mart 2012 tarihine denk gelen su seviyesi 26,63m olup en düşük su seviyesidir. Bu tarihten maksimum su seviyesi olan 194,87 m ye kadar sürekli olarak su seviyesi artmıştır. 13 Haziran 2013 tarihine kadar devam eden su seviyesindeki yükselme bu noktadan itibaren azalma eğilimine geçmiştir. Bu tarihler Deriner Barajının rezervuar su tutma dönemi olup, maksimum su seviyesine ulaştıktan sonra barajda elektrik üretimi başlamıştır. 13 Haziran 2013 yılından

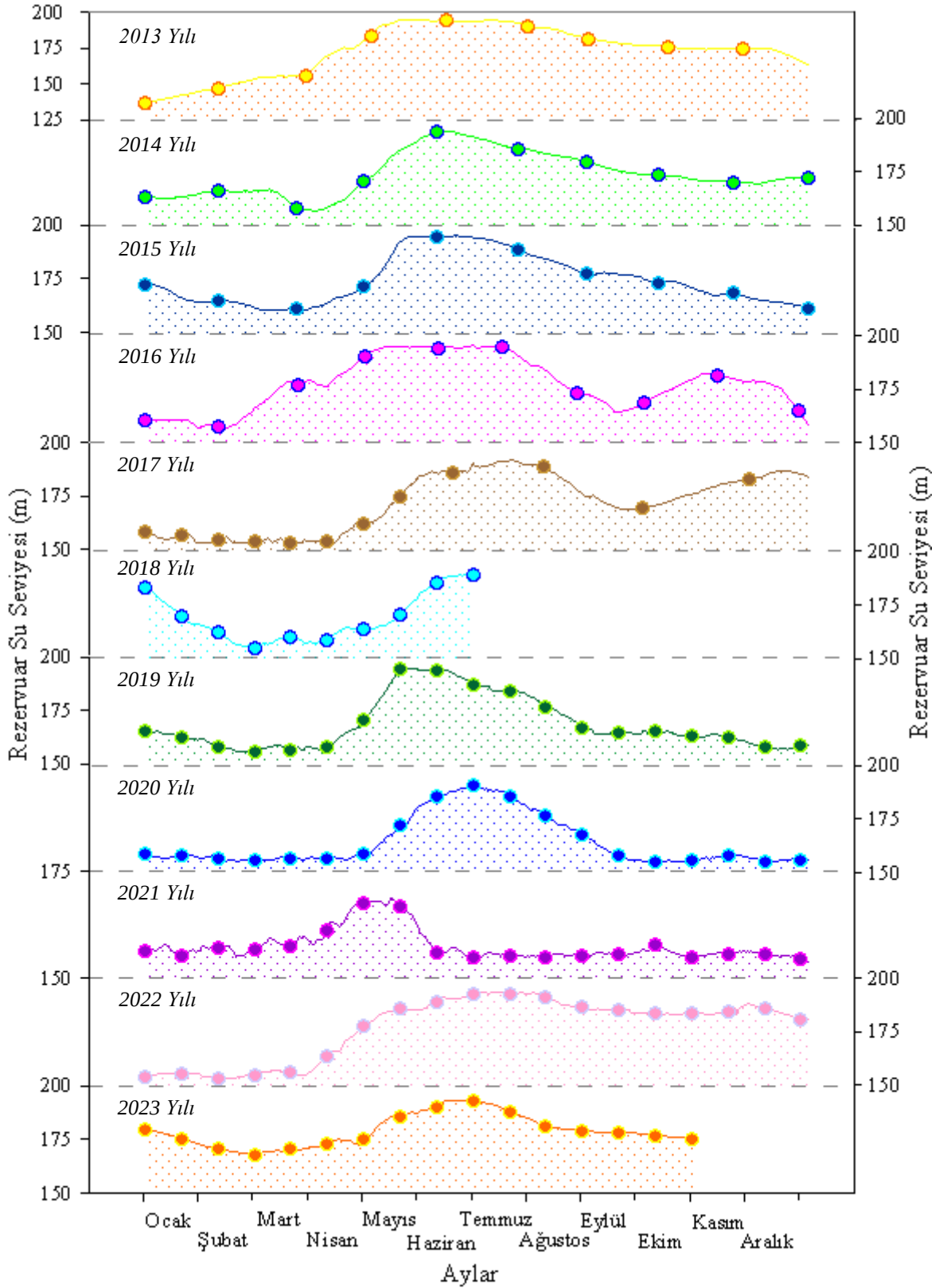
itibaren meydana gelen su seviyesindeki değişimler periyodik olarak incelenmiştir. On bir yıllık sürecin tamamı incelendiğinde ilk üç yıllık süreç boyunca benzer davranışın devam ettiği ardından sonraki yıllarda daha farklı bir davranış gösterdiği görülmektedir. Benzer zaman aralıklarındaki değişimi daha iyi gözlemleyebilmek adına Şekil 137’de bir yıllık periyodik süreçler halinde çizdirilerek yeni bir grafik oluşturulmuştur.



Şekil 136. Deriner Barajının on bir yıllık rezervuar su değişimi

Şekil 137 incelendiğinde, baraj rezervuarının su yüksekliğinde periyodik olarak belirgin değişimler görülmektedir. Ancak bu değişimlerin eğilimleri her yıl aynı olmamakla birlikte maksimum ve minimum su seviyesi hemen hemen benzer aylarda meydana gelmektedir. Su yüksekliğinin genel eğilimi ve dalgalanmaları çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu duruma sebep olabilecek en önemli etkenler arasında başlıca mevsimsel yağış miktarları, barajdan yapılan su salımı ve bölgedeki buharlaşma oranlarının değişmesi örnek verilebilir.

Şekil 137’ye göre her yıl için elde edilen maksimum ve minimum su seviyeleri ve bu su seviyelerinin hangi aylarda meydana geldiği Tablo 43’te detaylı şekilde özetlenmiştir. Ayrıca her bir yılda maksimum su seviyesinde meydana gelen azalma oranları da tabloda belirtilmiştir. Barajın ilk su tutma sürecinin sonu Eylül ayına denk gelmesi sebebiyle maksimum su seviyesi 2013 yılında Eylül ayında oluşmuştur. Diğer yıllarda ise maksimum su seviyelerinin genellikle Haziran ve Temmuz aylarında meydana geldiği görülmektedir. Minimum su seviyelerine bakıldığında ise minimum değerler Aralık -Nisan arasında değişkenlik göstermektedir.



Şekil 137. Deriner Barajının yıllık periyotlar halinde rezervuar su değişimi

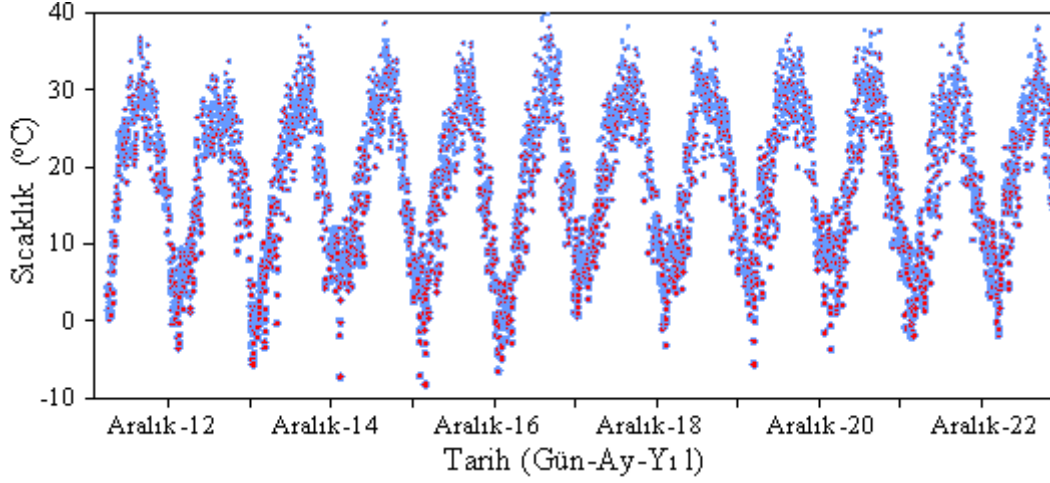
Tablo 43 ve Şekil 137’de yalnızca 2021 yılında maksimum su seviyesinin diğer yıllara göre oldukça düşük kaldığı görülmektedir. Bu fark özellikle o yılda yağışların az

olması, kurak bir dönem geçirilmesi ya da baraj suyu salınımının fazla olması nedeniyle oluşmuş olabilir. Tablo 43'te genel bir değerlendirme yapıldığında on bir yıllık süreç boyunca maksimum su seviyesinin 2016 yılında 195,34 m, minimum su seviyesinin ise 2013 yılında 136,88 m olarak elde edildiği görülmektedir. Maksimum su seviyesindeki azalış oranı ise %29 ile 2013 yılında en yüksek değerde elde edilmiştir.

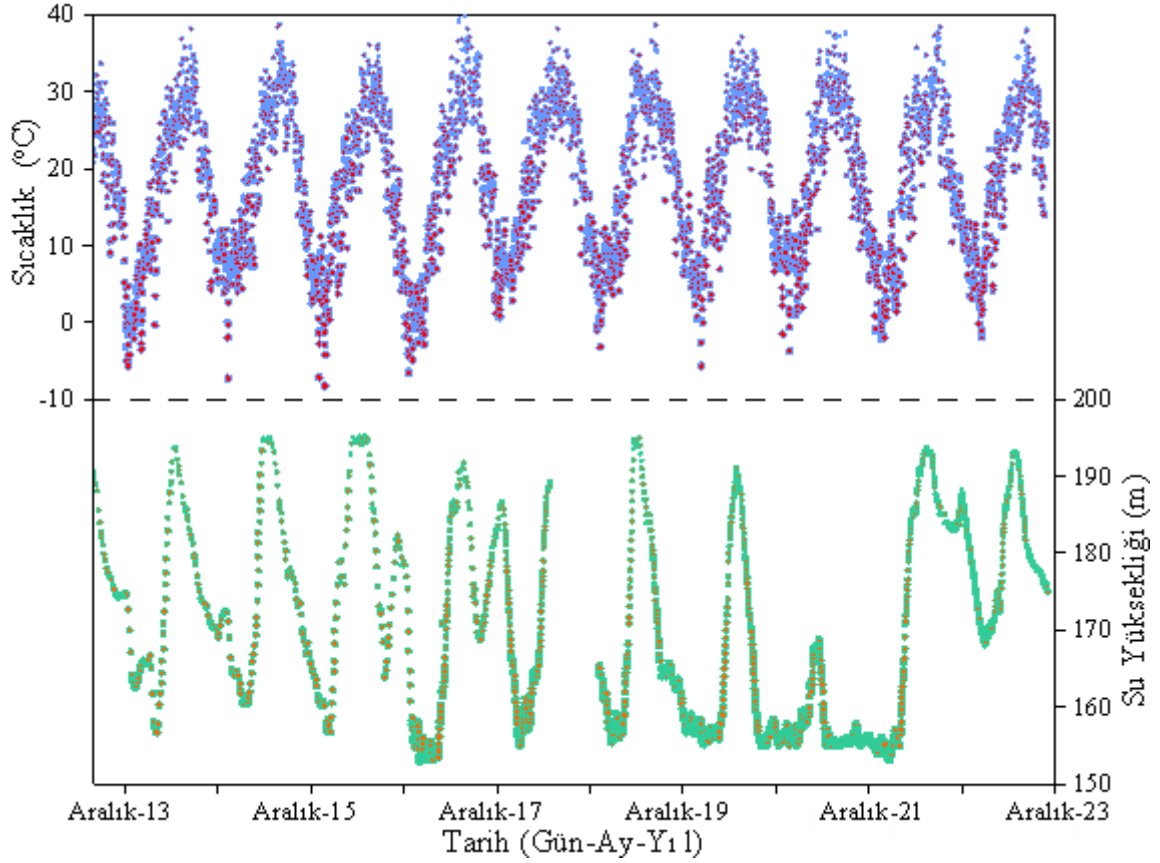
Tablo 43. Deriner Barajı'nda rezervuar suyu seviyesinin değişiminin yıllara göre dağılımı

Yıl	Rezervuar Su Seviyesi (m)				
	Maksimum Su Seviyesi	Maksimum Su Seviyesinin Oluştugu Ay	Minimum Su Seviyesi	Minimum Su Seviyesinin Oluştugu Ay	Fark (%)
2013	195,00	Eylül	136,88	Ocak	29,81
2014	193,81	Haziran	156,69	Nisan	19,15
2015	195,11	Haziran	160,51	Mart	17,73
2016	195,34	Temmuz	156,76	Şubat	19,75
2017	191,75	Temmuz	153,00	Ocak	20,21
2018	189,39	Temmuz	154,98	Mart	18,17
2019	195,00	Haziran	155,39	Şubat	20,31
2020	191,20	Temmuz	155,01	Aralık	18,93
2021	168,80	Mayıs	153,91	Aralık	8,82
2022	193,77	Temmuz	153,13	Şubat	20,97
2023	193,28	Temmuz	168,09	Mart	13,03

Baraj rezervuar su seviyesinin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimini incelemek amacıyla her bir su seviyesine ait günlük hava sıcaklığı değerleri web tabanlı YSİ programı ile otomatik çekilerek Şekil 138 ile görselleştirilmiştir. Şekil 138 on bir yıllık süreç boyunca günlük ortalama sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. Şekilden görüldüğü üzere maksimum sıcaklık temmuz ayında, minimum sıcaklık ise ocak ayında oluşmakta olup, on bir yıllık periyotta değişmemektedir. Baraj rezervuarının tamamen su dolup elektrik üretimine başladığı tarih olan 13 Haziran 2013 yılından itibaren yıllık periyodik su değişiminin sıcaklıkla ilişkisini belirlemek adına Şekil 139'da aynı grafik içerisinde çizdirilmiştir. Şekil 139'dan görüldüğü üzere genel olarak maksimum su seviyeleri maksimum sıcaklıkların olduğu aylarda meydana gelmektedir. Aynı şekilde su seviyelerinin minimum değeri, minimum sıcaklığın olduğu aylarda meydana gelmektedir.



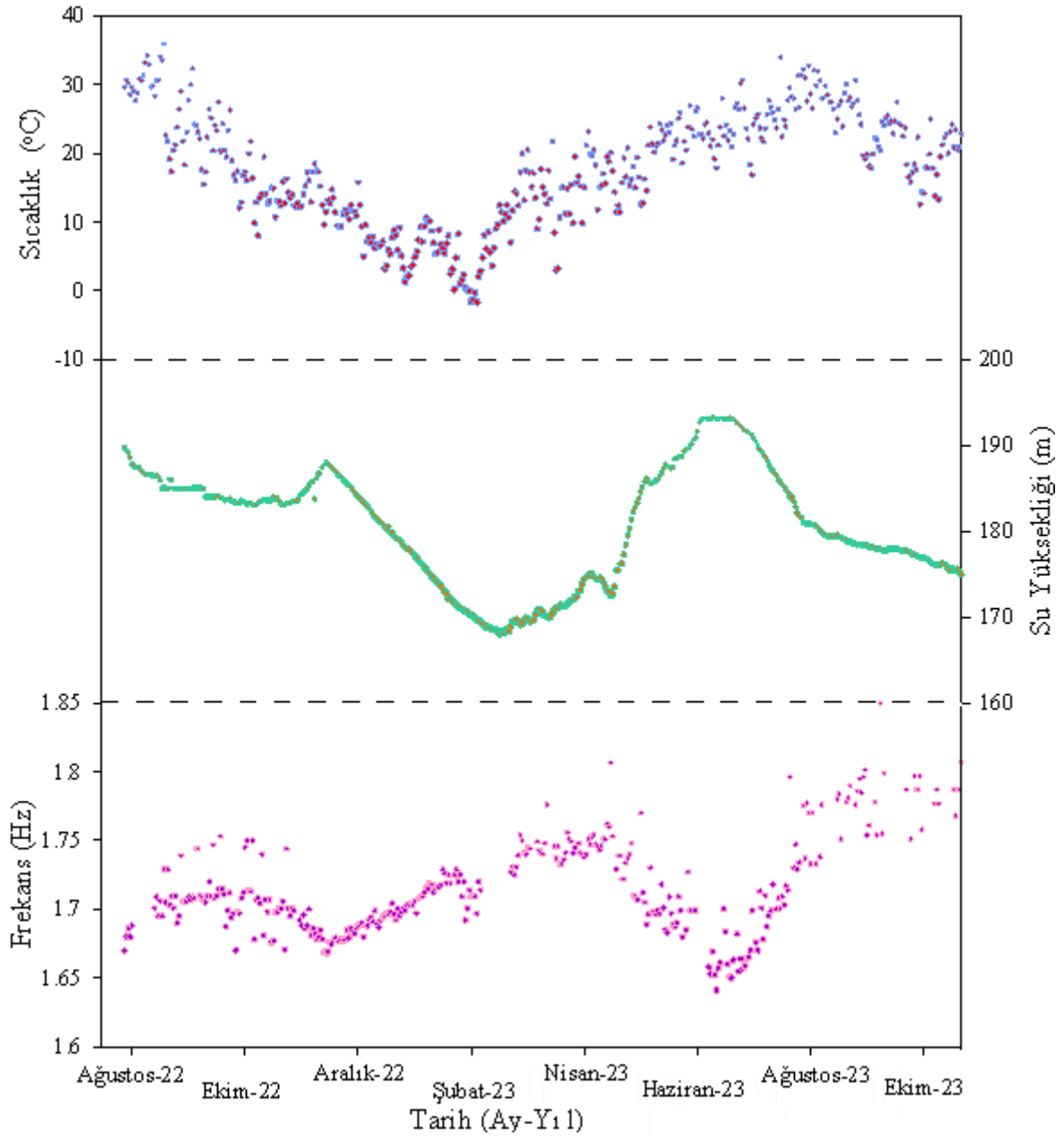
Şekil 138. 2012-2023 yılları arasında Deriner Barajının bulunduğu bölgeye ait ortalama hava sıcaklığı verileri



Şekil 139. 2013-2023 yılları arasında Deriner Barajının bulunduğu bölgeye ait ortalama hava sıcaklığı ve rezervuar su seviyesinin değişimlerine ait grafik

Baraj gövdesine ait frekans değerlerinin değişimine sebep olan en önemli çevresel etkenler değişen rezervuar su seviyesi ve hava sıcaklığıdır. Değişimlerin daha iyi yorumlanabilmesi adına sıcaklık ve su verileri dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Deriner Barajının Ağustos 2022 ile Ekim 2023 tarihleri arasında izleme süreci boyunca

ivmeölçerlerden elde edilen ilk moda ait günlük doğal frekans değerleri ve aynı tarihe denk gelen günlük rezervuar su seviyesi değerleri ve günlük ortalama hava sıcaklığı değerlerine ait grafik Şekil 140'ta verilmektedir. Deriner Barajında dikkate alınan dört modun frekans değerlerinin zamana göre değişimleri benzer eğilimde olduğu için Şekil 140'ta frekansların sıcaklık ve su yüksekliğine bağlı değişiminin görsel olarak sunulması için sadece ilk moda ait frekanslar dikkate alınmıştır.



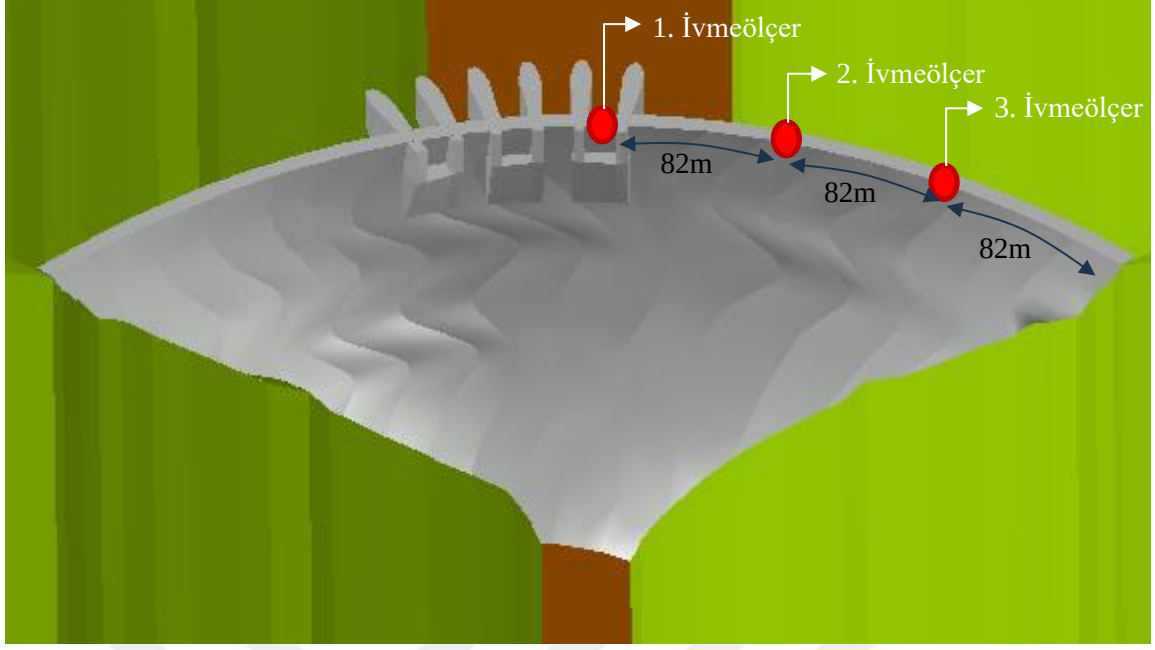
Şekil 140. Deriner Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ortam sıcaklığı, su yüksekliği ve frekans değerlerinin değişimine ait grafik

Şekil 140 incelendiğinde ortam sıcaklığı ve su yüksekliğine ait verilerin benzer eğilimde davranış gösterdiği, maksimum ve minimum değerlerin aynı tarihlerde oluştuğu görülmektedir. Ancak frekans değerlerine ait eğilimin diğerleri ile tam zıt olacak şekilde oluştuğu, maksimum sıcaklık ve su yüksekliği durumunda frekans değerlerinin minimum olduğu, minimum sıcaklık ve su yüksekliği durumunda ise frekans değerlerinin maksimum olduğu tespit edilmiştir.

2.3.2. Yusufeli Barajında Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme

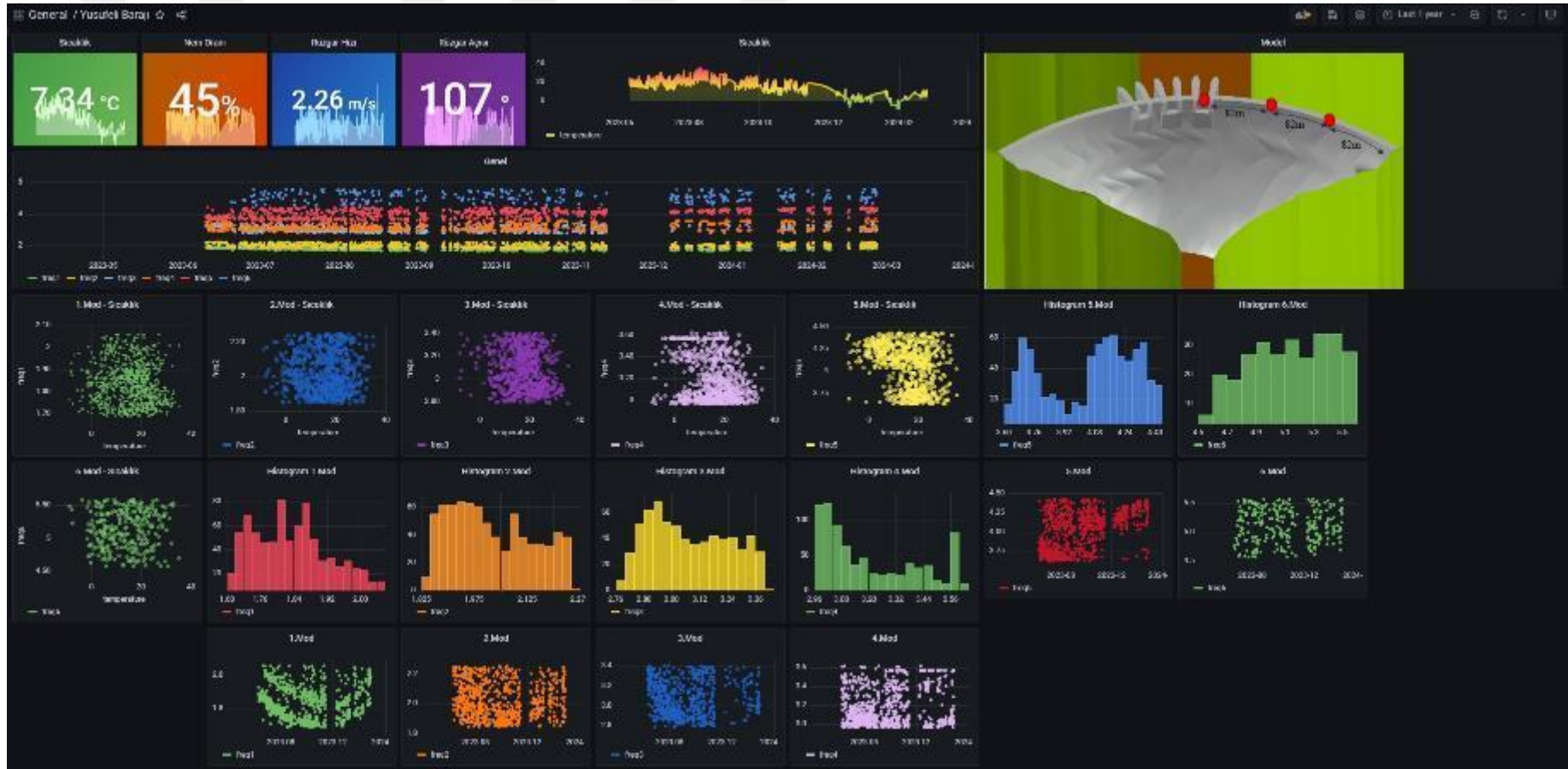
275m gövde yüksekliği ve 490m kret uzunluğu ile Türkiye'nin en yüksek kemer barajı olan Yusufeli Barajının inşasının tamamlanmasının ardından 22 Kasım 2022'de su tutma süreci başlamıştır. Bölüm 2.2.1'de çok sayıda hassas ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilen detaylı çevresel titreşim testi ile baraj gövdesinin rezervuarının boş olması durumu için dinamik karakteristiklerin belirlenmesi ile ilgili çalışmalardan detaylı olarak bahsedilmiştir. Bu aşama özellikle hazırlanan sonlu eleman modellerin güncellenmesi için referans değerleri oluşturmuştur. Ayrıca bu değerler, su tutma süreci boyunca Yapı Sağlığı İzlemek amacıyla gövdeye yerleştirilen 3 adet ivmeölçerde elde edilen ham sinyallerin günlük olarak işlenip yorumlanması aşamasında da referans değer olarak dikkate alınmıştır. Literatür anlamında büyük bir önem arz eden bu çalışmada, inşası tamamlanan ve oldukça yüksek bir gövdeye sahip kemer barajın rezervuarının su tutma sürecinde ve değişen mevsim koşulları altında yapısal durumunun belirlenmesi amacıyla uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışması yürütülmüştür.

Sürekli izleme amacıyla baraj kretine üç adet Sara SL06 tipi üç eksenli, 156dB dinamik aralığına ve 0-1500Hz frekans aralığına sahip ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bölüm 2.2.1'de tüm kret boyunca detaylı olarak yerleştirilen ivmeölçerler ile yapılan deneysel testlerden elde edilen grafikler referans olarak dikkate alınmış olup, sürekli izleme sürecinde yalnızca üç adet ivmeölçer kullanımının frekans ve mod şekillerini elde etmede yeterli olacağı kanaatine varılmıştır. Mod şekillerinin simetrik olması nedeniyle baraj gövdesinin yarısı dikkate alınarak sensör yerleşim planı gerçekleştirilmiştir. Şekil 141 Yusufeli Barajının kretine yerleştirilen üç adet ivme ölçere ait genel yerleşim planını göstermektedir. Şekil 141'den görüldüğü üzere 715,00 m kotunda bulunan baraj kretine ivmeölçer kurulumu yapılmıştır. Birinci ivmeölçer baraj kretinin tam orta noktasına kurulmuş olup, diğer iki ivmeölçer sensörler arası mesafe yaklaşık 82m olacak şekilde eşit aralıklarla yerleştirilmiştir.



