



LİMAN İÇİ ÇALKANTILARIN MODELLENMESİ

Olcaý EĞRİBOYUN

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Olca EĞRİBOYUN

27 / 12 / 2022

LİMAN İÇİ ÇALKANTILARIN MODELLENMESİ
(Doktora Tezi)

Olca EĞRİBOYUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Çalkantı ve rezonans analizleri, bir ticari liman, yat limanı ya da balıkçı barınağının tasarımı için gerekli olan çalışmalardır. Derin denizden sığ sulara ilerleyen dalgaların, sapma, sığlaşma, kırınım, yansıma, kırılma ve taban sürtünmesi etkileri sonucu, yükseklik, yön ve periyotlarında değişimler meydana gelmektedir. Dalgaların ilerlerken uğradıkları bu değişimler, yumuşak eğim eşitliğine dayalı sayısal modeller ile çözümlenebilmektedir. Tez çalışmasında, parabolik yumuşak eğim eşitliğini temel alan açık kaynak kodlu REF/DIF 1 dalga modeli incelenmiş ve Giresun kıyısı alanına uygulanarak dalga ilerlemesi başarıyla modellenmiştir. Liman içi çalkantı ve liman rezonansı problemlerinin analizlerinde ise eliptik yumuşak eğim eşitliğini çözümleyen açık kaynak kodlu RIDE dalga modeli ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Modeller literatürde doğruluğu kabul görmüş fiziksel model deneyleri ile test edilmiştir. RIDE dalga modelinin hem liman içi çalkantılarını hem de liman rezonansını başarılı biçimde benzeştirebildiği belirlenmiş ve Türkiye kıyılarında farklı kıyı suyu kütlelerine uygulanmıştır. Batı Karadeniz’de yer alan Kilimli Balıkçı Barınağı ve Filyos Limanı ile Ege Denizi’nde yer alan Seferihisar Koyu’nun rezonans davranışları modellenerek incelenmiştir. Deprem etkenli uzun dalga ilerlemesinin Seferihisar Koyu için rezonans problemi oluşturabileceği saptanmıştır. Kare ve dikdörtgen geometrilere sahip limanlarda oluşabilecek çalkantı ve rezonans problemlerinin analizi için dalga havuzunda dört ayrı deney düzeneği kullanılarak ölçümleme çalışmaları da yürütülmüştür. Fiziksel model çalışmaları, RIDE dalga modeli sonuçları ile karşılaştırılarak, kıyı yapısı yüzeylerinin dalga enerjisini sönmülendirme dereceleri tespit edilmiştir. Doğruluğu kanıtlanmış açık kaynak kodlu sayısal modellerin, kıyısız sulara çalkantı ve rezonans problemlerinin çözümlenmesinde yönetim araçları olarak kullanılması önemle önerilmektedir.

Bilim Kodu : 91112
Anahtar Kelimeler : Sayısal modelleme, fiziksel modelleme, yansıma, rezonans, dalga ilerlemesi, kıyısız alan, REF/DIF 1, RIDE
Sayfa Adedi : 172
Danışman : Prof. Dr. Lale BALAS

NUMERICAL MODELLING OF HARBOR RESONANCE

(Ph. D. Thesis)

OlcaY EĞRİBOYUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

Harbor agitation and resonance analysis are essential for planning a commercial port, marina, or fishing harbor. Wave height, direction, and period change as they propagate from deep water to shallow due to refraction, shoaling, diffraction, reflection, wave breaking, and bottom friction. The wave transformation can be analyzed with numerical models based on the mild slope equation. The wave model based on the parabolic mild slope equation, REF/DIF 1, which is available as open-source code, was investigated in this work. Wave propagation was successfully modeled by applying it to the coastal area of Giresun. Harbor agitation and resonance analysis were performed using the open-source coded RIDE wave model based on the elliptic mild-slope equation. The models were tested with physical model experiments accepted in the literature. It was found that the wave model RIDE can successfully simulate both harbor agitation and resonance, and it was applied to various coastal water bodies on the Turkish coast. The resonance behavior of Kilimli Fishing Harbor and Filyos Port in the western Black Sea and Seferihisar Bay in the Aegean Sea was investigated using numerical models. It was found that the propagation of earthquake-induced long waves may pose a resonance problem for Seferihisar Bay. In addition, measurement studies were conducted using four different experimental setups in the wave basin to analyze wave agitation and resonance problems that may occur in harbors with square and rectangular geometry. By comparing the physical model studies with the results of the wave model RIDE, the degrees of dissipation of wave energy from the surfaces of coastal structures were determined. The validated and verified open-source numerical models are strongly recommended to be used as management tools for solving wave agitation and resonance problems in coastal waters.

Science Code : 91112

Key Words : Numerical modeling, physical modeling, reflection, resonance, wave transformation, coastal water, REF/DIF 1, RIDE

Page Number : 172

Supervisor : Prof. Dr. Lale BALAS

TEŞEKKÜR

Ders döneminden tez çalışmasının sonuna kadar, engin bilgisini, tecrübesini ve desteğini benden esirgemeyen, çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve tez sürecimin her aşamasında bana göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam sayın Prof. Dr. Lale BALAS'a teşekkürlerimi ve en içten saygılarımı sunarım. Doktora eğitimim boyunca hem ders hem de tez çalışması dönemlerinde değerli bilgi ve tecrübelerini aktararak bana yol gösteren, tez çalışmalarımı yürütürken geçmiş çalışmalarından azami derecede istifade ettiğim ve akademik gelişimime önemli katkılar sağlayan değerli hocam sayın Prof. Dr. Asu İNAN'a teşekkürlerimi sunarım. Tez konusunun belirlenmesinden tezin tamamlanmasına kadar geçen süreçte her tez izleme komitesi toplantısında, değerli fikirleri ve görüşleri ile tezin oluşumunda ve gelişimindeki önemli katkılarından dolayı değerli hocam sayın Doç. Dr. Aslı NUMANOĞLU GENÇ'e teşekkürlerimi sunarım. Kıyı mühendisliği yolunda değerli katkılarını benden esirgemeyen, verdiği dersler ile mühendislik çalışmalarında büyük ilerlemeler sağladığım ve mesleki birlikteliklerde beraber onurla çalıştığım değerli hocam sayın Prof. Dr. Can BALAS'a şükranlarımı sunarım. Uzun ve zahmetli bir süreç sonunda gerçekleştirdiğim fiziksel model çalışmalarında bana yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'ndeki değerli meslektaşlarıma şükranlarımı sunarım. Yıllar süren bu maratonda maddi ve manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan, her zaman motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan çok sevdiğim aileme ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
HARİTALARIN LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Dalga İlerlemesi Kaynak Araştırması	5
2.2. Liman İçi Çalkantı Kaynak Araştırması.....	7
2.3. Liman Rezonansı Kaynak Araştırması	9
3. HELMHOLTZ EŞİTLİĞİ.....	11
3.1. Analitik Çözüm	11
3.2. Sayısal Çözüm	13
4. YUMUŞAK EĞİM EŞİTLİĞİ.....	23
5. REF/DIF 1 DALGA MODELİ.....	29
5.1. Modelin Kabulleri.....	30
5.2. Modelin Teorisi.....	30
5.3. Sonlu Farklar Çözümü ve Sınır Koşulları.....	33
5.4. Modelin Kullanımı.....	35
6. RIDE DALGA MODELİ	43

	Sayfa
6.1. Modelin Teorisi.....	43
6.2. Sonlu Farklar Çözümü ve Sınır Koşulları.....	44
6.3. Modelin Kullanımı	49
7. LİMAN REZONANSI.....	63
7.1. RIDE Modeli Tahminlerinin Doğrulama Çalışmaları.....	63
7.2. Rezonans Çalışmalarında Kullanılan Liman Geometrileri	68
7.3. Uzun ve İnce Liman Rezonans Modellemesi Sonuçları	70
7.4. Dik ve Açılı Gelen Dalgaların Liman Rezonansına Etkisi	72
7.5. Liman Geometrilerinin Karşılaştırılması	75
7.6. Filyos Limanı Rezonans Çalışması.....	79
7.7. Kilimli Balıkçı Barınağı Rezonans Çalışması	85
7.8. Mod Şekillerinin ve Sonuçların Değerlendirilmesi	90
8. SEFERİHİSAR KOYU REZONANS MODELLEMESİ.....	95
8.1. Su Seviyesi Değişimleri.....	97
8.2. Seferihisar Koyu Rezonans Modellemesi.....	100
8.2.1. Demircili Mevkii	103
8.2.2. Altıncöy Mevkii.....	103
8.2.3. Sığacık Koyu.....	105
8.2.4. Sığacık Yat Limanı	105
8.2.5. Akarca Koyu	107
8.2.6. Tepecik Mevkii	108
8.3. Değerlendirmeler.....	111
9. LİMAN REZONANSI FİZİKSEL MODEL ÇALIŞMASI	115
9.1. Dalga Havuzu ve Dalga Ölçüm Sistemi	115

	Sayfa
9.2. Deney Düzeneği.....	116
9.3. Birinci Deney.....	122
9.4. İkinci Deney.....	124
9.5. Üçüncü Deney.....	126
9.6. Dördüncü Deney	127
9.7. Birinci Fiziksel Model Deneyinin RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması.	129
9.8. İkinci Fiziksel Model Deneyinin RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması ..	132
9.9. Üçüncü Fiziksel Model Deneyinin RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması	135
9.10. Dördüncü Fiziksel Model Deneyi RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması.	141
9.11. Fiziksel ve sayısal model sonuçlarının değeriendirilmesi	147
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	149
KAYNAKLAR.....	155
EKLER	160
ÖZGEÇMİŞ	172

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Analitik ve Sayısal Çözümlerin Karşılaştırılması.....	21
Çizelge 6.1. RIDE sınır koşulu tanımlama değerleri	47
Çizelge 6.2. REF/DIF 1 ve RIDE modellerinin batık sığlık deneyi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.....	51
Çizelge 6.3. RIDE modelinin düşey yüzeyli dalgakıran deneyi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.....	55
Çizelge 6.4. Örnek çalışmada kullanılan değerler	58
Çizelge 6.5. RIDE modelinde kullanılan yansıma ve sönümleme katsayıları.....	58
Çizelge 7.1. Dikdörtgen liman fiziksel model deneyleri ile RIDE modeli sonuçlarının karşılaştırılması	65
Çizelge 7.2. Kare liman fiziksel model deneyleri ile RIDE ve Dong ve ark. sayısal modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması.....	67
Çizelge 7.3. Durum-1 ile Durum-4 arasındaki çalışmalarda hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler Durum çalışmalarının “RIDE model $\alpha=0,01$ ” sonuçlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerleri rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)	72
Çizelge 7.4. Durum-5 ile Durum-12 arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler açılı dalga durumlarının dik dalga durumlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerleri rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)	75
Çizelge 7.5. Durum-5 ile Durum-12 arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler, Durum-7, Durum-9 ve Durum-11’in Durum-5’e, Durum-8, Durum-10 ve Durum-12’nin Durum-6’ya, oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerleri rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)	77
Çizelge 7.6. Filyos limanı ile ayırık dalgakıran arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler, ayırık dalgakıranı sonuçlarının Filyos limanı sonuçlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerleri rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)	83

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.7. Kilimli balıkçı barınağı ile farazi geometri arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler, Kilimli balıkçı barınağı sonuçlarının farazi geometri sonuçlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerler rezonans artışını, negatif değerler rezonans azalışını belirtmektedir)	88
Çizelge 8.1. Ege Denizi'ndeki dört mareograf istasyonunun 30.10.2020 12.00 – 31.10.2020 03.00 UTC tarihleri arasında dalga yüksekliği ve dalga periyodu aralıkları.....	99
Çizelge 8.2. T=9-20 dk. periyot aralığında hesaplanan en büyük rezonans değerleri ve karşılık gelen dalga periyotları.....	109
Çizelge 8.3. T=1-9 dk. periyot aralığında hesaplanan en büyük rezonans değerleri ve karşılık gelen dalga periyotları.....	110
Çizelge 8.4. Seferihisar koyu rezonans çalışmasında incelenen alanlarda hesaplanan en yüksek dalga yüksekliği artışları.....	113
Çizelge 8.5. T=1-30 dk. periyot aralığında hesaplanan en büyük rezonans değerleri ve karşılık gelen dalga periyotları.....	113
Çizelge 9.1. Birinci deneyde kullanılan dalga periyotları ve dalga diklikleri	122
Çizelge 9.2. Birinci deneyde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm).....	123
Çizelge 9.3. İkinci deneyde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm).....	126
Çizelge 9.4. Deneyde kullanılan yansıma yüzeylerinin literatürde [58] önerilen aralıkları.....	130
Çizelge 9.5. Birinci deney ile RIDE dalga modeli sonuçlarının karşılaştırılması	131
Çizelge 9.6. İkinci deney ile RIDE dalga modeli sonuçlarının karşılaştırılması	134
Çizelge 9.7. Üçüncü deney ile RIDE dalga modelinin tüm periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması	137
Çizelge 9.8. Üçüncü deney ile RIDE dalga modelinin $T < 11,52$ sn periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması	140
Çizelge 9.9. Dördüncü deney ile RIDE dalga modelinin tüm periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması	142
Çizelge 9.10. Dördüncü deney ile RIDE dalga modelinin $T < 10,96$ sn periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması	146

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Analitik çözüm ile kırınım katsayısının (K_d) dağılımı	13
Şekil 3.2. Beş noktalı sonlu farklar çözüm molekülü	13
Şekil 3.3. Sayısal çözüm için sınır koşulları	15
Şekil 3.4. Sayısal çözüm ile kırınım katsayısının (K_d) dağılımı	18
Şekil 3.5. Analitik ve sayısal çözüm ile dalgakırandan $y=2L$ dik uzaklıkta kırınım katsayısının (K_d) yatay değişimi.....	19
Şekil 3.6. Analitik ve sayısal çözüm ile dalgakırandan $y=4L$ dik uzaklıkta kırınım katsayısının (K_d) yatay değişimi.....	19
Şekil 3.7. Analitik ve sayısal çözüm ile dalgakırandan $y=6L$ dik uzaklıkta kırınım katsayısının (K_d) yatay değişimi.....	19
Şekil 4.1. Boyutsuz parametrelerin belirlenmesinde kullanılan uzunluklar [4].....	24
Şekil 5.1. Crank-Nicholson çözüm molekülü	33
Şekil 5.2. Çalışma alanının tanımlanması.....	34
Şekil 5.3. Batık sığlık fiziksel model deneyi batimetrisi [19].....	36
Şekil 5.4. REF/DIF 1 modelinde kullanılan batimetri (derinlikler metredir)	37
Şekil 5.5. Batık sığlık fiziksel model deneyi sonucu boyutsuz dalga genliğinin alansal dağılımı (A/A_0) [19]	37
Şekil 5.6. REF/DIF 1 dalga modeli sonucu boyutsuz dalga genliğinin alansal dağılımı (A/A_0).....	38
Şekil 5.7. REF/DIF 1 dalga modeli sonucu renklendirilmiş boyutsuz dalga genliğinin alansal dağılımı (A/A_0).....	38
Şekil 5.8. 1 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	39
Şekil 5.9. 2 numaralı boyunca boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. 3 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	39
Şekil 5.11. 4 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	40
Şekil 5.12. Model sonucu dalga yüksekliklerinin (H) alansal dağılımı.....	41
Şekil 5.13. Model sonucu dalga yüksekliklerinin (H) sığlık ve dalgakıran bölgesinde dağılımı.....	42
Şekil 6.1. Beş noktalı sonlu farklar çözüm molekülü	45
Şekil 6.2. RIDE modelinde sınır koşullarının tanımlanması	46
Şekil 6.3. Sınır koşulu tanımlama örnekleri (a) Dalga alt sınırdan geliyorsa (b) Dalga üst sınırdan geliyorsa (c) Dalga sol sınırdan geliyorsa (d) Dalga sağ sınırdan geliyorsa	48
Şekil 6.4. Kıyı ve dalgakıran olması durumunda sınır koşulu tanımlama örneği.....	48
Şekil 6.5. Kıyı ve dalgakıran olması durumunda sönümleme katsayısı tanımlama örneği.....	49
Şekil 6.6. RIDE dalga modeli tahmini boyutsuz dalga yüksekliklerinin alansal dağılımı (H/H_0).....	52
Şekil 6.7. RIDE dalga modeli tahmini boyutsuz dalga yüksekliklerinin renklendirilmiş alansal dağılımı (H/H_0)	52
Şekil 6.8. 1 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması	53
Şekil 6.9. 2 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması	53
Şekil 6.10. 3 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması	53
Şekil 6.11. 4 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması	54
Şekil 6.12. Fiziksel model deneyi batimetrisi [56]	55
Şekil 6.13. Yumuşak eğim eşitliği model sonucu dalga yüksekliklerinin (cm) alansal dağılımı [56]	55

Şekil	Sayfa
Şekil 6.14. RIDE dalga modeli sonucu dalga yüksekliklerinin (cm) alansal dağılımı ...	56
Şekil 6.15. RIDE dalga modeli sonucu dalga yüksekliklerinin (cm) renklendirilmiş alansal dağılımı.....	56
Şekil 6.16. RIDE modeli dalga yüksekliği tahminlerinin deney sonuçları ile 1 numaralı hat boyunca karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.17. RIDE modeli dalga yüksekliği tahminlerinin deney sonuçları ile 2 numaralı hat boyunca karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.18. RIDE modeli dalga yüksekliği tahminlerinin deney sonuçları ile 3 numaralı hat boyunca karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.19. Yansıma yüzeyleri için önerilen katsayılar [58].....	59
Şekil 6.20. RIDE modelinde barınak için sönümleme katsayılarının tanımlanması	60
Şekil 6.21. RIDE modelinde barınak için sınır koşullarının tanımlanması	60
Şekil 6.22. RIDE modeli tahminlerine göre dalga yüksekliği dağılımı	61
Şekil 6.23. REF/DIF 1 modeli tahminlerine göre dalga yüksekliği dağılımı	61
Şekil 6.24. RIDE modeli tahminlerine göre basen içi dalga yüksekliği dağılımı.....	62
Şekil 6.25. REF/DIF 1 modeli tahminlerine göre basen içi dalga yüksekliği dağılımı ..	62
Şekil 7.1. Dikdörtgen liman için çalışma alanı	64
Şekil 7.2. Dikdörtgen liman sonundaki “e” noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrisi ve mod şekilleri	65
Şekil 7.3. Kare liman fiziksel model deneyinde dalga havuzu ve liman boyutları [35]	65
Şekil 7.4. Sayısal model çalışma alanı a) Dong ve ark. (2020) b) RIDE modeli	66
Şekil 7.5. Kare limanda büyütme faktörünün frekans ile değişimleri a) G1 b) G2 c) G3	67
Şekil 7.6. RIDE modeli ile tahmin edilen kare liman mod şekilleri a) Mod 1 b) Mod 2 c) Mod 3 d) Mod 4	68
Şekil 7.7. Çalışılan Durumlara ait liman geometrileri ve dalga açıları.....	70

Şekil	Sayfa
Şekil 7.8. Dikdörtgen liman sonundaki “e” noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	71
Şekil 7.9. Durum – 1 – Durum – 4’e ait mod şekilleri.....	72
Şekil 7.10. P3 noktasında Durum-5 ve Durum-6 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	73
Şekil 7.11. P3 noktasında Durum-7 ve Durum-8 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	73
Şekil 7.12. P3 noktasında Durum-9 ve Durum-10 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	74
Şekil 7.13. P3 noktasında Durum-11 ve Durum-12 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	74
Şekil 7.14. Durum-5, Durum-7, Durum-9 ve Durum-11 koşullarında P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri	76
Şekil 7.15. Durum-6, Durum-8, Durum-10 ve Durum-12 koşullarında P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri	77
Şekil 7.16. P1 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	78
Şekil 7.17. P2 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	78
Şekil 7.18. P4 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	78
Şekil 7.19. P5 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	78
Şekil 7.20. P6 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri.....	79
Şekil 7.21. Büyütme faktörü hesaplama noktaları ve ayırık dalgakıran konumu	80
Şekil 7.22. Filyos limanı RIDE modeli sınır koşulu tanımlaması	81
Şekil 7.23. Filyos Limanı mod şekilleri.....	81
Şekil 7.24. Ayırık dalgakıran eklenmiş Filyos Limanı mod şekilleri	82
Şekil 7.25. P1 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi	83
Şekil 7.26. P2 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi	83
Şekil 7.27. P3 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi	84

Şekil	Sayfa
Şekil 7.28. P4 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi	84
Şekil 7.29. P5 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi	84
Şekil 7.30. P6 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi	85
Şekil 7.31. Büyütme faktörü hesaplama noktaları ve farazi barınak geometrisi	86
Şekil 7.32. Kilimli balıkçı barınağı mod şekilleri.....	87
Şekil 7.33. Kilimli balıkçı barınağı farazi barınak mod şekilleri.....	87
Şekil 7.34. P1 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi	88
Şekil 7.35. P2 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi	89
Şekil 7.36. P3 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi	89
Şekil 7.37. P4 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi	89
Şekil 7.38. P5 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi	90
Şekil 7.39. P6 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi	90
Şekil 7.40. Durum 5'e ait mod şekilleri.....	91
Şekil 7.41. Durum 7'ye ait mod şekilleri.....	91
Şekil 7.42. Durum 9'a ait mod şekilleri.....	91
Şekil 7.43. Durum 11'e ait mod şekilleri.....	92
Şekil 8.1. Kandilli rasathanesi verilerine göre depremden bir ay sonrası için ana deprem ve artçı sarsıntıların konumları.....	95
Şekil 8.2. AFAD verilerine göre depremden iki ay sonrası için ana deprem ve artçı sarsıntıların konumları.....	96
Şekil 8.3. Ege Denizinde deprem üssüne en yakın mareograf istasyonlarının konumları.....	98
Şekil 8.4. Mareograf istasyonlarının su seviyesi ölçümleri (30.10.2020 12:00 – 31.12.2020 20:00).....	99
Şekil 8.5. Seferihisar koyu ve rezonans modellemesi alanı (siyah dikdörtgen alan)....	100

Şekil	Sayfa
Şekil 8.6. 1992 yılından günümüze kadar Kuşadası körfezinde büyüklüğü dörtten büyük depremlerin konumları [63].....	101
Şekil 8.7. Demircili mevkiine ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)	101
Şekil 8.8. Altıncıköy mevkiine ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)	101
Şekil 8.9. Sığacık koyuna ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)	102
Şekil 8.10. Sığacık yat limanına ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)	102
Şekil 8.11. Akarca koyuna ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)	102
Şekil 8.12. Tepecik mevkiine ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)	103
Şekil 8.13. T=9 dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı	104
Şekil 8.14. T=5,8 dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı	105
Şekil 8.15. T=10,2 dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı	106
Şekil 8.16. T=6,0 dk. ve T=17,6 dk. periyotlarında boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı.....	107
Şekil 8.17. T=12,7 dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı	108
Şekil 8.18. T=6,6 dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı	109
Şekil 8.19. T=21 dk, T=25 dk. ve T=30 dk. periyotlarında boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı	111
Şekil 9.1. Dalga havuzunun görünümü.....	116
Şekil 9.2. Dalga ölçer sensörü ve elektronik kutu	116
Şekil 9.3. Dalga havuzu ve liman yerleşimi	117
Şekil 9.4. Ana dalgakıran kesiti (ölçüler cm'dir).....	118

Şekil	Sayfa
Şekil 9.5. Ana dalgakıran kesiti yapım aşamaları a) Gövde ve müzvar çekirdeğinin yerleştirilmesi b) Kurp ve alıyman çekirdeğinin yerleştirilmesi c) Palye çekirdeğinin yerleştirilmesi d) Filtre tabakası ve basen tarafı koruma tabakasının yerleştirilmesi e) Gövde koruma tabakasının dizilmesi f) Ana dalgakıranın tamamlanması.....	120
Şekil 9.6. Basen içinde düzleştirilen kısım ve basenin kıyı sınırına 15x15x60 cm boyutlarında düşey yüzeyli beton blokların yerleştirilmesi.....	120
Şekil 9.7. Tali dalgakıran ve sensörlerin görünümü	121
Şekil 9.8. Basen içindeki sensör yerleşim düzeneği	121
Şekil 9.9. Birinci deney liman geometrisi ve sensör yerleşimi.....	122
Şekil 9.10. Birinci deneyde sensörlerin yerleşimi	123
Şekil 9.11. İkinci deneyde liman geometrisi ve sensör yerleşimi.....	124
Şekil 9.12. Düşey yüzeyli yansıma sınırlarının oluşturulması aşamaları a) Aliyman kısmındaki rıhtımın yapımı b) Gövde kısmındaki rıhtımın yapımı c) Tamamlanan rıhtımların giriş ağzı tarafından görünümü d) Tamamlanan rıhtımların kıyı tarafından görünümü	125
Şekil 9.13. İkinci deneyde sensörlerin yerleşimi	125
Şekil 9.14. Üçüncü deneyde liman geometrisi ve sensör yerleşimi.....	127
Şekil 9.15. Üçüncü deneyde sensörlerin yerleşimi	127
Şekil 9.16. Dördüncü deneyde liman geometrisi ve sensör yerleşimi	128
Şekil 9.17. Dikdörtgen liman basenini oluşturulması aşamaları a) Düz kısmın başladığı hatta beton blokların yerleştirilmesi b) Beton blokların arkasına çekirdek malzemesi ile dolgu yapılması c) Tamamlanan basenin giriş ağzı tarafından görünümü d) Tamamlanan basen ve sensörlerin görünümü	128
Şekil 9.18. Dördüncü deneyde sensörlerin yerleşimi.....	129
Şekil 9.19. Birinci deney için RIDE dalga modeli çalışma alanı.....	130
Şekil 9.20. RIDE dalga modeli ile birinci fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri	132
Şekil 9.21. İkinci deney için RIDE dalga modeli çalışma alanı	133

Şekil	Sayfa
Şekil 9.22. RIDE dalga modeli ile ikinci fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri	134
Şekil 9.23. Sayısal model sonuçları ile üçüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri	137
Şekil 9.24. Durum-1, Durum-6 ve Durum-12’de $T < 11,52$ sn periyotlardaki dalga yüksekliği dağılım grafikleri	141
Şekil 9.25. Sayısal model sonuçları ile dördüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri	142
Şekil 9.26. Durum-1, Durum-6 ve Durum-12’de $T < 10,96$ sn periyotlardaki dalga yüksekliği dağılım grafikleri	146

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 5.1. REF/DIF 1 örnek çalışma alanı ve batimetri	41
Harita 6.1. Darıca balıkçı barınağının coğrafi konumu ve çalışma alanı boyutları	59
Harita 6.2. Barınaktaki yüzeylerin özellikleri	59
Harita 7.1. Filyos limanının coğrafi konumu ve çalışma alanı boyutları	80
Harita 7.2. Kilimli balıkçı barınağının coğrafi konumu ve çalışma alanı boyutları	86

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	dalga genliği
A₀	başlangıç dalga genliği
BIAS	yanlılık katsayısı
C	dalga hızı
C_g	grup hızı
C_f	dalga sürtünme faktörü
d	uyum indeksi
D	lineer olmayan katsayı
f₁	taban eğriliği katsayısı
f₂	taban eğiminin karesinin katsayısı
f_b	taban sürtünme faktörü
f_d	dalga kırılması enerji kayıp faktörü
F(x,y)	kompleks dalga fonksiyonu
g	yerçekimi ivmesi
h	su derinliği
k	dalga sayısı
K_d	kırınım katsayısı
l	çözüm ağı uzunluğu
L	dalga boyu
L₀	derin deniz dalga boyu
M	rezonans modu
MAE	ortalama gerçek hata
MAPE	yüzde ortalama gerçek hata
r	yansıma katsayısı
R	büyütme faktörü

Simgeler	Açıklamalar
RMSE	kök ortalama kare hatası
RMSPE	yüzde kök ortalama kare hatası
T	dalga periyodu
U	Ursell parametresi
w	taban sürtünmesi kaynaklı enerji kaybı
α	sönümlenme katsayısı
∇h	taban eğimi
$\nabla^2 h$	taban eğriliği
Δx	karelaj aralığı
Δy	karelaj aralığı
$\emptyset$	kompleks potansiyel fonksiyonu
φ	su yüzeyindeki hız potansiyeli
γ	dalga genliğinin su derinliğine oranı
η	su seviyesi değişimi
σ	açısal frekansı

1. GİRİŞ

Liman içi çalkantı, ticari liman, balıkçı barınağı, yat limanı veya koy gibi deniz bağlantısı olan yarı kapalı su alanlarında dalgalar nedeniyle oluşan salınımdır. Liman içine giren dalgaların bir miktarının, rıhtım gibi düşey yüzeylerden ya da dalgakıran gibi eğimli yüzeylerden sönümlenmeden geri dönmesi bu salınının artmasına neden olabilmektedir.

Liman içi çalkantıyı oluşturan dalgalar, 2-15 sn. gibi küçük periyotlu rüzgâr ve soluğan dalgaları olabileceği gibi, gelgit ve sismik hareketler sonucu oluşabilecek uzun dalgalar da liman içinde farklı salınımlar meydana getirebilmektedir.

Liman içi çalkantı analizi, bir limanın tasarımı için gerekli olan çalışmalardan biridir. Limanın dalgakıran boylarının, yanaşma yerleri uzunluklarının ve konumlarının belirlenmesi için liman içi çalkantı analizi gerçekleştirilir. Liman içindeki dalga yükseklikleri hem güvenlik hem de konfor konularında önem arz etmektedir. Ticari limanlarda yük elleçleme sürecinde, gemilerin olabildiğince durağan olmaları gerekmektedir. Gemilerin yük transferini güvenli biçimde yapabilmeleri için yükleme-boşaltma alanlarında (rıhtımlar, iskeleler) operasyona mani teşkil etmeyecek derecede hareketsiz durmaları gerekmektedir. Balıkçı barınakları veya yat limanlarında teknelerin yanaşma yerlerine güvenle bağlanabilmeleri, birbirlerine, rıhtımlara veya iskelelere çarparak zarar görmemeleri için sakin bir su alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca yat tekneleri aynı zamanda bir yaşam alanı olduğundan, içinde bulunan insanların konforlu bir durumda konaklamaları gerekmektedir.

Bir limanın çalkantı durumunu ortaya koyabilmek için öncelikle bulunduğu yörenin derin deniz rüzgâr ve dalga parametreleri belirlenmelidir. Elde edilen değerlerin de yakın kıyıya taşınması ve bu şekilde liman içi çalkantı analizinde kullanılması gerekmektedir. Limanlar çoğunlukla karaya bağlı veya karaya yakın konumlarda inşa edildiğinden bulundukları denizel alan sığ su koşulunu taşımaktadır. Ayrıca limanın bulunduğu yörenin deniz içi topoğrafik durumu da limana ulaşan dalgaların ilerlemesini etkileyen bir unsurdur. Bu nedenle çalışmada öncelikle dalga ilerlemesi üzerine çalışılmıştır. Dalga ilerlemesi, dalgaların derin denizden kıyıya doğru hareket ederken geçirdikleri değişimi tanımlamaktadır. Dalga ilerlemesi sırasında bu değişime neden olan büyük etkiler, kırınım (diffraction), sapma (refraction), sığlaşma (shoaling), taban sürtünmesi enerji kaybı ve dalga

kırılması enerji kaybı şeklindedir.

Kırınım; dalga ilerleme yönünde bulunan geçirimsiz bir yüzey (ada, burun, gemi, dalgakıran) nedeniyle dalganın yönünde ve yüksekliğinde meydana gelen değişimdir. Kırınım, yanal yönde enerji iletimidir. Geçirimsiz yüzeyin arka tarafı "gölge bölge" olarak isimlendirilir. Gölge bölgedeki dalga yüksekliğinin, kırınımına uğramamış dalga yüksekliğine oranına kırınım katsayısı (K_d) adı verilmektedir. Kırınım etkisi ile dalga yüksekliğinde azalma ve dalga yönünde değişim meydana gelmektedir.

Sapma; deniz taban konturlarına göre açılı şekilde ilerleyen dalganın sığdaki ucu, derinde olan ucundan daha yavaş hareket ettiğinden, dalga yönünde taban konturlarına paralel olma eğiliminde bir bükülme meydana gelmesidir. Sapma etkisi ile dalga yüksekliğinde azalma ve dalga yönünde değişim oluşmaktadır.

Sığlaşma; dalgaların, dalga boyunun yarısı derinlikten daha sığ alana geldiklerinde, dalga ve deniz tabanı arasında oluşan sürtünme nedeniyle yavaşlamasıdır. Sığlaşma nedeniyle dalga boyu azalmakta ve dalga dikliği artmaktadır. Sığlaşma, dalga kırılma anına kadar devam etmektedir. Sığlaşma etkisi, dalga ilerlemesinin gerçekleştiği alanın büyük bölümünde geçerlidir.

Dalgalar ilerleyip sığ sığa ulaştıklarında, dalga ile deniz tabanı arasındaki etkileşim artmaktadır. Sığ suda, deniz tabanındaki sedimanın (kum, kil, çakıl) özelliğine, deniz tabanının ondülasyonlu olup olmamasına, deniz tabanının geçirimsizliğine veya deniz suyunun viskozitesine göre taban sürtünmesi kaynaklı enerji kayıpları belirlenmektedir. Taban sürtünmesi sığ suda dalga yüksekliğin azalmasında önemli rol oynamaktadır.

Sığ suda, dalgaların dikliği kıyıya yaklaştıkça artmakta ve su parçacığı hızının, dalga hızından büyük olduğu ana kadar devam etmektedir. Bu kriter sağlandığında dalga formunun bozulması durumu, dalga kırılması olarak tanımlanmaktadır. Sığ suda gerçekleşen taban sürtünmesi ve dalga kırılması, önemli miktarda enerjinin kaybolmasına neden olmaktadır.

Derin denizden liman alanına değişime uğrayarak ulaşan dalgaların, liman basenine girdiklerinde rıhtım gibi düşey yüzeylerden veya dalgakıranların eğimli yüzeylerinden farklı oranlarda geri dönmesi, liman içerisinde farklı yüksekliklerde ve farklı yönlere giden birçok

dalga oluşmasına sebebiyet vermektedir. Liman içindeki yüzeylerden yansıyan dalgalar ile basene giren dalgalar etkileşime girmekte ve dalga yükseklikleri artabilmektedir. Dış kuvvetin (dalgaların) frekansları, limanın doğal frekansları ile çakıştığı zaman, salınımların genlikleri oldukça yükselebilmekte ve bu durumda liman rezonansı oluşabilmektedir.

Dalga ilerlemesi ve liman içi çalkantı sayısal modellemelerinde kullanılan eşitliklerin ve çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi günümüzde halen aktif birer araştırma konusudur. Bu konularda kullanılan modeller, faz ortalamalı (phase-averaged) ve faz çözümlemeli (phase resolving) olarak iki gruba ayrılabilir.

Faz ortalamalı modeller diğer bir deyişle spektral modeller, dalga enerji spektrumu ya da spektrumdan elde edilecek dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga yönü gibi değerlerin tahmininde kullanılmaktadır. WAM (WAVE Model) [1], WAVEWATCH III [2] ve SWAN (Simulating WAVes Nearshore) [3] gibi yaygın kullanılan çeşitleri olan spektral modeller, dalga tahmini konusunda Akdeniz'in tamamı, Karadeniz'in tamamı veya okyanuslar gibi büyük denizel alanlarda kullanılmakta, rüzgâr hız bileşenlerini girdi verisi olarak kullanarak derin deniz dalga tahmini yapılabilmektedirler.

Faz çözümlemeli modeller, yakın kıyı bölgelerindeki dalga değişimlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Faz ortalamalı modeller, kırınım etkisini dikkate almamaktadır. Bu nedenle kırınımın etkili olduğu yakın kıyı bölgelerinde, özellikle ada veya burun bulunan denizel alanlarda dalga ilerlemesi çalışmaları için kırınım etkisini hesaplayabilen faz çözümlemeli modellerin kullanılması gerekmektedir. Faz çözümlemeli modeller dalga boyuna oranla küçük çözümüme uzunlukları ($L/5 - L/15$) ile çözümüme yapabildiklerinden, daha fazla işlemci gücü ve süre gerektirmektedir. Bu nedenle uygulama alanları genellikle limanlar veya yakın çevresini kapsayan küçük alanlardır. Bu modeller başlıca, kırınım, dalga kırılması, sapma ve yansıma olaylarını benzeştirmektedirler. Literatürde yaygın olarak kullanılan faz çözümlemeli sayısal modellerin temel eşitlikleri, yumuşak eğim eşitliği [4] ve Boussinesq eşitliğidir [5].

Bu tez çalışmasında, yumuşak eğim eşitliği temel alınarak geliştirilmiş REF/DIF 1 [6] ve RIDE [7] sayısal modelleri kullanılarak farklı liman içi çalkantı durumları incelenmiştir. Tezin ilk bölümünde, liman içi çalkantı analizinin önemi ve dalga ilerlemesi ile ilgili genel tanımlamalara yer verilmiştir. Tezin ikinci bölümünde, yumuşak eğim eşitliği ile yapılmış

önceki çalışmalar kaynak araştırması başlığı altında verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, yumuşak eğim eşitliğinin daha iyi anlaşılması için öncelikle, sabit su derinliğinde kırınımın ele alındığı Helmholtz eşitliği analitik ve sayısal olarak çözümlenmiştir. Tezin dördüncü bölümünde, yumuşak eğim eşitliğinin teorisi ve türetilişi açıklanmıştır. Tezin beşinci bölümünde, REF/DIF 1 sayısal modeli, altıncı bölümde ise RIDE sayısal modeli detayları ile açıklanmış, farklı kıyısal alanlara uygulanmış ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Tezin yedinci bölümünde, RIDE sayısal modeli kullanılarak liman rezonansı konusunda uygulamalar yapılmıştır. Tezin sekizinci bölümünde, 30.10.2020 tarihinde İzmir ilinin güneyinde Ege denizinde meydana gelen deprem sonrası oluşan uzun dalgaların Seferihisar koyunda meydana getirdiği rezonans oluşumları sayısal olarak modellenmiştir. Tezin dokuzuncu bölümünde, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı hidrolik laboratuvarında yer alan dalga havuzunda liman içi çalkantı ve liman rezonansı fiziksel model çalışmaları yapılmıştır. Tezin onuncu bölümünde, yapılan tüm çalışmalar özetlenmiş, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekteki çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yumuşak eğim eşitliği (Eş. 2.1), 1972 yılında Berkhoff [4] tarafından değişken su derinliği dikkate alınarak türetilmiştir. Eşitliğin orijinal hali lineer dalga teorisini temel alarak, kırınım, sıglaşma ve sapma etkilerini bir arada çözebilmektedir. Derin denizden sıg sulara doğru dalga ilerlemesine, dalga kırılması, taban sürtünmesi, dalga-akıntı etkileşimi, ani değişen taban topoğrafyası gibi ilave karmaşık fiziksel süreçlerin birleşik etkisi de tesir etmektedir. Orijinal eşitlik bu etkileri içermemektedir. Yıllar içerisinde birçok araştırmacı orijinal eşitliğe eklemeler yaparak daha kompleks ve gerçekçi dalga eşitlikleri türetmiştir. Yumuşak eğim eşitliğinin sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler kullanılarak çözülebilmesi mümkündür.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(C C_g \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C C_g \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\sigma^2 C_g}{C} \Phi = 0 \quad (2.1)$$

Burada, σ : açısal frekansı, C : dalga hızını, C_g : grup hızını, Φ : iki boyutlu kompleks potansiyel fonksiyonunu simgelemektedir.

2.1. Dalga İlerlemesi Kaynak Araştırması

Eliptik formdaki yumuşak eğim eşitliğinin çözümü, büyük alanlar için zorlayıcı olabilmektedir. Bu durum, çözüm için farklı yaklaşımların geliştirilmesine yol açmıştır. Dalga alanını, ilerleyen ve yansıyan bileşenlere bölerek ve yansıyan bileşeni ihmal ederek parabolik bir yaklaşım türetilmiştir [8]. Bu yaklaşım sahil, kıyı duvarı, ada gibi yüzeylerin yansımaları ihmal edilebilir olduğunda kullanılabilir. Berkhoff tarafından geliştirilen modelde açılı dalga koşulunda bile yumuşak eğim eşitliğinin 1/3 taban eğimine kadar uygulanabilir olduğu belirlenmiştir [9]. Yumuşak eğim eşitliğinin çözümü için Booij tarafından, ikinci dereceden eliptik yumuşak eğim eşitliğinin iki ayrı birinci dereceden zamana bağlı hiperbolik eşitliğe dönüştürülmesi sonucunda hiperbolik formdaki eşitlik türetilmiştir [10]. Hiperbolik formda yansıma etkisi ihmal edilmemiştir. Orijinal yumuşak eğim eşitliği, belli bir eğimde değişen deniz tabanı için türetilmiştir. Batimetrideki çukur veya tümsek gibi ani değişimler dikkate alınmamaktadır. Bu durum eşitliğe taban eğriliği ve taban eğiminin karesi ile ilgili terimlerin ilave edilmesini gerektirmektedir. Taban eğiminin karesi derin denizde önemli bir etkiye sahip olmasa da, sıg suda ve geçiş derinliğinde

önemlidir. Taban eğriliği ise derin deniz ve sığ suda ihmal edilebilir olmakla birlikte, geçiş derinliğinde önemli bir etkiye sahiptir [11]. Bu etkilerin incelenmesi için zamana bağlı hiperbolik formdaki yumuşak eğim eşitliği de kullanılmaktadır [12].

Orijinal eşitliğin gerçekçiliğinin artırılması için lineer olmayan etkilerin de eklenmesi gerekmektedir. Bunlardan biri lineer dispersiyon eşitliği yerine lineer olmayan dispersiyon eşitliğinin kullanılmasıdır. Bu doğrultuda türetilen yumuşak eğim eşitliği sonlu farklar metodu ve eşlenik gradyan (conjugate gradient) yöntemi ile çözülebilmektedir [13].

Yumuşak eğim eşitliklerinin çözümünde lineer olmayan dalga hızı ve grup hızı da eşitliğe dâhil edilebilmektedir. Lineer olmayan etkiler, özellikle dalga sapmasının etkin olduğu sığ sularda önem kazanmaktadır. Ayrıca genişletilmiş yumuşak eğim eşitliği, Helmholtz denkleminde indirgenip özellikle kaotik bölgelerin çözümlenmesinde problemi basitleştirmektedir. Yumuşak eğim eşitliğinin parabolik formu, eliptik formu ve Helmholtz denkleminde indirgenmiş formu sonlu farklar ve sonlu hacimler yöntemleri ile çözülebilmektedir [14].

Orijinal eşitlik taban sürtünmesi ve dalga kırılması gibi enerji kayıplarını içermemektedir, bu nedenle kırılma derinliğinden kıyıya kadar olan kısımda doğruluğu azalmaktadır. Bu etkilerin eklenmesi ile türetilen eşitlik sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözüldüğünde laboratuvar deneyleri ile daha uyumlu sonuçlar elde edilmektedir [15].

Dalgaların sığ sularda ilerlemesinde, dalga kaynaklı akıntılar özellikle deniz topoğrafyası ve kıyı çizgisi değişimlerinin hesaplanmasında önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda, lineer olmayan dispersiyon ilişkisi, taban sürtünmesi ve dalga kırılmasının yanında dalga-akıntı etkileşiminin de eklenmesi ile genişletilen eliptik yumuşak eğim eşitliği sonlu elemanlar metodu ile çözümlenebilmektedir [16]. Eliptik yumuşak eğim eşitliğinin çözümü için dalga boyu başına 15-20 çözüm noktası kullanılmasının yeterli olacağı öngörülmektedir. Sonlu farklar metodu ile yapılacak çözümlerlerde dörtgen çözüm ağı uygulanması nedeniyle eğri hatlara sahip kıyıların sayısallaştırılması sorun olabilmektedir. Bu durumda eğri hatlar koordinat dönüşümü uygulanmakta ve yakın kıyıda dalga kaynaklı akıntılar hesaplanabilmektedir [17]. Rüzgâr kaynaklı deniz dalgaları ardışık olarak farklı yüksekliklerde, periyotlarda ve yönlerde oluşabilmektedirler. Yumuşak eğim eşitliği düzensiz dalgaların ilerlemesi için de kullanılabilir [18].

Geliştirilen tüm sayısal modellerin doğruluğunun kanıtlanması gerekmektedir. Bu işlem için de deneysel (laboratuvar ortamında) veya sahada ölçümler kullanılmaktadır. Bu doğrultuda yapılan deneysel çalışmalardan biri, dalga havuzunda düzenli dalgalar kullanılarak 1/50 taban eğiminde eliptik sığlaşma alanı ile hazırlanmıştır [19]. Çalışmada, 20 m genişliğinde ve 25 m uzunluğunda bir dalga havuzunda, 0,45 m derinlikte düz bir taban ve sonrasında 1/50 eğimde sığlaşan batimetri yer almaktadır. Tüm batimetri dalga ilerleme yönüne göre 20° açılıdır. Başlangıç dalga genliği $A_0=0,0232$ m ve dalga periyodu $T=1$ sn'dir. Bir başka deneysel çalışmada ise düzensiz geometriye sahip batimetri üzerine Berkhoff tarafından kullanılabilecek geometride eliptik sığlaşma alanı ile düzensiz dalgaların ilerlemesi incelenmiştir [20]. 35 m genişliğinde ve 29 m uzunluğundaki dalga havuzundaki batimetrinin en yüksek kotu ile en düşük kotu arasındaki fark 2,6 cm'dir. Deneyde 0,46 cm su derinliği bulunmaktadır. Eliptik sığlık üzerinde kalan su derinliği ise 15,24 cm'dir.

Başka bir çalışmada ise, farklı bir eliptik sığlaşma alanı kullanılarak düzenli ve düzensiz dalgaların ilerlemesi incelenmiştir [21]. Bu deneysel çalışmanın amacı sonlu hacimler metodu kullanılarak çözümlenen hiperbolik formdaki yumuşak eğim eşitliği modelini doğrulamaktır. Çalışmada, 6,1 m genişliğinde ve 11 m uzunluğunda bir dalga havuzunda 44 cm su derinliği kullanılmıştır. Eliptik sığlık üzerinde kalan su derinliği ise 8,1 cm'dir. Çalışmada özellikle dalga kırılması üzerine yoğunlaşarak farklı dalga kırılma formülleri incelenmiş ve yeni bir dalga kırılma eşitliği önerilmiştir.

Çalışma alanının büyüklüğüne göre çözümün hızlandırılması için derinliklerin büyük olduğu yerlerde büyük çözümleme ağı, derinliğin azaldığı ya da hassasiyet istenen yerlerde daha küçük çözümleme ağı kullanılması ile oluşturulan çoklu çözüm ağı tekniği ile özellikle yumuşak eğim eşitliğinin Helmholtz eşitliğine indirgenmesi sonrasında hızlı çözümlere ulaşılabilmektedir [22].

2.2. Liman İçi Çalkantı Kaynak Araştırması

Liman veya koylar gibi kara etkileşimi ve tekne yoğunluğu olan denizel alanlarda enerji kayıpları fazladır. Bu nedenle liman içi çalkantı problemlerinin incelenmesinde orijinal yumuşak eğim eşitliğinin kullanılması, gerçek değerlerden daha büyük dalga yüksekliklerinin hesaplanmasına yol açmaktadır. Dalga ilerlemesi için kullanılan modellerde, yakın kıyı için hesaplama yapılmayacak ise kıyı, dalgakıran, rıhtım vb. yapıların

neden olduğu yansıma etkisi ihmal edilebilir. Ancak liman içi çalkantıların analizinde yansıma etkisi ihmal edilemeyecek derecede önemlidir. Liman içi çalkantı analizi için geliştirilen tüm sayısal modeller dalga kırılması, taban sürtünmesi ve yansıma etkilerini içermektedir.

Sığ su kütlelerinde dalga hesaplamasına önemli etkisi bulunan dalga kırılmasının sayısal modelde ele alınabilmesi için dalga kırılma derinliğinin ve kırılan dalga yüksekliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Kırılan dalga yüksekliğinin kırılma derinliğine oranı olarak tanımlanan kırılma indeksi için literatürde çok sayıda yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımların sayısal modele eklenmesi, model sonuçlarının deneysel sonuçlarla doğrulanması ve en uygun parametrelerin seçilmesi sayısal modellerin başarısında önemlidir [23].

Dalga kırılma derinliğinden kıyı çizgisine kadar uzanan kırılma bölgesinde, dalga kaynaklı akıntılar oluşmaktadır. Bu akıntılar hem sediman taşınımında hem de liman giriş ağızlarında tekne navigasyonu açısından dikkate alınmaktadır. Özellikle lagün veya nehir içlerine yapılan yat limanı veya balıkçı barınaklarının navigasyon yolu olan nehir ağızlarındaki jetilerin etrafında veya aralarında oluşacak dalga yüksekliklerinin tahmini için yumuşak eğim eşitliği kullanılmaktadır [24].

Dalga kırılmasından sonra oluşan akıntılar, liman giriş ağızı yapıları nedeniyle yön değiştirebilmektedir. Bu yön değişimlerinden kaynaklanan enerji kayıpları liman ağızlarındaki dalga parametrelerinin de değişmesine neden olabilmektedir. Özellikle tsunami veya tayfun nedeniyle oluşan yüksek enerjili uzun dalgalar, rüzgâr dalgalarına göre daha büyük akıntı hızlarının oluşmasına neden olabilmektedir. Yumuşak eğim eşitliği ile uzun dalgaların liman veya koy içerisindeki dağılımının belirlenmesi ve liman giriş ağızlarındaki enerji kayıplarının dikkate alınması mümkündür [25].

Limanların vaziyet planları dikkate alındığında, köşeli hatlara sahip veya birbiri ile dik kesişen rıhtımların olduğu görülmektedir. Düşey yüzeyli yanaşma yerleri liman içerisinde ayrılmış bölgeler oluşturmaktadır. Özellikle bu bölgelerde dalga sıkışmasına bağlı olarak su seviyesinde yükselmeler ve tekneler için sorun oluşturabilecek dalgaların oluşması muhtemeldir. Ayrıca liman içerisinde yanaşma yerlerinden yansıyan dalgaların gelen dalgalarla olan etkileşimi de teknelerin güvenli yanaşmaları için dikkate alınması gereken

bir durumdur. Liman içi çalkantıların analizinde kullanılan bazı sayısal modellerde dalga-dalga etkileşimi de benzeştirilmektedir [26].

Yumuşak eğim eşitliği kullanılarak çok sayıda, liman içi çalkantı modeli geliştirilmiştir. Bunlardan ticari yazılım haline getirilen EMS (Elliptic Mild Slope) [27] modelinde sonlu farklar metodu, CGWAVE [28] ve PHAROS (Program for HARbor Oscillations) [29] modellerinde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Açık kaynak kodlu olarak ulaşılabilen ARTEMIS [30] gibi modeller de bulunmaktadır.

2.3. Liman Rezonansı Kaynak Araştırması

Bir limandaki güvenli operasyon ve bağlama koşulları için dalga kaynaklı salınımların analiz edilmesi gerekmektedir. Dalgalar limana girdiği sürece su yüzeyinde salınımlar meydana gelmektedir. Liman içerisine dalga girişi sürekli değil ise basende oluşan salınımlar zaman içerisinde azalarak kaybolur. Bu durumda oluşan su yüzeyi hareketine serbest salınım adı verilmektedir. Eğer liman baseni sürekli olarak dış kuvvetlerin (dalgaların) etkisi altında kalır ise bu durumda oluşan su yüzeyi hareketi zorlanmış salınım olarak tanımlanmaktadır. Serbest ya da zorlanmış salınımların frekansları limanın doğal frekansları ile örtüştüğünde basendeki dalga yükseklikleri artış göstermektedir. Bu durum rezonans olarak tanımlanmaktadır [31].

Liman rezonansının tanımlanması ve limanların küçük genlikli düzenli ve düzensiz dalgalar altında çeşitli periyotlardaki davranışlarının ortaya çıkarılması için fiziksel ve sayısal model testleri yapılmıştır. Genişliği uzunluğunun 0,2 katı olan dikdörtgen geometrideki liman [32] [33], genişliği uzunluğuna göre küçük ve değişken boyutlardaki dikdörtgen limanlar [34] ve genişliği uzunluğuna eşit açılı dalgalar etkisinde kare liman [35] fiziksel model deneyleri rezonans karakteristiklerinin belirlenmesinde sayısal modellere yol göstermektedir. Karmaşık liman geometrileri nedeniyle, liman rezonans modlarının elde edilebilmesi için çok sayıda farklı periyot ile çalışılması gerekmektedir. Bu nedenle sayısal modellerin benzeşimleri önemlidir. Liman rezonansı sayısal çalışmaları Boussinesq eşitlikleri, yumuşak eğim eşitliği veya sıkı su eşitlikleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Liman içinde ve dışında sabit su derinliği veya sabit taban eğimi varsayan ve Boussinesq eşitliğini çözümleyen liman rezonansı sayısal modellerinde, taban eğimi arttıkça liman rezonans modlarının daha büyük periyotlara ulaştığı ve dalga yüksekliği artışının daha fazla olduğu belirlenmiştir [36].

Rezonans sadece limanlarda değil koy ve körfez gibi yarı kapalı denizel alanlarda da oluşabilmektedir. Özellikle uzun dalgalar etkisinde gerçekleşen rezonans durumu su seviyesi ölçen şamandıralar vasıtasıyla belirlenebilmektedir. Bu konuya bir örnek Kanada'nın Fundy koyu ve Maine körfezinde yapılan şamandıra ölçümleri ile yumuşak eğim eşitliğine dayalı geliştirilen bir sayısal modelin karşılaştırılmasıdır [37]. Periyotları saatler mertebesinde olan gelgit dalgalarının, koy ve körfezdeki davranışı sayısal model ile belirlenip ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır.

Liman basenine yerleştirilen dalga ölçerler de rezonans çalışmalarında sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmaktadır. İtalya'da Di Carrara yat limanında yapılan ölçümler ile sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan lineer sıg su eşitliğine dayalı geliştirilen bir sayısal model karşılaştırılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [38].

Birçok araştırmacı sayısal modeller kullanarak mevcut ya da planlanan limanların rezonans karakteristiklerini incelemiştir. Bunlardan biri Roma yat limanının uzun dalgalar etkisinde zamana bağlı yumuşak eğim eşitliğine dayanan sayısal model ile incelenmesidir [39]. Bir diğer çalışmada, Tayvan'da yer alan Hualien limanının rezonans analizidir [40]. RIDE dalga modeli ile yapılan çalışmada, liman içi ve çevresinde bulunan şamandıra ölçümleri ile model sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Güney Çin denizinde planlanan bir liman için yapılan çalışmada [41] ise zamana bağlı yumuşak eğim eşitliğine dayalı bir sayısal model kullanılmıştır.

Gerçek limanlar gibi basit geometride basenler için de rezonans çalışmaları yürütülmüştür. Bir dikdörtgen basende, boyuna yönde salınımlar oluşacağı gibi basenin enine yönünde de rezonans salınımları oluşabilmektedir. Bu durumun farklı sabit taban eğimleri kullanılarak detaylı şekilde incelenmesi [42] ile basen içerisinde enine yönde de dalga yüksekliklerinde önemli artışlar meydana geldiği belirlenmiştir. Dikdörtgen bir basenin farklı genişlikleri, kenarlarının farklı sönümleme katsayısına sahip olması, tabanda sürtünme etkisi ile enerji kaybı bulunması ve giriş ağzının farklı genişliklerde olması durumları için de detaylı çalışmalar yapılmıştır [43]. Dikdörtgen basen gibi kare bir basen için de farklı liman giriş ağzı genişlikleri ile yapılan çalışmada, dalga yüksekliğinin 100 kattan fazla arttığı dalga periyotları hesaplanmıştır [44]. Ekstrem mod olarak tanımlanan bu durum çok dar bir frekansta oluşmaktadır.

3. HELMHOLTZ EŞİTLİĞİ

Liman içi çalkantı analizinde ele alınan temel durumlardan biri, dalgakıranın dalgaya olan etkisinin belirlenmesidir. Kırınım olarak tanımlanan bu durum, dalgaların ilerleme yönünde önüne çıkan bir engel nedeniyle yön değiştirmesidir. Kırınım dalga yüksekliğinde azalmaya neden olmaktadır. Önlerine çıkan geçirimsiz bir engelin dalgaların hareketine nasıl etki ettiğinin anlaşılabilmesi için zamandan bağımsız iki boyutlu dalga denklemi olan Helmholtz eşitliği (Eş. 3.1) çözümlenmiştir. Bu eşitlik, genel bir dalga eşitliği olduğundan ses, ısı, optik ve su dalgaları için farklı uygulama alanları bulunmaktadır. 1896 yılında ışığın kırınımı için Sommerfield tarafından türetilen teori [45], 1952 yılında su dalgaları için yarı sonsuz, düşey yüzölçümü ve geçirimsiz bir engele uygulanmıştır [46]. Kırınımın tek başına sabit su derinliği için hesaplanması Helmholtz eşitliği ile mümkündür. Kırınımın incelenmesinde analitik ve sayısal model olarak iki farklı çözüm yolu çalışılmıştır. Sayısal çözümde sonlu farklar yaklaşımı uygulanarak, model sonuçları analitik çözüm [46] ile karşılaştırılmıştır.

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + k^2 F(x, y) = 0 \quad (3.1)$$

Burada, $F(x,y)$ kompleks dalga fonksiyonu, k dalga sayısıdır.

3.1. Analitik Çözüm

Kırınımın analitik çözümünde bazı kabuller bulunmaktadır. Bu kabuller aynı zamanda lineer dalga teorisinde geçerli olan kabullerdir.

- 1- Akım çevrintisizdir.
- 2- Dalga genliği sonsuz küçüktür.
- 3- Su yüzeyinde basınç uniform ve sabittir.

Su seviyesi değişimi “Eş. 3.2” ile hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{Aikc}{g} e^{ikct} \cosh kh F(x, y) \quad (3.2)$$

Burada, η su seviyesi değışimi, A dalga genliğı, $i = \sqrt{-1}$, k dalga sayısı, c dalga hızı, g yerçekimi ivmesi, h su derinliğı, x ve y ise düzlemsel koordinatlardır.

Sommerfield çözümü, yarı sonsuz, düşey yüzölü ve geçirimsiz bir dalgakıran olması durumunda su dalgaları için uyarlandığında “Eş. 3.3” ve “Eş. 3.4” elde edilmektedir.

$$F(x, y) = \frac{1+i}{2} \left(e^{-iky} \int_{-\infty}^{\sigma} e^{-\frac{1}{2}\pi i u^2} du + e^{-iky} \int_{-\infty}^{\sigma'} e^{-\frac{1}{2}\pi i u^2} du \right) \quad (3.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{4}{L}(r - y) \quad \sigma'^2 = \frac{4}{L}(r + y) \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.4)$$

$$f(\sigma) = \frac{1}{2}(i+1) \int_{-\infty}^{\sigma} e^{-\frac{1}{2}\pi i u^2} du \quad f(\sigma') = \frac{1}{2}(i+1) \int_{-\infty}^{\sigma'} e^{-\frac{1}{2}\pi i u^2} du \quad (3.5)$$

“Eş. 3.5” değerleri “Eş.3.3”te yerine yazıldığında, F(x,y) daha sade bir formda “Eş.3.6” da görölmektedir.

$$F(x, y) = f(\sigma)e^{-iky} + f(\sigma')e^{-iky} \quad (3.6)$$

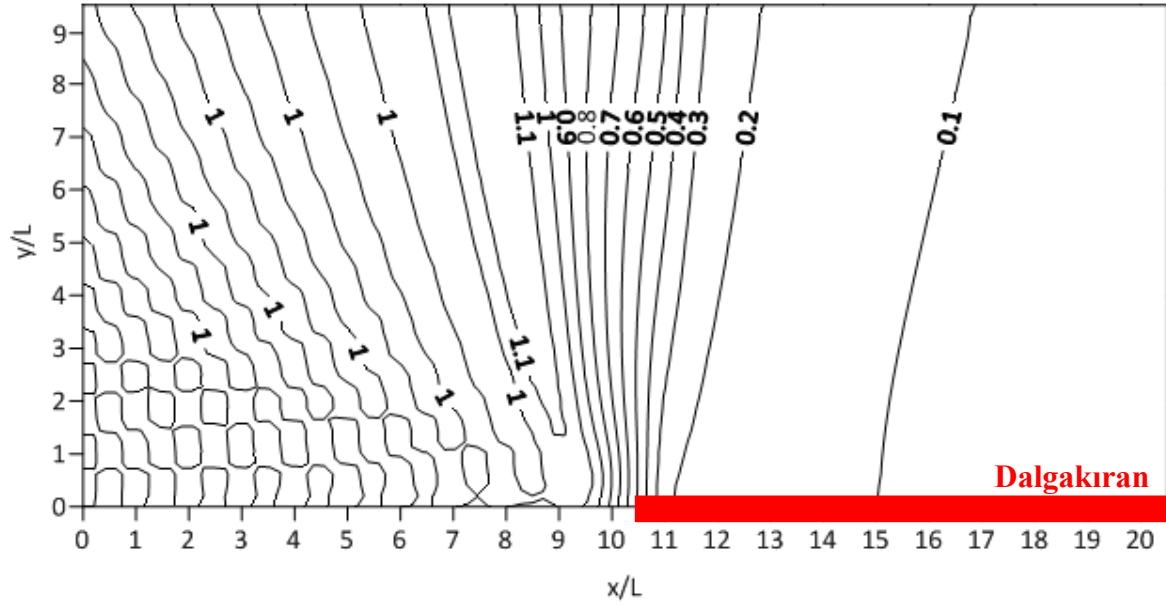
“Eş. 3.5” daha açık bir formda yazıldığında $f(\sigma)$ “Eş. 3.7” deki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} f(\sigma) &= \frac{1}{2}(i+1) \left[\int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2}\pi i u^2} du + \int_0^{\sigma} e^{-\frac{1}{2}\pi i u^2} du \right] \\ &= \frac{1}{2}(i+1) \left[\frac{1}{2}(1-i) + \int_0^{\sigma} \cos\left(\frac{1}{2}\pi u^2\right) du - i \int_0^{\sigma} \sin\left(\frac{1}{2}\pi u^2\right) du \right] \\ &= \frac{1}{2}(i+1) \left[\frac{1}{2}(1-i) + M - iN \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Burada M ve N terimleri “Eş. 3.8”deki Fresnel integralleridir.

$$M = \int_0^{\sigma} \cos\left(\frac{1}{2}\pi u^2\right) du \quad N = \int_0^{\sigma} \sin\left(\frac{1}{2}\pi u^2\right) du \quad (3.8)$$

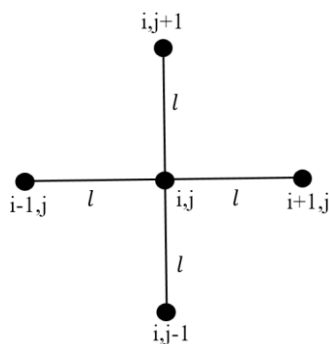
Elde edilen $F(x,y)$ fonksiyonunun modu ($H = \text{mod}(F(x,y))$) alındığında, dalgakıran arkasındaki herhangi bir (x,y) noktasındaki K_d (kırınım katsayısı=kırınımına uğrayan dalga yüksekliği/ gelen dalga yüksekliği) hesaplanabilmektedir. Söz konusu eşitlikler kullanılarak kırınım katsayısının dağılımı analitik olarak çözülmüştür (Şekil 3.1). Şekilde x ekseninde dalgakıran boyunca olan mesafenin dalga boyuna oranı (x/L) bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Analitik çözüm ile kırınım katsayısının (K_d) dağılımı

3.2. Sayısal Çözüm

Helmholtz eşitliğinin sayısal çözümü için iki boyutlu eliptik eşitliğe beş noktalı sonlu farklar metodu uygulanmıştır. Uzamsal türevler merkezi sonlu farklar ile yaklaşılmıştır. Noktalar arası mesafe x ve y yönlerinde eşit alınmış ve l olarak adlandırılmıştır. Açılıma ait çözüm molekülü Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Beş noktalı sonlu farklar çözüm molekülü

Sayısal çözümde dalga sayısı (k) elde edilirken lineer dispersiyon eşitliğinden (Eş. 3.9) yararlanılmıştır.

$$\sigma^2 = g k \tanh kh \text{ ve } L = L_0 \tanh kh \rightarrow k = \frac{\sigma^2}{g \frac{L}{L_0}} = \frac{\sigma^2 L_0}{g L} \quad (3.9)$$

Burada, $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ açısal frekans, T dalga periyodu, L dalga boyu, L_0 derin deniz dalga boyu, g yerçekimi ivmesi ve h su derinliğidir.

Herhangi bir derinlik için dalga boyu ise $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)$ kapalı fonksiyonundan iterasyon yapılarak elde edilmiştir. Sayısal çözümde hesaplama yapılırken kullanılan girdiler, dalga periyodu (T), su derinliği (h) ve çözüm ağı uzunluğu (l) olarak belirlenmiştir.

“Eş. 3.1”deki uzamsal türevlerin yaklaşımları “Eş. 3.10”da verilmiştir. “Eş. 3.11”de tüm sayısal eşitlik görülmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} &= \frac{F_{i+1,j} - 2F_{i,j} + F_{i-1,j}}{l^2} + O(l^2) \\ \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= \frac{F_{i,j+1} - 2F_{i,j} + F_{i,j-1}}{l^2} + O(l^2) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + k^2 F = \frac{F_{i+1,j} - 2F_{i,j} + F_{i-1,j}}{l^2} + \frac{F_{i,j+1} - 2F_{i,j} + F_{i,j-1}}{l^2} + k^2 F_{i,j} = 0 \quad (3.11)$$

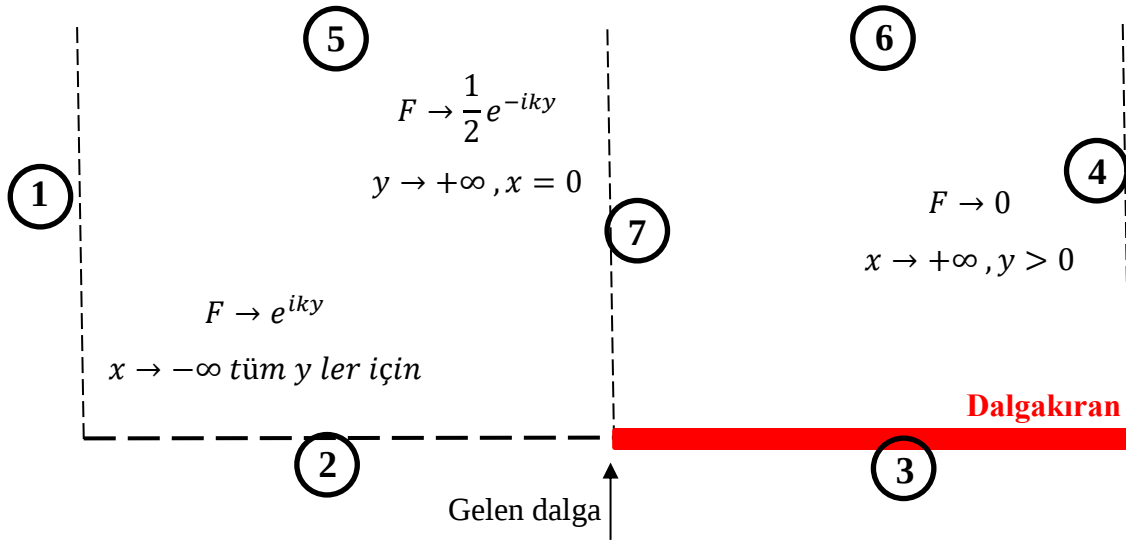
“Eş. 3.11”, “Eş. 3.12” ve “Eş. 3.13”teki gibi düzenlendiğinde, “Eş. 3.14” çözüm için gerekli hali almaktadır.

$$F_{i+1,j} - 2F_{i,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} - 2F_{i,j} + F_{i,j-1} + k^2 l^2 F_{i,j} = 0 \quad (3.12)$$

$$F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1} + (k^2 l^2 - 4)F_{i,j} = 0 \quad (3.13)$$

$$F_{i,j} = \frac{1}{(4 - k^2 l^2)} (F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}) \quad (3.14)$$

Sayısal çözümün yapılabilmesi için sınır koşulları Şekil 3.3’te tanımlanmaktadır.



Şekil 3.3. Sayısal çözüm için sınır koşulları

1 ve 2 numaralı sınır koşullarında (gelen dalga ve sol sınır)

$$F = e^{iky}$$

3 ve 4 numaralı sınır koşullarında (dalgakıran ve sağ sınır)

$$F = 0$$

5 ve 6 numaralı sınır koşullarında (giden dalga)

$$\frac{\partial F}{\partial y} = 0$$

7 numaralı sınır koşulunda (dalgakıranın gölge sınırı)

$$F = \frac{1}{2} e^{-iky}$$

Uzamsal merkezi fark yaklaşımları için Von Neumann stabilite analizi ile bir stabilite koşulu araştırılmıştır. Bu işlem için eşitliğin sade hali “Eş. 3.15”te görülmektedir. Dalga fonksiyonu haricindeki terimler “c” isimli bir katsayı olarak gösterilmiştir (Eş. 3.16).

$$F_{i,j} = c (F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}) \quad (3.15)$$

$$c = \frac{1}{(4 - k^2 l^2)} \quad (3.16)$$

Von Neumann stabilite analizi için “Eş. 3.15” içindeki her bir dalga fonksiyonu terimi Fourier serisi ile açılmaktadır (Eş. 3.17).

$$\begin{aligned} F_{i,j} &= S e^{I(\theta i + \phi j)} \\ F_{i+1,j} &= S e^{I(\theta(i+1) + \phi j)} \\ F_{i-1,j} &= S e^{I(\theta(i-1) + \phi j)} \\ F_{i,j+1} &= S e^{I(\theta i + \phi(j+1))} \\ F_{i,j-1} &= S e^{I(\theta i + \phi(j-1))} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Burada S dalga genliği, θ ve ϕ faz açıları, i ve j koordinatlardır.

“Eş. 3.17”deki açılımlar “Eş. 3.15”te yerine yazıldığında “Eş. 3.18” elde edilmektedir.

$$S e^{I(\theta i + \phi j)} = c \left(S e^{I(\theta(i+1) + \phi j)} + S e^{I(\theta(i-1) + \phi j)} + S e^{I(\theta + \phi(j+1))} + S e^{I(\theta + \phi(j-1))} \right) \quad (3.18)$$

Eşitliğin iki tarafındaki $e^{I(\theta i + \phi j)}$ terimleri elendiğinde “Eş. 3.19” oluşmaktadır.

$$S = c S \left(e^{I\theta} + e^{-I\theta} + e^{I\phi} + e^{-I\phi} \right) \quad (3.19)$$

“Eş. 3.19”un “Eş. 3.20”deki trigonometrik dönüşümler ile düzenlenmesi sonucunda “Eş. 3.21” elde edilmektedir.

$$\cos\theta = \frac{e^{I\theta} + e^{-I\theta}}{2} \quad \cos\phi = \frac{e^{I\phi} + e^{-I\phi}}{2} \quad (3.20)$$

$$S^{k+1} = S^k \underbrace{c (2\cos\theta + 2\cos\phi)}_G \quad (3.21)$$

Burada k+1 ve k hesap adımlarını temsil etmektedir. k+1 hesap adımındaki hatanın k hesap adımındaki hataya oranının 1’den küçük veya eşit olması gerekmektedir. Bu şekilde hatanın artmayacağı ve sönümleneceği bir stabilite koşulu elde edilebilmektedir. Stabil çözüm için genlik faktörünün, $|G| \leq 1$ olması gerekmektedir. Kosinüsün maksimum ve minimum değerlerine (+1,-1) göre c’nin alabileceği değerler incelendiğinde “Eş. 3.22” ve “Eş. 3.23” ortaya çıkmaktadır.

$$-\frac{1}{4} \leq c \leq \frac{1}{4} \quad (3.22)$$

$$-\frac{1}{4} \leq \frac{1}{(4 - k^2 l^2)} \leq \frac{1}{4} \quad (3.23)$$

“Eş. 3.23” düzenlendiğinde 2 koşul oluşmaktadır (Eş. 3.24).

$$k^2 l^2 \leq 8 \quad ve \quad k^2 l^2 \leq 0 \quad (3.24)$$

Çözüm için bağlayıcı koşul $k^2 l^2 \leq 0$ olarak elde edilmektedir. Helmholtz eşitliğine beş noktalı merkezi sonlu fark açılımı ile çözüm bulunması için k ve l değerlerinin sıfıra yaklaşması gerekmektedir. Diğer bir deyişle çok çok büyük dalga boylarının ve çok çok küçük çözüm ağı uzunluğunun seçilmesi gerekmektedir.

Beş nokta sonlu fark çözümünde stabilite koşulunun sağlanması için k^2 terimi belirleyicidir. Bu terimi farklı bir şekilde ele alabilmek için önerilen bir yöntemde [47] $F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}$ terimi yüzey dalga çözümü ile yer değiştirmektedir (Eş. 3.25 ve Eş. 3.26).

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + k^2 F = \frac{F_{i+1,j} + F_{i-1,j} - 4F_{i,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}}{l^2} + k^2 F_{i,j} = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{F_{i+1,j} + F_{i-1,j} - 4F_{i,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}}{l^2} = -k^2 F_{i,j} \quad (3.26)$$

$F_{i,j} = e^{i(k_1 x + k_2 y)}$ terimi bileşenlerine ayrılarak ($k_1 = k \cos \theta, k_2 = k \sin \theta$) $F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}$ terimi “Eş. 3.27”deki şekilde düzenlenmektedir.

$$F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1} = e^{i(k_1(x+l) + k_2 y)} + e^{i(k_1(x-l) + k_2 y)} + e^{i(k_1 x + k_2(y+l))} + e^{i(k_1 x + k_2(y-l))} \quad (3.27)$$

$$F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1} = e^{i(k_1 x + k_2 y)} (e^{ik_1 l} + e^{-ik_1 l} + e^{ik_2 l} + e^{-ik_2 l})$$

“Eş. 3.27”de $\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$ dönüşümü kullanılarak “Eş. 3.28” elde edilmektedir.

$$e^{i(k_1 x + k_2 y)} (e^{ik_1 l} + e^{-ik_1 l} + e^{ik_2 l} + e^{-ik_2 l}) = F_{i,j} 2(\cos(k_1 l) + \cos(k_2 l)) \quad (3.28)$$

“Eş. 3.28”, “Eş. 3.26”da yerine koyulduğunda, “Eş. 3.29” oluşmaktadır.

$$\frac{F_{i+1,j} + F_{i-1,j} - 4F_{i,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}}{l^2} = \frac{2(\cos(k_1 l) + \cos(k_2 l))F_{i,j} - 4F_{i,j}}{l^2} = -k^2 F_{i,j} \quad (3.29)$$

“Eş. 3.29”un iki tarafındaki $F_{i,j}$ terimleri elendiğinde orijinal k yerine kullanılacak $\hat{k}$ elde edilmektedir (Eş. 3.30 ve Eş. 3.31).

$$\frac{2(\cos(k_1 l) + \cos(k_2 l)) - 4}{l^2} = -\hat{k}^2 \quad (3.30)$$

$$\frac{4 - 2(\cos(k_1 l) + \cos(k_2 l))}{l^2} = \hat{k}^2 \quad (3.31)$$

Bu durumda eşitliğin son hali “Eş. 3.32”de görülmektedir.

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + k^2 F =$$

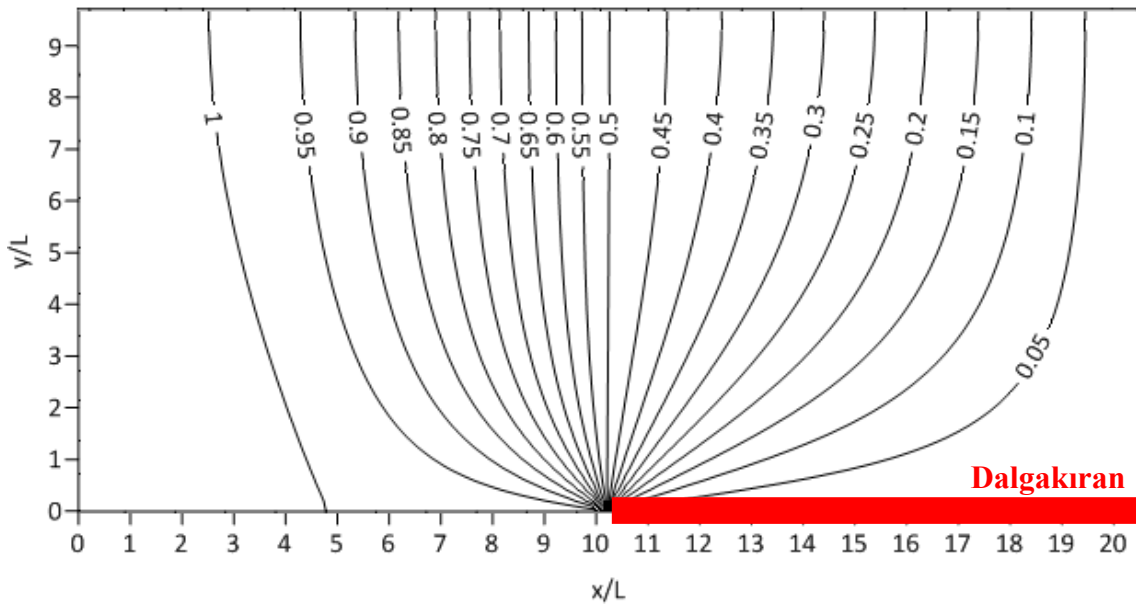
$$\frac{F_{i+1,j} + F_{i-1,j} - 4F_{i,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}}{l^2} + \frac{4 - 2(\cos(k_1 l) + \cos(k_2 l))}{l^2} F_{i,j} = 0 \quad (3.32)$$

“Eş. 3.32”, “Eş. 3.33”te düzenlenerek “Eş. 3.34” çözüm için kullanılacak hali almaktadır.

$$\frac{F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}}{l^2} = \frac{2(\cos(k_1 l) + \cos(k_2 l))}{l^2} F_{i,j} \quad (3.33)$$

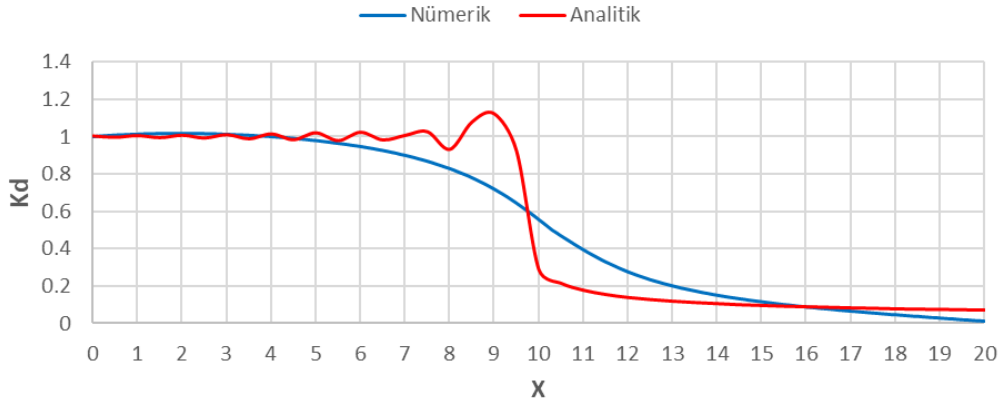
$$F_{i,j} = \frac{1}{2(\cos(k_1 l) + \cos(k_2 l))} (F_{i+1,j} + F_{i-1,j} + F_{i,j+1} + F_{i,j-1}) \quad (3.34)$$

“Eş. 3.34” kullanılarak $l = L/10$ için yapılan çözüm Şekil 3.4’te görülmektedir.

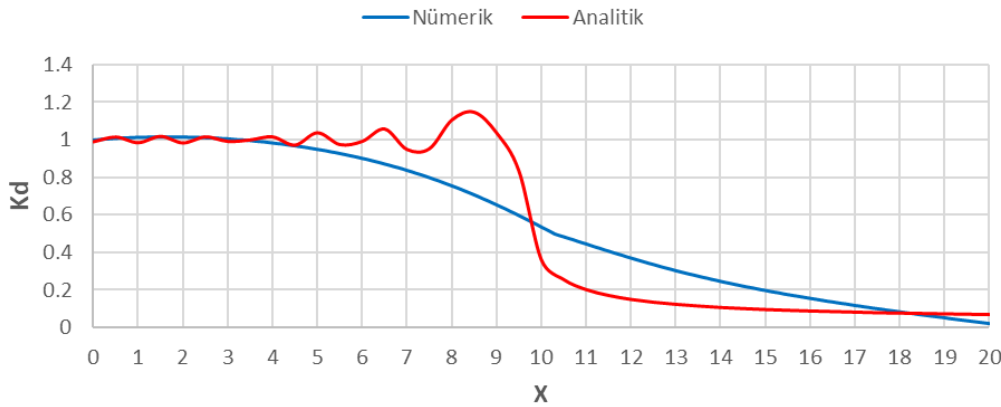


Şekil 3.4. Sayısal çözüm ile kırınım katsayısının (K_d) dağılımı

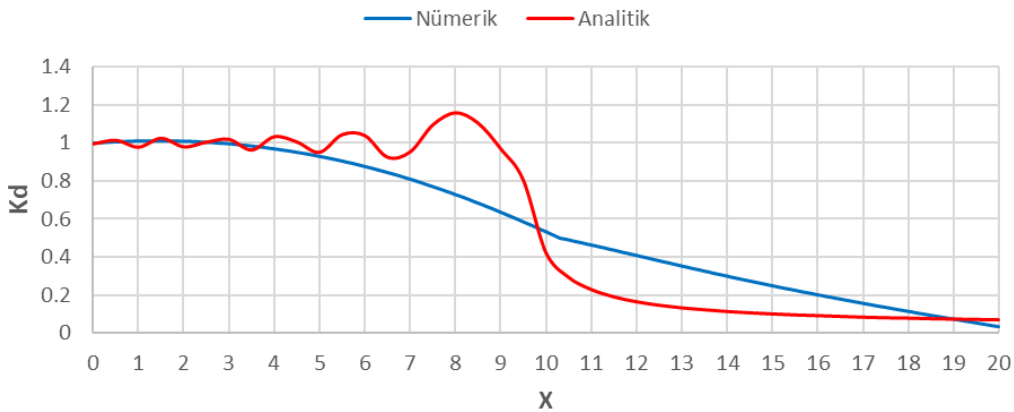
Analitik ve sayısal çözümlerin dalgakırından dik yönde dalga boyunun iki, dört ve altı katı ($y=2L$, $y=4L$ ve $y=6L$) uzaklığındaki kırınım katsayısı değerlerinin yatay değişimleri sırasıyla Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.5. Analitik ve sayısal çözüm ile dalgakırından $y=2L$ dik uzaklıkta kırınım katsayısının (K_d) yatay değişimi



Şekil 3.6. Analitik ve sayısal çözüm ile dalgakırından $y=4L$ dik uzaklıkta kırınım katsayısının (K_d) yatay değişimi



Şekil 3.7. Analitik ve sayısal çözüm ile dalgakırından $y=6L$ dik uzaklıkta kırınım katsayısının (K_d) yatay değişimi

Sayısal çözümün analitik çözüme yakınsamasının belirlenmesi için tüm hatlarda ve y/L'nin 1-9 arasındaki hatlarda, kök ortalama kare hatası (RMSE, Eş. 3.35), yüzde kök ortalama kare hatası (RMSPE, Eş. 3.36), ortalama gerçek hata (MAE, Eş. 3.37), yüzde ortalama gerçek hata (MAPE, Eş. 3.38), yanlışlık (BIAS, Eş. 3.39), uyum indeksi (d, Eş. 3.40) ve korelasyon katsayısı (R, Eş. 3.41) ve olmak üzere 7 farklı değer ile karşılaştırma yapılmıştır. Hesaplamalar Çizelge 3.1'de görülmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (3.35)$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2} * 100\% \quad (3.36)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (3.37)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| * 100\% \quad (3.38)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i - P_i \quad (3.39)$$

$$d = \left(1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right) * 100\% \quad (3.40)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N ((P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right)}} \quad (3.41)$$

Burada, P sayısal çözüm sonucu, O analitik çözüm sonucu, N veri sayısıdır.

Çizelge 3.1. Analitik ve Sayısal Çözümlerin Karşılaştırılması

	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)
Tüm hatlar	0,157	71,96	0,112	48,9	0,001	96,10	94,18
y/L=9	0,176	80,25	0,135	56,2	0,002	94,38	93,10
y/L=8	0,176	82,41	0,134	57,6	0,005	94,44	93,07
y/L=7	0,175	82,79	0,132	57,7	0,006	94,60	93,21
y/L=6	0,171	81,18	0,128	56,5	0,007	94,91	93,43
y/L=5	0,166	77,44	0,122	53,9	0,006	95,36	93,78
y/L=4	0,158	71,31	0,112	49,4	0,004	95,96	94,29
y/L=3	0,145	62,02	0,099	42,6	0,002	96,74	95,06
y/L=2	0,127	51,37	0,082	34,5	-0,006	97,65	96,08
y/L=1	0,103	48,60	0,061	31,6	-0,015	98,58	97,37

Sayısal çözümde tüm hatların kırınım katsayılarının aritmetik ortalaması 0,5572, analitik çözümde ise 0,556 elde edilmiştir. Çalışma alanı, dalga ilerleme bölgesi (dalgakıranın sol tarafı) ve dalgakıran koruma alanı (kırınım bölgesi) olarak ikiye ayrıldığında, ilerleme bölgesindeki kırınım katsayılarının aritmetik ortalaması sayısal çözüm için 1,003, analitik çözüm için 0,903 bulunmuştur. Kırınım bölgesinde ise kırınım katsayılarının (K_d) aritmetik ortalaması sayısal çözümde 0,181, analitik çözümde 0,132 olarak hesaplanmıştır. Sayısal çözüm ile analitik çözüm arasındaki fark özellikle dalga ilerleme bölgesinden dalgakıran koruma bölgesine geçiş alanında meydana gelmektedir. Bu doğrultuda tüm hatlar değerlendirildiğinde, sayısal çözümde %48,9 yüzde ortalama gerçek hata ve %96,1 uyum indeksi ile analitik çözüme yaklaşmıştır. İki çözüm arasındaki farka bölgesel olarak bakıldığında ise dalga ilerleme bölgesinde %10, dalgakıran koruma alanında ise %37 yüzde ortalama gerçek hata hesaplanmaktadır.

4. YUMUŞAK EĞİM EŞİTLİĞİ

Kırınım ve sapma ayrı ayrı ele alınarak çözümlenebilmektedir. Bu iki olayın bir arada dikkate alınabilmesi ise yumuşak eğim eşitliği ile mümkündür. Düzenli dalgalar için iki boyutlu diferansiyel eşitlik Berkhoff [4] tarafından geliştirilmiştir. Rastgele yönlerden gelen dalgaların düzensiz batimetride ilerlemeleri üç boyutlu bir problemdir ve karmaşık lineer olmayan sınır koşullarını içermektedir. Berkhoff, bu üç boyutlu problemi basitleştirmek için, üç boyutlu hız potansiyelinin derinlik boyunca integre edilmesi ile lineer su dalgalarının ilerlemesinin tahmin edilebileceğini belirtmiştir. Bu sayede eşitlik, x ve y olarak iki boyutlu düzlemsel hale indirgenmiştir. Eşitliğin geliştirilmesinde dalga hareketinin lineer olduğu kabul edilmekte, taban sürtünmesi veya dalga kırılması kaynaklı enerji kayıpları dikkate alınmamaktadır.

Yumuşak eğim eşitliğinin türetilmesi için kullanılan temel eşitlikler üç boyutlu hız potansiyeli (Eş. 4.1) [4], harmonik dalgalar için serbest su yüzeyi sınır koşulu (Eş. 4.2) [4] ve deniz tabanı sınır koşuludur (Eş. 4.3) [4].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\sigma^2}{g} \phi = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = -h(x, y) \quad (4.3)$$

Bu eşitliklerde,

x,y : yatay koordinatlar

z : düşey koordinat

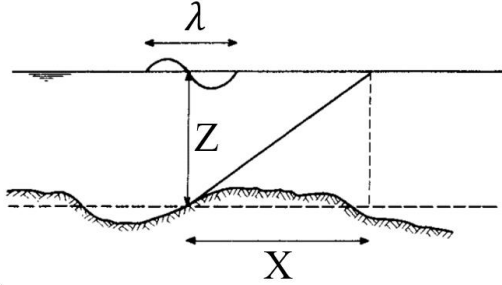
ϕ : 3 boyutlu hız potansiyeli

σ : açısal frekans

g : yerçekimi ivmesi

h : su derinliği

Kullanılan bazı boyutsuz parametreler, düşey mesafe (ortalama su derinliği, Z) ve Z derinliğindeki dalga boyu (λ) kullanılarak elde edilmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Boyutsuz parametrelerin belirlenmesinde kullanılan uzunluklar [4]

$$x' = \frac{x}{\lambda} \quad y' = \frac{y}{\lambda} \quad z' = \frac{z}{\lambda} \quad d = \frac{h}{Z} \quad (4.4)$$

“Eş. 4.1”, “Eş. 4.2” ve “Eş. 4.3”, boyutsuz parametrelere (Eş. 4.4) [4] göre düzenlendiğinde, “Eş. 4.5”, “Eş. 4.6” ve “Eş. 4.7” elde edilmektedir.

$$\Delta' \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z'^2} = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z'} - \delta \phi = 0 \quad z' = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z'} + \mu (\nabla' \phi \cdot \nabla' d) = 0 \quad z' = -\mu d \quad (4.7)$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan simgelerin açılımları “Eş. 4.8”deki [4] gibidir.

$$\nabla' = \left(\frac{\partial}{\partial x'}, \frac{\partial}{\partial y'} \right) , \quad \Delta' = \nabla'^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2}{\partial y'^2} \right) , \quad \delta = \frac{\sigma^2 \lambda}{g} , \quad \mu = \frac{Z}{\lambda} \quad (4.8)$$

Deniz tabanı değişiminin tanımlanması için yatay uzunluk (dalga boyu λ) yerine, taban eğimine karşılık gelen karakteristik bir uzunluk olarak yatay uzunluk X 'i kullanmak daha doğrudur. Buna göre “Eş. 4.9”daki [4] dönüşümler kullanılarak derinlik değişimi “Eş. 4.10”daki [4] gibi elde edilmektedir.

$$\bar{x} = \frac{x}{X}, \quad \bar{y} = \frac{y}{X}, \quad \gamma = \frac{Z}{X}, \quad \nabla' = \left(\frac{\partial}{\partial \bar{x}}, \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \right) \quad (4.9)$$

$$\nabla h = \gamma \bar{\nabla} d \quad (4.10)$$

Ardından su derinliğinin, ortalama su derinliğine oranının değişimi “Eş. 4.11” [4] ile elde edilir. (Devam eden eşitliklerde anlatımın basitleştirilmesi için (') simgeleri ihmal edilmiştir)

$$\nabla' d = \frac{\lambda}{Z} \nabla h = \epsilon \bar{\nabla} d \quad \text{burada} \quad \epsilon = \frac{\lambda}{X} \quad (4.11)$$

Yumuşak eğim eşitliğinin lineer teori ile hesaplamalarında, dalga hareketinin düşey bileşenlerinin f fonksiyonu ile ifade edildiği kabulü yapılmaktadır. Bu şekilde 3 boyutlu hız potansiyeli “Eş. 4.12” [4] gibi yazılabilmektedir. Burada ϕ su yüzeyindeki hız potansiyelini simgelemektedir.

$$\phi(x, y, z) = f(d, z; \mu) \phi(x, y, \sqrt{\epsilon} z) \quad (4.12)$$

“Eş. 4.12”, “Eş. 4.13”teki dönüşümler ile “Eş. 4.14” [4] haline gelmektedir.

$$\zeta = \frac{z}{\mu}, \quad v = \mu \epsilon^{\frac{1}{2}} = \frac{Z}{\sqrt{\lambda X}} \quad (4.13)$$

$$\phi(x, y, z) = f(d, \zeta; \mu) \phi(x, y, v \zeta) \quad (4.14)$$

Su yüzeyindeki hız potansiyeli $v \zeta$ parametresine göre Taylor serisi ile açıldığında “Eş. 4.15” [4] elde edilmektedir.

$$\phi = \phi_0(x, y) + v \zeta \phi_1(x, y) + v^2 \zeta^2 \phi_2(x, y) + \dots \quad (4.15)$$

μ parametresi v parametresinden bağımsız olarak sıfır (sığ su) ile sonsuz (derin deniz) arasında değişebilmektedir. f fonksiyonunun, μ parametresinin küçük değerleri için d parametresine göre türevlerinin μ^2 mertebesinde olacağı varsayıldığında, “Eş. 4.16”daki [4] terimler μ parametresinin ($0 \leq \mu < \infty$) her değeri için sonlu bir değer alır.

$$\frac{1}{\mu^2} \frac{\partial f}{\partial d} \quad ve \quad \frac{1}{\mu^2} \frac{\partial^2 f}{\partial d^2} \quad (4.16)$$

“Eş. 4.14” ve “Eş. 4.15”, “Eş. 4.17”deki [4] bağıntı kullanılarak “Eş. 4.7”de yerine konduğunda $v \rightarrow 0$ limit değeri için “Eş. 4.18”deki [4] 3 koşul oluşmaktadır.

$$\nabla f = \epsilon \frac{\partial f}{\partial d} \bar{\nabla} d \quad (4.17)$$

- $\frac{\partial f}{\partial \zeta} = 0 \quad \zeta = -d$
 - Tek sayılı fonksiyonlar (φ_k) sıfırdır
 - Çift sayılı fonksiyonlar (φ_k) , φ_0 fonksiyonu ile tanımlanabilir.
- (4.18)

“Eş. 4.14” ve “Eş. 4.15”, “Eş. 4.6”da yerine konduğunda, “Eş. 4.19” [4] elde edilmektedir.

$$\frac{\partial f}{\partial \zeta} = \delta \mu f = 0 \quad \zeta = -0 \quad (4.19)$$

Bu durumda, bilinmeyen fonksiyonlar olarak iki boyutlu su yüzeyindeki hız potansiyeli fonksiyonu (φ_0) ve f fonksiyonu kalır.

“Eş. 4.14” ve “Eş. 4.15”, “Eş. 4.5”te yerine konduğunda, v parametresinin küçük değerleri için “Eş. 4.20”deki [4] ilk yaklaşım elde edilmektedir.

$$\mu^2 f \Delta \varphi_0 + \frac{\partial^2 f}{\partial \zeta^2} \varphi_0 = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta \varphi_0}{\varphi_0} = -\frac{1}{\mu^2 f} \frac{\partial^2 f}{\partial \zeta^2} \quad (4.20)$$

“Eş. 4.20”nin sol tarafındaki terimler sadece x ve y ’nin fonksiyonudur. Bu nedenle sağ taraftaki terimler de x ve y ’nin fonksiyonu olmak durumundadır. Bu nedenle sağ taraftaki terimler “Eş. 4.21”deki x ve y ’nin fonksiyonu olan $\mathcal{K}$ fonksiyonuna eşitlenir.

$$\frac{1}{\mu^2 f} \frac{\partial^2 f}{\partial \zeta^2} = \mathcal{K}^2(x, y) \quad (4.21)$$

“Eş. 4.21” [4], “Eş. 4.18”deki ilk koşul ve $\zeta = 0$ da $f = 1$ koşuluyla birlikte f fonksiyonunun çözümü elde edilir (Eş. 4.22) [4]. $\mathcal{K}$, boyutsuz dalga sayısıdır. İki boyutlu φ_0 fonksiyonu için “Eş. 4.20” tarafından verilenden daha yüksek dereceli bir eşitlik elde etmek için, “Eş. 4.5” f fonksiyonu ile çarpıldıktan sonra -d'den sıfıra ζ 'ye kadar integre edilir (Eş. 4.23) [4].

$$f = \frac{\cosh[\mathcal{K}\mu(\zeta + d)]}{\cosh[\mathcal{K}\mu d]} \quad (4.22)$$

$$\int_{-d}^0 f^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \zeta^2} d\zeta = f^2 \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta = -d}^{\zeta = 0} - \int_{-d}^0 \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} \frac{\partial f^2}{\partial \zeta} d\zeta \quad (4.23)$$

$$\int_{-d}^0 f \varphi \frac{\partial^2 f}{\partial \zeta^2} d\zeta = \mu^2 \mathcal{K}^2 \int_{-d}^0 f^2 \varphi d\zeta$$

“Eş. 4.23”te φ fonksiyonuna göre seri açılımı sonucunda “Eş. 4.24” [4] elde edilir.

$$\left(\int_{-d}^0 f^2 d\zeta \right) \Delta \varphi_0 + \mathcal{K}^2 \left(\int_{-d}^0 f^2 d\zeta \right) \varphi_0 + \frac{v^2}{\mu^2} \frac{\partial}{\partial d} \left(\int_{-d}^0 f^2 d\zeta \right) (\nabla \varphi_0 \cdot \bar{\nabla} d) + O(v^2) + \frac{1}{\mu^2} O(v^4) = 0 \quad (4.24)$$

“Eş. 4.25” [4] ve Şekil 4.1'deki λ ve Z tanımlamalarına göre δ and μ terimleri arasında bulunan ilişki “Eş. 4.26” [4] daki gibidir.

$$\left(\int_{-d}^0 f^2 d\zeta \right) = \frac{n\delta}{\mathcal{K}^2 \mu} \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2\mathcal{K}\mu d}{\sinh(2\mathcal{K}\mu d)} \right) \quad (4.25)$$

$$\delta = 2\pi \tanh(2\pi\mu) \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2\mathcal{K}\mu d}{\sinh(2\mathcal{K}\mu d)} \right) \quad (4.26)$$

μ parametresinin küçük değerleri için $\int_{-d}^0 f^2 d\zeta$ integral işlemi birinci derecedendir. μ parametresinin değerleri için 3 durum incelenmektedir.

A: Eğer $\mu \geq 1$ ise; Bu koşul dalga sayısında değişikliğin olmadığı derin deniz durumudur. $O(v^2)$ derecesindeki terimlerin ihmal edilmesi ile derin deniz için kırınımı tanımlayan “Eş. 4.27” [4] elde edilmektedir.

$$\Delta\varphi_0 + \frac{\sigma^2}{g}\varphi_0 = 0 \quad (4.27)$$

B: Eğer $\mu = v \ll 1$ ise; Bu koşul sığ su anlamını taşımaktadır. $O(v^2)$ derecesindeki terimlerin ihmal edilmesi ile “Eş. 4.28”deki sığ su eşitliği elde edilmektedir. “Eş. 4.28”deki [4] c terimi ($c = \sqrt{gh}$) faz hızıdır.

$$\nabla \cdot (c^2 \nabla \varphi_0) + \sigma^2 \varphi_0 = 0 \quad (4.28)$$

C: Eğer $v < \mu < 1$ ise; Bu koşulda “Eş. 4.24”deki $O(v^2)$ derecesindeki terimlerin ihmal edilmesi ile “Eş. 4.29” [4] elde edilmektedir.

$$\Delta\varphi_0 + k^2\varphi_0 + \frac{k^2}{n} \frac{\partial}{\partial h} \left(\frac{n}{k^2} \right) (\nabla\varphi_0 \cdot \nabla h) = 0 \quad (4.29)$$

“Eş. 4.29”, “Eş. 4.30”daki [4] terimler kullanılarak düzenlendiğinde kırınım ve sapmanın bir arada dikkate alındığı sonuç eşitliği “Eş. 4.31” [4] ile elde edilmektedir.

$$c = \frac{\sigma}{k} \quad , \quad c_g = nc \quad , \quad \sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad , \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (4.30)$$

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla \varphi_0) + \frac{\sigma^2 c_g}{c} \varphi_0 = 0 \quad (4.31)$$

5. REF/DIF 1 DALGA MODELİ

REF/DIF 1 dalga ilerlemesi için yumuşak eğim eşitliğini temel alan parabolik formda zayıf lineer olmayan bir sayısal modeldir. 1983 yılında James Kirby ve Robert Dalrymple [48] tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Model sığ suya doğru dalga ilerlemesi sırasında gerçekleşen sıkışma, sapma, kırınım, dalga-akıntı ilişkisi, taban pürüzlülüğü ve dalga kırılması kaynaklı enerji kayıplarını dikkate alabilmektedir [49].

Modele akıntı hız bileşenlerinin girdi olarak verilmesi durumunda, model akıntıların güçlü olduğu yerlerde akıntı etkisiyle dalga yüksekliğinde ve yönünde meydana gelebilecek değişimleri hesaplayabilmektedir.

Yumuşak eğim eşitliği eliptik bir eşitliktir. Eliptik eşitliklerin çözümleri için model alanındaki tüm sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle eliptik eşitliğin çözümü parabolik eşitliklere göre zor ve karmaşıktır. Hesaplamanın kolaylaştırılması için parabolik eşitliğin çözümü, eliptik eşitlik çözümüne göre bazı sınırlandırmalar içermektedir. Parabolik modelde dalga, ilerleyen ve geri dönen (yansıyan) olarak ikiye ayrılmakta ve yansıyan dalga ihmal edilmektedir. Bu durumda dalga ilerleme yönünde bir sınır koşulu tanımlanmasına ihtiyaç kalmamaktadır. Bu sayede modelin çalışma süresi kısalmakta ve gerekli işlemci gücü azalmaktadır.

REF/DIF 1 parabolik dalga modeli, eliptik çözümlere göre daha büyük denizel alanları daha büyük çözüm ağı uzunlukları ile ele alabilmektedir. Genel olarak çözüm ağı uzunluğunun dalga boyunun 5'te biri olması gerekmektedir [49]. Ancak geri dönen dalgaların ihmal edilmesinden dolayı, dalga değişimini önemli derecede etkileyecek yansıma yüzeylerinin bulunduğu alanlarda kullanılamamaktadır. Liman içi çalkantı problemleri REF/DIF 1 dalga modeli ile çözülememektedir.

5.1. Modelin Kabulleri

- Batimetri değişimi dalga boyuna oranla uzun mesafede gerçekleşir. Diğer bir deyişle deniz derinlikleri ani değişim göstermez. Bu kabul yumuşak eğim eşitliğinin genel kabulüdür. Ancak yıllar içerisinde araştırmacıların yumuşak eğim eşitliğini ani deniz taban değişimlerine uygulaması sonucunda, 1/3 deniz taban eğimine kadar yumuşak eğim eşitliğinin doğru sonuçlar üretebildiği belirlenmiştir.
- REF/DIF 1 dalga modeli Stokes pertürbasyon açılımı ile elde edilmiştir. Bu nedenle modelin geçerliliği Stokes dalgalarının geçerli olduğu alanlarla sınırlıdır. Bu sınırın tayini için Ursell parametresi (Eş. 5.1) kullanılmaktadır.

$$U = \frac{H L^2}{h^3} \quad (5.1)$$

Burada, U Ursell parametresi, H dalga yüksekliği, L dalga boyu, h su derinliğidir.

Ursell parametresinin 40'tan büyük değerleri için model geçerli değildir. Bu değere ulaşıldığında sığ suya geçilmektedir. Model, sığ su için Hedges (1976) tarafından soliter dalgalar için önerilmiş farklı bir dispersiyon eşitliğini kullanmaktadır. Bu sayede REF/DIF 1 sığ su koşulları için de doğru sonuçlar üretebilmektedir.

- Dalga geliş açısı, dalga girdi sınırı normaline göre $\pm 70^\circ$ aralığında girilmelidir. Daha geniş açılı dalgalar için model geçerli değildir.

5.2. Modelin Teorisi

Yumuşak eğim eşitliğinde değişken taban topoğrafyası dikkate alınırken, dalga kırınımı için sabit su derinliğinde parabolik dalga eşitliği (Eş. 5.2) de geliştirilmiştir [50].

$$\frac{\partial A}{\partial x} - \frac{i}{2k} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad (5.2)$$

Burada, A su seviyesi değişimine (Eş. 5.3) bağlı kompleks dalga genliğidir.

$$\eta = A e^{i(kx - \sigma t)} \quad (5.3)$$

“Eş. 5.2” çoklu ölçek yaklaşımı ile 3. dereceden Stokes dalgalarının ilerlemesini ele alabilen lineer olmayan “Eş. 5.4” haline getirilmiştir [51]. “Eş. 5.4” içerisindeki terimler “Eş. 5.5” ve “Eş. 5.6”da verilmektedir.

$$2i \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{k} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - K' |A|^2 A = 0 \quad (5.4)$$

Burada, A su seviyesi değişimine bağlı kompleks dalga genliğidir.

$$K' = k^3 \left(\frac{C}{C_g} \right) D \quad (5.5)$$

$$D = \frac{\cos 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh}{8 \sinh^4 kh} \quad (5.6)$$

Burada $i = \sqrt{-1}$, C dalga hızı, C_g grup hızı, D lineer olmayan katsayı ve x dalga ilerleme yönüdür.

REF/DIF 1, yukarıdaki iki çalışmada kullanılan yaklaşımların temel özelliklerinin birleştirilmesi, yumuşak eğim eşitliğinin değişken derinlik özelliğinin korunması ve ek terimlerin eklenmesi ile geliştirilmiştir. REF/DIF 1 lineer olmayan kırınım eşitliği ile lineer yumuşak eğim eşitliğini bir arada ele alır. Bu süreçte, hız potansiyeli eşitliği, x ve y yönlerinde farklı ölçeklerle pertürbasyon açılımına tabi tutulmuş ve elde edilen değerler viskoz olmayan çevrintisiz akım kabulü ile $z=0$ da serbest su yüzeyi sınır koşullarına uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda “Eş. 5.7” elde edilmiştir [52].

$$2ikCC_g \frac{\partial A}{\partial x} + 2k(k - k_0)(CC_g)A + i \frac{\partial(kCC_g)}{\partial x} A + \frac{\partial}{\partial y} \left(CC_g \frac{\partial A}{\partial y} \right) - k(CC_g)K' |A|^2 A = 0 \quad (5.7)$$

“Eş. 5.7”ye deniz tabanı ve kırılma kaynaklı enerji kayıplarına ait terimler eklenerek modelde kullanılan “Eş. 5.8” son haline getirilmiştir. “Eş. 5.8” içindeki terimler “Eş. 5.9” – “Eş. 5.13”te verilmektedir.

$$\begin{aligned}
& (C_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} - 2\Delta_1 V \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U)A \\
& + \left\{ \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g + U}{\sigma} \right) - \Delta_1 \sigma \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V}{\sigma} \right) \right\} A + i\Delta' \frac{\partial}{\partial y} \left[(CC_g - V^2) \frac{\partial A}{\partial y \sigma} \right] \\
& - i\Delta_1 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[UV \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[UV \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} + \frac{i\sigma k^2}{2} D|A|^2 A + \frac{w}{2} A \\
& - \frac{b_1}{k} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[(CC_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + 2i \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right) \right\} \\
& + b_1 \beta \left\{ 2i\omega U \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) + 2i\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\
& - b_1 \beta \left\{ 2UV \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[(CC_g - V^2) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\
& - \frac{ib_1}{k} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (\omega V) + 3 \frac{\partial}{\partial x} (\omega U) \right\} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) - \Delta_2 \left\{ \omega U \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} \omega \frac{\partial U}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\
& + ik\omega U(a_0 - 1) \left(\frac{A}{\sigma} \right) = 0
\end{aligned} \tag{5.8}$$

$$\beta = \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2k^2(CC_g - U^2)} \frac{\partial(CC_g - U^2)}{\partial x} \tag{5.9}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1 \tag{5.10}$$

$$\Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1 \tag{5.11}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1 \tag{5.12}$$

$$\Delta' = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k} \tag{5.13}$$

Eşitliklerde, C dalga hızı, C_g grup hızı, U x yönünde akıntı hızı, V y yönünde akıntı hızı, k dalga sayısı, $\bar{k}$ y eksenini boyunca ortalama dalga sayısı, σ açısal frekans, ω absolute frekans, w taban sürtünmesi ve dalga kırılmasından kaynaklanan enerji kaybı, a₀, a₁ ve b₁ dalga geliş açısına göre seçilen katsayılarıdır.

Modeldeki dalga kırılma indeksi (dalga yüksekliğinin su derinliğine oranı) 0,78 olarak alınmaktadır. Bu değere erişildiğinde dalganın kırıldığı kabul edilmektedir.

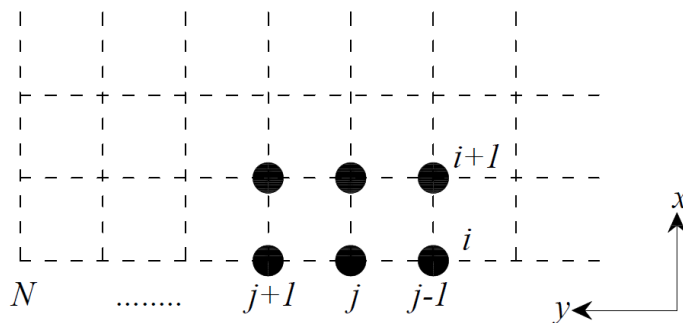
Su yüzeyinde ve deniz tabanında, suyun veya suya yayılmış bir sıvının viskozitesi nedeniyle oluşan laminar sınır tabakası nedeniyle dalga yüksekliğinde azalma meydana gelmektedir. Modelde böyle bir durum için sıvıya ait kinematik viskozite değeri girilerek enerji kaybı hesap edilebilmektedir.

Derin deniz koşullarında deniz tabanındaki hızların nispeten küçük olduğu durumlarda laminar koşullar yeterli olabilmektedir. Ancak yakın kıyı bölgesinde, deniz tabanında akımın türbülanslı olması beklenmektedir. Bu durumda model, türbülanslı akım için Darcy-Weisbach pürüzlülük faktörü ile enerji kaybını ele alabilmektedir.

Deniz tabanının kum olması durumunda ve kum taneleri arasındaki görece boşluklu yapı nedeniyle, bu boşluklara doğru bir akış oluştuğu kabul edilmektedir. Buna göre deniz taban malzemesine ait geçirimsizlik katsayısı tanımlanarak enerji kaybı dikkate alınabilmektedir.

5.3. Sonlu Farklar Çözümü ve Sınır Koşulları

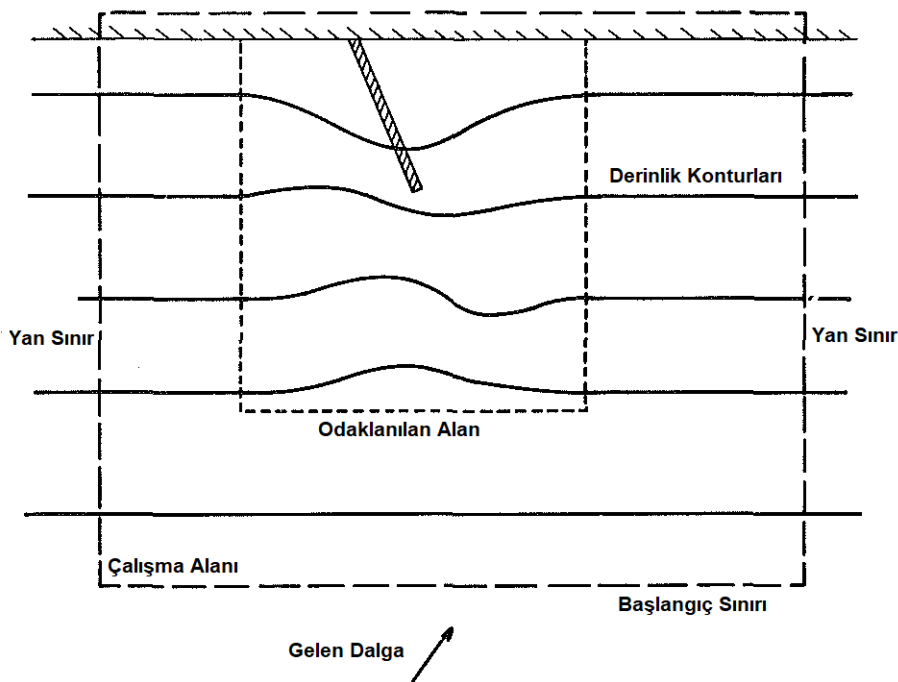
Model Crank-Nicholson sonlu farklar metodu ile çözülmektedir. İmplicit çözüm yöntemi, x ve y yönünde 2. derece doğruluk sağlamaktadır. 1. Derece türevlere ileri sonlu farklar ikinci derece türevlere ise merkezi sonlu farklar uygulanmaktadır. Çözümde i satırı ile i+1 satırı arasında orta noktaya göre açılım yapılarak iki satır değerleri toplanıp ikiye bölünmektedir. i satırı bilinen değerler olup i+1 satırı bilinmeyen değerlerdir. Çözüm satır satır yapılmakta, i ve i+1 satırının tüm j değerleri için matris çözümü ile ilerlenmektedir. Buna göre altı noktalı Crank-Nicholson çözüm molekülü Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Crank-Nicholson çözüm molekülü

Modelde sonlu farklar yöntemi dörtgen çözüm alanında uygulanmaktadır. X yönünde çözüm ağı uzunluğu Δx , y yönünde çözüm ağı uzunluğu ise Δy olarak tanımlanmıştır. Çözüm ağı uzunluğu iki yönde de farklı seçilebilmektedir. Modelin stabilitesi için çözüm ağı uzunluğu seçimi önemlidir. Çözüm ağı uzunluğunun optimum dalga boyunun 5'te 1'i seçilmesi önerilmektedir. Model tekil (düzenli) dalgaların ilerlemesini ele alabildiğinden kullanılan periyoda ve dalga giriş sınırındaki derinliğe bağlı olarak hesaplanacak dalga boyunun 5'te 1'i modelin çalışması için yeterlidir.

Modelde tanımlanması gereken iki adet sınır koşulu bulunmaktadır. Biri başlangıç açık deniz sınır koşulu, diğeri yanal sınır koşuludur. Başlangıç açık deniz sınır koşulunda, dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga açısı girilmektedir. Yanal sınır koşulunda ise yan kenarların durumu belirlenmektedir. Bu aşamada açık ve kapalı sınır koşulu olarak adlandırılan 2 alternatif bulunmaktadır. Açık sınır koşulunda, gelen dalgaların yanal sınırdan geçerek model alanına geri dönmemesi hedeflenmektedir. Kapalı sınır koşulunda ise yan kenarlarda yansıma sınır koşulu tanımlanmaktadır. Kenarın bir iç noktası ile kenar dışındaki farazi bir noktanın değerleri aynı kabul edilmektedir. Açık sınır koşulunda daha az olmakla beraber kapalı sınır koşulunda açılı dalgalarda model alanına yansıyan dalgaların geri dönme durumu oluşmaktadır. Bu nedenle sınır koşulu seçimine göre odaklanılan alandan daha büyük bir çalışma alanının kullanılması gerekmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Çalışma alanının tanımlanması

5.4. Modelin Kullanımı

RED/DIF 1 parabolik dalga modeli fortran programlama dilinde yazılmıştır. Bu tez çalışmasında modelin v2.5 versiyonu kullanılmıştır. Modelin sadece kaynak kodu bulunmakta, herhangi bir kullanıcı dostu ara yüzü bulunmamaktadır. Model kaynak kodu Microsoft Developer Studio programı ile derlenmiştir.

Modelin, param.h, indat.dat, refdat.dat olmak üzere 3 adet girdi dosyası bulunmaktadır. Bu dosyaların içeriği her çalışmaya özgü olarak değiştirilmekte veya düzenlenmektedir. Dosyaların içeriği ve düzenlenme koşulları aşağıda özetlenmektedir.

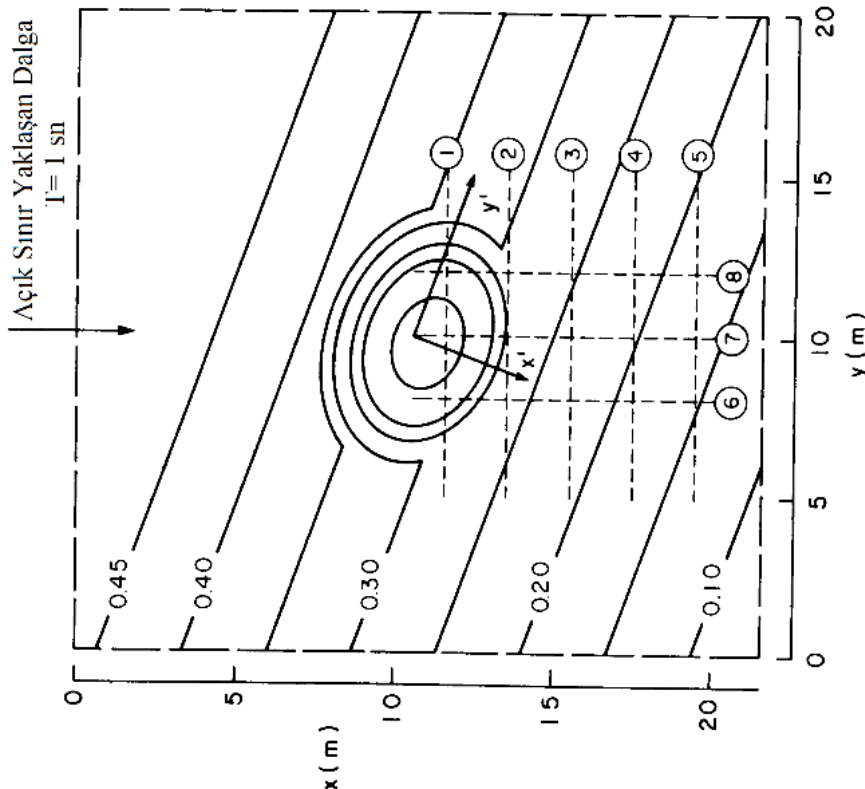
- param.h : Çalışma alanının x ve y yönünde maksimum çözüm noktası sayısı, çözüm ağı sıklaştırılma sayısı ve dalga yön sayısı bu dosyada bulunur. Model içerisinde alt çözüm ağı oluşturularak daha fazla nokta ile çalışılması için çözüm ağı sıklaştırılması yapılabilmektedir. Bu durumda çalışma alanında toplam çözüm noktası sayısı artmaktadır. Çalışma alanında, x yönünde sıklaştırma dahil toplam çözüm noktası sayısı “*ixr*” ve y yönünde sıklaştırma dahil toplam çözüm noktası sayısı “*iy*” değişkenleri ile tanımlanmaktadır. Alt çözüm ağı (sıklaştırma) için x yönündeki nokta sayısı “*ix*”, y yönündeki sayı “*iy*” ile tanımlanmaktadır. Modelde aynı periyoda ve farklı yüksekliklere sahip birden fazla dalga bir defa da çözümlenebilmektedir. Bu dalga sayısı da “*ncomp*” değişkeni ile tanımlanmaktadır.
- indat.dat : Modelin çalışması için gerekli bilgiler bu dosyaya girilir. Modelin kontrol dosyasıdır. Modelin okuyacağı ve çıktı oluşturacağı dosya isimleri, x ve y yönlerindeki ana çözüm ağı nokta sayısı “*mr*” ve “*nr*”, akıntı girdisi olup olmadığı, x ve y yönlerindeki çözüm ağı uzunlukları “*dxr*” ve “*dyr*”, sıklaştırma olup olmayacağı, taban sürtünmesi enerji kaybı türü seçimi “*iff*”, dalga periyodu “*freq*”, dalga genliği “*amp*”, gelgit kaynaklı sabit su seviyesi değişimi “*tide*”, dalga yönü “*dir*” vb. bilgiler bu dosyada yer alır.
- refdat.dat : Çalışma alanının çözüm ağına göre her bir noktanın derinlik değeri bu dosyada bulunur. Modelin batimetri dosyasıdır. Virgülden sonra 4 basamak olmak üzere her bir nokta, 10 karakter kapsayacak ve toplam 20 sütun olacak formatta alt alta yazılır.

Model kodunun düzgün derlenip doğru çalıştırıldığından emin olunması için Berkhoff [19] tarafından yapılan batık bir sığlık alan için fiziksel model deneyi örneği ele alınmıştır. Fiziksel modelde, 0,45 m derinlikte düz bir taban ve sonrasında 1/50 eğimde sığlaşan

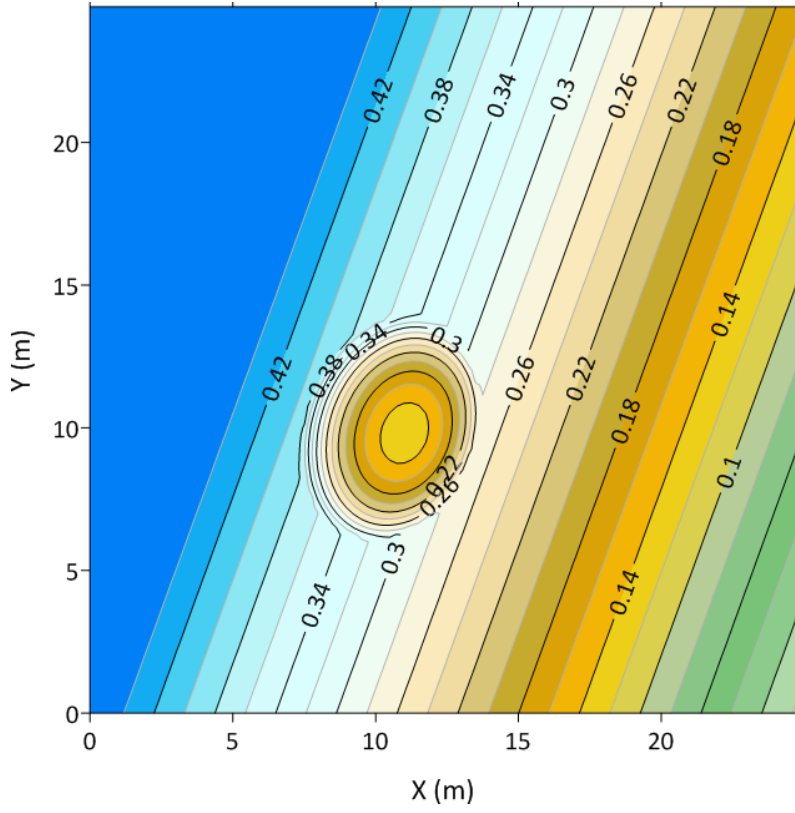
batimetri yer almaktadır. Tüm batimetri x eksenine (dalga ilerleme yönü) göre 20° açıdır. Fiziksel model deneyi batimetrisi Şekil 5.3'te görülmektedir. Başlangıç dalga genliği $A_0=0,0232$ m ve dalga periyodu $T=1$ sn'dir. Fiziksel modelde, dalga y eksenine dik yaklaşmaktadır. Diğer bir deyişle geliş açısı sıfır derecedir.

REF/DIF 1 modelinin yan kenarlarında yansıma sınır koşulu tanımlanmıştır. Kenarların dışındaki birer farazi nokta ile kenarın içindeki (kenara komşu) noktalar aynı değerlere sahiptir. Her iki yönde çözüm ağı uzunluğu $\Delta x=\Delta y=0,25$ m olarak uygulanmıştır. REF/DIF 1 modelinde kullanılan batimetri Şekil 5.4'te, batık sığlık alan için fiziksel model deneyi ölçümlerine göre dalga genliğinin açık sınırdaki dalga genliğine oranının (A/A_0 , boyutsuz) alansal dağılımı Şekil 5.5'te, aynı dağılımın REF/DIF 1 modeli sonuçları Şekil 5.6'da ve Şekil 5.6'nın renklendirilmiş hali Şekil 5.7'de görülmektedir.

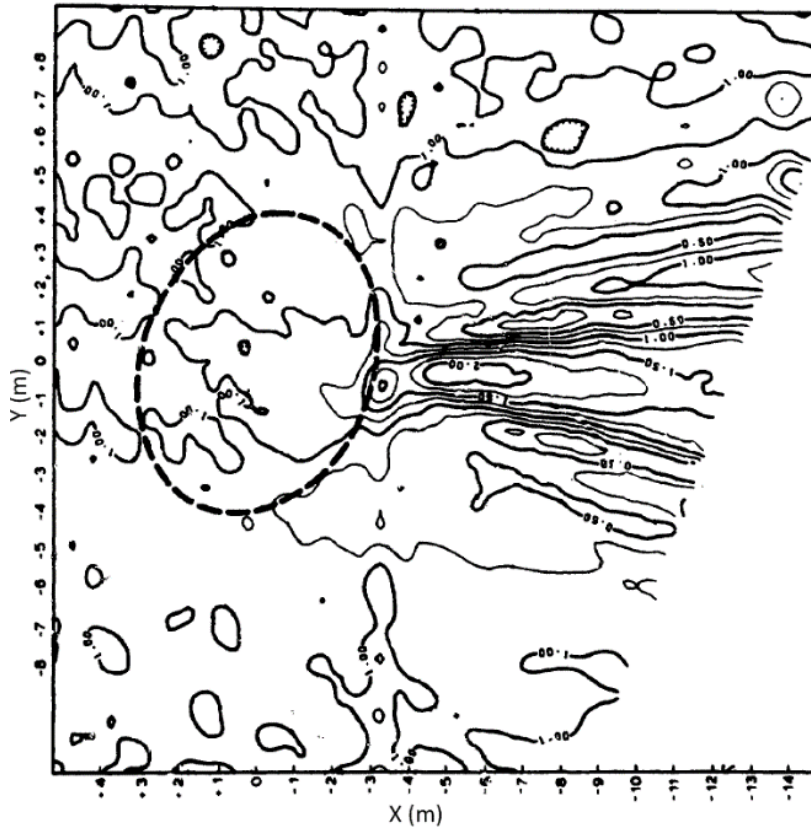
Alansal dalga yüksekliği dağılımlarının daha iyi karşılaştırılabilmesi için Şekil 5.3'te belirtilen 1-4 numaralı hatlarda hesaplanan genlik/açık sınır genliği değerleri Şekil 5.8 - Şekil 5.11'de görülmektedir. Buna göre REF/DIF 1 parabolik dalga modelinin, fiziksel model deneyi ile uyumlu sonuçlar hesap edebildiği görülmüştür.



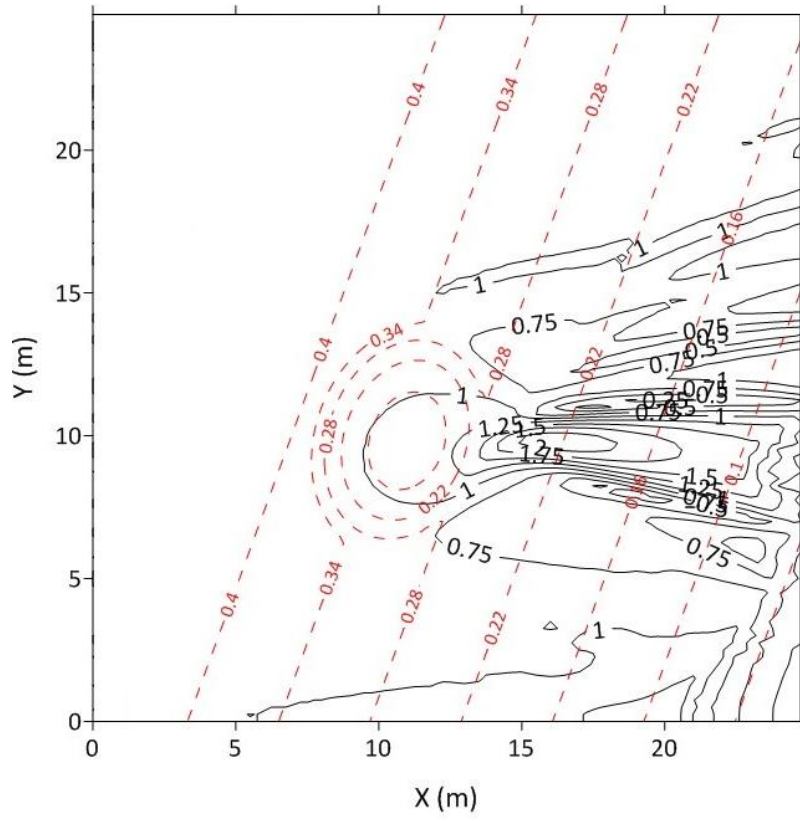
Şekil 5.3. Batık sığlık fiziksel model deneyi batimetrisi [19]



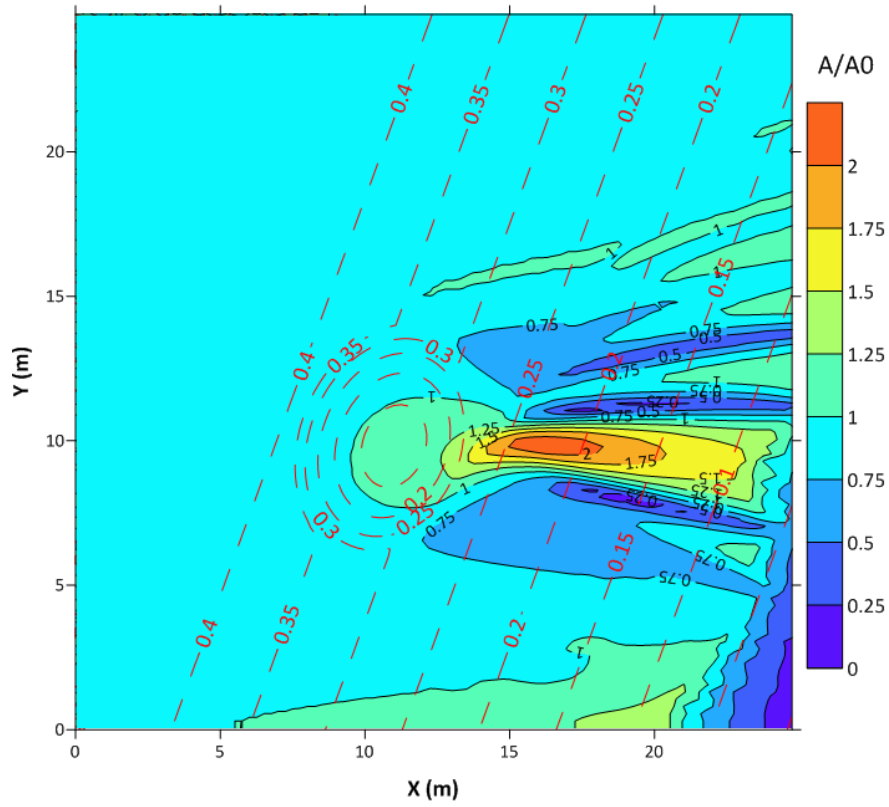
Şekil 5.4. REF/DIF 1 modelinde kullanılan batimetri (derinlikler metredir)



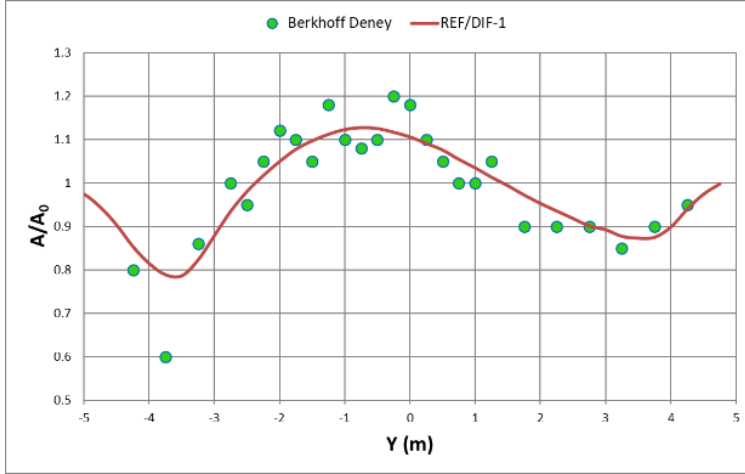
Şekil 5.5. Batık sığlık fiziksel model deneyi sonucu boyutsuz dalga genliğinin alansal dağılımı (A/A_0) [19]



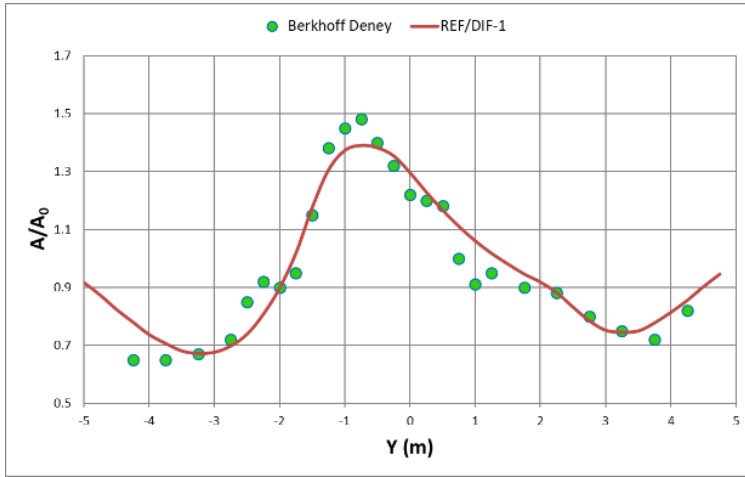
Şekil 5.6. REF/DIF 1 dalga modeli sonucu boyutsuz dalga genliğinin alansal dağılımı (A/A_0)



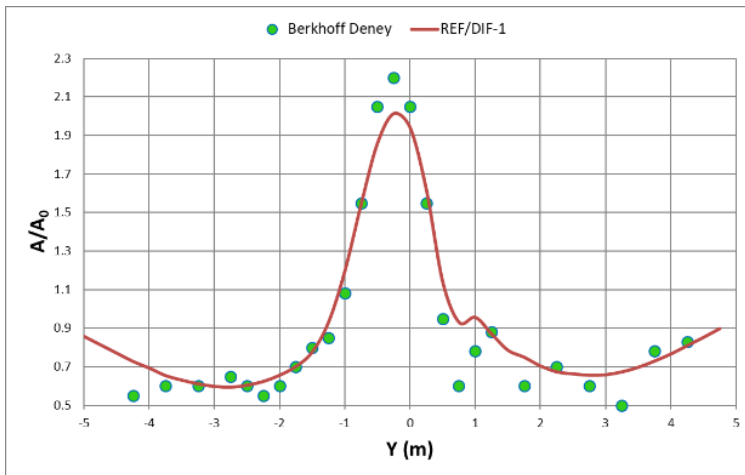
Şekil 5.7. REF/DIF 1 dalga modeli sonucu renklendirilmiş boyutsuz dalga genliğinin alansal dağılımı (A/A_0)



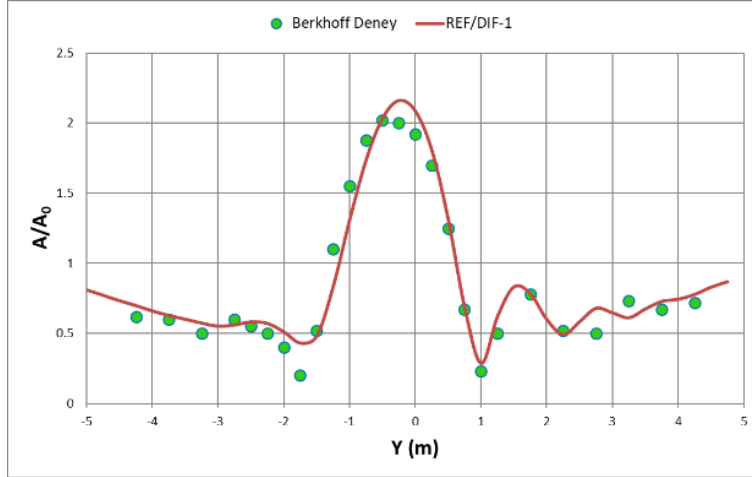
Şekil 5.8. 1 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.9. 2 numaralı boyunda boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması



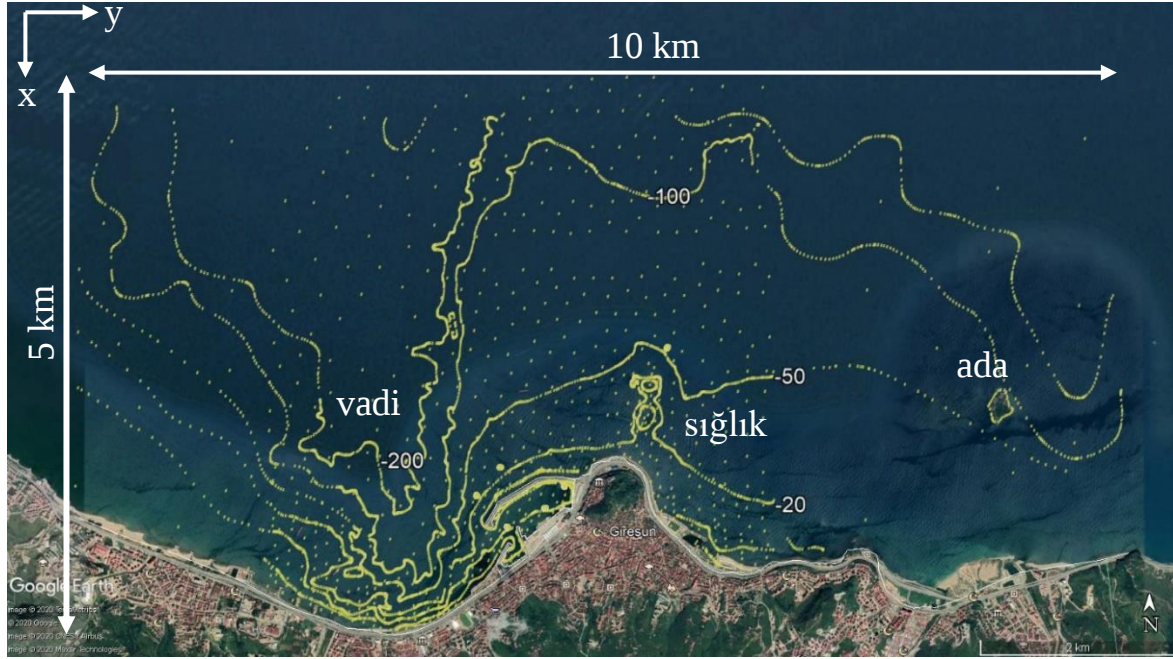
Şekil 5.10. 3 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması



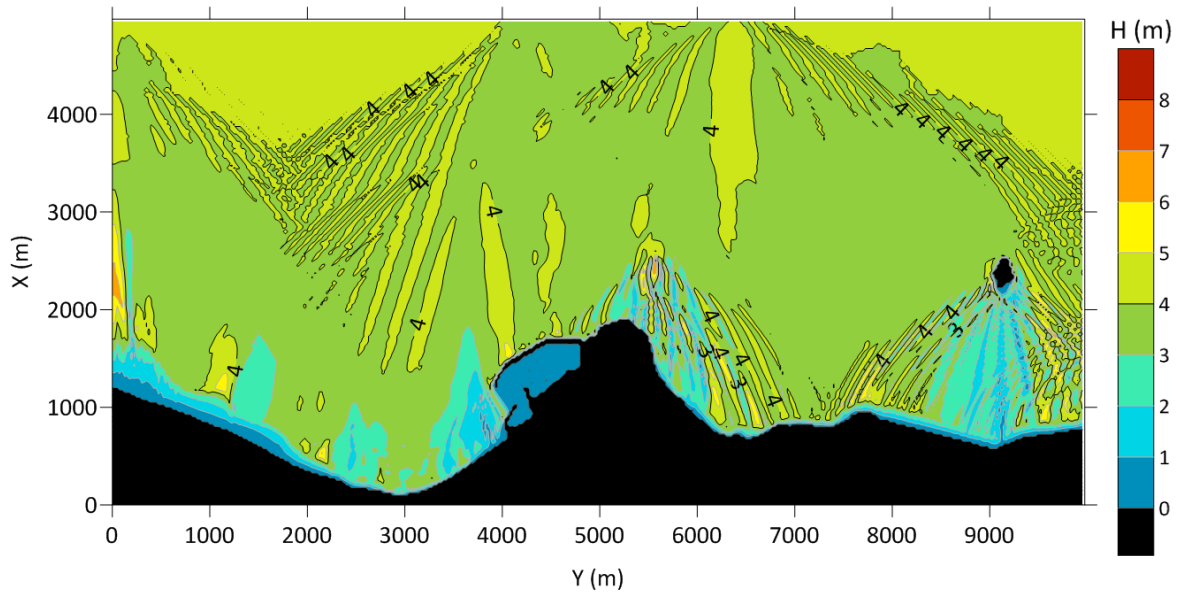
Şekil 5.11. 4 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga genliği değişimi ölçüm ve model sonuçlarının karşılaştırılması

REF/DIF 1 dalga modeli ile gerçek deniz batimetrisi kullanılarak bir örnek yapılmıştır. Örnek için çalışma alanı, Giresun şehir merkezini kapsayacak şekilde (Harita 5.1), kıyı boyunca (y-yönünde) 10 km, açık deniz dalga ilerleme yönünde (x-yönünde) 5 km uzunluğundadır. Batimetrisinin en yüksek derinliği -490 m'dir. Çalışma alanının içinde ada, sıgılık, burun, vadi ve dalgakıran yer almaktadır. Çözüm ağı uzunluğu iki yönde de 25 m olarak seçilmiş, x-yönünde çözüm ağı aralık sayısı 200, y-yönünde çözüm ağı aralık sayısı 400 alınmıştır. Açık deniz sınırı dalga yüksekliği $H=4$ m, dalga periyodu $T=10$ sn, geliş açısı ise sıfır (Kuzeyden yaklaşan dalgalar) alınmıştır.