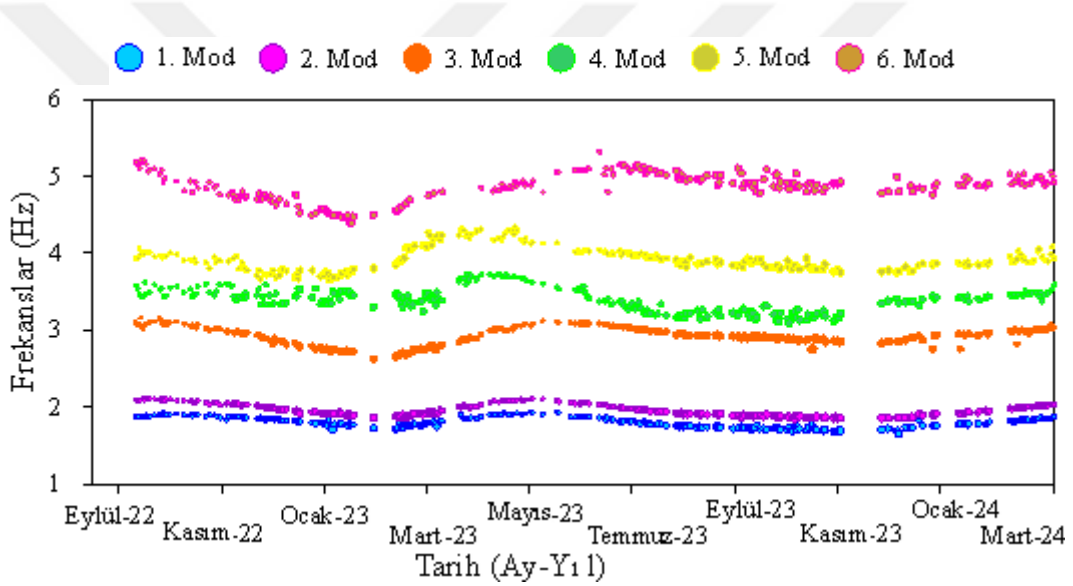
Şekil 141. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesi için kret kotuna yerleştirilen ivmeölçerlerin genel yerleşim planı

İvmeölçerlere kesintisiz güç sağlanması adına ikinci ivmeölçerin bulunduğu bölgeye ayrı bir kabin içerisinde güç kaynağı ve ivmeölçerleri belirli aralıklarla açıp kapatması için sinyal gönderen bir kit (Okur, 2023) yerleştirilmiştir. Böylece verilerin uzaktan kontrolünü sağlayabilmek ve veri kesintisi olması durumunda ivmeölçerleri resetleyerek yeniden veri toplamaya hazır hale getirilmesi sağlanmıştır. İvmeölçerden toplanan verinin internet aracılığı ile anlık olarak bize ulaşımı sağlanmıştır. Ayrıca güç kabini içerisinde endüstriyel modem kurulmuştur. Endüstriyel modeme aylık 100gb internet kotası bulunan bir sim kart yerleştirilmiştir. Modemin elektrik ihtiyacı da kesintisiz güç kaynağı ile sağlanmıştır. Her üç ivmeölçerin modem ile bağlantısı ethernet kablolarıyla gerçekleştirilmiştir. Yusufeli Barajına uzun süreli izleme amacıyla kurulan ivmeölçer sistemine ait bazı görseller Şekil 41’de detaylı olarak verilmiştir. Yusufeli Barajı’nın Yapı Sağlığı İzlemesi amacıyla baraja kurulan üç ivmeölçerden toplanan ham sinyaller internet data hattı ile Okur (2023) tarafından tez kapsamında hazırlanan online web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme programına aktarılmıştır. Şekil 142’de Yapı Sağlığı İzleme programında Yusufeli Barajı için hazırlanmış arayüz ekranına ait bir görüntü sunulmaktadır. Okur (2023) tarafından geliştirilen web tabanlı YSİ programı ve geliştirilerek bu programa entegre edilen yazılım ile ivmeölçerlere ait ham sinyal verileri işlenerek belirlenen mod sayısına ait frekans değerlerini otomatik olarak hesaplayabilmektedir. Ayrıca program yapının bulunduğu bölgedeki hava sıcaklığına ait verilere de otomatik olarak erişebilmektedir.



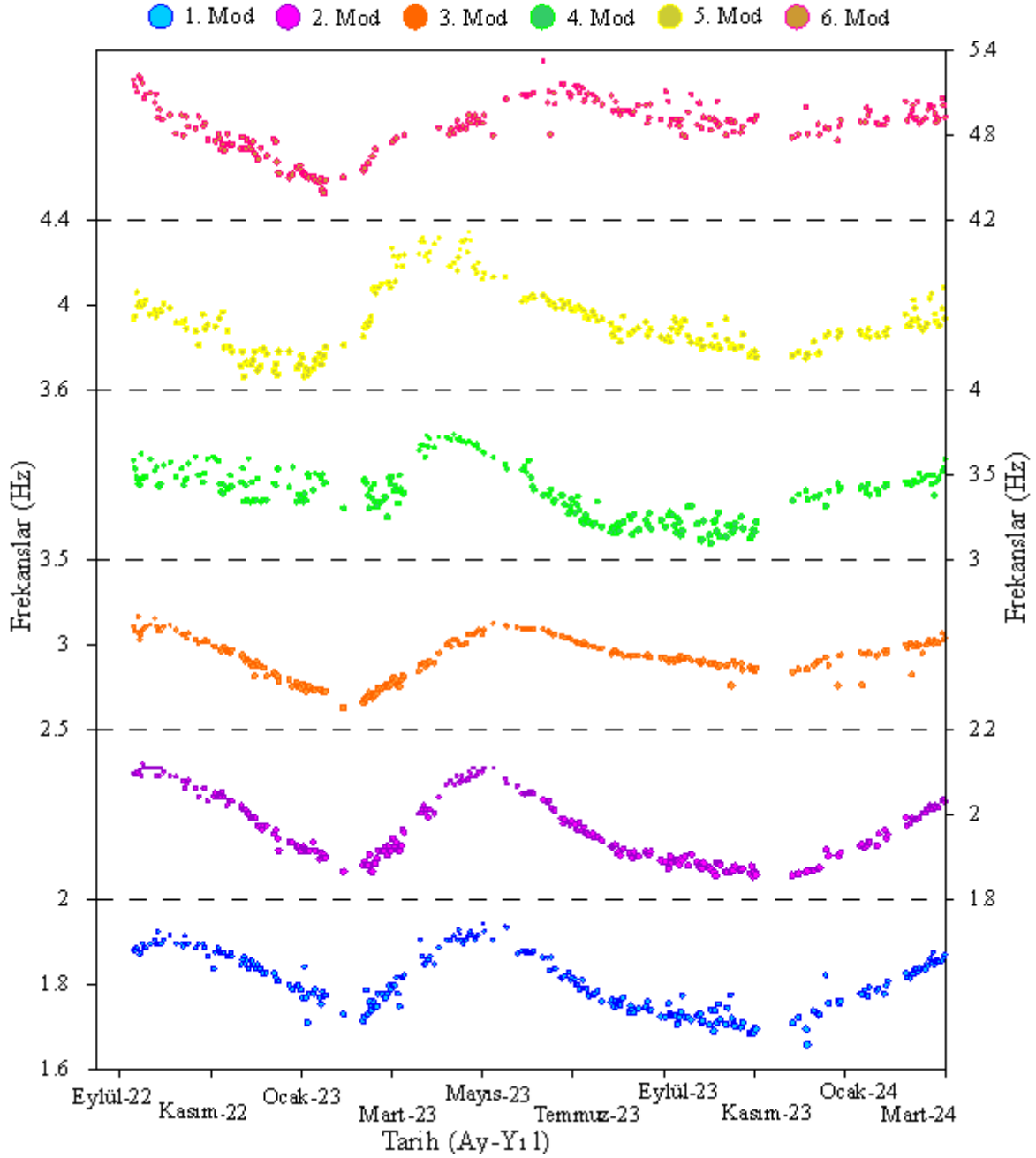
Şekil 142. Web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen Yusufeli Barajının gerçek zamanlı grafiklerine ait görsel

Şekil 142’de otomatik olarak elde edilen ilk altı doğal frekans değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri ve her bir mod için ayrı ayrı sıcaklığa bağlı dağılımlarına ait grafikler verilmektedir. Görseldeki grafiklerin daha net şekilde görselleştirilmesi amacıyla veri tabanından alınan grafiklere ait veriler kullanılarak grafikler yeniden oluşturulmuştur. Şekil 143’te tez kapsamında Yapı Sağlığı İzleme amacıyla Yusufeli Barajına yerleştirilen üç adet ivmeölçerden elde edilen 22 Kasım 2022 - 15 Mart 2024 aralığına ait ilk altı doğal frekans değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği verilmektedir. İvmeölçerden elde edilen ham sinyallerin işlenmesi ile elde edilen frekans değerleri için gece 02.00 saatinde oluşan ham sinyal dosyaları kullanılmıştır. Her bir moda ait frekans değişimlerinin zamanla nasıl eğilim izlediğinin detaylı incelemesi adına her bir mod Şekil 144’te ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 143. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk altı moda ait frekans değerlerinin zamanla değişim grafiği

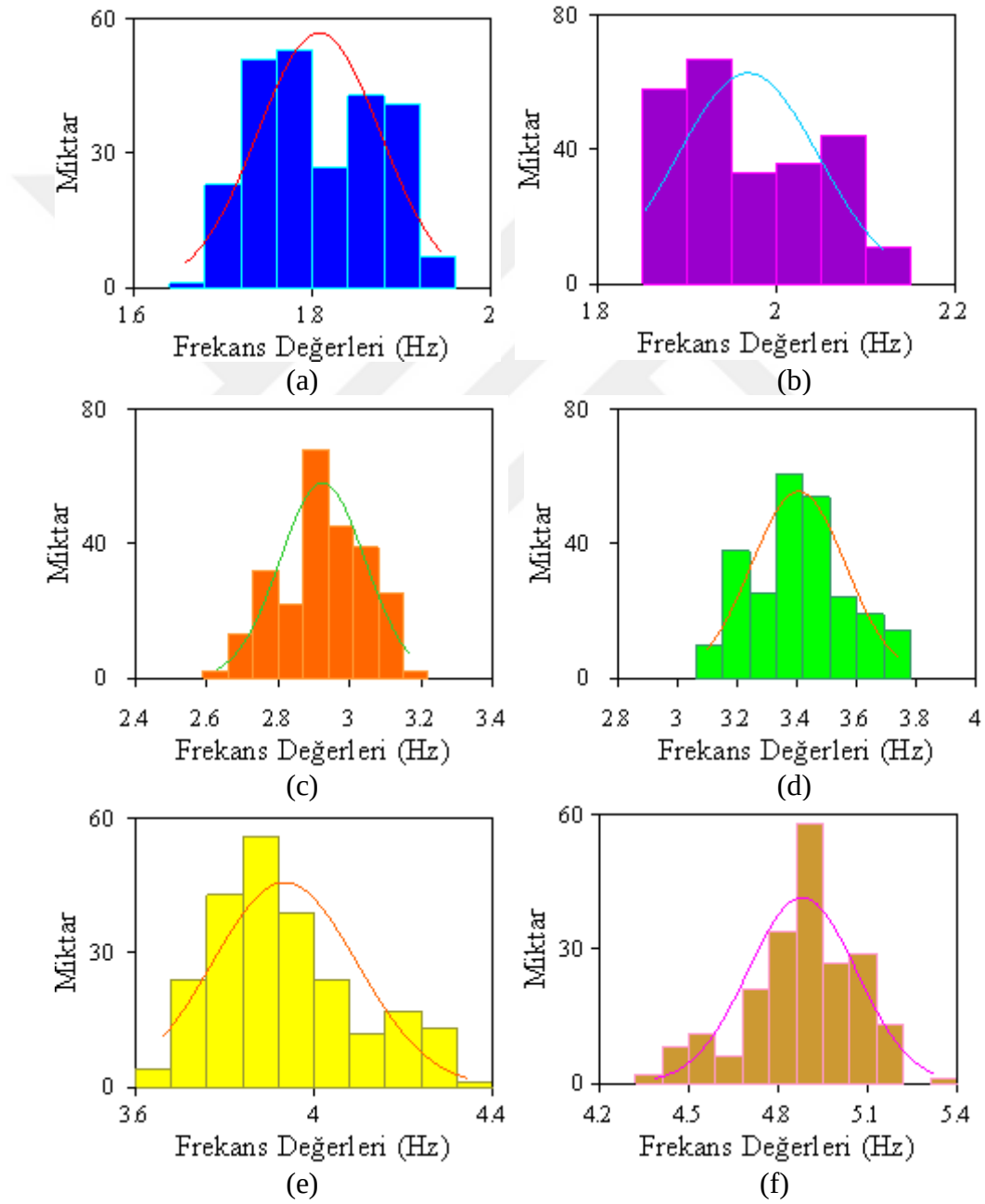
Şekil 144’te her bir moda ait frekans değerlerinin zamana göre değişimi daha detaylı olarak incelendiğinde, zamanla her bir modun frekans değerlerinin eğiliminin değiştiği, otomatik işlemeye bağlı bazı değerlerde sapmalar olsa da verilerin çoğunluğunun asıl eğilim üzerinde toplandığı görülmektedir. Her bir mod için normal dağılım değerlerini gösteren histogram grafikleri Şekil 145’te verilmektedir. Burada her bir mod için ağırlıklı olarak elde edilen frekans değerleri görülmektedir.



Şekil 144. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk altı moda ait frekans değerlerinin ayrı ayrı zamanla değişim grafikleri

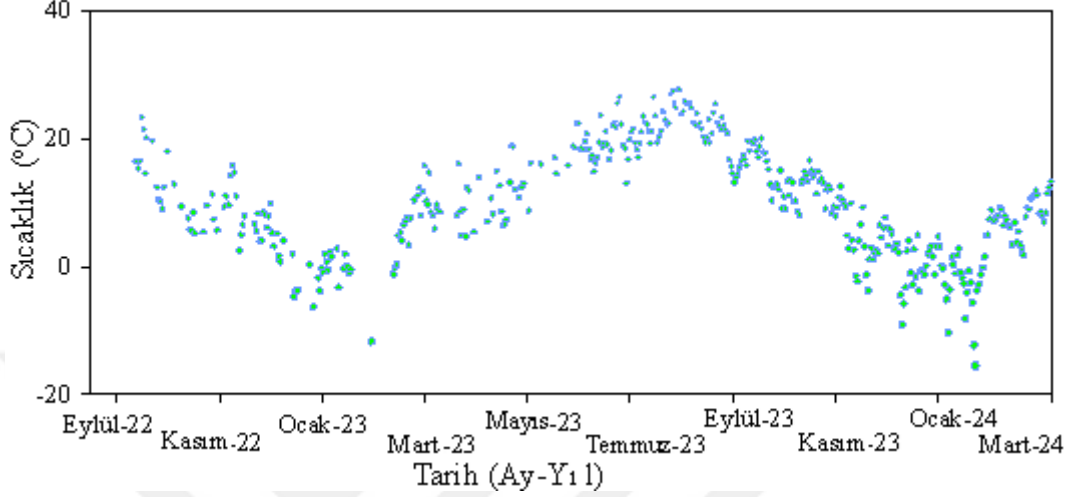
Şekil 145'te her bir mod için frekans değerlerinin normal dağılım grafikleri çizilmiş olup, her bir mod için yatay eksen frekans değerlerine ait aralıkları, dikey eksen ise seçilen frekans aralığında kaç adet değer bulunduğunu ifade etmekte olup, grafiklerin uygun aralıklarda elde edildiği görülmektedir. Web tabanlı YSİ programı tarafından otomatik olarak çekilen Yusufeli Barajı'nın bulunduğu bölgeye ait hava sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim grafiği 26 Eylül 2022 ile 15 Mart 2024 aralığını kapsayan frekans değerlerine

karşılık gelen değerler alınarak oluşturulmuştur. Frekans değerinin işlenerek elde edildiği saatteki hava sıcaklığı değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 146'da verilmektedir. İvmeölçerlerden elde edilen ham sinyallerin işlenmesi ile elde edilen frekans değerleri için gece 02.00 saatinde oluşan ham sinyal dosyaları kullanılmıştır. YSİ programı kapsamında frekans değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerleri seçilirken de aynı saat dikkate alınarak gece 02.00'daki hava sıcaklık verileri kullanılmıştır.



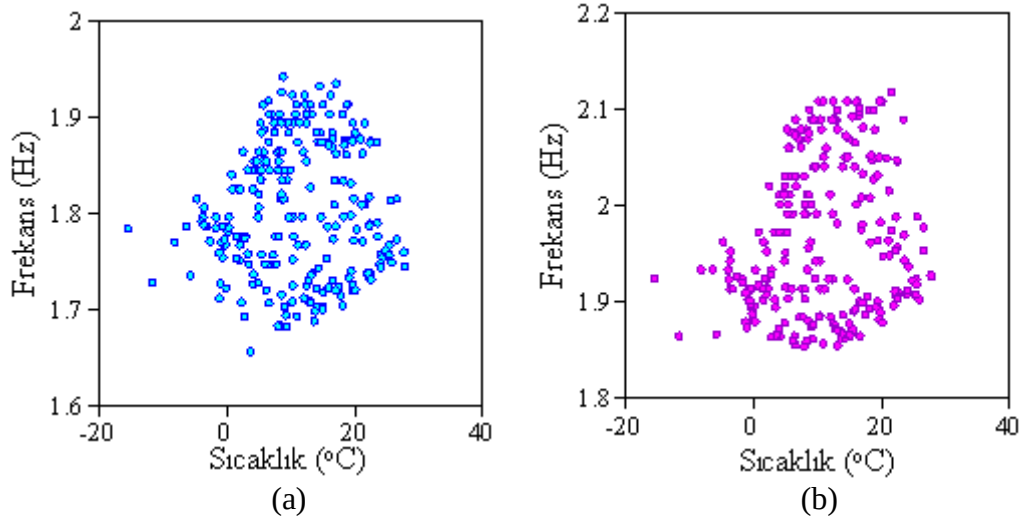
Şekil 145. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ilk altı moda ait frekans değerlerinin histogram grafikleri a) Mod 1, b) Mod 2, c) Mod 3, d) Mod 4, e) Mod 5, f) Mod 6

Şekil 146'dan görüldüğü üzere sıcaklıklar kış mevsiminde azalma yaz mevsimine doğru artma eğiliminde olup, maksimum sıcaklık 27,82 °C ile 10 Ağustos 2023 tarihinde, minimum sıcaklık ise -15,42 °C ile 31 Ocak 2024 tarihlerinde elde edilmiştir.



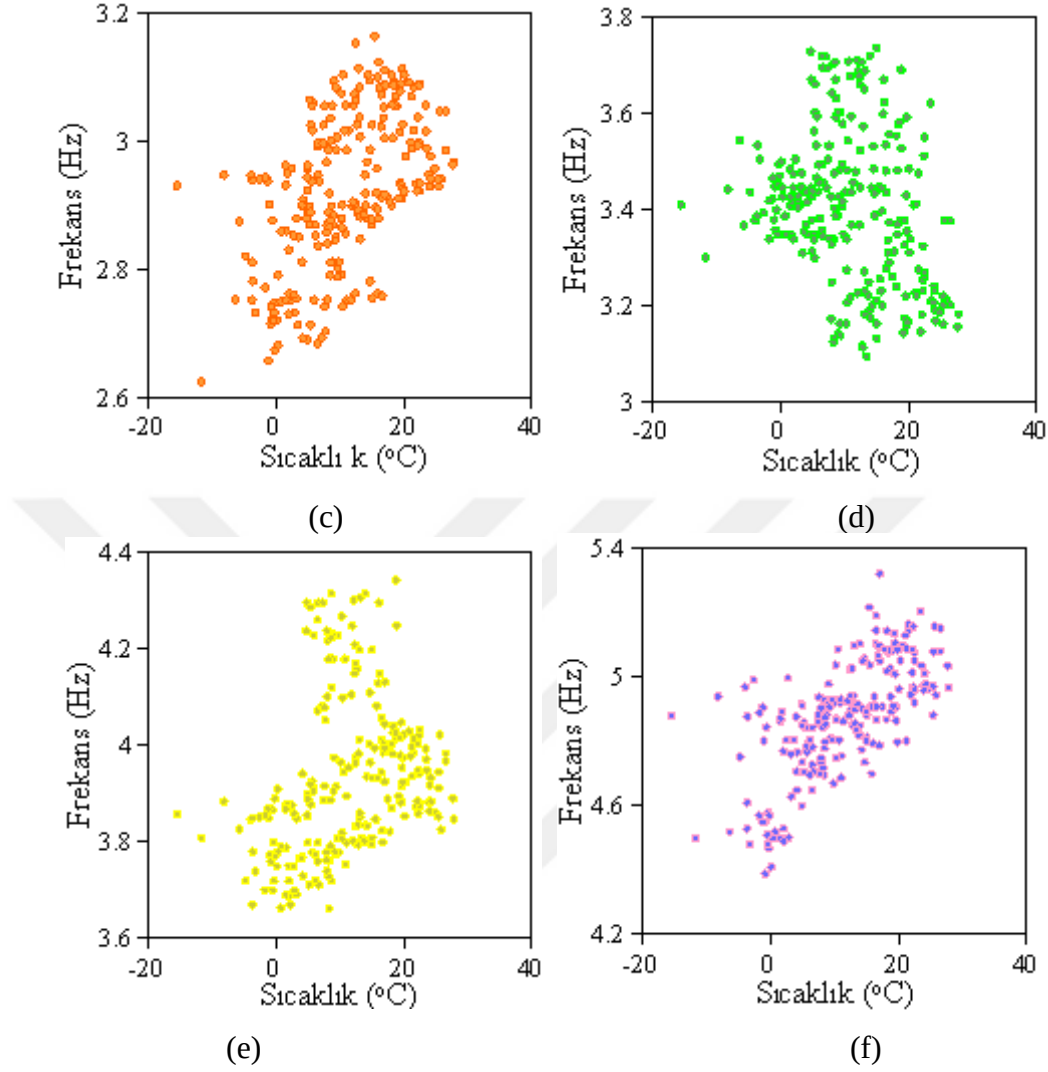
Şekil 146. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen hava sıcaklıklarının zamanla değişim grafiği

Doğal frekans değerlerinin sıcaklığa bağlı dağılımlarının belirlenmesi amacıyla Şekil 147'de her bir mod için frekans-sıcaklık dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 147'ye göre değişen sıcaklık değerlerinde frekansların dağınık bir dağılım sergilediği görülmektedir. Belirli bir sıcaklıkta belirli bir frekans yoğunluğu ya da kümelenme olmadığı, sıcaklığın artması ya da azalması ile frekans değerlerinin belirgin bir eğilimde değişiklik göstermediği görülmektedir.



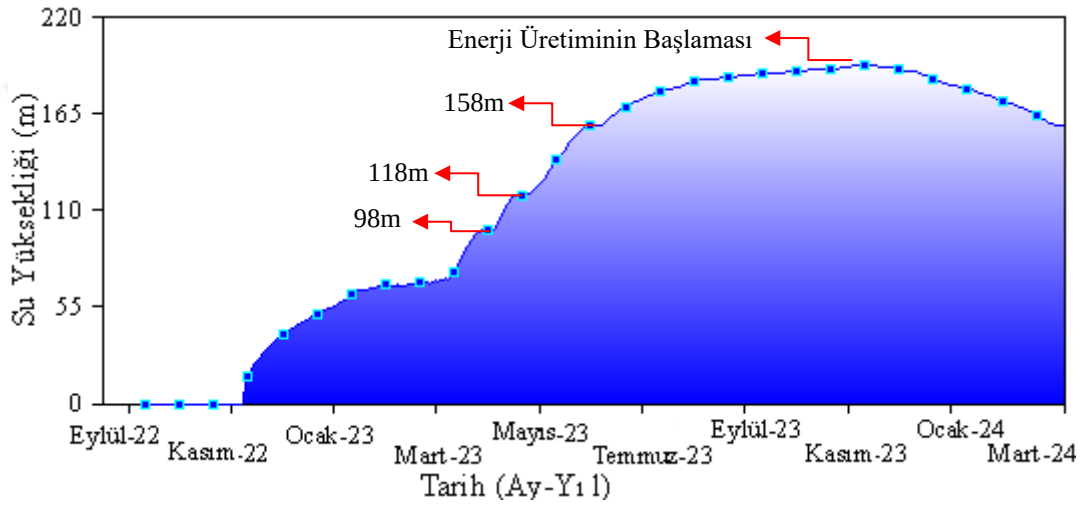
Şekil 147. Yusufeli Barajından elde edilen uzun süreli frekans ve ortam sıcaklığı verilerinin frekans-sıcaklık dağılım grafikleri a) Mod 1, b) Mod 2, c) Mod 3, d) Mod 4, e) Mod 5, f) Mod 6

Şekil 147'nin devamı



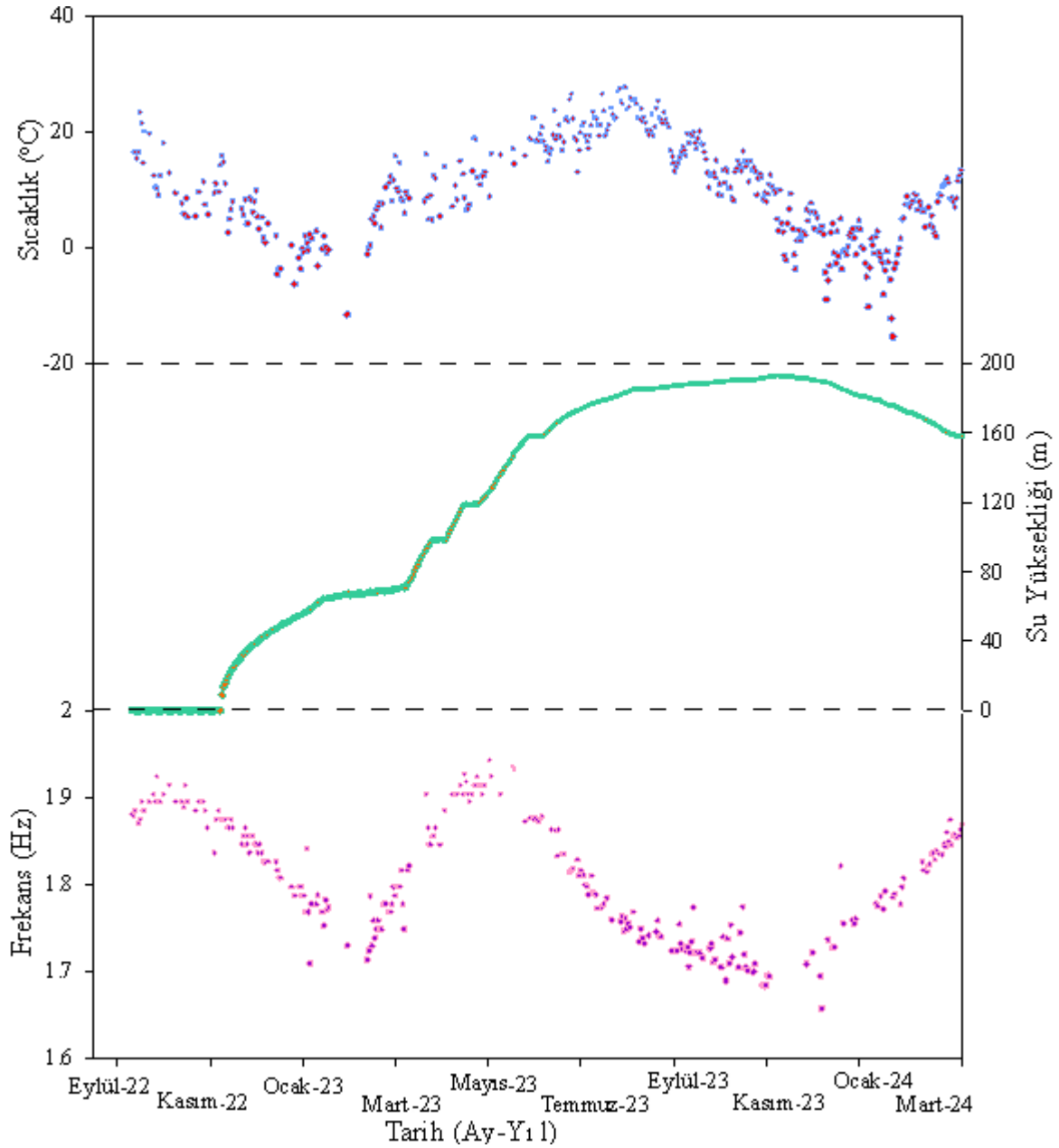
26. Bölge Artvin DSİ tarafından günlük rezervuar su yükseklikleri sürekli olarak kaydedilmektedir. Temin edilen bu rezervuar su seviyeleri grafiklendirilerek Şekil 148’de verilmiştir. Rezervuar su seviyeleri 26 Eylül 2022 ile 15 Mart 2024 tarihleri arasında kapsamakta olup, izleme süreci başladıktan sonra baraj gövdesinin su tutmaya başladığı 22 Kasım 2022 tarihine kadar yaklaşık 2 aylık süreçte baraj rezervuarı boş kalmıştır. Şekil 148 incelendiğinde, 22 Kasım 2022 tarihinde başlayan su tutma sürecinde rezervuar su seviyesinin sürekli artmaya başladığı ve otuz günde 40 m’lik su seviyesine hızla ulaştığı grafiğin eğiminden anlaşılmaktadır. Bu tarihten sonra su seviyesindeki artış hızının biraz daha yavaşladığı görülmektedir. Rezervuar 98 m’lik su seviyesine ulaştığında 10 günlük stabil bir bekleme süreci geçirilerek DSİ tarafından testler yapılmıştır. Rezervuarın adım adım kontrollü bir şekilde doldurulması gövdenin su ile etkileşim anındaki davranışlarının

belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Ardından su seviyesi 118 m'ye ulaştığında stabil su seviyesi altında yeniden on günlük bir bekleme süreci gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bekleme süreci rezervuar seviyesi 158m'ye ulaştığında gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan itibaren rezervuar suyunun dolum hızı genişleyen rezervuar vadisi nedeniyle daha da yavaşlamıştır. Rezervuar su seviyesinin 192 m'ye gelmesi ile baraj enerji üretimine başlamıştır. Enerji üretimi ile su seviyesi azalmaya başlamıştır. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan 15 Mart 2024 tarihi ile rezervuar su seviyesi 158 m seviyesine kadar düşmüştür.



Şekil 148. Yusufeli Barajında izleme süreci boyunca meydana gelen rezervuar su değişimi

Baraj gövdesine ait frekans değerlerinin değişimine sebep olan en önemli çevresel etkenler değişen rezervuar su seviyesi ve hava sıcaklığıdır. Değişimlerin daha iyi yorumlanabilmesi adına sıcaklık ve su verileri dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Yusufeli Barajının Eylül 2022 ile Mart 2024 tarihleri arasında izleme süreci boyunca ivmeölçerlerden elde edilen ilk moda ait günlük doğal frekans değerleri ve aynı tarihe denk gelen günlük rezervuar su seviyesi değerleri ve günlük ortalama sıcaklık değerlerine ait grafik Şekil 149'da verilmektedir. Yusufeli Barajı'nda dikkate alınan altı modun frekans değerlerinin zamana göre değişimleri benzer eğilimde olduğu için Şekil 149'da frekansların sıcaklık ve su yüksekliğine bağlı değişiminin görsel olarak sunulması için sadece ilk moda ait frekansların dikkate alınmıştır.



Şekil 149. Yusufeli Barajının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinden elde edilen ortam sıcaklığı, su yüksekliği ve frekans değerlerinin değişimine ait grafik

Şekil 149 incelendiğinde sıcaklık verileri periyodik bir döngü içerisinde değişmektedir. Su yüksekliğine ait veriler ise barajın su tutma süreci nedeniyle kontrollü olarak sürekli artan bir eğilimde devam etmektedir. Frekans değerlerindeki değişim ise su ve sıcaklık değişimlerinin yanı sıra baraj gövdesinin eğrilikli yapısının yükleme etkisi ile değişmesinden kaynaklı ekstra etkilere de maruz kalmaktadır. Baraj gövdesi düşeyde büzülme derzlerine sahip olacak şekilde inşa edilmiş olup, bu derzler yükleme etkisi ile belirli sınırlar içerisinde açılıp kapanabilme hareketi gösterebilmektedir. Derzlerin açılması

durumunda gövdenin rijitliğinde azalma olması ile frekans değerlerinde düşüş, derzlerin sıkışarak kapalı konuma gelmesi ile gövde rijitliğinin artması ile frekans değerlerinde yükseliş görülmesi literatürde kabul gören bir gerçektir. Mart ayına kadar frekans değerlerinin azalma eğiliminde olup, mart ayından itibaren başlayan frekanslardaki yükselme haziran ayına kadar devam etmiştir. Su seviyesindeki yükselişe rağmen mart ve haziran ayları arasındaki frekanslardaki artışın büzülme derzlerinin sıkışarak kapanması ile baraj gövdesinin rijitliğindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Mart ayında gövdenin su yüksekliği 68m, haziran ayında ise 150m olup 68m-150m aralığındaki su seviyesinin çift eğrilikli baraj gövdesindeki derzleri sıkıştırarak kapattığı için rijitliği artıran bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. 150m den itibaren sürekli artış eğiliminde olan su yüksekliği ile frekanslarda beklenen doğrultuda bir azalma olduğu görülmektedir. Ocak ayında su seviyesindeki artışın çok daha azaldığı ve neredeyse stabil düzeyde devam ettiği dikkate alındığında bu aşamadan sonraki meydana gelen frekanslardaki artışa sıcaklığın azalmasının etki ettiği düşünülmekte olup, Deriner Barajında meydana değişime benzer şekilde davranış gösterdiği görülmektedir.

2.4. Kemer Barajlardan Elde Edilen Uzun Süreli İzleme Verilerinin Yapay Sinir Ağları ile İşlenmesi

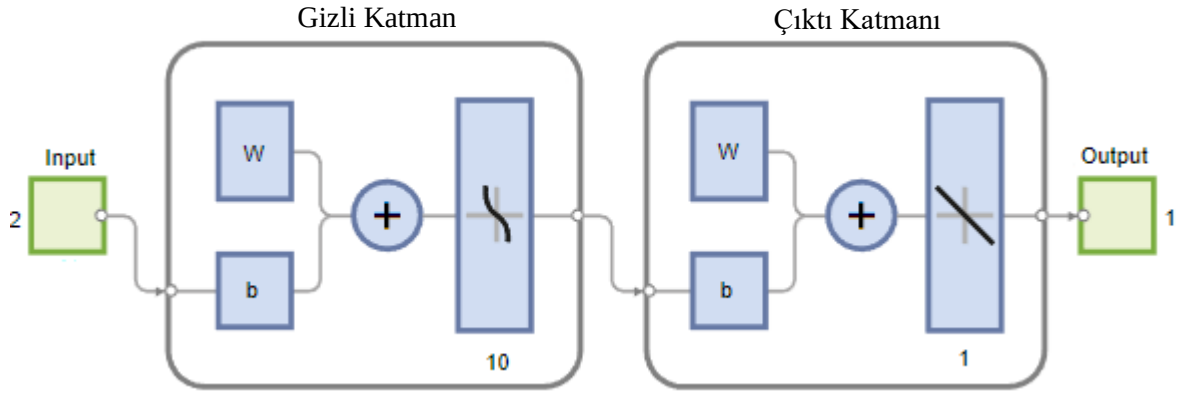
Tez kapsamında Deriner ve Yusufeli Barajlarına yerleştirilen ivme ölçerler ile uzun süreli doğal frekanslar elde edilmiştir. Bölüm 2.3.1 ve 2.3.2’de Deriner ve Yusufeli Barajlarına ait elde edilen frekans değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı parametreleri dikkate alınarak detaylı olarak incelenmiştir. Deriner Barajında mevsimsel olarak değişen rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığına bağlı frekans değerlerinin değişimi incelenirken, Yusufeli Barajında ise rezervuarın boş olduğu durumdan itibaren başlayan frekans değerlerinin ölçümü sürekli artan rezervuar su seviyesi ve değişen hava sıcaklığı altında incelenmiştir. Bu bölümde her iki baraja ait uzun süreli izleme sonucu elde edilen veri setlerinin Yapay Sinir Ağları ile işlenerek anlamlı sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Barajlara ait uzun süreli izleme sonucu elde edilen rezervuar su seviyesi ve hava sıcaklığına bağlı frekans değerlerindeki değişimi ifade eden veri seti kullanılarak MATLAB (2018) programında bulunan Neural Network Fitting uygulaması ile farklı su seviyesi ve sıcaklık değerlerine bağlı frekans değişim haritası oluşturularak seçilen su seviyesi ve sıcaklığa bağlı frekans değerinin tahmin edilmesi planlanmıştır.

2.4.1. Deriner Barajında Yapay Sinir Ağları Uygulaması

Deriner Barajına ait uzun süreli izleme verileri 13 Ağustos 2022 ile 31 Ekim 2023 aralığına ait olup günlük birer adet frekans, su seviyesi ve hava sıcaklığı verisini kapsamaktadır. Yaklaşık 14 aylık izleme sürecinde oluşan bazı aksaklıklar nedeniyle veri kaybı olan günler bulunmaktadır. Deriner Barajının günlük frekans değerleri dikkate alınarak ilk dört moda ait frekans değerlerinin değişimi rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değişimine bağlı incelenmiştir. Bazı günlerde ilgili moda ait frekans değeri elde edilemediği (yetersiz çevresel titreşim nedeniyle pik elde edememe, elektrik ya da internet kesintisi nedeniyle oluşan kayıplar) için o günlere ait rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verisi de dikkate alınmamıştır. Deriner Barajının birinci modu için 352, ikinci modu için 350, üçüncü modu için 352 ve dördüncü modu için 326 adet frekans değeri ve bu frekans değerinin elde edildiği saate karşılık gelen rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklığı verisi dikkate alınmıştır.

Bu tez kapsamında, MATLAB (2018) programı kullanılarak veri analizi ve tahmin amacıyla Yapay Sinir Ağları yöntemi benimsenmiştir. Mevcut verinin %70'i eğitim (training), %20'si geçerlilik (validation) ve %10'u test aşamaları için ayrılmıştır. Başlangıç modelinde gizli katman sayısının belirlenmesi karar vericiye bırakılmıştır. Ancak, Yapay Sinir Ağı modelinin beklenen performansı göstermemesi durumunda, karar verici gizli katman sayısını göreceli olarak artırıp azaltabilmektedir. Bu çalışmada, 10 adet gizli katman kullanılmasının uygun ve yeterli olduğuna karar verilmiştir. Rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklık verisi girdi parametresi olarak verilmekte bunlara karşılık frekans değeri çıktı verisini oluşturmaktadır. 10 adet gizli katman ve 1 adet çıktı katmanı olmak üzere toplam on bir ara katman olarak oluşturulan yapının özeti Şekil 150'de verilmektedir. Oluşturulan Yapay Sinir Ağı'nın eğitimi için Levenberg-Marquardt Back Propagation algoritmasından yararlanılmıştır. Bu algoritma, Yapay Sinir Ağlarının hızlı ve etkili bir şekilde eğitilmesini sağlayarak analiz sürecini hızlandırmakta ve sonuçların daha güvenilir olmasını sağlamaktadır.

Eğitilen modelin çıktılarının performansını belirlemek amacıyla Ortalama Kare Hata (MSE: Mean Squared Error) yöntemi kullanılmıştır. Ortalama Kare Hata (MSE), gerçek değerler ile ağın tahmin ettiği değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasını ifade eder. R değeri ise $[-1,1]$ aralığında değişir ve gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki korelasyonu gösterir. Bu değerlerin, ilişkinin gücünü belirtmesi açısından 1'e yakın olması tercih edilir.

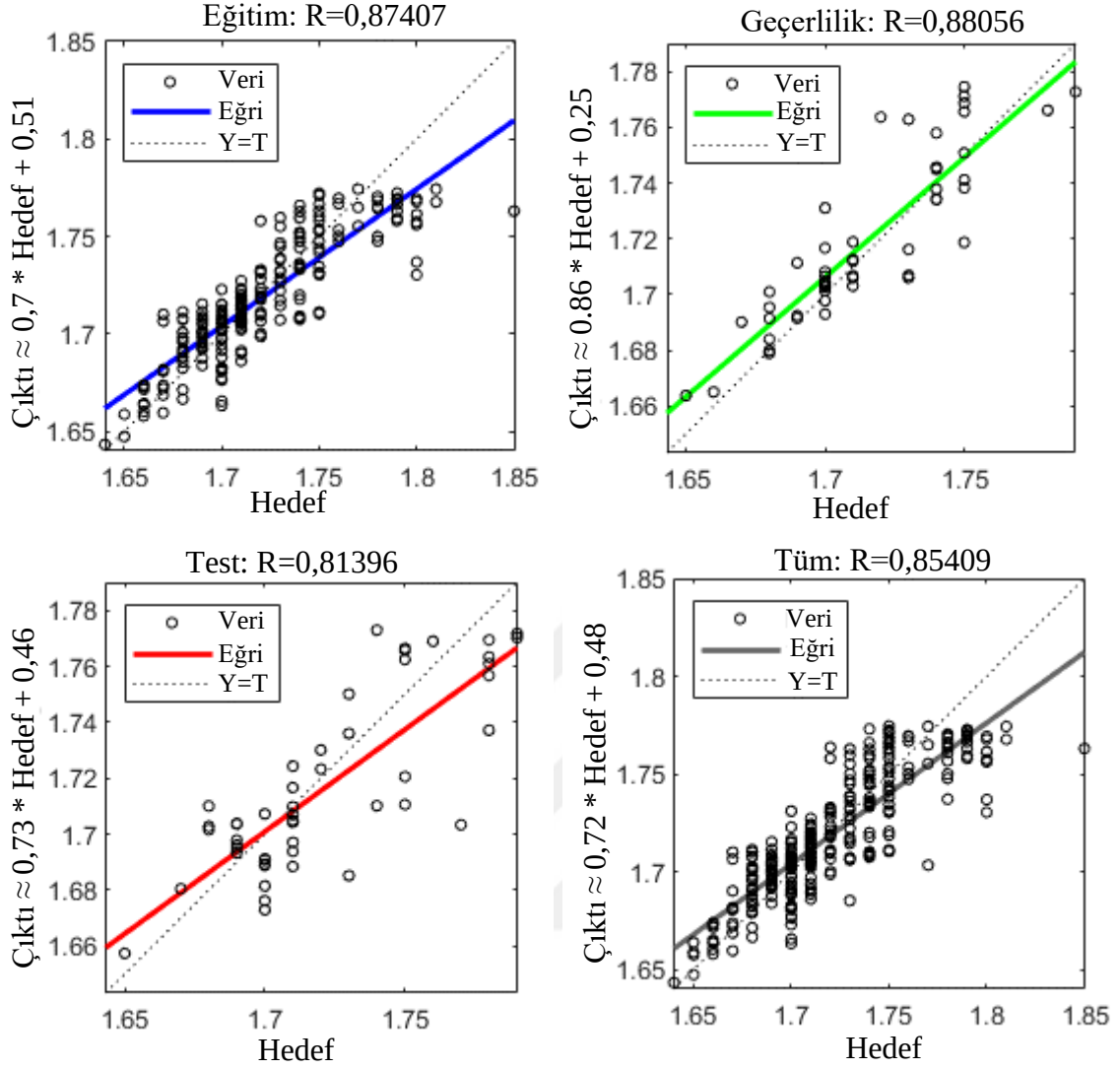


Şekil 150. Deriner Barajı için oluşturulan Yapay Sinir Ağı modeli yapısı

Deriner Barajının uzun süreli izleme sonucu dikkate alınan dört moduna ait frekans değerleri için ayrı ayrı işlem yapılarak her bir mod için rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değişimine bağlı frekans değişim haritası elde edilmiştir. Birinci moda ait 352 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 9 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 246, geçerlilik için 71 ve test için 35 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 44'te sunulmuştur. Bu tablodaki veriler, ağın eğitimi sırasında gözlemlenen hata katsayılarını ve tahmin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmaktadır. Özellikle, MSE'nin düşük olması ve R değerinin 1'e yakın olması, ağın iyi eğitildiğini ve gerçek verilere yakın tahminler yaptığını göstermektedir. Senaryo değerlendirmesi sırasında, aslında dikkate alınan temel gösterge R değerleridir ve ağın performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir. Şekil 151'de oluşturulan ağa ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiklerindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla çalıştığını ve geçerlilik analiziyle bu durumun doğrulandığını, aynı zamanda ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

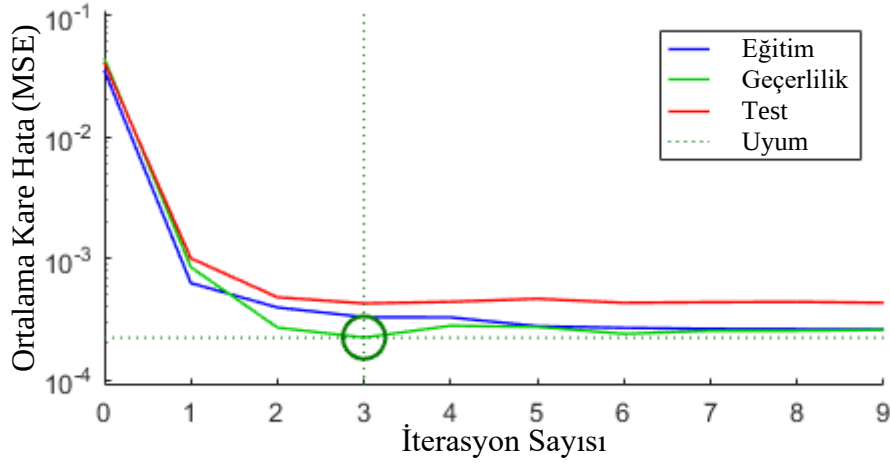
Tablo 44. Deriner Barajının birinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,0003335	0,86407	246
Geçerlilik	0,0002235	0,88056	71
Test	0,0004935	0,81396	35

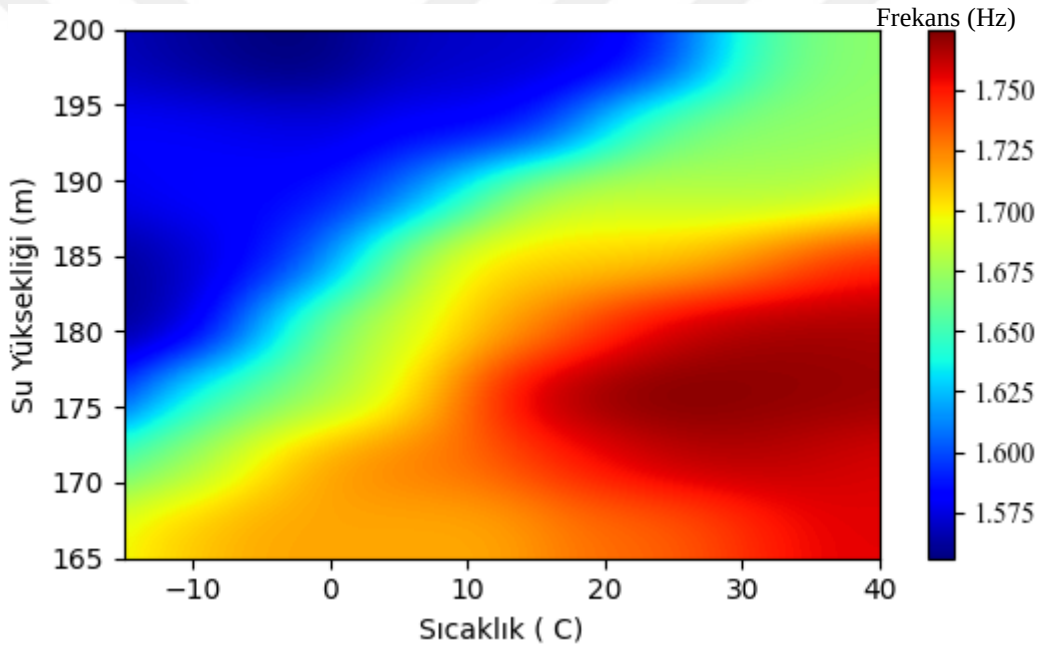


Şekil 151. Deriner Barajının birinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri

Şekil 152 ağın performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri üçüncü iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sınır Ağı'nın toplamda 14 aylık birinci moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklığı verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Deriner Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 165m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Deriner Barajına ait birinci frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 153'te ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan Yapay Sınır Ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 152. Deriner Barajının birinci modu için oluşturulan ağı performans grafiği



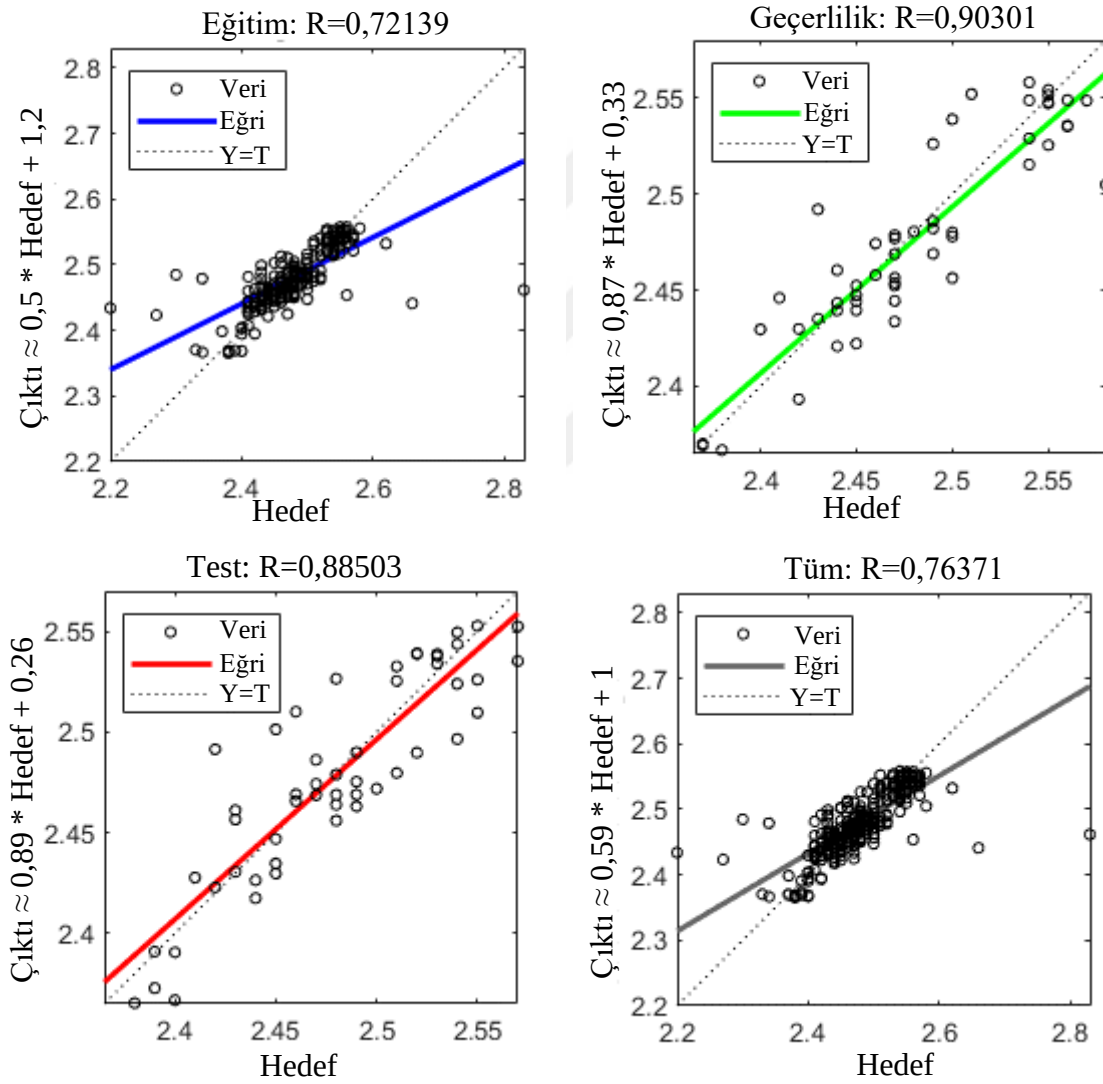
Şekil 153. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen birinci moduna ait frekans haritası

İkinci moda ait 350 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 9 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 245, geçerlilik için 70 ve test için 35 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 45'te sunulmuştur. Şekil 154'te oluşturulan ağı ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, geçerlilik grafiğindeki R

değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla çalıştığını ve ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

Tablo 45. Deriner Barajı'nın ikinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

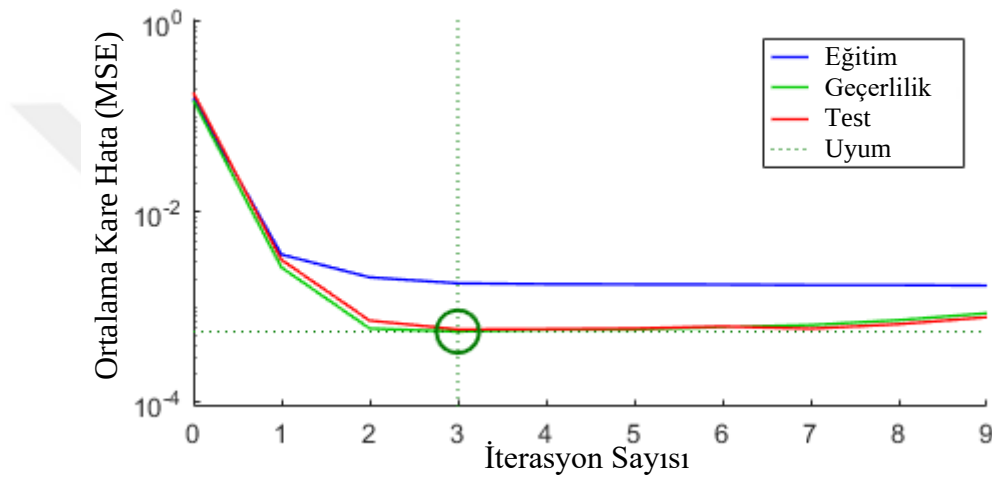
Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,0009564	0,72139	245
Geçerlilik	0,0005556	0,90301	70
Test	0,0005556	0,88503	35



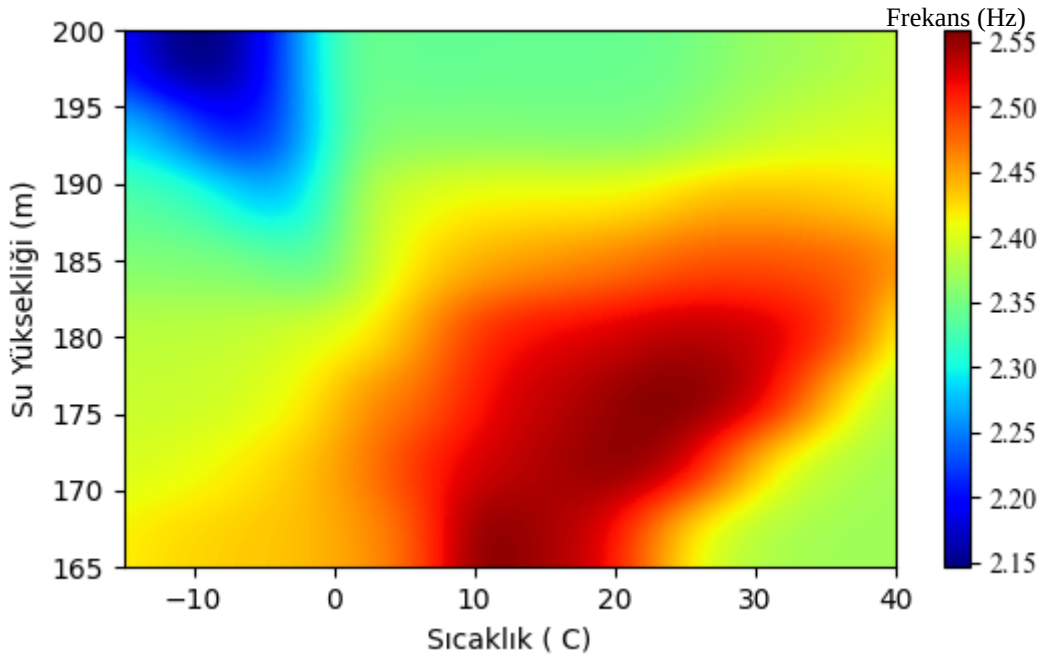
Şekil 154. Deriner Barajının ikinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri

Şekil 155 ağın performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri üçüncü iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay

Sinir Ağının toplamda 14 aylık ikinci moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklığı verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Deriner Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 165m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Deriner Barajına ait ikinci frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 156'da ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan yapay sinir ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 155. Deriner Barajının ikinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği



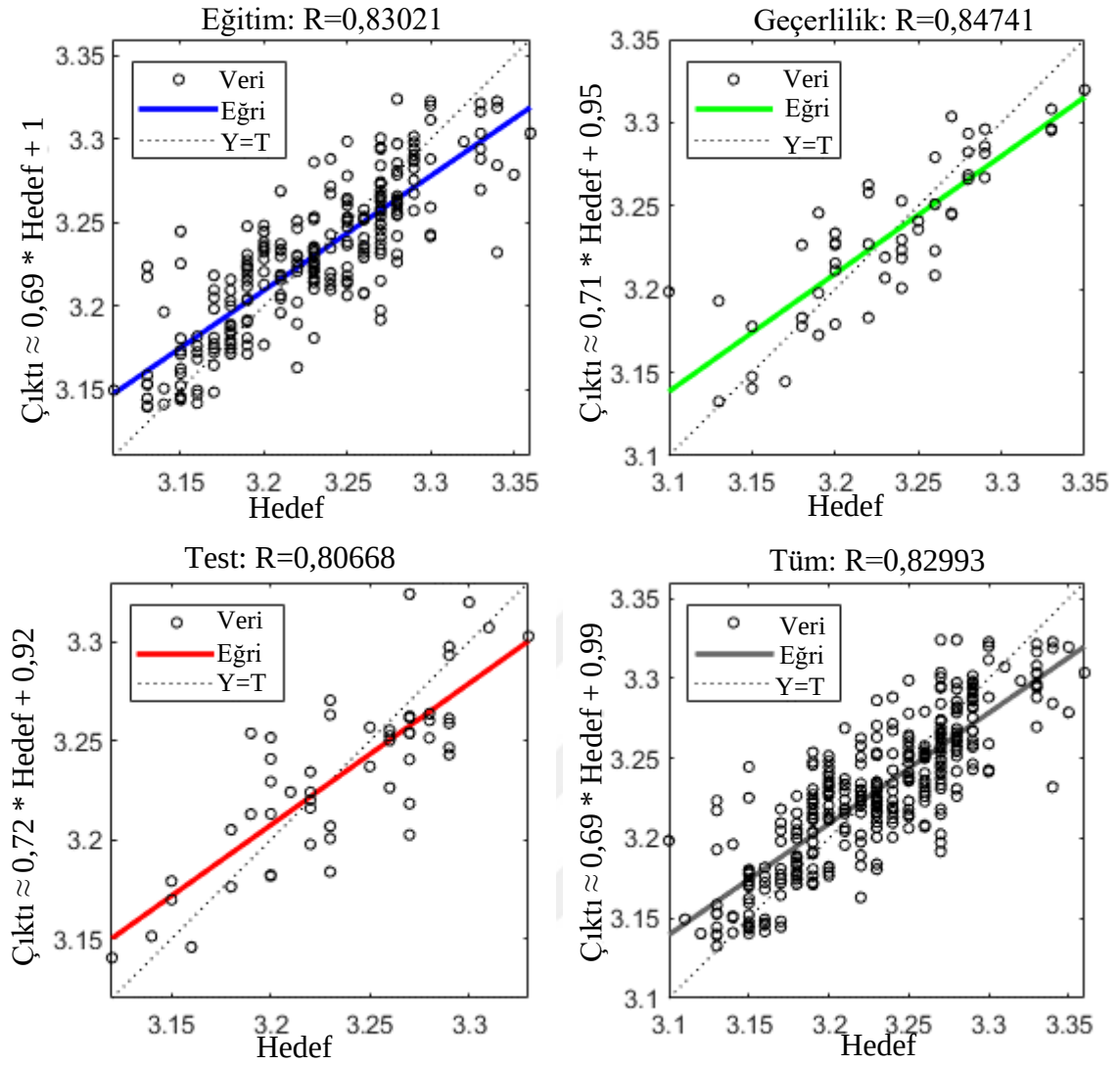
Şekil 156. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen ikinci moduna ait frekans haritası

Üçüncü moda ait 352 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 13 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 246, geçerlilik için 71 ve test için 35 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 46'da sunulmuştur. Şekil 157'de oluşturulan ağa ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiğindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla çalıştığını ve ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

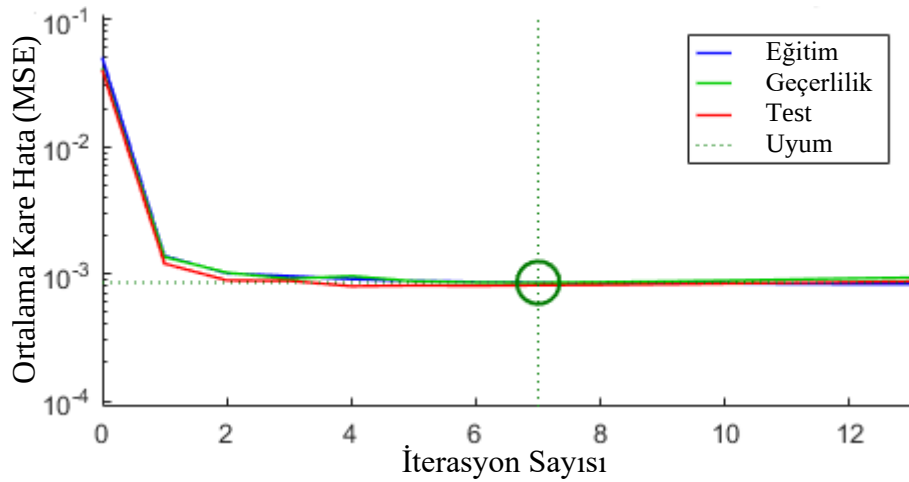
Tablo 46. Deriner Barajının üçüncü modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,00085169	0,83021	246
Geçerlilik	0,00085169	0,84741	71
Test	0,00085169	0,80668	35

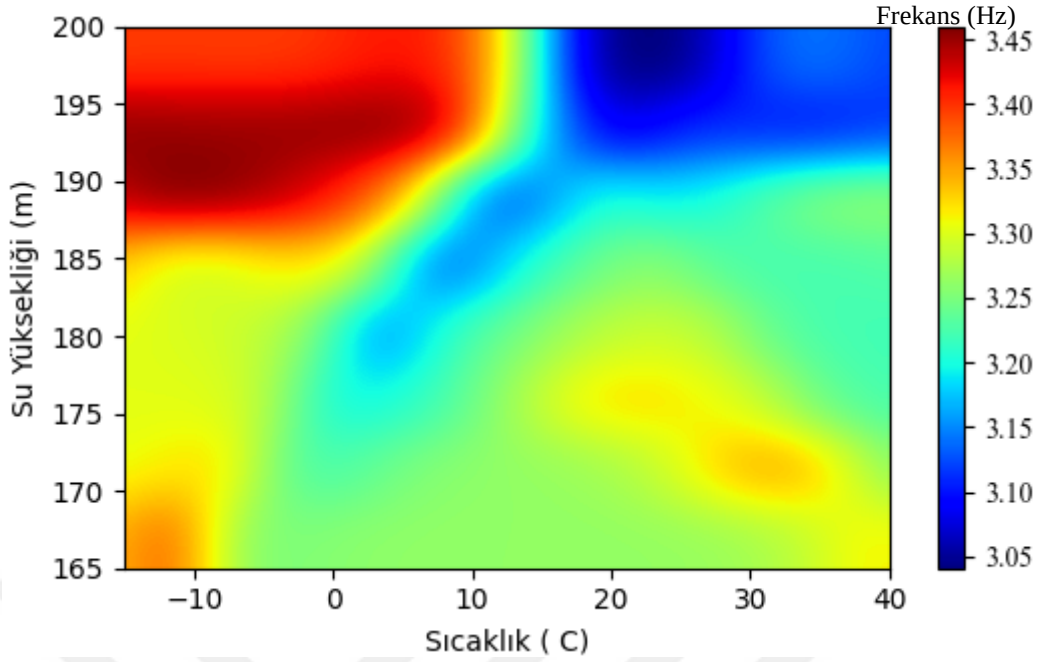
Şekil 158 ağın performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri yedinci iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sinir Ağı'nın toplamda 14 aylık üçüncü moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklığı verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Deriner Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 165m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Deriner Barajına ait üçüncü frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 159'da ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan yapay sinir ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 157. Deriner Barajının üçüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri



Şekil 158. Deriner Barajının üçüncü modu için oluşturulan ağı performans grafiği

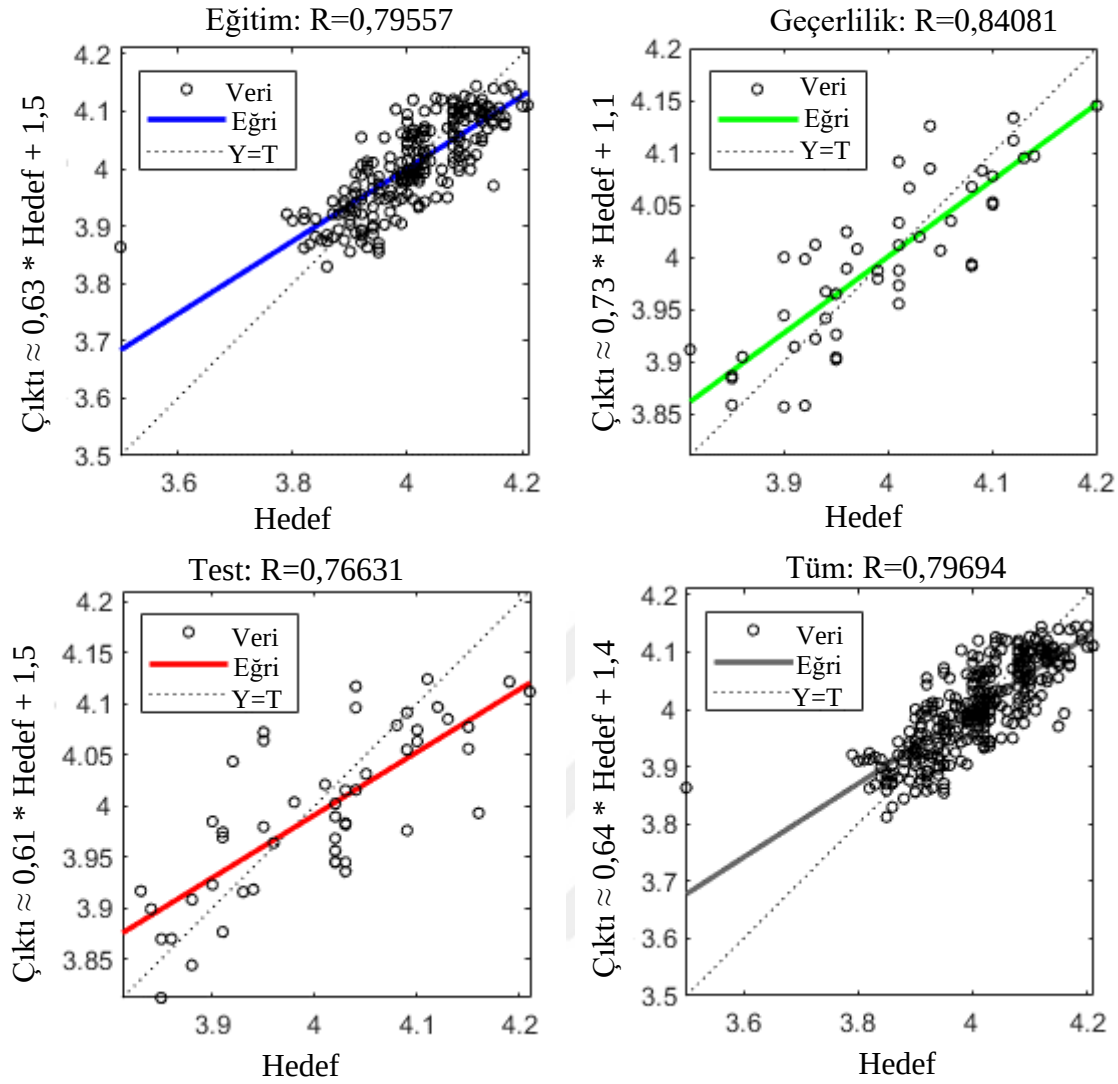


Şekil 159. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen üçüncü moduna ait frekans haritası

Dördüncü moda ait 326 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 18 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 228, geçerlilik için 65 ve test için 33 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 47’de sunulmuştur. Şekil 160’ta oluşturulan ağıta ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiğindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla çalıştığını ve ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

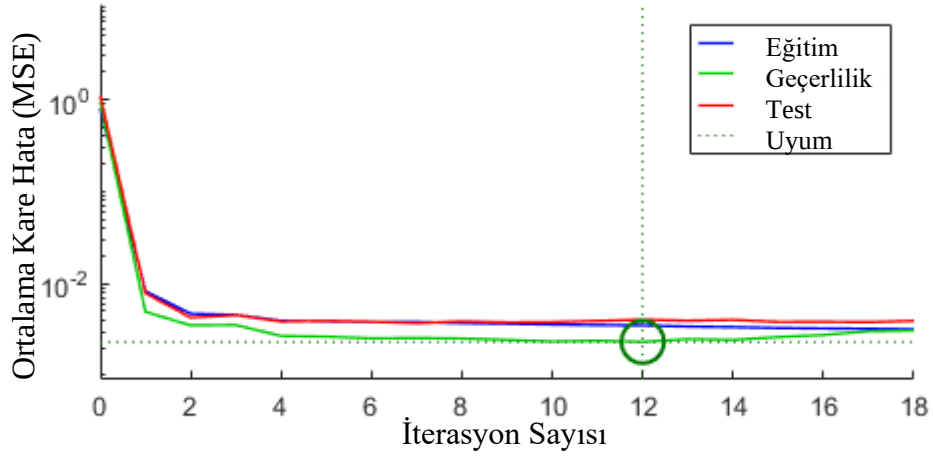
Tablo 47. Deriner Barajının üçüncü modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyükliği
Eğitim	0,004565	0,79557	228
Geçerlilik	0,0023165	0,84081	65
Test	0,0004923	0,76631	33

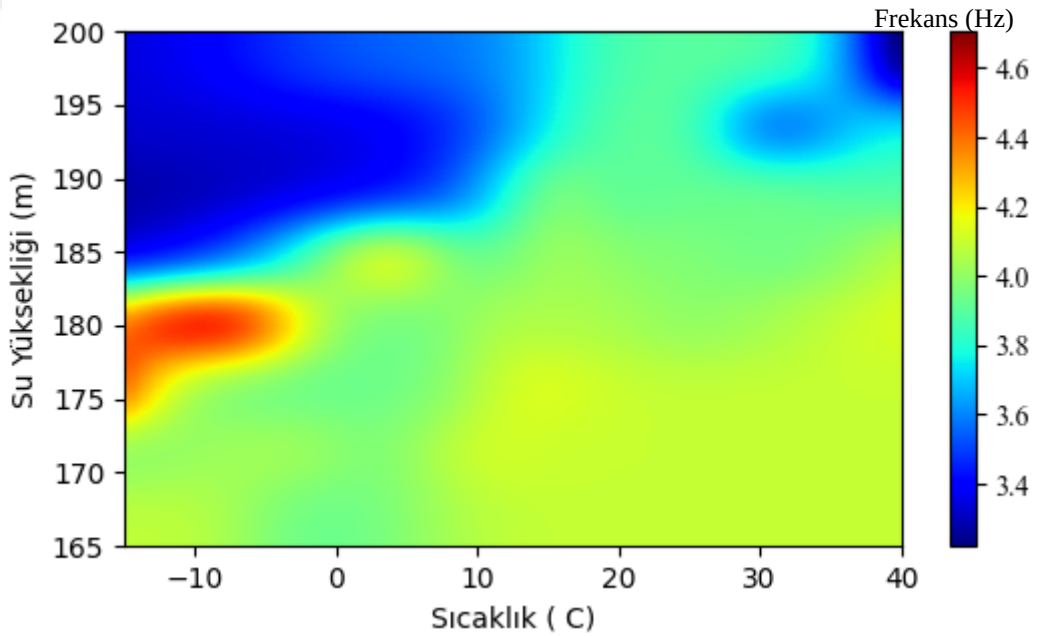


Şekil 160. Deriner Barajının dördüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri

Şekil 161 ağın performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri on ikinci iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sinir Ağı'nın toplamda 14 aylık dördüncü moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Deriner Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 165m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Deriner Barajına ait dördüncü frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 162'de ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan Yapay Sinir Ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 161. Deriner Barajının dördüncü modu için oluşturulan ağı performans grafiği



Şekil 162. Deriner Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen dördüncü moduna ait frekans haritası

Bu çalışma ile Deriner Barajının değişen rezervuar su yüksekliği ve sıcaklık değerlerine göre ilk dört moduna ait frekans değerlerinin ileride alabileceği değerler tahmin edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen Ortalama Kare Hata (MSE) ve R değerleri Yapay Sinir Ağı modellerinin mevcut duruma iyi adapte olabildiğini ve gelecek durum tahminleri için başarılı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

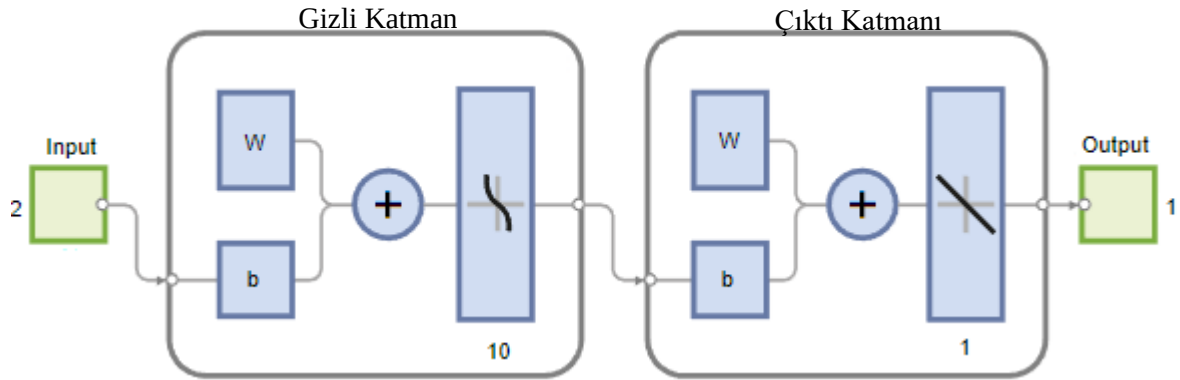
2.4.2. Yusufeli Barajında Yapay Sinir Ağları Uygulaması

Yusufeli Barajı'na ait uzun süreli izleme verileri 26 Eylül 2022 ile 16 Mart 2024 aralığına ait olup günlük birer adet frekans, su seviyesi ve hava sıcaklığı verisini kapsamaktadır. Yaklaşık 18 aylık izleme sürecinde oluşan bazı aksaklıklar nedeniyle veri kaybı olan günler bulunmaktadır. Yusufeli Barajının günlük frekans değerleri dikkate alınarak ilk altı moda ait frekans değerlerinin değişimi rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklık değişimine bağlı incelenmiştir. Bazı günlerde ilgili moda ait frekans değeri elde edilemediği (yetersiz çevresel titreşim nedeniyle pik elde edememe, elektrik ya da internet kesintisi nedeniyle oluşan kayıplar) için o günlere ait rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verisi de dikkate alınmamıştır. Yusufeli Barajı'nın birinci modu için 270, ikinci modu için 272, üçüncü modu için 270, dördüncü modu için 264, beşinci modu için 254 ve altıncı modu için 232 adet frekans değeri ve bu frekans değerinin elde edildiği saate karşılık gelen rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklık verisi dikkate alınmıştır.

Bu tez kapsamında, MATLAB (2018) programı kullanılarak veri analizi ve tahmin amacıyla Yapay Sinir Ağları yöntemi benimsenmiştir. Mevcut verinin %70'i eğitim (training), %20'si geçerlilik (validation) ve %10'u test aşamaları için ayrılmıştır. Başlangıç modelinde gizli katman sayısının belirlenmesi karar vericiye bırakılmıştır. Ancak, Yapay Sinir Ağı modelinin beklenen performansı göstermemesi durumunda, karar verici gizli katman sayısını göreceli olarak artırıp azaltabilmektedir. Bu çalışmada, 10 adet gizli katman kullanılmasının uygun ve yeterli olduğuna karar verilmiştir. Rezervuar su seviyesi ve ortam sıcaklık verisi girdi parametresi olarak verilmekte bunlara karşılık frekans değeri çıktı verisini oluşturmaktadır. 10 adet gizli katman ve 1 adet çıktı katmanı olmak üzere toplam on bir ara katman olarak oluşturulan yapının özeti Şekil 163'te verilmektedir. Oluşturulan Yapay Sinir Ağı'nın eğitimi için Levenberg-Marquardt Back Propagation algoritmasından yararlanılmıştır. Bu algoritma, Yapay Sinir Ağlarının hızlı ve etkili bir şekilde eğitilmesini sağlayarak analiz sürecini hızlandırmakta ve sonuçların daha güvenilir olmasını sağlamaktadır.

Eğitilen modelin çıktılarının performansını belirlemek amacıyla Ortalama Kare Hata (MSE: Mean Squared Error) yöntemi kullanılmıştır. Ortalama Kare Hata (MSE), gerçek değerler ile ağı tahmin ettiği değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasını ifade eder. R değeri ise $[-1,1]$ aralığında değişir ve gerçek ile tahmin edilen değerler arasındaki

korelasyonu göstermektedir. Bu değerlerin, ilişkinin gücünü belirtmesi açısından 1'e yakın olması tercih edilir.



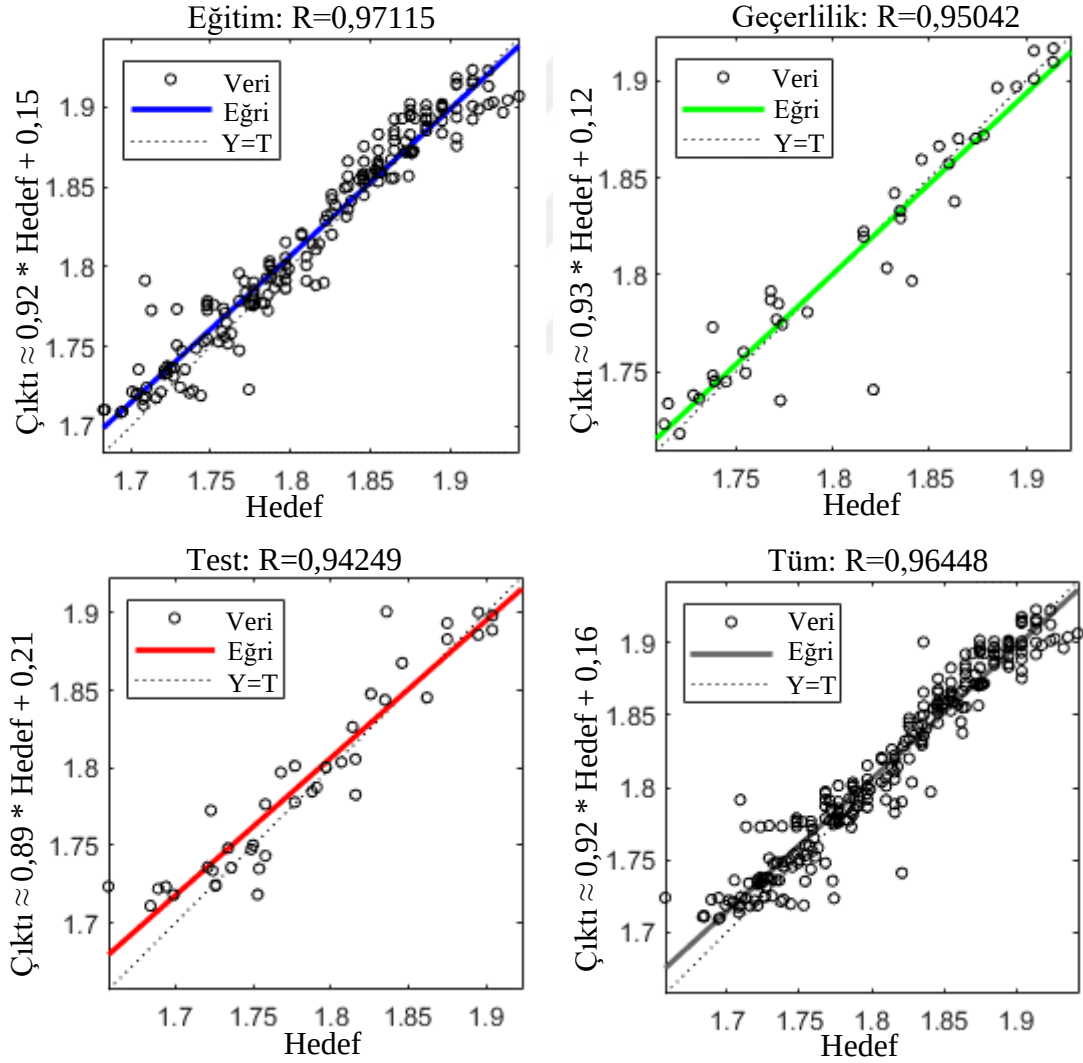
Şekil 163. Yusufeli Barajı için oluşturulan Yapay Sinir Ağı modeli yapısı

Yusufeli Barajının uzun süreli izleme sonucu dikkate alınan altı moduna ait frekans değerleri için ayrı ayrı işlem yapılarak her bir mod için rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değişimine bağlı frekans değişim haritası elde edilmiştir. Birinci moda ait 270 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 11 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 189, geçerlilik için 54 ve test için 27 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 48'te sunulmuştur. Bu tablodaki veriler, ağı eğitimi sırasında gözlemlenen hata katsayılarını ve tahmin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmaktadır. Özellikle, MSE'nin düşük olması ve R değerinin 1'e yakın olması, ağı iyi eğitildiğini ve gerçek verilere yakın tahminler yaptığını gösterir. Senaryo değerlendirmesi sırasında, aslında dikkate alınan temel gösterge R değerleridir ve ağı performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir. Şekil 164'te oluşturulan ağı eğitimi (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiklerindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağı başarıyla çalıştığını ve geçerlilik analiziyle bu durumun doğrulandığını, aynı zamanda ağı ezber yapmadığını göstermektedir.