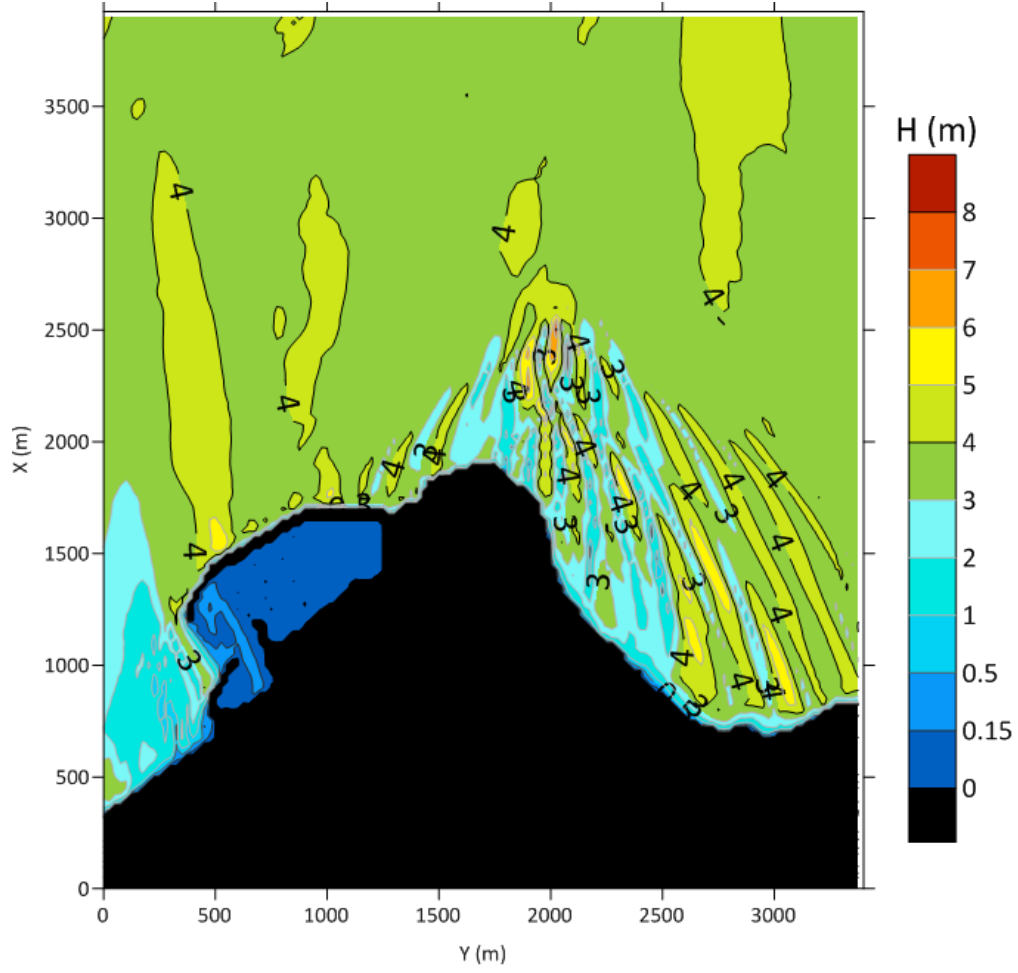
Model sonucunda tüm alanın dalga yükseklik dağılımı Şekil 5.12'de görülmektedir. Model sonucunda sıgılık, ada ve dalgakıran arkasında dalga yüksekliklerinin eliptik sıgılık örneğindeki gibi azaldığı görülmektedir. Sıgılık alanın en sığ yeri -1 m'dir. Bu alan bir su içi kayalığının tepe noktasıdır ve kayalığın şev eğimi yaklaşık olarak $1/4$ 'tür. Özellikle sıgılığın hemen arkasında dalga yüksekliği, fiziksel model deneyindeki gibi başlangıç dalga yüksekliğinin 2 katına yaklaşmıştır. Dalgakıran arkasında ise en büyük dalga yüksekliği 0,15 m elde edilmiştir. Model geçirimsiz bir engel nedeniyle dalga yüksekliğindeki azalmayı benzeştirmiş ancak yansıma etkilerini içermediği için dalgakıran arkasında birbirine yakın dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Sıgılık ve dalgakıran bölgeleri için yakın görünüm Şekil 5.13'te verilmiştir.



Harita 5.1. REF/DIF 1 örnek çalışma alanı ve batimetri



Şekil 5.12. Model sonucu dalga yüksekliklerinin (H) alansal dağılımı



Şekil 5.13. Model sonucu dalga yüksekliklerinin (H) sığlık ve dalgakıran bölgesinde dağılımı

6. RIDE DALGA MODELİ

RIDE dalga modeli, dalga ilerlemesi için yumuşak eğim eşitliğini temel alan eliptik formda bir sayısal modeldir. 1998 yılında Jerome Maa tarafından geliştirilmeye başlanmıştır [53]. Modelde sığ suya doğru dalga ilerlemesi sırasında gerçekleşen sığlaşma, sapma, kırınım, yansıma, dik taban eğimleri ve taban eğrilikleri, hızlı derinlik farklılaşmaları, taban pürüzlülüğü ve dalga kırılması kaynaklı enerji kayıpları dikkate alınmaktadır. Modelin ilk versiyonu olan RDE [53], enerji kayıpları ile ilgili terimleri içermemektedir. Bu etkiler, 2001 yılında modele eklenerek RIDE [7] modeli geliştirilmiştir.

Model eliptik formda olduğundan ve liman alanlarına uygulanabildiğinden çözüm ağı uzunlukları parabolik eşitliklere göre daha küçük seçilmektedir. Bu nedenle REF/DIF 1 gibi büyük denizel alanlara uygulanması büyük depolama alanı ve uzun çözüm süresi gerektirmektedir. RIDE dalga modeli, çalışma alanında yer alan yüzeylerden (dalgakıran, ada, kıyı, rıhtım vb.) meydana gelecek yansıma etkilerini dikkate alabildiğinden, tüm sınırlarda gerekli koşulların tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle eliptik modeller parabolik modellere göre karmaşıktır.

RIDE eliptik dalga modeli, parabolik modellere göre liman, koy ve yakın kıyı gibi daha küçük denizel alanları daha küçük çözüm ağı uzunlukları ile modelleyebilmektedir. Genel olarak çözüm ağı uzunluğunun en fazla dalga boyunun 10'da biri olması önerilmektedir [7]. Liman içi çalkantı problemleri RIDE dalga modeli ile çözülebilmektedir.

6.1. Modelin Teorisi

RIDE modelinde, genişletilmiş yumuşak eğim eşitliği [54] [55] kullanılmaktadır (Eş. 6.1). “Eş. 6.1”de, f_1 taban eğriliği katsayısı (Eş. 6.2), f_2 taban eğiminin karesinin katsayısıdır (Eş. 6.3). Yumuşak eğim eşitliği lineerdir ve RIDE modeli bu eşitliği olduğu gibi kullanmaktadır. Bu nedenle lineer olmayan terimler içermemektedir.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + k^2 CC_g (1 + if\phi) + [f_1 g \nabla^2 h + f_2 (\nabla h)^2 g k] \phi = 0 \quad (6.1)$$

$$f_1 = \frac{-4kh \cosh(kh) + \sinh(3kh) + \sinh(kh) + 8(kh)^2 \sinh(kh)}{8 \cosh^3(kh) [2kh + \sinh(2kh)]} - \frac{k h \tanh(kh)}{2 \cosh^2(kh)} \quad (6.2)$$

$$f_2 = \frac{\text{sech}^2(kh)}{6[2kh + \sinh(2kh)]^3} \{8(kh)^4 + 16(kh)^3 \sinh(2kh) - 9\sinh^2(2kh)\cosh(2kh) + 12(kh)[1 + 2\sinh^4(kh)][kh + \sinh(2kh)]\} \quad (6.3)$$

Burada, $\emptyset$ hız potansiyeli fonksiyonu, k lokal dalga sayısı, C dalga hızı, C_g grup hızı, ∇h taban eğimi, $\nabla^2 h$ taban eğriliği, $f=f_b+f_d$ toplam enerji kaybı, f_b taban sürtünme faktörü (Eş. 6.4), f_d dalga kırılması kaynaklı enerji kayıp faktörüdür (Eş. 6.5).

$$f_b = \frac{4C_f}{3\pi} \frac{a\omega^2}{ng\sinh^3 kh} \quad (6.4)$$

$$f_d = \frac{k_2}{kh} \left(1 - \frac{k_1^2}{4\gamma^2}\right) \quad (6.5)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \quad (6.6)$$

Burada, C_f dalga sürtünme faktörü, a dalga genliği, ω açısal frekans, $k_1 = 0,4$, $k_2=0,15$ ampirik sabitler ve $\gamma = a/h$ dalga genliğinin su derinliğine oranıdır.

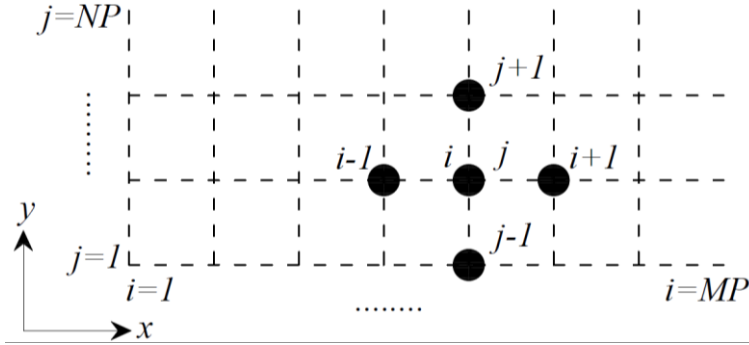
Modeldeki dalga kırılma indeksi (dalga yüksekliğinin su derinliğine oranı) 0,78 olarak alınmaktadır. Bu değere erişildiğinde dalganın kırıldığı kabul edilmektedir.

Deniz tabanının kum olması durumunda ve kum taneleri arasındaki görece boşluklu yapı nedeniyle, bu boşluklara doğru bir akış olduğu kabul edilmektedir. Buna göre deniz taban malzemesine ait geçirimsizlik katsayısı veya dalga sürtünme faktörü tanımlanarak enerji kaybı dikkate alınabilmektedir.

6.2. Sonlu Farklar Çözümü ve Sınır Koşulları

Model eşitliğinin açılımı beş noktalı merkezi sonlu farklar metodu ile yapılmıştır (Şekil 6.1). Kapalı çözüm yönteminde oluşan matris, gauss eliminasyon yöntemi ile çözülmektedir. Klasik gauss eleme yönteminde yuvarlama hataları çözüme yakınsama konusunda sorun oluşturabilmektedir. Bunun azaltılması için kısmi pivot uygulaması kullanılmaktadır. Katsayılar matrisinde ileri doğru eleme yapılırken her bir sütundaki katsayıların mutlak

değerce en büyüğü pivot olarak seçilir ve o satır o anki eleme yapılacak satır ile yer değiştirilir. Pivot uygulaması işlem yükünü arttırmakta buna karşın çözüm kararlılığını da sağlamaktadır. Modelde açık deniz dalga ilerleme sınırı olarak tüm çözüm ağı kenarları tanımlanabilmektedir.

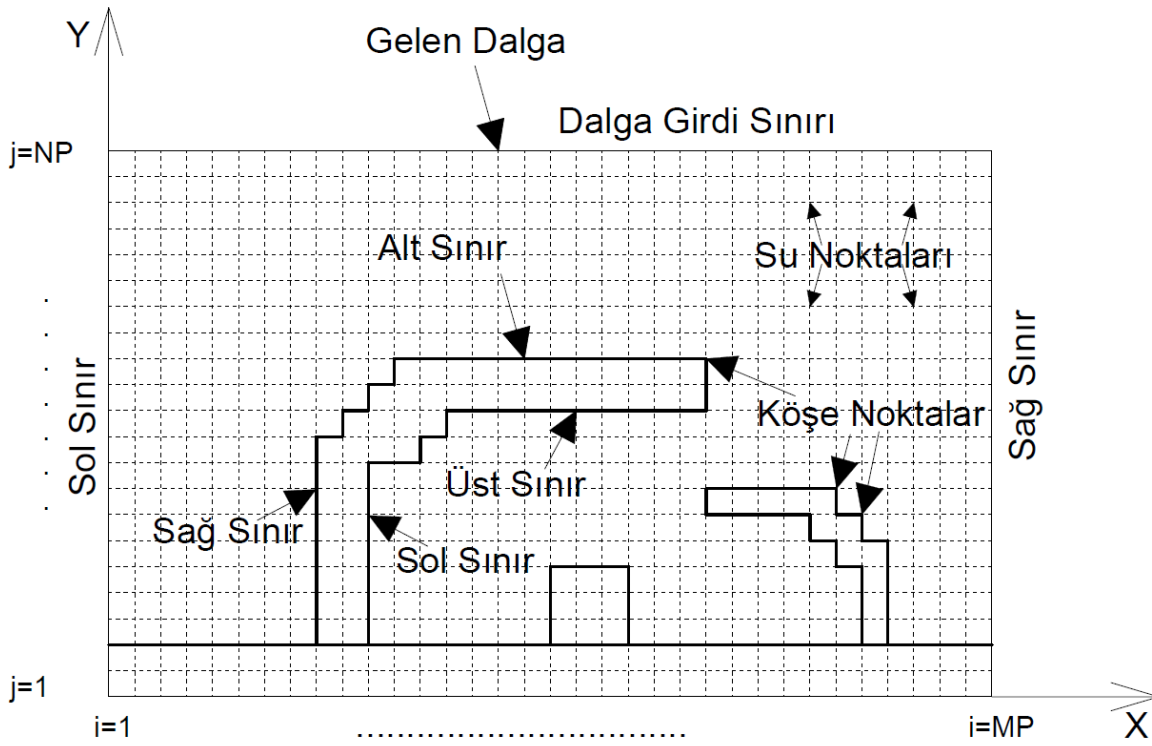


Şekil 6.1. Beş noktalı sonlu farklar çözüm molekülü

Modelin en önemli aşaması sınır koşullarının tanımlanmasıdır (Şekil 6.2). İki farklı sınır koşulu bulunmaktadır. İlki yansıma sınır koşulu, diğeri dalga girişi olan açık deniz sınır koşuludur. Yansıma sınır koşulu yansıma katsayısının değerine göre üç farklı durum oluşturmaktadır. Yansıma yüzeyinin tanımı, “Eş. 6.7” (x eksenine dik sınırlar için) ve “Eş. 6.8” (y eksenine dik sınırlar için) ile yapılmaktadır. Sönümlenme katsayısı $\alpha = (1 - r)/(1 + r)$ olarak elde edilmektedir. Yansıma katsayısı r parametresidir. Yansıma katsayısının $r=1$ olması durumunda, sönümlenme katsayısı $\alpha = 0$ değerini almaktadır. Bu koşul yüzeyin tam yansıma oluşturmalarını benzeştirmektedir. Yansıma katsayısının $r=0$ seçilmesi, sönümlenme katsayısının $\alpha = 1$ değerini alması ve yüzeyin tam sönümlenme oluşturmalarını sağlamaktadır. Yansıma katsayısının $0 < r < 1$ arasında olması durumunda ise kısmi yansıma oluşmaktadır. Kısmi yansıma, gerçekçi liman içi çalkantı analizlerinde önemli bir değişkeni oluşturmaktadır.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \pm i \alpha k \left(\phi + \frac{1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \pm i \alpha k \left(\phi + \frac{1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) \quad (6.8)$$



Şekil 6.2. RIDE modelinde sınır koşullarının tanımlanması

Dalga girdisi olan açık deniz sınır koşulunda, dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga açısı tanımlanmaktadır. Bu sınırdaki “Eş. 6.9” ve “Eş. 6.10”, “Eş. 6.7” ve “Eş. 6.8” gibi kullanılır. Aralarındaki fark, açık deniz sınırından geri dönen dalgaların oluşmaması için dalga sönümlleme katsayısının $\alpha = 1$ olarak kabul edilmesidir ($r=0$, yansıma yok). Ayrıca bu sınırdaki hız potansiyeli (Eş. 6.11), eşitliklere eklenerek gerekli olan dalga verileri modele aktarılmaktadır.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \pm ik \left(\phi + \frac{1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + 2ik\phi^g \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \pm ik \left(\phi + \frac{1}{2k^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + 2ik\phi^g \quad (6.10)$$

$$\phi^g = Ae^{is} = \frac{igTH}{4\pi} e^{is} \quad (6.11)$$

Burada, A genlik fonksiyonu, S ise açılı dalgalar için faz fonksiyonudur. Modelde, sınır koşulları harfler ve rakamlar kullanılarak tanımlanmaktadır (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. RIDE sınır koşulu tanımlama değerleri

Değer	Açıklama
0	Su noktaları
1	Üst sınır
2	Alt sınır
3	Sol sınır
4	Sağ sınır
5	Sol alt köşe
6	Sol üst köşe
7	Sağ alt köşe
8	Sağ üst köşe
g	Dalga girdi sınırı (given boundary)
e	Kara noktaları (kıyı, ada, dalgakıran vb.)
o	Dalga girdi sınırında dalga alt sınırdan geliyor ise sol alt köşe
p	Dalga girdi sınırında dalga sol sınırdan geliyor ise sol alt köşe
q	Dalga girdi sınırında dalga sol sınırdan geliyor ise sol üst köşe
r	Dalga girdi sınırında dalga üst sınırdan geliyor ise sol üst köşe
s	Dalga girdi sınırında dalga üst sınırdan geliyor ise sağ üst köşe
t	Dalga girdi sınırında dalga sağ sınırdan geliyor ise sağ üst köşe
u	Dalga girdi sınırında dalga sağ sınırdan geliyor ise sağ alt köşe
v	Dalga girdi sınırında dalga alt sınırdan geliyor ise sağ alt köşe

Sınır koşullarının oluşturulması için Çizelge 6.1'e göre hazırlanmış örnekler dalga girdi sınırının farklı kenarlarda olması durumu için Şekil 6.3'te, kıyı ve dalgakıran olması durumu için Şekil 6.4'te görülmektedir. Yansıma yüzeyleri tanımlandıktan sonra aynı çözüm ağı noktalarına α sönümleme katsayısı tanımlamaktadır.

6	1	1	1	1	1	1	1	1	8
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
o	g	g	g	g	g	g	g	g	v

(a)

r	g	g	g	g	g	g	g	g	s
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
5	2	2	2	2	2	2	2	2	7

(b)

q	1	1	1	1	1	1	1	1	8
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
g	0	0	0	0	0	0	0	0	4
p	2	2	2	2	2	2	2	2	7

(c)

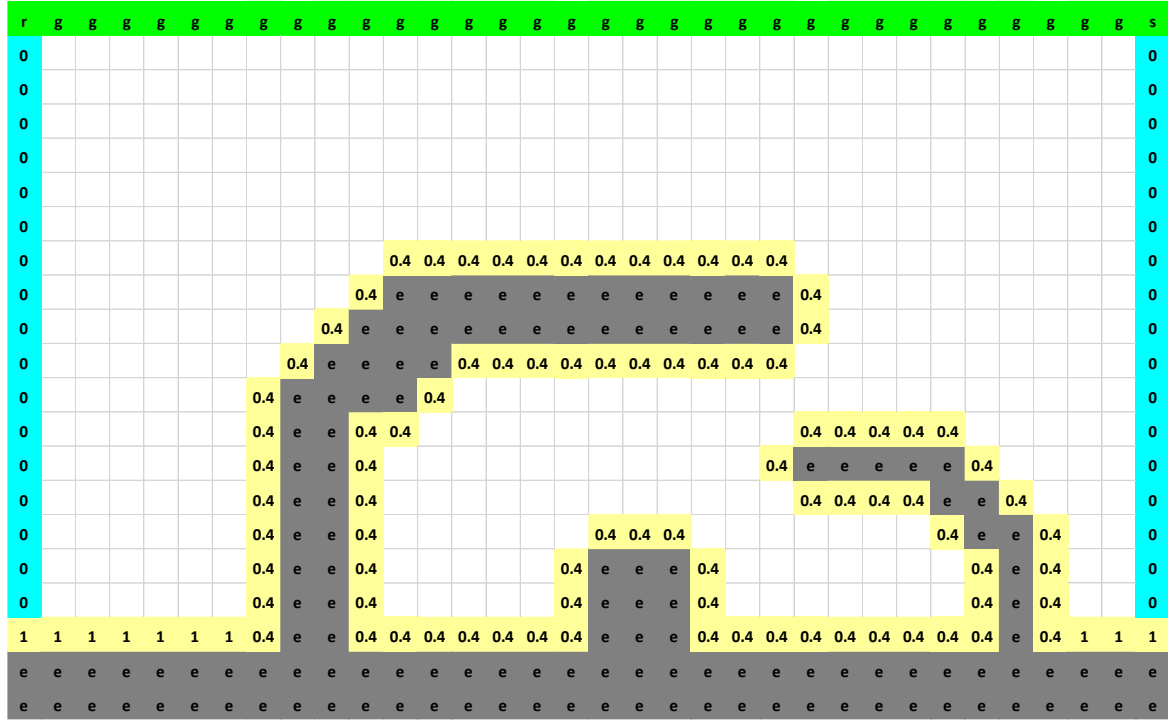
6	1	1	1	1	1	1	1	1	t
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
3	0	0	0	0	0	0	0	0	g
5	2	2	2	2	2	2	2	2	u

(d)

Şekil 6.3. Sınır koşulu tanımlama örnekleri (a) Dalga alt sınırdan geliyorsa (b) Dalga üst sınırdan geliyorsa (c) Dalga sol sınırdan geliyorsa (d) Dalga sağ sınırdan geliyorsa

[illegible]

Şekil 6.4. Kıyı ve dalgakıran olması durumunda sınır koşulu tanımlama örneği



Şekil 6.5. Kıyı ve dalgakıran olması durumunda sönümlleme katsayısı tanımlama örneği

6.3. Modelin Kullanımı

RIDE eliptik dalga modeli fortran programlama dilinde yazılmıştır. Modelin sadece kaynak kodu bulunmakta, herhangi bir kullanıcı dostu ara yüzü bulunmamaktadır. Model kaynak kodu Microsoft Developer Studio programı ile derlenmiştir.

Modelin üç adet girdi dosyası bulunmaktadır. Bu dosyaların içeriği her çalışmaya özgü olarak değiştirilmekte veya düzenlenmektedir. Dosyaların içeriği ve düzenlenme koşulları aşağıda özetlenmektedir.

- **CONFILE** : Modelin kontrol dosyasıdır. Çalışma yerinin adı ile oluşturulan .con uzantılı dosya her çalışma için farklı isimle oluşturulabilmektedir. Çalışma alanının x ve y yönündeki çözüm ağı nokta sayısı “mp” ve “np”, dalga yüksekliği “waveh”, dalga periyodu “period”, dalga yönü “angle θ ”, x ve y yönlerindeki çözüm ağı uzunlukları “dx” ve “dy”, enerji kayıp verileri “ifric” ve gelgit kaynaklı sabit su seviyesi değişimi “dlevel” vb. bilgiler .con uzantılı kontrol dosyasında yer alır. Modelin okuyacağı batimetri ve sınır koşulları dosyalarının isimleri de kontrol dosyasına yazılmaktadır.

- BCDFILE : Modelin sınır koşullarının tanımlandığı dosyadır. Tüm kenarlarda ve varsa çalışma alanındaki kara noktalarının komşu olduğu su noktalarında sınır koşulu tanımlanması gerekmektedir. Sınır koşulları tanımlanan noktalara ayrıca yansıma özelliklerinin belirlenmesi için sönümlenme katsayıları da tanımlanması gerekmektedir. Sönümleme katsayıları denk geldikleri i ve j noktaları ile beraber .bcd uzantılı dosyaya yazılmaktadır. Sınır koşulu dosyasına, dalga girdi sınır koşulunda bulunan nokta sayısı “ngc” ve yansıma katsayısı tanımlanan nokta sayısı “nbc” değerleri de yazılmaktadır.
- DEPFİLE : Modelin batimetri dosyasıdır. Çalışma alanının çözüm ağına göre her bir noktanın derinlik değeri bu dosyada bulunur. Virgülden sonra 5 basamak olmak üzere her bir nokta, 9 karakter kapsayacak ve toplam 10 sütun olacak formatta alt alta yazılır.

Model kodunun düzgün derlenip doğru çalıştırıldığından emin olunması için Berkhoff [19] tarafından yapılan batık sığlık fiziksel model deneyi örneği ele alınmıştır. Ayrıca Watanabe ve Maruyama [56] tarafından yapılmış kıyıya paralel dalgakıran fiziksel model deneyi de RIDE ile modellenmiştir. Batık sığlık fiziksel model deneyine ait bilgiler Bölüm 5.4’te verilmiştir.

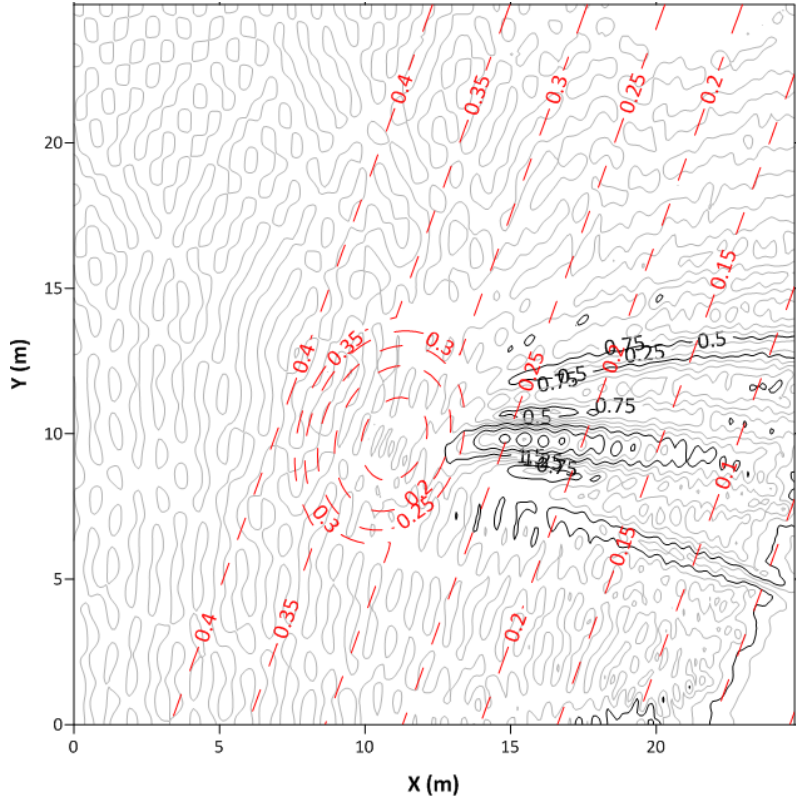
Batık sığlık örneği REF/DIF 1 (parabolik model) ve RIDE (eliptik model) modelleri ile ayrı ayrı çalışılmış ve iki modelin farkları da belirlenmiştir. İki modelde de sağ ve sol sınırlarda yansıma sınır koşulu tanımlanmıştır. İki modelde de başlangıç dalga yüksekliği $H_0=0,0464$ m, dalga periyodu $T=1$ sn ve dalga geliş açısı 0 derecedir. Çözüm ağı uzunlukları REF/DIF 1 modelinde $\Delta x=\Delta y=0,25$ m, RIDE modelinde $\Delta x=\Delta y=0,10$ m olarak uygulanmıştır.

Çözümün sonuç görsellerinde çizilen konturlar hesaplanan dalga yüksekliği/açık deniz sınırı dalga yüksekliğidir (H/H_0), boyutsuzdur. Boyutsuz dalga yüksekliklerinin alansal dağılımlarının, Berkhoff fiziksel model deneyi sonuçları Şekil 5.5’te, REF/DIF 1 model sonuçları Şekil 5.6’da, RIDE model sonuçları ise Şekil 6.6’da görülmektedir. Şekil 6.6’nın renklendirilmiş görüntüsü Şekil 6.7’de sunulmuştur. Şekil 5.3’te sunulan, 1-4 numaralı hatlar için, her iki modelin sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 6.8 - Şekil 6.11’de verilmiştir. REF/DIF 1 ve RIDE modellerinin ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ise Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

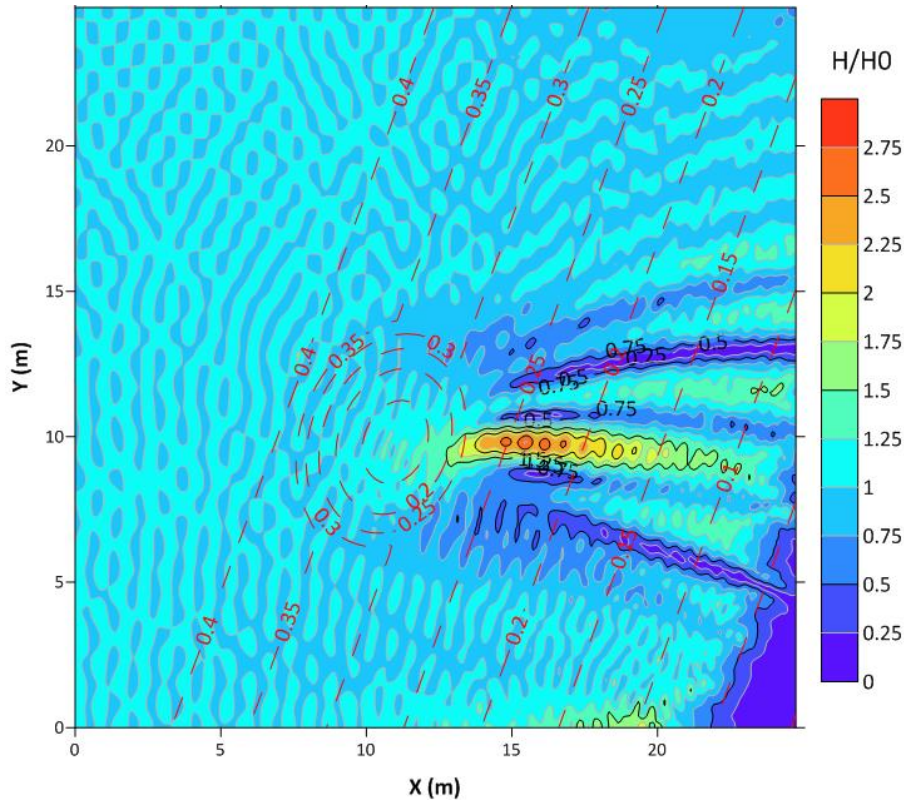
Çizelge 6.2. REF/DIF 1 ve RIDE modellerinin batık sığlık deneyi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması

Model	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)
REF/DIF 1 tüm hatlar	0,097	16,92	0,072	9,60	0,022	98,45	97,33
REF/DIF 1 hat-1	0,058	7,56	0,046	5,00	0,005	93,23	91,21
REF/DIF 1 hat-2	0,069	7,77	0,055	5,90	0,014	98,21	96,44
REF/DIF 1 hat-3	0,120	26,92	0,096	15,8	0,028	96,86	97,85
REF/DIF 1 hat-4	0,123	17,40	0,093	11,9	0,041	98,37	97,74
RIDE tüm hatlar	0,286	52,74	0,204	27,10	0,028	88,67	80,57
RIDE hat-1	0,102	30,85	0,087	18,90	0,044	88,30	86,78
RIDE hat-2	0,279	48,96	0,245	21,09	0,013	85,40	86,55
RIDE hat-3	0,217	50,59	0,177	22,80	-0,038	85,74	82,98
RIDE hat-4	0,299	52,62	0,225	27,60	0,115	81,98	78,36

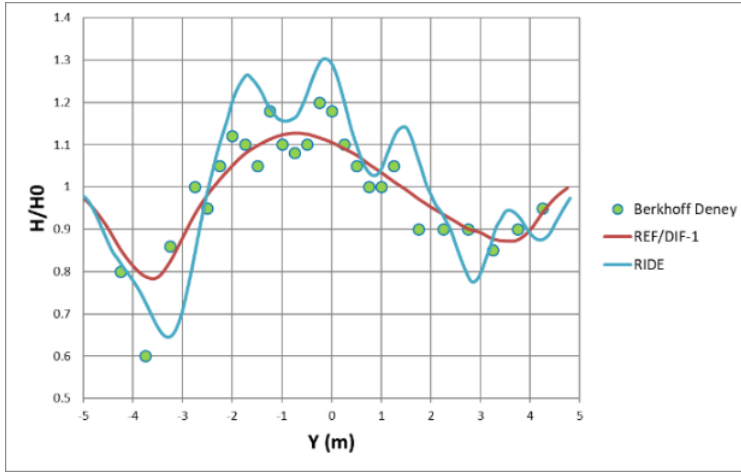
REF/DIF 1 %16,92 yüzde kök ortalama kare hatası, %9,6 yüzde ortalama gerçek hata ve %98,45 uyum indeksi ile batık sığlık fiziksel model deneyi sonuçlarıyla daha iyi uyum göstermiştir. RIDE modeli ise özellikle 2 numaralı hat boyunca, sığlık arkasında dalga yüksekliğini %60 daha büyük hesaplamaktadır. Modellemeye ait dalga vektörleri [57] incelendiğinde 2 numaralı hattın bulunduğu alanda dalga vektörlerinin birbirini kestiği görülmektedir. Bu durum da sığlık nedeniyle kırınımına uğrayan dalgaların içi içe geçmesine ve dalga yüksekliğinde artış meydana gelmesine neden olmaktadır. Maa [57] tarafından, Berkhoff deneyinde yansımanın ihmal edilebilir kadar küçük ve kırınımın zayıf olması nedeniyle, REF/DIF 1 için doğrulama kriteri olarak kullanılabileceği ancak eliptik bir model için yeterli olmadığı belirtilmektedir. RIDE modeli gibi güçlü kırınım ve yansıma etkilerinin ele alınabildiği modellerde, başka deneysel çalışmalarla karşılaştırma yapılması gerektiği vurgulanmaktadır. Bu doğrultuda, RIDE modeli kıyıya paralel dalgakıran fiziksel model deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



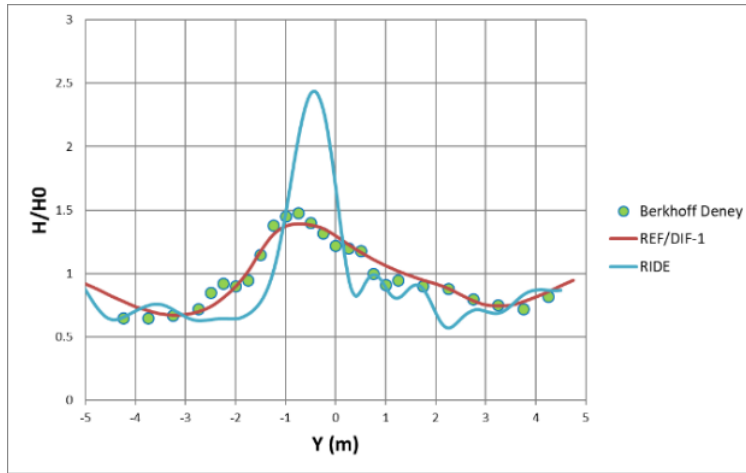
Şekil 6.6. RIDE dalga modeli tahmini boyutsuz dalga yüksekliklerinin alansal dağılımı (H/H_0)



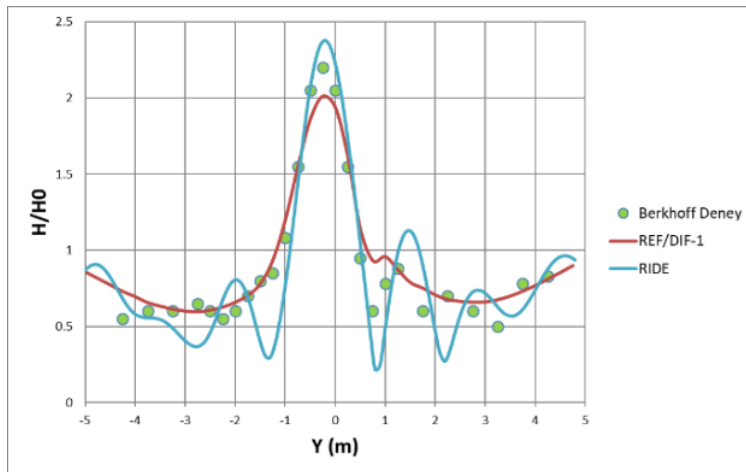
Şekil 6.7. RIDE dalga modeli tahmini boyutsuz dalga yüksekliklerinin renklendirilmiş alansal dağılımı (H/H_0)



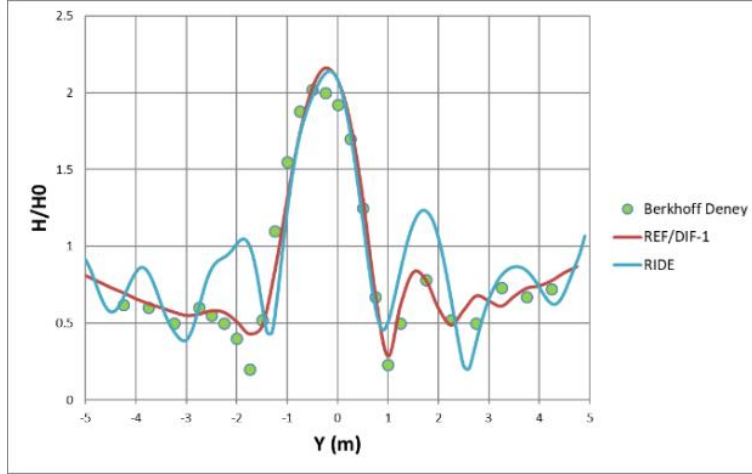
Şekil 6.8. 1 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 6.9. 2 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 6.10. 3 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması



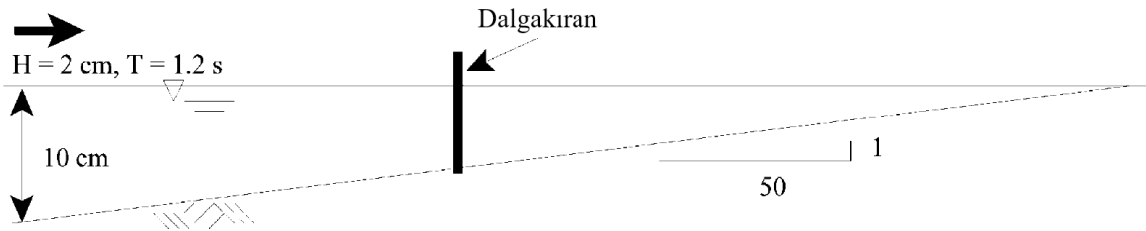
Şekil 6.11. 4 numaralı hat boyunca boyutsuz dalga yüksekliği REF/DIF 1 modeli ve RIDE modeli tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması

Watanabe ve Maruyama [56] tarafından yapılmış kıyıya paralel dalgakıran fiziksel model deneyinde, 10 cm derinlikten başlayarak kıyıya kadar sabit 1/50 eğim ile sığlaşan taban ve 6 cm derinlikte üst kotu su seviyesi üzerinde olan düşey yüzeyli bir çelik plaka ile oluşturulmuş dalgakıran (Şekil 6.12) bulunmaktadır. Deney alanı 8 m genişliğinde ve 5 m uzunluğundadır. Alan, genişliğin dördüncü metresine göre simetrik olduğundan Watanabe ve Maruyama ile Maa tarafından sayısal model çalışmalarında model alanı, 4 m genişliğinde (dalga geliş sınırı) ve 5 m uzunluğunda (dalga ilerleme alanı) kullanılmıştır. Dalga yüksekliği 2 cm, dalga periyodu 1,2 sn ve geliş açısı 0 derecedir. Fiziksel model deneyi ile birlikte geliştirilen yumuşak eğim eşitliği modeli ile yapılan modelleme sonucu dalga yüksekliklerinin alansal dağılımı Şekil 6.13'te, RIDE modeli ile yapılan çalışma sonucu dalga yüksekliklerinin alansal dağılımı ise Şekil 6.14'te görülmektedir. Şekil 6.14'ün renklendirilmiş hali Şekil 6.15'te verilmiştir. Şekil 6.13'te verilen kesitler için, fiziksel model deneyi ile RIDE modeli sonuçlarının grafik karşılaştırmaları Şekil 6.16 - Şekil 6.18'de ve RIDE modelinin ölçüm sonuçları ile istatistiki karşılaştırılması ise Çizelge 6.3'te sunulmuştur.

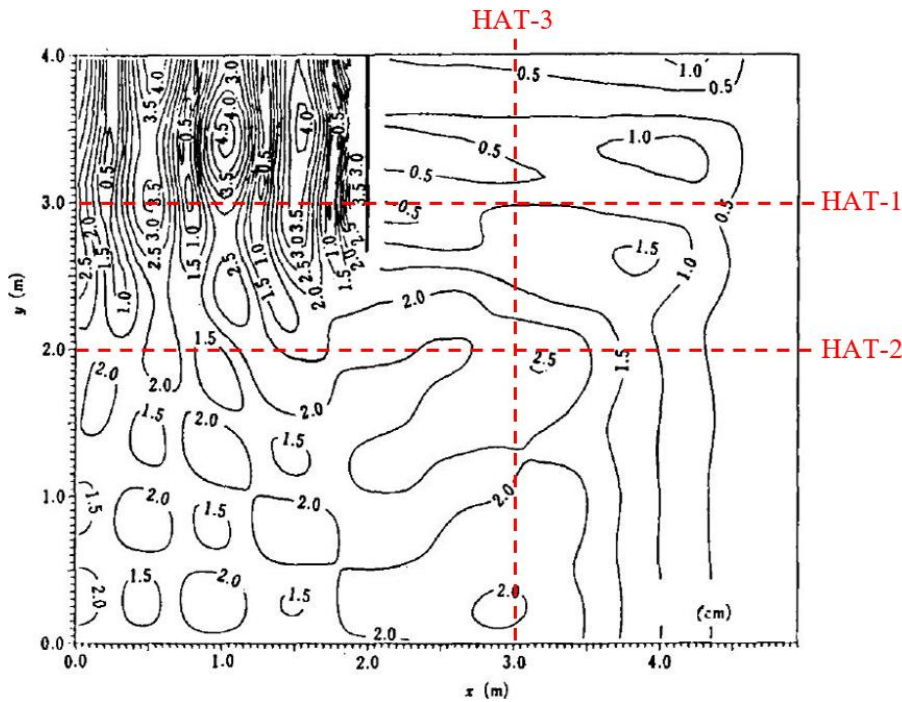
Çizelge 6.3. RIDE modelinin düşey yüzeyli dalgakıran deneyi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması

Model	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)
RIDE tüm hatlar	0,467	34,11	0,359	24,8	0,059	92,07	86,22
RIDE hat-1	0,551	35,87	0,383	27,0	0,143	92,25	89,33
RIDE hat-2	0,512	32,38	0,420	24,8	-0,026	90,22	82,39
RIDE hat-3	0,359	35,7	0,293	23,6	0,033	95,08	90,05

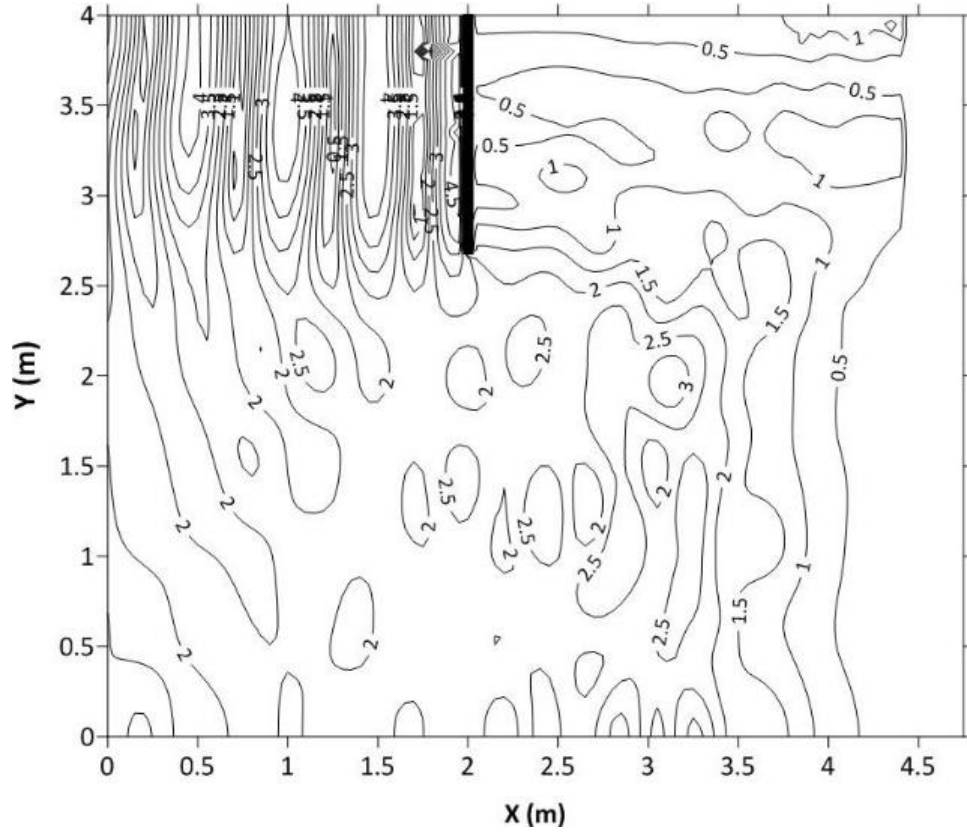
Karşılaştırmalar RIDE modelinin, %34,11 yüzde kök ortalama kare hatası, %24,8 yüzde ortalama gerçek hata ve %92,07 uyum indeksi ile yansıma etkilerinin ve güçlü kırınım durumunun bulunduğu alanları benzeştirebildiğini göstermektedir.



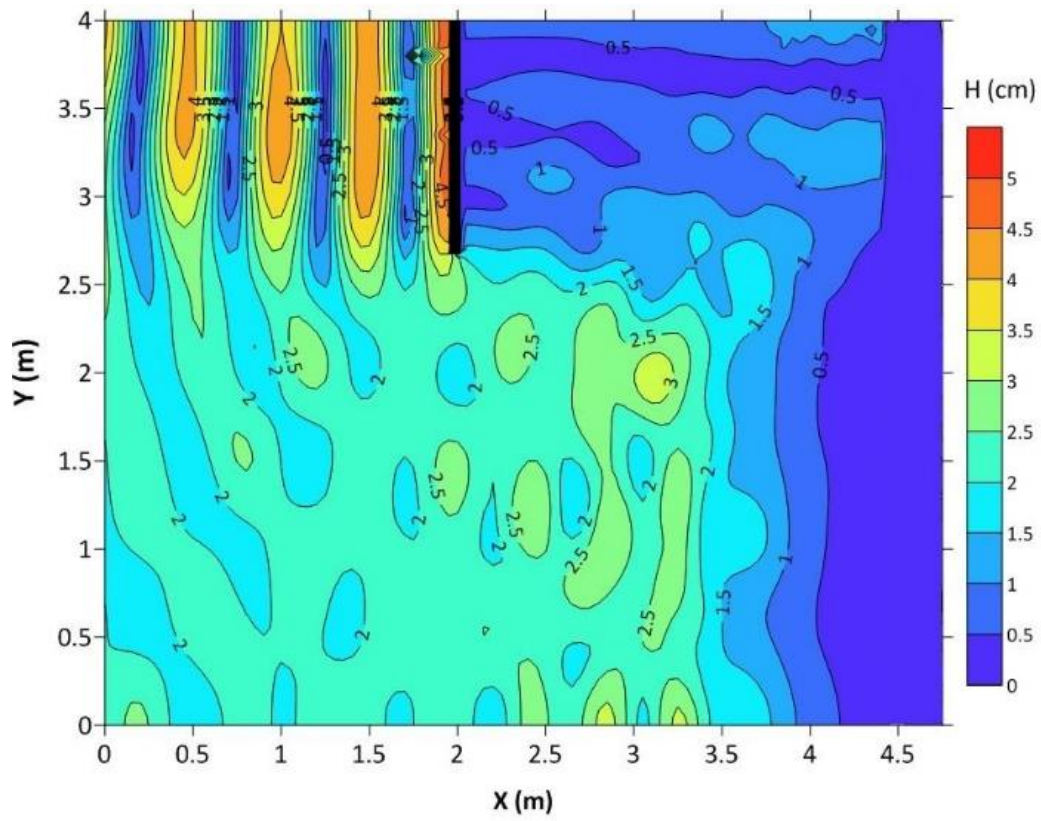
Şekil 6.12. Fiziksel model deneyi batimetrisi [56]



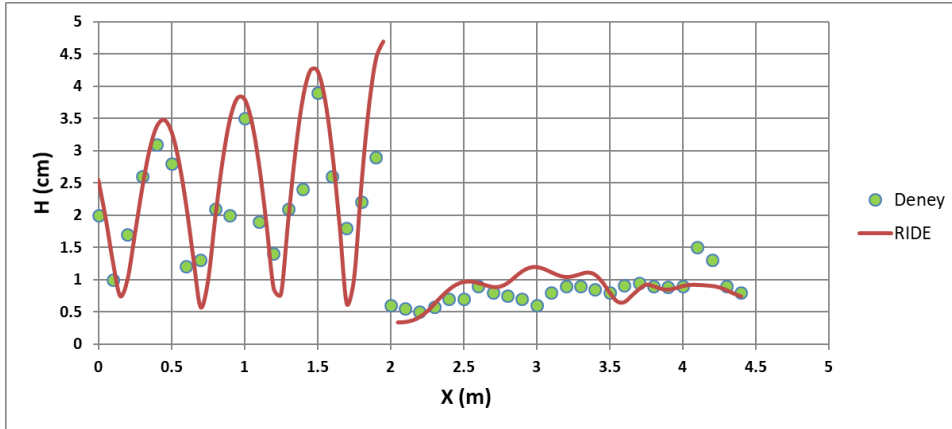
Şekil 6.13. Yumuşak eğim eşitliği model sonucu dalga yüksekliklerinin (cm) alansal dağılımı [56]



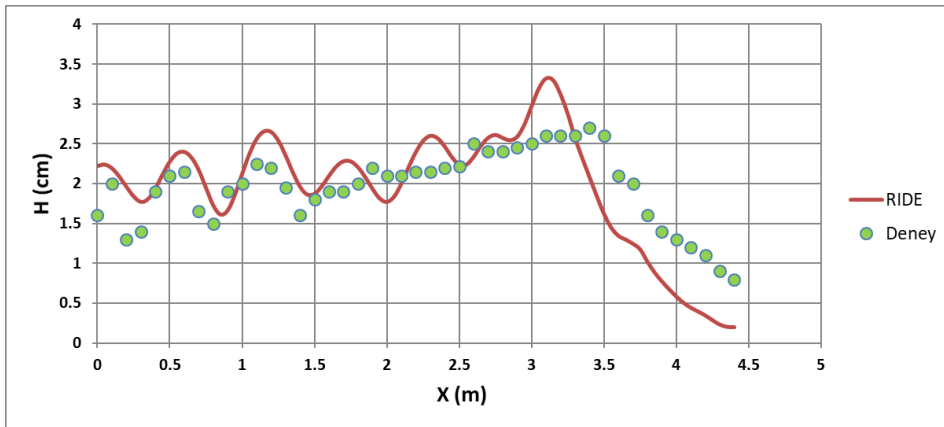
Şekil 6.14. RIDE dalga modeli sonucu dalga yüksekliklerinin (cm) alansal dağılımı



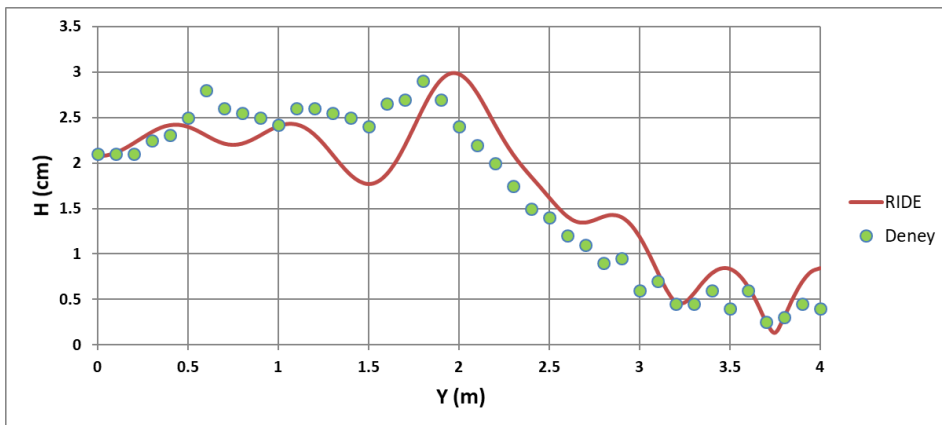
Şekil 6.15. RIDE dalga modeli sonucu dalga yüksekliklerinin (cm) renklendirilmiş alansal dağılımı



Şekil 6.16. RIDE modeli dalga yüksekliği tahminlerinin deney sonuçları ile 1 numaralı hat boyunca karşılaştırılması



Şekil 6.17. RIDE modeli dalga yüksekliği tahminlerinin deney sonuçları ile 2 numaralı hat boyunca karşılaştırılması



Şekil 6.18. RIDE modeli dalga yüksekliği tahminlerinin deney sonuçları ile 3 numaralı hat boyunca karşılaştırılması

RIDE ve REF/DIF 1 dalga modellerinin kırınım ve yansıma özelliklerinin karşılaştırılması için gerçek deniz batimetrisi ve balıkçı barınağı kullanılarak örnek bir çalışma yapılmıştır.

RIDE modeli için gerekli dosyaların oluşturulması için Microsoft Excel programı ara yüz olarak kullanılmış ve Visual Basic programlama dili ile sınır koşullarının herhangi bir çalışma için kısa sürede oluşturulabileceği ve sınır koşulu (*.bcd) dosyasına ekleme yapan bir program yazılmıştır. Ayrıca RIDE modelinin okuyacağı batimetri (*.grd), kontrol (*.con) ve sınır koşulu (*.bcd) dosyalarının oluşturulması için ayrı fortran kodları hazırlanmıştır. Örnek uygulama alanı olarak Trabzon ili Akçaabat ilçesinde yer alan Darıca balıkçı barınağı seçilmiştir. Çalışma alanı (Harita 6.1), kıyı boyunca (y-yönünde) 1,9 km, açık deniz dalga ilerleme yönünde (x-yönünde) 0,9 km uzunluğundadır. Batimetrisinin en yüksek derinliği -35 m'dir. Çalışmada kullanılan değerler Çizelge 6.4'de görülmektedir.

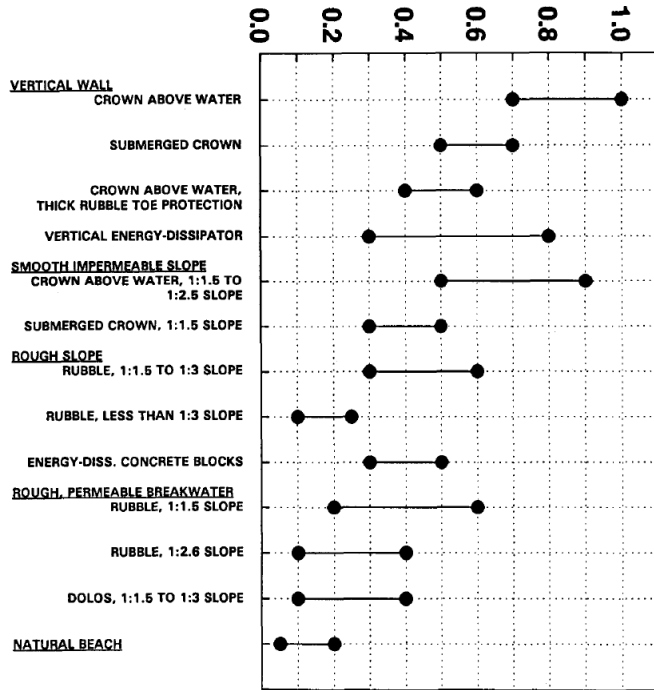
Çizelge 6.4. Örnek çalışmada kullanılan değerler

Model	H (m)	T (sn)	Açı (°)	Çözüm ağı uzunluğu (m)	Çözüm ağı nokta sayısı (x-yönü)	Çözüm ağı nokta sayısı (y-yönü)
RED/DIF 1	2,0	6,0	0	12	75	160
RIDE	2,0	6,0	0	6	150	320

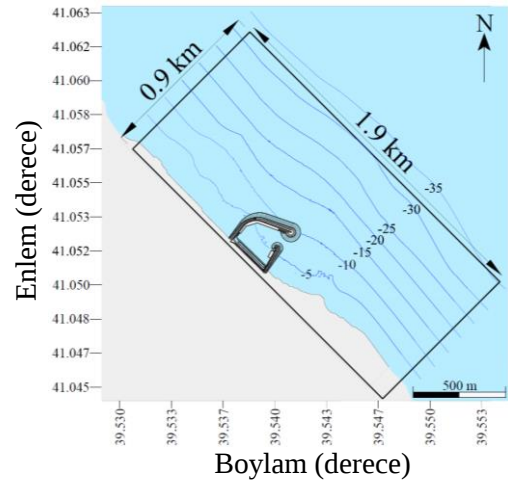
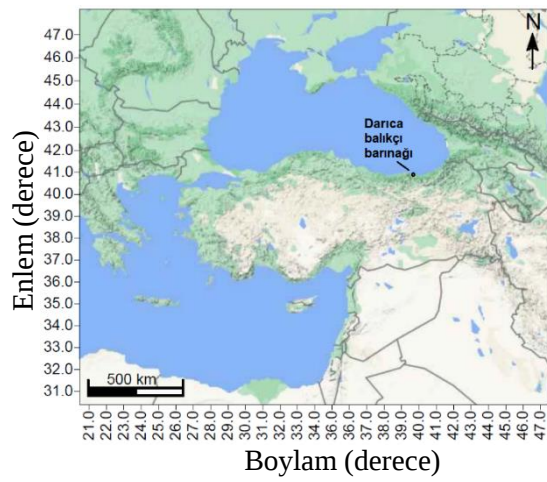
Balıkçı barınağında, pembe renkli bölge rıhtım (düşey yüzeyli), turuncu renkli bölge çekek yeri (kumsal niteliğinde yatık eğimli yüzey) ve kalan kısımlar taş tahkimat olarak alınmıştır (Harita 6.2). Yansımaya yüzeylerindeki katsayıların tayini için Şekil 6.19'da önerilen değerler kullanılmıştır. Su üzerine çıkan düşey yüzeyler (rıhtım) için 0,7-1,0, geçirimli eğimli yüzeyler için 0,2-0,6 ve doğal kumsal için 0,05-0,2 değer aralıkları önerilmektedir [58]. Buna göre yüzeylerdeki yansımaya katsayıları söz konusu değer aralıklarının ortalama değerleri olarak kabul edilmiştir ve modeldeki sönümleme katsayıları ile birlikte Çizelge 6.5'te verilmiştir. Sönümleme katsayıları $\alpha = (1 - r)/(1 + r)$ eşitliği ile elde edilmiştir. Barınak için sönümleme katsayılarının modele tanımlanışı Şekil 6.20'de, yansımaya katsayılarının tanımlanışı ise Şekil 6.21'de verilmiştir.

Çizelge 6.5. RIDE modelinde kullanılan yansımaya ve sönümleme katsayıları

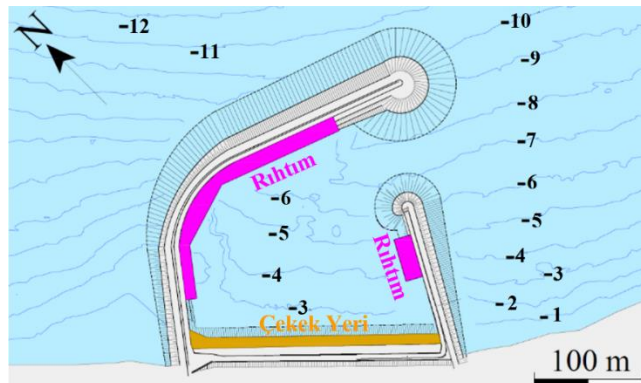
Yüzey	Yansımaya Katsayısı (r)	Sönümleme Katsayısı (α)
Rıhtım	0,90	0,05
Çekek yeri	0,10	0,81
Taş tahkimat	0,40	0,43
Kara	0,10	0,81



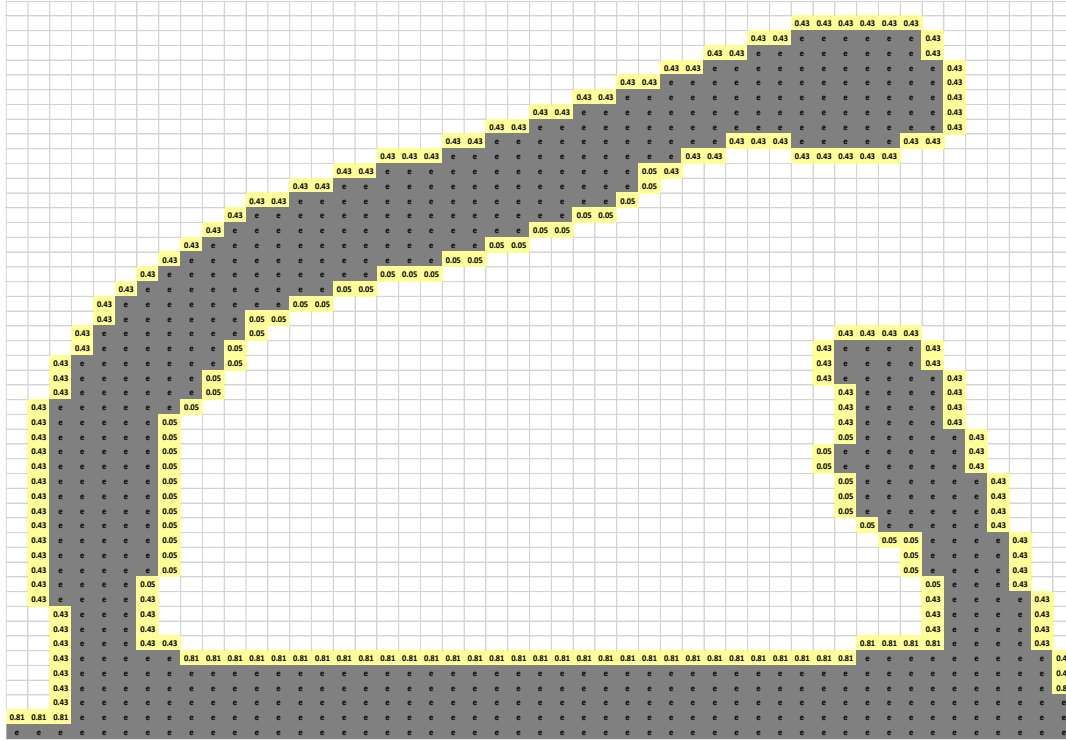
Şekil 6.19. Yansıma yüzeyleri için önerilen katsayılar [58]



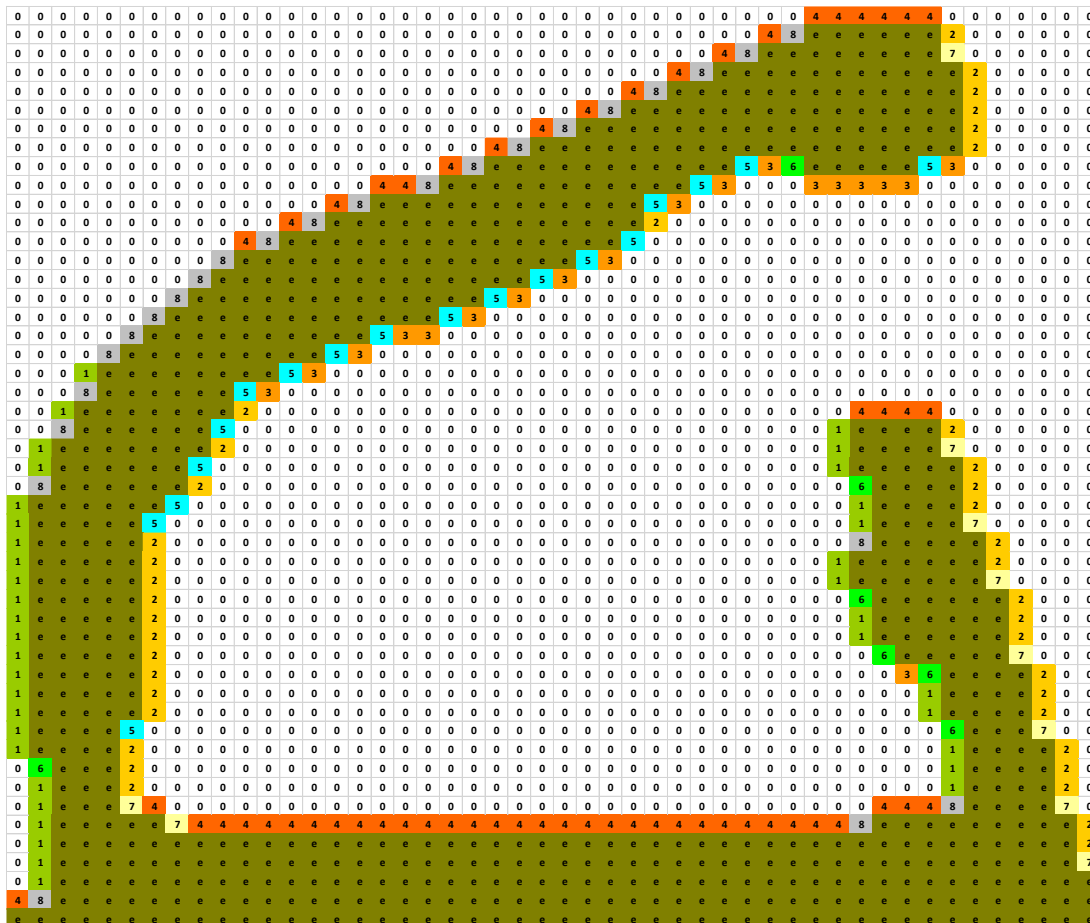
Harita 6.1. Darıca balıkçı barınağının coğrafi konumu ve çalışma alanı boyutları



Harita 6.2. Barınaktaki yüzeylerin özellikleri

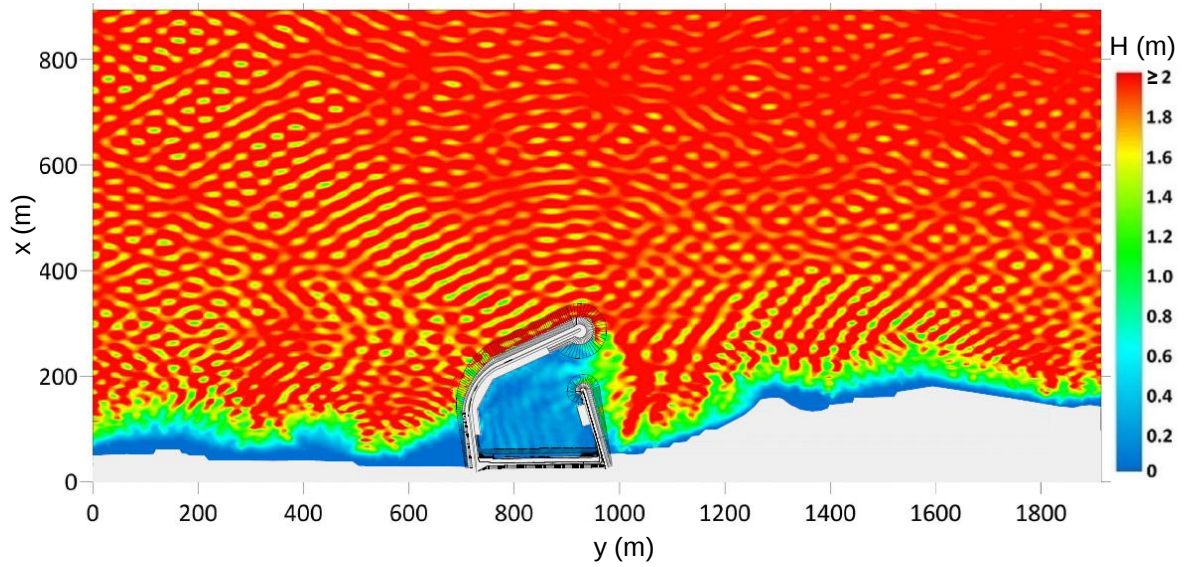


Şekil 6.20. RIDE modelinde barınak için sönümlleme katsayılarının tanımlanması

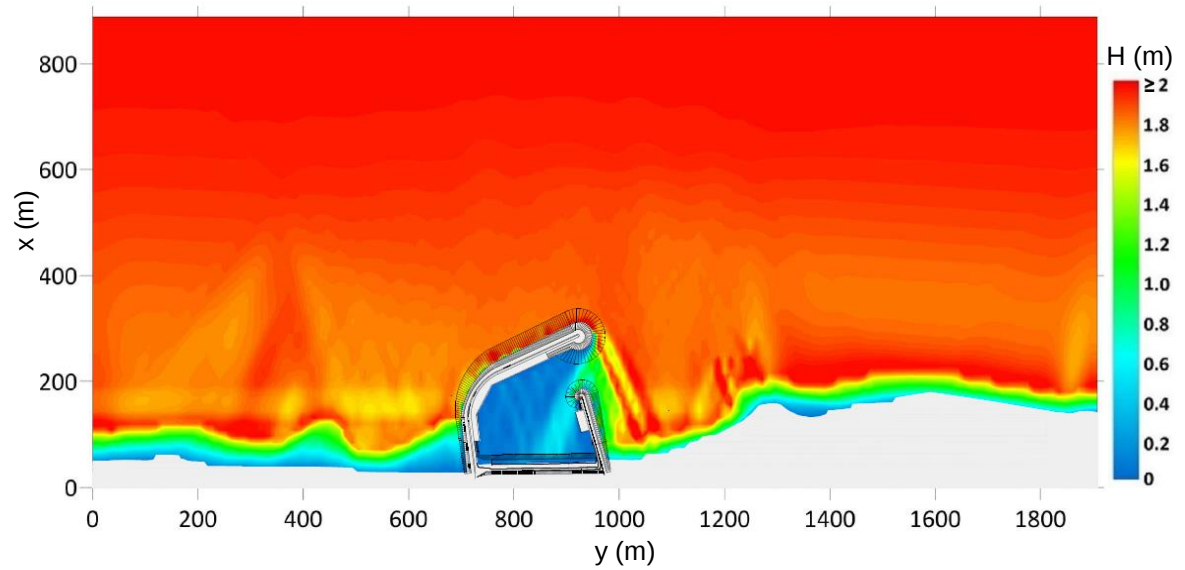


Şekil 6.21. RIDE modelinde barınak için sınır koşullarının tanımlanması

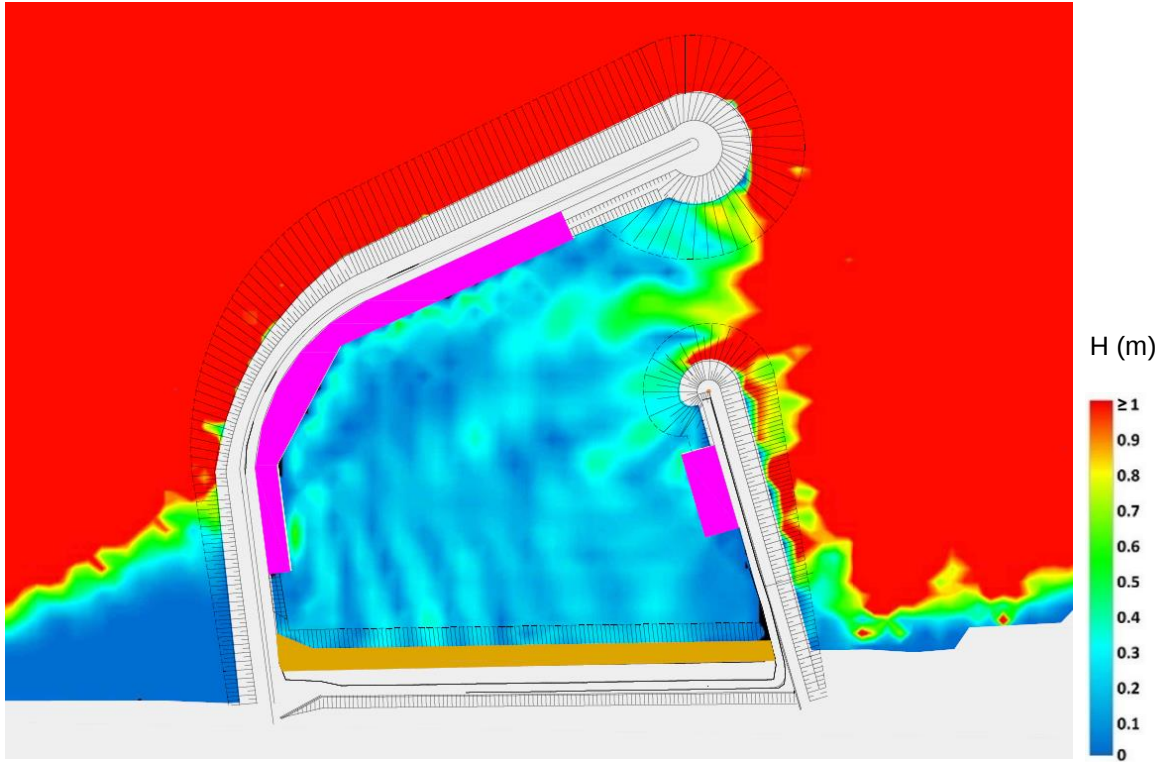
Modelleme sonucunda RIDE (Şekil 6.22) ve REF/DIF 1 (Şekil 6.23) modellerinin özellikle barınak içinde farklı dalga yüksekliği dağılımları hesapladığı görülmektedir. RIDE modeli yansıma etkilerini dikkate alabildiğinden dalgakıranın deniz tarafında dalga yüksekliği artmaktadır. Basen içi dalga değerleri de RIDE modelinde özellikle rıhtım önlerinde yükselmektedir ve dalga dağılımı daha homojendir. REF/DIF 1 modelinde ise basen içine giren dalgalar tek bir bölgeye doğru yoğunlaşmaktadır. Basen içi dalga yüksekliklerinin dağılımının daha rahat görülebilmesi için yakınlaştırılmış kontur çizgileri RIDE modeli için Şekil 6.24’de, REF/DIF 1 modeli için Şekil 6.25’te görülmektedir.