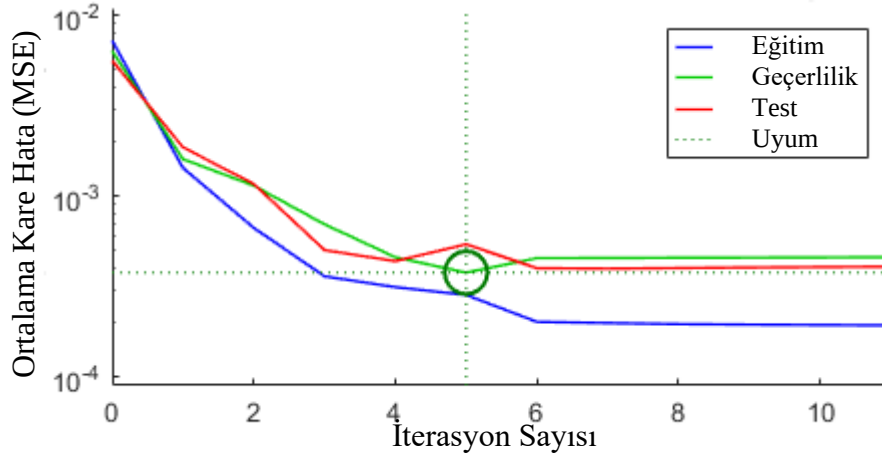
Tablo 48. Yusufeli Barajının birinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyükliği
Eğitim	0,00023245	0,97115	189
Geçerlilik	0,00037911	0,95042	54
Test	0,00054231	0,94249	27

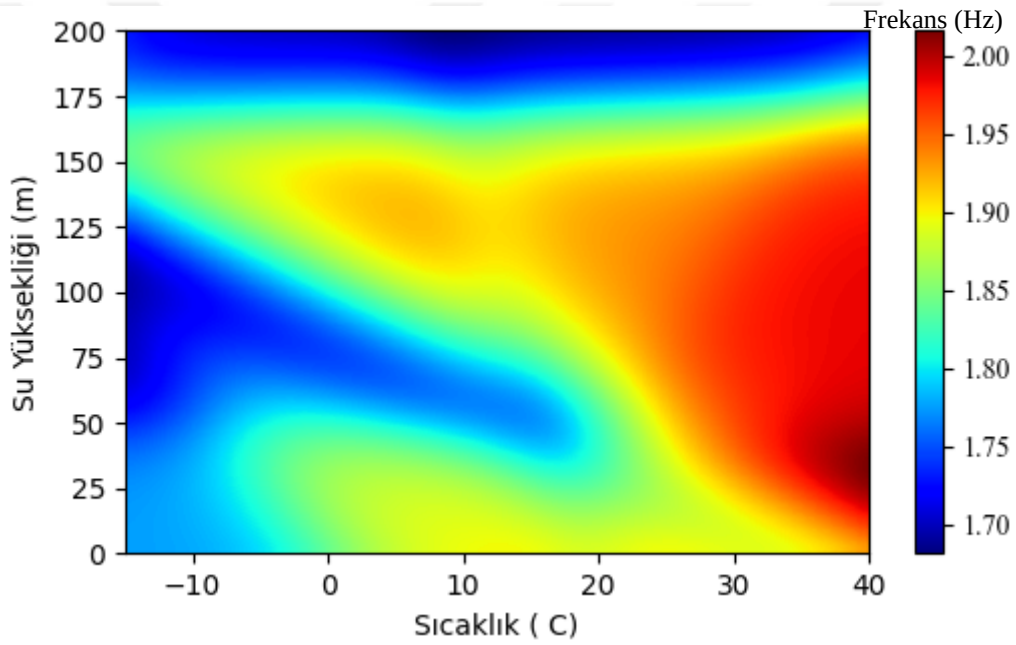
Şekil 165 ağın performans grafiğini göstermektedir. Geçerlik (validation) için en düşük hata değeri üçüncü iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sinir Ağının toplamda 18 aylık birinci moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yusufeli Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 0m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Yusufeli Barajına ait birinci frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 166’da ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan Yapay Sinir Ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 164. Yusufeli Barajının birinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri



Şekil 165. Yusufeli Barajının birinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği



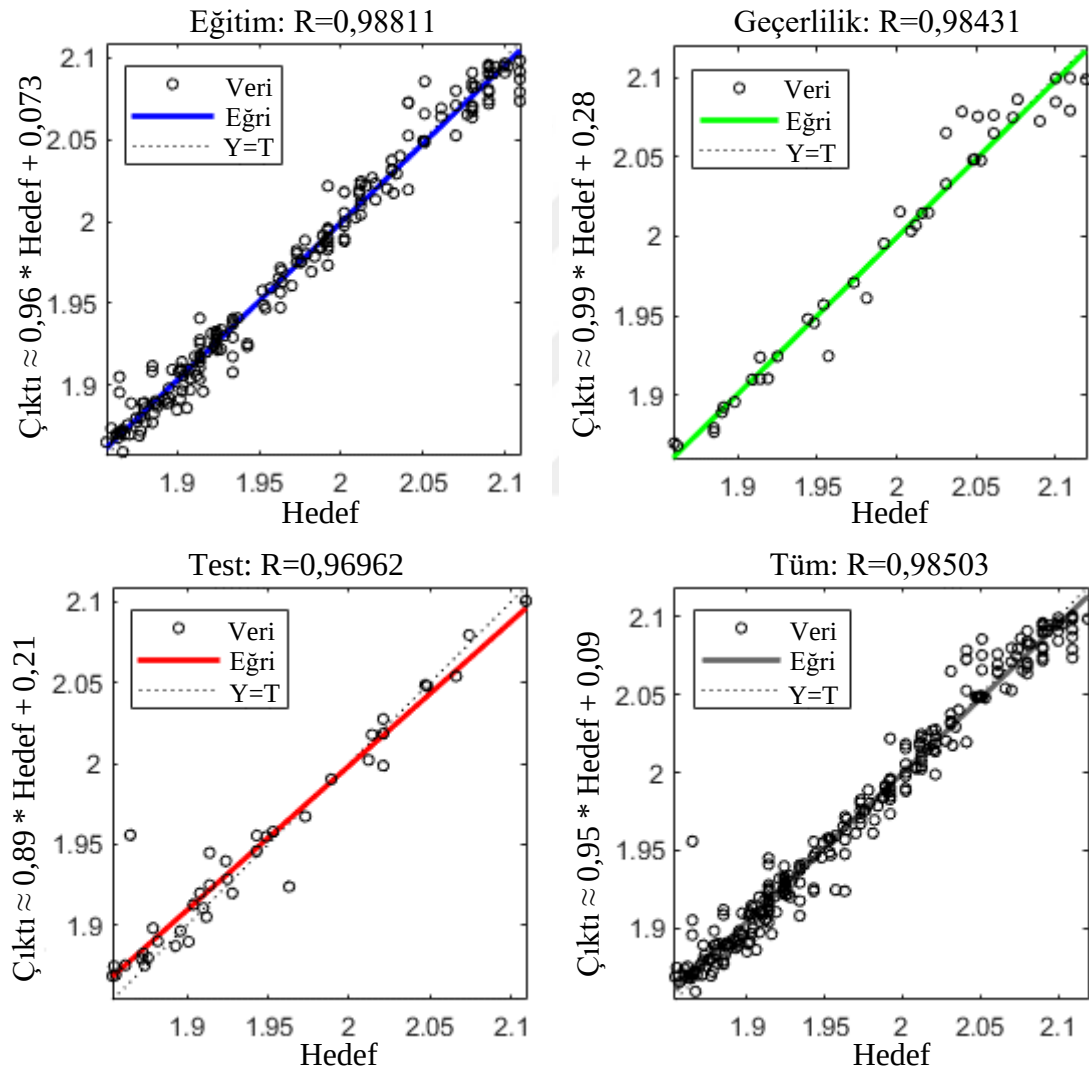
Şekil 166. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen birinci moduna ait frekans haritası

İkinci moda ait 272 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 23 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 191, geçerlilik için 54 ve test için 27 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 49'da sunulmuştur. Şekil 167'de oluşturulan ağına ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiklerindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla

çalıştığını ve geçerlilik analiziyle bu durumun doğrulandığını, aynı zamanda ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

Tablo 49. Yusufeli Barajının ikinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

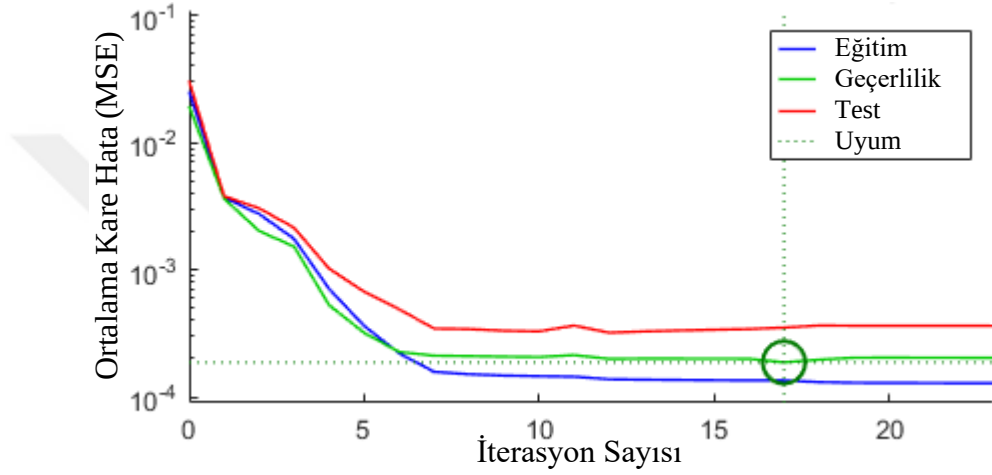
Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,00010256	0,98811	191
Geçerlilik	0,00018705	0,98431	54
Test	0,00025213	0,96962	27



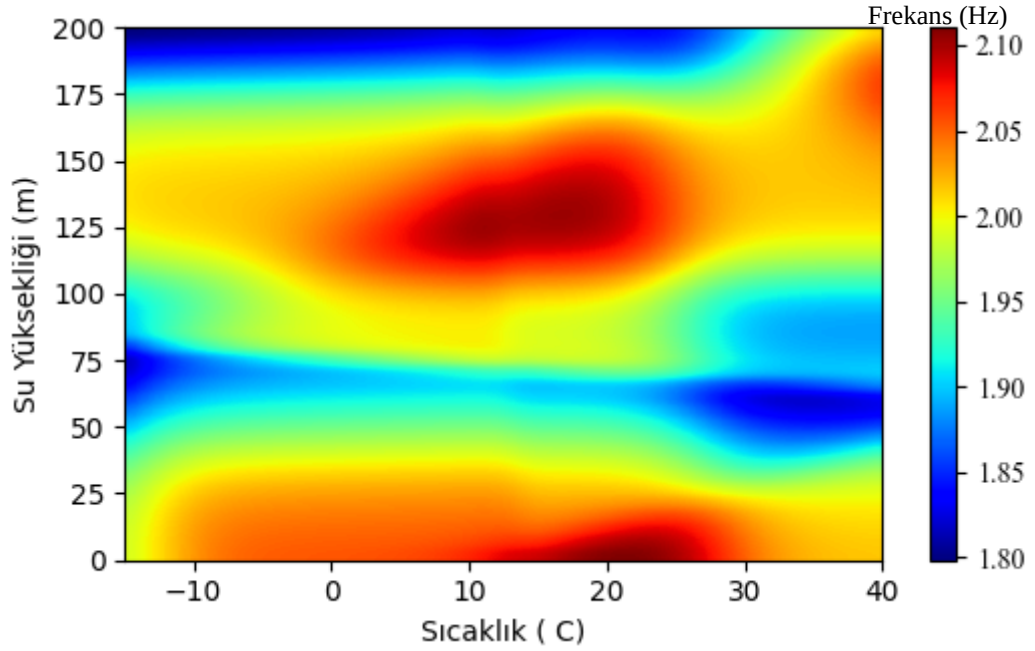
Şekil 167. Yusufeli Barajının ikinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri

Şekil 168 ağın performans grafiğini göstermektedir. Geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri on yedinci iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sinir Ağı'nın toplamda 18 aylık ikinci moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verileri ile eğitilmesi ve

test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yusufeli Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 0m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Yusufeli Barajına ait ikinci frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 169’da ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan yapay sinir ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 168. Yusufeli Barajının ikinci modu için oluşturulan ağı performans grafiği



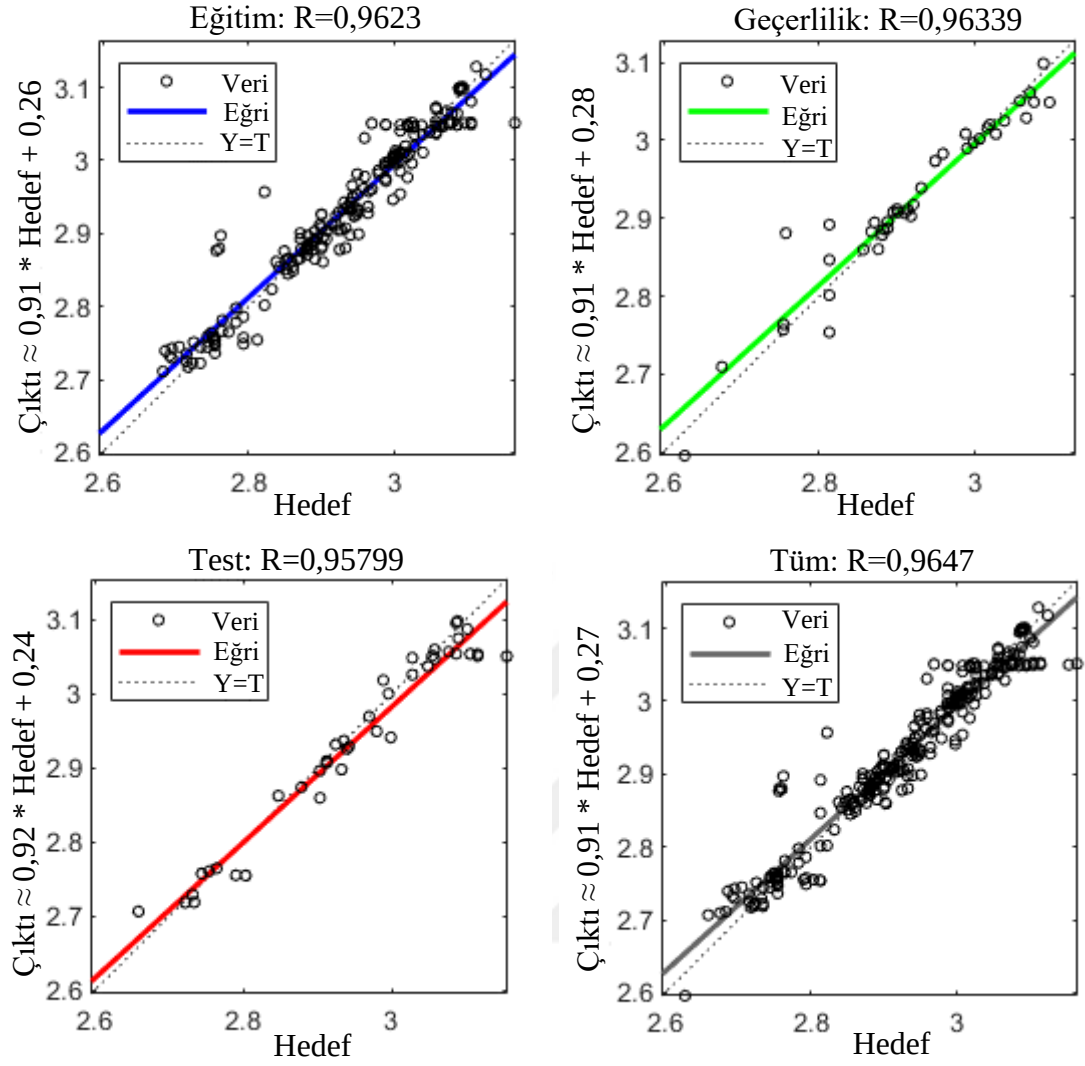
Şekil 169. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen ikinci moduna ait frekans haritası

Üçüncü moda ait 270 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 18 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 189, geçerlilik için 54 ve test için 27 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 50'de sunulmuştur. Şekil 170'te oluşturulan ağa ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiklerindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla çalıştığını ve geçerlilik analiziyle bu durumun doğrulandığını, aynı zamanda ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

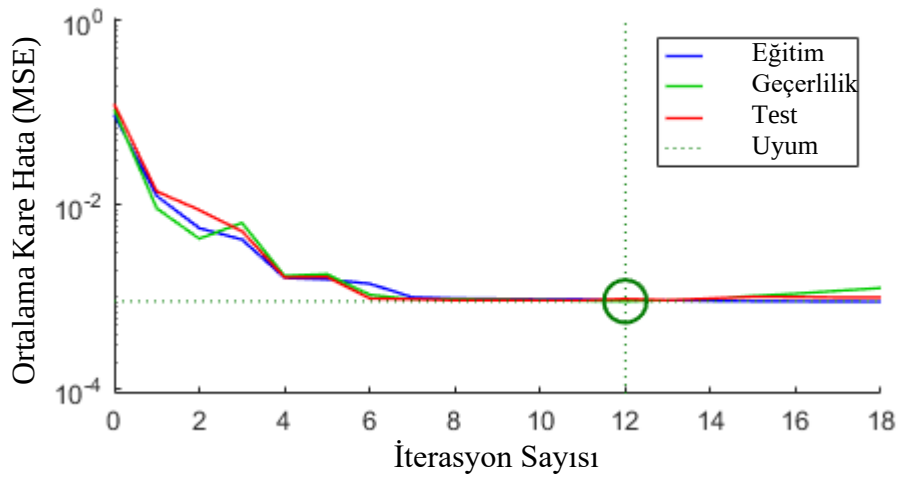
Tablo 50. Yusufeli Barajı'nın üçüncü modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,00090731	0,9623	189
Geçerlilik	0,00090731	0,9634	54
Test	0,00090732	0,9579	27

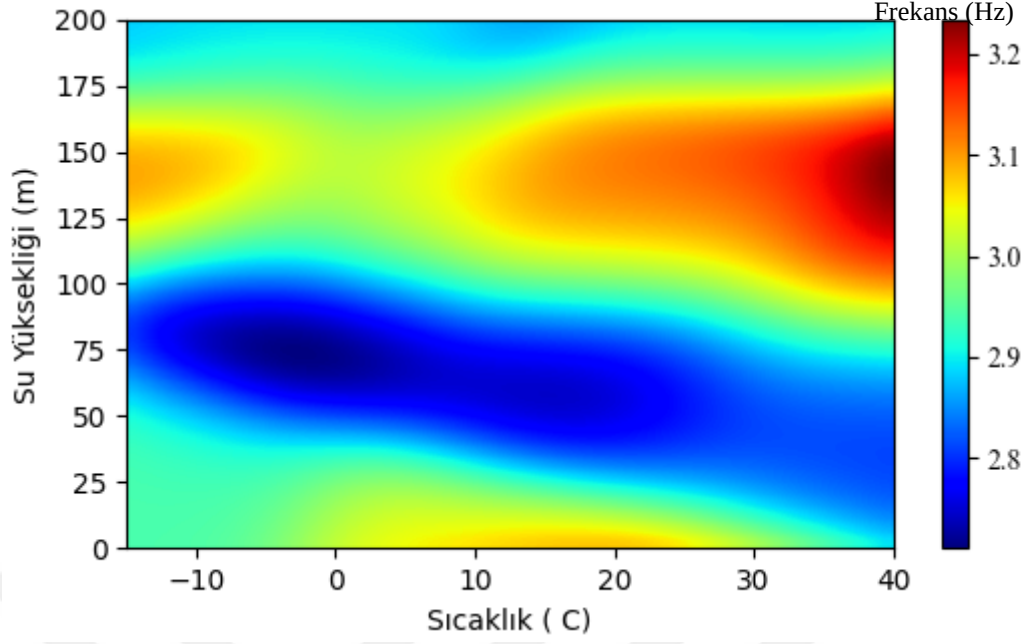
Şekil 171 ağın performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), Geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri on ikinci iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sinir Ağı'nın toplamda 18 aylık üçüncü moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yusufeli Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 0m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Yusufeli Barajına ait üçüncü frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 172'de ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan Yapay Sinir Ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 170. Yusufeli Barajının üçüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri



Şekil 171. Yusufeli Barajının üçüncü modu için oluşturulan ağın performans grafiği

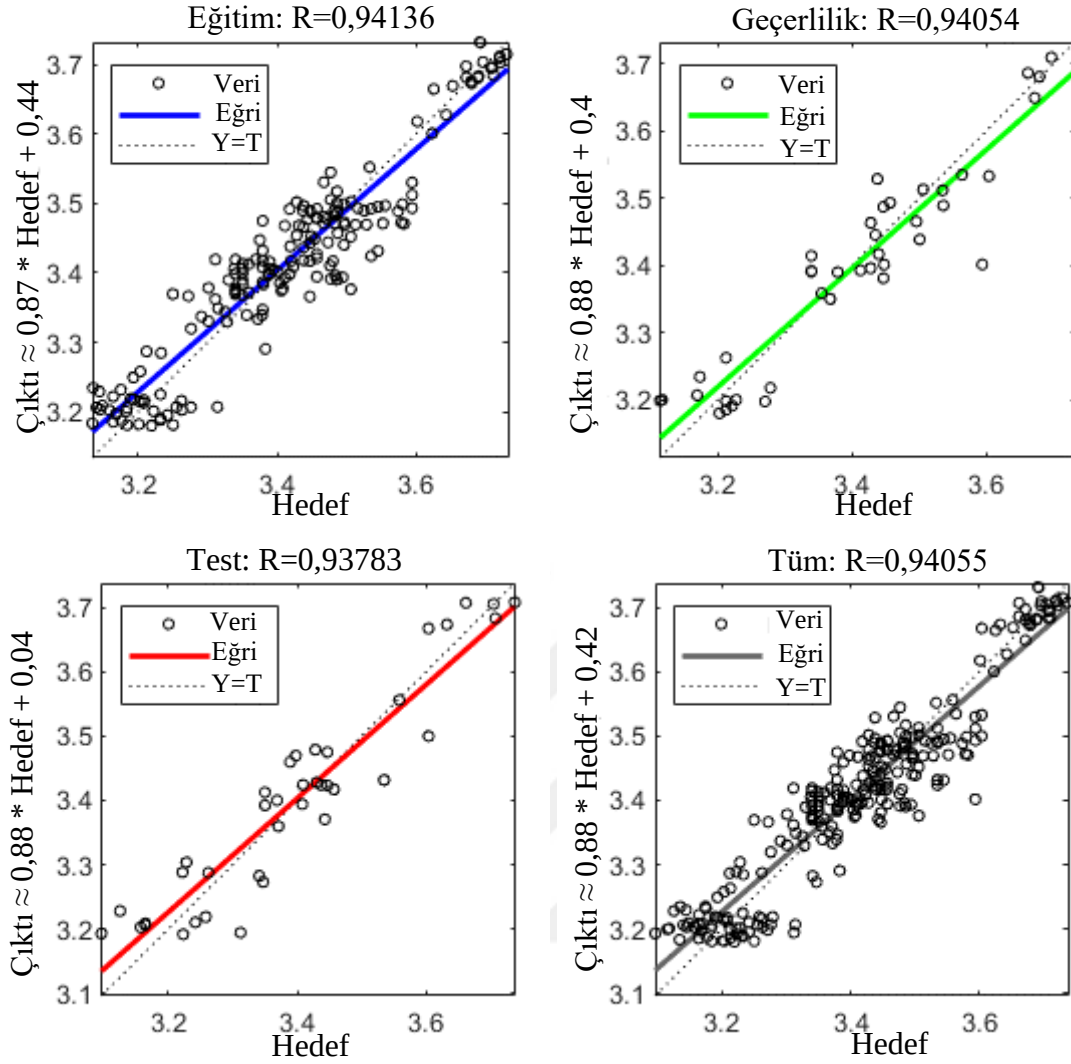


Şekil 172. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen üçüncü moduna ait frekans haritası

Dördüncü moda ait 264 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 30 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 185, geçerlilik için 53 ve test için 26 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 51’de sunulmuştur. Şekil 173’te oluşturulan ağıta ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiklerindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla çalıştığını ve geçerlilik analiziyle bu durumun doğrulandığını, aynı zamanda ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

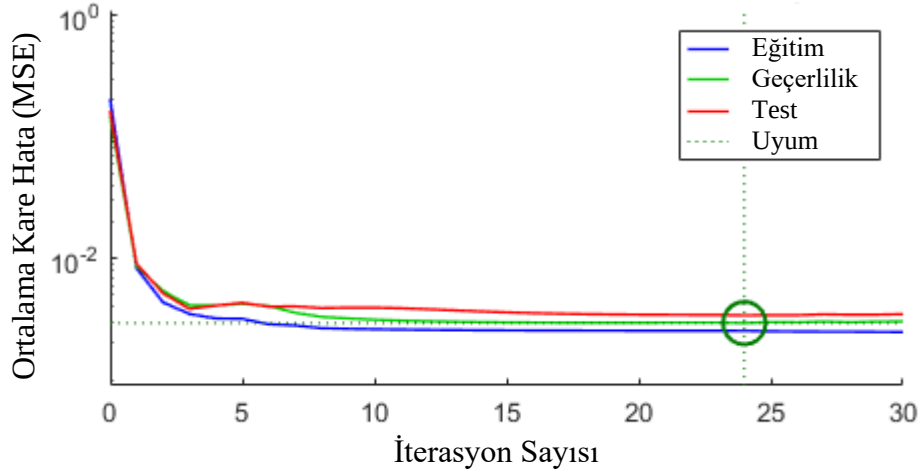
Tablo 51. Yusufeli Barajının dördüncü modu için eğitim sırasında ağıda oluşan hata katsayıları

Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,0028651	0,94136	185
Geçerlilik	0,0029411	0,94054	53
Test	0,0031254	0,93783	26

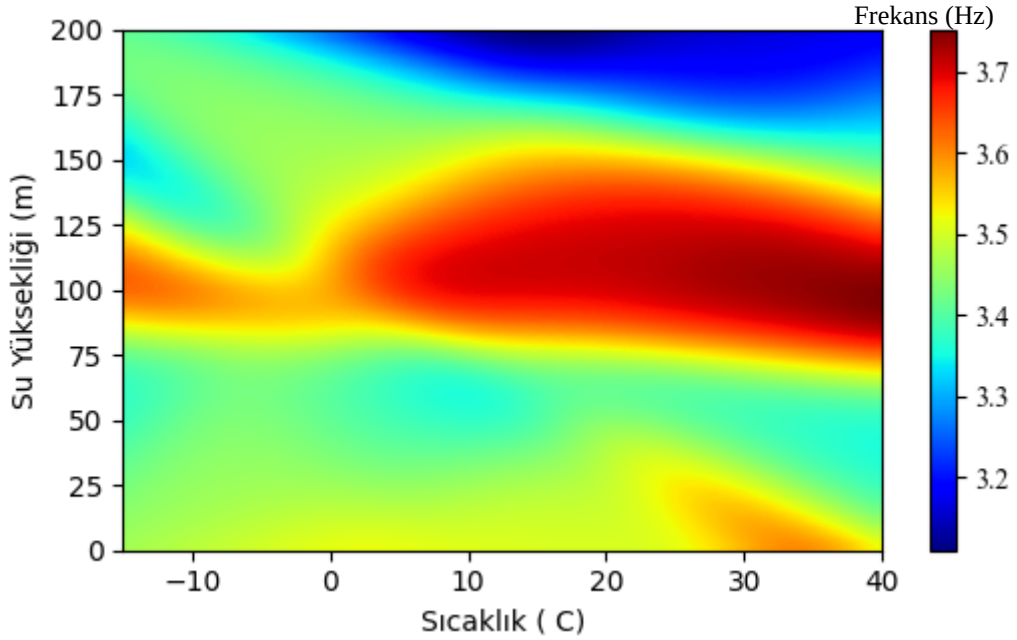


Şekil 173. Yusufeli Barajının dördüncü modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri

Şekil 174 ağı performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), Geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri yirmi dördüncü iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sinir Ağı'nın toplamda 18 aylık dördüncü moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yusufeli Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 0m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Yusufeli Barajına ait dördüncü frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 175'te ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan Yapay Sinir Ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 174. Yusufeli Barajının dördüncü modu için oluşturulan ağı performans grafiği



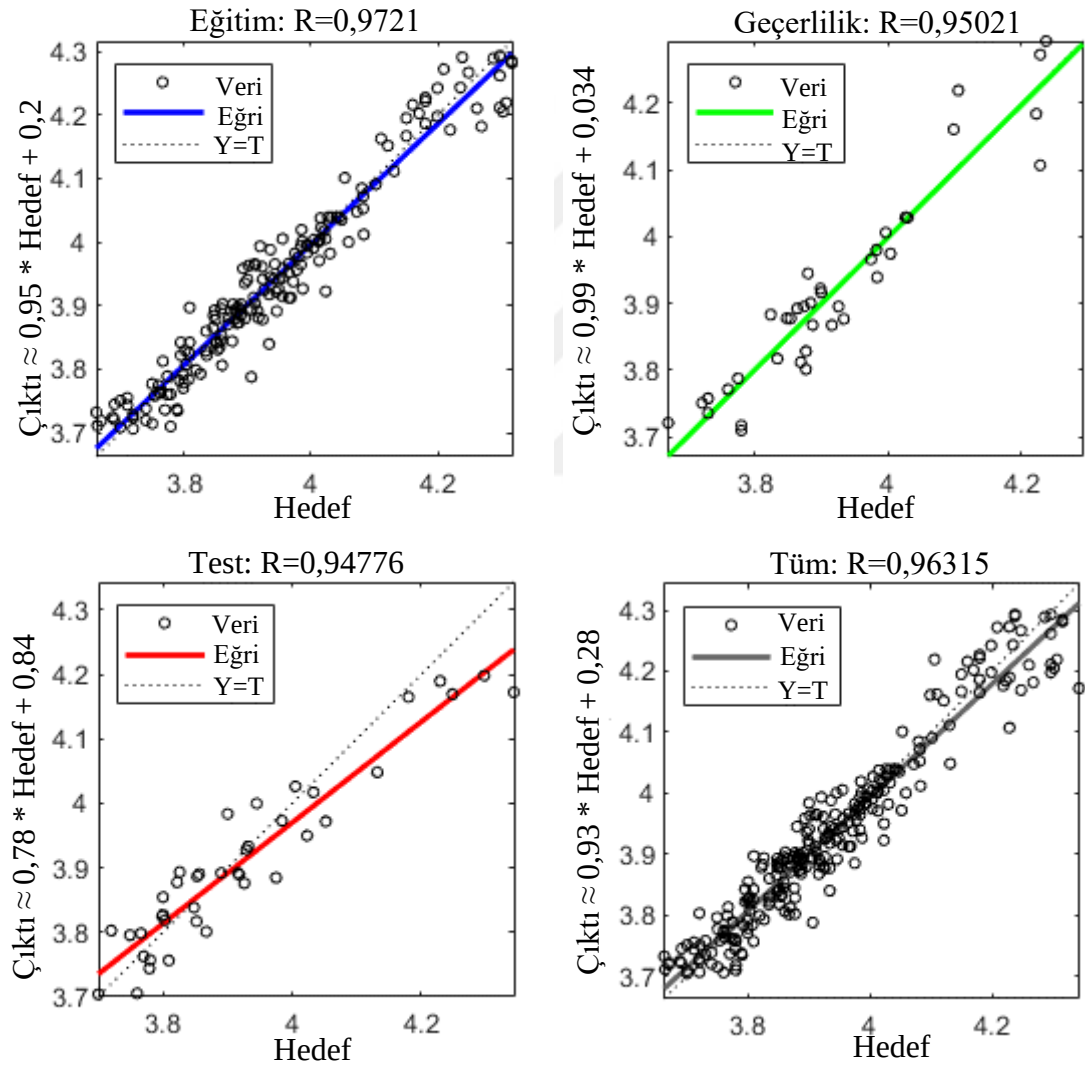
Şekil 175. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen dördüncü moduna ait frekans haritası

Beşinci moda ait 254 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 30 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 178, geçerlilik için 51 ve test için 25 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 52’de sunulmuştur. Şekil 176’da oluşturulan ağa ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiklerindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla

çalıştığını ve geçerlilik analiziyle bu durumun doğrulandığını, aynı zamanda ağıın ezber yapmadığını göstermektedir.

Tablo 52. Yusufeli Barajının beşinci modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

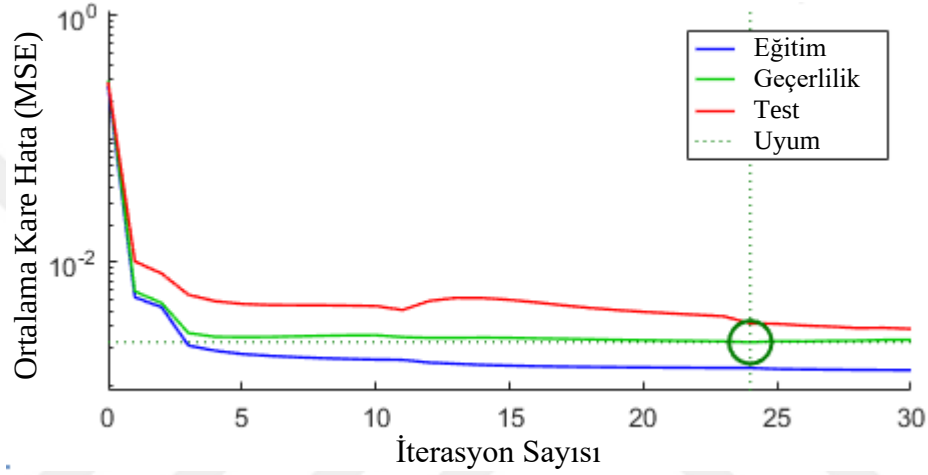
Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,0012545	0,97210	178
Geçerlilik	0,0022285	0,95021	51
Test	0,0035651	0,94776	25



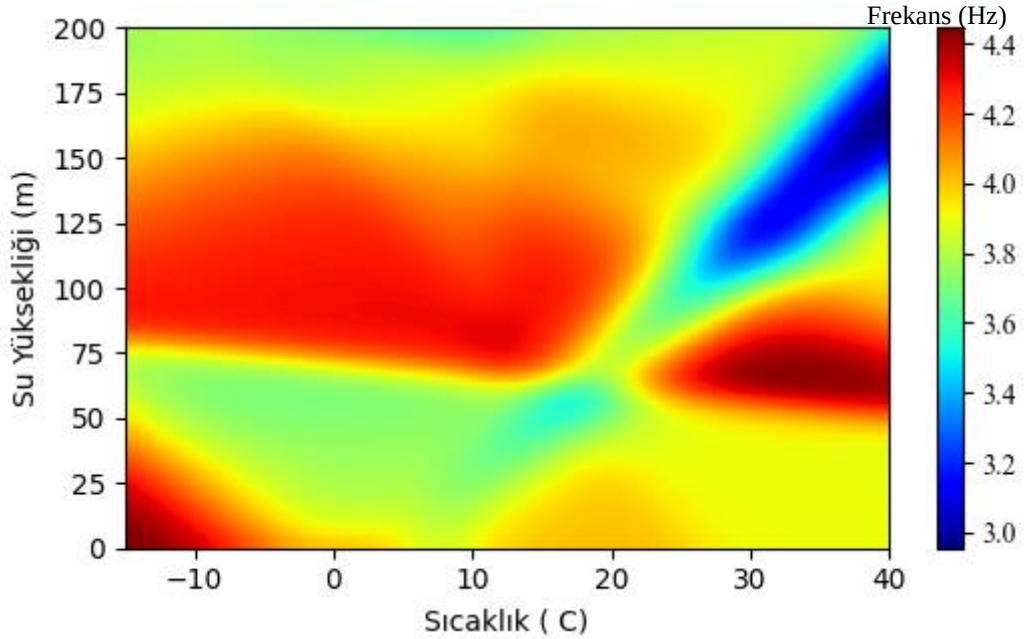
Şekil 176. Yusufeli Barajının beşinci modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri

Şekil 177 ağıın performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), Geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri yirmi dördüncü iterasyonunda elde edilmiştir.

Yapay Sinir Ağı'nın toplamda 18 aylık beşinci moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yusufeli Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 0m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Yusufeli Barajına ait beşinci frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 178'te ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan Yapay Sinir Ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 177. Yusufeli Barajının beşinci modu için oluşturulan ağın performans grafiği



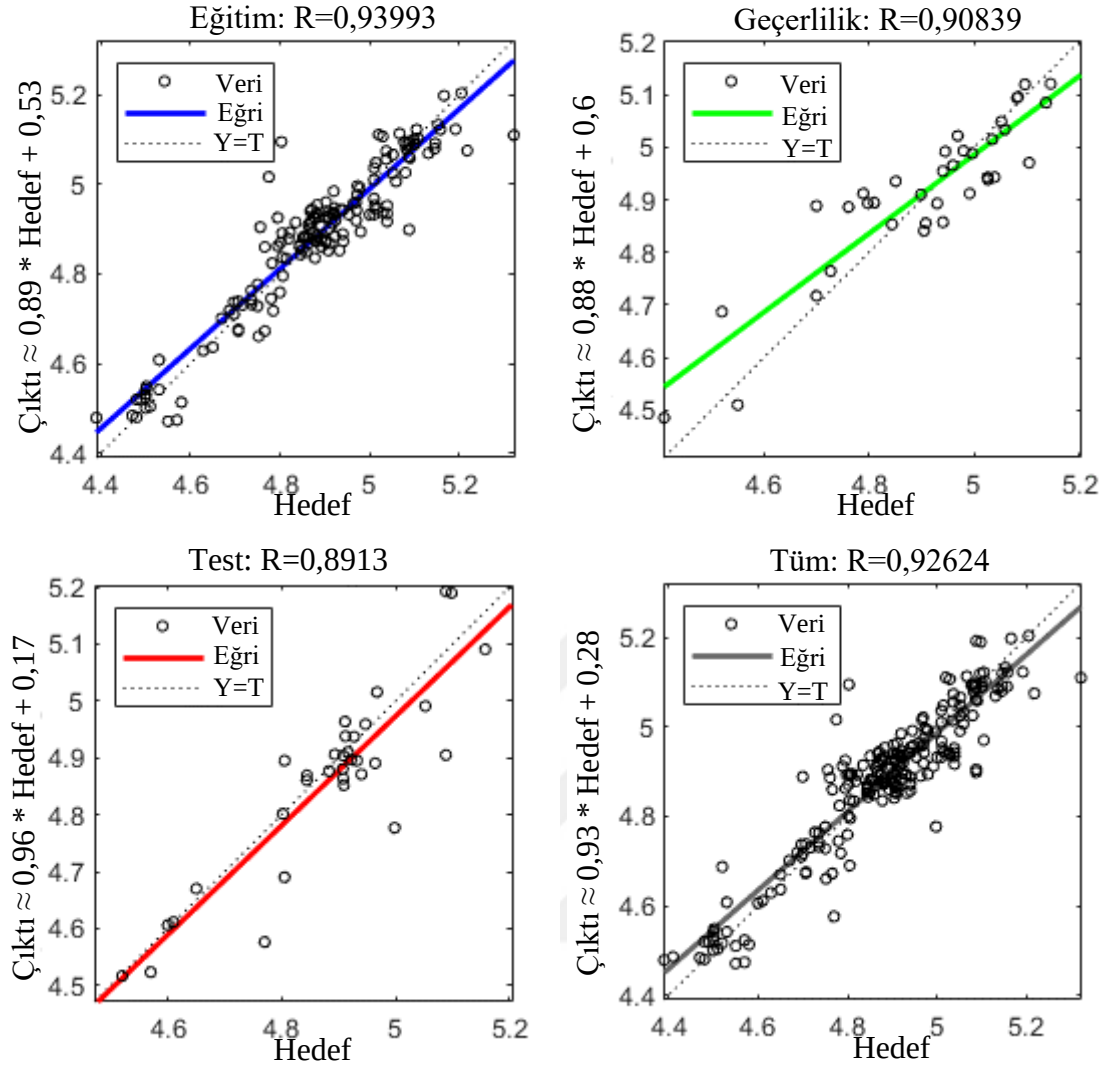
Şekil 178. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen beşinci moduna ait frekans haritası

Altıncı moda ait 232 adet frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri MATLAB (2018) programındaki Neural Network Fittin uygulaması ile eğitilmiştir. Toplam 18 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, eğitim için 163, geçerlilik için 46 ve test için 23 örneklem kullanılmıştır. Analiz sonucunda MSE ve R değerlerinin istenilen seviyelerde olduğu görülmektedir. Eğitim süreci boyunca gözlemlenen hata katsayıları, Tablo 53'te sunulmuştur. Şekil 179'da oluşturulan ağa ait eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test aşamaları için elde edilen regresyon grafikleri verilmekte olup, eğitim ve geçerlilik grafiklerindeki R değerinin, test grafiğindeki R değerinden büyük olması ağın başarıyla çalıştığını ve geçerlilik analiziyle bu durumun doğrulandığını, aynı zamanda ağın ezber yapmadığını göstermektedir.

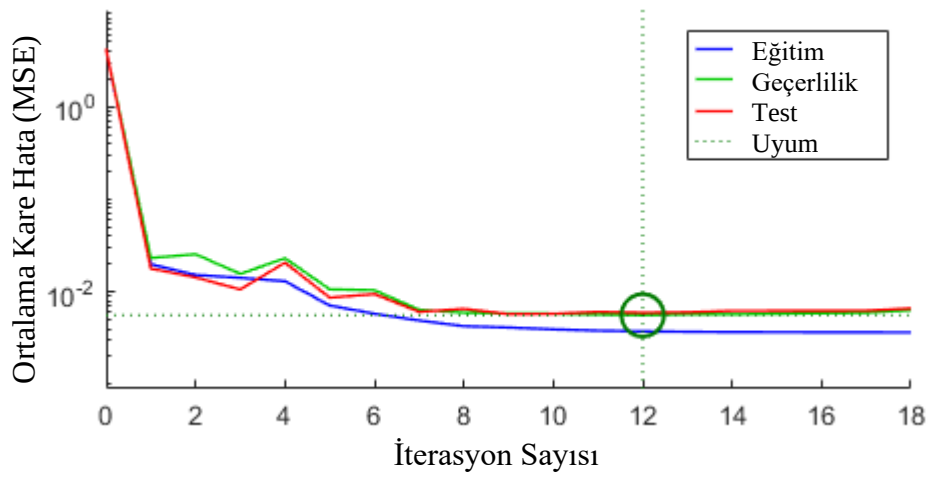
Tablo 53. Yusufeli Barajının altıncı modu için eğitim sırasında ağda oluşan hata katsayıları

Hata Değerleri	MSE	R	Örneklem Büyüklüğü
Eğitim	0,0038512	0,93993	163
Geçerlilik	0,0055952	0,90839	46
Test	0,0055978	0,89130	23

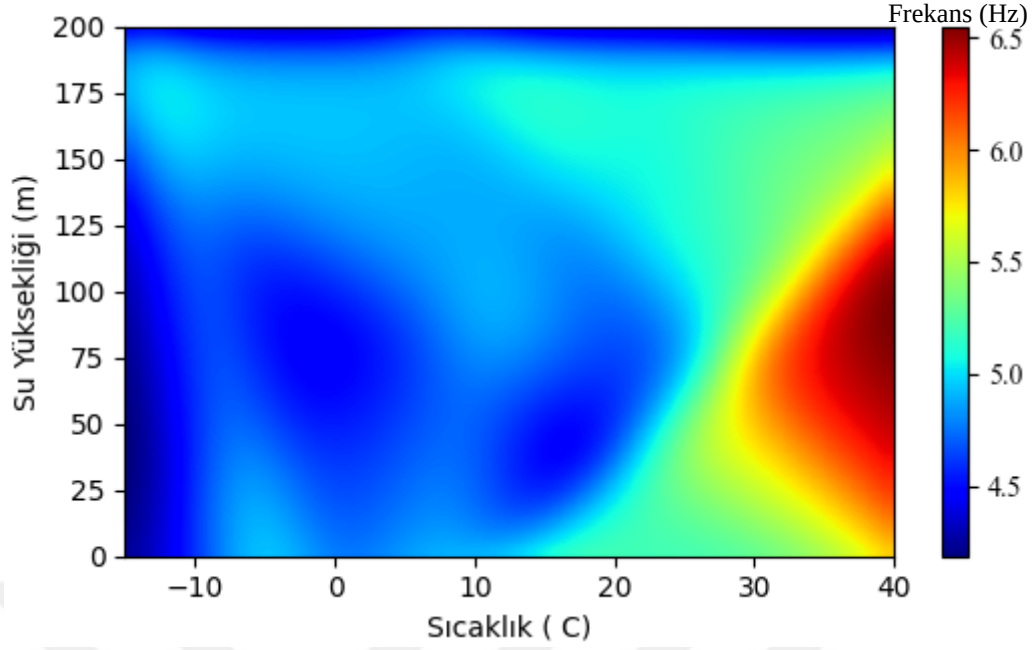
Şekil 180 ağın performans grafiğini göstermektedir. Eğitim (training), Geçerlik (validation) ve test için en düşük hata değeri on ikinci iterasyonunda elde edilmiştir. Yapay Sinir Ağı'nın toplamda 18 aylık altıncı moda ait frekans, rezervuar su seviyesi ve sıcaklık verileri ile eğitilmesi ve test edilmesiyle elde edilen sonuçlar gerçek çıktı değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yusufeli Barajı için rezervuar su seviyesindeki değişim aralığı 0m-200m olarak, hava sıcaklığındaki değişim aralığı da -15 ve 40 °C aralığında baz alınarak eğitilen ağ sonucu Yusufeli Barajına ait altıncı frekans değerinin rezervuar su yüksekliği ve hava sıcaklığı değerine bağlı frekans haritası Şekil 181'de ki gibi elde edilmiştir. Bu grafik eğitim için kullanılan verilerin haricinde oluşturulan Yapay Sinir Ağı tarafından tahmin edilen frekans değerlerini içermektedir.



Şekil 179. Yusufeli Barajının altıncı modu için oluşturulan eğitim (training), geçerlilik (validation) ve test regresyon grafikleri



Şekil 180. Yusufeli Barajının altıncı modu için oluşturulan ağı performans grafiği



Şekil 181. Yusufeli Barajının değişen rezervuar su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen altıncı moduna ait frekans haritası

Bu çalışma ile Yusufeli Barajının değişen rezervuar su yüksekliği ve sıcaklık değerlerine göre ilk altı moduna ait frekans değerlerinin ileride alabileceği değerler tahmin edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen Ortalama Kare Hata (MSE) ve R değerleri Yapay Sinir Ağı modellerinin mevcut duruma iyi adapte olabildiğini ve gelecek durum tahminleri için başarılı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

3. SONUÇLAR

Deriner ve Yusufeli Kemer Barajları, Türkiye'nin en yüksek çift eğrilikli kemer barajları olup, dünya sıralamasında da ilk sıralarda yer almaktadırlar. Bu barajlar sadece enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda bölgesel kalkınma ve istihdam yaratma konularında da önemli bir rol oynamaktadır. Proje, yerel ekonomiyi canlandırarak bölge halkına yeni iş olanakları sunmakta ve sosyal kalkınmaya katkı sağlamaktadır. Bu barajlar, Türkiye'nin enerji sektöründeki hedeflerine ulaşma yolunda önemli bir kilometre taşıdır. Coğrafi avantajları, stratejik konumu ve yüksek enerji potansiyeli ile bu mühendislik harikası, sadece ülkenin enerji ihtiyaçlarını karşılamakla kalmayacak, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik kalkınma gibi alanlarda da olumlu etkiler yaratacaktır. Tez kapsamında gerçekleştirilen araştırma, analiz ve deneysel çalışmalar, ülkenin enerji altyapısının güçlenmesinde kilit bir rol oynayacağı aşikardır.

Bu tez kapsamında kemer barajların, baraj-rezervuar-temel etkileşimini simüle etmek amacıyla Deriner ve Yusufeli Barajlarının sonlu eleman modellerinin Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak oluşturulması, farklı su seviyelerinde barajların statik analizlerinin yapılması ve deprem performanslarının belirlenmesi amacıyla dinamik analizlerin yapılması, uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmalarının yürütülmesi ve uzun süreli izleme verilerinin Yapay Sinir Ağları ile eğitilerek sıcaklık ve su seviyesine bağlı frekans değerlerinin tahmini için frekans haritalarının elde edilmesi olmak üzere dört ana kategoride çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların yürütülme sürecinde Deriner Barajı aktif olarak enerji üretimine devam etmekte olduğu için mevcut yapısal durumun belirlenmesi amacıyla barajda deneysel modal analiz testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal analizin gerçekleştirildiği gün ki barajın rezervuar su seviyesi durumu dikkate alınarak sonlu eleman modelleri ANSYS programında oluşturulmuştur. Yusufeli Barajının ise tez süreci içerisinde inşası tamamlanmış olup, rezervuarın su tutma süreci takip edilerek sürekli olarak izlenmiştir. Yusufeli Barajının rezervuarının boş olduğu durumda detaylı deneysel modal analiz testleri gerçekleştirilerek yalnızca gövdeye ait dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Baraj rezervuarının su tutma sürecinin başlaması ile gövdeye kurulan ivmeölçer sistemi ile belirlenen sekiz farklı su seviyesi durumu için dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Deriner ve Yusufeli Barajının baraj-rezervuar-temel etkileşimi literatürde yaygın olarak kullanılan Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları

dikkate alınarak sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Deriner Barajı için tek bir su seviyesi durumu olmak üzere üç yaklaşımı da dikkate alan üç adet sonlu eleman modeli, Yusufeli Barajı için ise sekiz farklı su yüksekliği durumunda üç yaklaşımı da dikkate alan yirmi dört adet sonlu eleman model oluşturulmuştur. Ayrıca Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumunda da deneysel testler yapıldığı için bu duruma ait sonlu eleman modelde de çalışmalar yapılmıştır. Deriner ve Yusufeli Barajına ait toplam yirmi sekiz adet sonlu eleman modelde statik ve dinamik analizler gerçekleştirilerek belirlenen kesitler boyunca yer değiştirme, minimum ve maksimum asal gerilme değerlerine ait diyagram ve tablolar elde edilerek tez içeriğinde detaylı olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen diğer bir çalışma olan Yapı Sağlığı İzleme sürecinde ise, Deriner ve Yusufeli Barajlarına yüksek hassasiyetli ivmeölçerler yerleştirilerek elde edilen ham sinyallerin 7/24 sürekli olarak web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme platformuna aktarılması, bu ham sinyallerin işlenmesi ve dinamik karakteristiklerin elde edilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tüm izleme süreci boyunca dinamik karakteristiklerin elde edildiği saatlere ait baraj rezervuarının su yükseklikleri ve hava sıcaklığı değerleri de dikkate alınmıştır. Bir baraj yapısının dinamik karakteristiklerini etkileyen en önemli parametrelerden ikisi olan sıcaklık ve su seviyesi değişiminin dinamik karakteristikler üzerindeki etkinliğinin belirlenmesi amacıyla istatistiki çalışma yapılarak tez kapsamında sunulmuştur. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumu için gerçekleştirilen sayısal ve deneysel modal analiz sonucu elde edilen frekans ve mod şekillerinin birbirleri ile tam uyum sağladığı görülmüştür. Özellikle literatürde bu şekilde inşası tamamlanan ve yalnızca baraj-temel etkileşimini içeren baraja ait dinamik karakteristiklerin belirlendiği bir çalışmaya rastlanılmamış olup, elde edilen sayısal ve deneysel sonuçların uyumu baraj-temel etkileşimli sonlu eleman modelin gerçek yapıyı temsil eden doğrulukta bir model olduğunu ifade etmek açısından önem arz etmektedir.
- Rezervuarın boş haline ait dinamik karakteristiklerin belirlenmesinin bir diğer önemli katkısı da rezervuar modelleme aşamasında kullanılan yaklaşımlara ait belirsizliklerin belirlenebilmesine imkan sağlamasıdır. Rezervuar modelleme yaklaşımları bazı kabullere dayalı formülasyonlar içermekte olup, bu durum sonlu

eleman modellere ait analiz sonuçlarında, gerçek yapıya ait değerlere göre sapmalar/farklılıklar oluşmasına sebep olmaktadır. Yusufeli Barajı'na ait rezervuarın boş olması durumu için yapılan deneysel testler sonucu dinamik karakteristiklerin belirlenerek sonuçların sonlu eleman model ile birebir uyumlu olarak elde edilmesi işlemi ile baraj-temel etkileşimli modelde herhangi bir sapmanın olmadığı belirlenmiştir. Böylece sonlu eleman modele eklenecek rezervuar etkisinin uygulanan yaklaşıma göre deneysel sonuçlarla farklılıklarına bakılarak meydana getirdiği sapmalar açıkça belirlenebilecektir. Bu durum özellikle literatürde yaygın olarak kullanılan rezervuar modelleme yaklaşımlarından olan Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonuçların hangisinin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu hakkında bilgi sağlamaktadır.

- Deriner ve Yusufeli Barajları için oluşturulan ve farklı rezervuar su yüksekliği durumlarını da içeren sonlu eleman modellere ait gerçekleştirilen sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekansların birbirleriyle genel anlamda uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum, oluşturulan sonlu eleman modellerin Deriner ve Yusufeli Barajlarının dinamik davranışlarını gerçekçi bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Üç farklı rezervuar yaklaşımı kullanılarak oluşturulan baraj modellerine ait sonuçların deneysel sonuçlara göre belirli limitler arasında sapmalar/farklılıklar gösterdiği görülmekte olup, bu sapmalar/farklılıkların yaklaşımlarda yapılan kabuller ve idealleştirmelerden kaynaklı olduğu bilinen bir gerçektir.
- Deriner ve Yusufeli Barajları için değişen rezervuar su seviyeleri ve sıcaklık değerleri altında deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin değişkenlik gösterdiği ancak mod şekillerinin değişmediği görülmüştür.
- Deriner Barajı tez sürecinde aktif olarak elektrik üretimine devam eden bir baraj olup, detaylı deneysel testlerin yapıldığı 12.06.2019 tarihinde rezervuar su kotu 390m olup, hava sıcaklığı 28°C'dir. Bu parametreler altında yapılan deneysel test sonucu elde edilen frekans değerleri baz alınarak üç farklı rezervuar modelleme yaklaşımı kullanılarak baraj-rezervuar-temel etkileşimli sonlu eleman model hazırlanmıştır. Üç yaklaşıma ait sonlu eleman modellerin modal analiz sonuçları arasında farklılar mevcut olup, deneysel sonuçlar referans alınarak sonuçların güncellenmesi gerekmektedir. Bu aşamada Euler yaklaşımına ait sonlu eleman

model seçilmiş olup, deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla baraj gövdesinin malzeme özelliklerinde belirli sınırlar arasında değişiklikler yapılarak model güncelleme denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler barajın ilk dört moduna ait sayısal frekans değerlerinin deneysel frekans değerleri ile arasındaki fark %5'in altına düşene kadar devam etmiş olup, Deriner Barajı'nın Euler yaklaşımına ait sonlu eleman modeli güncellenmiştir. Güncellenmiş Euler yaklaşımına ait sonlu eleman modelde kullanılan malzeme özellikleri Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen sonlu eleman modele atanarak yeniden modal analiz yapılmış ve frekans değerleri elde edilmiştir. Euler yaklaşımına ait sonlu eleman modelin frekans değerlerinde deneysel sonuçlara göre %5 civarında olan maksimum sapma/fark Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonlu eleman modelde sırasıyla %21 ve %18 olarak elde edilmiştir. Deriner Barajı'nda rezervuarın boş olması durumu için gerçekleştirilen bir deneysel test ve çalışma olmadığı için sonlu eleman model güncellemesi rezervuar suyunun dikkate alındığı model üzerinden yapılması gerekli idi. Bu durumda modeller hem baraj-temel hem de baraj-rezervuar-temel etkileşimlerinden gelen belirsizlikleri içermektedir.

- Deriner Barajının Euler yaklaşımına göre modellenmiş ve güncellenmiş sonlu eleman modeli kullanılarak bu modelden rezervuar etkisi kaldırılmış ve rezervuarın boş olması durumu için sonlu eleman modele modal analiz uygulanarak ilk dört moda ait frekans değerleri elde edilmiştir. Bu değerler ileride farklı çalışmalar yapmak isteyen araştırmacılara referans olması adına önem arz etmektedir. Elde edilen boş rezervuar durumuna ait frekans değerleri rezervuarın dolu olması durumuna ait frekans değerleri ile karşılaştırıldığında maksimum %34 oranında bir değişimin olduğu görülmüştür.
- Yusufeli Barajında baraj rezervuarının boş olması durumu için ve sekiz farklı rezervuar su yüksekliği durumu için deneysel dinamik karakteristikler elde edilerek oluşturulan üç farklı rezervuar modelleme yaklaşımından elde edilen sayısal dinamik karakteristikler ile karşılaştırılmıştır. DSİ'den elde edilen karot numunelerine ait sonuçlar kullanılarak barajın boş olması durumuna ait sonlu eleman modelde malzeme özellikleri tanımlanarak deneysel ve sayısal sonuçlar arasında birebir uyum olduğu elde edilmiştir. Böylece üç farklı rezervuar

modelleme yaklaşımlarına ait modeller yeniden güncellenmemiş olup elde edilen sonuçlar direkt olarak kullanılmıştır.

- Yusufeli Barajının rezervuarının boş olması durumu için deneysel olarak elde edilen ilk altı doğal frekans değeri 1,881-5,191Hz aralığında değişmektedir.
- Değişen rezervuar su seviyelerine göre elde edilen deneysel frekans değerleri ise şu şekildedir: 15m su seviyesinde 1,875-5,191 Hz, 36m su seviyesinde 1,855-4,688 Hz, 57m su seviyesinde 1,768-4,510 Hz, 78m su seviyesinde 1,821-4,800 Hz, 99m su seviyesinde 1,885-4,900 Hz, 126m su seviyesinde 1,943-4,940 Hz, 150m su seviyesinde 1,933-5,052 Hz ve 172m su seviyesinde 1,828-4,800 Hz. Tüm modlara ait deneysel frekans değişimleri benzer eğilim göstermekte olup, bu frekans değerlerinin ilk 57m'ye kadar azaldığı, ardından yükselişe geçerek 126m'ye kadar artışın devam ettiği ve bu su seviyesinden itibaren tekrar azalmaya başladığı görülmektedir. Rezervuarın boş olması durumuna göre oluşan maksimum farkın 78m su seviyesi için beşinci modda %15 olarak elde edildiği görülmüştür.
- Yusufeli Baraj rezervuarının boş olması durumu için sayısal olarak elde edilen ilk altı doğal frekans değeri 1,9095-5,0293Hz aralığında değişmektedir. Deneysel sonuçlara göre maksimum fark %3 oranında altıncı modda oluştuğu görülmüştür.
- Westergaard yaklaşımına göre modellenen sonlu eleman modelin modal analizi sonucu, değişen rezervuar su seviyelerine göre elde edilen sayısal frekans değerleri ise şu şekildedir: 15m su seviyesinde 1,9093-5,0283 Hz, 36m su seviyesinde 1,9092-5,0266 Hz, 57m su seviyesinde 1,9086-5,0222 Hz, 78m su seviyesinde 1,9060-5,0088 Hz, 99m su seviyesinde 1,8988-4,9781 Hz, 126m su seviyesinde 1,8778-4,9624 Hz, 150m su seviyesinde 1,8164-4,8732 Hz ve 172m su seviyesinde 1,7005-4,600 Hz. Tüm su seviyelerinde elde edilen sayısal frekans değerlerinin deneysel sonuçlara göre değişimleri benzer eğilim göstermekte olup, bu frekans değerleri arasındaki maksimum farklar artan su seviyesine göre sırayla %7, %9, %11, %8, %9, %9, %11 ve %11 olarak elde edilmiştir.
- Euler yaklaşımına göre modellenen sonlu eleman modelin modal analizi sonucu, değişen rezervuar su seviyelerine göre elde edilen sayısal frekans değerleri ise şu şekildedir: 15m su seviyesinde 1,9095-5,0279 Hz, 36m su seviyesinde 1,9094-5,0271 Hz, 57m su seviyesinde 1,9092-5,0225 Hz, 78m su seviyesinde 1,9084-5,0295 Hz, 99m su seviyesinde 1,9058-5,0269 Hz, 126m su seviyesinde 1,8945-5,0075 Hz, 150m su seviyesinde 1,8651-4,8629 Hz ve 172m su seviyesinde 1,8066-

4,9656 Hz. Tüm su seviyelerinde elde edilen sayısal frekans değerlerinin deneysel sonuçlara göre değişimleri benzer eğilim göstermekte olup, bu frekans değerleri arasındaki maksimum farklar artan su seviyesine göre sırayla %7, %10, %11, %8, %10, %9, %11 ve %3 olarak elde edilmiştir.