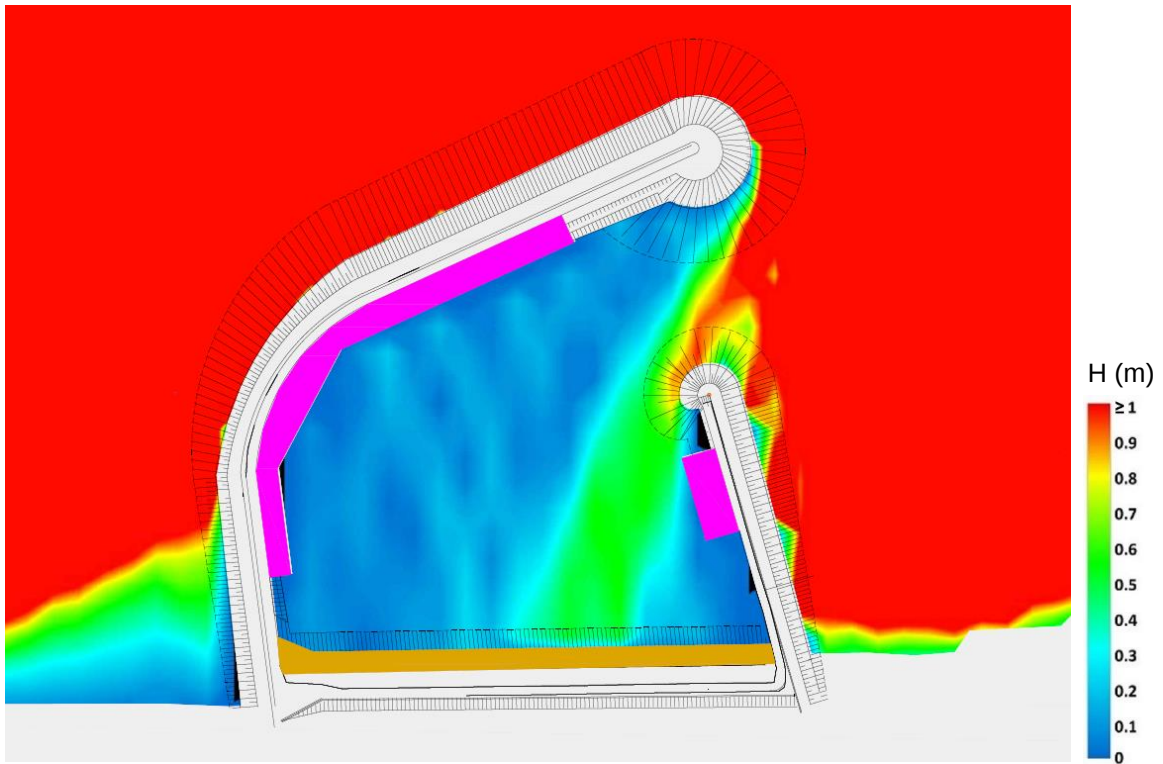
Şekil 6.22. RIDE modeli tahminlerine göre dalga yüksekliği dağılımı



Şekil 6.23. REF/DIF 1 modeli tahminlerine göre dalga yüksekliği dağılımı



Şekil 6.24. RIDE modeli tahminlerine göre basen içi dalga yüksekliği dağılımı



Şekil 6.25. REF/DIF 1 modeli tahminlerine göre basen içi dalga yüksekliği dağılımı

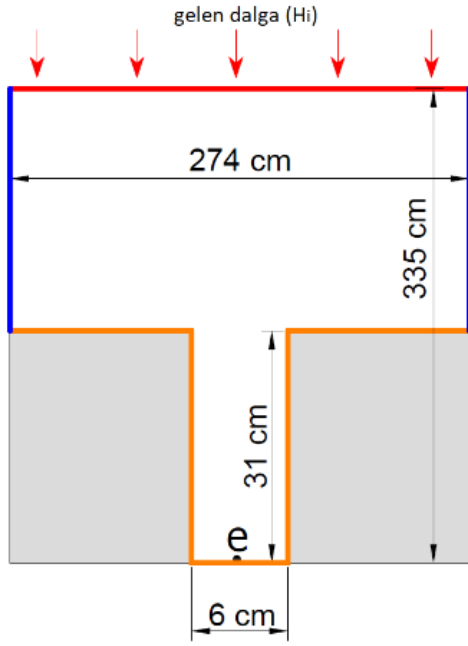
7. LİMAN REZONANSI

Liman, koy veya körfez gibi yarı kapalı su alanlarında oluşan serbest ya da zorlanmış salınım frekanslarının, bu alanların doğal frekansları ile örtüşmesi rezonans olarak tanımlanmaktadır [31]. Bir limanda rezonans oluştuğunda dalga yüksekliklerinde önemli miktarda artış meydana gelebilmektedir. Liman rezonansı çalışmasında, RIDE dalga modeli kullanılmış ve farklı vaziyet planları, farklı dalga periyotları, farklı dalga açıları, farklı taban topoğrafyaları dikkate alınarak modellemeler yapılmıştır.

Çalışmada öncelikle, RIDE dalga modelinin liman rezonansı hesaplama kabiliyetinin belirlenmesi için iki ayrı fiziksel ve numerik model çalışması ile karşılaştırma ve doğrulama yapılmıştır. Ardından bu sayısal modellerde kullanılan parametreler baz alınarak uzunluğu genişliğinin 2,16 katı olan ve farklı giriş ağzı geometrilerine sahip bir liman oluşturulmuştur. Bu limanın rezonans modlarının incelenmesi için dik ve 30° açılı dalgaların ilerlemeleri çalışılmıştır. Sonrasında ise RIDE modeli, liman rezonansı çalışması için Batı Karadeniz’de yer alan Filyos Limanı ve Kilimli Balıkçı Barınağına uygulanmıştır [65].

7.1. RIDE Modeli Tahminlerinin Doğrulama Çalışmaları

RIDE dalga modelinin liman rezonansı yeteneğinin belirlenmesi için dikdörtgen bir basen [32] [33] ve kare bir basen [35] kullanılarak gerçekleştirilen fiziksel ve sayısal model çalışmaları dikkate alınmıştır. Dikdörtgen basen deneyinde, dalga havuzu boyutları 11 ft uzunluğunda, 9 ft genişliğindedir. Basen boyutları ise 12,25 inç uzunluğunda, 2,38 inç genişliğinde ve 10,128 inç derinliğindedir. Bu birimler SI birimlerine dönüştürülerek RIDE modelinde 3,35 m uzunluğunda, 2,74 m genişliğinde bir çalışma alanı ve 31 cm uzunluğunda, 6 cm genişliğinde ve 25,73 cm derinliğinde bir basen kullanılmıştır. Çözüm ağı uzunluğu x ve y yönlerinde eşit ve 0,01 m olarak seçilmiştir. Modellemede 0,5 – 12,32 sn. aralığında 50 farklı dalga periyodu kullanılmıştır. Büyütme faktörü (R), dikdörtgen liman sonundaki (e noktası) dalga yüksekliğinin, başlangıç dalga yüksekliğinin iki katına oranı ile hesaplanmaktadır ($H_e/2H_i$). RIDE dalga modelinde, dalga üst açık sınırdan dik şekilde yaklaşmaktadır (Şekil 7.1 kırmızı çizgi). Sol ve sağ sınır koşulları geçirimli sınır olarak tanımlanmıştır (Şekil 7.1 mavi çizgiler). Bu sınırlarda yansıma yoktur. Dikdörtgen liman ve limana komşu kenarlarda tam yansıma sınır koşulu tanımlanmıştır (Şekil 7.1 turuncu çizgiler). Sönümleme katsayısı $\alpha=0$ olarak kullanılmıştır.

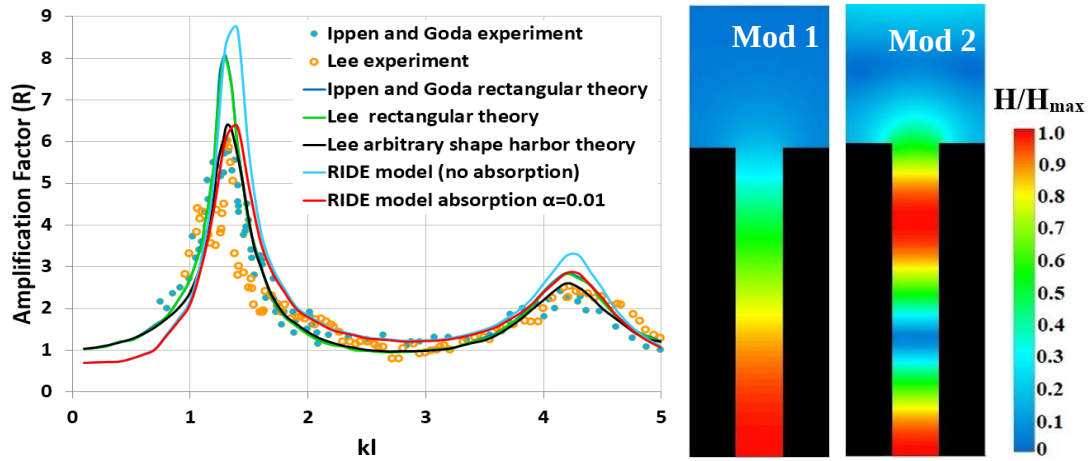


Şekil 7.1. Dikdörtgen liman için çalışma alanı

Modelleme sonucunda “e” noktasında elde edilen dalga yüksekliklerinin başlangıç dalga yüksekliğinin iki katına oranlanması sonucunda hesaplanan büyütme faktörü ve limanın ilk iki moduna ait alansal boyutsuz dalga yüksekliği dağılımı Şekil 7.2’de görülmektedir. Dalga yüksekliği dağılımları, her bir rezonans modundaki en büyük dalga yüksekliği kullanılarak normalize edilmiştir. Liman sınırlarındaki sönümlenme katsayısının $\alpha=0$ olarak kullanılması sonucunda “e” noktasındaki büyütme faktörü birinci modda dikdörtgen liman teorilerinden %11, ikinci modda %8 daha büyük elde edilmiştir. Fiziksel model sonuçlarından ise birinci modda %46, ikinci modda %30 daha büyük elde edilmiştir. Yumuşak eğim eşitliğine dayalı geliştirilmiş farklı bir modelde [43] aynı dikdörtgen liman örneği için farklı sönümlenme katsayıları test edilmiştir. Bu doğrultuda RIDE modelinde liman sınır koşullarında tam yansımaya ($\alpha=0$) yerine $\alpha=0,01$ tanımlanarak modelleme tekrarlanmıştır. Bu durumda yansımaya katsayısı %100 yerine %98 olarak dikkate alınmıştır. Liman içindeki “e” noktasındaki büyütme faktörü birinci modda %6,6, ikinci modda %15,8 daha büyük elde edilmiştir (Şekil 7.2 kırmızı eğri). Bu sayede RIDE modeli ile fiziksel deney sonuçlarına yaklaşılmıştır. Şekil 7.2’de x eksenini, dalga sayısı ve liman uzunluğunun çarpımı ile elde edilmiş kl değeri, y eksenini büyütme faktörüdür. RIDE modeli sonuçlarının, Ippen ve Goda fiziksel model deneyi sonuçları ile istatistiki karşılaştırılması Çizelge 7.1’de sunulmuştur. Buna göre $\alpha=0,01$ sönümlenme katsayısı ile RIDE modeli %24,52 kök ortalama kare hatası, %20,1 yüzde ortalama gerçek hata ve %94,21 uyum indeksiyle dikdörtgen liman fiziksel model deneyi sonuçlarına yaklaşılmıştır.

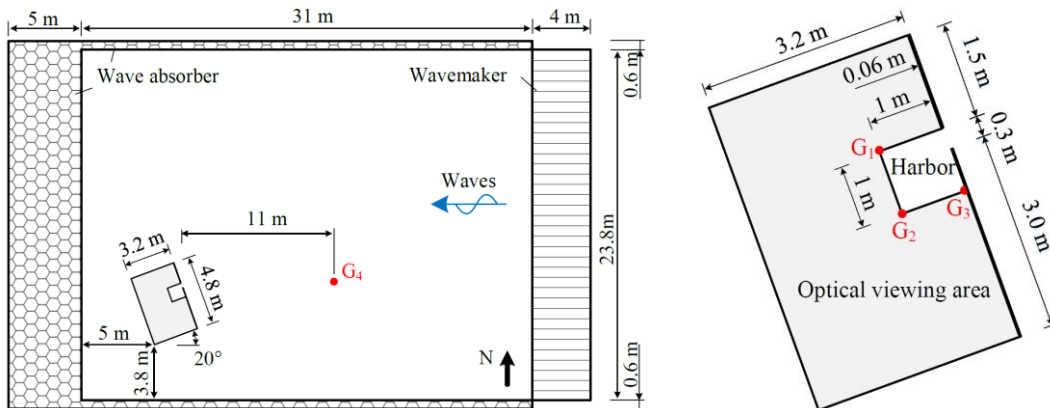
Çizelge 7.1. Dikdörtgen liman fiziksel model deneyleri ile RIDE modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Model	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)
$\alpha=0$ ($r=\%100$)	1,43	38,33	0,98	30,71	0,78	85,67	90,11
$\alpha=0,01$ ($r=\%98$)	0,73	24,52	0,56	20,12	0,26	94,21	93,86



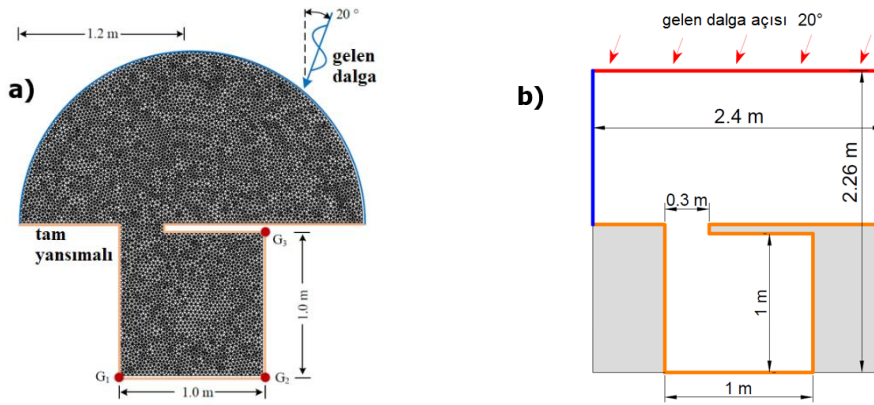
Şekil 7.2. Dikdörtgen liman sonundaki “e” noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrisi ve mod şekilleri

Diğer doğrulama çalışmasında, kare bir liman üzerine yapılmış fiziksel ve yumuşak eğim eşitliğine dayalı sayısal bir model [35] kullanılmıştır. Kare liman fiziksel model deneyinde, dalga havuzu 40 m uzunluğunda ve 25 m genişliğindedir. Kare liman boyutları 1 m x 1 m, liman içi ve dışı su derinliği 0,6 m ve liman giriş ağzı 0,3 m genişliğindedir. Başlangıç dalga yüksekliği 0,04 m ve dalga geliş açısı 20° dir. Deneyde dalga yüksekliği ölçümleri liman köşelerine yerleştirilen üç adet dalga ölçer (G1, G2 ve G3) ile yapılmıştır (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. Kare liman fiziksel model deneyinde dalga havuzu ve liman boyutları [35]

RIDE dalga modeli ile yapılan modellemede, sayısal model alanı ve kullanılan parametreler doğrulama çalışmasına göre hazırlanmıştır. İki çalışmada da kullanılan model alanları Şekil 7.4'te görülmektedir. RIDE modelinde çözüm ağı uzunluğu x ve y yönlerinde eşit ve 0,02 m olarak seçilmiştir. Modellemede 0,83 – 7,42 sn. aralığında 36 farklı dalga periyodu kullanılmıştır. Dalga üst sınırdan 20° açılı şekilde gelmektedir (Şekil 7.4b kırmızı çizgi). Sol ve sağ kenarlar geçirimli sınır olarak tanımlanmıştır (Şekil 7.4b mavi çizgiler). Bu sınıra gelen dalgalar yansıyarak çalışma alanına geri dönmemektedir. Kare liman ve limana komşu kenarlarda tam yansımaya sınır koşulu tanımlanmıştır (Şekil 7.4b turuncu çizgiler). Sönümleme katsayısı $\alpha=0$ olarak kullanılmıştır. Büyütme faktörü dikdörtgen liman örneğindeki gibi G1, G2 ve G3 noktalarındaki dalga yüksekliklerinin başlangıç dalga yüksekliğinin iki katına oranı ile hesaplanmıştır.



Şekil 7.4. Sayısal model çalışma alanı a) Dong ve ark. (2020) b) RIDE modeli

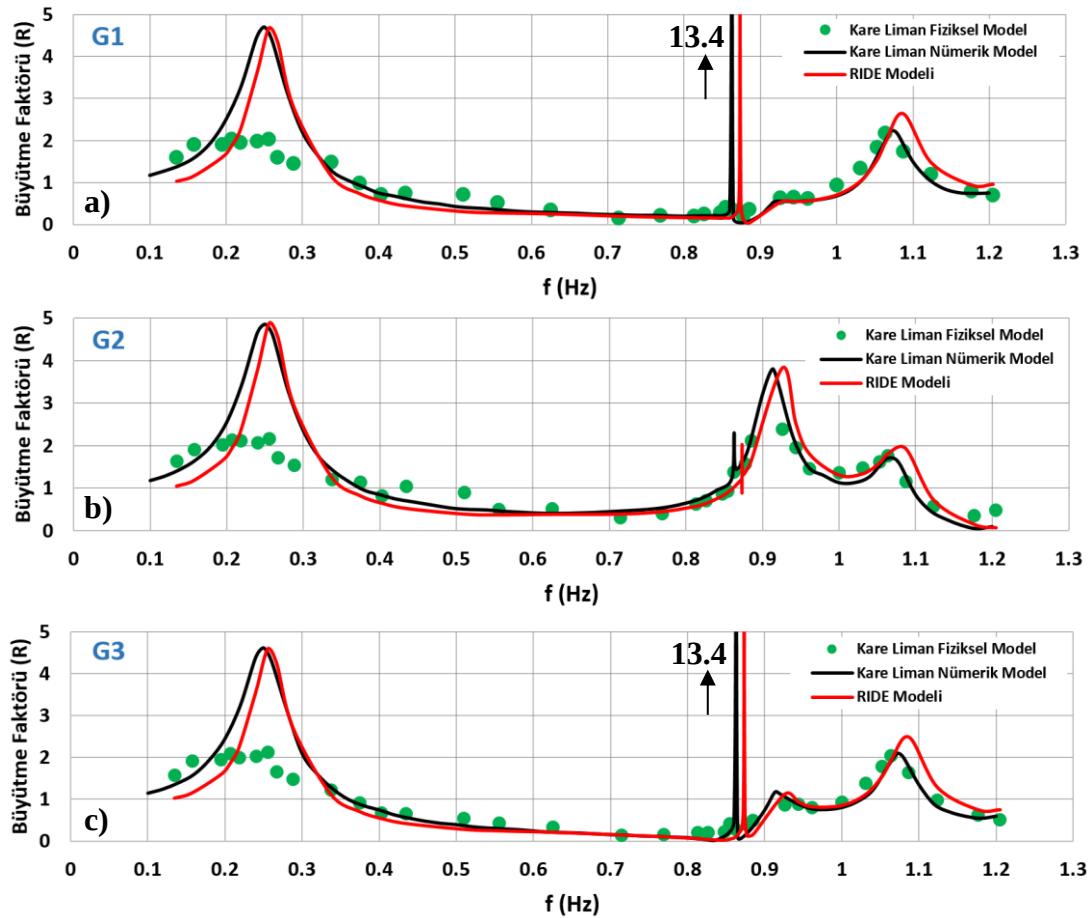
Kare liman sayısal model çalışmasında dört rezonans modu belirlenmiştir. Model sonuçları Şekil 7.5'te görülmektedir, x eksen dalga frekansı, y eksen ise büyütme faktörüdür. RIDE modelinde birinci modda fiziksel deney sonucuna göre %131 fark oluşmuştur. Dong ve ark. sayısal modelinde ise birinci modda %129 fark oluşmuştur. Buna göre RIDE modeli ile Dong ve ark. sayısal modeli birinci modda çok yakın değerler hesaplamıştır. İkinci mod diğerlerinden çok yüksektir ve ekstrem mod olarak adlandırılmıştır. Fiziksel model deneyinde $f=0,865$ Hz frekansında G1 ve G3 köşelerindeki ölçümlere göre 0,90 büyütme faktörü elde edilirken RIDE ve Dong ve ark. sayısal modellerinde 13,4 büyütme faktörü hesaplanmıştır. Yaklaşık 13 katlık bu fark RIDE modelinde ise $f=0,87319$ Hz ($T=1,14522$ sn.) frekansında elde edilmiştir. Ekstrem mod çok dar bir frekans aralığında oluşabilmekte ve bulunabilmesi için çok fazla model tekrarı gerektirmektedir. RIDE modeli ile elde edilen kare limana ait mod şekilleri Şekil 7.6'da görülmektedir. Dalga yüksekliği dağılımları, her

bir rezonans modunda basen içindeki en büyük dalga yüksekliği kullanılarak normalize edilmiştir. RIDE ve Dong ve ark. sayısal modellerinin fiziksel model deneyi sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 7.2’de verilmiştir.

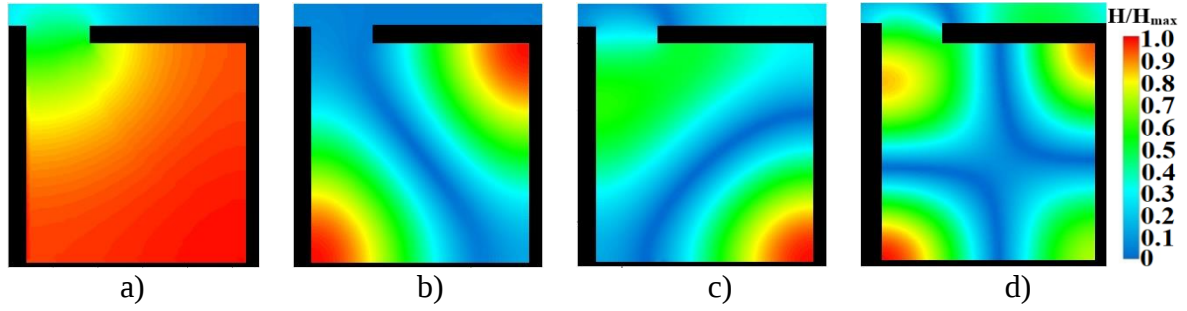
Çizelge 7.2. Kare liman fiziksel model deneyleri ile RIDE ve Dong ve ark. sayısal modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması

Model	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)
RIDE	0,789	53,09	0,461	39,8	0,139	80,16	79,43
Dong ve ark.	0,756	46,68	0,419	33,6	0,241	82,64	85,93

Dikdörtgen ve kare liman fiziksel ve sayısal model çalışmaları ile RIDE modeli tahminlerinin karşılaştırılması sonucunda, RIDE modelinin liman rezonansını başarılı bir şekilde benzeştirebildiği belirlenmiştir.



Şekil 7.5. Kare limanda büyütme faktörünün frekans ile değişimleri a) G1 b) G2 c) G3



Şekil 7.6. RIDE modeli ile tahmin edilen kare liman mod şekilleri a) Mod 1 b) Mod 2 c) Mod 3 d) Mod 4

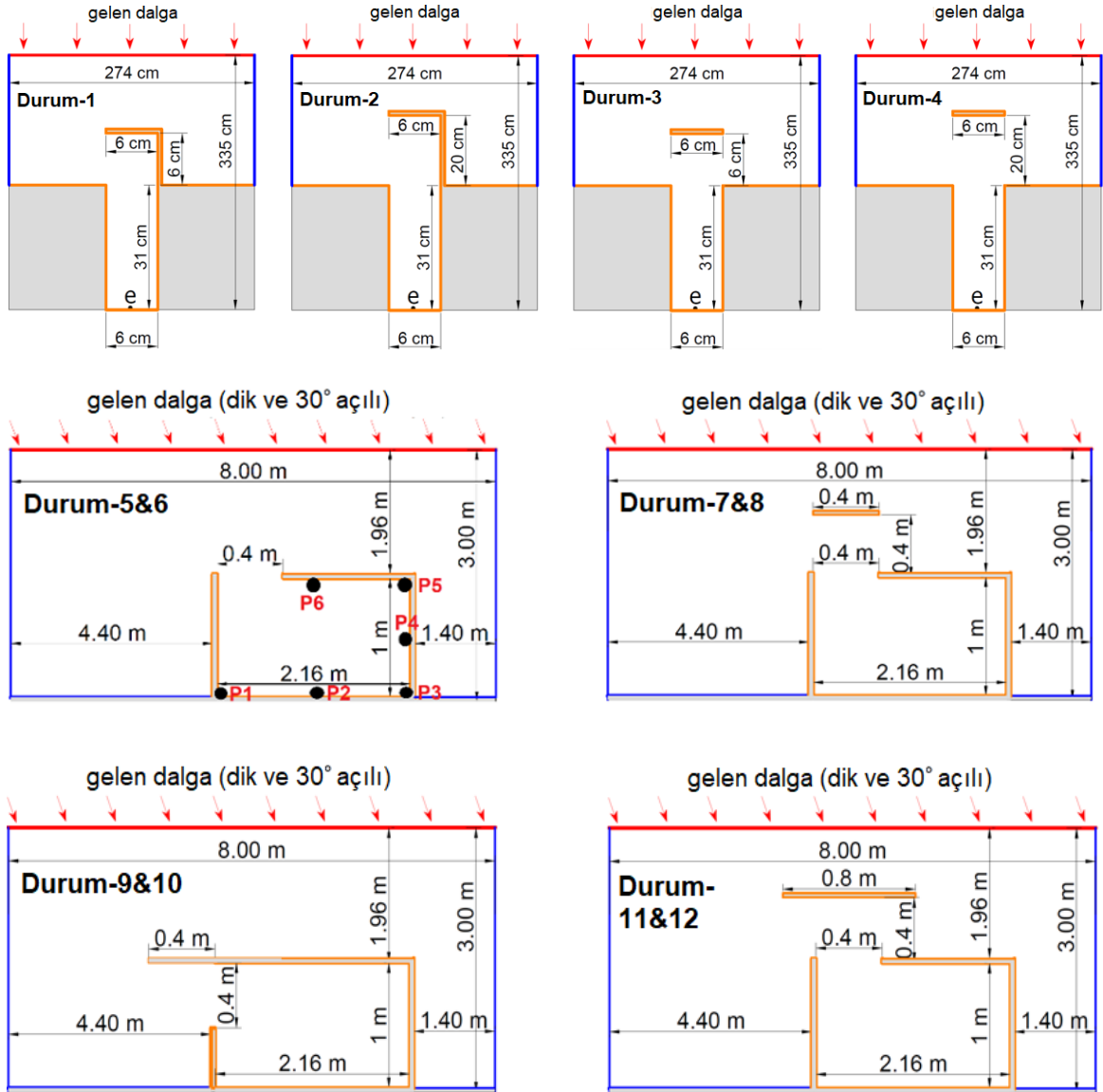
7.2. Rezonans Çalışmalarında Kullanılan Liman Geometrileri

Liman ağzından dik şekilde giren dalgalar dalga yüksekliğinin liman içinde önemli ölçüde artmasına neden olabilmektedir. Bu durum literatürde sabit su derinliği, sabit, üssel veya parabolik deniz taban eğimleri ve farklı liman geometrileri kullanılarak fiziksel ve sayısal modeller ile yaygın biçimde çalışılmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde, dalga ilerleme yönünde bir engel olması durumunda kırınımına uğrayan dalgaların liman rezonansına etkisi incelenmiştir. Kırınım etkisinin incelenmesi için RIDE modelinin doğrulanmasında kullanılan sayısal modellerdeki liman geometrileri baz alınarak toplamda 8 farklı liman ve 12 farklı durum (Şekil 7.7) için modellemeler yapılmıştır. Durum-1'den Durum-4'e 0,50 – 12,32 sn. aralığında 50 farklı dalga periyodu, Durum-5'ten Durum-12'ye 0,70 -7,90 sn. aralığında 60 farklı dalga periyodu kullanılmıştır. Büyütme faktörü Şekil 7.7'de belirtilen noktalardaki dalga yüksekliklerinin başlangıç dalga yüksekliğinin iki katına oranı ile hesaplanmıştır. Şekil 7.7'de kırmızı çizgi gelen dalga sınır koşulunu, mavi çizgi geçirimli (yansıma yok) sınır koşulunu ve turuncu çizgiler tam yansıma sınır koşulunu simgelemektedir. Durum-1'den Durum-4'e sönümlleme katsayısı $\alpha=0,01$, Durum-5'ten Durum-12'ye sönümlleme katsayısı $\alpha=0$ olarak kullanılmıştır. Çalışılan durumlar aşağıda özetlenmiştir.

- Dikdörtgen limana L şeklinde bir dalgakıran eklenmesi ve dalgaların dik gelmesi durumu (Durum-1)
- Dikdörtgen limana L şeklinde daha uzun bir dalgakıran eklenmesi ve dalgaların dik gelmesi durumu (Durum-2)
- Dikdörtgen limana bir ayırık dalgakıran eklenmesi ve dalgaların dik gelmesi durumu (Durum-3)

- Dikdörtgen limana daha uzakta bir dalgakıran eklenmesi ve dalgaların dik gelmesi durumu (Durum-4)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların dik geldiği, liman giriş ağzı açık denize bakan bir dikdörtgen liman (Durum-5)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların 30° açılı geldiği, liman giriş ağzı açık denize bakan bir dikdörtgen liman (Durum-6)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların dik geldiği, liman giriş ağzı ayrı dalgakıran ile korunmuş bir dikdörtgen liman (Durum-7)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların 30° açılı geldiği, liman giriş ağzı ayrı dalgakıran ile korunmuş bir dikdörtgen liman (Durum-8)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların dik geldiği, liman giriş ağzı dalgakıran ile korunmuş dikdörtgen liman (Durum-9)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların 30° açılı geldiği, liman giriş ağzı dalgakıran ile korunmuş dikdörtgen liman (Durum-10)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların dik geldiği, liman giriş ağzı uzun ayrı dalgakıran ile korunmuş bir dikdörtgen liman (Durum-11)
- Kare liman çalışmasının parametreleri baz alınarak oluşturulan ve dalgaların 30° açılı geldiği, liman giriş ağzı uzun ayrı dalgakıran ile korunmuş bir dikdörtgen liman (Durum-12)

Büyütme faktörü, Durum-1 – Durum-4’te liman sonundaki “e” noktasında, Durum-5 – Durum-12’de ise liman içindeki toplam 6 noktada hesaplanmıştır. P1 basenin sol alt köşesinde, P2 alt kenarın ortasında, P3 sağ alt köşede, P4 sağ kenarın ortasında, P5 sağ üst köşede ve P6 üst kenarın ortasındadır. Modellemelerde elde edilen modlara ait alansal dalga dağılımları her bir rezonans modunda basen içindeki en büyük dalga yüksekliğine göre normalize edilmiştir.

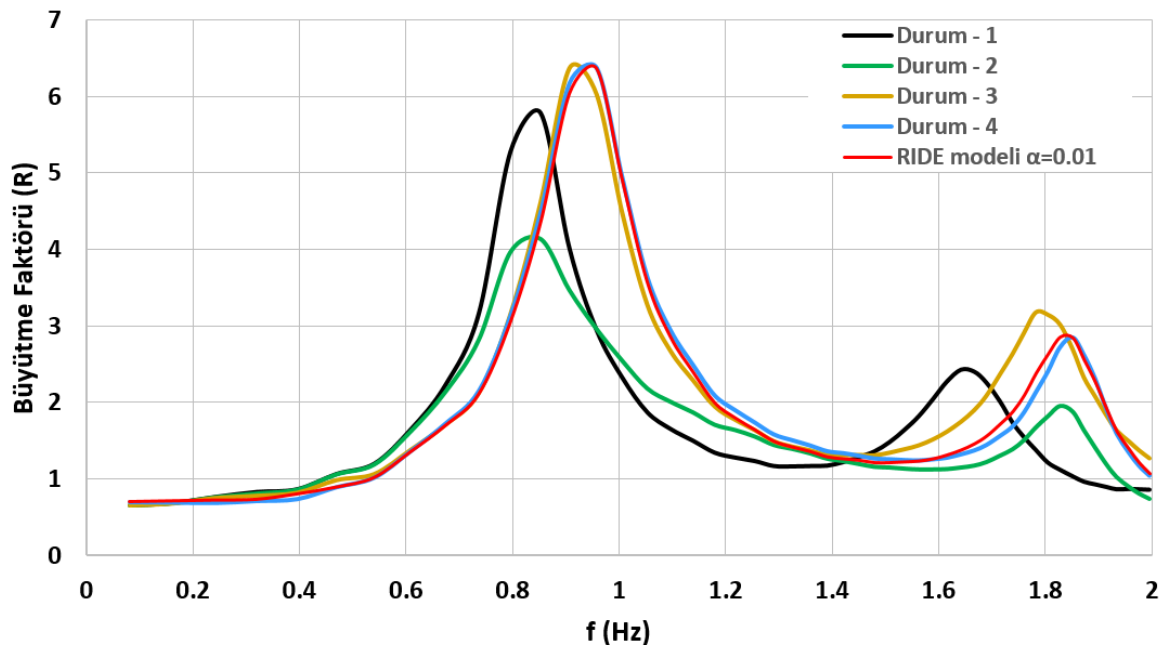


Şekil 7.7. Çalışılan Durumlara ait liman geometrileri ve dalga açıları

7.3. Uzun ve İnce Liman Rezonans Modellemesi Sonuçları

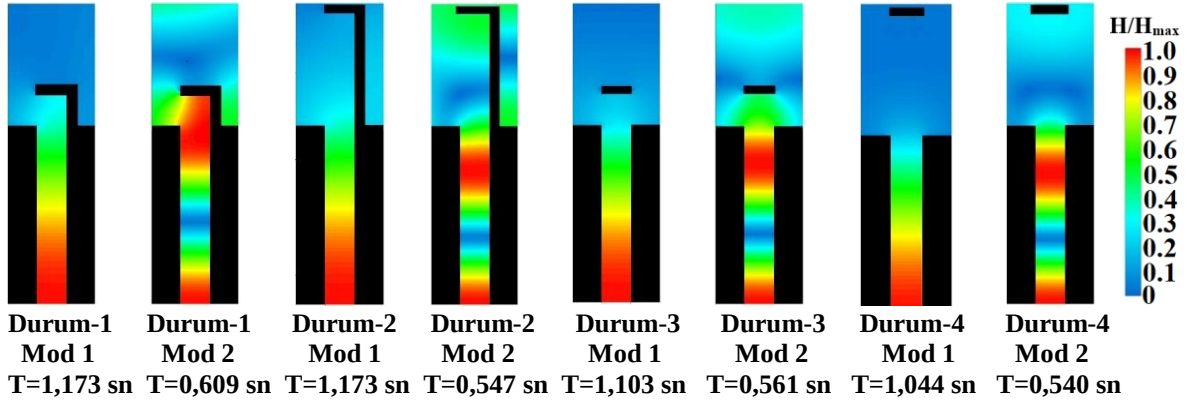
Durum-1 ve Durum-2’de uzun ve ince dikdörtgen limana iki farklı L şeklinde dalgakıran eklenmiştir. Durum-1’de dalgakıranın dalga ilerleme yönündeki genişliği ve uzunluğu, liman giriş ağzı genişliği (6 cm) kadardır. Durum-2’ de ise genişlik sabit tutulup uzunluk 20 cm’ye çıkarılmıştır. RIDE modelinin dikdörtgen liman doğrulama çalışmasında birinci mod $T=1,044$ sn. ve ikinci mod $T=0,547$ sn’de elde edilmiştir (Şekil 7.8, kırmızı eğri). Durum-1’de L şeklinde dalgakıran ile büyütme faktörü birinci modda %9,18, ikinci modda %15,06 azalmış ve limanın rezonans tepkisi değişmiştir. Durum-1 ile birinci rezonans periyodu %12 yükselerek $T=1,173$ sn, ikinci rezonans periyodu %11,3 yükselerek $T=0,609$ sn olarak hesaplanmıştır. Durum-2’de ise büyütme faktörü oranı birinci modda % 35,09, ikinci modda

%31,7 azalmıştır. Durum-2 ile birinci rezonans periyodu %12 yükselerek $T=1,173$ sn olarak hesaplanmıştır, ikinci rezonans periyodu ise değişmemiştir. Liman girişini daha fazla kapatan Durum-1’de büyütme faktörü azalışının daha fazla olması beklenirken böyle bir sonuç oluşmamıştır. Bunun sebebi “liman paradoksu” tanımlaması ile açıklanabilmektedir. Dar liman giriş ağzı geniş giriş ağzına göre büyütme faktörünün daha fazla artmasına neden olabilmektedir. Ancak bu durum sadece rezonans modları için geçerlidir [44]. Durum-1 ve Durum-2 modelleri, L şeklinde bir dalgakıran ile liman rezonansının azaltılabileceğini göstermiştir.



Şekil 7.8. Dikdörtgen liman sonundaki “e” noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri

Durum-3 ve Durum-4’te, uzun ve ince dikdörtgen limanın önüne dalga geliş yönünde engel oluşturacak şekilde ayırık dalgakıran eklenmiştir. Durum-3’te ayırık dalgakıranın dalga ilerleme yönündeki genişliği ve uzunluğu, liman giriş ağzı genişliği (6 cm) kadardır. Durum-4’te ise genişlik sabit tutulup uzunluk 20 cm’ye çıkarılmıştır. Modelleme sonucunda, limana yakın veya uzak olup, genişliği liman giriş ağzı genişliğine eşit olan bir ayırık dalgakıranın, birinci ve ikinci rezonans modlarını azaltıcı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Durum-1 – Durum-4’e ait alansal dalga yüksekliği dağılımları Şekil 7.9’da görülmektedir. Durum-1 ile Durum-4 arasındaki çalışmalarda hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar Çizelge 7.3’te verilmiştir.



Şekil 7.9. Durum – 1 – Durum – 4’e ait mod şekilleri

Çizelge 7.3. Durum-1 ile Durum-4 arasındaki çalışmalarda hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler Durum çalışmalarının “RIDE model $\alpha=0,01$ ” sonuçlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerleri rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)

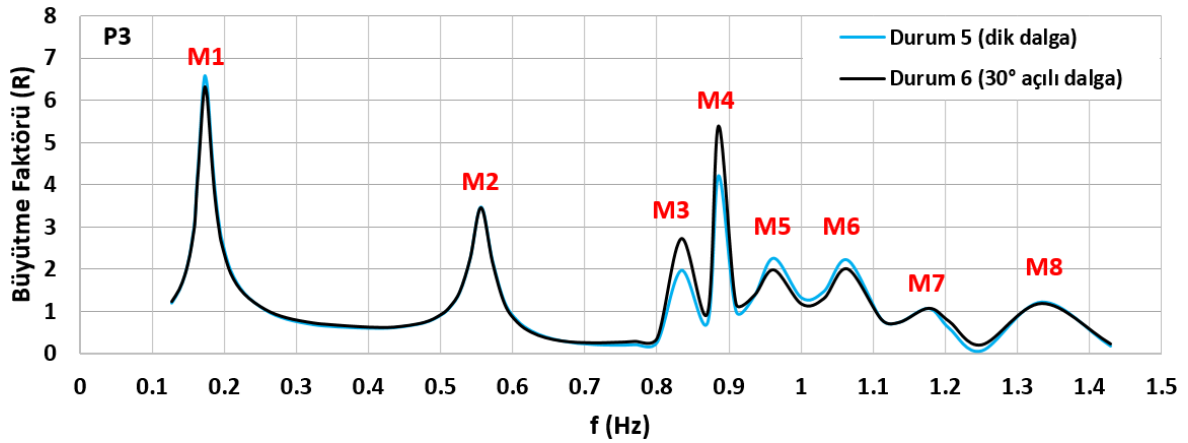
Durum	Rezonans Değeri		Durum 1 – Durum 4 sonuçlarının “RIDE model $\alpha=0,01$ ” sonuçlarına oranı (%)	
	M1	M2	M1	M2
RIDE model $\alpha=0,01$	6,37	2,86		
Durum -1	5,79	2,43	9,18	15,06
Durum -2	4,14	1,95	35,09	31,70
Durum -3	6,37	3,18	0,00	-11,21
Durum -4	6,37	2,85	0,00	0,18

7.4. Dik ve Açılı Gelen Dalgaların Liman Rezonansına Etkisi

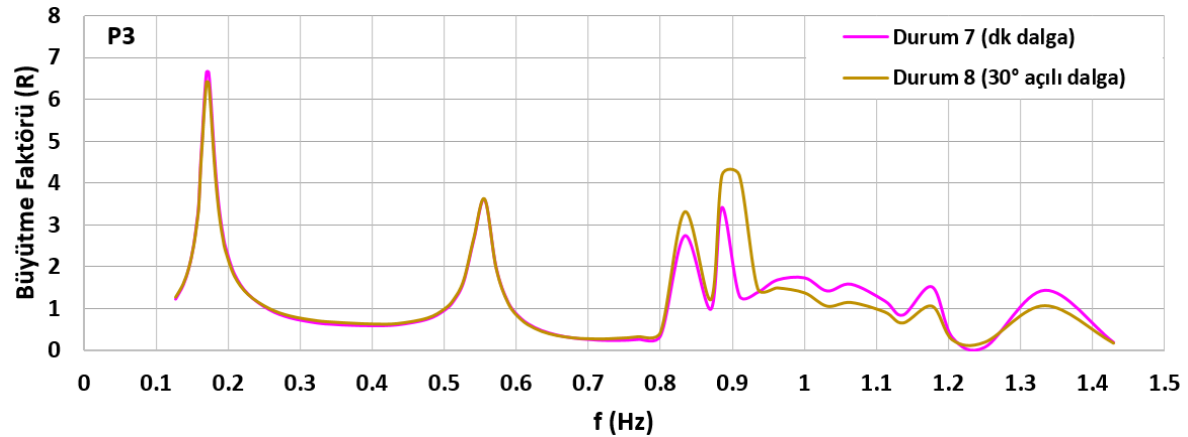
Kare liman sayısal modeli baz alınarak genişliği 1 m, uzunluğu 2,16 m, giriş ağzı genişliği 0,4 m olan bir dikdörtgen liman oluşturulmuştur. Su derinliği tüm çalışma alanında 0,6 m ve dalga yüksekliği 0,04 m’dir. Çalışma alanı boyutları 8x3 m ve çözüm ağı uzunluğu 0,02 m’dir. Açılı dalgaların liman alanına uygun şekilde ulaşabilmesi için liman, çalışma alanının sağına doğru yerleştirilmiştir. Dört farklı liman geometrisi oluşturulmuştur. Durum-5 ve Durum-6’da liman giriş ağzı dalga geliş yönüne açıktır. Durum-7 ve Durum-8’de liman girişine, uzunluğu ve limana uzaklığı giriş ağzı genişliğine eşit bir ayırık dalgakıran yerleştirilmiştir. Durum-9 ve Durum-10’da liman ana dalgakıranı liman girişini gölgeleyecek şekilde liman giriş ağzı genişliği kadar uzatılmıştır. Durum-11 ve Durum-12’de, Durum-5’teki ile aynı konumda ancak iki kat daha uzun bir ayırık dalgakıran

yerleştirilmiştir. Her bir durumda dik ve 30° açılı dalgalar kullanılarak 0,70-7,90 sn aralığında 60 farklı dalga periyodu ile sekiz farklı durum çalışılmıştır.

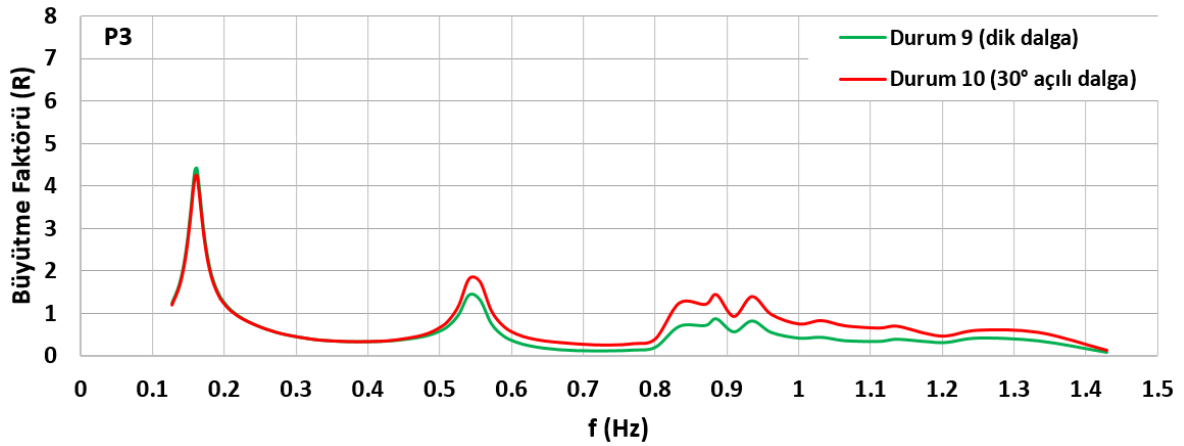
Liman giriş ağzına en uzak nokta olan P3 dikkate alınarak sekiz rezonans modu belirlenmiştir. P3 noktasına ait büyütme faktörü eğrileri dört farklı liman geometrisinde dik ve açılı yaklaşan dalgalar için Şekil 7.10- Şekil 7.13'te görülmektedir. Rezonans modları M1-M8 olarak işaretlenmiştir. Birinci modda (M1) liman giriş ağzından sonuna kadar tüm basende dalga yükseklikleri artmıştır. Dalga profilinde düğüm noktası bulunmamaktadır. M2 ve M3 boyuna yönde oluşan rezonans modlarıdır. M2'de bir, M3'te iki düğüm noktası oluşmuştur. M4 enine yönde oluşan rezonans modudur. M4'te enine yönde bir düğüm noktası bulunmaktadır. Diğer rezonans modlarında dalga profilinde hem boyuna hem de enine yönde birden fazla düğüm noktası oluşmuştur.



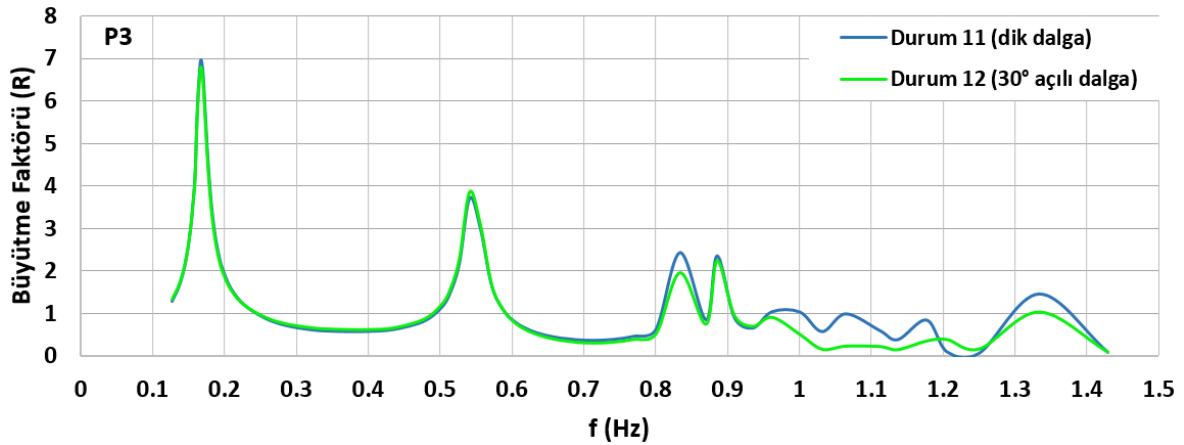
Şekil 7.10. P3 noktasında Durum-5 ve Durum-6 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



Şekil 7.11. P3 noktasında Durum-7 ve Durum-8 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



Şekil 7.12. P3 noktasında Durum-9 ve Durum-10 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



Şekil 7.13. P3 noktasında Durum-11 ve Durum-12 için hesaplanan büyütme faktörü eğrileri

Dört farklı liman geometrisinde ayrı ayrı dik ve açılı yaklaşan dalgaların dağılımı incelendiğinde, birinci rezonans modunda (M1) dik dalgalar, açılı dalgalardan yaklaşık %2 daha büyük büyütme faktörü oluşturmuştur. İkinci rezonans modunda (M2) sadece Durum-10'da büyütme faktörü %26,48 artmaktadır. Durum-10 da oluşan fark, açılı yaklaşan dalgaların daha az kırınımına uğramalarıdır. Diğer durum çalışmalarında ise M2'de dik ve açılı dalgalar arasında fark oluşmamıştır. Üçüncü rezonans modu ve sonrasında liman geometrisinin dalga açısına göre farklılık oluşturduğu görülmüştür. Açılı dalga etkisinde büyütme faktörü Durum-6'da M3'te %38,3, M4'te %28,12, Durum-8'de M3'te %20,83, M4'te %22,65, ve Durum-10'da %45,17, M4'te %42 artmıştır. Ancak Durum-12'de açılı dalga ile büyütme faktöründe M3'te %19,63, M4'te %4,99 azalış olduğu görülmüştür. Ayrık dalgakıran (Durum-8), liman rezonansını görece küçük dalga periyotlarında (M5 ve sonrasında) %24,72 ve giriş ağzı genişliğinin iki katı uzunluğundaki ayrık dalgakıran

(Durum-12) ise %41,33 azaltabilmektedir. Daha uzun ayırık dalgakıran M3-M8 arasında açılı dalga etkisinde daha iyi koruma sağlamaktadır. M5 ve sonraki rezonans modlarında Durum-6'da dik dalgaya göre %7,41 azalış ile önemli bir değişim oluşmamaktadır. Durum-8 ve Durum-12'de büyütme faktörü M3 ve M4'ün aksine azalış göstermektedir. Durum-10'da ise M5 ve sonrası için rezonans oluşumu tam olarak gerçekleşmemiştir. Ancak açılı dalgalar Durum-10 geometrisinde dik dalgalara göre basen içerisinde %59,34 daha büyük rezonans değerleri oluşturmaktadır. Durum-5 ile Durum-12 arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Durum-5 ile Durum-12 arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdelere açılı dalga durumlarının dik dalga durumlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerler rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)

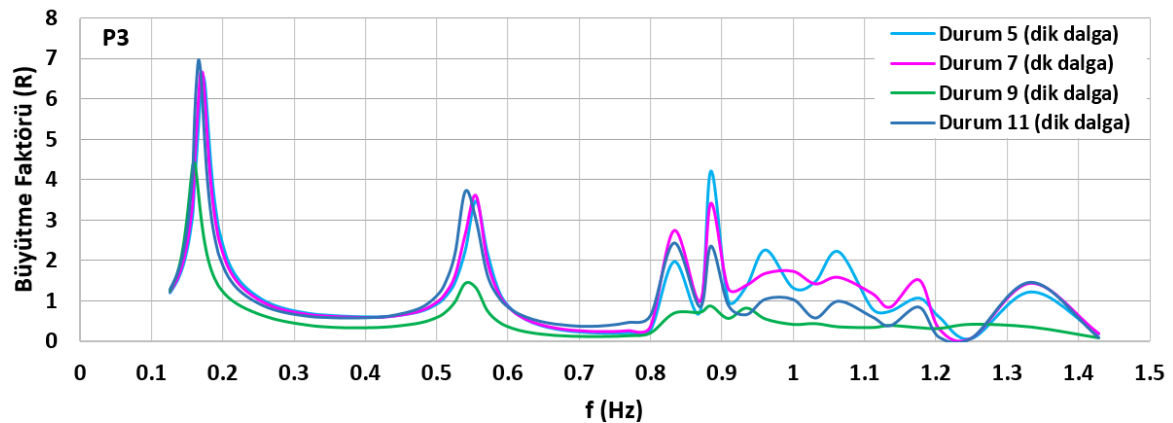
Durum	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Durum-5	6,57	3,47	1,97	4,21	2,25	2,21	1,06	1,22
Durum-6	6,31	3,45	2,72	5,39	1,98	2,01	1,07	1,18
Durum-6 sonuçlarının Durum-5 sonuçlarına oranı (%)	3,96	0,52	-38,30	-28,12	12,38	9,00	-0,66	2,58
Durum-7	6,65	3,60	2,74	3,41	1,73	1,58	1,52	1,44
Durum-8	6,42	3,61	3,31	4,18	1,48	1,13	1,05	1,06
Durum-8 sonuçlarının Durum-7 sonuçlarına oranı (%)	3,44	-0,31	-20,83	-22,65	14,23	28,24	31,05	26,31
Durum-9	4,42	1,44	0,83	0,94	0,86	0,47	0,39	0,42
Durum-10	4,26	1,82	1,20	1,34	1,30	0,82	0,69	0,60
Durum-10 sonuçlarının Durum-9 sonuçlarına oranı (%)	3,62	-26,48	-45,17	-42,00	-50,80	-75,73	-76,36	-41,67
Durum-11	6,97	3,71	2,43	2,36	1,04	0,99	0,84	1,46
Durum-12	6,80	3,85	1,96	2,24	0,90	0,23	0,38	1,03
Durum-12 sonuçlarının Durum-11 sonuçlarına oranı (%)	2,47	-3,80	19,63	4,99	13,21	77,27	54,75	29,42

7.5. Liman Geometrilerinin Karşılaştırılması

Genel olarak en büyük büyütme faktörü değerleri giriş ağzı açık denize bakan Durum-5'te elde edilmiştir. M1 ve M2 modları, Durum-5, Durum-7 ve Durum-11'de yaklaşık aynı değerlerde oluşmuştur. Durum-3 ve Durum-4'te olduğu gibi büyük dalga periyotlarında ayırık dalgakıranların rezonansı azaltıcı bir katkısının olmadığı belirlenmiştir. Açılı dalga

koşulu için de bu durum aynıdır. Ancak liman ana dalgakıranının giriş ağzını gölgeleyecek biçimde uzatılması ile oluşturulan Durum-9'da, büyütme faktörü Durum-5'e göre M1'de %32,72, M2'de %58,5 azalmıştır. Açılı dalga koşulunda da, Durum-10'da benzer oranlarda azalma meydana gelmiştir. Durum-9 ve Durum-10'da kırınım etkisi yüksek olduğundan liman ağzından giren dalga yüksekliğinde meydana gelen azalma ile görece düşük dalga periyotlarında (M3 ve sonrası) büyütme faktörü değerleri %35-80 oranlarında azalmıştır. M3 ve sonrası rezonans modlarında, uzunluğu ve limandan uzaklığı, liman giriş ağzı genişliği kadar olan ayırık dalgakıranın (Durum-7 ve Durum-8), Durum-5 ve Durum-6'ya oranla %9,68, uzunluğun arttırılması halinde ise (Durum-11 ve Durum-12) %41,84 fayda sağladığı görülmüştür. Ayırık dalgakıran uzunluğunun arttırılması ile özellikle açılı dalga koşulunda fayda oranının arttığı belirlenmiştir. P3 noktasına ait farklı liman geometrilerinde, dik ve açılı dalga etkisinde hesaplanan büyütme faktörü eğrileri Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'te görülmektedir. Durum-5 ile Durum-12 arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar Çizelge 7.5'te verilmiştir.

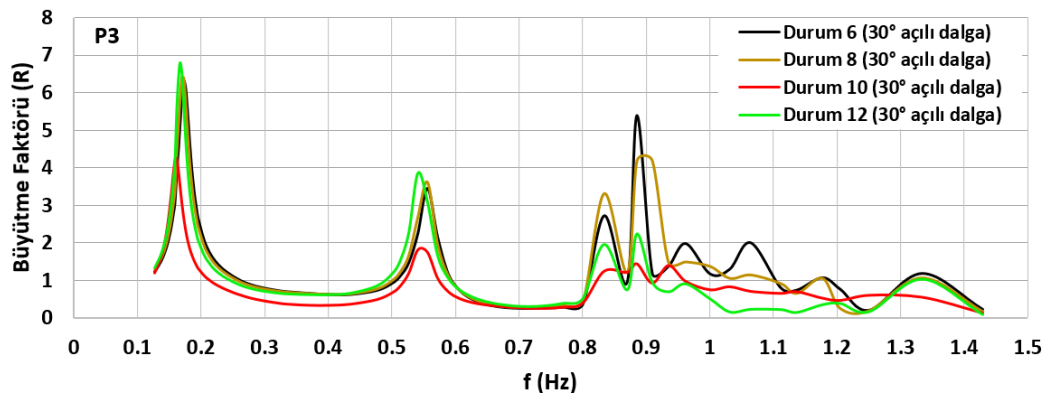
Basen içerisindeki diğer noktalara ait büyütme faktörü eğrileri Şekil 7.16-Şekil 7.20'de görülmektedir. Her bir noktadaki büyütme faktörü eğrisi farklılık göstermektedir. Birinci modda tüm basendeki dalga yükseklikleri arttığı için eğriler büyük değerleri göstermektedir. İkinci modda basen ortasında düğüm noktası olduğundan (dalga yüksekliği sıfıra yakın) P2 ve P6 noktalarında eğride yükselme oluşmamıştır. Benzer şekilde M4'te enine yönde oluşan rezonans modu nedeniyle P4'te eğride yükselme oluşmamıştır.



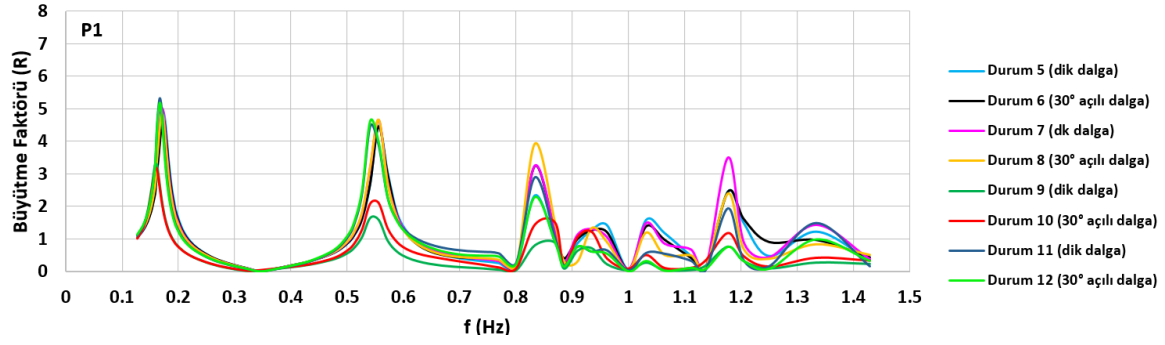
Şekil 7.14. Durum-5, Durum-7, Durum-9 ve Durum-11 koşullarında P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri

Çizelge 7.5. Durum-5 ile Durum-12 arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler, Durum-7, Durum-9 ve Durum-11'in Durum-5'e, Durum-8, Durum-10 ve Durum-12'nin Durum-6'ya, oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerleri rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)

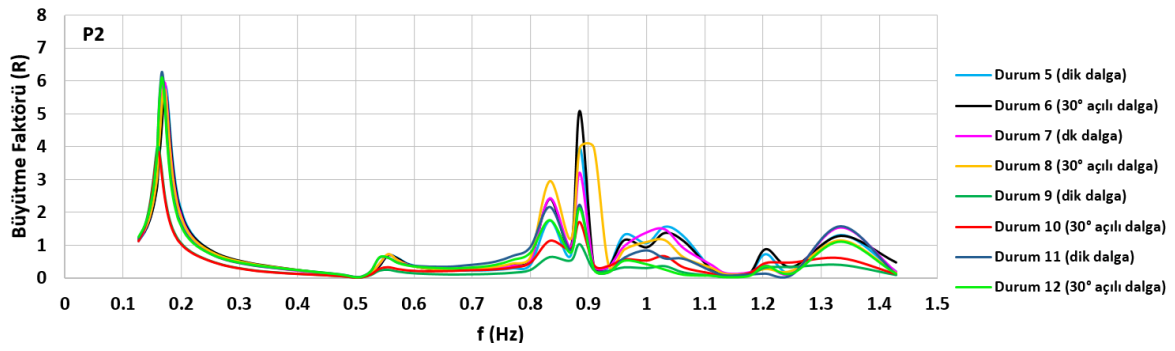
Durum	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Durum-5	6,57	3,47	1,97	4,21	2,25	2,21	1,06	1,22
Durum-7	6,65	3,60	2,74	3,41	1,73	1,58	1,52	1,44
Durum-9	4,42	1,44	0,83	0,94	0,86	0,47	0,39	0,42
Durum-11	6,97	3,71	2,43	2,36	1,04	0,99	0,84	1,46
Durum-7 sonucunun Durum-5 sonucuna oranı (%)	-1,22	-3,75	-39,09	19,00	23,11	28,51	-43,40	-18,03
Durum-9 sonucunun Durum-5 sonucuna oranı (%)	32,72	58,50	57,87	77,67	61,78	78,73	63,21	65,57
Durum-11 sonucunun Durum-5 sonucuna oranı (%)	-6,09	-6,92	-23,35	43,94	53,78	55,20	20,75	-19,67
Durum-6	6,31	3,45	2,72	5,39	1,98	2,01	1,07	1,18
Durum-8	6,42	3,61	3,31	4,18	1,48	1,13	1,05	1,06
Durum-10	4,26	1,82	1,20	1,34	1,30	0,82	0,69	0,60
Durum-12	6,80	3,85	1,96	2,24	0,90	0,23	0,38	1,03
Durum-8 sonucunun Durum-6 sonucuna oranı (%)	-1,74	-4,64	-21,69	22,45	25,25	43,78	1,87	10,17
Durum-10 sonucunun Durum-6 sonucuna oranı (%)	32,49	47,25	55,88	75,14	34,34	59,20	35,51	49,15
Durum-12 sonucunun Durum-6 sonucuna oranı (%)	-7,77	-11,59	27,94	58,44	54,55	88,56	64,49	12,71



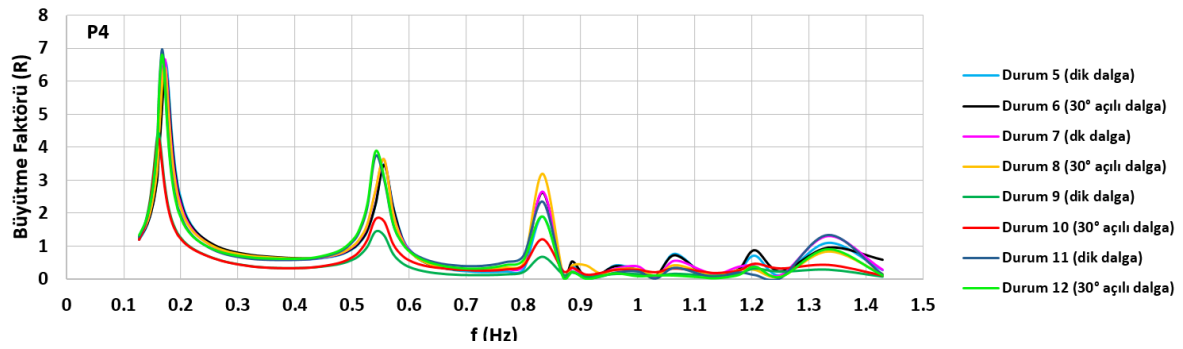
Şekil 7.15. Durum-6, Durum-8, Durum-10 ve Durum-12 koşullarında P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



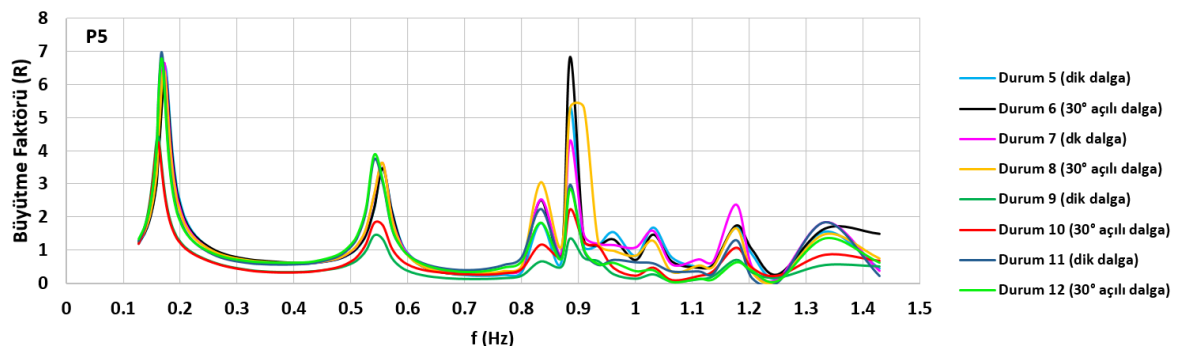
Şekil 7.16. P1 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



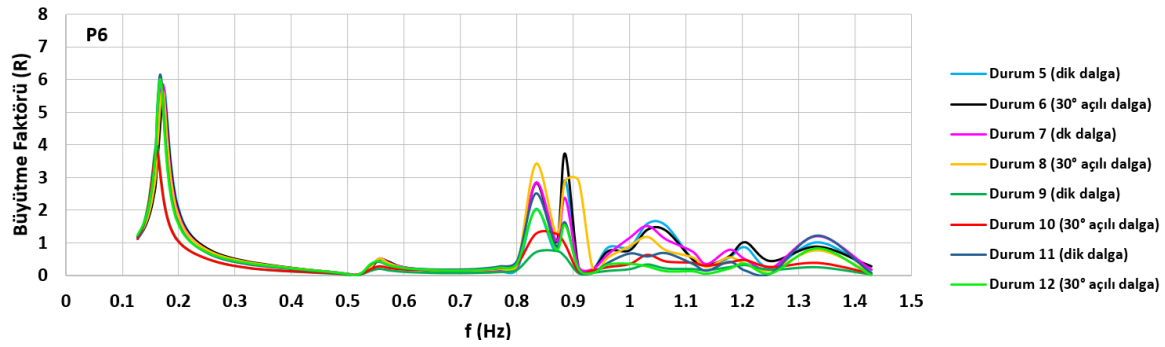
Şekil 7.17. P2 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



Şekil 7.18. P4 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



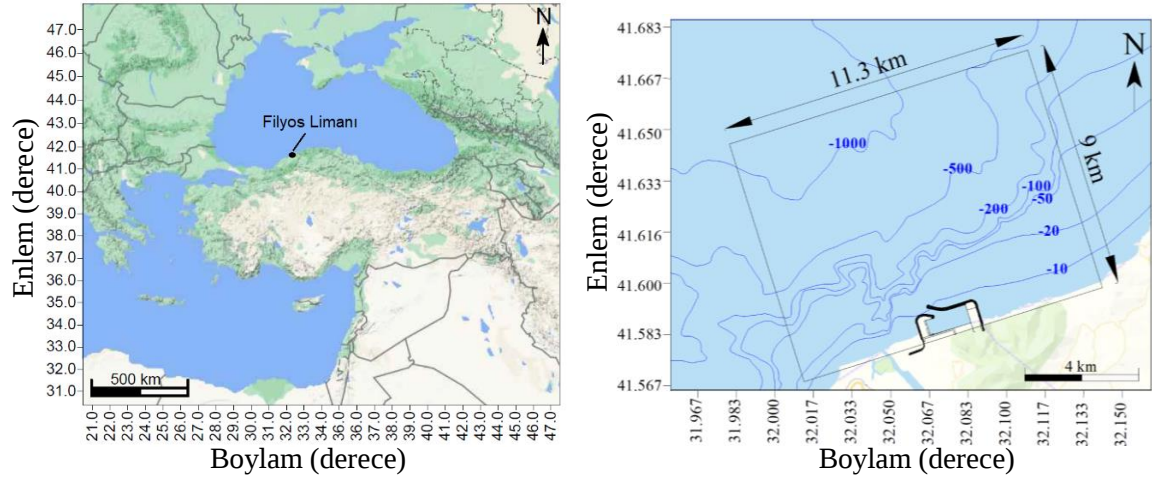
Şekil 7.19. P5 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri



Şekil 7.20. P6 noktasında hesaplanan büyütme faktörü eğrileri

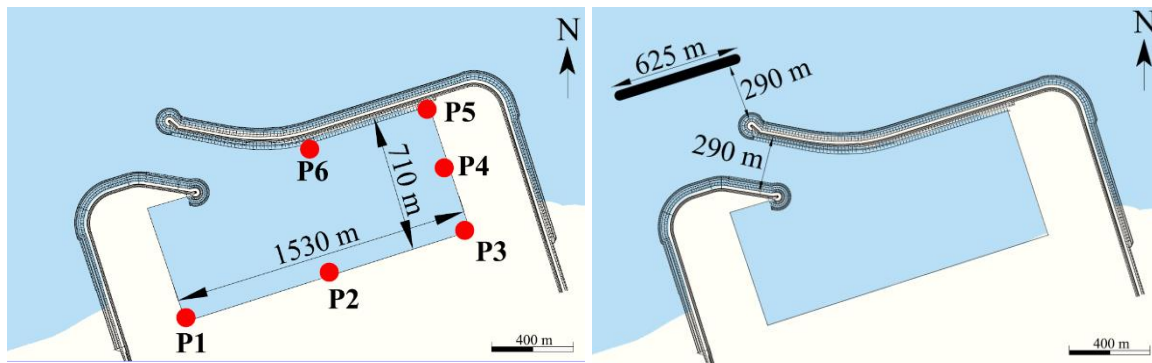
7.6. Filyos Limanı Rezonans Çalışması

RIDE dalga modelinde literatürdeki örnekler dikkate alınarak hazırlanan ideal çalışma alanları ve liman geometrileri haricinde, gerçek deniz batimetrisi ve gerçek liman geometrisine göre rezonans modellemesi yapılması için Filyos limanı örneği çalışılmıştır. Filyos Limanı Batı Karadeniz’de 41,052071°K-39,539033°D koordinatlarında yer almaktadır. Çalışma alanı boyutları kıyıya paralel y yönünde 11,3 km, kıyıya dik x yönünde 9 km ve kuzeye göre saat yönünün tersine doğru 18° dönüktür (Harita 7.1). Çözüm ağı nokta sayısı 452x360 ve batimetrideki en yüksek derinlik -1200 m’dir. Liman içi ve navigasyon kanalındaki derinlik ise sabit ve -15 m’dir. Çalışmada 20-800 sn. aralığında 77 farklı periyot kullanılmıştır. RIDE modelinde, çözüm ağı uzunluğu dalga boyunun 10’da birinden küçük olmalıdır. 20 sn periyotlu dalganın boyu 624 m ve 10’da biri 62 m mertebesindedir. Liman geometrisinin de modelde tanımlanabilmesi için çözüm ağı uzunluğu 25 m seçilmiştir. Açık deniz sınırı dalga yüksekliği 0,1 m ve dalga geliş açısı 0° alınmıştır. Filyos Limanındaki rezonans davranışının karşılaştırılması için orijinal geometriye, liman giriş ağzı genişliği mesafesi uzaklıkta 625 m uzunluğunda bir ayırık dalgakıran eklenmiştir (Şekil 7.21). 2 geometri arasındaki farkların belirlenmesi için liman içerisinde P1-P6 olarak adlandırılan 6 farklı inceleme noktası seçilmiştir.

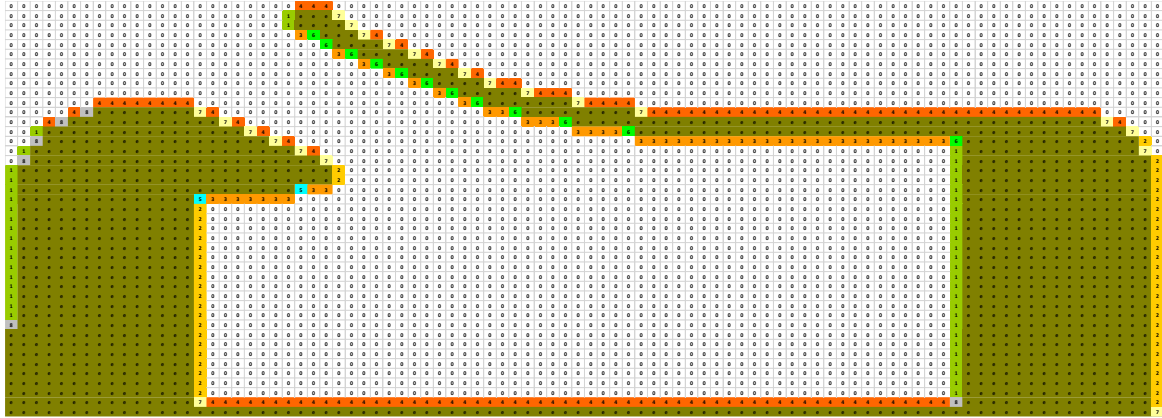


Harita 7.1. Filyos limanının coğrafi konumu ve çalışma alanı boyutları

RIDE dalga modelinde yansıma katsayısı (r) sönümlenme katsayısı ($\alpha = (1 - r)/(1 + r)$) ile tanımlanmaktadır. Liman çevresindeki kıyı alanı kumsaldır ve dalgakıranlar beton blok koruma tabakasına sahiptir. Bu nedenle kıyı çizgisi için yansıma katsayısı $r=0,1$ ve dalgakıranlar için $r=0,4$ kabul edilmiştir. Bu değerlere göre hesaplanan sönümlenme katsayıları ise kıyı hattı için $\alpha=0,82$ ve dalgakıranlar için $\alpha=0,43$ olarak modelde kullanılmıştır. Liman içindeki dik yüzeyli rıhtımlarda ise tam yansıma kabul edilerek $\alpha=0$ tanımlanmıştır. Model alanının sağ ve sol sınırlarında ise geçirimli (yansıma yok) sınır koşulu tanımlanmıştır. Filyos Limanı RIDE modeli sınır koşulu tanımlama değerleri Şekil 7.22’te görülmektedir.

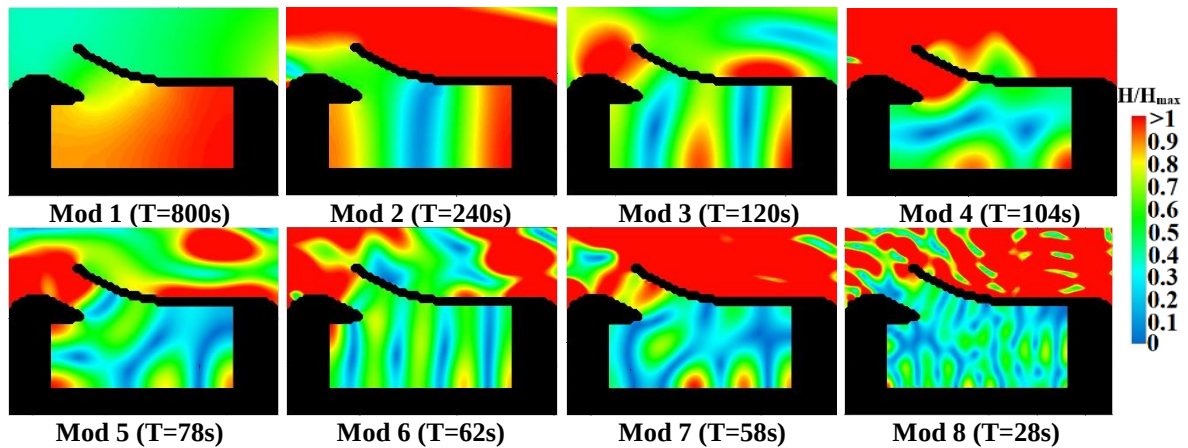


Şekil 7.21. Büyütme faktörü hesaplama noktaları ve ayırık dalgakıran konumu

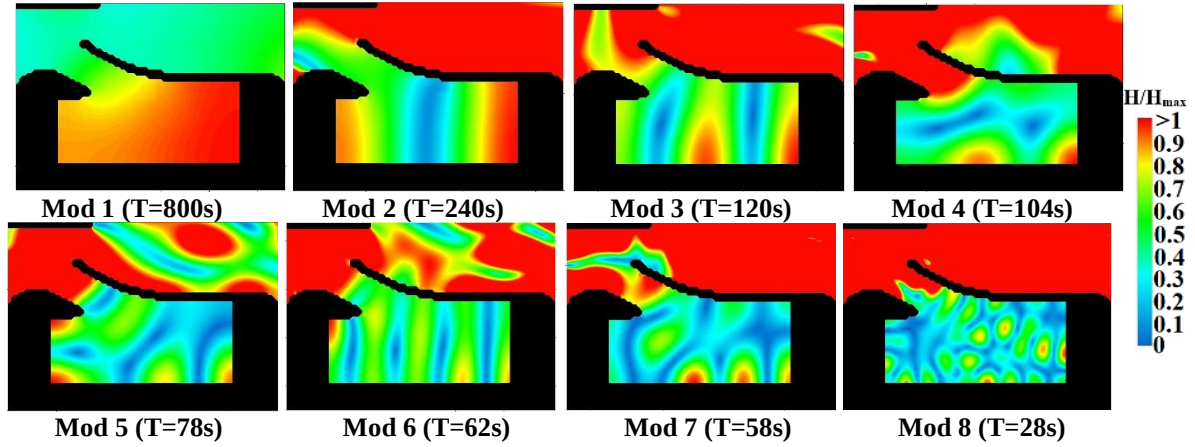


Şekil 7.22. Filyos limanı RIDE modeli sınır koşulu tanımlaması

Çalışmada değişken ve düzensiz gerçek deniz batimetrisi kullanıldığından, büyütme faktörü eğrilerinde ideal modellerden farklı olarak salınımlar oluşmuştur. Bu durum rezonans modlarının belirlenmesini güçleştirmektedir. Liman giriş ağzına en uzak nokta olan P3 dikkate alınarak çalışılan dalga periyodlarına göre sekiz farklı rezonans mod belirlenmiştir. İlk rezonans modu $T=800$ sn'de oluşmuştur. Dalga yüksekliği tüm liman baseninde başlangıç dalga yüksekliğine göre 4 kat yükselmiştir. İkinci mod $T=240$ sn. ve üçüncü mod $T=120$ sn'de oluşmuştur. M2 ve M3'ün mod şekilleri incelendiğinde rezonansın boyuna yönde olduğu görülmektedir. M2'de 1 düğüm noktası, M3'te 2 düğüm noktası bulunmaktadır. Mod M4 için $T=104$ sn'de ve enine yönde rezonans oluşmuştur. M4'te oluşan mod şekli, durum çalışmalarındaki gibi tam olarak enine yönde bir düğüm noktası şeklinde değil kısmi şekilde oluşmuştur. M5'ten M8'e kadar olan diğer dört rezonans modu ise sırasıyla $T=78$ sn., $T=62$ sn., $T=58$ sn. ve $T=28$ sn'de oluşmuştur. Mod şekilleri ise hem enine hem de boyuna yönde karmaşık formlarda meydana gelmiştir. Orijinal ve ayırık dalgakıranlı liman geometrilerine ait mod şekilleri Şekil 7.23 ve Şekil 7.24'te görülmektedir.



Şekil 7.23. Filyos Limanı mod şekilleri

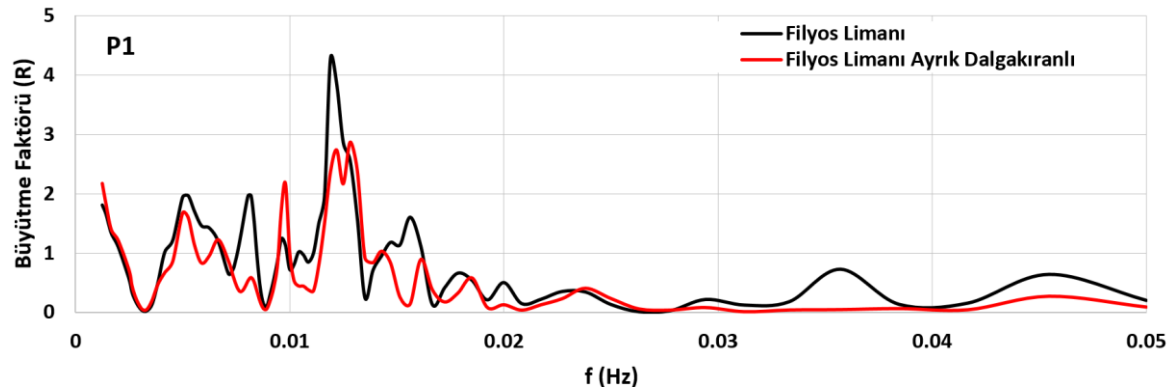


Şekil 7.24. Ayırık dalgakıran eklenmiş Filyos Limanı mod şekilleri

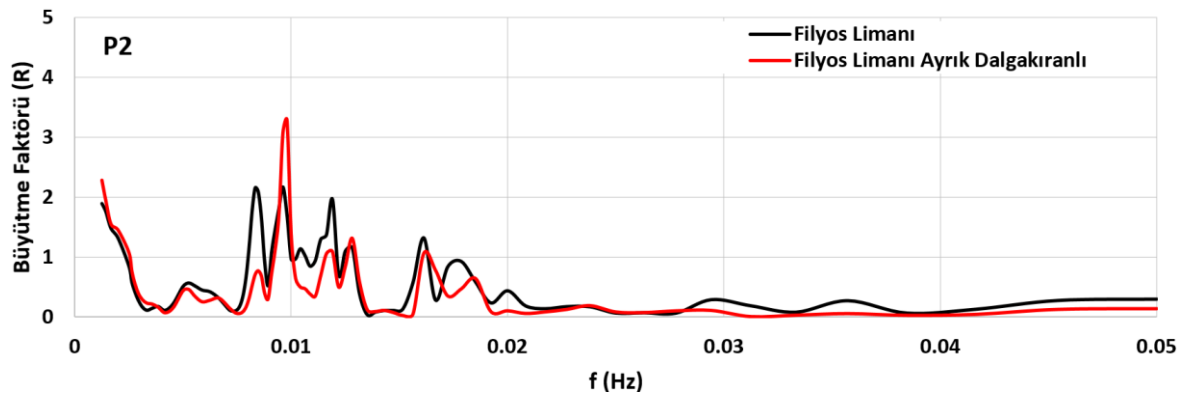
Filyos Limanı ve ayırık dalgakıran eklenmiş liman geometrisine göre yapılan modelleme sonuçlarına göre hazırlanan büyütme faktörü eğrileri, belirlenen altı inceleme noktası için Şekil 7.30 - Şekil 7.30'da görülmektedir. Birinci rezonans modunda ayırık dalgakıran rezonansın %12,08 daha fazla oluşmasına neden olmuştur. İkinci rezonans modunda ise %9,17 daha düşük rezonans değerleri elde edilmiştir. Üçüncü rezonans modunda P1,P5 ve P6 noktalarında 3 kat, diğer noktalarda 4 kat dalga yüksekliği artışı hesaplanmıştır. Ayırık dalgakıran M3'te söz konusu artışları %67 azaltmıştır. Beşinci rezonans modunda P1 noktasında 8 kat, P3, P5 ve P6 noktalarında 6,5 kat olmak üzere çalışmadaki en büyük dalga yüksekliği artışları elde edilmiştir. Ayırık dalgakıran bu artışları da %40,82 azaltmıştır. M6, M7 ve M8'de de ayırık dalgakıranın rezonans azaltıcı etkisi %45,6 olarak belirlenmiştir. Ancak dördüncü modda ayırık dalgakıran %41,21 oranında rezonans artışına neden olmuştur. Modelleme sonuçlarına göre ayırık dalgakıranın, T=130 sn. üzerindeki periyotlarda Durum çalışmalarına benzer şekilde rezonans değerlerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Dördüncü mod haricinde ayırık dalgakıranın büyütme faktörü değerlerini %35,3 azaltıcı yönde etkisi olduğu belirlenmiştir. Durum çalışmalarında olduğu gibi görece düşük periyotlarda ayırık dalgakıranın rezonansı azaltıcı etkisi olduğu görülmüştür. Filyos limanı ile ayırık dalgakıran arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Filyos limanı ile ayırık dalgakıran arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler, ayırık dalgakıranı sonuçlarının Filyos limanı sonuçlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerleri rezonans azalışını, negatif değerler rezonans artışını belirtmektedir)

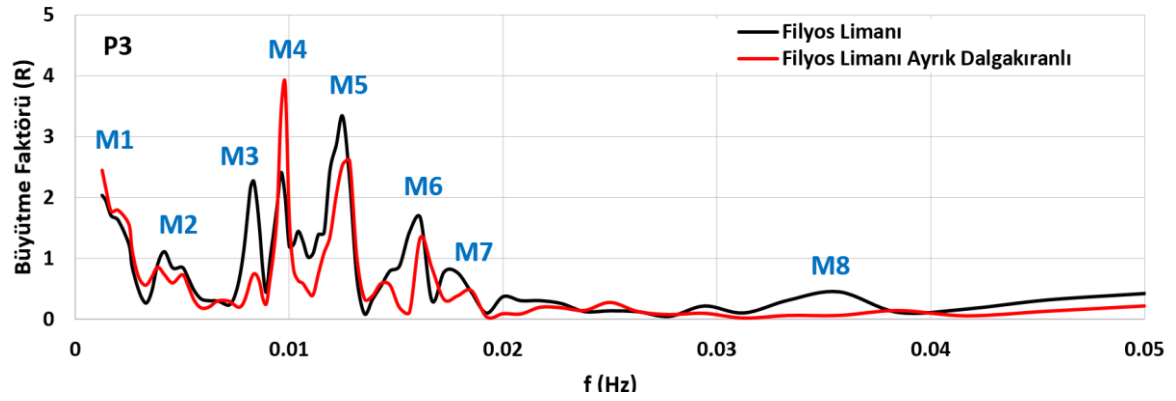
Durum	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Filyos limanı P3 noktası	2,06	1,08	2,27	2,41	3,33	1,66	0,78	0,45
Ayrık dalgakıran P3 noktası	2,38	0,86	0,75	3,88	2,60	1,34	0,47	0,15
P3 noktası için ayırık dalgakıranın Filyos Limanı'na oranı (%)	-15,53	20,37	67,06	-60,98	21,84	19,26	39,06	67,34
Tüm noktalar için ayırık dalgakıranın Filyos Limanı'na oranı (%)	-12,08	9,17	67,01	-41,21	40,82	19,28	58,28	59,31



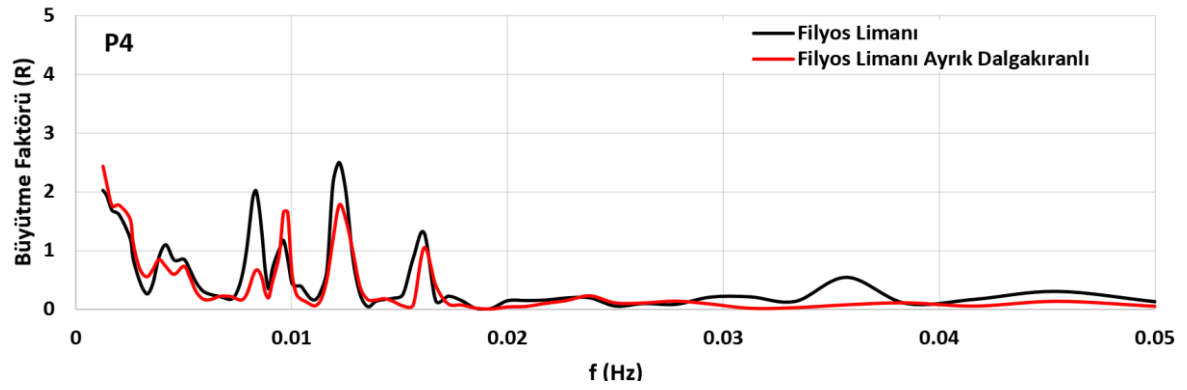
Şekil 7.25. P1 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi



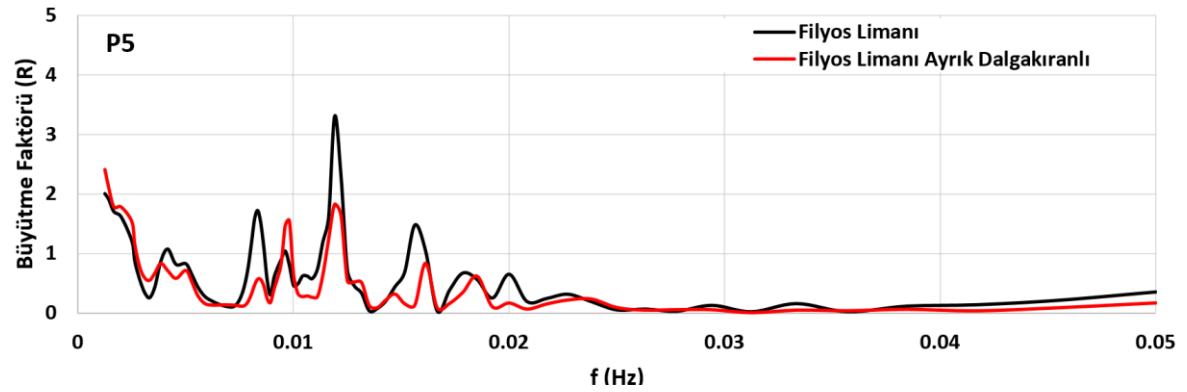
Şekil 7.26. P2 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi



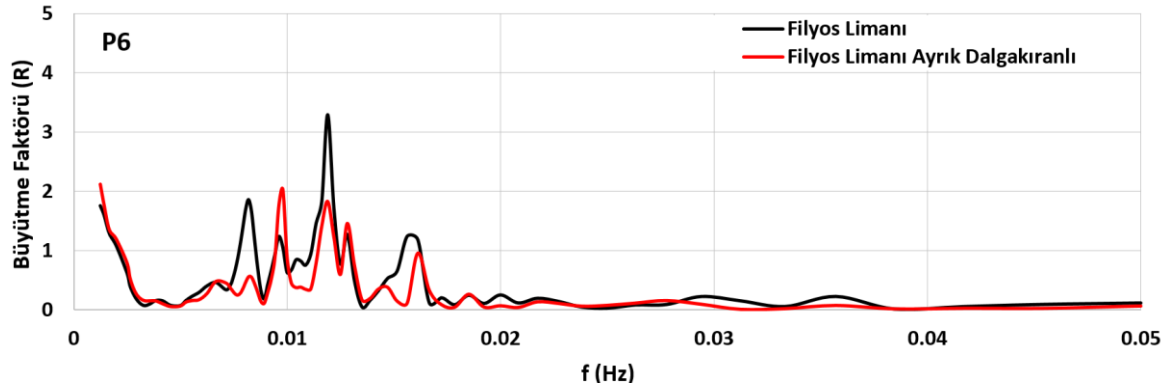
Şekil 7.27. P3 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi



Şekil 7.28. P4 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi



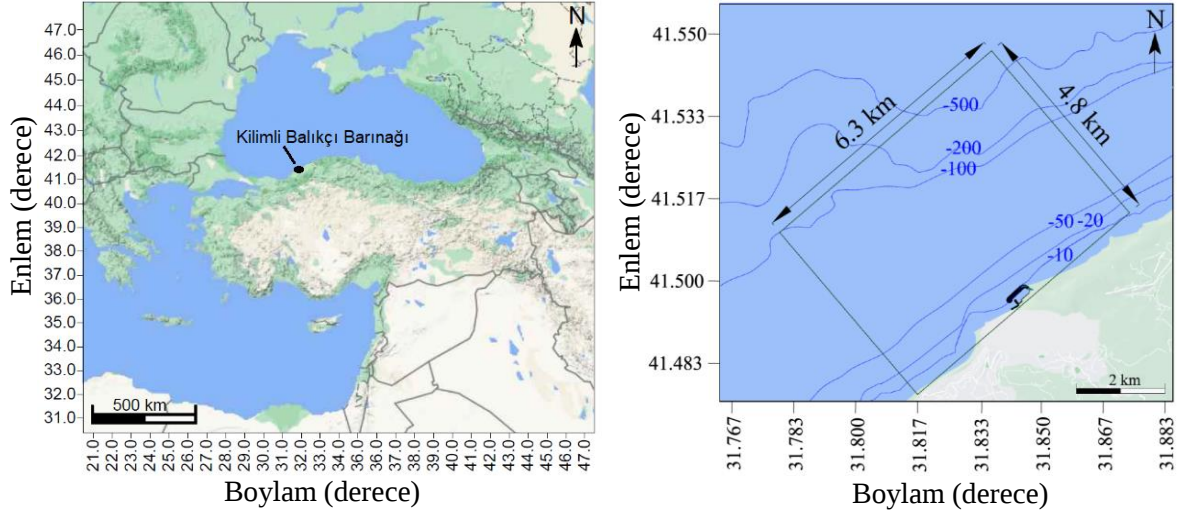
Şekil 7.29. P5 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi



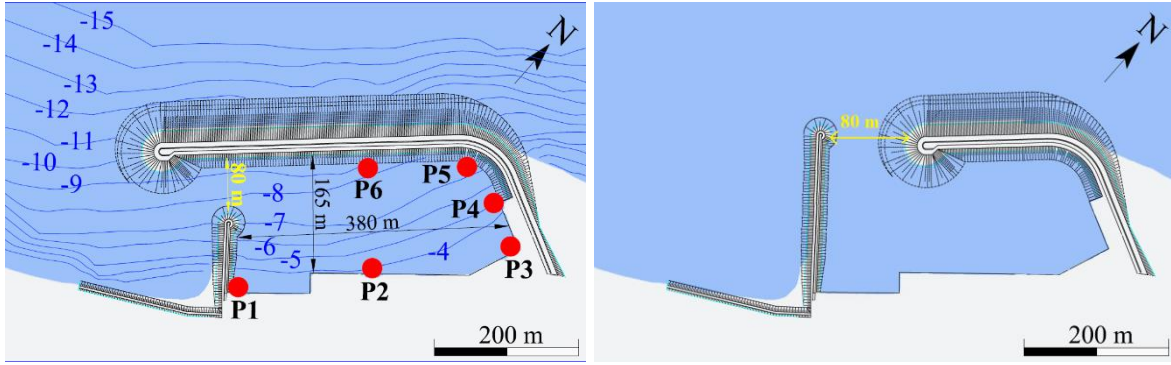
Şekil 7.30. P6 noktasındaki Filyos limanı büyütme faktörü eğrisi

7.7. Kilimli Balıkçı Barınağı Rezonans Çalışması

RIDE dalga modeli ile gerçek deniz batimetrisi ve gerçek liman geometrisine göre rezonans modelleme uygulaması olarak Kilimli Balıkçı Barınağı çalışılmıştır. Filyos Limanı çalışması ile Durum-11'e benzer bir liman geometrisinin modellenmesi hedeflenmiştir. Kilimli Balıkçı Barınağı çalışması ile de Durum-9'a benzer bir liman geometrisi modellenmesi hedeflenmiştir. Kilimli Balıkçı Barınağı Batı Karadeniz'de $41,497851^{\circ}\text{K}$ - $31,843743^{\circ}\text{D}$ koordinatlarında yer almaktadır. Çalışma alanı boyutları kıyıya paralel y yönünde 6,3 km, kıyıya dik x yönünde 4,8 km ve kuzeye göre saat yönünün tersine doğru 40° dönüktür (Harita 7.2). Çözüm ağı nokta sayısı 422 x 320 ve batimetrideki en yüksek su derinliği -653 m'dir. Barınak içi su derinliği ise sabit olmayıp -4 m ile -9 m arasında değişmektedir. Çalışmada 20-800 sn. aralığında 114 farklı periyot kullanılmıştır. Çözüm ağı uzunluğu barınak geometrisinin de modelde tanımlanabilmesi için 15 m seçilmiştir. Açık deniz sınır koşulu dalga yüksekliği 0,1 m ve dalga geliş açısı 0° 'dir. Barınağın giriş ağzı ana dalgakıran tarafından gölgelenmektedir ve basene giren dalgalar kırınıma uğrayarak ilerlemektedir. Kilimli Balıkçı Barınağı'ndaki rezonans davranışının karşılaştırılması için orijinal geometri, Durum-5'teki gibi giriş ağzı açık denize bakar hale getirilerek ayrı bir çalışma (farazi barınak) daha yapılmıştır (Şekil 7.31). İki farklı barınak geometrisi arasındaki farkların belirlenmesi için basen içerisinde P1-P6 olarak adlandırılan altı inceleme noktası seçilmiştir. Çalışma alanındaki yansımaya katsayıları Filyos Limanı çalışması ile benzer şekilde tanımlanmıştır.

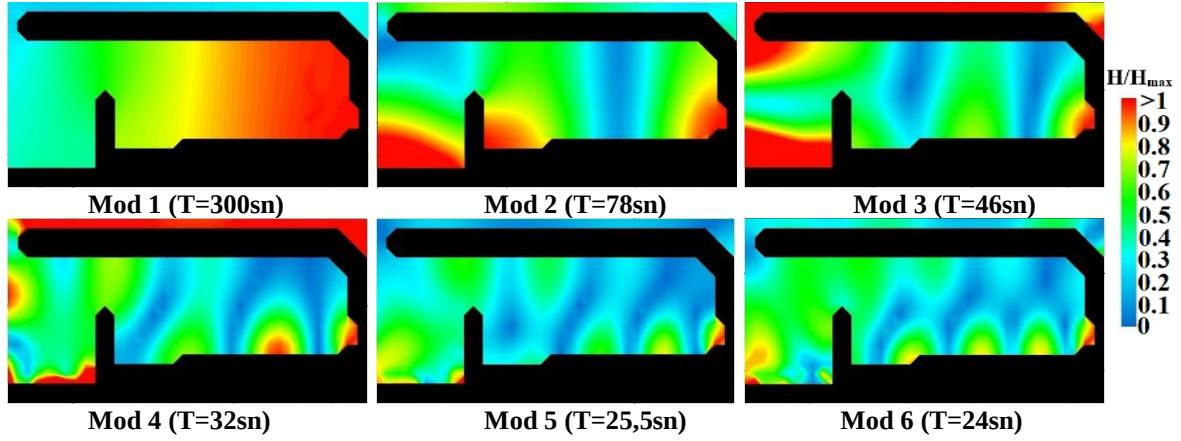


Harita 7.2. Kilimli balıkçı barınağının coğrafi konumu ve çalışma alanı boyutları

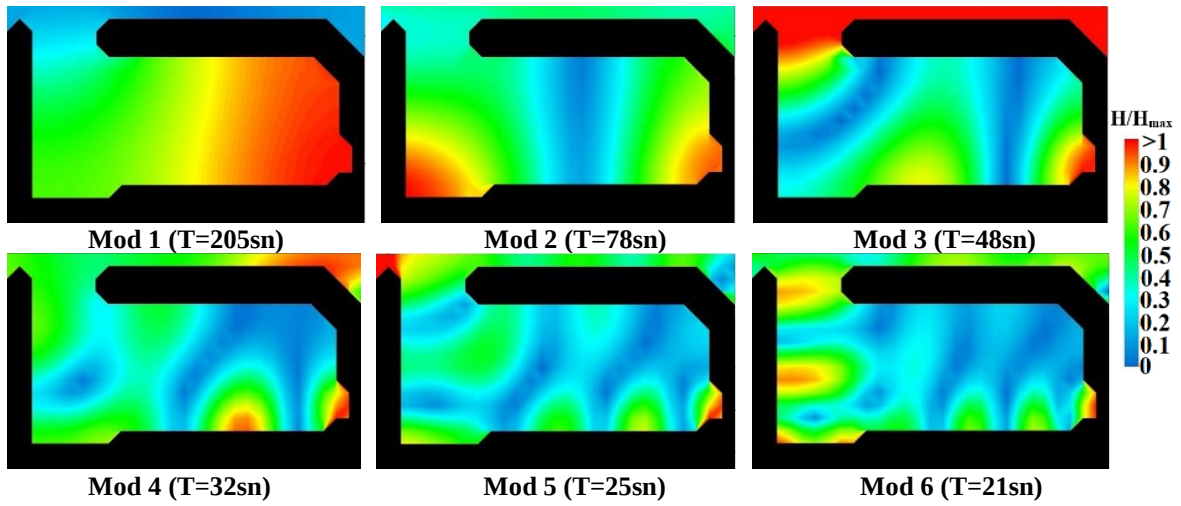


Şekil 7.31. Büyütme faktörü hesaplama noktaları ve farazi barınak geometrisi

Modelleme sonuçları incelendiğinde, büyütme faktörü eğrilerinde Filyos Limanı örneğindeki gibi salınımlar oluşmuştur. Mod şekilleri ve büyütme faktörü eğrileri incelenerek basen giriş ağzına en uzak nokta olan P3'te, kullanılan periyotlara göre altı rezonans modu belirlenmiştir. Orijinal geometride ilk rezonans modu $T=300$ sn'de, farazi geometride ise $T=205$ sn'de oluşmuştur. Dalga yüksekliği giriş ağzı bölgesinde 6 kat, P4 noktası civarında 9 kat olmak üzere tüm liman baseninde yükselmiştir. İkinci mod $T=78$ sn. ve üçüncü mod $T=46$ sn'de oluşmuştur. M2 ve M3'ün mod şekilleri incelendiğinde rezonansın boyuna yönde olduğu görülmektedir. M2'de 1 düğüm noktası, M3'te 2 düğüm noktası bulunmaktadır. M4'ten M6'ya kadar olan diğer 3 rezonans modu ise sırasıyla $T=32$ sn., $T=25,5$ sn. ve $T=24$ sn.'de oluşmuştur. Mod şekilleri ise hem enine hem de boyuna yönde karmaşık formlarda meydana gelmiştir. Orijinal ve farazi barınak geometrilerine ait mod şekilleri Şekil 7.32 ve Şekil 7.33'de görülmektedir.



Şekil 7.32. Kilimli balıkçı barınağı mod şekilleri



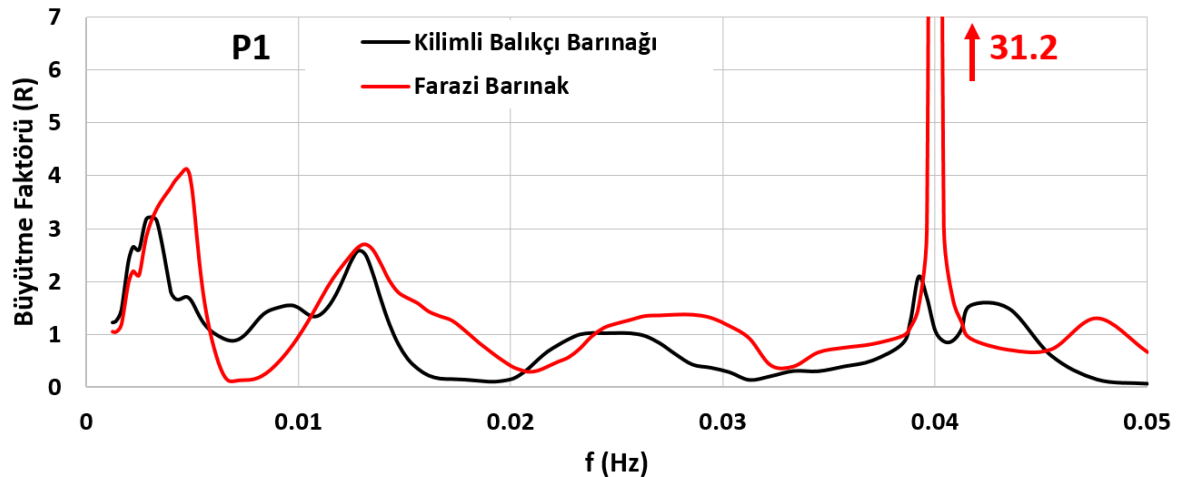
Şekil 7.33. Kilimli balıkçı barınağı farazi barınak mod şekilleri

Kilimli Balıkçı Barınağı'nın orijinal geometrisi ile farazi barınak arasındaki rezonans davranışı farkı Durum-5 ile Durum-9 arasındaki farka benzer şekilde oluşmuştur. Kilimli Balıkçı Barınağı'nda birinci modda P1'de yaklaşık 6 kat, diğer noktalarda yaklaşık 8 kat dalga yüksekliği artışı hesaplanmıştır. Farazi barınak için ise bu değerler P1'de yaklaşık 8 kat, P2 ve P6'da 10 kat, P3, P4 ve P5'te 12 kat olarak elde edilmiştir. İlk modda büyütme faktörü orijinal geometride, farazi geometriye göre %26,79 daha düşük hesaplanmıştır. Durum çalışmalarında da benzer bir oranda azalma meydana gelmiştir. İkinci mod her iki barınak geometrisinde de yakın değerler de oluşmuştur. Büyütme faktörü eğrisinde M1 ve M2 arasında, orijinal geometri için yumuşak bir geçiş olurken, farazi geometride bu değişim belirgin şekilde meydana gelmiştir. M3 ve M4'te orijinal geometri farazi geometriden %28,6 daha küçük büyütme faktörü değerlerine sahip olmuştur. M5'te farazi geometride ekstrem mod meydana gelmiştir. P3 noktasında büyütme faktörü 33,8 hesaplanmıştır. Orijinal

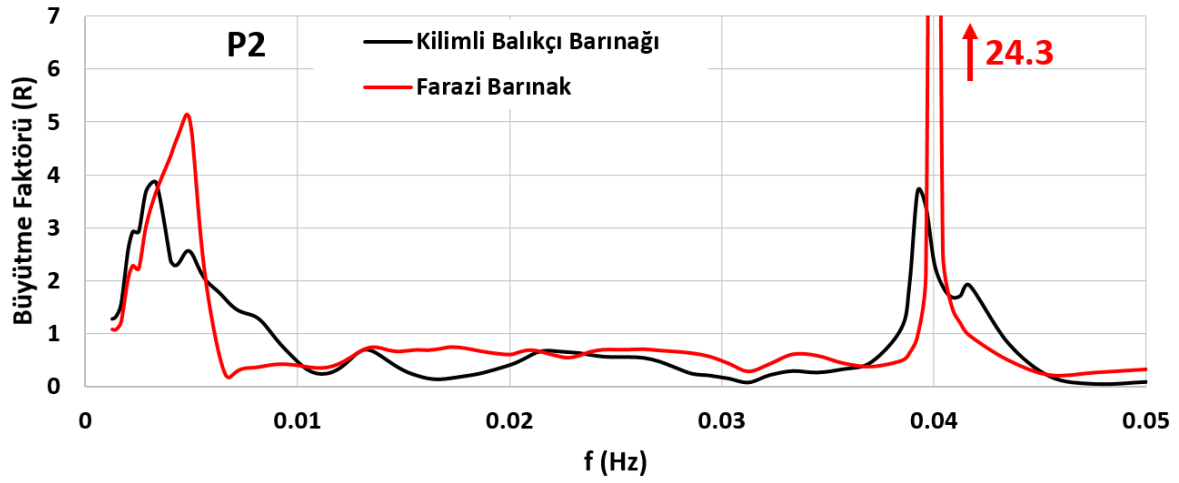
geometride $T=25$ sn'de ekstrem mod meydana gelmemiştir. Bu nedenle $T=24-26$ sn. aralığında yapılan ek çalışmalarda, orijinal barınak için $T=25,5$ sn'de 5,2 büyütme faktörü değeri ile ekstrem mod elde edilmiştir. Rezonans değeri %87,47 düşük hesaplanmıştır. Orijinal geometride, farazi geometride meydana gelebilecek büyük dalga yüksekliği değişimini önlemek konusunda önemli fark oluşmuştur. Bu şekilde basene giren dalgaların kırınımına uğratılmasının faydası ortaya konmuştur. Basen içerisinde belirtilen altı noktaya ait büyütme faktörü eğrileri Şekil 7.34 - Şekil 7.39'da görülmektedir. Kilimli balıkçı barınağı ile farazi geometri arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Kilimli balıkçı barınağı ile farazi geometri arasındaki çalışmalarda P3 noktasında hesaplanan büyütme faktörü değerleri ve karşılaştırmalar (Çizelgedeki yüzdeler, Kilimli balıkçı barınağı sonuçlarının farazi geometri sonuçlarına oranlanması ile hesaplanmıştır. Pozitif değerler rezonans artışını, negatif değerler rezonans azalışını belirtmektedir)

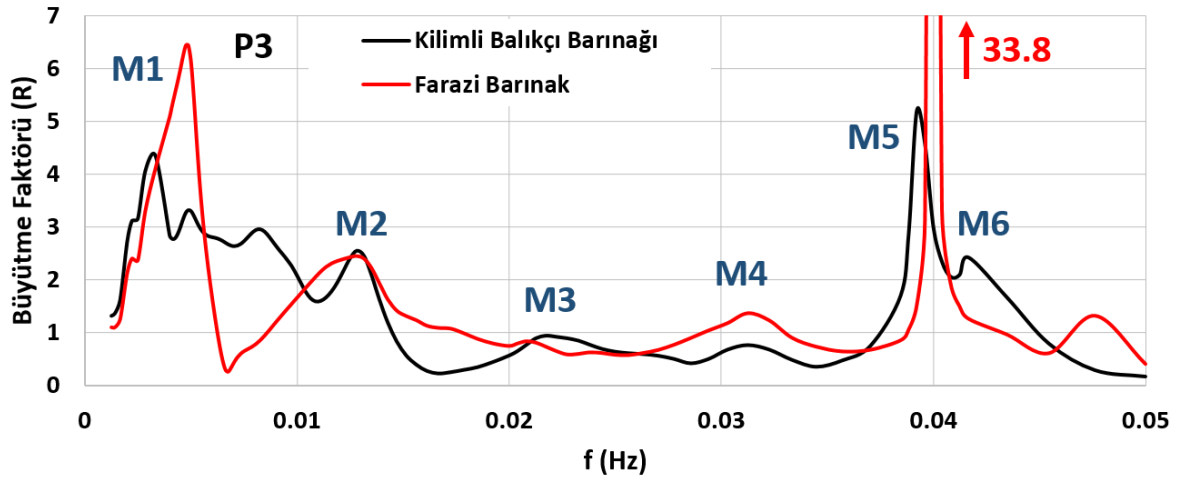
Durum	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Kilimli balıkçı barınağı	4,35	2,53	0,92	0,76	5,20	2,42
Farazi barınak	6,44	2,48	0,86	1,37	33,81	1,33
P3 noktası için Kilimli balıkçı barınağının farazi barınağa oranı (%)	32,47	-2,02	-6,98	44,28	84,63	-82,75
Tüm noktalar için Kilimli balıkçı barınağının farazi barınağa oranı (%)	26,79	-3,05	1,63	55,63	87,47	-58,02



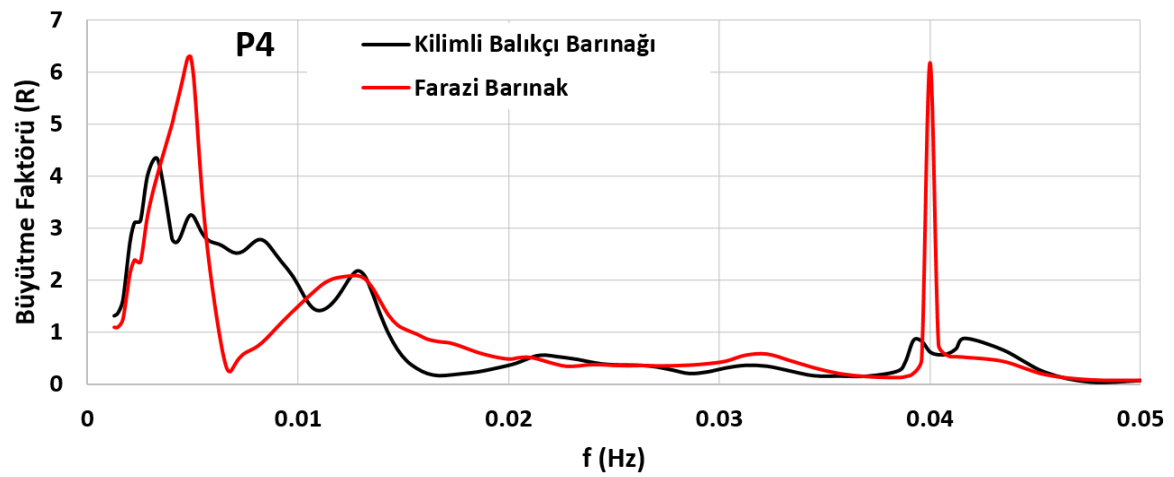
Şekil 7.34. P1 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi



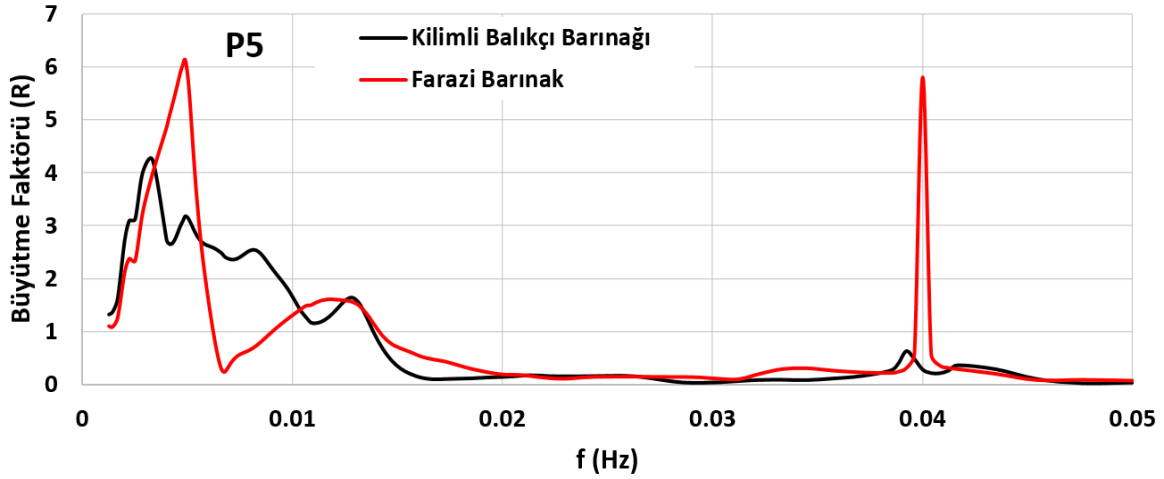
Şekil 7.35. P2 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi



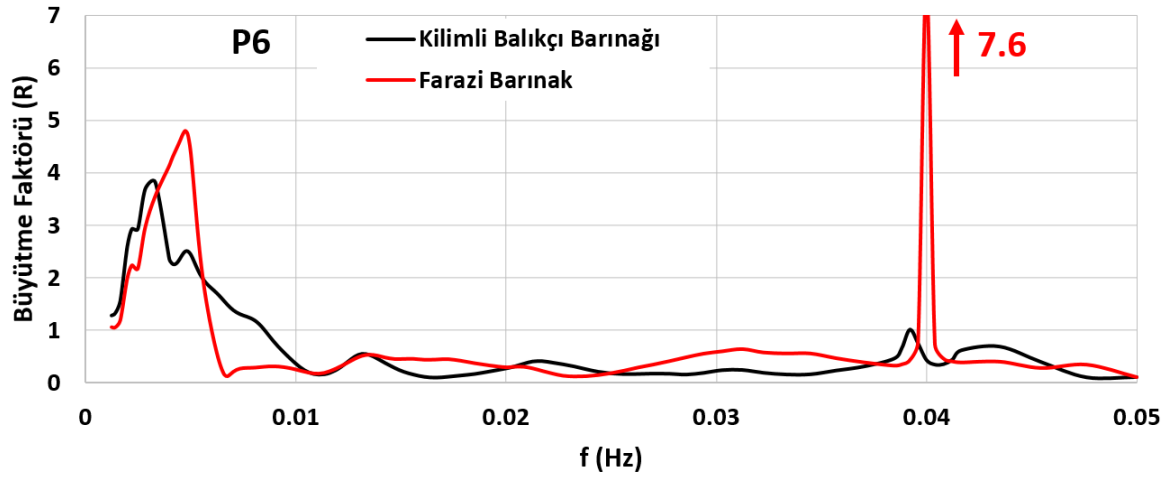
Şekil 7.36. P3 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi



Şekil 7.37. P4 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi



Şekil 7.38. P5 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi

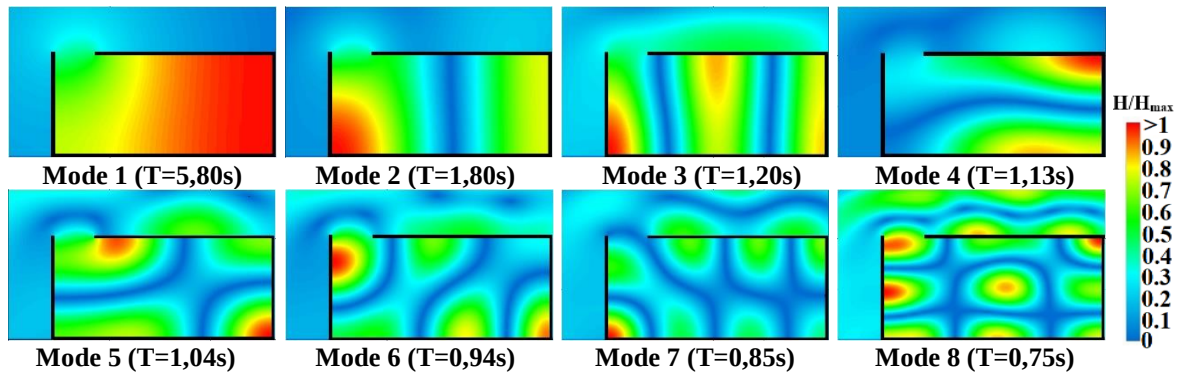


Şekil 7.39. P6 noktasındaki Kilimli Balıkçı Barınağı büyütme faktörü eğrisi

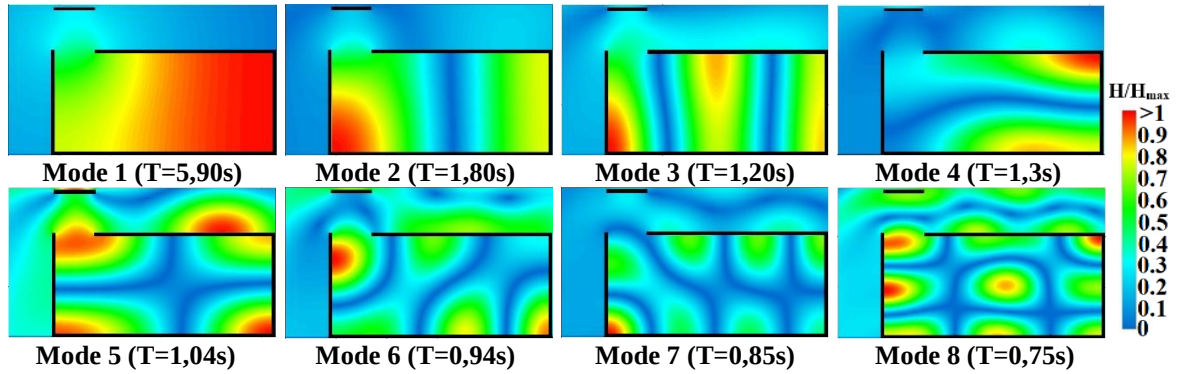
7.8. Mod Şekillerinin ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Durum çalışmalarına ait mod şekilleri Şekil 7.40 - Şekil 7.43'te görülmektedir. Tüm modellemelerde birinci modda, liman girişinden kıyıya doğru dalga yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Basene giren dalga su seviyesini basen sonuna doğru artırmaktadır. Bu davranış nedeniyle bu mod aynı zamanda pompalama (kabartma) modu olarak da adlandırılır. Genellikle en yüksek büyütme faktörü ekstrem mod haricinde birinci modda gerçekleşmektedir. İkinci modda su seviyesindeki kabarma basen girişinde ve sonunda gerçekleşmektedir. Basen ortasında ise su seviyesi sakine yakındır. Bu alan düğüm noktası olarak adlandırılmaktadır. Basenin uzun kenarı boyunca bir profil alındığında oluşan kesit dalga profiline benzemektedir. Bu nedenle ikinci mod çalkantı modu olarak da adlandırılmaktadır. Üçüncü mod da bir diğer çalkantı modudur. Basenin uzun kenarı

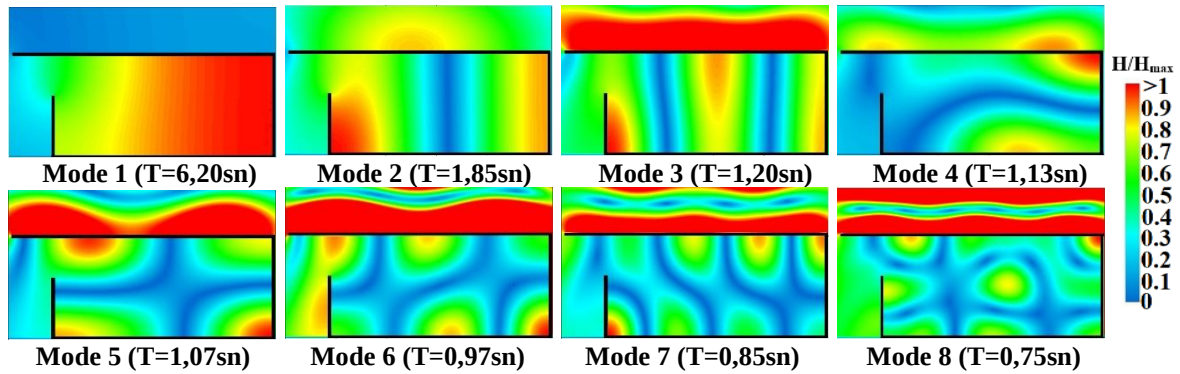
boyunca oluşan üçüncü mod, iki adet düğüm noktasına sahiptir. Dalga yüksekliği artışı basenin giriş ağzı, ortası ve sonunda meydana gelmektedir. Dördüncü mod ise enine yönde çalkantı modudur. Basenin üst ve alt taraflarında dalga yüksekliğinde artış meydana gelirken, basen ortasında dalga yüksekliği sakine yakındır. Beşinci ve sonraki modların belirli bir isim tanımlaması bulunmamaktadır. Hem boyuna hem de enine yönde birden fazla düğüm noktası oluşmakta ve basen içerisindeki dalga tepesi-dalga çukuru oluşumları tekne barınması için oldukça olumsuz durumlar meydana getirmektedir.



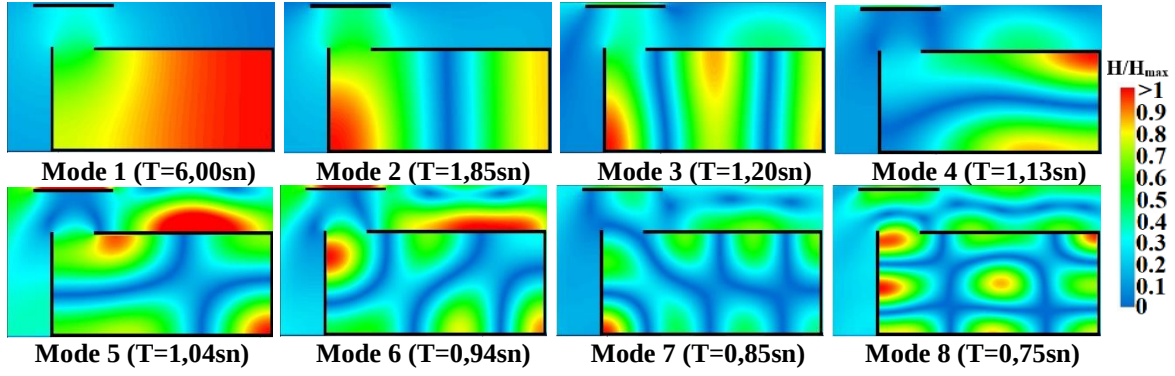
Şekil 7.40. Durum 5'e ait mod şekilleri



Şekil 7.41. Durum 7'ye ait mod şekilleri



Şekil 7.42. Durum 9'a ait mod şekilleri



Şekil 7.43. Durum 11'e ait mod şekilleri

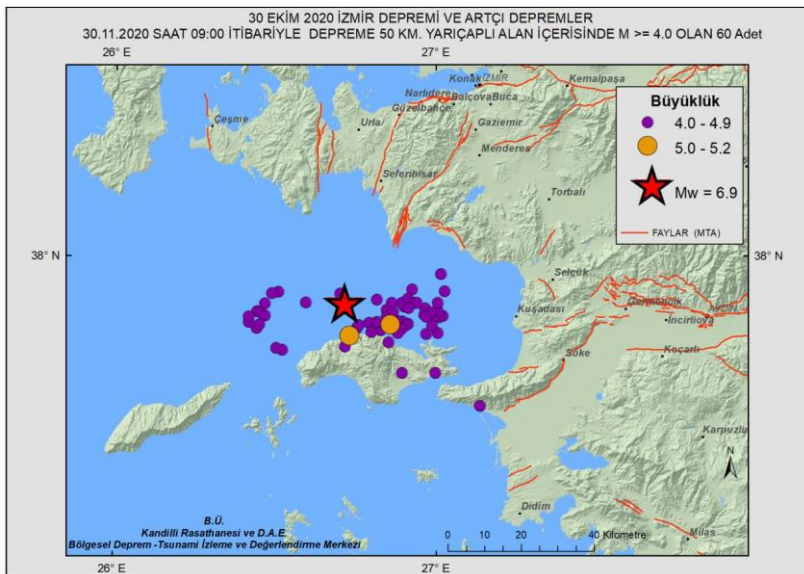
Sayısal model çalışmalarında kullanılan çalışma alanlarının boyutlarının belirlenmesi için değişen periyot ve çözüm ağı uzunlukları gözetilerek parametre hassasiyet çalışmaları yürütülmüş ve optimum boyutlandırma yapılmıştır.

Durum çalışmaları sabit su derinliğine sahip ideal test modellerine göre oluşturulmuş ve modelleme sonucunda elde edilen veriler, ideal test modelleri ile uyumlu oluşmuştur. Liman rezonansı çalışmasını çeşitlendirebilmek için ülkemiz kıyılarında, Durum çalışmalarında kullanılan geometrilere benzer gerçek kıyı yapıları araştırılmış ve Durum-5 ile Durum-11 için Filyos Limanı çalışması, Durum-5 ile Durum-7 için de Kilimli Balıkçı Barınağı çalışması yapılmıştır. Durum çalışmalarında kullanılan limanın boy-en oranı 2,16'dır. Bu değer seçilme nedeni Filyos limanı ve Kilimli Balıkçı Barınağı'nın da boy en oranının 2,16 olmasıdır. Elde edilen sonuçlar, ideal yatay tabanlı liman çalışmaları ile gerçek deniz batimetrisi ile yapılan çalışmaların benzer davranışlar sergilediğini göstermiştir. Karşılaştırmalı çalışmalar, liman geometrisinde yapılacak küçük değişimler ile liman rezonansı karakteristiklerinin değiştirilebileceğini ve büyütme faktörünün küçültülebileceğini göstermiştir. Liman giriş ağzı açık denize bakan basenlerde, rezonans durumunda dalga yüksekliği onlarca kat yükselebilmektedir. Liman giriş ağzı L şeklinde bir dalgakıran ile korunduğunda büyütme faktörünün, dalgakıran geometrisine bağlı olarak %23 azaltılabileceği belirlenmiştir. Büyütme faktörünün azaltılabilmesi için liman giriş ağzında ayırık dalgakıran kullanılması da fayda sağlamaktadır. Ancak ayırık dalgakıranın etkisi ilk iki modda görülmezken üçüncü ve sonraki modlarda büyütme faktörünün azaltılabilmesini sağlamaktadır. Ayırık dalgakıran ile liman giriş ağzı korunduğunda, büyütme faktörünün %16 azaltılabileceği belirlenmiştir.

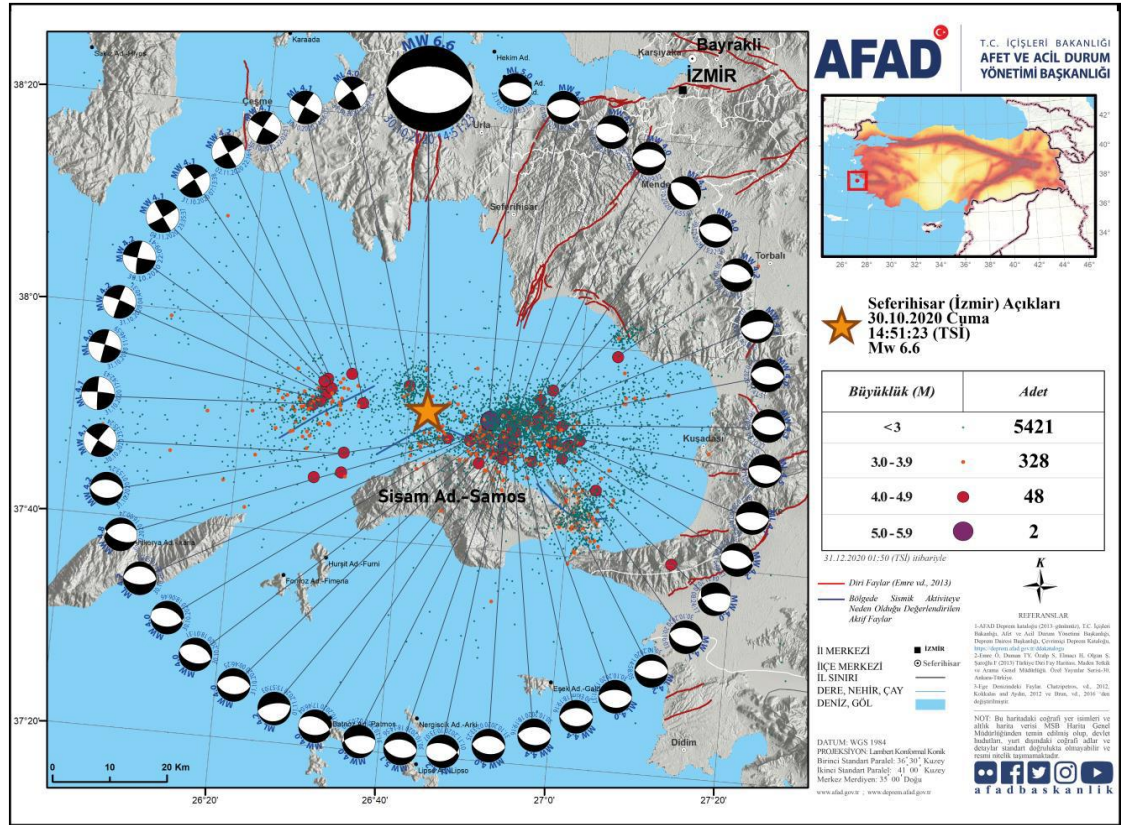
Yat limanları ya da küçük tekne (<10 m) barınakları genellikle küçük periyotlu rüzgâr dalgalarına göre tasarlanmakta ve ülkemizde liman giriş ağızları genellikle ana dalgakıran ile korunacak biçimde inşa edilmektedir. Sayısal modelleme çalışmaları giriş ağızı dalgakıran ile gölgelenmiş bu geometrilerin büyütme faktörünü hem dik hem de açılı dalgalar etkisinde önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Liman giriş ağızları ana dalgakıran ile gölgelenmiş basenlerde tüm rezonans modlarında dalga yükseklikleri %57 azaltılabilmektedir.