- Lagrange yaklaşımına göre modellenen sonlu eleman modelin modal analizi sonucu, değişen rezervuar su seviyelerine göre elde edilen sayısal frekans değerleri ise şu şekildedir: 15m su seviyesinde 1,9125-5,0339 Hz, 36m su seviyesinde 1,9119-5,0249 Hz, 57m su seviyesinde 1,9101-5,0196 Hz, 78m su seviyesinde 1,9053-5,0351 Hz, 99m su seviyesinde 1,8938-5,0387 Hz, 126m su seviyesinde 1,8563-4,9632 Hz, 150m su seviyesinde 1,7835-4,9573 Hz ve 172m su seviyesinde 1,6742-4,7358 Hz. Tüm su seviyelerinde elde edilen sayısal frekans değerlerinin deneysel sonuçlara göre değişimleri benzer eğilim göstermekte olup, bu frekans değerleri arasındaki maksimum farklar artan su seviyesine göre sırayla %7, %10, %11, %8, %9, %6, %11 ve %13 olarak elde edilmiştir.
- Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına ait elde edilen frekans değerlerinin deneysel sonuçlara oranlanması ile elde edilen maksimum farklar en fazla %13 seviyesinde olup genellikle yüksek modlarda oluşmuştur. Üç farklı yaklaşıma ait ilk üç ve dördüncü modların frekans değerlerindeki değişim incelendiğinde genellikle 99m lik su seviyesine kadar aynı modlarda benzer hata oranlarının elde edildiği görülmüştür. 99m'lik su seviyesinden itibaren elde edilen hata oranlarının Euler yaklaşımına ait sonlu eleman modellerde daha az olduğu görülmüştür. Westergaard ve Lagrange arasında ise belirgin bir fark olmadığı hata oranların benzer modlarda yakın olduğu görülmüştür. Her üç yaklaşıma ait modal analiz sonuçları incelendiğinde Euler yaklaşımına ait sonuçların deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu açıkça söylenebilir.
- Su seviyesindeki değişimin deneysel ve numerik yöntemlere göre elde edilen frekans değerlerine etkisinin daha detaylı incelenmesi amacıyla ilk üç modun ayrı ayrı su seviyesine göre değişimleri incelenmiştir. Deneysel sonuçların değişen su seviyelerinde ilk üç mod için 50m'lik su seviyesine kadar azalan eğilimde olduğu ardından 130m'ye kadar değişen su seviyesi ile frekans değerlerinin arttığı daha sonra maksimum su seviyesine ulaşana kadar tekrar azaldığı görülmektedir. Ancak sayısal analizlerde her üç yaklaşıma ait sonuçların benzer eğilimde olduğu yaklaşık

90m'lik su seviyesine kadar değişimin çok az olduğu sonrasında ise artan su seviyesi ile frekansların azalmaya başladığı görülmektedir.

- Numerik analizlerde rezervuar suyunun modellenmesi amacıyla kullanılan her üç yaklaşım kendi içerisinde kabulleri olan formüllerle temsil edilmektedir. Ayrıca deneysel sonuçların elde edilmesi süreci yaklaşık bir yıllık bir süreci kapsamakta olup, özellikle hava ve rezervuar su sıcaklığının değişimi ve diğer çevresel koşullar sayısal analizlerde dikkate alınamadığı için ekstra farklılıkların oluşması olağan kabul edilmektedir. Deneysel frekans değerlerindeki değişim su seviyesi ve sıcaklık değişimlerinin yanı sıra baraj gövdesinin eğrilikli yapısının yükleme etkisi ile değişmesinden kaynaklı ekstra etkilere de maruz kalmaktadır. Baraj gövdesi düşeyde büzülme derzlerine sahip olacak şekilde inşa edilmiş olup, bu derzler yükleme etkisi ile belirli sınırlar içerisinde açılıp kapanabilme hareketi gösterebilmektedir. Derzlerin açılması durumunda gövdenin rijitliğinde azalma olması ile frekans değerlerinde düşüş, derzlerin sıkışarak kapalı konuma gelmesi ile gövde rijitliğinin artması ile frekans değerlerinde yükseliş görülmesi literatürde kabul gören bir gerçektir.
- Deriner barajının Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modelinin statik analizi sonucu II-II kesiti boyunca Westergaard yaklaşımına ait durumda yer değiştirme baraj yamaçlarında minimum değerde iken barajın çeyrek bölgesine denk gelen kısımlarda maksimum değerlere (4,57 cm) ulaşmış, kretin tam ortasında kadar azalma eğiliminde olduğu, Lagrange yaklaşımına ait modelde ise yer değiştirme değerlerinin yamaçtan itibaren kret orta bölgesine doğru artış eğiliminde olduğu görülmekte olup maksimum 3,24 cm'dir. I-I kesiti boyunca ise her iki yaklaşımda da temelde minimum olan yer değiştirme değerlerinin gövde yüksekliği arttıkça artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Maksimum değerler Westergaard için 1,71cm, Lagrange için 3,22 cm olarak elde edilmiştir.
- Deriner Barajı'nın statik analizi sonucu I-I kesiti boyunca maksimum asal gerilmelerinin Westergaard yaklaşımına ait modelde baraj yüksekliği boyunca genellikle arttığı, kretten yaklaşık 10 m aşağıda en büyük değeri aldığı ve krette ise biraz azaldığı görülmektedir. Lagrange yaklaşımına ait analiz sonuçlarında ise seçilen kesit boyunca önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. II-II kesitinde ise Westergaard yaklaşımına göre maksimum asal gerilmeler yamaçtan

baraj gövdesine doğru ilk 100 m'lik mesafede artmakta; 100 m'den sonra azalmaya başlayarak 150 m'den itibaren sabitlenmekte ve 210 m'den itibaren kretin orta bölgesine kadar tekrar artış eğilimi göstermektedir. Lagrange yaklaşımına göre ise seçilen kesit boyunca maksimum asal gerilmelerin değişmediği görülmektedir.

- Deriner Barajı'nın statik analizi sonucu I-I kesiti boyunca minimum asal gerilmeler incelendiğinde iki yönteme ait sonuçların tam tersi bir davranış gösterdiği, zeminden itibaren kesit boyunca Westergaard yaklaşımına göre ilk 65m ye kadar gerilmelerin arttığı ardından azalmaya başlayarak 130 m yüksekliğinde minimum değere ulaştığı ve ardından tekrar artmaya başladığı görülmektedir. Lagrange yaklaşımına göre ise ilk 65m ye kadar gerilmelerin azaldığı ardından artmaya başlayarak 130 m yüksekliğinde maksimum değere ulaştığı ve ardından tekrar azalmaya başlamaktadır. II-II kesitinde ise Westergaard yaklaşımına ait modelde minimum asal gerilmeler yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 144 m'lik mesafede sabit devam etmekte; 144 m'den 180 m'ye kadar hızla artmakta ve ardından azalma eğilimine girerek kret orta bölgesinde sabit kalmaktadır. Lagrange yaklaşımına göre minimum asal gerilmelerin yamaçtan itibaren kret orta bölgesine doğru azalan bir eğilimde devam edip minimum değere ulaştığı görülmektedir.
- Deriner barajının Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modelinin dinamik analizleri sonucu II-II kesiti boyunca her üç yaklaşıma ait analizler sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri benzer eğilimde değişmekte olup, Westergaard yaklaşımına ait yer değiştirme değerlerinin daha büyük olduğu, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. I-I kesiti boyunca ise her üç yaklaşımda da temelde minimum olan yer değiştirme değerlerinin gövde yüksekliği boyunca arttığı, Westergaard yaklaşımına ait yer değiştirme değerlerinin diğer iki yaklaşıma göre daha büyük olduğu belirlenmiştir.
- Deriner barajının her üç yaklaşıma göre dinamik analizlerinden elde edilen maksimum asal gerilmeler I-I kesiti boyunca benzer eğilimde davranış göstermekte ve gövde yüksekliği boyunca artmaktadır. Lagrange yaklaşımına ait maksimum asal gerilmelerin diğer iki yaklaşımdan elde edilen sonuçlara göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. II-II kesiti boyunca ise maksimum asal gerilmeler yamaçtan itibaren kretin orta bölgesine kadar artmakta; Orta bölgeyi geçtikten sonra azalmaya başlamakta ve yamaçtan itibaren yaklaşık 500 m'de minimum değere ulaşp

yeniden artmaya başlamaktadır. Maksimum asal gerilmeler 600 m’de yeniden maksimum noktaya ulaştıktan sonra yamaca kadar azalma eğilimine devam etmektedir. Her üç yaklaşımda benzer davranışı göstermekte olup, kret ortasında maksimum asal gerilme Euler yaklaşımında oluşurken bir sonraki oluşan maksimum değer Westergaard yaklaşımında elde edilmiştir.

- Deriner barajının her üç yaklaşıma göre dinamik analizlerinden elde edilen minimum asal gerilmeler I-I kesiti boyunca benzer eğilimde hareket ettiği ancak Euler yaklaşımına ait sonuçların diğer iki yaklaşıma ait sonuçlara göre daha düşük olduğu ve minimum asal gerilmenin Euler yaklaşımına ait modelde olduğu görülmektedir. II-II kesiti boyunca oluşan minimum asal gerilmeler ise maksimum asal gerilmelere benzer eğilimde olup, negatif değerli halidir. Burada farklı olarak Westergaard yaklaşımında ilk 150 m’lik mesafede minimum asal gerilmelerin olduğu ardından kret boyunca ilerledikçe diğer yaklaşımlarla benzer eğilimde devam ettiği görülmektedir.
- Yusufeli barajının Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre sekiz farklı su seviyesi durumu için oluşturulan baraj-rezervuar-temel modellerinin statik analizi sonucu I-I ve II-II kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirme değerleri, rezervuarın boş olması durumunda minimum değerde iken, rezervuar su seviyesi arttıkça arttığı gözlemlenmiştir.
- Yusufeli barajının Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına göre sekiz farklı su seviyesi durumu için oluşturulan baraj-rezervuar-temel modellerinin statik analizi sonucu, maksimum asal gerilmelerin I-I kesitinde baraj yüksekliği boyunca genellikle arttığı, talvegden yaklaşık 120 m yüksekliğinde en büyük değeri aldığı ve krette ise biraz azaldığı görülmektedir. II-II kesiti boyunca ise maksimum asal gerilmeler yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 150 m’lik mesafede artmakta; 150 m’den 300 m’ye kadar sabit değerde devam edip sonrasında tekrar azalmaya başlamaktadır.
- Yusufeli barajının Westergaard yaklaşımına göre sekiz farklı su seviyesi durumu için oluşturulan baraj-rezervuar-temel modellerinin statik analizi sonucu, minimum asal gerilmelerin I-I kesitinde baraj yüksekliği boyunca genellikle azaldığı, talvegden yaklaşık 120 m yüksekliğinde en küçük değeri aldığı ve krette ise biraz arttığı görülmektedir. II-II kesiti boyunca ise minimum asal gerilmeler yamaçtan baraj gövdesine doğru ilk 150 m’lik mesafede sabit devam etmekte; 150 m’den 250

m'ye kadar hızla artmakta ve anahtar kesitte maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başlamaktadır.

- Yusufeli barajının Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan baraj-rezervuar-temel modelinin dinamik analizleri sonucu II-II kesiti boyunca her üç yaklaşıma ait analizler sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri incelenmiştir. II-II kesiti boyunca her üç yaklaşım için ilk 78 m'lik su seviyesine kadar barajın kret boyunca yer değiştirme değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. 99 m'lik su seviyesinde ise Lagrange yaklaşımına ait sonuçların kret orta bölgesinde diğer iki yöntemle göre biraz daha fazla olduğu görülmektedir. 150 m'den itibaren ise Euler ve Lagrange yaklaşımına ait sonuçların benzer eğilimde devam ettiği, Westergaard yaklaşımına ait sonuçların daha fazla arttığı ve eğiliminin değiştiği gözlemlenmektedir. 172 m'lik maksimum su seviyesinde yer değiştirme değerlerinin en yüksek 25,31cm ile Westergaard, 15,32 cm ile Lagrange ve en düşük değer olan 15,30cm Euler yaklaşımından elde edildiği görülmektedir. Westergaard yaklaşımına göre elde edilen yer değiştirme değerinin Euler yaklaşımından elde edilen değere göre yaklaşık %65 daha fazla olduğu hesaplanmıştır.
- Yusufeli barajının her üç yaklaşıma göre dinamik analizlerinden elde edilen maksimum asal gerilmeler II-II kesiti boyunca barajın kret eksenini doğrultusunda her üç yaklaşım için ilk 99 m'lik su seviyesine kadar neredeyse aynı olduğu görülmüştür. 126 m'lik su seviyesinden itibaren ise yaklaşımlara ait sonuçların aynı eğilimde devam ettiği ancak değerler arasındaki farkların artmaya başladığı görülmekte olup, maksimum su seviyesi olan 172 m'de maksimum asal gerilmeler oluşmaktadır. Yaklaşımlara ait en yüksek maksimum asal gerilmeler 24,06 MPa ile Westergaard, 16,35 MPa ile Euler ve en düşük değer olan 13,88 MPa Lagrange yaklaşımına göre elde edilmektedir. Westergaard yaklaşımına göre elde edilen maksimum asal gerilme değerinin Lagrange yaklaşımından elde edilen değere göre yaklaşık %73 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Yusufeli barajının her üç yaklaşıma göre dinamik analizlerinden elde edilen minimum asal gerilmeler II-II kesiti boyunca barajın kret eksenini doğrultusunda her üç yaklaşım için ilk 78 m'lik su seviyesine kadar neredeyse aynı olduğu görülmüştür. 99 m'lik su seviyesinde ise yaklaşımlara ait sonuçların aynı eğilimde devam ettiği ancak değerler arasındaki farklılıkların artmaya başladığı görülmekte

olup, minimum asal gerilme değerleri Westergaard yaklaşımında oluşmakta diğer iki yaklaşımlara ait sonuçlar birbirine yakın değerlerdedir. 126 m'lik su seviyesinden itibaren her üç yaklaşıma ait sonuçlar arasındaki farklar açılmaktadır. 172 m'lik maksimum su seviyesinde minimum asal gerilme değerlerinin mutlak değerce en yüksek 20,26 MPa ile Westergaard, 18,37 MPa ile Lagrange ve en düşük değer olan 16,18 MPa Euler yaklaşımından elde edildiği görülmektedir. Westergaard yaklaşımına göre elde edilen minimum asal gerilme değerinin Euler yaklaşımından elde edilen değere göre yaklaşık %25 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

- Yapılan modal, statik ve dinamik analizler sonucu her üç yaklaşıma ait farklı su seviyeleri için elde edilen yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilmeler değerlendirilmiştir. Modal analiz sonuçlarında genel anlamda frekans değerlerinin yakın olduğu ve Euler yaklaşımına ait sonuçların deneysel sonuçlarla daha iyi örtüştüğü, Westergaard ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonuçlarının ise neredeyse çok yakın olduğu görülmüştür. Ancak değişen su seviyeleri durumunda yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilme değerleri karşılaştırıldığında genellikle 99m'lik rezervuar su seviyesine kadar her üç yaklaşıma ait sonuçlar birbirine çok yakın olsa da su seviyesinin daha da artması ile ise Euler ve Lagrange yaklaşımlarına ait sonuçların birbirine genellikle benzer ve yakın değerlerde olduğu, Westergaard yaklaşımına ait sonuçların ise bu iki yaklaşıma oranla daha çok daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.
- Bu çerçevede, yapılan tüm analizlere ait sonuçlar toplu bir şekilde değerlendirildiğinde modal analiz sonuçlarında Westergaard yaklaşımı her ne kadar diğer iki yöntemle uyumlu sonuçlar verse de yer değiştirme ve asal gerilmelere ait sonuçların diğer iki yöntemden elde edilen sonuçlara göre oldukça yüksek olması barajının yapısal durumunun belirlenmesi hususunda yanlış bir değerlendirme yapılmasına sebebiyet verebilir.
- Uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları kapsamında Türkiye'nin en yüksek ikinci kemer barajı olan Deriner Barajı'nın değişen mevsim koşulları altında yapısal durumunun belirlenmesi amacıyla baraj gövdesine yerleştirilen hassas ivmeölçerlerden toplanan ham sinyallerin işlenerek dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Barajın dinamik karakteristiklerinin dikkate alındığı zaman aralığına ait sıcaklık ve rezervuar su seviyelerinin elde edilmesi ile bu parametrelerin

dinamik karakteristikler üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışması yürütülmüştür.

- Uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme çalışmaları kapsamında Türkiye'nin en yüksek barajı olan Yusufeli Barajı'nda ise baraj inşasının tamamlanmasının ardından rezervuarın su tutma süreci başlamadan önce hassas ivmeölçerler baraj gövdesine yerleştirilerek uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme Süreci başlamıştır. Tez kapsamında baraj rezervuarının tamamen su ile dolma süreci izlenmiş olup, günlük olarak işlenen ivme verilerinden dinamik karakteristiklerin zamana, değişen su seviyesine ve sıcaklık değerlerine göre değişimi incelenmiştir.
- Deriner ve Yusufeli Barajlarının değişen rezervuar su yüksekliği ve sıcaklık değerlerine göre frekans değerlerinin alabileceği değerlerin tahmin edilerek frekans haritası oluşturmak amacıyla uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme verileri Yapay Sinir Ağı ile eğitilerek tahmini frekans değerleri elde edilmiştir. Deriner Barajı için ilk dört, Yusufeli Barajı içinse ilk altı moda ait frekans değerlerinin elde edilmesi için Yapay Sinir Ağı modelleri oluşturularak analizler yürütülmüştür. Analizler sonucu elde edilen Ortalama Kare Hata (MSE) ve R değerleri Yapay Sinir Ağı modellerinin mevcut duruma iyi adapte olabildiğini ve gelecek durum tahminleri için başarılı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak Deriner ve Yusufeli Kemer Barajları üzerinde gerçekleştirilen detaylı deneysel modal analiz testleri mühendislik dünyasında önemli bir adımı temsil etmektedir. Bu testler, barajların yapısal durumunu değerlendirmek ve olası riskleri önceden belirleyerek müdahale imkanı sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, deneysel veriler referans alınarak güncellenmiş sonlu eleman modeller kullanılarak yapılan dinamik analizler barajların deprem performansının belirlenmesi hususunda önem arz etmektedir.

Deriner ve Yusufeli Barajında kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilen uzun süreli izleme ve değerlendirme süreci, mühendislik alanındaki en son gelişmeleri takip ederek, olası risklere karşı proaktif bir yaklaşım benimsemektedir. Bu sayede baraj hem enerji üretimindeki etkinliğini sürdürmekte hem de uzun vadeli güvenlik standartlarına uygun bir şekilde izlenmektedir. Özellikle literatür çalışmaları incelendiğinde rezervuarın boş olması durumunu dikkate alan çalışmalara rastlanılmamış olup, rezervuar su tutma süreci boyunca barajın yapısal değişimini inceleyen çalışmaların ise çok sınırlı olması bu tez çalışmasının özgün değerini ortaya koymaktadır.

4. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Yapı Sağlığı İzleme kapsamında barajların günlük olarak belirlenen dinamik davranışlarının izlenmesi sürecine bu tezin tamamlanmasının ardından devam edilecek olup, tez kapsamında belirlenen sıcaklık ve su seviyesindeki değişimlere bağlı sonuçların toplanan daha fazla veri ile uyumu, kontrol edilecektir.
- Uzun süreli izlemeye bağlı elde edilen baraj verileri ileride yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi ve uygulanması hususunda önemli bir veri seti niteliği taşıyacaktır.
- Barajların inşasında dikkate alınan düşey büzülme derzlerinin dinamik karakteristikler, statik ve dinamik davranışlar üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla çalışmalar yürütülebilir.
- Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre modellenen Yusufeli Barajı'nda değişen su seviyelerine bağlı olarak üç yöntemle göre yer değiştirme, maksimum ve minimum asal gerilmeler elde edilmiş ve yaklaşık 99m'lik su seviyesine kadar sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu 99m'den sonraki su seviyelerinde ise yöntemlere ait sonuçlar arasında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Üç yöntemle göre sonuçların değişmediği maksimum su seviyesi genelleştirilebilir mi sorunun cevabı için aynı analizlerin farklı gövde yüksekliğine (100m, 150m 200m vb.) sahip kemer barajlarda gerçekleştirilmesi ve üç yöntemle ait sonuçların hangi su seviyesinden itibaren değiştiğinin tespit edilmesi ile gövde yüksekliğine bağlı bir oran belirlenebilir.
- Tez kapsamında dinamik analizler lineer olarak gerçekleştirilmiştir, lineer olmayan dinamik analizlerin gerçekleştirilerek elde edilen sonuçların lineer analiz sonuçları ile karşılaştırılması ile ilgili çalışmalar yapılabilir.
- Barajların bulunduğu vadide heyelan veya taş düşmesi gibi olaylar yaşanması durumunda rezervuar suyunun yükselmesi, dalgalanması ya da suyun taşması durumunu simüle ederek baraj gövdesine etkisini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Ağralioğlu, N. (2011). *Baraj Güvenliği*, Beta Yayınları, İstanbul.
- Ahmadi, M. T., Izadinia, M. & Bachmann, H. (2001). A Discrete Crack Joint Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Arch Dam, *Computers and Structures*, 79, 403-420.
- Akbari, M., Hariri-Ardebili, M. A. & Mirzabozorg, H. (2013). Nonlinear Response of High Arch Dam to Nonuniform Seismic Excitation Considering Joint Effects, *Journal of Engineering*, 2013, 1-6.
- Akköse, M. & Dumanoglu, A. A. (2003). Su Sıkışabilirlik Etkisi Dikkate Alınarak Kemer Baraj-Rezervuar-Zemin Sistemlerinin Deprem Davranışının İncelenmesi. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, Bildiriler Kitabı, AT-010, İstanbul, Türkiye.
- Akköse, M., Adanur, S., Bayraktar, A. & Dumanoglu, A. A. (2007). Elasto-Plastic Earthquake Response of Arch Dams Including Fluid-Structure Interaction by the Lagrangian Approach, *Applied Mathematical Modelling*, 32, 2396-2412.
- Akköse, M., Bayraktar, A. & Dumanoglu, A. A. (2008). Reservoir Water Level Effects on Nonlinear Dynamic Response of Arch Dams, *Journal of Fluids and Structures*, 24, 418-435.
- Akköse, M., Dumanoglu, A. A. & Tuna, M. E. (2004). Investigation of Hydrodynamic Effects on Linear and Nonlinear Earthquake Responses of Arch Dams by the Lagrangian Approach, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 28, 25-40.
- Alçay, S. (2014). Beton Kemer Barajlardaki Deformasyonların Jeodezik ve Geoteknik Yöntemlerle İzlenmesi ve Ermenek Barajı Örneği. Selçuk Üniversitesi, Doktora Tezi, Konya.
- Alves, S. W. & Hall, J. F. (2006a). Generation of Spatially Nonuniform Ground Motion for Nonlinear Analysis of a Concrete Arch Dam, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 1339-1357.
- ANSYS Inc. (2017). *ANSYS Mechanical APDL Material Reference Release 18.2.*, Canonsburg, PA.
- Başbolat, E. E. (2022). *Beton Kemer Barajların Sismik Kırılabilirlik Eğrilerinin Oluşturulması*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

- Boscato, G., Fragonara, L. Z., Cecchi, A., Reccia, E. & Baraldi, D. (2019). Structural Health Monitoring through Vibration-Based Approaches. *Shock and Vibration Volume*, 2380616, 5.
- Brincker, R., Ventura, C. E. & Andersen, P. (2003). Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, *Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics*, Kissimmee, Orlando, USA.
- Camara, R. J. (2000). A Method for Coupled Arch Dam-Foundation-Reservoir Seismic Behaviour Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 441-460.
- Chanson, H. & James, P. (1998). Rapid Reservoir Sedimentation of Four Historic Thin Arch Dams in Australia. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 12(2), 85-92.
- Chen, D. H., Du, C. B., Yuan, J. W. & Hong, Y. W. (2012). An Investigation into the Influence of Damping on the Earthquake Response Analysis of a High Arch Dam, *Journal of Earthquake Engineering*, 16, 329-349.
- Chen, S. H., Xu, M. Y., Shahrou, I. & Egger, P. (2003). Analysis of Arch Dams using Coupled Trial Load and Block Element Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 129, 977-986.
- Chopra, A. K. (2006). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- Chouinard, L. E., Bennett, D. W. & Feknous, N. (1995). Statistical Analysis of Monitoring Data for Concrete Arch Dams, *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, 9, 286-301.
- Clough, R. W. (1980). Non-linear Mechanisms in the Seismic Response of Arch Dams, *Proceedings of the International Research Conference on Earthquake Engineering*, 669, Skopje, Yugoslavia.
- Darbre, G. R. (1995). Strong-Motion Instrumentation of Dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 1101-1111.
- Darbre, G. R., Smet, C. A. & M., Kraemer, C. (2000). Natural Frequencies Measured from Ambient Vibration Response of the Arch Dam of Mauvoisin, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 577-586.
- Debessay, M. (1989). Random Dynamic Interaction Arch Dam-Reservoir-Foundation System. Deleware Üniversitesi, Doktora Tezi, Newark, USA.
- Dominguez, J. & Maeso, O. (1993a). Earthquake Analysis of Arch Dams I: Dam-Water-Foundation Interaction. *Journal of Engineering Mechanics*, 119, 496-512.
- Dominguez, J. & Maeso, O. (1993b). Earthquake Analysis of Arch Dams II: Dam-Water-Foundation Interaction. *Journal of Engineering Mechanics*, 119, 513-530.