8. SEFERİHİSAR KOYU REZONANS MODELLEMESİ

Limanlar haricinde, daha büyük denizel alanlarda rezonans modellemesi ve model sonuçlarının doğrulanabilmesi için Seferihisar koyu örneği çalışılmıştır. Seferihisar koyu açıklarında meydana gelen deprem sonrasında, yerinde yapılan gözlem ve inceleme sonuçları ile rezonans modellemesi sonuçları karşılaştırılmıştır. İzmir depremi, Seferihisar ilçesinin güneyinde ve Sisam adasının kuzeyinde Ege denizinde 30.10.2020 tarihinde 14:51:23 (TSİ) zamanında gerçekleşmiştir. Depremi merkez üssü Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) deprem raporu [59] verilerine göre 37,879°K-26,703°D, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERI) deprem raporu [60] verilerine göre 37,9020°K-26,7942°D koordinatlarında gerçekleşmiştir. Deprem üssü ve artçı sarsıntıların konumları, depremden bir ay sonrası için Kandilli Rasathanesi deprem raporuna göre Şekil 8.1’de, iki ay sonrası için AFAD deprem raporuna göre Şekil 8.2’de görülmektedir. Depremi büyüklüğü Kandilli Rasathanesi verilerine göre $M_w=6,9$, AFAD verilerine göre $M_w=6,6$ olarak ölçülmüştür. Depreme sebebiyet veren fay hattı Doğu-Batı yönlü olduğundan, Sisam adası boyunca yaklaşık 45 m uzunluğundaki bir alanda $M_w=4,0-5,9$ arasında çok sayıda artçı sarsıntı meydana gelmiştir. Depremden iki ay sonrasına ait verilere göre büyüklüğü üçten küçük ($M_w<3$) olan 5241 artçı deprem meydana gelmiştir. Büyüklüğü $M_w=3,0-3,9$ arasında 328, büyüklüğü $M_w=4,0-4,9$ arasında 48 ve büyüklüğü $M_w=5,0-5,9$ arasında 2 artçı sarsıntı oluşmuştur.



Şekil 8.1. Kandilli rasathanesi verilerine göre depremden bir ay sonrası için ana deprem ve artçı sarsıntıların konumları



Şekil 8.2. AFAD verilerine göre depremde iki ay sonrası için ana deprem ve artçı sarsıntılarının konumları

Deprem sonrası İzmir il merkezi dahil olmak üzere, çevre yerleşim yerlerindeki yapılarda büyük hasarlar meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra deprem kaynaklı oluşan uzun dalgalar, deniz suyunun Seferihisar ve Urla ilçelerinin güney kıyı şeridindeki yerleşim yerlerine ulaşmasına ve su baskınlarına neden olmuştur.

Deprem sonrası yerinde yapılan incelemeler [61] sonucunda su baskınlarının batıdan doğuya doğru Alaçatı, Zeytineli, Demircili, Altıncıköy, Sığacık, Akarca, Tepecik ve Gümüldür yerleşim yerlerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Uzun dalgalar, Alaçatı ve Zeytineli yerleşim yerlerinden denize deşarj olan derelerin içine girip yaklaşık 2,7 km ve 0,8 km ilerlemiştir. Deniz suyunun karadaki hareketi ise kıyı hattı boyunca sınırlı bir alanda meydana gelmiştir. Demircili’de deniz suyu sahilde tırmanarak yaklaşık 45 m ilerlemiştir. Kıyı şeridinde konut yerleşiminin olmaması belirgin bir hasar oluşturmamıştır. Demircili’de oluşan hasar, koyun güney ucunda yer alan küçük tekne yanaşma yerinde meydana gelmiştir. Yaklaşık 1 m su seviyesinin yükseldiği görülmüştür. Altıncıköy’de ise deniz suyu sahilde tırmanarak yaklaşık 200 m ilerlemiş ancak kıyıda yoğun bir yerleşim olmaması nedeniyle belirgin bir hasar oluşturmamıştır.

Uzun dalgaların en çok etkilediği alanlar Sığacık mahallesi, Sığacık yat limanı, Sığacık balıkçı barınağı ve Akarca mahallesidir. Sığacık koyu yaklaşık 650 m genişliğinde ve 1 km uzunluğundadır ve rüzgar dalgalarına karşı doğal konumuyla oldukça korunaklıdır. Doğal liman özelliği nedeniyle çok sayıda küçük tekne barınmaktadır. Ayrıca rüzgar dalgalarının yüksekliklerinin küçük olması turizm konusunda yörenin talep görmesini sağlamaktadır. Koyun güneyinde bir küçük koy daha bulunmaktadır. Bu konumda Sığacık yat limanı ve Sığacık balıkçı barınağı yer almaktadır. Konut yerleşiminin ve insan aktivitesinin yüksek olduğu Sığacık'ta deprem dalgalarının verdiği hasar da bu doğrultuda yüksek olmuştur. Sığacık yerleşim yerinde kara kotlarının da deniz seviyesine yakın olması nedeniyle deniz suyu yaklaşık 400 m karanın içine doğru ilerlemiştir. Yat limanında ve balıkçı barınağında su seviyesi yaklaşık 2 m yükselerek rıhtım seviyesinin üzerine çıkmış ve çok sayıda tekne ve yüzer iskele büyük zarar görmüştür.

Akarca koyu yaklaşık 1 km genişliğinde ve 3,8 km uzunluğundadır. Koyun ortasında bir ada ve ada ile kara arasında üst kotu yaklaşık deniz seviyesinde olan bir kıyı oku bulunmaktadır. Bu oluşum koyu ikiye ayırmaktadır. Sığacık koyunda olduğu gibi kıyıya yakın çok sayıda konut bulunmaktadır. Sığacık ve Akarca mahallelerinin kara kotları deniz seviyesine göre +1 ~ +2 m civarındadır. Bu durum oluşan su baskınlarının daha etkili olmasında ayrıca bir etkidir. Akarca mahallesinde deniz suyu yaklaşık 290 m karanın içine doğru ilerlemiştir. Su seviyesi yaklaşık 2 m yükselerek koyun ortasında yer alan küçük tekne yanaşma yerinde bulunan teknelerde hasarlar meydana getirmiştir.

Tepecik ve Gümlüdür yerleşim yerlerinde ise dalga etkisi sahil şeridi ile sınırlı kalmış ve belirgin bir hasar oluşmamıştır.

8.1. Su Seviyesi Değişimleri

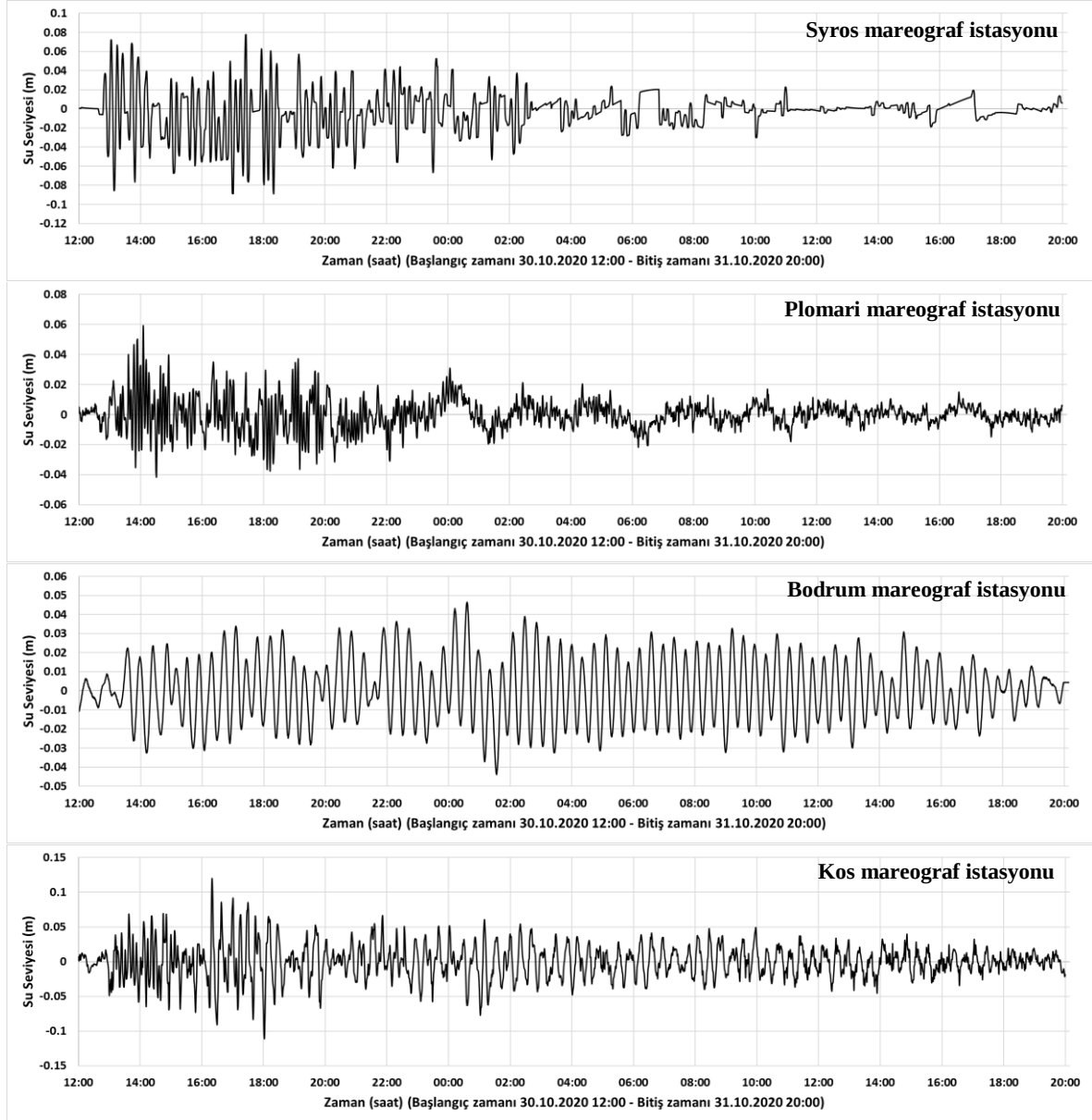
Deprem sonrasında merkez üssüne yakın mareograf istasyonlarının 1 dakikalık aralıklarla deniz seviyesi ölçümleri incelenmiş [62] ve deprem kaynaklı dalgaların yükseklik ve periyot verileri belirlenmeye çalışılmıştır. Ege Denizi'nde deprem merkez üssüne yakın mareograf istasyonu bulunmamaktadır. En yakın mareograf istasyonlarının yerleri Şekil 8.3'te gösterilmiştir. Ege Denizi'nde irili ufaklı birçok ada ve küçük kayalık oluşumlar bulunmaktadır. Bu nedenle çok sayıda yansıma yüzeyi oluşmaktadır. Plomari (deprem merkez üssüne uzaklık 123 km), Kos (deprem merkez üssüne uzaklık 121 km) ve Bodrum

(deprem merkez üssüne uzaklık 113 km) mareograf istasyonlarına ulaşan deprem kaynaklı dalgaların, yansıma yüzeylerinin varlığından etkilendiği düşünülmektedir. Diğer istasyonlara kıyasla merkez üssü ile Syros (deprem merkez üssüne uzaklık 174 km) arasında daha az yansıma yüzeyi veya engel bulunmaktadır. Deprem kaynaklı dalgaların ada ve kayalık oluşumlardan en az etkilenererek ulaştığı düşünülen Syros mareograf istasyonunun deniz seviyesi ölçümleri sıfırı yukarı kesme yöntemi ile analiz edilmiş ve deprem gününde 9-20 dakika arasında dalga periyotlarının meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 8.3. Ege Denizinde deprem üssüne en yakın mareograf istasyonlarının konumları

Mareograf istasyonlarının deniz seviyesi ölçümleri ayrıca gelgit dalgasını da içermektedir. Deprem kaynaklı dalgaları belirlemek için yerel regresyon (Loess) analizi ile filtreleme uygulanmış, bu şekilde gelgit dalgaları elimine edilmiştir. Elde edilen su seviyesi değişimleri zaman serisi olarak Şekil 8.4'te gösterilmiştir. Su seviyesi ölçümleri incelendiğinde, deprem kaynaklı dalgaların Syros ve Polimari istasyonlarında yaklaşık 13 saat sonra sönümlendiği görülmektedir. Diğer istasyonlarda ise bu süre yaklaşık 30 saat olarak belirlenmiştir. En uzun dalga periyotları 12-27 dakika ile Bodrum istasyonunda, en kısa dalga periyotları ise 3-16 dakika ile Plomari istasyonlarında hesaplanmıştır. İstasyonların deprem saati ile gece (31.10.2020) 03:00 UTC arasındaki zamana göre dalga periyodu ve dalga yüksekliği aralıkları Çizelge 8.1'de verilmiştir.



Şekil 8.4. Mareograf istasyonlarının su seviyesi ölçümleri (30.10.2020 12:00 – 31.12.2020 20:00)

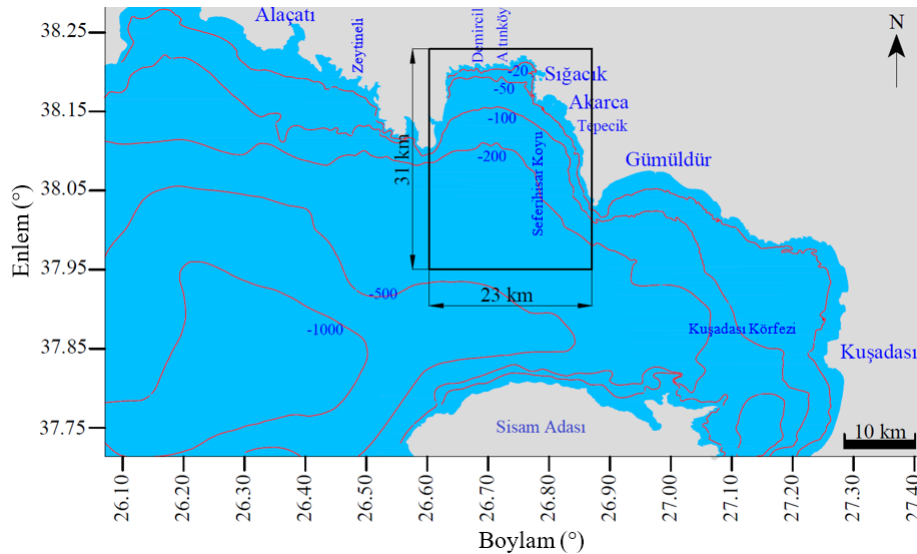
Çizelge 8.1. Ege Denizi'ndeki dört mareograf istasyonunun 30.10.2020 12.00 – 31.10.2020 03.00 UTC tarihleri arasında dalga yüksekliği ve dalga periyodu aralıkları

Mareograf İstasyonu	H (cm)	T (dk)
Syros	3-15	9-20
Polimari	2-8	3-16
Bodrum	3-9	12-27
Kos	3-20	3-20

8.2. Seferihisar Koyu Rezonans Modellemesi

Çalışmada, Seferihisar koyunda deprem kaynaklı dalgaların rezonans özellikleri RIDE dalga modeli kullanılarak araştırılmıştır. Deprem merkez üssündeki su derinliği yaklaşık -500 m'dir. Seferihisar koyunun derinlikleri ise -200 m'den başlayıp kıyıya doğru sığlaşmaktadır. Çalışma alanının boyutları 31x23 km olup çözüm ağı uzunluğu x ve y yönlerinde 25 m'dir (Şekil 8.5). Çalışma alanı, dalga ilerleme yönünde (x yönü) 1240 ve dalga ilerleme yönüne dik doğrultuda (y yönü) 920 çözüm ağı nokta sayısından oluşmaktadır. Gelen dalga açısı 0°'dir ve alanın güney açık sınırından dik olarak verilmiştir. Deprem günü oluşan deprem kaynaklı dalgaların analizi için 9-20 dk. arasında 0,1 dk. aralıklı 111 dalga periyodu kullanılmıştır. Mareograf istasyonlarının verileri dikkate alınarak başlangıç dalga yüksekliği 0,1 m olarak alınmıştır. Yansıma katsayısı kumsal kıyı hatları için 0,1, kayalık oluşumlar ve dalgakıranlar için 0,4 ve düşey yüzeyler için 1,0 olarak kabul edilmiştir.

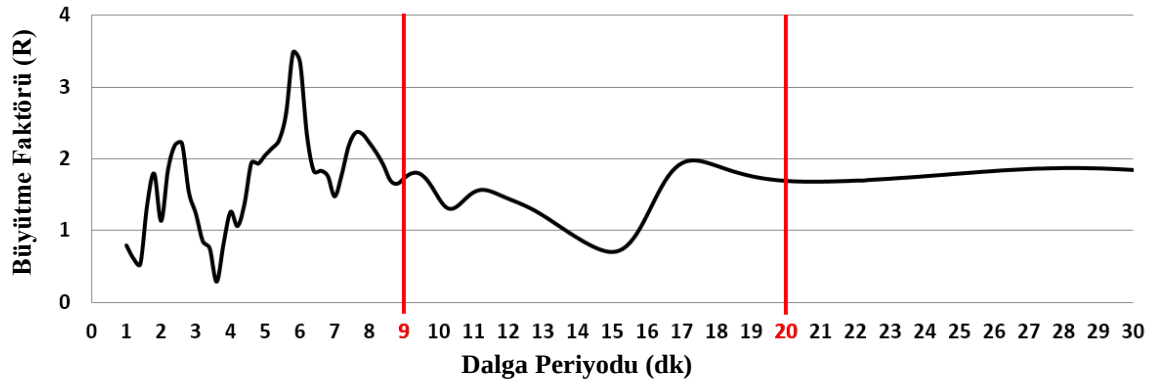
1992 yılından günümüze kadar deprem merkez üssü çevresinde büyüklüğü dörtten büyük ($M_w > 4$) 81 deprem meydana gelmiştir [63] (Şekil 8.6). Ekim 2020'de meydana gelen depremi meydana getiren fay hattı günümüzde aktif olarak deprem üretmeye devam etmektedir. Gelecekteki depremlerde oluşabilecek dalgaların 9-20 dakika aralığının dışında olması durumunda, Seferihisar koyu için rezonans çalışması 1-9 dk. ve 20-30 dk. arasında 92 dalga periyodu kullanılarak genişletilmiştir. Büyütme faktörü (R) dalga yüksekliğinin, başlangıç dalga yüksekliğinin iki katına oranı ile hesaplanmaktadır. Modelleme sonucunda elde edilen büyütme faktörü eğrileri Şekil 8.7 - Şekil 8.12'de verilmiştir.



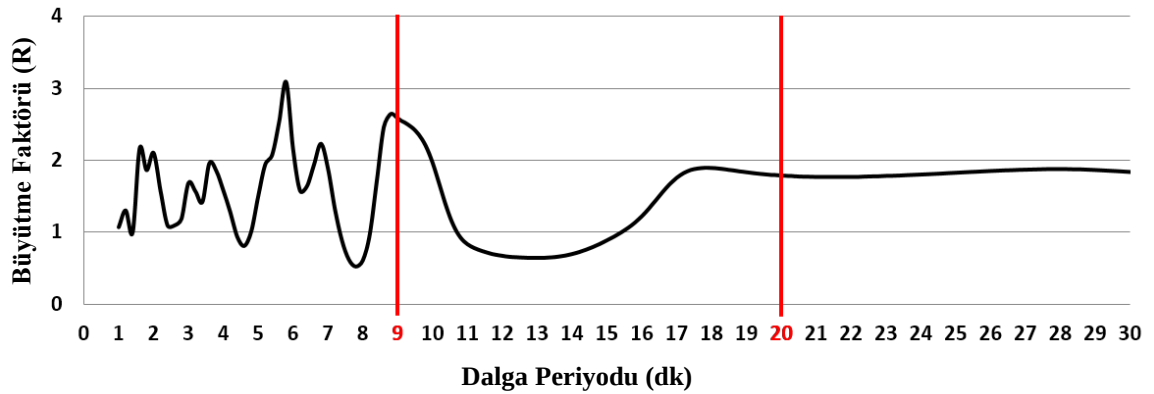
Şekil 8.5. Seferihisar koyu ve rezonans modellemesi alanı (siyah dikdörtgen alan)



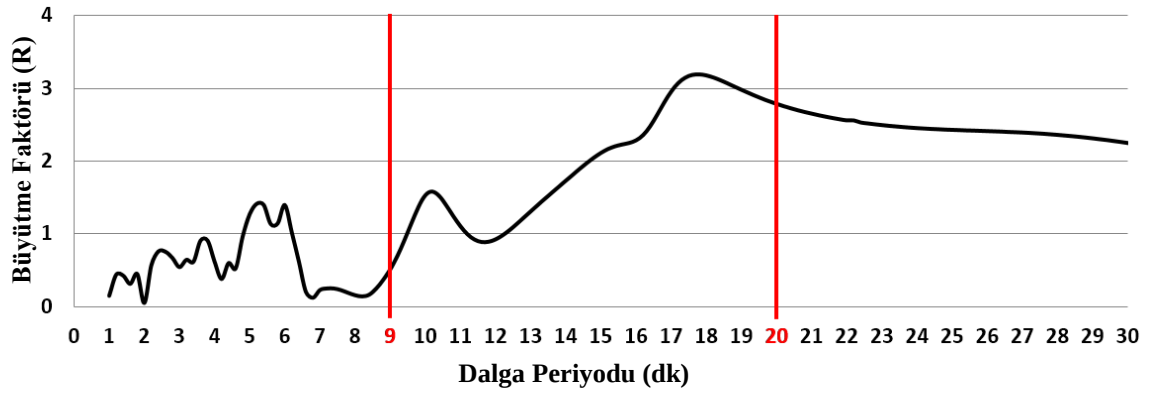
Şekil 8.6. 1992 yılından günümüze kadar Kuşadası körfezinde büyüklüğü dörtten büyük depremlerin konumları [63]



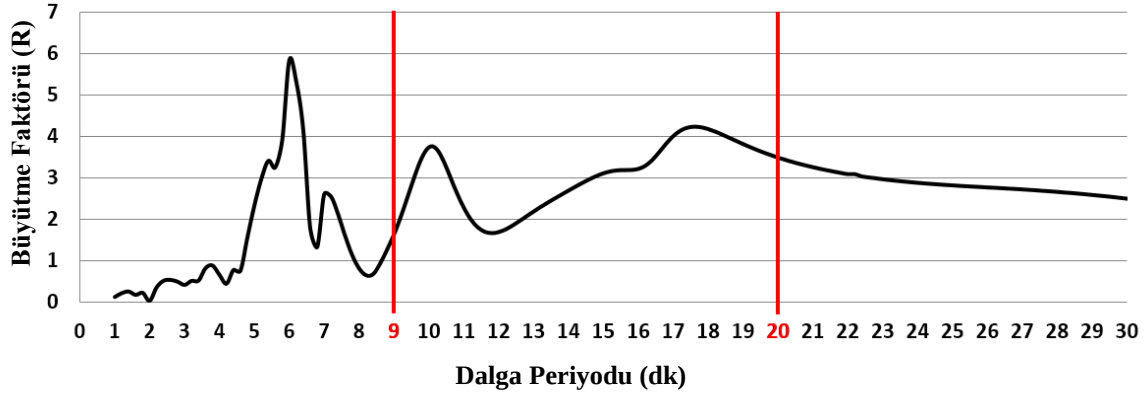
Şekil 8.7. Demircili mevkiine ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)



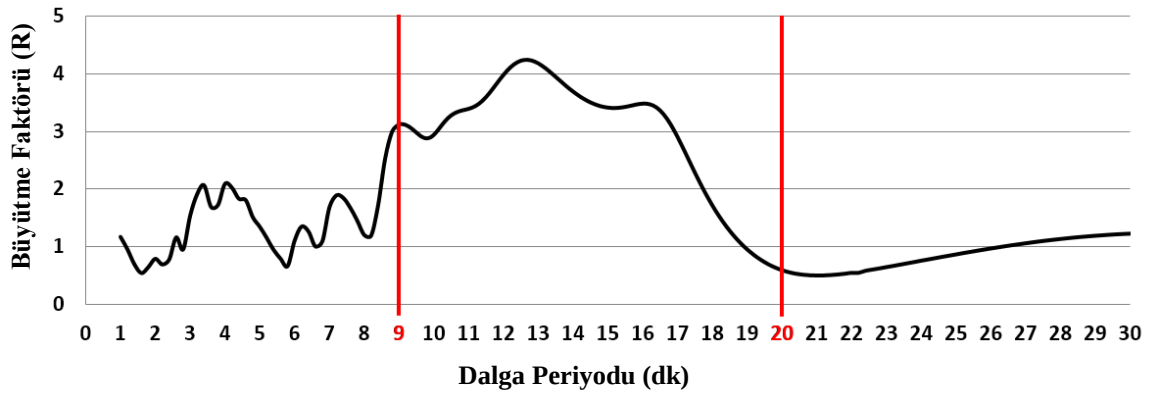
Şekil 8.8. Altıncıköy mevkiine ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)



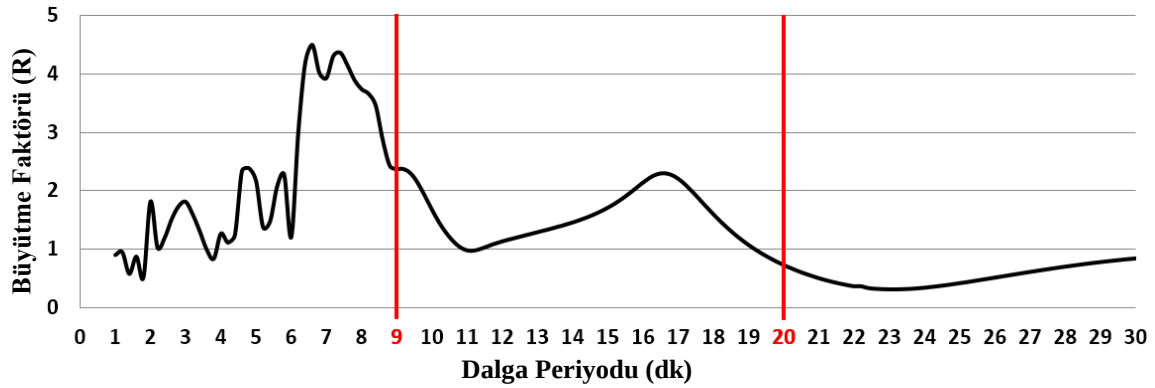
Şekil 8.9. Sığacık koyuna ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)



Şekil 8.10. Sığacık yat limanına ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)



Şekil 8.11. Akarca koyuna ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)



Şekil 8.12. Tepecik mevkiine ait büyütme faktörü eğrisi (Kırmızı hatlar 9 dk. ve 20 dk. periyotları belirtmektedir)

8.2.1. Demircili Mevkii

T=9-20 dk: Demircili mevkii, yaklaşık 800 m genişliğinde ve 800 m uzunluğunda kare geometriye sahip bir koy olup Seferihisar koyunun batısında yer almaktadır. Demircili’de deprem günü T=9 dk’da dalga yüksekliği 3,5 kat artmıştır. Ardından rezonans davranışı T=15 dakikaya kadar azalmış ve dalga yüksekliğindeki artış 2 kata inmiştir. Sonrasında rezonans oluşumunun güçlenmesi ile dalga yüksekliği T=17,3 dakikada 4 kat artmıştır.

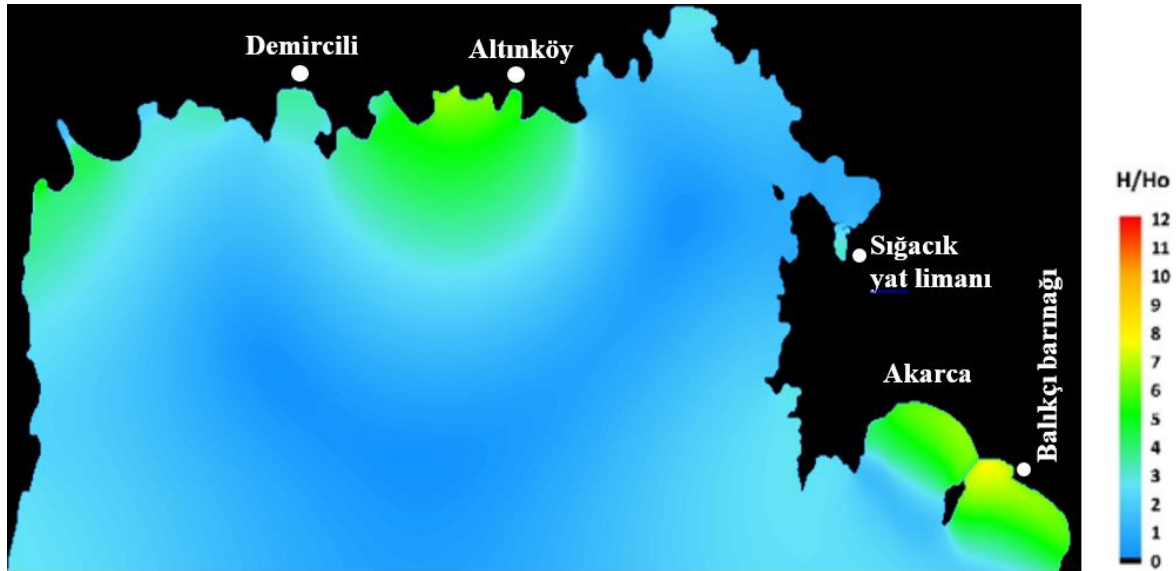
T=1-9 dk: Rezonans frekansı yarı kapalı su alanlarının boyutlarına bağlıdır. Seferihisar koyu tek başına yarı kapalı bir su alanı iken, içindeki birçok küçük koy da kendi rezonans frekanslarına sahiptir. Sayısal modelleme, rezonansın bazı küçük koylarda T<9 dk. periyotlarında daha belirgin olduğunu göstermektedir. Demircili’de dalga yüksekliğinin T=2,6 dk. ve T=7,6 dk. periyotlarında 4,5 kat, T=5,8 dk. periyodunda 6,9 kat artabileceği belirlenmiştir. Demircili’de T<9 dk’da deprem gününden daha yüksek dalga yüksekliği artışları meydana gelebileceği hesaplanmıştır.

8.2.2. Altıncöy Mevkii

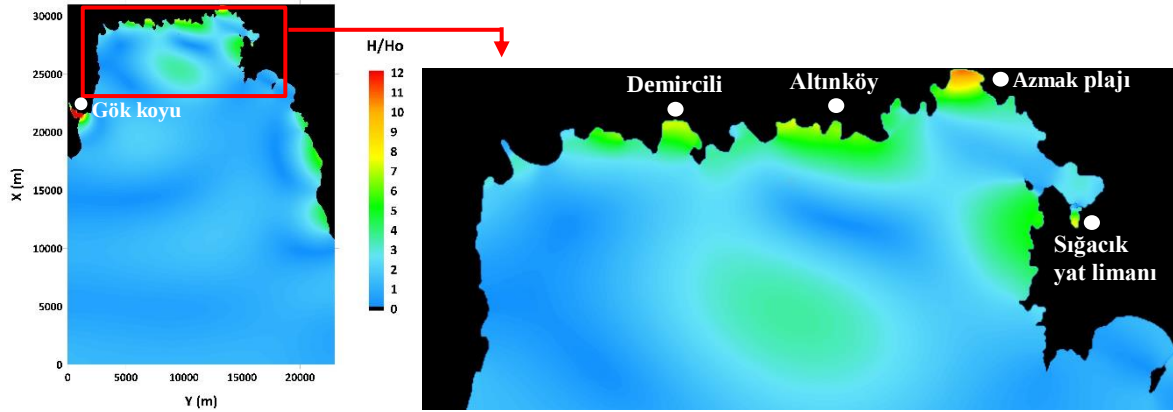
T=9-20 dk: Altıncöy koyu, Demircili koyunun 3,5 km doğusunda, yaklaşık 250 m genişliğinde ve 350 m uzunluğunda dikdörtgen geometride olup Seferihisar koyunun ortasında yer almaktadır. Altıncöy koyu incelenen alanların en küçüğüdür. Dalga enerjisi, Demircili ile Altıncöy arasında, T=9 dk’da yaklaşık 3 km çapında bir alanda yoğunlaşmıştır (Şekil 8.13). Dalga yüksekliği sadece Demircili ve Altıncöy’de değil, iki lokasyon arasındaki yerleşim olmayan diğer koylarda da artmıştır. Ayrıca Akarca körfezinin ortasındaki kıyı

okunun güneyinde yer alan balıkçı barınağının da yaklaşık 7 katlık dalga yüksekliği artışı ile $T=9$ dk'da oldukça etkilendiği görülmüştür. Altıncöy'de $T=9$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğinin 5,2 kat arttığı hesaplanmıştır. Ardından rezonansın etkisi zayıflayarak $T=13$ dk'ya kadar bu şekilde devam etmiştir. Dalga yüksekliği artışı $T=13$ dk'da 1,3 kat hesaplanmıştır. Sonrasında rezonans oluşumu güçlenmiş ve dalga yüksekliği $T=17,9$ dakikada 3,8 kat artmıştır.

$T=1-9$ dk: Altıncöy koyundaki rezonans oluşumu $T=1-9$ dk. aralığında Demircili koyundakine benzer bir davranış göstermiştir. Dalga yüksekliğinin $T=2,0$ dk, $T=3,6$ dk. ve $T=6,8$ dk. periyotlarında 4 kat, $T=5,8$ dk. periyodunda ise 6 kat artabileceği belirlenmiştir (Şekil 8.14). Ayrıca dalga yüksekliğinin Seferihisar körfezinin batısında yer alan Gök koyunda 12 kat, Altıncöy ve Sığacık'ın ortasında yer alan Azmak sahilinde $T=5,8$ dk. periyodunda 11 kat artabileceği görülmüştür. Demircili ve Altıncöy'de $T=1-9$ dakikalık periyot aralığının deprem günü meydana gelen dalga periyotlarına göre daha fazla dalga yüksekliği artışına neden olabileceği, bu sebeple daha fazla zarar verebileceği tahmin edilmektedir.



Şekil 8.13. $T=9$ dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı



Şekil 8.14. $T=5,8$ dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı

8.2.3. Sığacık Koyu

$T=9-20$ dk: Sığacık koyunda $T=9$ dk'da dalga yüksekliğinde artış oluşmamıştır. Ancak dalga periyodu arttıkça koydaki rezonans seviyesi de artmıştır. $T=10,2$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğinde 3,2 kat artış olmuştur. Ardından bu oran $T=11,7$ dk'ya kadar 1,8 kata kadar düşmüştür. Sonrasında rezonans formasyonunun kuvvetlenmesiyle $T=17,8$ dk. periyodunda dalga yüksekliğinde 6,4 kat artış olmuştur. Sığacık koyunun güneyindeki rezonans seviyesi kuzeyinden %69 daha yüksektir. Su baskınından zarar gören alanlar da koyun güneyindeki kısımlardır. Ayrıca Sığacık mahallesinin güneyi (Kaleiçi mevki ve Sığacık yat limanı çevresi) eski bir yerleşim yeri olduğundan birbirine yakın evler ve dar sokaklar bulunmaktadır. Bu durum konutlarda ve eşyalarda yaşanan su baskını hasar düzeyini arttırmıştır.

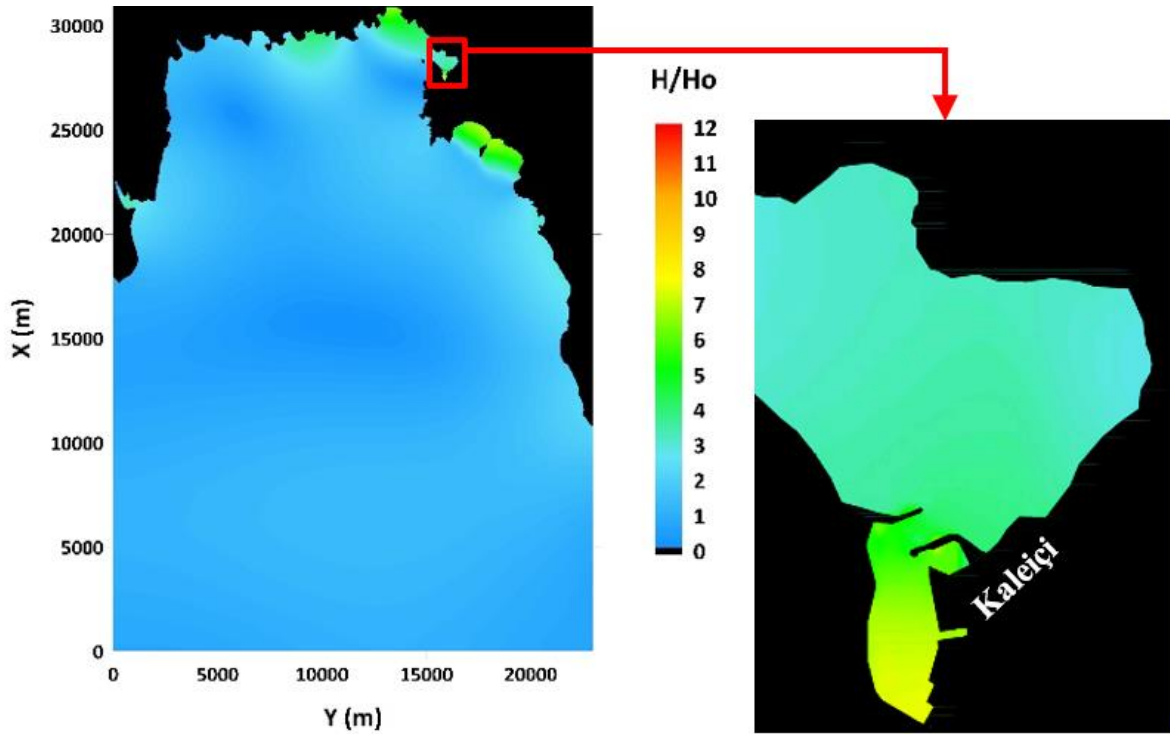
$T=1-9$ dk: Dalga yüksekliğinin $T=5,2$ dk. ve $T=6,0$ dk. periyotlarında 2,8 kat artabileceği belirlenmiştir. Diğer periyotlar ise daha düşük dalga yüksekliği artışları üretmemiştir. Sığacık koyu rezonans açısından $T=1-9$ dk. aralığında, deprem gününe göre daha az etkilenmektedir. Dalga yüksekliğinde artış ve su baskını riskinin düşük olduğu değerlendirilmektedir.

8.2.4. Sığacık Yat Limanı

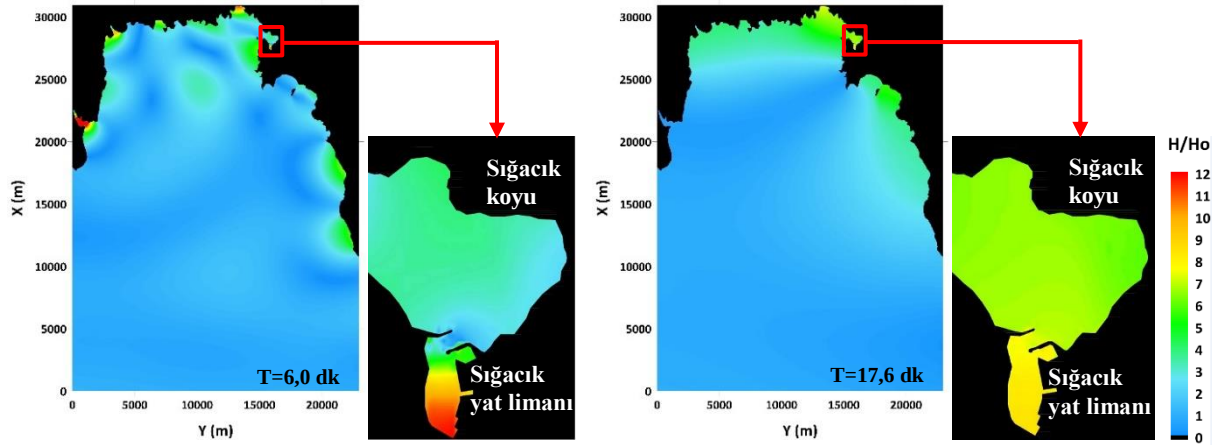
$T=9-20$ dk: Sığacık yat limanı ve balıkçı barınağının bulunduğu koy, yaklaşık 170 m genişliğinde ve 470 m uzunluğunda dikdörtgen geometriye sahiptir. İncelenen alanların en yüksek rezonans değerleri Sığacık yat limanında elde edilmiştir. $T=9$ dk. periyodundan

başlayarak rezonans seviyesi artmış ve $T=10,2$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğinde 7,4 kat artış olmuştur (Şekil 8.15). Sığacık koyunda olduğu gibi bir süre rezonans değerlerinde düşüş olmuş ancak $T=11,8$ dk. periyodundan itibaren rezonans etkisi artmış ve $T=17,6$ dk. periyodunda dalga yüksekliğinde 8,5 kat artış meydana gelmiştir (Şekil 8.16). Dalga yüksekliği hem balıkçı barınağı hem de yat limanının tüm basen alanında yükselmiştir. Rezonans nedeniyle yat limanı rıhtımlarını aşan deniz sularının, Kaleiçi bölgesinde oluşan su baskınlarının etkisini arttırdığı düşünülmektedir.

$T=1-9$ dk: Sığacık yat limanındaki rezonans davranışı, $T=1-9$ dk. aralığında Sığacık koyuna göre çok daha agresiftir. $T=4,8$ dk. periyodundan başlayarak $T=6,0$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğindeki artışın 11,6 kata ulaşabileceği görülmüştür. Ayrıca $T=7,0$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğinin 5,2 kat artabileceği belirlenmiştir. Bu rezonans davranışı deprem gününe göre daha yüksek dalga yüksekliği artışlarının oluşması anlamına gelmektedir. Bu durum, deprem günü yaşanan su baskınlarından daha tehlikelidir. $T=5,2-7,2$ dk. aralığının, özellikle depremin, merkez üssünde 0,5 m veya daha fazla dalga yüksekliği oluşturması durumunda, Sığacık yat limanının bulunduğu koy için yıkıcı etkiler yaratabileceği görülmektedir.



Şekil 8.15. $T=10,2$ dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı

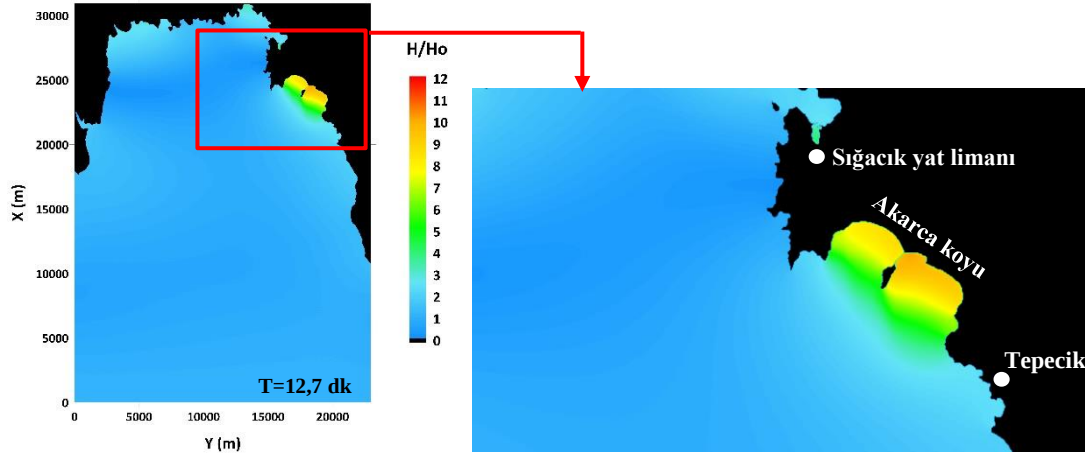


Şekil 8.16. $T=6,0$ dk. ve $T=17,6$ dk. periyotlarında boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı

8.2.5. Akarca Koyu

$T=9-20$ dk: Akarca koyunda $T=9$ dk. periyodunda dalga yüksekliğinin 6,2 kat arttığı hesaplanmıştır. $T=9-17$ dk. arasındaki tüm periyotlar, dalga yüksekliğinde artışa neden olmuştur. En yüksek artış 8,5 kat ile $T=12,7$ dk'da meydana gelmiştir (Şekil 8.17). Bu durumun Akarca mahallesinin, deprem kaynaklı dalgalardan diğer lokasyonlara göre daha fazla zarar görmesine neden olduğu düşünülmektedir. Dalga rezonansı, limanlar ve koylar için oldukça tehlikeli bir olgudur. Uzun dalgaların neden olduğu rezonans oluşumlarında, bu depremde olduğu gibi dalga yüksekliği düşükse, dalga yüksekliğindeki artış çıplak gözle kolayca fark edilemez. Deniz suyunun hareketi bir akış gibi görülür. Yerinde yapılan inceleme raporlarında [61] da görgü tanıkları tarafından deniz suyunun nehir gibi aktığı ifade edilmektedir. Diğer inceleme alanlarında dalga yüksekliği artıp azalırken, Akarca'da $T=9-17$ dakika arasında herhangi bir zamanda dalga yüksekliğinin en az 6 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle Akarca'da su seviyesi uzun süre yüksek kalmış ve depremin neden olduğu dalgalardan en fazla zararı Akarca mahallesi almıştır.

$T=1-9$ dk: Akarca koyunda dalga yüksekliğinin $T=1-9$ dk. Aralığında, $T=3,4$ dk, $T=4$ dk. ve $T=7,2$ dk. periyotlarında 4 kat artabileceği belirlenmiştir. Bu artış oranı deprem günü yaşanan artışın yaklaşık yarısıdır. Depremin merkez üssündeki dalga yüksekliği 0,5 m veya daha fazla ise 4 kat artış ciddi bir derecedir. Ancak rezonans açısından $T=1-9$ dk. aralığında Akarca koyunun deprem gününe göre daha az etkileneceği değerlendirilmektedir. Akarca koyu $T=1-9$ dk. aralığında Sığacık koyuna benzer davranış göstermektedir.

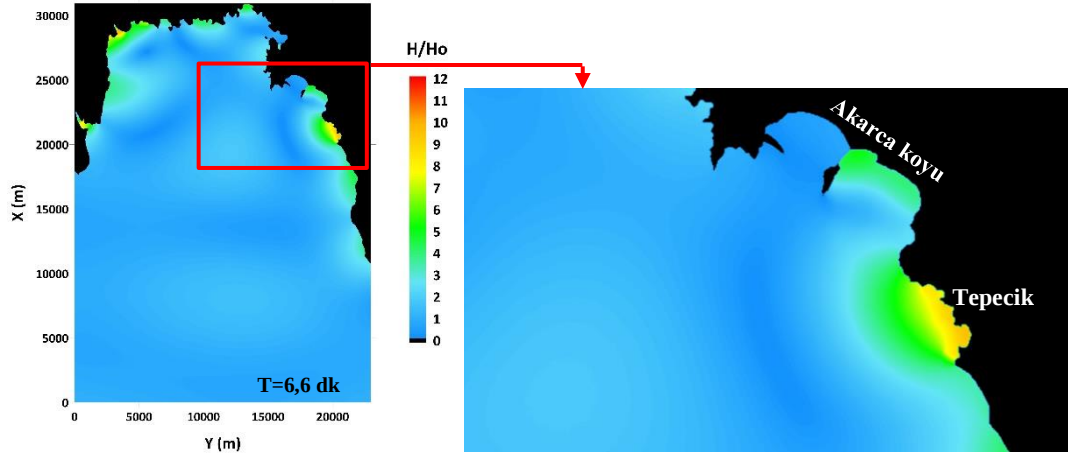


Şekil 8.17. $T=12,7$ dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı

8.2.6. Tepecik Mevkii

$T=9-20$ dk: Tepecik, yaklaşık 400 m genişliğinde ve 1500 m uzunluğunda dikdörtgen geometride olup Akarca koyunun 3,5 km güneyinde ve Seferihisar koyunun doğusunda yer almaktadır. Diğer yerleşim yerlerine göre deprem kaynaklı dalgalardan en az etkilenen mevkii Tepecik'tir. Tepecik mevkii diğer lokasyonlara göre yarı koy geometrisindendir ve kara kotları hızla yükselmektedir. Tepecik'te $T=9$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğinde 4,7 kat artış meydana gelmiştir. Ardından rezonansın etkisi zayıflayarak $T=11,1$ dk'ya kadar devam etmiştir. Dalga yüksekliği artışı $T=11,1$ dk'da 2 kat hesaplanmıştır. Sonrasında rezonans oluşumunun güçlenmesi ile $T=16,6$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğinin 4,6 kat arttığı belirlenmiştir.

$T=1-9$ dk: Tepecik'te $T<6,4$ dk. periyotlarında dalga yüksekliği artışları, deprem günü meydana gelen artışlar (4,5 kat) kadardır. Ancak $T=6,4-7,8$ dk. aralığının Tepecik için tehlikeli olabileceği düşünülmektedir. $T=6,6$ dk. dalga periyodunda dalga yüksekliğinin 9 kat artabileceği tahmin edilmektedir (Şekil 8.18). Bu artış deprem günü oluşan durumun 2 katıdır. Kara kotlarının yüksekliği nedeniyle konutlarda bir hasar oluşmayacağı öngörülmekle birlikte Tepecik'in güneyindeki küçük kumsal koyda su baskını yaşanabileceği düşünülmektedir. Sayısal modelleme, $T=1-9$ dakika aralığında diğer lokasyonlara kıyasla dalga yüksekliğindeki en yüksek artış oranının Tepecik'te olabileceğini göstermektedir.



Şekil 8.18. T=6,6 dk. periyodunda boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı

T=9-20 dk. arasındaki rezonans modellemesi sonuçları, deprem sonrası araştırmalarda görülen su baskınlarını netleştirmektedir. Sığacık ve Akarca'da deprem kaynaklı dalgaların diğer lokasyonlara göre daha etkili olmasının nedeninin, bu bölgelerde oluşan rezonans olduğu belirlenmiştir. Büyütme faktörü eğrileri incelendiğinde Demircili, Altıncöy ve Tepecik'te daha düşük, Sığacık ve Akarca'da daha yüksek rezonans değerlerinin meydana geldiği görülmüştür (Çizelge 8.2).

Çizelge 8.2. T=9-20 dk. periyot aralığında hesaplanan en büyük rezonans değerleri ve karşılık gelen dalga periyotları

Mevkii	En Yüksek Rezonans Periyodu (dk)	En Yüksek Rezonans Değeri
Demircili	17,3	1,975
Altıncöy	9,0	2,585
Sığacık koyu	17,8	3,185
Sığacık yat limanı	17,6	4,232
Akarca	12,7	4,252
Tepecik	9,1	2,377

T=1-9 dk. arasındaki rezonans modelleme sonuçları gelecek için öngörü sağlamaktadır. Eğer gelecekteki bir deprem, T=5,8 dk. periyodunda bir dalga oluşturursa Demircili ve Altıncöy'de deprem gününe göre yaklaşık 2 kat daha fazla su seviyesi artışı meydana gelebileceği hesaplanmıştır. Benzer bir durum Tepecik için de geçerlidir. Tepecik'e T=6,6 dk. periyodunda bir dalga ulaşırsa dalga yüksekliğinin yaklaşık 9 kat yükselerek Tepecik kıyılarına zarar verebileceği görülmüştür. Seferihisar koyunda rezonanstaki en çok

etkilenecek yer Sığacık yat limanıdır. Hem $T=1-9$ dk. hem de $T=9-20$ dk. periyotlarında en yüksek dalga yüksekliği artışlarının Sığacık yat limanında meydana gelebileceği hesaplanmıştır. Sığacık yat limanı, Sığacık koyunun güneyinde yer almaktadır. Koy içinde koy olarak düşünülebilir. Bu geometri, uzun dalgaların Sığacık yat limanının bulunduğu koyda sıkışmasına ve dalga yüksekliği artışlarının fazla olmasına neden olmaktadır (Çizelge 8.3).

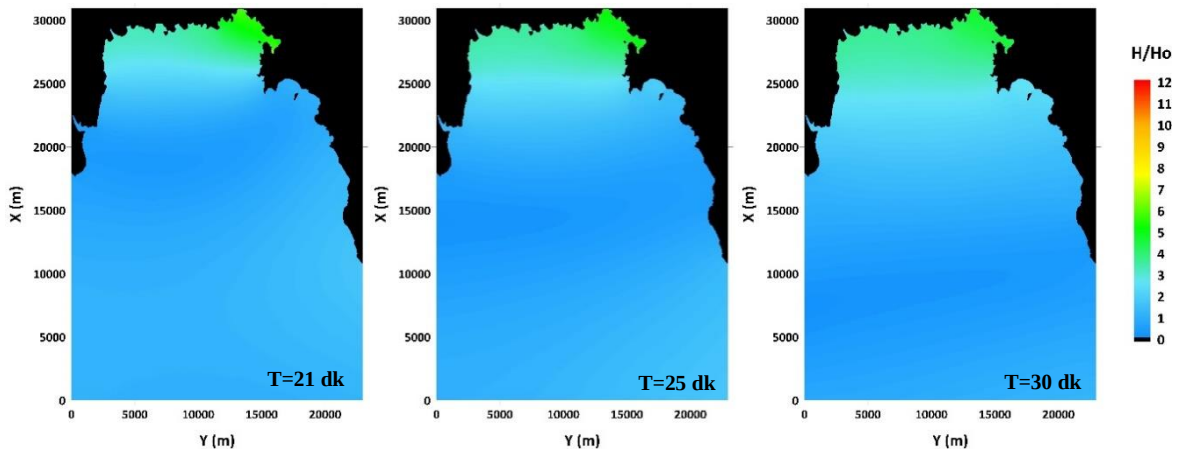
Diğer lokasyonların aksine Sığacık ve Akarca koylarında deprem gününe göre $T=1-9$ dakika aralığında daha düşük dalga yükseklik artışlarının olabileceği hesaplanmıştır. Sığacık koyunda $T=5,2$ dk. periyodunda dalga yüksekliğinde 2,8 kat artışın karada önemli bir su baskınına neden olmayacağı düşünülmektedir. Ancak Sığacık yat limanından taşabilecek deniz suyunun yerleşim yerlerine (Kaleiçi mevkiine) zarar verebileceği öngörülmektedir. Akarca Körfezi'nde $T<9$ dk. periyotlarda en fazla 4 kat artış olabileceği ve bu artışın deprem günü gibi uzun süre yüksek kalmayacağı belirlenmiştir. Bu nedenle Akarca'daki yerleşim bölgesinde su baskını riskinin deprem gününe göre daha az olduğu değerlendirilmektedir.

Çizelge 8.3. $T=1-9$ dk. periyot aralığında hesaplanan en büyük rezonans değerleri ve karşılık gelen dalga periyotları

Mevkii	En Yüksek Rezonans Periyodu (dk)	En Yüksek Rezonans Değeri
Demircili	5,8	3,482
Altıncıköy	5,8	3,094
Sığacık koyu	5,2	1,411
Sığacık yat limanı	6,0	5,834
Akarca	8,8	2,962
Tepecik	6,6	4,494

Seferihisar koyunda farklı boyutlarda ve geometrilerde çok sayıda küçük koy bulunmaktadır. $T=17$ dakika ve daha küçük periyotlarda, rezonans davranışı küçük koylarda daha belirgin (bir koyda dalga yüksekliği artarken komşu koyunda bir değişim olmaması durumu), $T=17$ dakikadan daha büyük periyotlardaki rezonans davranışı Seferihisar koyu boyutlarında etkili olmaya başlamaktadır. Depremi neden olduğu dalgaların periyotları $T=20-30$ dk. aralığında olur ise Seferihisar Körfezi'nin tüm kuzey kıyılarında dalga yüksekliklerinin aynı anda artabileceği görülmüştür. Bu durum Demircili, Altıncıköy ve Sığacık koyunda dalga yüksekliğinin aynı anda 4 kat artabileceğini göstermektedir. Koyun

güneyindeki (Akarca ve Tepecik) artış ise kuzeydekinin yarısı kadar hesaplanmaktadır. Büyütme faktörü eğrileri incelendiğinde $T=17$ dk'dan küçük periyotlarda, dalga yüksekliği artımlarında yükselişlerin ve azalışların olduğu görülmektedir. Ancak $T=20-30$ dk. aralığında dalga yüksekliklerindeki artış sabit kalmaktadır. Bu durumun, deprem gününden daha uzun süren su baskınlarına neden olabileceği değerlendirilmektedir. $T=21$ dk'da dalga yükseklikleri koyun kuzeydoğu kesiminde artmakta ve bu davranış $T=25$ dk. ve $T=30$ dk'da koyun kuzeybatı kesimine doğru yayılmaktadır (Şekil 8.19).



Şekil 8.19. $T=21$ dk, $T=25$ dk. ve $T=30$ dk. periyotlarında boyutsuz dalga yüksekliğinin alansal dağılımı

8.3. Değerlendirmeler

Ege Denizi'nin doğusunda Seferihisar körfezi ile Sisam adası arasında 30 Ekim 2020'de büyüklüğü $M_w=6,6-6,9$ olan bir deprem meydana gelmiştir. Yaklaşık 100 km çapındaki yerleşim yerlerinde şiddetli bir şekilde hissedilen deprem büyük hasara neden olmuştur. Depremi neden olduğu uzun dalgalar Sisam adasının kuzey, Seferihisar ve Urla ilçelerinin güney kıyılarına ulaşarak su baskınlarına neden olmuştur. Ancak bu su baskınları tüm yerleşim yerlerinde aynı derecede meydana gelmemiştir. Çalışmada, Seferihisar koyunda deprem kaynaklı dalgaların etkilerindeki farklılıkları netleştirmek için rezonans modellemesi yapılmıştır.

Deprem kaynaklı dalgaların Ege Denizi'ndeki ada ve kayalık oluşumlardan en az etkilenecek ulaştığı mareograf istasyonunun Syros olduğu değerlendirilmiş ve bu istasyonun verileri rezonans modellemesinde kullanılmıştır. Deprem günü oluşan dalga periyotlarının $T=9-20$ dk. aralığında olduğu hesaplanmış ve başlangıç dalga yüksekliği $H=0,1$ m alınmıştır.

Depremi olduğu gün Sığacık yat limanı ve Akarca koyunda su seviyesinin yaklaşık 2 m, Demircili ve Altıncıköy koylarında yaklaşık 1 m yükseldiği raporlanmıştır [61]. Sayısal modelleme sonucunda, Sığacık yat limanı ve Akarca koyunda dalga yüksekliğinin başlangıç dalga yüksekliğine göre yaklaşık 8,5 kat, Demircili ve Altıncıköy koylarında ise yaklaşık 4 kat arttığı hesaplanmıştır. Buna göre deprem merkez üssündeki dalga yüksekliğinin $H=0,20-0,25$ m civarında olduğu değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda başlangıç dalga yüksekliği $H=0,25$ m olan dalgalar ve Çizelge 8.2'deki dalga periyotları ile yapılan rezonans modelinde yerinde gözlem ve inceleme çalışmalarında rapor edilen dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Akarca koyunda ve özellikle rüzgâr dalgalarına karşı oldukça korunaklı olan Sığacık yat limanında meydana gelen su seviyesi artışlarının rezonans kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç ayrıca RIDE dalga modelinin Seferihisar koyu gibi büyük denizel alanlar için rezonans modellemesinde başarılı olduğunu da göstermektedir.

Anadolu levhası sürekli olarak Avrasya ve Afrika levhasına doğru hareket etmektedir ve Doğu Ege Denizi bölgesinde çok sayıda fay hattı bulunmaktadır [64]. Bu hareketin, fay hatlarında enerji birikmesine ve gelecekte yeni depremlerin oluşmasına neden olabileceği beklenmektedir. Seferihisar koyu rezonans çalışması, gelecekteki bir depremde $T=9-20$ dk. aralığı dışında deprem kaynaklı uzun dalgaların meydana gelmesi durumu için $T=1-9$ dk. ve $T=20-30$ dk. periyot aralıkları kullanılarak genişletilmiştir. Bu doğrultuda, $T=1-9$ dk. aralığının Demircili, Altıncıköy, Tepecik ve Sığacık yat limanı için deprem gününe göre daha tehlikeli olduğu belirlenmiştir (Çizelge 8.4). $T=1-9$ dk. aralığında dalga yüksekliğinin $T=9-20$ dk. aralığına göre Demircili'de %76,3, Altıncıköy'de %86,6, Sığacık yat limanında %37,9 ve Tepecik'te %89,1 daha yüksek olabileceği hesaplanmıştır. Sığacık koyunda ve Akarca'da ise sırasıyla %55,7 ve %30,3 daha düşük dalga yükseklikleri oluşabileceği tahmin edilmiştir. $T=20-30$ dakika aralığında ise deprem gününe göre daha tehlikeli dalga yüksekliklerinin oluşmayacağı tahmin edilmiştir.

Çizelge 8.4. Seferihisar koyu rezonans çalışmasında incelenen alanlarda hesaplanan en yüksek dalga yüksekliği artışları

Mevkii	T=1-9 dk. Arası	T=9-20 dk. Arası	Fark (%)
Demircili	6,96	3,95	76,3
Altıncöy	6,19	3,32	86,6
Sığacık koyu	2,82	6,37	-55,7
Sığacık yat limanı	11,67	8,46	37,9
Akarca	5,92	8,50	-30,3
Tepecik	8,99	4,75	89,1

Sonuç olarak Seferihisar Körfezi için 1 dk. ile 30 dk. arasında önemli rezonans periyotları tespit edilmiştir. Dalga yüksekliklerinin T=5,8 dk.'da Demircili'de 7 kat ve Altıncöy'de 6,2 kat, T=17,8 dk'da Sığacık koyunda 6,4 kat, T=6 dk'da Sığacık yat limanında 11,7 kat, T=12,7 dk'da Akarca'da 8,5 kat ve T=6,6 dk'da Tepecik'te 9 kat yükselebileceği hesaplanmıştır (Çizelge 8.5).

Çizelge 8.5. T=1-30 dk. periyot aralığında hesaplanan en büyük rezonans değerleri ve karşılık gelen dalga periyotları

Mevkii	En Yüksek Rezonans Periyodu (dk)	En Yüksek Rezonans Değeri
Demircili	5,8	3,482
Altıncöy	5,8	3,094
Sığacık koyu	17,8	3,185
Sığacık yat limanı	6,0	5,834
Akarca	12,7	4,252
Tepecik	6,6	4,494

Ege Denizi'nde çok sayıda aktif fay hattı ve denize yakın birçok yerleşim yeri bulunmaktadır. Deprem kaynaklı dalgalar, uzun yıllardır yerleşim yerlerine zarar vermektedir. Bu nedenle tsunami erken uyarı sistemleri can ve mal kaybını önlemek için önemlidir. Tsunami erken uyarı sistemlerini (sayısal modelleri) geliştirmek ve doğrulamak için mareograf istasyon ölçümlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Aktif fay hatlarının gelecekte de geçmişte olduğu gibi güçlü depremler üreteceği tahmin edilmektedir. Ege Denizi'ndeki aktif fay hatlarının çevresinde, özellikle Sisam Adası'nın kuzeyinde ve Sığacık yat limanında yeni mareograf istasyonları kurulması tavsiye edilmektedir.

9. LİMAN REZONANSI FİZİKSEL MODEL ÇALIŞMASI

Dalga teorilerinin sonlu farklar, sonlu elemanlar veya sonlu hacimler çözüm yöntemleri kullanılarak sayısal model haline getirilmeleri sonrasında doğruluklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktada fiziksel model deneyleri veya deniz ölçümleri kullanılmaktadır. RIDE dalga modeli tez çalışması içinde, yansıma sınır koşulluna sahip olmayan batık sığlık [19], yatay taban ve liman içi düşey yüzölçümü yansıma sınırlarına sahip dikdörtgen liman [32], sabit eğimle sığlaşan taban ve düşey yüzölçümü yansıma sınırına sahip dalgakıran [56] ile yatay taban ve liman içi düşey yüzölçümü yansıma sınırlarına sahip kare liman [35] fiziksel model deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu fiziksel model deneylerinden farklı olarak ülkemiz kıyılarında sıklıkla kullanılan geometride bir liman deneyi yapılmıştır. Fiziksel model çalışmasında, dalga üreticiden itibaren yatay ilerleyip sonrasında değişken eğimle sığlaşan taban kullanılmıştır. Deneyde inşa edilen liman, 2/3 şeve sahip ana ve tali dalgakıranlardan oluşmaktadır. Dalgakıranların koruma tabakalarında taş ve beton blok elemanlar kullanılmıştır. Bu doğrultuda gerçekçi bir liman deneyi yapılması hedeflenmiştir. Deneyde liman içi çalkantı ve liman rezonansı hususlarına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. RIDE dalga modeli ile söz konusu deneyin sayısal model çalışması da yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda RIDE dalga modelinde, model sınırlarında yansıma katsayı olarak hangi değerlerin kullanılması gerektiği de belirlenmeye çalışılmıştır.

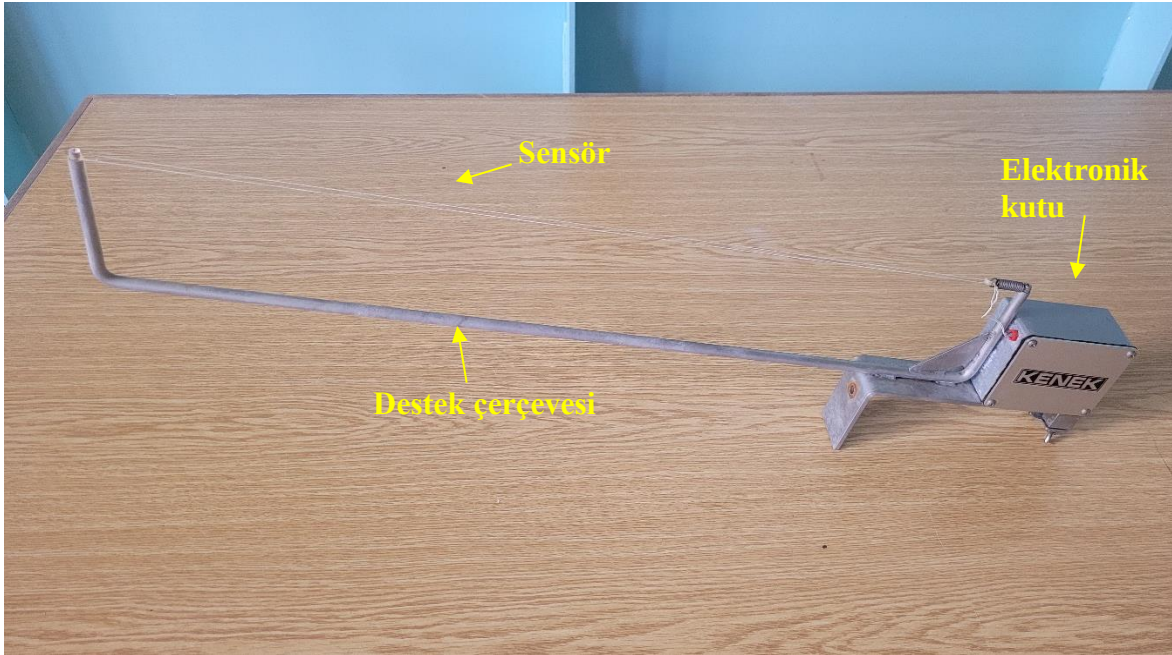
9.1. Dalga Havuzu ve Dalga Ölçüm Sistemi

Fiziksel model deneyleri Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı Hidrolik Şube Müdürlüğü dalga havuzunda (Şekil 9.1) gerçekleştirilmiştir. Hidrolik Şube Müdürlüğü bünyesinde 30 m genişliğinde 40 m uzunluğunda ve 1,2 m derinliğinde bir dalga havuzu, 0,6 m genişliğinde 40 m uzunluğunda ve 1,2 m derinliğinde bir dalga kanalı bulunmaktadır. Dalga havuzunda 56 adet pedaldan oluşan dalga üreticisi yer almaktadır. Her bir pedala güç sağlayan birer servo motor bulunmaktadır. Bu motorlar sayesinde her bir pedal birbirinden bağımsız ve farklı zamanlamalar ile çalışabilmekte ve bu sayede düzenli, düzensiz ve $\pm 30^\circ$ 'ye kadar açılı dalga üretilebilmektedir. Dalga üreticileri ile en büyük $H=25$ cm dalga yüksekliği ve $T=2$ sn. dalga periyodu üretilebilmektedir. Daha küçük dalga yükseklikleri ile daha büyük periyotlu dalgalar da oluşturulabilmektedir.



Şekil 9.1. Dalga havuzunun görünümü

Laboratuvarda kapasitans tipinde dalga ölçerler bulunmaktadır. Dalga ölçer, sensörün kendisi ve sensöre uygun bir sinyal ileten elektronik kutu olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Sensör, bir destek çerçevesi tarafından dikey konumda gergin tutulan ince bir yalıtımlı telden oluşmaktadır. İki telin arasında değişen su seviyesi kullanıcı tarafından belirlenen milisaniye aralıklar ile ölçülmektedir. Dalga ölçerin ölçüm sırasında dik şekilde suyun içine batırılmış olması gerekmektedir.



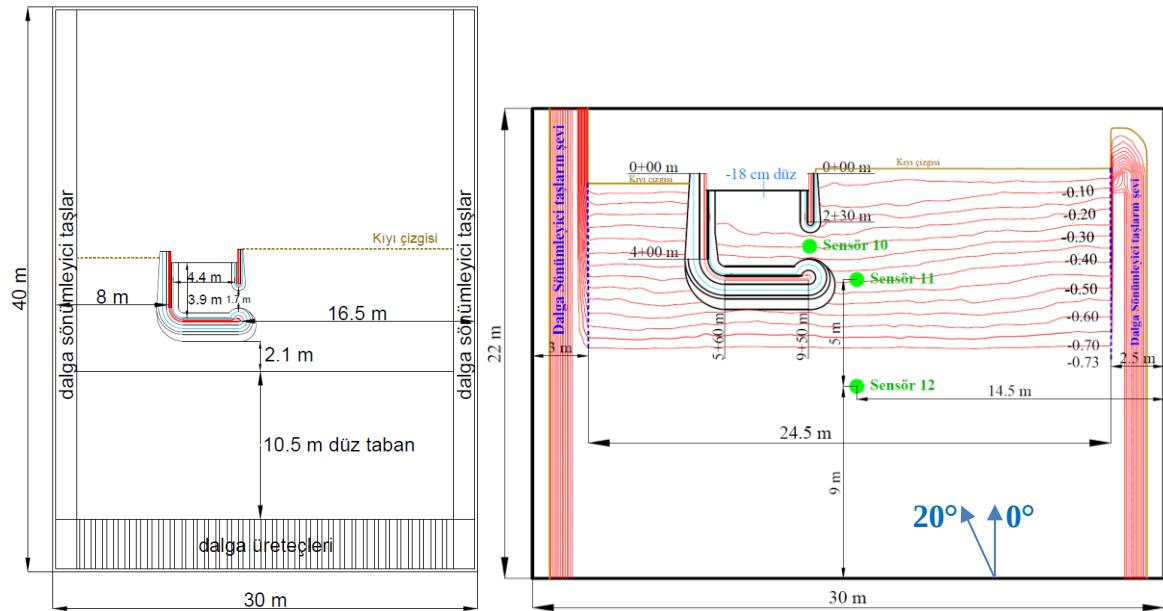
Şekil 9.2. Dalga ölçer sensörü ve elektronik kutu

9.2. Deney Düzenegi

Dalga havuzu içerisinde, dalga üreticilerinden itibaren 10,5 m düz tabandan sonra yaklaşık 1/11 eğim ile sığlaşan taban üzerine ana dalgakıran uzunluğu 9,5 m, tali dalgakıran uzunluğu 2,3 m olan bir liman (Şekil 9.3) inşa edilmiştir. Açılı dalgaların da çalışabilmesi için ana

dalgakıranın aliyman (başlangıçtan kurba kadar) kısmındaki kronman duvarından sol sınıra uzaklığı 8 m, ana dalgakıran müzvarı kronman duvarından sağ sınıra uzaklığı 16,5 m olacak şekilde yerleşim yapılmıştır. Liman giriş ağzı su seviyesinden su seviyesine 1,7 m'dir. Kullanılan dalga ölçerlerin çalışırken su içerisinde bulunması gerektiğinden basen içinde tali dalgakırandan kıyıya kadar olan kısım, yaklaşık derinlik 18 cm olacak şekilde yatay hale getirilmiştir. Bu nedenle yapılan tüm çalışmalarda basenin kıyı tarafı düşey yüzeylidir. Fiziksel model deneyi çalışmalarında ana ve tali dalgakıran boyutları sabit kalmak üzere üç farklı basen içi yerleşimi kullanılarak dört ayrı deneysel çalışma yapılmıştır.

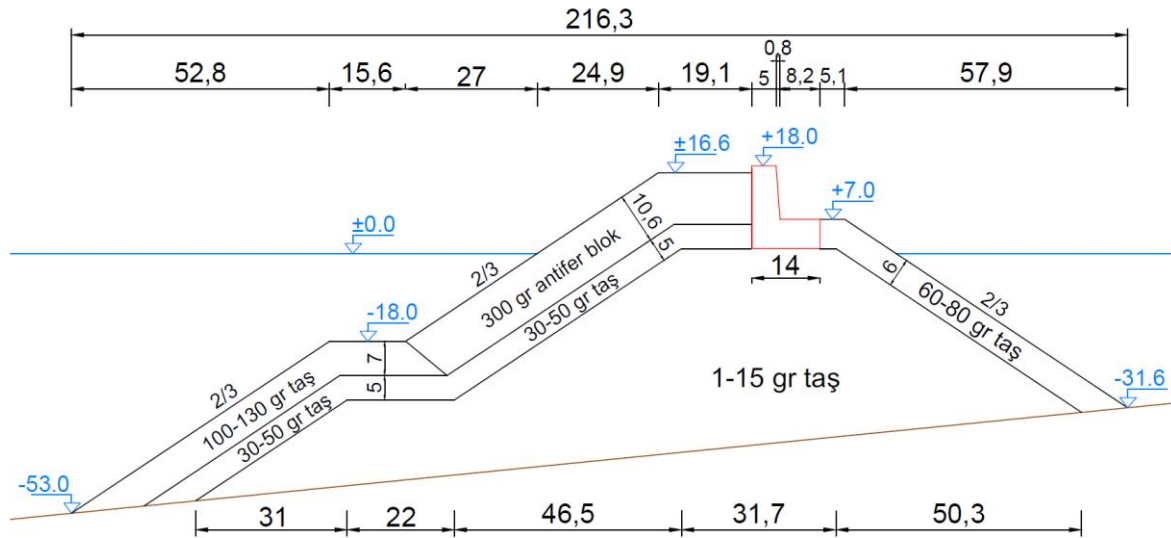
- Birinci deneyde, ana ve tali dalgakıran iç yüzeylerinin koruma tabakası (basen tarafındaki şevleri) taş olacak şekilde bir basen oluşturulmuştur.
- İkinci deneyde, 15x15x60 cm ve 15x15x90 cm boyutlarında beton bloklar kullanılarak tüm iç kenarları düşey yüzeyli bir basen oluşturulmuştur.
- Üçüncü deneyde, ikinci deneyin basen geometrisi kullanılmıştır.
- Dördüncü deneyde, basen içindeki yatay alan kapatılarak düşey yüzeyli kenarlara sahip dikdörtgen bir basen oluşturulmuştur.



Şekil 9.3. Dalga havuzu ve liman yerleşimi

Taş dolgu ana dalgakıranın kret genişliği 19,1 cm, kret kotu +16,6 cm, kronman üst kotu +18 cm, şev eğimi 2/3'tür. Dalgakıranın -18,0 cm kotunda 15,6 cm genişliğinde palyesi bulunmaktadır. Palye altındaki şev eğimi de 2/3'tür. Ana dalgakıran gövde kesiti Şekil 9.4'te

görülmektedir. Çekirdek dolgusu 1-15 gr taşlarla yapılmıştır. Filtre tabakası çekirdeğin üzerine 30-50 gr taşlar kullanılarak dizilmiştir. Ana dalgakıranda koruma tabakası olarak alıyman (başlangıçtan kurba kadar) kısmında 150-180 gr taş, müzvarda ve kurp bölgesinde 280 gr tetrapod beton bloklar, gövde (kurp ile müzvar arasında) kısmında 300 gr antifer beton bloklar kullanılmıştır. Tali dalgakıran koruma tabakasında da 150-180 gr taş kullanılmıştır. Ana dalgakıran palyesinde ise 100-130 gr taş kullanılmıştır. Ana dalgakıran ve tali dalgakıranın basen tarafı koruma tabakasında ise 60-80 gr taş kullanılmıştır. Kronman betonu 14 cm taban genişliğinde, 17 cm yüksekliğinde ve 60 cm uzunluğunda hazırlanan ahşap kalıplarla üretilmiştir. Çalışmada su derinliği 73 cm'dir. Deneyler esnasında dalgakıranın hasar görmemesi için ana dalgakıran kırılmayan dalga koşullarına göre tasarlanmıştır. 73 cm su derinliğinde ana dalgakıran için kırılmayan dalga koşulu geçerlidir. Deneyler esnasında havuzun dışına su taşmaması için gerek optimal su derinliği aralığı da 70-80 cm'dir. Ayrıca basen içerisinde dalga aşması sonucunda oluşabilecek ek çalkantı durumlarının yaşanmaması için kret yüksekliği +18 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 9.4. Ana dalgakıran kesiti (ölçüler cm'dir)

Deney düzeneğine ana dalgakıranın yapımı ile başlanmıştır. Çekirdek malzemesi eğimli taban üzerinde dalgakıran aksı boyunca serilmiş ardından 2/3 şev oluşturacak biçimde düzeltilmiştir. Ana dalgakıran gövde ve palye çekirdeği yerleştirildikten sonra filtre tabakası serilmiştir. Filtre tabakası ile birlikte dalgakıran basen tarafı şevinin koruma tabakası taşları da dizilmiştir. Sonrasında müzvardan başlanarak koruma tabakası beton blok elemanları çift sıra oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Ana dalgakıran kesit yerleşimi aşamalarına ait

görseller Şekil 9.5'te görülmektedir. Kesit oluşturma aşamasına ait farklı açılardan görünümüler ayrıca EK-1de sunulmuştur. Ana dalgakıran tamamlandıktan sonra basen içinde tali dalgakıranın başlangıcından müzvarına kadar olan kısımdaki eğim taranarak düzleştirilmiştir (Şekil 9.6). Ardından tali dalgakıran inşa edilerek sensör yerleşimi yapılmıştır (Şekil 9.7). Bir adet sensör hareket motoru ile birlikte beş kg ağırlığa ulaşmaktadır. Bu nedenle üç ayaklı taşıyıcılara monte edilmeleri gerekmektedir. Taşıyıcı ayaklarının basen içerisindeki dalga hareketine etki etmemesi için kronman duvarı ile kıyı arasına 6 m uzunluğunda I profil çelik kirişler yerleştirilmiş ve sensörler motorları ile birlikte bu profillere işkenceler kullanılarak monte edilmiştir. Bu sayede basen içinde suya sensörlerden başka temas eden bir eleman bulunmaması sağlanmıştır (Şekil 9.8). Basen içinde 1. ve 2. deneylerde dokuz adet, 3. deneyde altı adet ve 4. deneyde yedi adet sensör kullanılmıştır. Bunların dışında dalga üreticilerinden doğru dalga yüksekliği ve periyodu üretildiğinin kontrolü için basen giriş ağzında bir adet ve basen dışında iki adet sensör daha kullanılmıştır. Bu üç sensörün konumu her deneyde sabit tutulmuştur. Tüm deney düzeneği hazırlandıktan sonra bir hafta boyunca, farklı dalga yüksekliğine ve periyoduna sahip düzenli, düzensiz ve açılı dalgalar kullanılarak eğimli tabanın ve dalgakıranların oturmalarının tamamlanması beklenmiştir. Sonrasında tüm çalışma alanının kotları dalgakıranlar dâhil olmak üzere lazer seviye tespit cihazı ile ölçülmüştür. Bu sayede sayısal modellemede havuzdaki kotların olabildiğince benzeştirilmesi sağlanmıştır.



a)



b)



c)



d)



e)

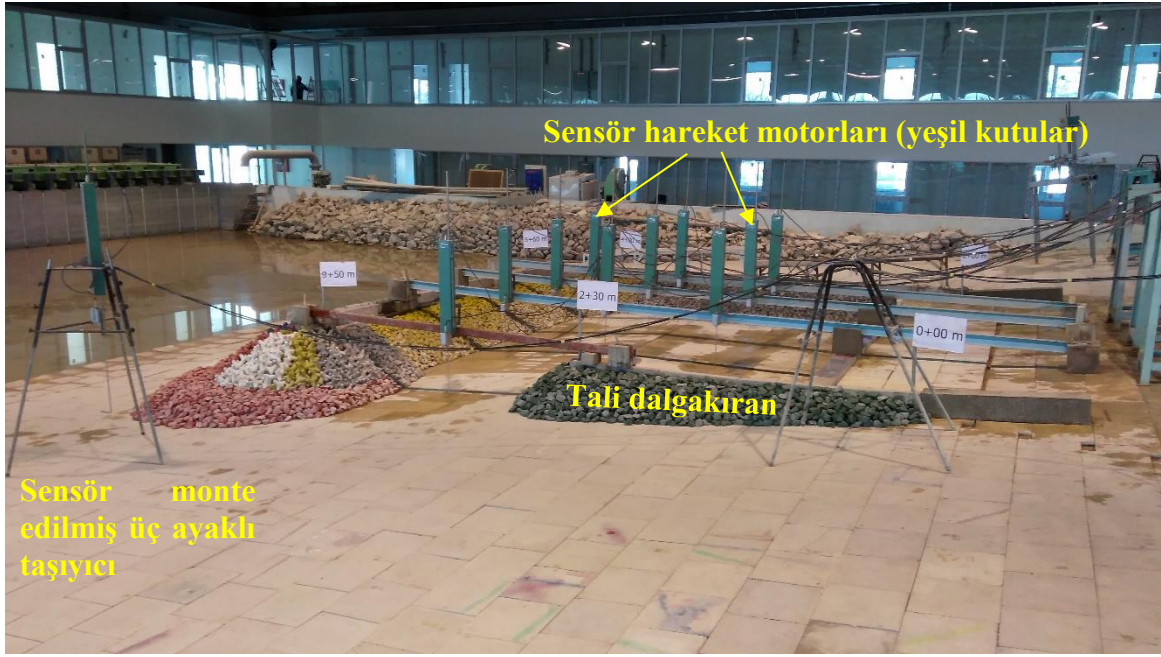


f)

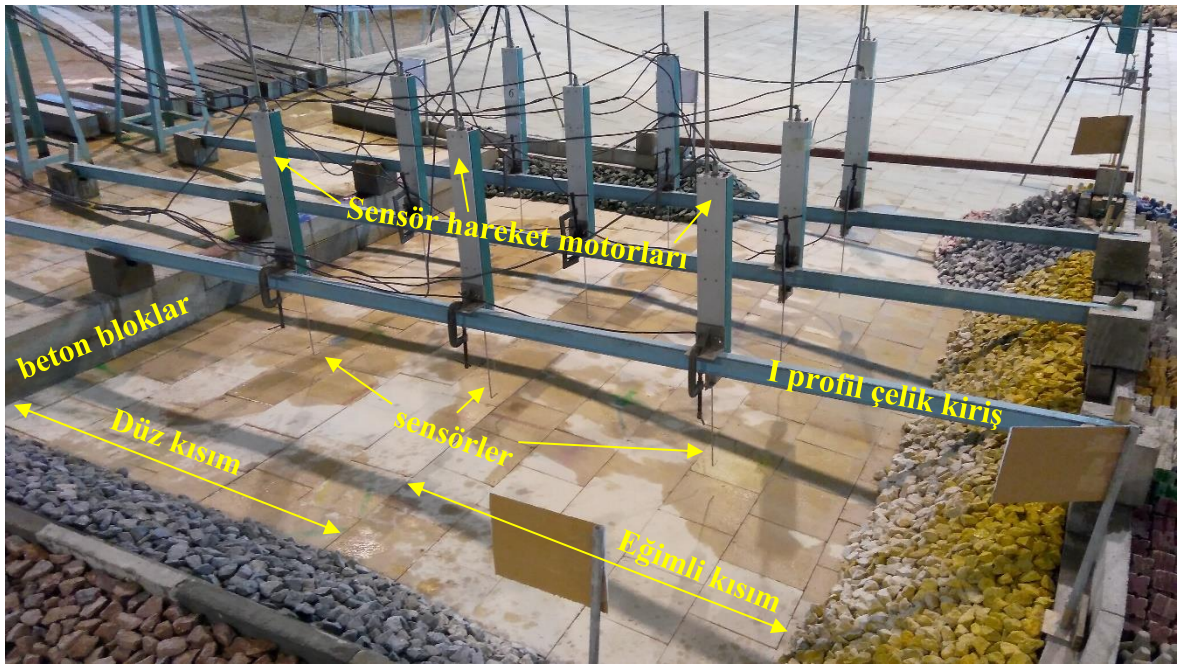
Şekil 9.5. Ana dalgakıran kesiti yapım aşamaları a) Gövde ve müzvar çekirdeğinin yerleştirilmesi b) Kurp ve alıyman çekirdeğinin yerleştirilmesi c) Palye çekirdeğinin yerleştirilmesi d) Filtre tabakası ve basen tarafı koruma tabakasının yerleştirilmesi e) Gövde koruma tabakasının dizilmesi f) Ana dalgakıranın tamamlanması.



Şekil 9.6. Basen içinde düzleştirilen kısım ve basenin kıyı sınırına 15x15x60 cm boyutlarında düşey yüzeyli beton blokların yerleştirilmesi



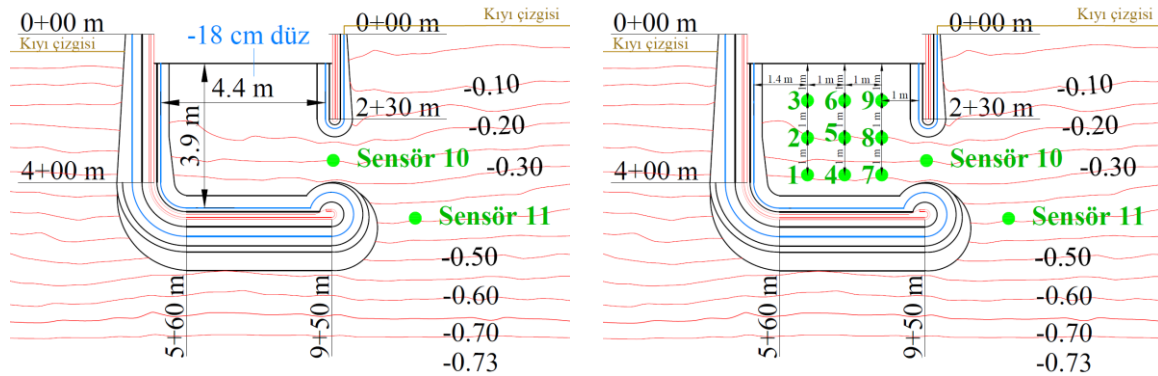
Şekil 9.7. Tali dalgakıran ve sensörlerin görünümü



Şekil 9.8. Basen içindeki sensör yerleşim düzeneği

9.3. Birinci Deney

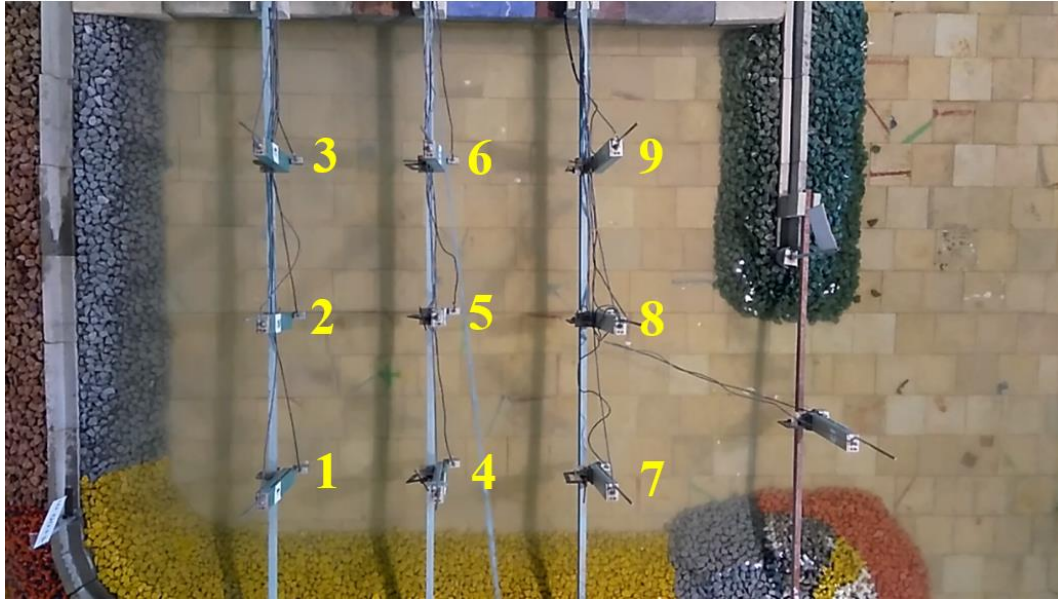
Fiziksel model çalışmasının birinci deneyinde, basen içi boyutları su seviyesinden su seviyesine uzunluğu 4,4 m, genişliği 3,9 m olan liman geometrisi kullanılmıştır (Şekil 9.9). Kıyıdaki yansıma sınırı düşey yüzeyli, dalgakıranlardaki yansıma sınırları ise 2/3 şevli taş yüzeylerdir. Birinci deneyde basen içerisinde dokuz adet sensör kullanılmıştır. Sensörlerin aralıkları tali dalgakırandan başlayarak yatayda ve düşeyde bir metre olacak şekilde yerleşim yapılmıştır. Sensör yerleşiminin deneydeki görünümü Şekil 9.10'da görülmektedir. Çalışmada $H=10$ cm dalga yüksekliği sabit tutularak $T=0,96$ sn, $T=1,04$ sn, $T=1,15$ sn, $T=1,30$ sn ve $T=1,56$ sn olmak üzere 5 ayrı dalga periyodu kullanılmıştır. Ayrıca beş farklı periyotlu dalga, dik ve 20° açılı şekilde üretilerek toplamda on ayrı dalga durumu test edilmiştir. Dalga periyotlarındaki seçim farklı dikliğe sahip dalga davranışının belirlenmesi amacını taşımaktadır. Bu doğrultuda, 0,73 cm su derinliği için dalga boyları hesaplanarak dalga dikliği 0,03-0,07 arasında olacak periyotlar belirlenmiştir (Çizelge 9.1). Deneylerde dalga üretici çalışmaya başladığı andan 5 dakika sonra kayıt alınmaya başlanmış ve her bir dalga için 20'şer dakikadan oluşan kayıtlar alınmıştır.



Şekil 9.9. Birinci deney liman geometrisi ve sensör yerleşimi

Çizelge 9.1. Birinci deneyde kullanılan dalga periyotları ve dalga diklikleri

H (m)	T (sn)	0,73 m'de dalga boyu (L) (m)	Dalga dikliği (H/L)
0,1	0,96	1,44	0,07
0,1	1,04	1,67	0,06
0,1	1,15	2,02	0,05
0,1	1,30	2,51	0,04
0,1	1,56	3,34	0,03



Şekil 9.10. Birinci deneyde sensörlerin yerleşimi

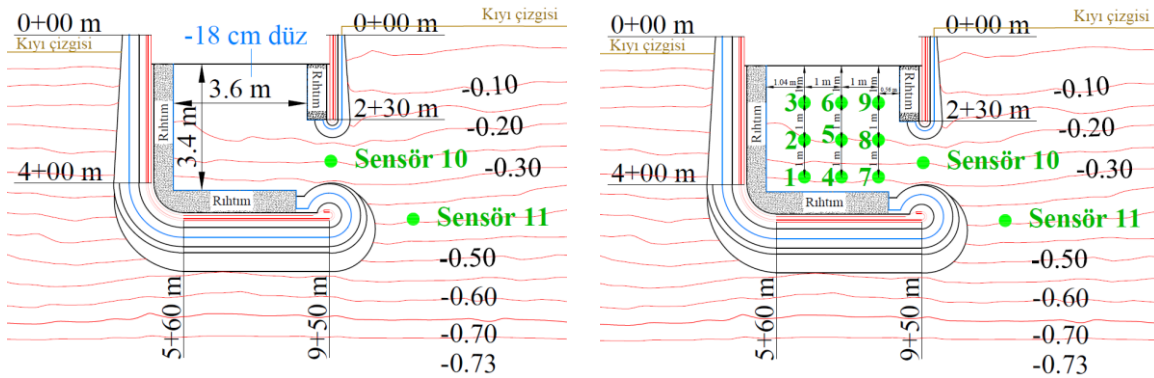
Birinci deney sonucunda basen içindeki dokuz adet sensörün ölçüm sonuçları Çizelge 9.2’de verilmiştir. 20° açılı dalga ile yapılan çalışmada 0° açılı dalga ile yapılan çalışmaya göre % 30 daha yüksek dalga yükseklikleri ölçülmüştür.

Çizelge 9.2. Birinci deneyde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

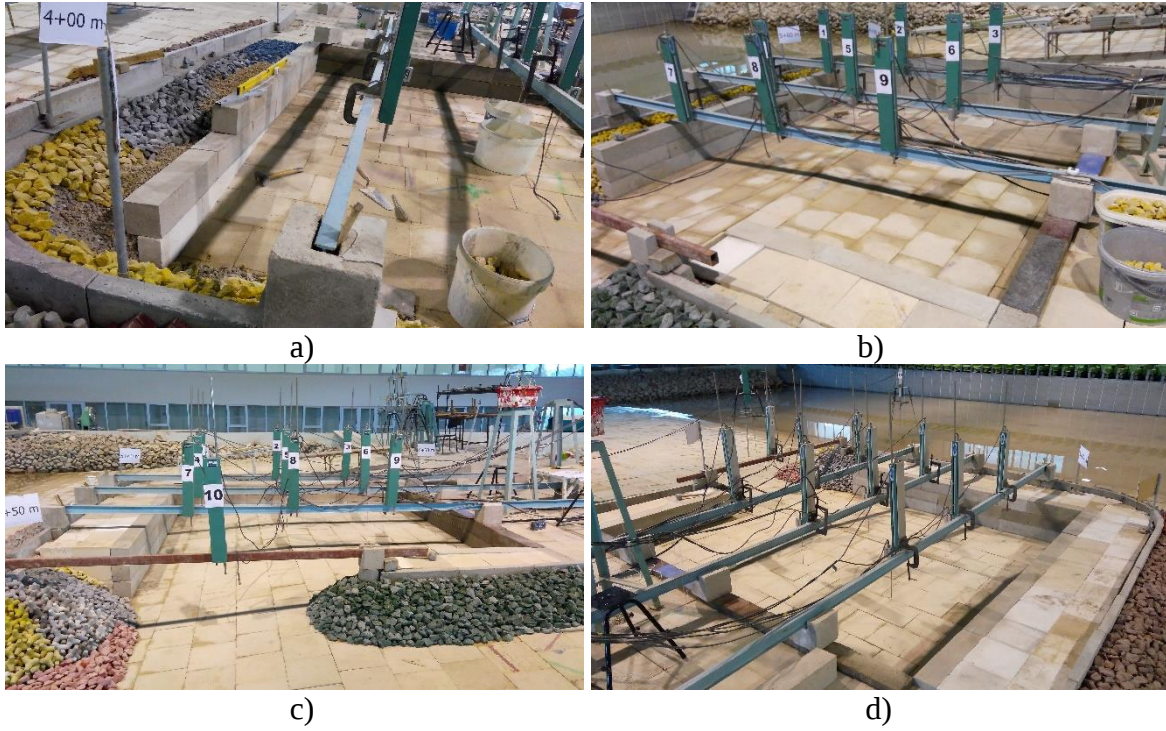
Periyot	Sensör No								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T=0,96 sn (açı:0°)	1,318	1,569	1,902	1,584	2,098	1,173	1,839	1,813	1,849
T=1,04 sn (açı:0°)	1,248	1,457	1,919	1,513	1,518	1,533	2,389	2,046	1,290
T=1,15 sn (açı:0°)	1,651	2,039	2,220	2,028	2,123	2,551	2,448	2,110	1,411
T=1,30 sn (açı:0°)	1,620	2,795	2,694	2,091	2,571	3,239	2,647	1,829	2,245
T=1,56 sn (açı:0°)	1,713	1,855	1,111	1,389	1,290	1,730	1,991	2,348	2,692
T=0,96 sn (açı:20°)	2,071	1,816	3,924	2,214	3,298	2,827	2,414	3,109	2,876
T=1,04 sn (açı:20°)	2,618	3,272	4,578	1,767	2,161	4,417	3,721	3,717	2,468
T=1,15 sn (açı:20°)	2,875	3,273	4,343	3,409	3,355	4,355	3,971	2,612	3,380
T=1,30 sn (açı:20°)	2,426	3,639	4,245	2,762	3,160	4,461	2,753	2,356	2,956
T=1,56 sn (açı:20°)	2,092	3,116	1,439	2,387	2,735	2,504	2,401	3,829	4,859

9.4. İkinci Deney

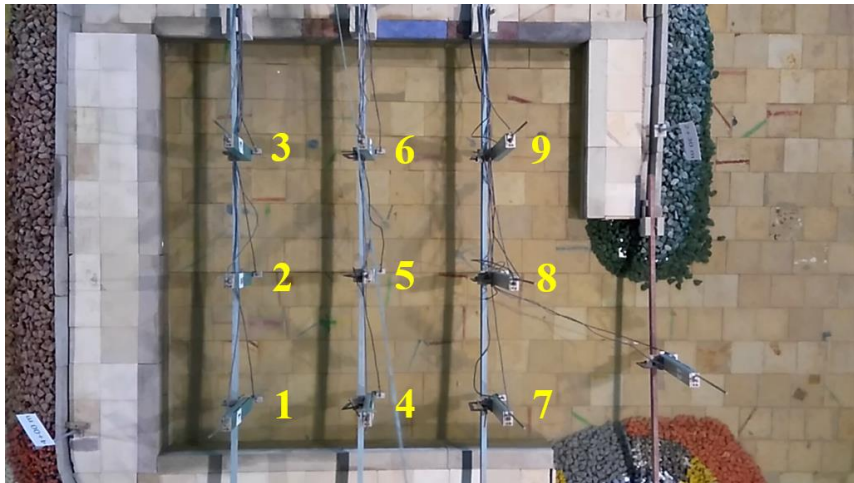
Fiziksel model çalışmasının ikinci deneyinde, basen içi boyutları su seviyesinden su seviyesine, uzunluğu 3,6 m, genişliği 3,4 m olan liman geometrisi kullanılmıştır (Şekil 9.11). Basen içindeki tüm yüzeyler 15x15x60 cm ve 15x15x90 cm boyutlarında beton bloklar kullanılarak düşey yüzeyli hale getirilmiştir (Şekil 9.12). Bu şekilde basen içinde dört taraflı rıhtım olması durumu oluşturulmuştur. Beton bloklar 2/3 şevli kısımların önüne üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Ardından kronman duvarı ile beton bloklar arasında kalan boşluk çekirdek malzemesi ile doldurulmuş ve üzeri karo taşları ile kapatılmıştır. İkinci deneyde de dokuz adet sensör kullanılmıştır. Birinci deneydeki sensör yerleri değiştirilmeden ölçümler yapılmıştır. Sensör yerleşiminin ikinci deneydeki görünümü Şekil 9.13'te görülmektedir. Birinci deneyde kullanılan dalga yüksekliği, dalga periyodu ve dalga açısı (Çizelge 9.1) değiştirilmeden ikinci deneyde de kullanılmıştır. Birinci deneyde olduğu gibi toplamda on ayrı dalga durumu test edilmiştir. Deneylerde dalga üretici çalışmaya başladığı andan 5 dakika sonra kayıt alınmaya başlanmış ve her bir dalga için 20'şer dakikadan oluşan kayıtlar alınmıştır.



Şekil 9.11. İkinci deneyde liman geometrisi ve sensör yerleşimi



Şekil 9.12. Düşey yüzeyli yansıma sınırlarının oluşturulması aşamaları a) Aliyman kısmındaki rıhtımın yapımı b) Gövde kısmındaki rıhtımın yapımı c) Tamamlanan rıhtımların giriş ağzı tarafından görünümü d) Tamamlanan rıhtımların kıyı tarafından görünümü



Şekil 9.13. İkinci deneyde sensörlerin yerleşimi

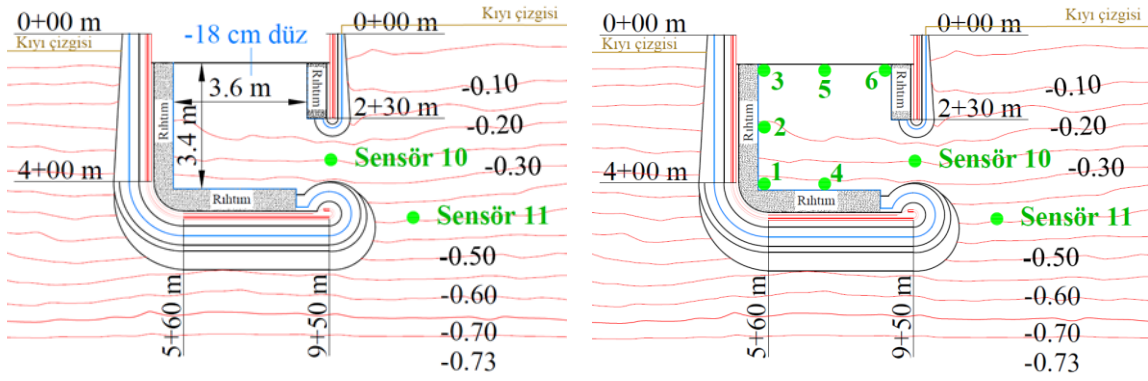
İkinci deney sonucunda basen içindeki dokuz adet sensörün ölçüm sonuçları Çizelge 9.3'te verilmiştir. 20° açılı dalga ile yapılan çalışmada, 0° açılı dalga ile yapılan çalışmaya göre % 52 daha yüksek dalga yükseklikleri ölçülmüştür. Basen içerisindeki yansıma sınırlarının düşey yüzeyli hale getirilmesi ile birinci deneye göre %68 daha yüksek dalga yükseklikleri ölçülmüştür.

Çizelge 9.3. İkinci deneyde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

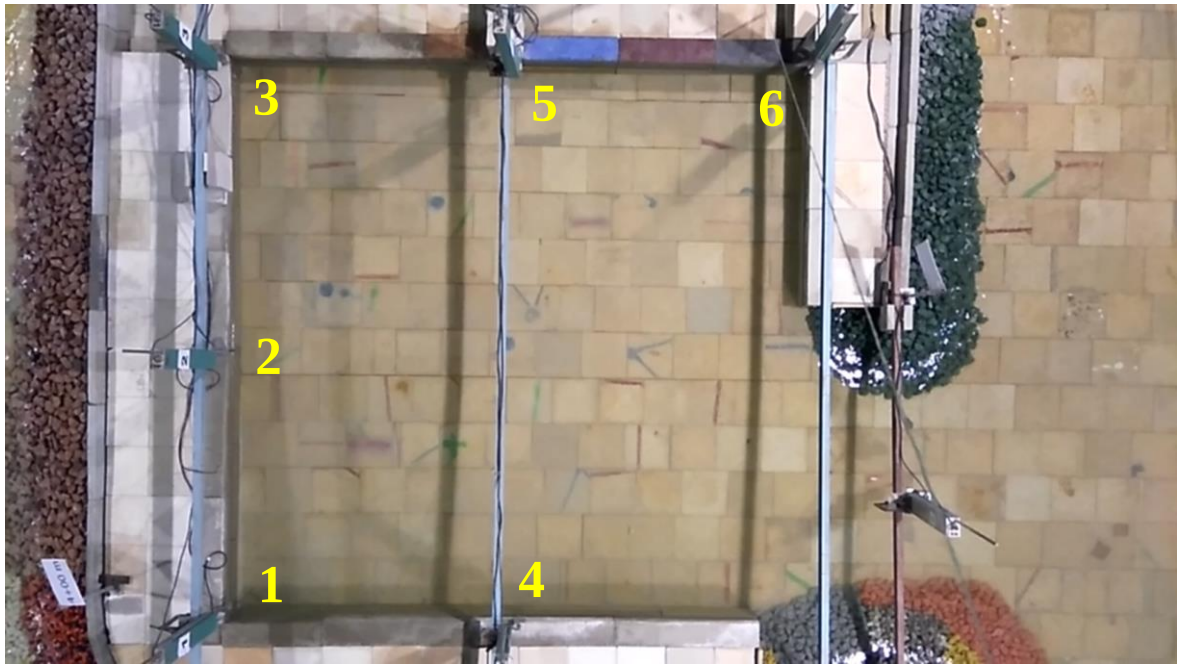
Periyot	Sensör No								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T=0,96 sn (açı:0°)	2,283	2,556	3,529	2,363	2,823	2,414	2,086	2,116	3,190
T=1,04 sn (açı:0°)	2,041	2,548	3,350	2,176	3,203	2,600	1,969	2,859	2,343
T=1,15 sn (açı:0°)	1,807	4,872	3,994	2,215	3,526	4,010	3,239	2,049	3,737
T=1,30 sn (açı:0°)	2,445	3,251	4,075	2,543	2,782	2,714	3,519	2,644	3,002
T=1,56 sn (açı:0°)	4,444	3,818	3,154	3,584	3,955	4,884	5,149	4,106	2,813
T=0,96 sn (açı:20°)	4,902	4,294	7,469	5,977	5,338	5,330	3,142	3,239	6,777
T=1,04 sn (açı:20°)	2,779	5,530	6,979	3,157	6,490	5,249	3,922	6,116	4,647
T=1,15 sn (açı:20°)	3,331	8,459	8,065	4,399	7,748	8,566	5,668	4,344	9,454
T=1,30 sn (açı:20°)	2,995	4,903	6,726	4,329	4,128	3,619	5,784	5,330	6,581
T=1,56 sn (açı:20°)	4,479	5,256	3,888	4,093	4,149	5,589	7,351	5,346	3,993

9.5. Üçüncü Deney

Fiziksel model çalışmasının üçüncü deneyinde, basen içi boyutları su seviyesinden su seviyesine, uzunluğu 3,6 m, genişliği 3,4 m olan liman geometrisi (ikinci deney ile aynı basen geometrisi) kullanılmıştır (Şekil 9.14). Üçüncü deneyde basen köşelerine ve kenarların ortalarına denk gelecek şekilde altı adet sensör kullanılmıştır. Sensör yerleşiminin üçüncü deneydeki görünümü Şekil 9.15'te görülmektedir. Üçüncü deneyde liman rezonansı çalışması yapılmıştır. Basenin en ve boy ölçüleri birbirine çok yakın olduğundan üçüncü deney kare liman rezonans çalışması olarak adlandırılmıştır. Deneyde $H=2$ cm dalga yüksekliği sabit tutularak 1,7-35 sn aralığında 80 farklı dalga kullanılmıştır. Kare liman rezonansı deneyi sonucunda basen içindeki altı adet sensörün ölçüm sonuçları EK-2'de verilmiştir.



Şekil 9.14. Üçüncü deneyde liman geometrisi ve sensör yerleşimi

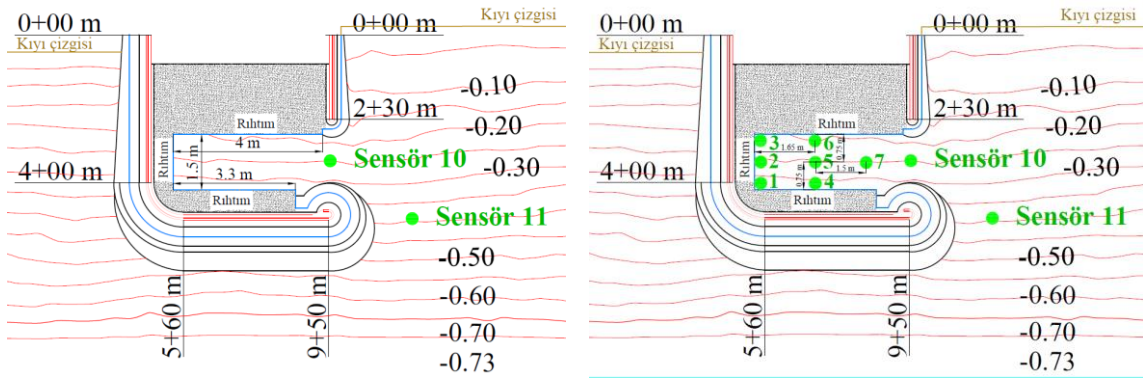


Şekil 9.15. Üçüncü deneyde sensörlerin yerleşimi

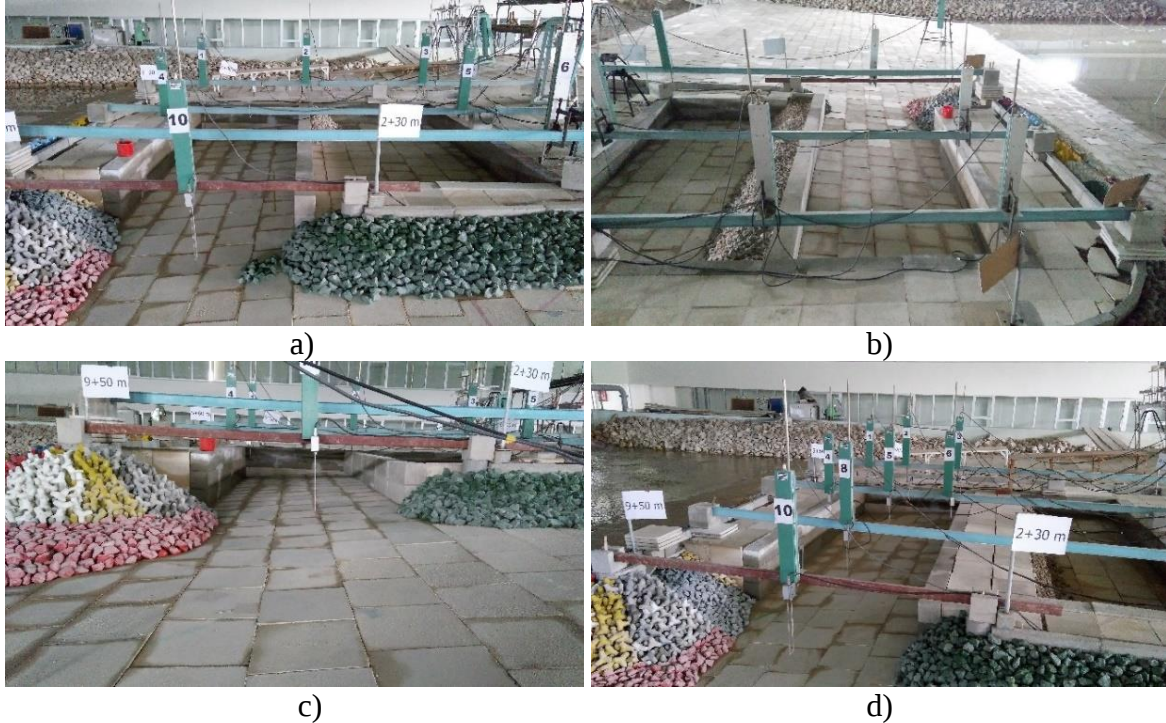
9.6. Dördüncü Deney

Fiziksel model çalışmasının dördüncü deneyinde, basen içi boyutları su seviyesinden su seviyesine, uzunluğu 3,3 m, genişliği 1,5 m olan liman geometrisi kullanılmıştır (Şekil 9.16). Basen içindeki 1,9 m genişliğindeki düz kısım kapatılarak uzunluğu genişliğin yaklaşık iki katı olan bir dikdörtgen basen oluşturulmuştur. 15x15x60 cm ve 15x15x90 cm beton bloklar ile kare basen, düz kısmın başladığı hattan itibaren ikiye ayrılmıştır. Ardından beton blokların arkası çekirdek malzemesi ile doldurulmuş ve üzeri karo taşları ile kapatılmıştır (Şekil 9.17). Dördüncü deneyde basen köşelerine ve kenarların ortalarına denk gelecek şekilde yedi adet sensör kullanılmıştır. Sensör yerleşiminin dördüncü deneydeki görünümü

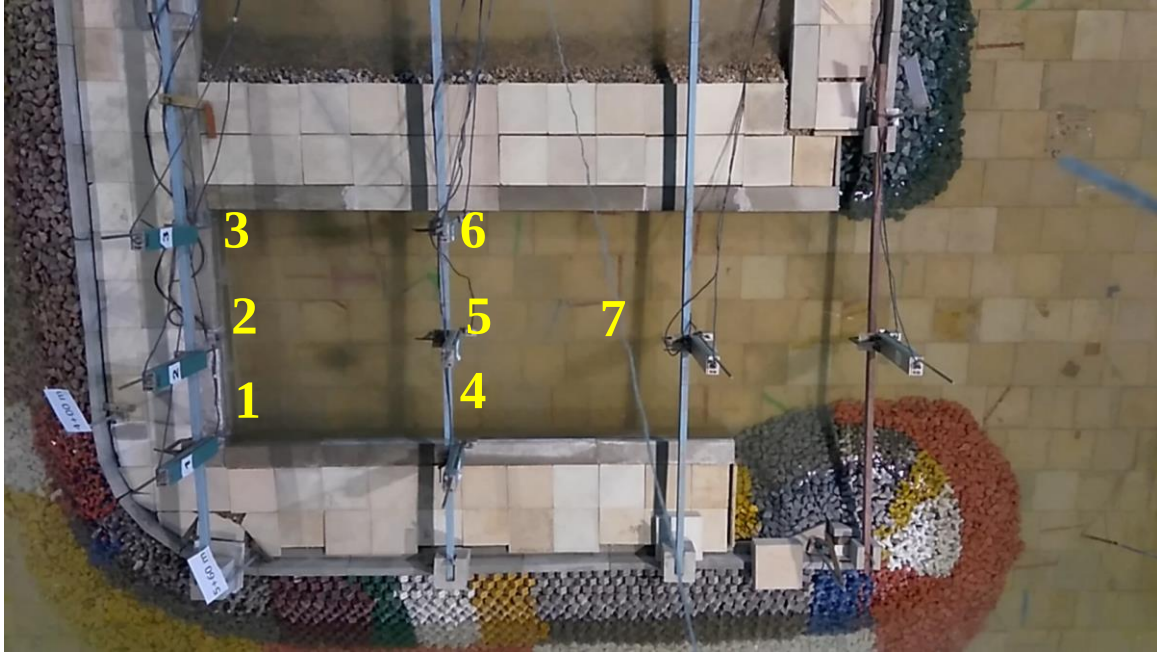
Şekil 9.18’de görülmektedir. Dördüncü deneyde, üçüncü deneyde olduğu gibi liman rezonansı çalışması yapılmıştır. Basenin en ve boy ölçüleri dikkate alınarak dördüncü deney dikdörtgen liman rezonans çalışması olarak adlandırılmıştır. Deneyde $H=2$ cm dalga yüksekliği sabit tutularak 1,5-25 sn aralığında 78 farklı dalga kullanılmıştır. Dikdörtgen liman rezonansı deneyi sonucunda basen içindeki yedi adet sensörün ölçüm sonuçları EK-2’de verilmiştir.



Şekil 9.16. Dördüncü deneyde liman geometrisi ve sensör yerleşimi



Şekil 9.17. Dikdörtgen liman basenini oluşturulması aşamaları a) Düz kısmın başladığı hatta beton blokların yerleştirilmesi b) Beton blokların arkasına çekirdek malzemesi ile dolgu yapılması c) Tamamlanan basenin giriş ağzı tarafından görünümü d) Tamamlanan basen ve sensörlerin görünümü



Şekil 9.18. Dördüncü deneyde sensörlerin yerleşimi

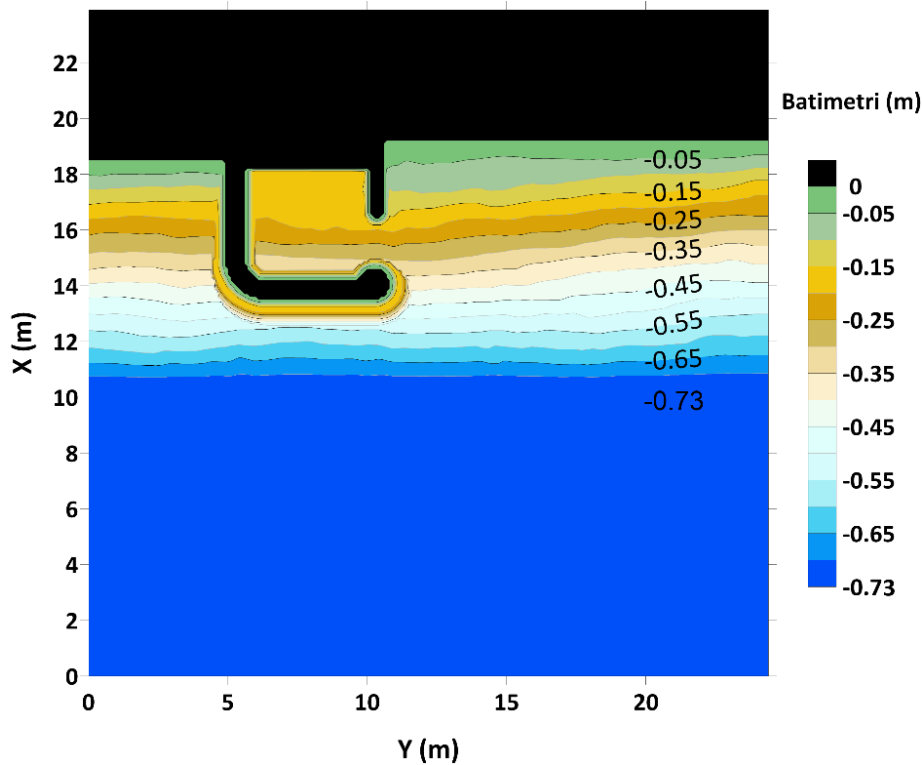
9.7. Birinci Fiziksel Model Deneyinin RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması

Birinci fiziksel model deneyinde kullanılan en küçük dalga periyodu $T=0,96$ sn'dir. RIDE dalga modelinde, model stabilite koşulu olarak çözüm ağı uzunluğunun dalga boyunun $1/10$ değerinde olması önerilmektedir [7]. Bu doğrultuda dalga üreticinin bulunduğu derinlikte (0,73 m) $T=0,96$ sn dalga periyoduna göre dalga boyu $L=1,44$ m olarak hesaplanmaktadır. Buna göre çözüm ağı uzunluğunun 0,14 m olması yeterlidir. Liman geometrisinin daha detaylı benzeştirilebilmesi için çözüm ağı uzunluğu 0,10 m olarak seçilmiş ve tüm sayısal modellemelerde bu değerde kullanılmıştır. Fiziksel model deneyindeki sınır koşulları $2/3$ eğimli taş yüzey, düşey yüzey (rıhtım), yaklaşık $1/11$ eğimli yüzey (kıyı çizgisi) ve yan kenarlar şeklindedir. Sayısal modelde sınır koşullarında dikkate alınacak yansımalar katsayıları, her yüzey için farklılık göstermektedir. Yansımalar yüzeylerinden geri dönecek (yansıyacak) dalga oranları için Şekil 6.19'da [58] önerilen aralıklar, fiziksel model deneyinde kullanılan yansımalar yüzeyleri için Çizelge 9.4'de görülmektedir. Buna göre, düşey yüzeyler için $r=0,8-1,0$, $2/3$ eğimli taş yüzeyler için $r=0,2-0,6$ ve kıyı çizgisi için $r=0,05-0,2$ aralıkları önerilmektedir. Bu doğrultuda birinci deney için sayısal modelde basen içindeki düşey yüzeyli sınırın yansımalar katsayısı $r=1,0$ değerinde sabit tutularak, taş yüzeylerin yansımalar katsayıları $r=0,2-0,6$ arasında 0,05 aralığa ayrılıp dokuz durum için RIDE dalga modelinde çalışılmıştır. Kıyı çizgisinin yansımalar katsayısı tüm deneylerde $r=0,1$ olarak kullanılmıştır.

Çizelge 9.4. Deneyde kullanılan yansımaya yüzeylerinin literatürde [58] önerilen aralıkları

Yüzey	Yansımaya katsayısı aralığı
Su üzerine çıkan rıhtım	0,8-1,0
Taş ve beton blok koruma tabakasına sahip 2/3 eğimde geçirimli dalgakıran	0,2-0,6
Kıyı	0,05-0,2

RIDE dalga modelinde birinci deney için hazırlanan çalışma alanı Şekil 9.19’da görülmektedir. Sayısal modelde sol ve sağ kenarlar geçirimli (yansımaya yok) sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. RIDE dalga modelinde deniz tabanının kum veya geçirimli olması durumları için taban sürtünme faktörü kullanılabilmektedir. Fiziksel model deneylerinde havuz tabanı beton ve 30x30 cm boyutlarında karo taşları ile teşkil edilmiştir. Fiziksel model çalışmaları hareketsiz tabana sahiptir. Bu nedenle sayısal modelde, havuz tabanı kaynaklı enerji kayıpları çalışmaya dahil edilmemiştir. Fiziksel model deneyinde dalga kırılma derinliğinin dalga periyoduna göre 11-14 cm arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu derinliklerde ölçüm alabilecek sensör bulunmadığından dalga yüksekliği ölçülememiştir. Dolayısıyla kırılma indeksi de hesaplanamamıştır. Bu nedenle sayısal modelde kırılma indeksi 0,78 kabul edilerek dalga kırılma kaynaklı enerji kayıpları çalışmaya dahil edilmiştir.



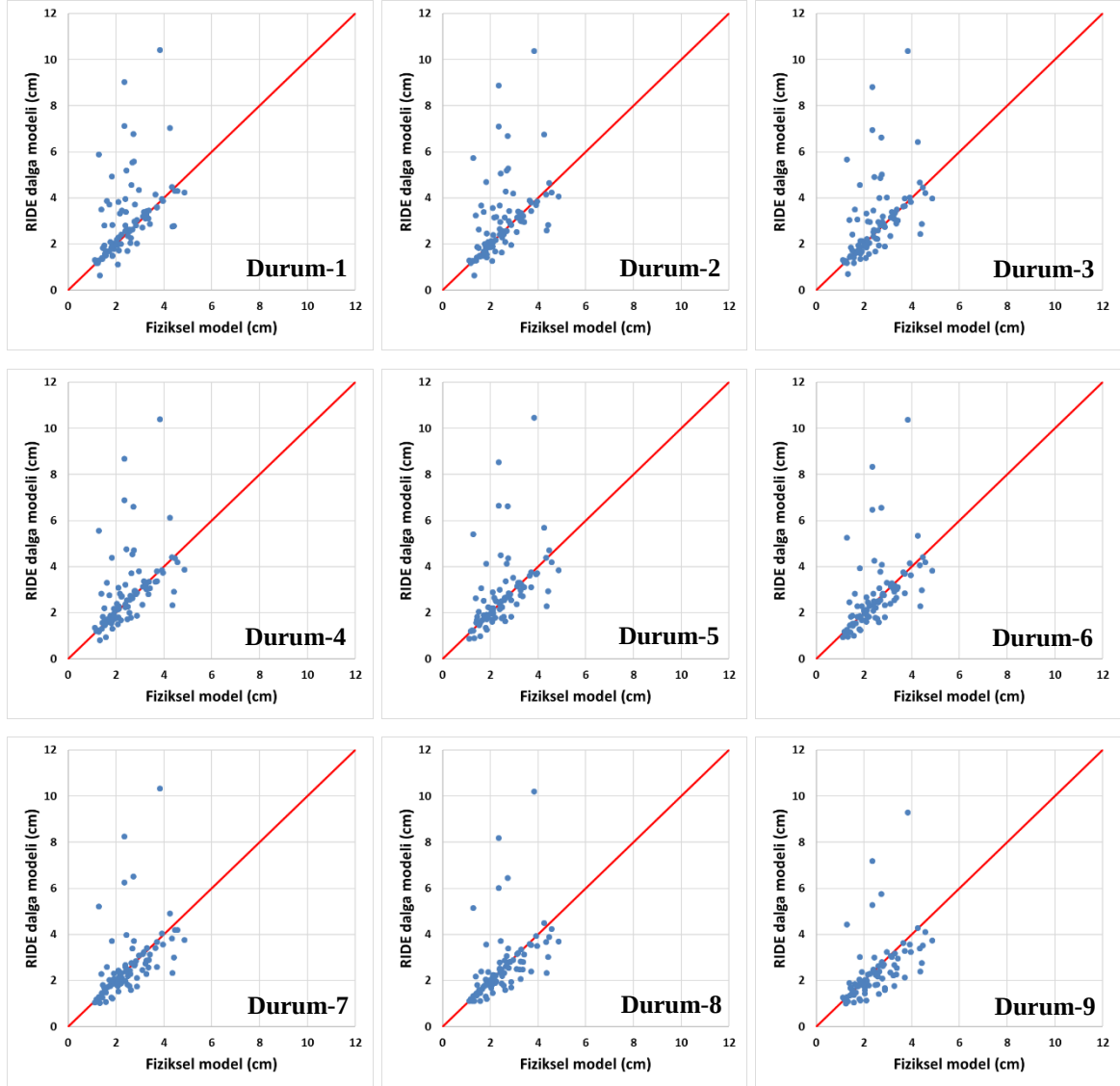
Şekil 9.19. Birinci deney için RIDE dalga modeli çalışma alanı

Dokuz durum için RIDE dalga modeli ile yapılan çalışma sonuçları ile basen içindeki dokuz sensörün ölçümlerinin istatistiki karşılaştırması Çizelge 9.5'te sunulmuştur.

Çizelge 9.5. Birinci deney ile RIDE dalga modeli sonuçlarının karşılaştırılması

	Taş yüzey yansım katsayısı	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)	Dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması (cm)
Durum-1	0,60	1,61	72,76	0,86	37,71	0,59	56,21	45,55	3,09
Durum-2	0,55	1,54	68,88	0,82	35,43	0,50	57,72	46,51	3,00
Durum-3	0,50	1,48	66,09	0,77	33,12	0,44	59,83	48,50	2,94
Durum-4	0,45	1,43	63,31	0,73	31,51	0,37	60,21	47,86	2,88
Durum-5	0,40	1,38	60,22	0,69	29,32	0,30	61,75	49,01	2,80
Durum-6	0,35	1,33	57,43	0,66	27,54	0,21	63,13	49,94	2,72
Durum-7	0,30	1,29	55,42	0,63	26,05	0,15	63,11	48,87	2,66
Durum-8	0,25	1,27	53,96	0,61	24,71	0,10	63,38	48,29	2,60
Durum-9	0,20	1,24	52,10	0,61	24,52	0,05	63,41	48,32	2,55

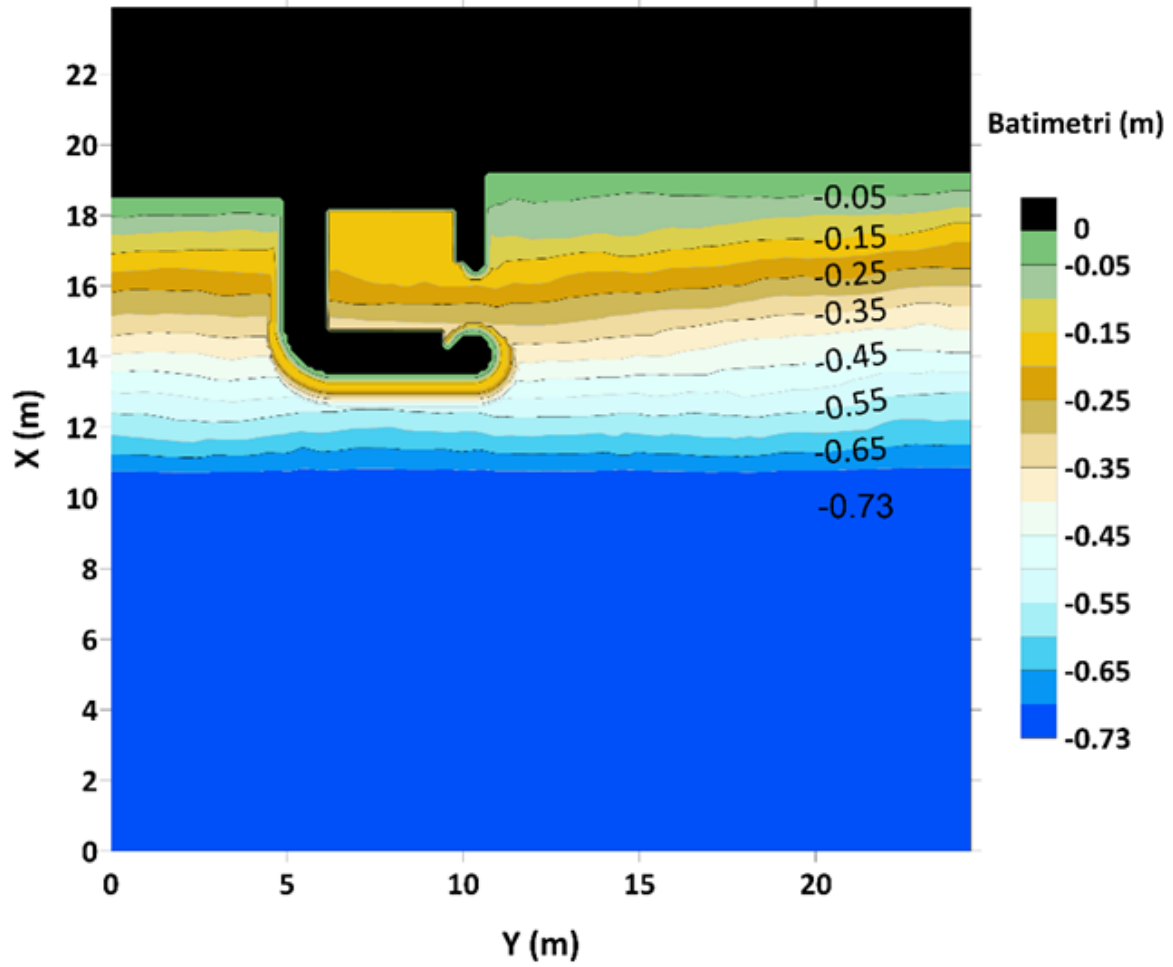
Sayısal model sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri Şekil 9.20'de görülmektedir. Taş yüzeylerin yansım katsayısı $r=0,6$ olarak uygulandığında deney sonuçları ile %37,7 yüzde ortalama gerçek hata oluşmaktadır. Yüzde kök ortalama kare hatası ise %72,76 seviyesindedir. Hatanın yüksek olmasının sebebi dağılım grafiklerinden görülmektedir. Fiziksel model deneyinde basen içerisinde ölçülen en büyük dalga yüksekliği 4,86 cm'dir. Sayısal modelde ise bu değer yansım katsayısı $r=0,6$ için 10,41 cm'dir. Sayısal modelde yansım katsayısı 0,6 için beş cm üzeri dokuz adet, yansım katsayısı $r=0,2$ için dört adet dalga yüksekliği elde edilmiştir. Bu doğrultuda, RIDE dalga modelinde yansım katsayısı azaldıkça hata yüzdesi de azalmaktadır. Yansım katsayısının $r=0,2$ olduğu durumda (Durum-9), %24,50 yüzde ortalama gerçek hata, %52,1 yüzde kök ortalama kare hatası ve %63,4 uyum indeksi ile fiziksel model deneylerine en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Birinci deney sonucunda basen içindeki dokuz adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 2,50 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 2,55 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,20$ yansım katsayısı ile ulaşılmıştır. Yansım katsayısının $r=0,25$ ve $r=0,3$ değerlerini aldığı Durum-7 ve Durum-8 sonuçlarının, Durum-9 sonuçlarına yakın olduğu görülmüştür. Tüm karşılaştırmalar incelendiğinde RIDE dalga modelinde, 2/3 eğimli taş yüzeylerde yansım katsayısı için $r=0,2 \sim 0,3$ aralığının kullanılabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 9.20. RIDE dalga modeli ile birinci fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri

9.8. İkinci Fiziksel Model Deneyinin RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması

İkinci fiziksel model deneyinde basen içindeki 2/3 eğimli taş yüzeyler, düşey yüzeylere (rıhtımlar) dönüştürülmüştür. Bu doğrultuda ikinci deney için sayısal modelde, 2/3 eğimli taş yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=0,2$ değerinde sabit tutularak, düşey yüzeylerin yansımaya katsayıları $r=0,8-1,0$ arasında on iki durum için RIDE dalga modelinde çalışılmıştır. RIDE dalga modelinde ikinci deney için hazırlanan çalışma alanı Şekil 9.21’de görülmektedir. Sayısal modelde sol ve sağ kenarlar geçirimli (yansımaya yok) sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Birinci deneyin sayısal modelinde olduğu gibi havuz tabanı kaynaklı enerji kayıpları çalışmaya dahil edilmemiştir. Dalga kırılma kaynaklı enerji kayıpları çalışmaya dahil edilmiştir.