- Dowling M. J. (1988). *Nonlinear Seismic Analysis of Arch Dams*. California Institute of Technology Pasadena, Doktora Tezi, USA.
- Dungar, R. (1978). An Efficient Method of Fluid-Structures Coupling in the Dynamic Analysis of Structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 13, 93-107.
- Duran, U. (2022). Kemer barajların farklı su seviyeleri dikkate alınarak dinamik analizi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Elkhodary, M. A. (1984). *Boundary Element Analysis of Hydrodynamic Pressure on Arch Dams*, Carleton Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Canada.
- Erguvanlı, K., Yüzer, E. & Vardar, M. (2016). *Mühendislik Jeolojisi*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Afşaroğlu Matbaası, ss.589, Maslak, İstanbul.
- Feng, L. M., Pekau, O. A. & Zhang, C. H. (1996). Cracking Analysis of Arch Dams by 3D Boundary Element Method. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 122(6), 691-699.
- Fiorino, G., Mitri, C., Rajab, A. & Patra, B. K. (2022). Structural Health Monitoring of Dams, *SHMII-11: 11th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Montreal, QC, Kanada.
- Fok, K. L. & Chopra, A. K. (1985). *Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams*. Earthquake Engineering Research Center, Rapor No: UCB/EERC-85/07, California Üniversitesi, Berkeley, USA.
- Fok, K. L. & Chopra, A. K. (1986). Earthquake Analysis of Concrete Arch Dams Including Dam-Water Interaction, Reservoir Boundary Absorption and Foundation Flexibility, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 114, 155-184.
- Freymann, R., Honsberg, W., Winter, F. & Steinbichler, H. (1996). *Holographie Modal Analysis*. Laser in Research and Engineering, Springer, 530-542, Berlin, Heidelberg.
- Garcia-Palacios, J. H., Soria, J. M., Diaz, I. M. & Tirado-Andrés, F. (2016) Ambient Modal Testing of a Double-Arch Dam: the Experimental Campaign and Model Updating. *Journal of Physics: Conference Series*, 744.
- Gedik, N. (2013). *Su Yapıları Ders Notu [Online]*, Balıkesir Üniversitesi, Müh-Mim. Fakültesi, <http://insaat.balikesir.edu.tr/dokumanlar/suyapilari/barajlar.pdf>.
- Ghanaat, Y., Clough, R. W. & Redpath, B. B. (1992). Experimental Study of Dam-Water-Foundation Interaction. *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Spain.
- Giahi, A. M., Marnani, J. A., Rohanimanesh, M. S. & Ahmadi, H. (2023). Structural Health Monitoring of Concrete Arch Dams using the Wavelet Transform and Modal Assurance Criterion Methods. *International Journal of Science & Technology*, doi: 10.24200/SCI.2023.60688.6938

- Giroux, R. (2010). Building Hoover Dam (Men, Machines, and Methods), 360-410. [https://doi.org/10.1061/41141\(390\)20](https://doi.org/10.1061/41141(390)20).
- Goodman, R. E., ASCE, M. & Powell, C. (2003). Investigations of Blocks in Foundations and Abutments of Concrete Dams. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129, 105-116.
- Hall, J. F. & Chopra, A. K. (1980). *Dynamic Response of Embankment, Concrete-Gravity and Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction*. Earthquake Engineering Research Center, Rapor No. UCB/EERC-80/39, California Üniversitesi, Berkeley, USA.
- Hall, J. F. & Chopra, A. K. (1983). Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 109(1), 149-167.
- Hall, J. F. (1998). Efficient Non-Linear Seismic Analysis of Arch Dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 1425-1444.
- Hariri Ardebili, M. A. & Mirzabozorg, H. (2012a). Effects of Near-Fault Ground Motions in Seismic Performance Evaluation of a Symmetric Arch Dam. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 49(5), 192-199.
- Hariri Ardebili, M. A. & Mirzabozorg, H. (2012b). Seismic Performance Evaluation and Analysis of Major Arch Dams Considering Material and Joint Nonlinearity Effects. *International Scholarly Research Network Civil Engineering*, 1-10.
- Hariri Ardebili, M. A. & Kianoush, M. R. (2014). Integrative Seismic Safety Evaluation of a High Concrete Arch Dam, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 85-101.
- Hariri Ardebili, M. A. & Kianoush, M. R. (2015). Seismic Analysis of a Coupled Dam-Reservoir-Foundation System Considering Pressure Effects at Opened Joints, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(7), 833-850.
- Hariri Ardebili, M. A., Furgani, L., Meghella, M. & Saouma, V. E. (2016). A New Class of Seismic Damage and Performance Indices for Arch Dams via ETA Method, *Engineering Structures*, 110, 145-160.
- Hariri Ardebili, M. A., Mirzabozorg, H. & Kianoush, M. R. (2014). Structural Safety of High Arch Dams with Variable Water Levels Based on Seismic Performance Evaluation, *IJST, Transactions of Civil Engineering*, 38, C1, 175-190.
- Hariri Ardebili, M. E. & Mirzabozorg, H. (2011). *Reservoir Fluctuation Effects on Seismic Response of High Concrete Arch Dams Considering Material Nonlinearity*. Journal of Civil Engineering Research, Cilt 1,1, 9-20.
- Hassan, N. H., Zawawi, M. H., Mazlan, A.Z.A., Abas, M. A., Zainol, M. R. R. M. A., Radzi, M. R. M. & Kamaruddin, M. A. (2024). Experimental Modal Analysis and Operational Deflection Shape Analysis for Kenyir Dam Spillway Physical Model, *Proceedings of AWAM International Conference on Civil Engineering*, Springer, 3, Singapur.

- Kalkan Okur, E., Altunışık, A. C. & Okur, F. Y. (2023). Obtaining the Natural Frequencies of Yusufeli Arch Dam under Different Water Levels with the Westergaard Method. *3rd International Civil Engineering and Architecture Conference*, Trabzon, Türkiye.
- Karaton, M. (2004). *Sıvı-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Kemer Barajların Dinamik Hasar Analizi*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Kottenstette, J. T. (1997). Block Theory Techniques Used in Arch Dam Foundation Stability Analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 3-4.
- Lan, S. & Yang, J. (1997a). Nonlinear Finite Element Analysis of Arch Dam-I: Constitutive Relationship. *Advances in Engineering Software*, 28, 403-408.
- Lan, S. & Yang, J. (1997b). Nonlinear Finite Element Analysis of Arch Dam-II. Nonlinear Analysis. *Advances in Engineering Software*, 28, 409-415.
- Lei, Y., Liu, C. H., Wu, D. T., Tang, Y. L., Wang, J. X., Wu, L. J. & Jiang, X. D. (2009). A New Type of Intelligent Wireless Sensing Network for Health Monitoring of Large-Size Structures, *Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, 74930H, Weihai, China.
- Lemos, J. V., Gomes, J. P. & Pereira, S. (2019). Modelling Dam-Water Dynamic Interaction, Numerical Options and Experimental Validation. *7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis*, Crete, Greece.
- Lemos, J. V., Oliveira, S. & Mendes, P. (2008). Analysis of the Dynamic Behavior of Cabril Dam Considering the Influence of Contraction Joints. *7th European Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2008*, Southampton, England.
- Lew, J. S. & Loh, C. H. (2013). Modeling of an Arch Dam Long-Term Static Deformation for Structural Health Monitoring. *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Boston, Massachusetts.
- Li, S., Chen, Y., Li, J. & Yang, J. (2000). The New Method of Arch Dam Stress Calculation and the Application of GTSTRUDL CAE/CAD System, *Advances in Engineering Software*, 31, 303-307.
- Liang, C., Chen, J., Xu, Q. & Li, J. (2021). Correlation Study between Seismic Intensity Measures and Nonlinear Response of Arch Dam via Endurance Time Analysis, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(1), 256-271.
- Loh, C. H., Weng, J. H., Chen, C. & Chang, Y.W. (2011). Feature Extraction within the Fei-Tsui Arch Dam under Environmental Variations. *Solid Mechanics and its Applications*, 29, 45-54.
- Long, Y., Zhang, C. & Jin, F. (2008). Numerical Simulation of Reinforcement Strengthening for High-Arch Dams to Resist Strong Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 1739-1761.

- Lotfi, V. & Espandar, R. (2002). An Investigation of Joints Behavior in Seismic Response of Arch Dams, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 1, 17-31.
- Lu, K. C., Loh, C. H. & Weng, J. H. (2010). Development of Smart Sensing System for Structural Health Monitoring. *Proc. SPIE 7647, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 76470G.
- Maeso, O. ve Dominguez, J., 1993. Earthquake Analysis of Arch Dams.I: Dam-Foundation Interaction. *Journal of Engineering Mechanics*, 119, 496-512.
- Malla, S. & Wieland, M. (1999). Analysis of an Arch-Gravity Dam with a Horizontal Crack, *Computers and Structures*, 72, 267-278.
- MathWorks, Inc. (2018). *MATLAB: The language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 9*. MathWorks.
- Matthew, R. (2005). Dams and Development: Transnational Struggles for Water and Power (Review). *Global Environmental Politics*, 5, 131-133.
- Miglietta, L. (1995). *Experimental Modal Analysis on the Supporting Structure of the Secondary Mirror of the Binocular Telescope*, Large Binocular Telescope Project, Florence, Italy.
- Mironov, V. & Pahl, P. J. (2004). A Prismatic Finite Element for Accurate Arch Dam Analysis, *International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Weimar.
- Mirzabozorg, H. & Ghaemian, M. (2005). Non-linear Behavior of Mass Concrete in Three-Dimensional Problems using a Smeared Crack Approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 247–269.
- Mivehchi, M. R., Ahmadi, M. T. & Hajmomeni, A. (2003). Effective Techniques for Arch Dam Ambient Vibration Test: Application on Two Iranian Dams. *JSEE: Summer*, 5, 2, 23-34.
- Mizuno, M. & Hirose, T. (2009). Instrumentation and Monitoring of Dams and Reservoirs. *WaterStorage, Transport, and Distribution*, 253.
- Monteiro, G. S., Neves, J. P. & Gomes, J. P. (2020). Seismic Monitoring System of Baixo Sabor and Feiticeiro Dams, *Civil Engineering Journal*, 6(11),
- Narayan, P., Patra, B. K. & Choudhary, R. (2018). Instrumented Health Monitoring of Dams Based on Potential Failure Mode Analysis. *International Dam Safety Conference*, 177-1157, Kerala.
- Nasserzarea, J., Leib, Y. & Eskandari-Shiria, S. (2000). Computation of Natural Frequencies and Mode Shapes of Arch Dams as an Inverse Problem, *Advances in Engineering Software*, 31, 827-836.

- Noor, A. Z. M., Fauadi, M. H. F. M., Jafar, F. A. & Bakar, M. H. A. (2019). Optimal Number of Hidden Neuron Identification for Sustainable Manufacturing Application. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 8(2).
- Noruziaan, B. (1995). *Nonlinear Seismic Analysis of Concrete Arch Dams*. Sharif University Technology , Doktora Tezi, Iran.
- Novokshchenov, V. (1997). Old Aswan Dam: Standing the Test of Time. *Civil Engineering*, 67.
- Ohmachi, T. & Jalali, A. (1999). Fundamental Study on Near-Field Effects on Earthquake Response of Arch Dams. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 1(1), 1-11
- Okuma, N., Etou, Y., Kanazawa, K. & Hirata, K. (2008). Dynamic properties of a large arch dam after forty-four years of completion. *Paper presented at the The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, Çin.
- Okur, F. Y. (2023). *Mühendislik Yapılarında Hasar Tespiti ve Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzlemesi İçin Geliştirilen Mühendislik Yazılımları*. Karadeniz teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye.
- Oliveira, S. & Alegre, A. (2022). A study on the Influence of the Horizontal Cracking on the Modal Parameters of Cabril Dam. *Experimental and numerical results, 8th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Orlando, Florida, USA
- Oliveira, S. & Faria, R. (2006). Numerical Simulation of Collapse Scenarios in Reduced Scale Tests of Arch Dams. *Engineering Structures*, 28, 1430–1439.
- Oliveira, S., Espada, M. & Camara, R. (2012). Long-term dynamic monitoring of arch dams. The case of Cabril dam, *Portugal. 15 WCEE*, Lisboa.
- OMA (2006). Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- OMA (2023). Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Omidi, O. & Lotfi, V. (2017). A Symmetric Implementation of Pressure-Based Fluid–Structure Interaction for Nonlinear Dynamic Analysis of Arch Dams, *Journal of Fluids and Structures*, 69, 34-55.
- Öziş, Ü. (1993). *Su Yapıları*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh-Mim. Fak., Yayın No: 45, İzmir, Türkiye.
- Pawar, P. M. & Ganguli, R. (2011). Structural Health Monitoring using Genetic Fuzzy Systems. *Springer*, Berlin.
- Pereira, S. B. (2020). Structural Condition Assessment of Dams Based on Continuous Dynamic Monitoring. Porto Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Doktora Tezi, Porto, Portekiz.

- Pereira, S., Magalhaes, F., Gomes, J. P., Cunha, A. & Lemos, J. V. (2018). Dynamic Monitoring of a Concrete Arch Dam During the First Filling of the Reservoir, *Engineering Structures*, 174, 548-560.
- Pourgholi, M., Ghannadi, M. & Gavgani, S. S. (2023). Modal Analysis of Earthquake Records for Dams using Stochastic Subspace Based on Error Analysis. *Engineering Reports*, e12822.
- Priscu, R., Popovici, A., Stematiu, D. & Stere, C. (1985). *Earthquake Engineering for Large Dams*, John and Wiley Sons, USA.
- Ramos, J. L. F. S. (2007). Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, University of Minho, Doktora Tezi, Portugal.
- Sarkar, A., Patra, B., Ghodke, S. & Bagchi, A. (2023). Monitoring the Deformation Pattern of an Instrumented Concrete Arch Dam. Proceedings of the Fourteenth International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Open Acces, ss.3082.
- Schwarz, B. J. & Richardson, M. H. (1999). *Experimental Modal Analysis*, CSI Reliability Week, Orlando, USA.
- Scott, C., Molyneux, J. (2001). Britain's Concrete Dams the Fnal 50 Years?. *Civil Engineering*, 144, 170-180.
- Sevim, B. (2010). *Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye
- Sevim, B., Akköse, M. & Bayraktar, A. (2006). Geometri Değişiminin Kemer Barajların Dinamik Davranışına Etkisi, *Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, İstanbul, Türkiye, (ACE06-479).
- Sevim, B., Altunışık, A. C. & Bayraktar, A. (2012). Experimental Evaluation of Crack Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam using Ambient Vibration Tests. *Computers and Concrete*, 10(3), 277-294.
- Sevim, B., Altunışık, A. C. & Bayraktar, A. (2013). Structural Identification of Concrete Arch Dams by Ambient Vibration Tests. *Advances in Concrete Construction*, 1(3), 227-237.
- Sevim, B., Altunışık, A. C. & Bayraktar, A. (2014). Construction Stages Analyses using Time Dependent Material Properties of Concrete Arch Dams. *Computers and Concrete*, 14(5), 599-612.
- Sevim, B., Altunışık, A. C., Bayraktar, A., Akköse, M. & Calayır, Y. (2011a). Water Length and Height Effects on the Earthquake Behavior of Arch Dam-Reservoir-Foundation Systems. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15, 295-303.
- Sevim, B., Bayraktar, A. & Altunışık, A. C. (2011b). Investigation of Water Length Effects on the Modal Behavior of a Prototype Arch Dam Using Operational and Analytical Modal Analyses. *Structural Engineering and Mechanics*, 37(6), 593-615.

- Sheibany, F. & Ghaemian, M. (2006). Effects of Environmental Action on Thermal Stress Analysis of Karaj Concrete Arch Dam, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 132, 532-544.
- Silva, V. D. & Julio, E. N. S. B. (1997). Computation of Membrane Shapes and Analysis of Arch Dams. *Computers and Structures*, 64, 849-855.
- Sultanbekov, R. R. (2005). Substantiation of the Strength and Stability of Concrete Dams Based on the Solution of a Nonlinear Three-Dimensional Problem, *Power Technology and Engineering*, 39, 42-45.
- Szczesiaka, T., Weberb, B. & Bachmannb H. (1999). Nonuniform Earthquake Input for Arch Dam–Foundation Interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 487–493.
- Tan, H. & Chopra, A. K. (1995). Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 1453-1474.
- Tan, H. & Chopra, A. K. (1996). Dam-Foundation Rock Interaction Effects in Earthquake Response of Arch Dams. *Journal of Structural Engineering*, 122, 528-538.
- Tan, H. (1995). Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams. University of California at Berkeley, Doktora Tezi, USA.
- Tarinejad, R., Fatehi, R. & Harichandran, R. S. (2013). Response of an Arch Dam to Non-Uniform Excitation Generated by a Seismic Wave Scattering Model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 40-54.
- Tung, Y. K. & Yen, B. C. (1993). *Some Recent Progress In Uncertainty Analysis For Hydraulic Design*. Reliability And Uncertainty Analyses In Hydraulic Design, 17, ASCE, New York, USA.
- Tzenkov, A. D. (2001). *Seismic Analysis of Concrete Arch Dams with Contraction Joint and Nonlinear Material Models*. Civil Engineering and Geodesy, University of Architecture, Yüksek Lisans Tezi, Bulgaria.
- URL-1. (2024, Mart 21). Yapay Sinir Ağları: <https://academy.patika.dev/blogs/detail/yapay-sinir-aglariys> adresinden alındı
- USACE (1994). Arch Dam Design, Engineering Manuel. 1110-2-2201, USA.
- USACE (2003). Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures. Engineering and Design, EM 1110-2-6051, USA.
- Üzen, N. & Çetin, Ö. (2012). Geçmişten günümüze su ve sulama yönetimi. *Journal of Life Sciences*, 1(2).
- Valliappan, S., Yazdchi, M. & Khalili, N. (1999). Seismic Analyses of Arch Dams – A Continuum Damage Mechanics Approach, *International Journal for Numerical methods in Engineering*, 45, 1695-1724.

- Wang, B. S. & He, Z. C. (2007). Crack Detection of Arch Dam using Statistical Neural Network Based on the Reductions of Natural Frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 302, 1037-1047.
- Wang, H. & Li, D. (2007). Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch Dam, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 347-366.
- Wang, H., Li, D. & Tu, J. (2014). Challenge in the study of ultimate capacity of high arch dams under earthquakes, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, İstanbul, Türkiye.
- Wang, J. T., Zhang, C. H. & Jin, F. (2012). Nonlinear Earthquake Analysis of High Arch Dam–Water–Foundation Rock Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 1157-1176.
- Wang, J., Jin, F. & Zhang, C. (2018a). Nonlinear Seismic Response Analysis of High Arch Dams to Spatially-Varying Ground Motions, *International Journal of Civil Engineering* 17, 487-493.
- Wang, R. K., Chen, L. & Zhang, C. (2018b). Seismic design of Xiluodu ultra-high arch dam, *Water Science and Engineering*, 11(4), 288e301
- Wen, P. J., Han, Z. C., Ting, W.J. & Jie, X. Y. (2009). Seismic Damage-Cracking Analysis of Arch Dams using Different Earthquake Input Mechanisms. *Science China Technological Sciences*, 52(2), 518-529.
- Weng, J. H. & Loh, C. H. (2010). Structural Health Monitoring of Arch Dam from Dynamic Measurements. *12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration*, 2518-2534, Honolulu, Hawaii, United States.
- Westergaard, H. M. (1933). Water Pressures on Dams during Earthquakes, *Transactions, ASCE*, 98, 418-433.
- Yang, J., Jin, F., Wang, J. T. & Kou, L. H. (2017). System identification and modal analysis of an arch dam based on earthquake response records, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 92, 109–121.
- Zahid, F. B., Ong, Z. C. & Khoo, S. Y. (2020). A Review of Operational Modal Analysis Techniques for In-Service Modal Identification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(398).
- Zhong, H., Lin, G. & Li, H. (2009). Numerical Simulation of Damage in High Arch Dam due to Earthquake, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 3(3), 316-322.
- Zhou, J., Lin, G., Zhu, T., Jefferson, A.D. & Williams, F.W. (2000). Experimental Investigation into Seismic Failure of High Arch Dams, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126, 926-935.

Ziyad, D. (1988). Experimental and Finite Element Studies of a Large Arch Dams, California Institute of Technology, Doktora Tezi, USA.



ÖZGEÇMİŞ

Ebru KALKAN OKUR, ilk ve ortaokulu 1998-2006 yılları arasında Trabzon Kanuni İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini ise 2006-2009 yılları arasında Trabzon Fatih Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı ile Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 07/06/2014 tarihinde bölüm üçüncüsü olarak tamamladı. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. İngilizce bilen KALKAN OKUR'un bugüne kadar almış olduğu ödül ve yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

ÖDÜLLER

Okur F, Kalkan E., Erdoğan E., Demir R., 1.lık Ödülü, "Tekla Global Student BIM Awards 2018", Trimble, Las Vegas, USA, Eylül 2018.

Kalkan E., Yılın Başarılı Öğrencisi Ödülü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2018.

Kalkan E., "İnşaat Mühendisliği Bölümü Üçüncülük Ödülü", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Haziran, 2014.

Kalkan E., "İnşaat Mühendisliği Bölümü Onur Öğrencisi", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Haziran, 2014.

BİLİMSEL PROJELER

Doğu Karadeniz Bölgesindeki Stratejik Öneme Sahip Mühendislik Yapıları İçin Yapı Sağlığı İzleme Ağının Kurulması ve Yenilikçi Yöntemlerin Geliştirilmesi, Araştırmacı, Bilimsel Araştırma Projesi (Altyapı), Karadeniz Teknik Üniversitesi Projesi, Proje No: FAY-2021-9635, (1.147.795,44TL), 2021-Devam Ediyor.

Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Sitesinin Geliştirilmesi ve Hizmet Alımı Sağlanması, Ar-Ge Mühendisi, Ar-Ge Projesi, KTÜ Teknokent Dynamic Academy, (2.000.000,00TL), 2022-Devam Ediyor.

Yapı Sağlığı İzleme Sitesinin Kurulması ve Hizmet Alımı Sağlanması, Ar-Ge Mühendisi, Ar-Ge Projesi, KTÜ Teknokent Dynamic Academy, (200.000,00TL), 2019-2021.

SCI, SSCI, AHCI indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

- Altunışık A.C., Kalkan Okur, E. Influence of earthquake angle on seismic performance of concrete highway bridges, *Gradevinar*, 75 (10), 1013-1024, 2023
- Kalkan Okur, E., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., Günaydın, M., Adanur, S. Progressive collapse assessment of Osmangazi Suspension Bridge due to sudden hanger breakage under different loading conditions, *Engineering Failure Analysis*, 149, 107269, 2023.
- Adanur, S., Kalkan Okur, E., Altunışık, A.C., Günaydın, M., Rahwan, B.R. Investigation of the structural behaviors of Bosphorus suspension bridge with vertical hangers replaced by inclined hangers, *Alexandria Engineering Journal*, 65 (15), 75-102, 2022.
- Günaydın, M., Genç, A.F., Altunışık, A.C., Hacıfendioğlu, K., Okur, F.Y., Kalkan Okur, E. Structural condition assessment of a historical masonry school building using experimental and numerical methods, *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 12 (5), 1083-1113, 2022.
- Kalkan Okur, E., Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Meral, M., Yılmaz, Z., Günaydın, M., Genç, A.F. Dynamic Response of a Traditional Hıdırlar Mansion using Updated FE Model with Operational Modal Testing, *Journal of Building Engineering*, 43, 103060, 2021.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Okur, F.Y., Karahasan, O., Ozgan, K. Finite Element Model Updating and Dynamic Responses of Reconstructed Historical Timber Bridges using Ambient Vibration Test Results", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34, 1, 04019085, 2020.
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Okur, F.Y., Kalkan, E., Özgan, K., "Ambient Vibration Test and FE Modelling of Historical Timber Mosques after Restoration", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 173, 12, 956-968, 2020.
- Altunışık, A.C., Kanbur, B., Genç A.F., Kalkan, E., "Structural response of historical masonry arch bridges under different arch curvature considering soil-structure interaction", *Geomechanics and Engineering*, 18, 2, 141-151, 2019.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Okur, F.Y., Ozgan, K., Karahasan, O.Ş., Bostancı, A., "Non-Destructive Modal Parameter Identification of Historical Timber Bridges using Ambient Vibration Tests after Restoration", *Measurement*, 146, 411-424, 2019.

- Altunışık A.C., Karahasan O.Ş., Genç A.F., Okur F.Y., Gunaydin M., Kalkan E., et al., "Effect of Fiber-Reinforced Polymer Strengthening on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Frame Using Model Updating", *ACI Structural Journal*, 115, 1589-1601, 2018.
- Altunışık A.C., Karahasan O.Ş., Genç A.F., Okur F.Y., Günaydin M., Kalkan E., et al., "Modal parameter identification of RC frame under undamaged, damaged, repaired and strengthened conditions", *Measurement*, 124, 260-276, 2018.
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Okur, F.Y., Kalkan, E., Özgan, K., Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of a Restored Historical Timber Mosque Based on Ambient Vibration Tests", *Journal of Testing and Evaluation*, 47, 212-225, 2018.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Başağa, H.B., Structural Response Relationship Between Scaled and Prototype Concrete Load Bearing Systems using Similarity Requirements, *Computers and Concrete*, 21, 4, 385-394, 2018.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Başağa, H.B., Structural behavior of arch dams considering experimentally validated prototype model using similitude and scaling laws, *Computers and Concrete*, 22, 1, 101-116, 2018.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Başağa, H.B., Development of Engineering Software to Predict the Structural Behavior of Arch Dams, *Advances in Computational Design*, 3, 1, 87-112, 2018.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Başağa, H.B., Creation of Similarity Requirement with Field Equations in Steel Bearing Systems, *The Open Civil Engineering Journal*, 12, 134-149, 2018.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Earthquake incidence angle influence on seismic performance of reinforced concrete buildings, *SIGMA*, 35, 4, 609-631, 2017.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Investigation of Earthquake Angle Effect on the Seismic Performance of Steel Bridges, *Steel and Composite Structure*, 22, 4, 855-874, 2016.

Diğer dergilerde yayınlanan makaleler

- Altunışık, A.C., Kalkan Okur, E., Okur, F.Y., Günaydin, M., Genç, A.F. Experimental Modal Analysis and Structural Health Monitoring of the Double Curvature Deriner Arch Dam, *Natural & Applied Sciences Journal* 4, 1, 22, 2021.
- Kalkan, E., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., Applications and usability of parametric modeling, *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 1, 3, 139-146, 2018.

Altunışık, A.C., Kalkan, E., Başağa, H.B., Creation of Similarity Requirement with Field Equations in Steel Bearing Systems, The Open Civil Engineering Journal, 12, 134-149, 2018.

Altunışık, A.C., Kalkan, E., Başağa, H.B., Development of engineering software to predict the structural behavior of arch dams, Advances in Computational Design, 3, 87-112, 2018.

Altunışık, A.C., Kalkan, E., Earthquake Incidence Angle Influence on Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings, SIGMA, 35, 609-631, 2017.

Altunışık, A.C., Kalkan E., Başağa, H.B., 2016. Kemer Barajların Yapısal Davranışlarını Belirlemek Amacıyla Geliştirilen Mühendislik Yazılımı, DSİ Teknik Bülteni, 126, 1-21, 2017.

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

Kalkan Okur, E., Altunışık A.C, Okur, F.Y., Structural condition assessment of a historical masonry school building using experimental and numerical methods, 3rd International Civil Engineering and Architecture Conference ICEARC'23, Trabzon, Türkiye, 12-14 Ekim 2023.

Kalkan Okur, E., Altunışık A.C, Okur, F.Y., Günaydın, M., Adanur, S., Determination of The Structural Behavior of Osmangazi Suspension Bridge Under Dynamic Effects, 3rd International Civil Engineering and Architecture Conference ICEARC'23, Trabzon, Türkiye, 12-14 Ekim 2023.

Ali, M.M., Adanur, S., Altunışık A.C, Sunca, F., Kalkan Okur, E., Near Fault and Far Fault Ground Motion Effects of a Long Span Suspension Bridge, 3rd International Civil Engineering and Architecture Conference ICEARC'23, Trabzon, Türkiye, 12-14 Ekim 2023

Okur, F.Y., Kalkan Okur, E., Altunışık, A.C., Importance of Parametric Modeling in New Generation Civil Engineering Projects, The 4th International Conference on Advanced Technologies for Humanity, Marrakech, Morocco, 11-12 November 2022.

Altunışık, A.C., Kalkan Okur, E., Effect of Damping Ratios on Linear Dynamic Analysis of Deriner Arch Dam, PACE-2021, International Congress on the Phenomenological Aspect of Civil Engineering, Erzurum, Türkiye, 20-23 Haziran 2021.

- Altunışık A.C., Günaydın, M., Okur, F.Y., Karahasan, O.Ş., Sarı, M., Kalkan, E., Asma Köprülerde Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Modal Parametrelerin Belirlenmesi, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-2 Kasım 2019.
- Altunışık A.C., Kalkan, E., Uzun Açıklıklı Çelik Karayolu Köprülerinde Değişen Deprem Doğrultusunun Deprem Davranışına Etkisi, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-2 Kasım 2019.
- Altunışık A.C., Kalkan, E., Okur, F.Y., Karahasan, O.Ş., Özgan, K., Çevresel Titreşim Test Sonuçlarına Göre Güncellenmiş Tarihi Ahşap Köprünün Dinamik Analizi, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-2 Kasım 2019.
- Kalkan E., Altunışık, A.C., Başağa, H.B., Sevim, B., Development of Software to Predict the Modal Parameters and Structural Behavior of Single Curved Arch Dams, 5th International Symposium On Dam Safety And Exhibition, İstanbul, Türkiye, 1 Ekim-1 Kasım 2018, 512-523.
- Altunışık, A.C., Sesli, H., Hüsem, M., Kalkan, E., “Structural Behavior of Concrete Gravity Dams Using Westergaard, Lagrange and Euler Approaches” 5th International Symposium On Dam Safety And Exhibition, İstanbul, Türkiye, 1 Ekim-1 Kasım 2018, 720-719.
- Altunışık, A.C., Sevim, B., Günaydın, M., Adanur, S., Kalkan, E., Structural Health Monitoring of Laboratory Arch Dam Model, 5th International Symposium On Dam Safety And Exhibition, İstanbul, Türkiye, 1 Ekim-1 Kasım 2018, 1010-1019.
- Altunışık A. C. ve Kalkan, E., Earthquake Angle Influence on Seismic Performance of Highway Bridges. Second International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Türkiye, 21-23 Eylül 2017, pp.1618.