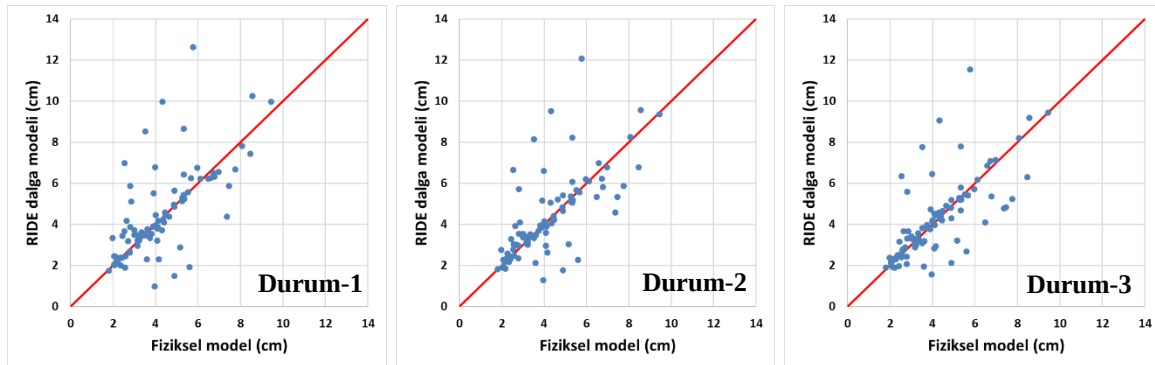
Şekil 9.21. İkinci deney için RIDE dalga modeli çalışma alanı

On iki durum için RIDE dalga modeli ile yapılan çalışma sonuçları ile basen içindeki dokuz sensörün ölçümlerinin istatistiki karşılaştırması Çizelge 9.6'da sunulmuştur. Sayısal model sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri Şekil 9.22'de görülmektedir. Düşey yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=1,0$ olarak uygulandığında deney sonuçları ile %22,7 yüzde ortalama gerçek hata oluşmaktadır. Yüzde kök ortalama kare hatası ise %41,04 seviyesindedir. Yansımaya katsayısı azaldıkça basen içindeki dalga yükseklikleri de azalmaktadır. Ancak bu durum birinci deneyin sayısal modelindeki gibi istatistiki karşılaştırma değerlerine olumlu yansımamaktadır. Dağılım grafiklerinden de görüleceği üzere, yansımaya katsayısı azaldıkça sayısal model dalga yükseklik değerleri 1/1 eğimli kıyas hattının (Şekil 9.22 kırmızı çizgi) altına doğru sarkmaktadır. Çizelge 9.6 incelendiğinde tüm istatistiki karşılaştırma değerlerinin tek bir yansımaya katsayısı için en iyi sonucu vermediği görülmektedir. Bu doğrultuda %17,80 yüzde ortalama gerçek hata ve %83,7 uyum indeksi ile $r=0,94$ yansımaya katsayısının, fiziksel model deneyi ile en yakın sonuçları ürettiği değerlendirilmektedir. Yansımaya katsayısının $r=0,92$ ve $0,96$ değerlerini aldığı Durum-3 ve

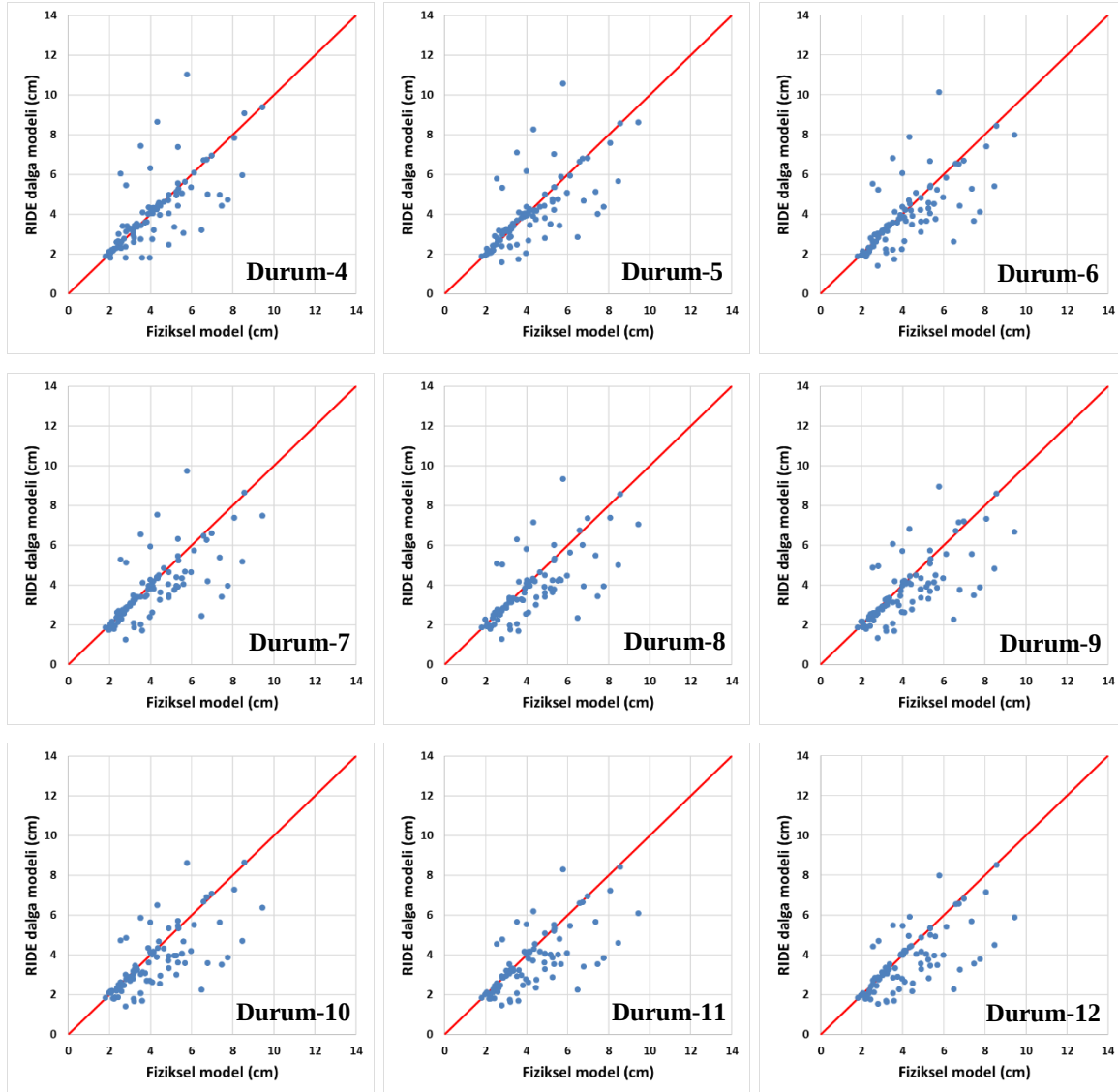
Durum-5 sonuçlarının, Durum-4 sonuçlarına yakın olduğu görülmüştür. İkinci deney sonucunda basen içindeki dokuz adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 4,21 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 4,25 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,96$ yansıma katsayısı ile ulaşılmıştır. Tüm karşılaştırmalar incelendiğinde RIDE dalga modelinde, düşey yüzeylerde yansıma katsayısı için $r=0,92 \sim 0,96$ aralığının kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 9.6. İkinci deney ile RIDE dalga modeli sonuçlarının karşılaştırılması

	Düşey yüzey yansıma katsayısı	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)	Dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması (cm)
Durum-1	1,00	1,62	41,04	0,90	22,70	0,24	80,60	68,11	4,45
Durum-2	0,98	1,49	36,69	0,84	20,40	0,13	82,30	69,53	4,34
Durum-3	0,96	1,41	33,88	0,80	19,10	0,04	83,40	70,91	4,25
Durum-4	0,94	1,37	31,79	0,77	17,80	-0,06	83,70	70,93	4,14
Durum-5	0,92	1,35	30,43	0,79	17,90	-0,19	83,40	70,61	4,02
Durum-6	0,905	1,34	29,51	0,82	18,30	-0,27	83,00	70,22	3,93
Durum-7	0,89	1,35	28,87	0,84	18,40	-0,36	82,50	70,14	3,85
Durum-8	0,87	1,35	28,31	0,86	18,70	-0,42	82,30	70,55	3,78
Durum-9	0,85	1,35	27,91	0,88	19,20	-0,49	82,30	70,53	3,72
Durum-10	0,835	1,37	27,69	0,89	19,30	-0,51	81,80	70,51	3,70
Durum-11	0,82	1,38	27,50	0,88	19,10	-0,56	81,10	70,43	3,65
Durum-12	0,80	1,39	27,39	0,89	19,00	-0,59	80,60	70,08	3,62



Şekil 9.22. RIDE dalga modeli ile ikinci fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri



Şekil 9.22. (Devam) RIDE dalga modeli ile ikinci fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri

9.9. Üçüncü Fiziksel Model Deneyinin RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması

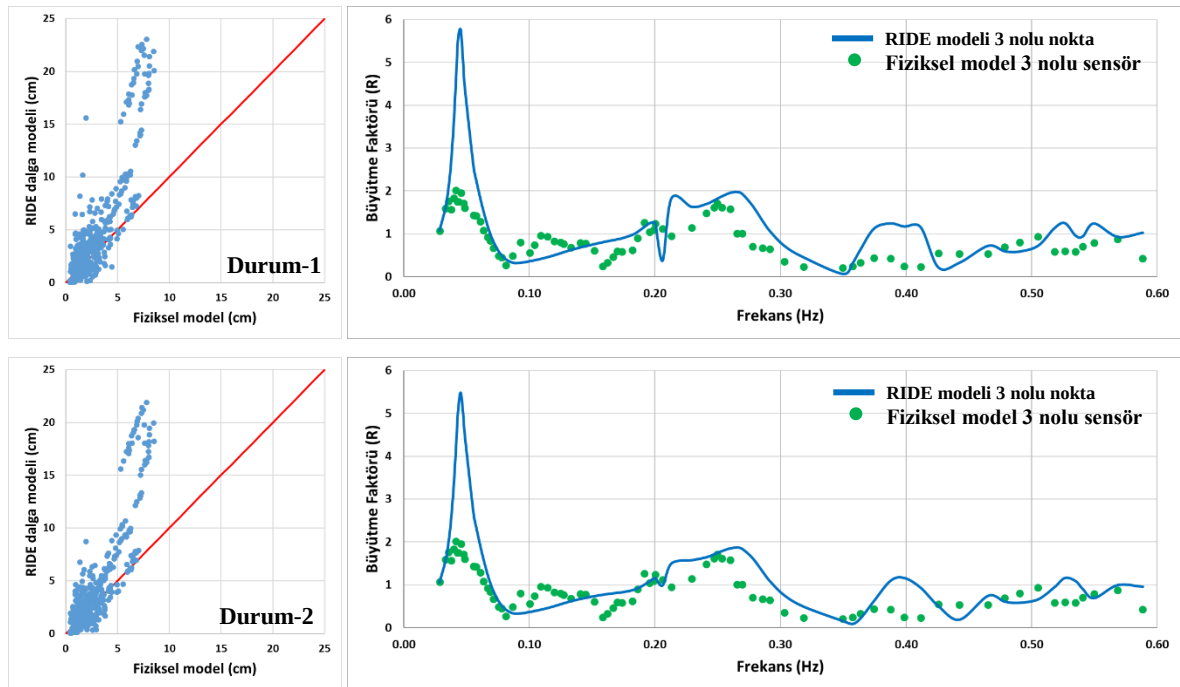
Üçüncü fiziksel model deneyinde ikinci deney ile aynı basen geometrisi kullanılmıştır. Çalışmada liman rezonansına yönelik ölçümler yapıldığından sensörler kenar ve köşelere yerleştirilmiştir. Üçüncü deneyin sayısal modelinde, $2/3$ eğimli taş yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=0,2$ değerinde sabit tutularak, düşey yüzeylerin yansımaya katsayıları $r=0,8-1,0$ arasında on iki durum için RIDE dalga modelinde çalışılmıştır. Sayısal modelde sol ve sağ kenarlar geçirimsiz (yansımaya yok) sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Dalgalar modelin alt sınırından dik (0° açılı) gönderilmiştir. Birinci ve ikinci deneyin sayısal modelinde olduğu gibi havuz tabanı kaynaklı enerji kayıpları çalışmaya dahil edilmemiştir. Deneyde $H=2$ cm

dalga yüksekliği kullanılmıştır. Bu nedenle dalga kırılma derinliği liman giriş ağzından uzakta kıyı çizgisi yakınında yaklaşık 2,5 cm derinlikte gerçekleşmiştir. $T=17,28$ sn'den daha büyük periyotlarda da dalga kırılması gerçekleşmemiştir. Bu nedenle dalga kırılma kaynaklı enerji kayıpları kare liman rezonans çalışmasına dahil edilmemiştir. On iki durum için RIDE dalga modeli ile yapılan çalışma sonuçları ile basen içindeki altı sensörün ölçümlerinin istatistiki karşılaştırması Çizelge 9.7'de sunulmuştur. Sayısal model sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri ve büyütme faktörü eğrileri Şekil 9.23'te görülmektedir.

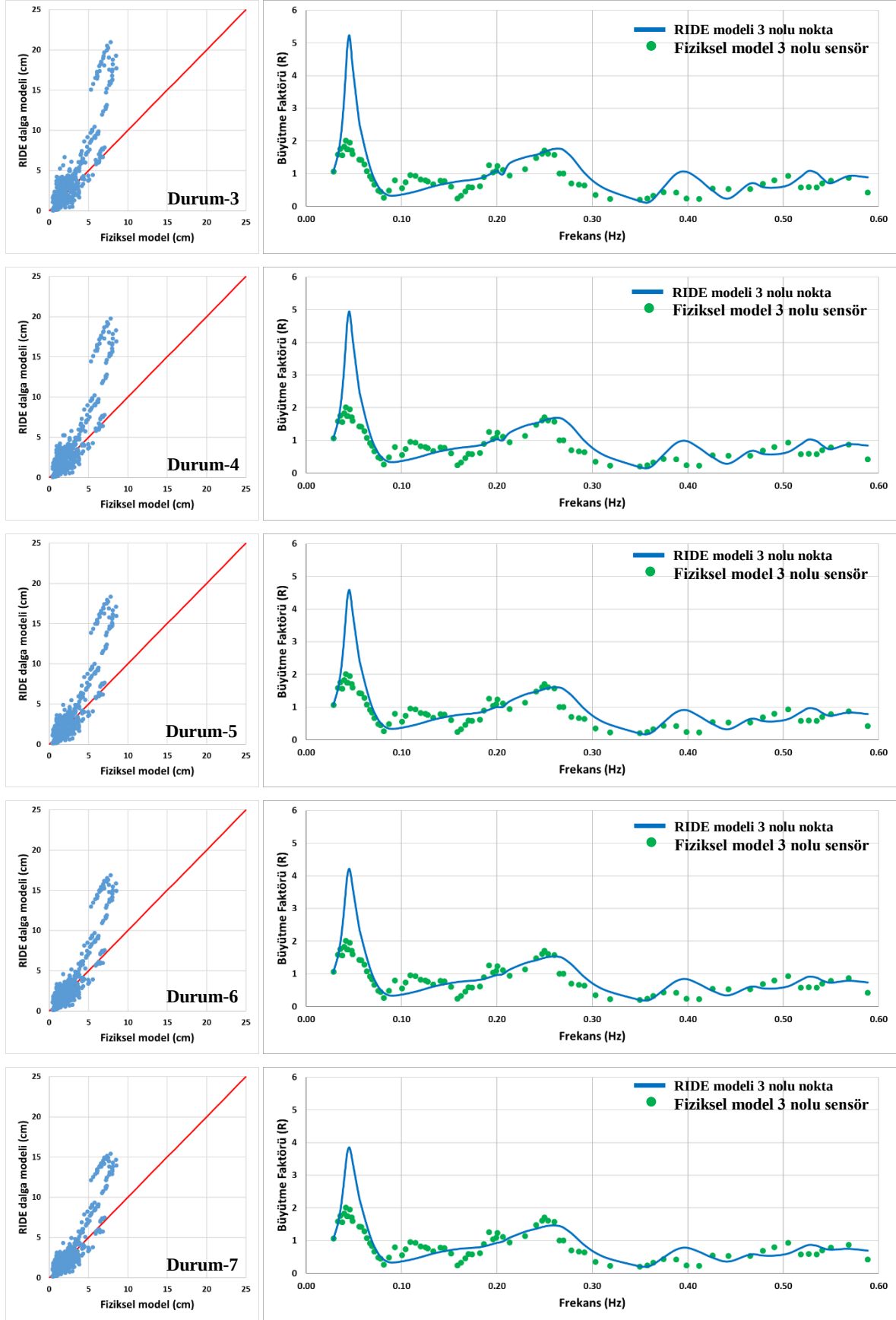
Düşey yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=1,0$ olarak uygulandığında deney sonuçları ile %75,5 yüzde ortalama gerçek hata oluşmaktadır. Yüzde kök ortalama kare hatası ise %110,88 seviyesindedir. Hatanın bu derece yüksek olmasının sebebi $T=11,52$ sn üzerindeki periyotlarda sayısal modelin, fiziksel model ölçümlerinden %99 daha büyük dalga yükseklikleri hesaplamasıdır. Fiziksel model çalışmalarında $T=11,52$ sn üzerindeki periyotlarda akıntıların meydana gelerek liman içine yönlendiği görülmüştür. RIDE dalga modelinde akıntı girdisi veya hesaplaması (dalga-akıntı etkileşimi) dikkate alınmadığından bu durumun olduğu değerlendirilmektedir. Yansımaya katsayısı azaldıkça basen içindeki dalga yükseklikleri de azalmaktadır. Paralel şekilde büyütme faktörü değerleri de azalarak düşey yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=0,8$ olduğunda, yüzde ortalama gerçek hata %35,1, yüzde kök ortalama kare hatası ise %46,13 seviyesine inmektedir. Ayrıca %94,2 uyum indeksi ile ölçüm sonuçlarına yaklaşılmıştır. Dağılım grafiklerinden de görüleceği üzere, yansımaya katsayısı azaldıkça sayısal model dalga yükseklik değerleri 1/1 eğimli kıyas hattına yaklaşmaktadır. Üçüncü deney sonucunda basen içindeki altı adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 2.76 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 2,79 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,80$ yansımaya katsayısı ile ulaşılmıştır.

Çizelge 9.7. Üçüncü deney ile RIDE dalga modelinin tüm periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması

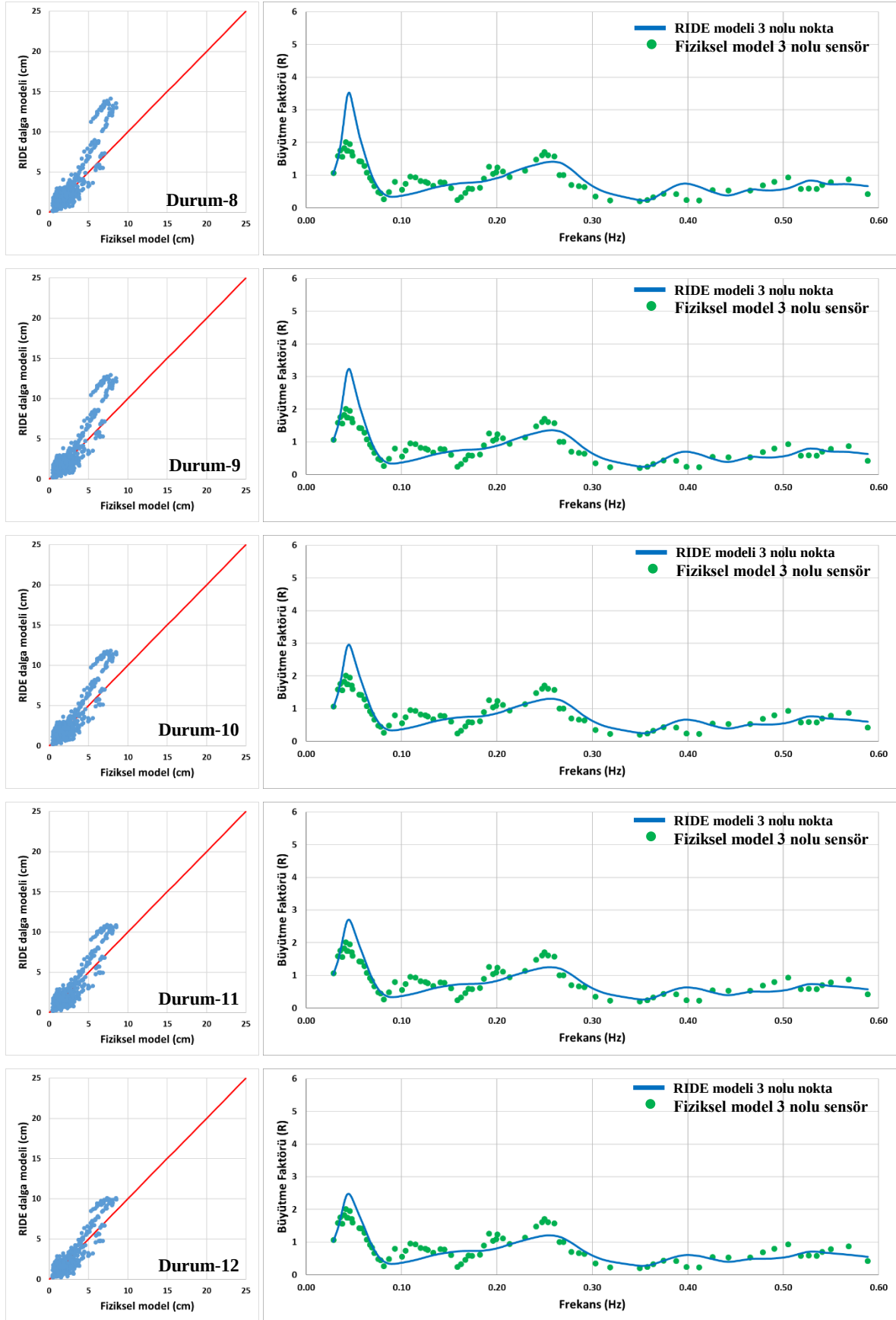
	Düşey yüzey yansıma katsayısı	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)	Dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması (cm)
Durum-1	1,00	3,84	110,88	2,14	75,5	1,64	70,11	85,24	4,40
Durum-2	0,98	3,46	91,76	1,91	66,3	1,39	73,12	86,22	4,15
Durum-3	0,96	3,24	82,94	1,79	61,3	1,25	75,06	87,04	4,01
Durum-4	0,94	2,99	75,88	1,66	56,8	1,11	77,22	87,72	3,86
Durum-5	0,92	2,71	69,87	1,53	52,8	0,96	79,71	88,40	3,71
Durum-6	0,905	2,41	64,65	1,40	49,3	0,81	82,45	89,12	3,56
Durum-7	0,89	2,12	60,05	1,29	46,1	0,66	85,04	89,81	3,42
Durum-8	0,87	1,85	56,13	1,18	43,3	0,52	87,52	90,43	3,28
Durum-9	0,85	1,62	52,84	1,07	40,8	0,39	89,61	90,96	3,15
Durum-10	0,835	1,40	50,1	0,98	38,6	0,27	91,51	91,39	3,02
Durum-11	0,82	1,22	47,89	0,90	36,7	0,15	93,08	91,74	2,90
Durum-12	0,80	1,08	46,13	0,83	35,1	0,04	94,21	92,00	2,79



Şekil 9.23. Sayısal model sonuçları ile üçüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri



Şekil 9.23. (Devam) Sayısal model sonuçları ile üçüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri

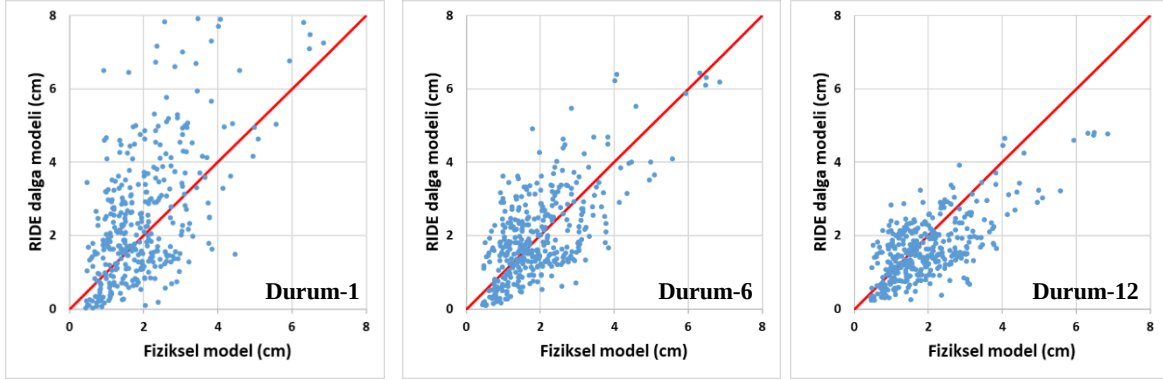


Şekil 9.23. (Devam) Sayısal model sonuçları ile üçüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri

Yansımaya katsayısının $r=0,80$ olması durumunda (Durum-12) ve tüm periyotlar dikkate alındığında, istatistiki karşılaştırmalarda fiziksel modele en yakın sonuçlar elde edilmektedir. Ancak yansımaya katsayısı küçüldükçe $T=11,52$ sn ($f=0,0868$ Hz) altındaki dalga yükseklikleri de azalmaktadır. Bu nedenle $T=11,52$ sn altındaki periyotlar için ayrıca istatistiki karşılaştırmalar yapılarak Çizelge 9.8’de verilmiştir. Bu durumda yansımaya katsayısının $r=1,0-0,905$ değerleri arasında, istatistiki karşılaştırmalardaki hata oranlarının hızla azaldığı, yansımaya katsayısının $r=0,905-0,8$ değerleri arasında ise azalış miktarının düştüğü görülmüştür. Yansımaya katsayısının $r=0,905$ olması durumunda yüzde ortalama gerçek hata %43,10, $r=0,80$ olması durumunda %37,50 olarak hesaplanmıştır. Yansımaya katsayısının $r=0,905$ olması durumunda uyum indeksi %83,04, $r=0,80$ olması durumunda %79,99 olarak hesaplanmıştır. Basen içindeki altı adet sensörün $T=11,52$ sn’den küçük periyotlarda ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 1,99 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 1,99 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,92$ yansımaya katsayısı ile ulaşılmıştır. Dalga yüksekliği dağılım grafiklerinden de (Şekil 9.24) Durum-1’de noktalar arası saçılımın yüksek olduğu, Durum-12’de noktaların 1/1 kıyas hattının altına sarktığı görülmektedir.

Çizelge 9.8. Üçüncü deney ile RIDE dalga modelinin $T<11,52$ sn periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması

	Düşey yüzey yansımaya katsayısı	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)	Dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması (cm)
Durum-1	1,00	1,76	112,23	1,20	71,92	0,53	62,81	51,77	2,57
Durum-2	0,98	1,33	86,98	0,98	59,80	0,28	72,17	57,69	2,27
Durum-3	0,96	1,15	76,23	0,89	54,19	0,17	76,47	61,43	2,16
Durum-4	0,94	1,03	68,42	0,82	49,62	0,08	79,26	64,11	2,07
Durum-5	0,92	0,96	62,58	0,77	45,98	0,00	80,99	66,01	1,99
Durum-6	0,905	0,90	56,03	0,73	43,10	-0,07	83,04	67,40	1,92
Durum-7	0,89	0,87	54,47	0,71	40,84	-0,13	82,48	68,41	1,86
Durum-8	0,87	0,86	53,68	0,70	40,05	-0,19	82,53	69,11	1,80
Durum-9	0,85	0,84	52,51	0,69	39,69	-0,24	82,25	69,59	1,75
Durum-10	0,835	0,84	51,83	0,68	38,67	-0,28	81,69	69,88	1,70
Durum-11	0,82	0,85	50,57	0,68	37,92	-0,33	80,93	70,03	1,66
Durum-12	0,80	0,86	50,64	0,69	37,50	-0,37	79,99	70,05	1,62



Şekil 9.24. Durum-1, Durum-6 ve Durum-12 de $T < 11,52$ sn periyotlardaki dalga yüksekliği dağılım grafikleri

9.10. Dördüncü Fiziksel Model Deneyinin RIDE Dalga Modeli İle Karşılaştırılması

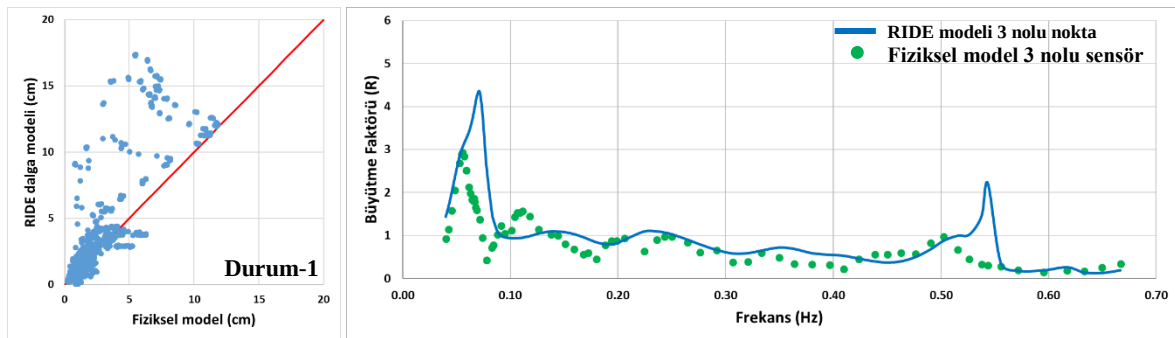
Dördüncü fiziksel model deneyinde basen içerisindeki düz alan kapatılarak oluşturulan dikdörtgen basen geometrisi kullanılmıştır. Dördüncü deneyin sayısal modelinde, $2/3$ eğimli taş yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=0,2$ değerinde sabit tutularak, düşey yüzeylerin yansımaya katsayıları $r=0,8-1,0$ arasında on iki durum için RIDE dalga modelinde çalışılmıştır. Sayısal modelde sol ve sağ kenarlar geçirimsiz (yansımaya yok) sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Dalgalar modelin alt sınırından dik (0° açılı) gönderilmiştir. Önceki deneylerin sayısal modelinde olduğu gibi havuz tabanı kaynaklı enerji kayıpları çalışmaya dahil edilmemiştir. Üçüncü fiziksel model deneyinde olduğu gibi dalga kırılma derinliği liman giriş ağzından uzakta kıyı çizgisi yakınında gerçekleştiğinden dördüncü deneyin sayısal modelinde de dalga kırılma kaynaklı enerji kayıpları rezonans çalışmasına dahil edilmemiştir. On iki durum için RIDE dalga modeli ile yapılan çalışma sonuçları ile basen içindeki yedi sensörün ölçümlerinin istatistiki karşılaştırması Çizelge 9.9’da sunulmuştur. Sayısal model sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının dağılım grafikleri ve büyütme faktörü eğrileri Şekil 9.25’te görülmektedir.

Düşey yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=1,0$ olarak uygulandığında deney sonuçları ile %68,7 yüzde ortalama gerçek hata oluşmaktadır. Yüzde kök ortalama kare hatası ise %129,21 seviyesindedir. Hatanın bu derece yüksek olmasının sebebi $T=10,96$ sn üzerindeki periyotlarda sayısal modelin fiziksel model ölçümlerinden %69 daha büyük dalga yükseklikleri hesaplamasıdır. Yansımaya katsayısı azaldıkça basen içindeki dalga yükseklikleri de azalmaktadır. Paralel şekilde büyütme faktörü değerleri de azalarak düşey yüzeylerin yansımaya katsayısı $r=0,8$ olduğunda, yüzde ortalama gerçek hata %32,08 yüzde

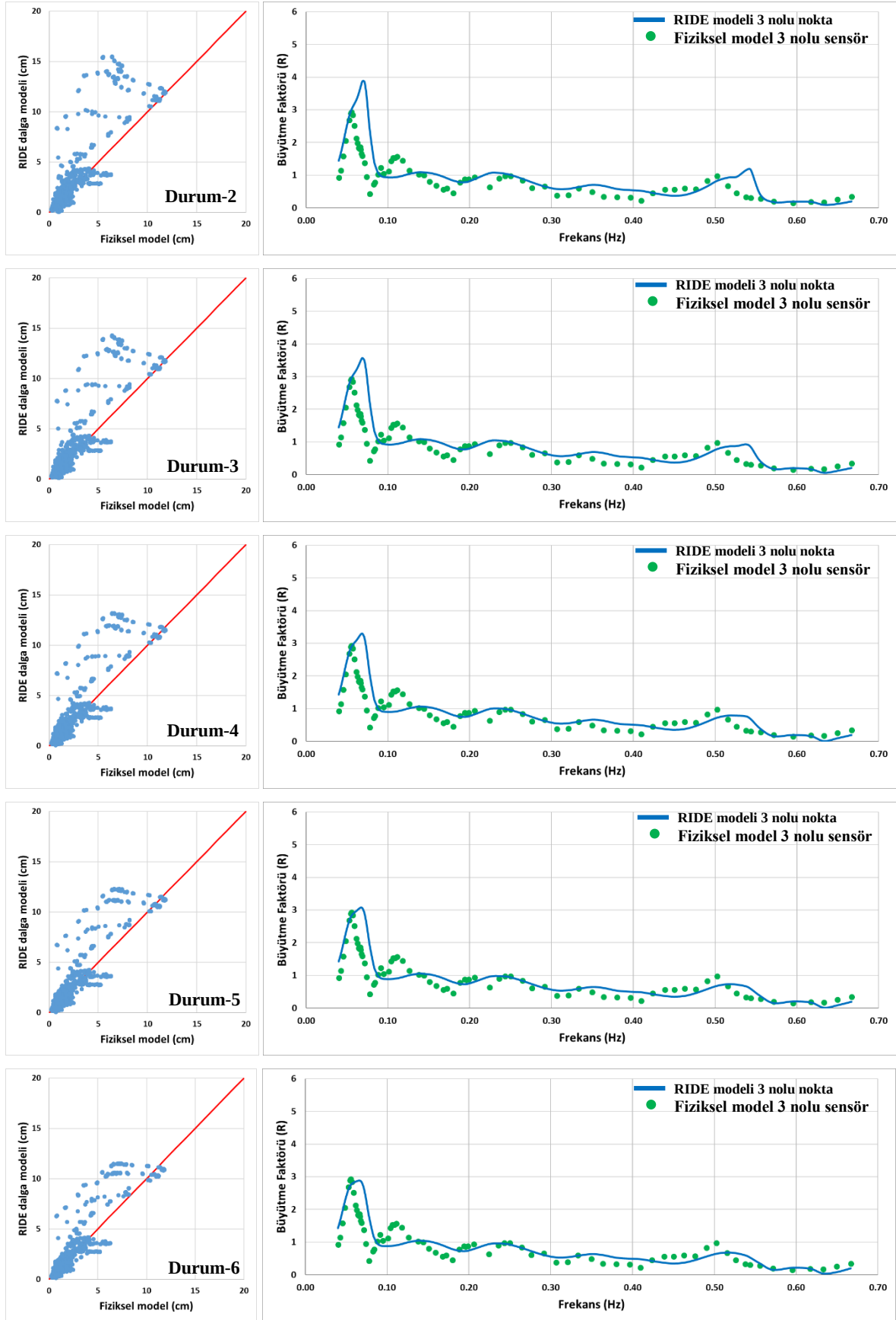
kök ortalama kare hatası ise %49,55 seviyesine inmektedir. Ayrıca %95,50 uyum indeksi ile ölçüm sonuçlarına yaklaşılmıştır. Dağılım grafiklerinden de görüleceği üzere, yansıma katsayısı azaldıkça sayısal model dalga yükseklik değerleri 1/1 eğimli kıyas hattına yaklaşmaktadır. Dördüncü deney sonucunda basen içindeki yedi adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 3,43 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 3,39 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,82$ yansıma katsayısı ile ulaşılmıştır.

Çizelge 9.9. Dördüncü deney ile RIDE dalga modelinin tüm periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması

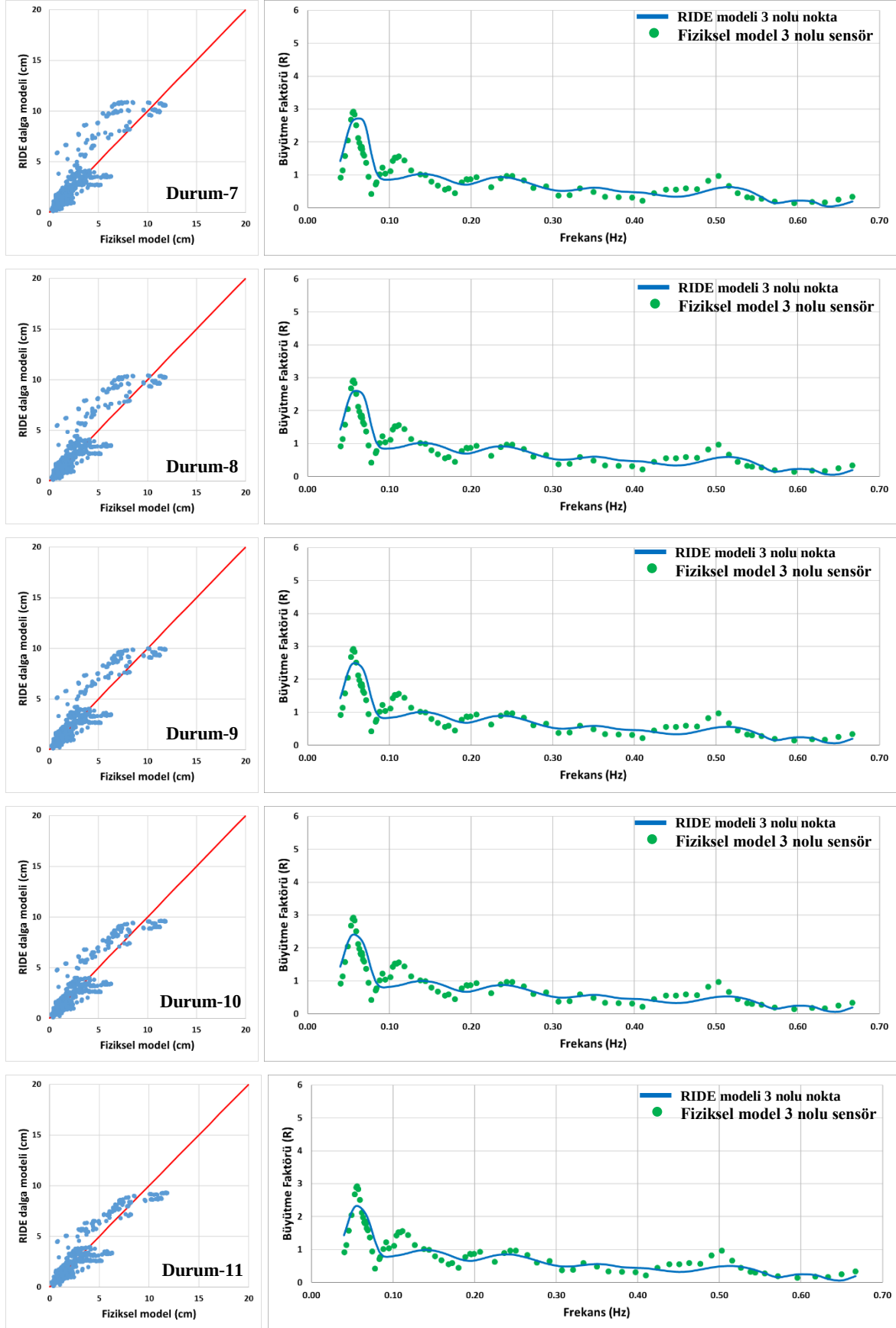
	Düşey yüzey yansıma katsayısı	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)	Dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması (cm)
Durum-1	1,00	3,32	129,21	1,91	68,71	1,49	79,71	78,63	4,91
Durum-2	0,98	2,90	110,15	1,71	60,91	1,26	83,23	81,66	4,69
Durum-3	0,96	2,57	99,13	1,56	55,72	1,09	85,94	83,72	4,51
Durum-4	0,94	2,30	90,43	1,42	51,53	0,93	88,11	85,33	4,36
Durum-5	0,92	2,05	82,96	1,31	47,81	0,77	90,05	86,67	4,20
Durum-6	0,905	1,86	76,51	1,21	44,62	0,62	91,61	87,75	4,05
Durum-7	0,89	1,62	70,47	1,12	41,71	0,48	92,92	88,75	3,90
Durum-8	0,87	1,45	65,03	1,04	39,14	0,34	94,03	89,64	3,76
Durum-9	0,85	1,32	60,23	0,97	36,91	0,21	94,81	90,38	3,63
Durum-10	0,835	1,22	56,07	0,92	35,04	0,08	95,32	90,96	3,51
Durum-11	0,82	1,17	52,51	0,88	33,41	-0,04	95,54	91,41	3,39
Durum-12	0,80	1,15	49,55	0,85	32,08	-0,15	95,50	91,72	3,28



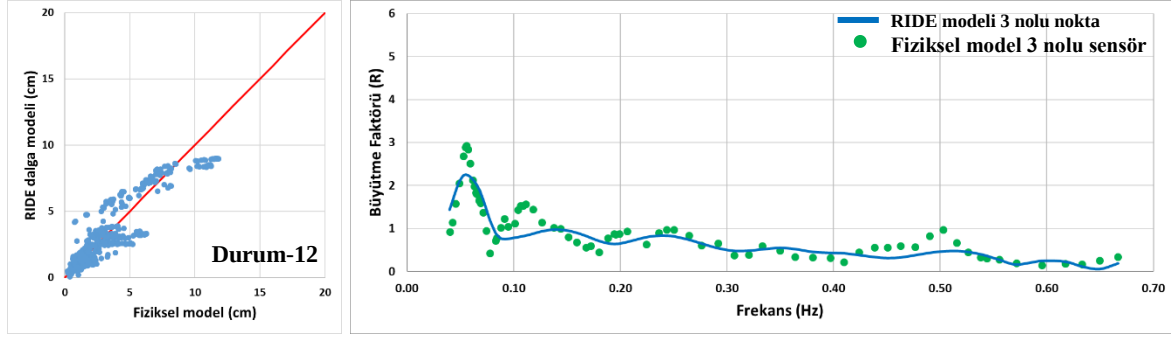
Şekil 9.25. Sayısal model sonuçları ile dördüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri



Şekil 9.25. (Devam) Sayısal model sonuçları ile dördüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri



Şekil 9.25. (Devam) Sayısal model sonuçları ile dördüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri



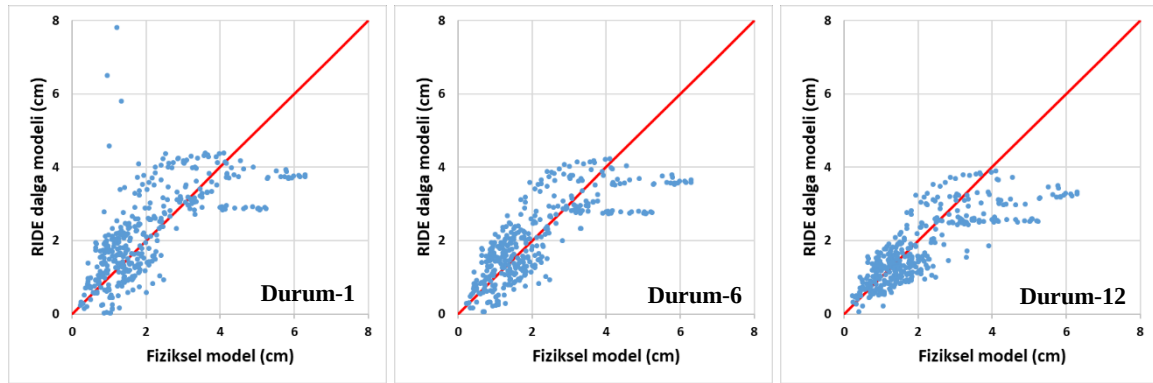
Şekil 9.25. (Devam) Sayısal model sonuçları ile dördüncü deney sensör ölçümlerinin karşılaştırılması ve 3 nolu sensör noktasında büyütme faktörü eğrileri

Üçüncü deneyin sayısal model çalışmasında olduğu gibi, yansıma katsayısının $r=0,80$ olması durumunda (Durum-12) ve tüm periyotlar dikkate alındığında, istatistiki karşılaştırmalarda fiziksel modele en yakın sonuçlar elde edilmektedir. Ancak yansıma katsayısı küçüldükçe $T=10,96$ sn ($f=0,0912$ Hz) altındaki dalga yükseklikleri de azalmaktadır. Bu nedenle $T=10,96$ sn altındaki periyotlar için ayrıca istatistiki karşılaştırmalar yapılarak Çizelge 9.10'da verilmiştir. Bu durumda üçüncü deneydeki gibi yansıma katsayısının $r=1,0\sim0,905$ değerleri arasında, istatistiki karşılaştırmalardaki hata oranlarının hızla azaldığı, yansıma katsayısının $r=0,905\sim0,8$ değerleri arasında ise azalış miktarının düştüğü görülmüştür. Yansıma katsayısının $r=0,905$ olması durumunda yüzde ortalama gerçek hata %35,21, $r=0,80$ olması durumunda %32,29 olarak hesaplanmıştır. Yansıma katsayısının $r=0,905$ olması durumunda uyum indeksi %86,77, $r=0,80$ olması durumunda %84,11 olarak hesaplanmıştır.

Basen içindeki yedi sensörün $T=10,96$ sn'den küçük periyotlarda ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 2,08 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 2,09 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,96$ yansıma katsayısı ile ulaşılmıştır. Dalga yüksekliği dağılım grafiklerinden de (Şekil 9.26) Durum-1'de noktalar arası saçılımın yüksek olduğu, Durum-12'de noktaların 1/1 kıyas hattının altına sarktığı görülmektedir.

Çizelge 9.10. Dördüncü deney ile RIDE dalga modelinin $T < 10,96$ sn periyotlardaki sonuçlarının karşılaştırılması

	Düşey yüzey yansım katsayısı	RMSE	RMSPE (%)	MAE	MAPE (%)	BIAS	Uyum indeksi (%)	Korelasyon (%)	Dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması (cm)
Durum-1	1,00	1,17	83,19	0,79	49,56	0,17	77,85	62,37	2,25
Durum-2	0,98	0,94	60,31	0,71	43,46	0,07	84,49	73,24	2,15
Durum-3	0,96	0,88	53,30	0,68	40,49	0,01	85,96	76,21	2,09
Durum-4	0,94	0,85	49,36	0,66	38,38	-0,03	86,53	77,68	2,05
Durum-5	0,92	0,84	46,53	0,64	36,66	-0,07	86,75	78,63	2,01
Durum-6	0,905	0,83	44,21	0,63	35,21	-0,11	86,77	79,32	1,97
Durum-7	0,89	0,83	42,35	0,62	34,48	-0,15	86,64	79,83	1,93
Durum-8	0,87	0,83	41,84	0,61	34,12	-0,18	86,48	80,34	1,90
Durum-9	0,85	0,84	40,68	0,61	33,43	-0,22	86,08	80,55	1,87
Durum-10	0,835	0,85	39,80	0,61	32,91	-0,25	85,54	80,63	1,83
Durum-11	0,82	0,86	39,12	0,62	32,53	-0,28	84,88	80,65	1,80
Durum-12	0,80	0,88	38,67	0,63	32,29	-0,31	84,11	80,59	1,77



Şekil 9.26. Durum-1, Durum-6 ve Durum-12 de $T < 10,96$ sn periyotlardaki dalga yüksekliği dağılım grafikleri

9.11. Fiziksel ve Sayısal Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Dalga havuzunda liman içi çalkantı ve liman rezonansı konularında üç ayrı liman geometrisinde dört ayrı fiziksel model deneyi gerçekleştirilmiştir. Fiziksel model deneylerinde kullanılan batimetri ve dalga verileri dikkate alınarak söz konusu geometriler, ayrıca RIDE dalga modelinde de sayısal olarak incelenmiştir. Fiziksel ve sayısal model çalışmaları neticesinde elde edilen veriler karşılaştırılmış ve RIDE dalga modelinde eğimli taş yüzey ve düşey yüzeyli yansımalar sınır koşullarında uygulanabilecek yansımalar katsayıları aralıkları belirlenmiştir.

Birinci deney sonucunda basen içindeki dokuz adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 2,50 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 2,55 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,20$ yansımalar katsayısı ile ulaşılmıştır. Birinci deney sonucunda, %25,06 yüzde ortalama gerçek hata, %53,83 yüzde kök ortalama kare hatası ve %63,3 uyum indeksi ile fiziksel model deneylerine en yakın sonuçlar $r=0,2\sim0,3$ aralığındaki yansımalar katsayıları ile elde edilmiştir. Buna göre RIDE dalga modelinde eğimli taş yüzey yansımalar katsayısı için $r=0,2\sim0,3$ aralığının uygun olduğu belirlenmiştir.

İkinci deney sonucunda basen içindeki dokuz adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 4,21 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 4,25 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,96$ yansımalar katsayısı ile ulaşılmıştır. İkinci deney sonucunda, %18,26 yüzde ortalama gerçek hata, %32,03 yüzde kök ortalama kare hatası ve %83,5 uyum indeksi ile fiziksel model deneylerine en yakın sonuçlar $r=0,92\sim0,96$ aralığındaki yansımalar katsayıları ile elde edilmiştir. Buna göre RIDE dalga modelinde eğimli taş yüzey yansımalar katsayısı için $r=0,92\sim0,96$ aralığının uygun olduğu belirlenmiştir.

Üçüncü deney sonuçlarında $T=11,52$ sn üzerindeki dalga periyotlarında ölçüm değerleri ile %99 kadar büyük fark oluşmuştur. $T=11,52$ sn periyot üzerinde dalga havuzunda akıntıların etkin olduğu görülmüştür. RIDE dalga modelinde dalga-akıntı etkileşiminin dikkate alınmaması nedeniyle bu durumun meydana geldiği düşünülmektedir. Üçüncü deney çalışmasındaki tüm periyotlara göre basen içindeki altı adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 2,76 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 2,79 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,80$ yansımalar katsayısı ile ulaşılmıştır. Ayrıca %35,1 yüzde ortalama gerçek hata, %46,13 yüzde kök ortalama kare hatası ve %94,2 uyum

indeksi ile tüm periyotlara göre ölçüm sonuçlarına en yakın $r=0,80$ yansıma katsayısı yaklaşılmıştır. Ancak bu değerlerin RIDE dalga modeli için gerçekçi olmadığı değerlendirilerek $T=11,52$ sn altındaki periyotların sonuçları ayrıca hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, basen içindeki altı adet sensörün $T=11,52$ sn'den küçük periyotlarda ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 1,99 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 1,99 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,92$ yansıma katsayısı ile ulaşılmıştır. Ek olarak %83,04 uyum indeksi ile $r=0,905$ yansıma katsayısı en iyi sonucu üretmiştir.

Dördüncü deneyde de üçüncü deneydeki gibi $T=10,96$ sn üzerindeki dalga periyotlarında ölçüm değerleri ile %69 kadar fark oluşmuştur. Dördüncü deney çalışmasındaki tüm periyotlara göre basen içindeki yedi adet sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 3,43 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 3,39 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,82$ yansıma katsayısı ile ulaşılmıştır. Ayrıca %32,08 yüzde ortalama gerçek hata, %49,55 yüzde kök ortalama kare hatası ve %95,50 uyum indeksi ile tüm periyotlara göre ölçüm sonuçlarına en yakın $r=0,80$ yansıma katsayısı yaklaşılmıştır. $T<10,96$ sn altındaki periyotlar için basen içindeki yedi sensörün ölçtüğü dalga yüksekliklerinin aritmetik ortalaması 2,08 cm olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelde bu değere 2,09 aritmetik ortalama ile en yakın $r=0,96$ yansıma katsayısı ile ulaşılmıştır. Ek olarak %86,77 uyum indeksi ile $r=0,905$ yansıma katsayısı en iyi sonucu üretmiştir.

Fiziksel ve sayısal model çalışmalarındaki karşılaştırmalar değerlendirildiğinde, RIDE dalga modelinde yansıma katsayısı olarak eğimli taş yüzeyler için $r=0,2\sim0,3$ ve düşey yüzeyler için $r=0,90\sim0,92$ aralıklarının kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Liman içi çalkantı ve liman rezonansı çalışmalarında, dalgaların derin denizden kıyıya doğru ilerlemeleri esnasında meydana gelen değişimler, limana giren dalgaların belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca dalga ilerlemesinin modellenmesi bir kıyı yapısının tasarımında kullanılacak dalga değerlerinin belirlenmesini de sağlamaktadır. Yumuşak eğim eşitliği kullanılarak dalga ilerlemesi ve yakın kıyı dalga değişimleri modellenenilmektedir. Yumuşak eğim eşitliği temel olarak kırınım ve sapma etkilerini bir arada ele alabilen eliptik formda lineer bir eşitliktir. Tez çalışmasında yumuşak eğim eşitliğine dayalı olarak geliştirilmiş iki ayrı açık kaynak kodlu sayısal model incelenmiştir. REF/DIF 1 dalga modeli parabolik formda olup dalga ilerlemesi sırasında gerçekleşen sığlaşma, sapma, kırınım, dalga-akıntı ilişkisi, taban pürüzlülüğü ve dalga kırılması kaynaklı enerji kayıplarını dikkate alabilmektedir. RIDE dalga modeli eliptik formda olup dalga ilerlemesi sırasında gerçekleşen sığlaşma, sapma, kırınım, yansıma, dik taban eğimleri ve taban eğrilikleri, hızlı derinlik farklılaşmaları, taban pürüzlülüğü ve dalga kırılması kaynaklı enerji kayıpları dikkate alabilmektedir.

Tez çalışmasında öncelikle limana yaklaşan bir dalgada, dalgakıran etkisiyle meydana gelen değişim (kırınım) ele alınmıştır. Bu doğrultuda sabit su derinliğinde zamandan bağımsız iki boyutlu dalga denklemi olan Helmholtz eşitliği çözümlenmiştir. Kırınımın incelenmesinde analitik ve sayısal model olarak iki farklı çözüm yolu çalışılmıştır. Sayısal çözümde sonlu farklar yaklaşımı uygulanarak, model sonuçları analitik çözüm ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sayısal çözümde %48,9 yüzde ortalama gerçek hata, %96,1 uyum indeksi ve %94,18 korelasyon ile analitik çözüme yaklaşılmıştır.

Yumuşak eğim eşitliği eliptik bir eşitlik olduğundan model alanındaki tüm sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Dalgalar çözümde ilerleyen ve geri dönen (yansıyan) olarak ikiye ayrılıp yansıyan dalga ihmal edildiğinde dalga ilerleme yönünde bir sınır koşulu tanımlanmasına ihtiyaç kalmamaktadır. Bu durumda yumuşak eğim eşitliğinin parabolik formu elde edilmektedir. REF/DIF 1 dalga modeli bu sayede dalga ilerlemesi konusunda büyük çalışma alanlarının hızlı bir şekilde çözümlenebilmesini sağlamaktadır. REF/DIF 1 dalga modeli öncelikle batık sığlık fiziksel model deneyi verileri kullanılarak başarılı şekilde çalıştırıldıktan sonra içerisinde vadi, sığlık, ada, burun ve dalgakıran olan ülkemiz kıyılarından Giresun ili açıklarına ait komplike bir çalışma alanına uygulanmıştır.

Liman içi çalkantı ve liman rezonansı çalışmaları için ilerleyen ve geri dönen (yansıyan) dalgaların birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Bu doğrultuda RIDE dalga modeli incelenmiştir. REF/DIF 1 dalga modelinde olduğu gibi RIDE dalga modeli de batık sığlık ve düşey yüzeyli dalgakıran fiziksel model deneylerinin verileri kullanılarak başarılı şekilde çalıştırıldıktan sonra iki sayısal model, liman içi dalga dağılımlarındaki farklılıkların belirlenmesi için doğu Karadeniz’de yer alan Darıca balıkçı barınağına uygulanmıştır. Karşılaştırma sonucunda, REF/DIF 1 dalga modelinde basen içine giren dalgaların tek bir bölgeye doğru yoğunlaştığı, basen içine dağılmadığı, RIDE dalga modelinde ise özellikle rıhtım önlerinde dalga yüksekliklerinin arttığı ve basen içi dalga dağılımının daha homojen olduğu görülmüştür. Bu nedenle REF/DIF 1 dalga modelinin, dalga ilerlemesi çalışmalarında kullanılması, liman içi çalkantı gibi yansıma etkilerinin yüksek olduğu çalışmalarda tercih edilmemesi önerilmektedir.

Liman veya koy gibi yarı kapalı bir su alanında oluşan salınım frekansının, bu alanın doğal frekansı ile örtüşmesi durumunda meydana gelen rezonans nedeniyle dalga yüksekliklerinde önemli miktarda artış meydana gelmektedir. RIDE dalga modeli ile liman rezonansı konusunda dikdörtgen ve kare liman fiziksel ve sayısal model çalışmaları ile karşılaştırmalar ve doğrulamalar yapıldıktan sonra, bu modellerde kullanılan parametreler baz alınarak farklı giriş ağzı geometrilerine sahip limanlar oluşturulmuş, dik ve 30° açılı dalgaların etkisinde bu durumların farklılıkları test edilmiştir. Ayrıca RIDE dalga modeli liman rezonansı çalışması için batı Karadeniz’de yer alan Kilimli balıkçı barınağı ve Filyos limanına uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda, giriş ağzı açık denize bakan bir limanın giriş ağzı L şeklinde bir dalgakıran ile korunduğu durumda, büyütme faktörünün ortalama %23, ayırık dalgakıran ile korunduğunda ortalama %16 ve ana dalgakıranın uzatılması ile ortalama %57 azaltılabileceği belirlenmiştir. Bu doğrultuda limana yaklaşan uzun dalgaların kırınımına uğratılmasının rezonans seviyelerini azaltıcı yönde etkisi olduğu belirlenmiştir.

Liman rezonansı çalışmasına ek olarak RIDE dalga modeli, bir liman baseninden çok daha büyük yarı kapalı su alanı olan Seferihisar koyuna uygulanmıştır. 30 Ekim 2020 tarihinde meydana gelen 6,9 büyüklüğündeki İzmir depremi sonrasında, Seferihisar koyunda başta Sığacık ve Akarca mahalleleri olmak üzere deniz kaynaklı su baskınları yaşanmış ve büyük maddi hasar meydana gelmiştir. Deprem merkezine en yakın mareograf istasyonlarının su seviyesi ölçümleri incelenmiş ve deprem kaynaklı dalga periyotlarının $T=9-20$ dk. arasında olduğu belirlenmiştir. İzmir depremini üreten fay hattının günümüzde halen aktif olması

ve yeni depremeler üretme potansiyeli olması nedeniyle gelecekte olabilecek bir depremde oluşabilecek dalga periyotlarının, $T=1-9$ ve $T=20-30$ dk. aralığında olması durumları için Seferihisar koyu rezonans çalışması genişletilmiştir. Modellemeler sonucunda deprem günü Demircili’de dalga yüksekliğinin merkez üssündeki dalga yüksekliğine göre 4 kat, Altıncıköy’de 5,2 kat, Sığacık koyunda 6,4 kat, Sığacık yat limanında 8,5 kat, Akarca’da 8,5 kat ve Tepecik’te 4,7 kat arttığı hesaplanmıştır. Deprem kaynaklı dalgalar nedeniyle özellikle Sığacık yat limanı ve Sığacık balıkçı barınağında çok sayıda tekne rıhtımlara, dalgakıranlara ve birbirlerine çarparak hasar almış ve bir kısmı da açığa taşınmıştır. Rüzgar dalgalarına karşı çok korunaklı olan yat limanı ve balıkçı barınağındaki bu durumun rezonans nedeniyle meydana geldiği belirlenmiştir. Dalga periyodunun $T=1-9$ dk. arasında olması durumunda ise Demircili, Altıncıköy, Tepecik ve Sığacık yat limanı için deprem gününden daha fazla dalga yüksekliği artışları hesaplanmıştır. Buna göre Demircili’de 7 kat, Altıncıköy’de 6,2 kat, Sığacık yat limanında 11,7 kat ve Tepecik’te 9 kat dalga yüksekliği artışı meydana gelebileceği belirlenmiştir. Sığacık koyunda ise 2,8 kat ve Akarca’da 5,9 kat ile $T=9-20$ dk. aralığına göre daha düşük dalga yüksekliği artışları olabilecektir.

Tez çalışmasının son bölümünde dalga havuzunda gerçekçi bir liman baseni oluşturularak liman içi çalkantı ve liman rezonansı fiziksel model deneyleri yapılmıştır. Ana dalgakıran uzunluğu 9,5 m, tali dalgakıran uzunluğu 2,3 m olan bir basende, üç ayrı geometride dört ayrı deney yapılmıştır. Birinci ve ikinci deneylerde basen içi yansıma yüzeylerinin sırasıyla taş ve düşey yüzeyli rıhtım olması durumları için dalga üreticiden dik ve 20° açılı gönderilen dalgalar etkisinde liman içi çalkantı çalışmaları yapılmıştır. Üçüncü ve dördüncü deneylerde basen içi düşey yüzeyli rıhtımlardan oluşan kare ve dikdörtgen liman geometrilerinde rezonans çalışmaları yapılmıştır. Fiziksel model deneylerinde kullanılan batimetri ve dalga verileri dikkate alınarak dört fiziksel model çalışmasının RIDE dalga modeli ile sayısal model çalışmaları yapılmıştır. Birinci deney sayısal model çalışmaları sonucunda, %25,06 yüzde ortalama gerçek hata ve %63,3 uyum indeksi ile RIDE dalga modelinde eğimli taş yüzey yansıma katsayısı için $r=0,2\sim0,3$ aralığının uygun olduğu belirlenmiştir. İkinci deney sayısal model çalışmaları sonucunda, %18,26 yüzde ortalama gerçek hata ve %83,5 uyum indeksi ile RIDE dalga modelinde düşey yüzey yansıma katsayısı için $r=0,92\sim0,96$ aralığının uygun olduğu belirlenmiştir. Üçüncü ve dördüncü fiziksel model deneylerinde yaklaşık $T=11$ sn üzerindeki periyotlarda, dalga havuzunda akıntıların meydana geldiği ve liman içine yönlendiği görülmüştür. RIDE dalga modelinde dalga-akıntı etkileşimi dikkate alınmadığından $T=11$ sn üzerindeki periyotlarda RIDE dalga

modeli kare limanda %99, dikdörtgen limanda %69 daha büyük dalga yükseklikleri hesaplamıştır. Bu sonucun gerçekçi olmadığı değerlendirilerek üçüncü ve dördüncü deneylerin sayısal model çalışmaları için $T=11$ sn altındaki periyotların sonuçları dikkate alınmıştır. Sonuçların incelemesi neticesinde, %40,24 yüzde ortalama gerçek hata ve %83,9 uyum indeksi ile RIDE dalga modelinde düşey yüzey yansıma katsayısı için $r=0,90\sim0,92$ aralığının uygun olduğu belirlenmiştir.

İkinci deneyde 9 adet sensör ve 10 farklı dalga periyodu ile toplam 90 kayıt, üçüncü deneyde 6 adet sensör ve 80 farklı dalga periyodu ile 480 kayıt ve dördüncü deneyde 7 adet sensör ve 78 farklı dalga periyodu ile 546 kayıt alınmıştır. Buna göre toplamda 1026 dalga kaydı ile yapılan incelemenin daha detaylı olduğu düşünülerek RIDE dalga modelinde düşey yüzey yansıma katsayısı için $0,90\sim0,92$ aralığının uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Tez kapsamında yapılan sayısal ve fiziksel model çalışmaları ile elde edilen genel sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar için öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Helmholtz eşitliğinin beş noktalı sonlu farklar metodu ile çözümlemesi yapılarak analitik çözüm sonucuna yakınsanmıştır. Çözümün hata yüzdesinin azaltılması için farklı sonlu farklar metotlarının araştırılması önerilmektedir.
- REF/DIF 1 dalga modelinin dalga ilerlemesi konusunda başarılı şekilde çözüm yapabildiği ve karmaşık deniz taban topoğrafyasına uygulanabildiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ülkemiz kıyı yapılarının tasarımında dikkate alınacak yakın kıyı dalga parametrelerinin belirlenmesinde kullanılması önerilmektedir. Ancak liman içi dalga dağılımı modellemelerinde kullanılmaması gerekmektedir.
- RIDE dalga modelinin liman içi çalkantı ve liman rezonansı konularında başarılı şekilde çözüm yapabildiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ülkemiz limanlarının basen içi dalga dağılımlarının sayısal modellemesinde kullanılması önerilmektedir.
- Dalga ilerleme yönünde bir engel inşa ederek dalganın kırınımına uğratılması ile bir limanda rezonans durumunda, basen içi dalga yüksekliklerinin azaltılabileceği ve daha güvenli bir basen oluşturulabileceği belirlenmiştir. Gelecekte yapılacak ticari liman, yat limanı ve balıkçı barınağı tasarımlarının rezonans çalışmalarında vaziyet planlarının bu doğrultuda oluşturulması önerilmektedir.

- Ege denizinde 30 Ekim 2020 günü meydana gelen deprem nedeniyle Seferihisar koyunda yaşanan deniz kaynaklı su baskınlarının, rezonans nedeniyle meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca Seferihisar koyu içerisinde yer alan küçük koylarda ve Sığacık yat limanında gelecekteki bir depremde, 30 Ekim 2020 gününden daha yıkıcı rezonans hareketlerinin oluşabileceği belirlenmiştir. Deprem dalgasının parametrelerinin belirlenmesi için mareograf istasyonları büyük öneme sahiptir. Bu nedenle daha doğru modellemeler yapabilmek için özellikle Ege denizinde daha çok mareograf istasyonlarının kurulması önerilmektedir.
- RIDE dalga modeli ile liman haricinde çok daha büyük denizel alanların rezonans modellemesi yapılabilmektedir. Bu doğrultuda, deniz içi fay hatlarına yakın koylarda bulunan yerleşim yerleri için olası deprem senaryolarına göre rezonans modellemeleri yapılarak risk haritalarının oluşturulması önerilmektedir.
- Dalga havuzunda liman içi çalkantı ve liman rezonansı fiziksel model deneyleri yapılarak RIDE dalga modeli ile karşılaştırılmış ve RIDE dalga modelinde eğimli taş yüzey ile düşey yüzeylerde kullanılabilecek yansımaya katsayısı değerleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda eliptik formda yumuşak eğim eşitliği kullanılarak üretilmiş farklı modellerinde fiziksel model deneyleri ile karşılaştırılması ve yumuşak eğim eşitliği için genel yansımaya katsayısı değerlerinin belirlenmesi önerilmektedir.
- RIDE dalga modelinin dalga-akıntı etkileşimini dikkate almaması nedeniyle liman rezonansı modellemesinde akıntının etkin hale geldiği periyotlarda sayısal model sonuçları fiziksel model sonuçlarından yüksek hesaplanmıştır. Bu nedenle RIDE dalga modelinin, dalga-akıntı etkileşimi ile ilgili terimlerin eklenmesiyle geliştirilmesi önerilmektedir.
- Liman içi çalkantı ve liman rezonansı sayısal modellerinin doğrulama çalışmalarında kullanılmak üzere literatüre dört ayrı fiziksel model deneyi kazandırılmıştır. Ayrıca liman rezonansı fiziksel model deneyleri ülkemiz özelinde bu konudaki ilk çalışma olmuştur.

KAYNAKLAR

1. WAMDI GROUP (1988). The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.
2. Tolman, H.L. (1999). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18, NOAA / NWS / NCEP/OMB Technical Note 166, 1-110.
3. Booij N., Ris, R.C., ve Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal region: 1- Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7667-7681.
4. Berkhoff, J.C.W. (1972). Computation of combined refraction-diffraction. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering*, 1, 471-490.
5. Madsen, P.A. ve Sorensen, O.R. (1992). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics part2. a slowly varying bathymetry. *Coastal Engineering*, 18, 183-204.
6. Kirby, J.T. ve Dalrymple, R.A. (1994). Combined refraction/ diffraction model REF/DIF-1, ver 2.5 documentation and user's manual. *Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering University. of Delaware*, CARC Report No: 94-22.
7. Maa J.P.-Y., Hsu T.-W. ve Lee D.-Y. (2002). The RIDE model: an enhanced computer program for wave transformation. *Ocean Engineering*, 29, 1441-1458.
8. Radder, A.C. (1979). On the parabolic equation method for water-wave propagation. *Journal of Fluid Mechanics*, 95, 159-176.
9. Booij, N. (1983). A note on the accuracy of the mild-slope equation. *Coastal Engineering*, 7, 191-203.
10. Copeland, G.J.M. (1985). A practical alternative to the "mild-slope" wave equation. *Coastal Engineering*, 9, 125-149.
11. Lee, C., Park, W. S., Cho, Y. S. ve Suh, K. D. (1998). Hyperbolic mild-slope equations extended to account for rapidly varying topography. *Coastal Engineering*, 34, 243-257.
12. Lee, C., Kim, G. ve Suh, K. D. (2003). Extended mild-slope equation for random waves. *Coastal Engineering*, 48, 277-287.
13. Tang, J., Shena, Y., Zhengb, Y. ve Qiu, D. (2004). An efficient and flexible computational model for solving the mild slope equation. *Coastal Engineering*, 51, 143-154.
14. İnan, A. (2007). *Genişletilmiş yumuşak eğim eşitliklerinin sayısal olarak modellenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-193.

15. Khellaf, M.C. ve Bouhade, M. (2004). Modified mild slope equation and open boundary conditions. *Ocean Engineering*, 31, 1713–1723.
16. Chen, W., Panchang, V. ve Demirbilek, Z. (2005). On the modeling of wave–current interaction using the elliptic mild-slope wave equation. *Ocean Engineering*, 32, 2135–2165.
17. Cui, L., Tong, F. ve Shi, F. (2011). Numerical simulation of wave-induced currents combined with parabolic mild-slope equation in curvilinear coordinates. *China Ocean Engineering*, 25, 457–468.
18. Lee, C., Kim, G. ve Suh, K. D. (2006). Comparison of time-dependent extended mild-slope equations for random waves. *Coastal Engineering*, 53, 311–318.
19. Berkhoff, J.C.W., Booy, N. ve Radder, A.C. (1982). Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. *Coastal Engineering*, 6, 255–279.
20. Vincent, C.L. ve Briggs, M.J. (1989). Refraction-diffraction of irregular waves over a mound. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115, 269–284.
21. Bokaris J. (2000). *Physical and numerical modelling of irregular wave propagation in coastal waters*. Phd. Thesis, London University Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 1–209.
22. Tabarek, R. (2019). *Multigrid method for mild-slope equation in coastal wave modelling*. Master's Thesis, Nazarbayev University, Kazakhstan, 1–41.
23. Zhao, L., Panchang, V., Chen, W., Demirbilek, Z. ve Chhabbra, N. (2001). Simulation of wave breaking effects in two-dimensional elliptic harbor wave models. *Coastal Engineering*, 42, 359–373.
24. Chen, W., Panchang, V. ve Demirbilek, Z. (2005). On the modeling of wave–current interaction using the elliptic mild-slope wave equation. *Ocean Engineering*, 32, 2135–2164.
25. Xing, X. (2009), *Computer modeling for wave oscillation problems in harbors and coastal regions*, Phd. Thesis, University Of Southern California Faculty Of The Graduate School, California, 1–174.
26. Sharma, A., Panchang, V., ve Kaihatu, J.M. (2014). Modeling nonlinear wave–wave interactions with the elliptic mildslope equation. *Applied Ocean Research*, 48, 114–125.
27. Danish Hydraulic Institute (2011). MIKE 21 elliptic mild-slope wave module. *Danish Hydraulic Institute*, Holsholm- Denmark. 1–60.
28. Aquaveo (2019). SMS User Manual (v12.1) the surface water modeling system, *Aquaveo*, Utah-United States. 737–772.
29. Deltares. (2013). PHAROS - user & technical manual - version 9.11.19731 *Deltares*, Delft-Netherlands.

30. Telemac Modelling System, (2012). Theoretical note and user manual version 6.2 Artemis software wave agitation, *Telemac*, France. 1-138.
31. Rabinovich, A.B. (2009). Handbook of coastal and ocean engineering chapter 11 seiches and harbor oscillations. *World Scientific Publication*, 243-286, Singapur.
32. Ippen A.T. ve Goda Y. (1963). Wave induced oscillations in harbors: the solution for a rectangular harbor connected to the open sea. Report No. 59. *Hydrodynamics Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*, Washington D. C.
33. Lee J.J. (1971). Wave induced oscillations in harbors of arbitrary geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, 45, 375-394.
34. Losada I.J., Gonzalez-Ondina, J.M., Diaz-Hernandez G. ve Gonzalez E.M. (2008). Numerical modeling of nonlinear resonance of semi-enclosed water bodies: Description and experimental validation. *Coastal Engineering*, 55, 21-34.
35. Dong G., Zheng Z., Gao J., Ma X., Dong Y. ve Wu H. (2020). Experimental investigation on special modes with narrow amplification diagrams in harbor oscillations. *Coastal Engineering*, 159, 1-16.
36. Wang G., Dong G. Perlin M., Ma X. ve Ma Y. (2011). An analytic investigation of oscillations within a harbor of constant slope. *Ocean Engineering*, 38, 479-486.
37. Xing, X., Lee, J.-J. ve Raichlen, F. (2011). Harbor resonance: A comparison of field measurements to numerical results. *International Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, Çin.
38. Bellotti G., Briganti R., Beltrami G.M. ve Franco L. (2012). Modal analysis of semi-enclosed basins. *Coastal Engineering*, 64, 16-25.
39. Bellotti G. (2007). Transient response of harbors to long waves under resonance conditions. *Coastal Engineering*, 54, 680-693.
40. Maa J. P-Y., Tsai C-H., Huang W-J. ve Tseng H-M. (2011). A preliminary study on Typhoon Tim induced resonance. *Ocean Dynamics*, 61, 411-423.
41. Hongjun Z., Jie Y. ve Guoping C. (2014). Tieshan port development plan: evaluation of the long wave induced resonance using a numerical mild-slope model. *Applied Mechanics and Materials*, 580-583, 2154-2165.
42. Wang G., Zheng J-H., Maa J. P-Y, Zhang J-S. ve Tao A-F. (2013). Numerical experiments on transverse oscillations induced by normal-incident waves in a rectangular harbor of constant slope. *Ocean Engineering*, 57, 1-10.
43. Chang Y. ve Wang E.H. (2017). A harbor resonance numerical model with reflecting, absorbing and transmitting boundaries. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 11, 413-432.

44. Ma X., Zheng Z., Zhang X. ve Dong G. (2020). Numerical investigation on special modes with narrow amplification diagram in harbor oscillations. *Ocean Dynamics*, 70, 1-19.
45. Sommerfield, A., (1896). Mathematische theorie der diffraction. *Mathematische Annalen*, 47, 317-374.
46. Penney, W. G. ve Price, A. T. (1952). The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters. *Mathematical and Physical Sciences*. 244, 236-253.
47. Cocquet P.H., Gander M.J. ve Xiang X. (2018), A finite difference method with optimized dispersion correction for the helmholtz equation, *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 125, 205-213.
48. Kirby J.T. ve Dalrymple R.A (1983). A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 136, 453-466.
49. Kirby J. T. ve Dalrymple R. A. (1994). Combined refraction/diffraction model REF/DIF 1 version 2.5 documentation and user's manual. *Center for Applied Coastal Research Department of Civil Engineering University of Delaware*, Newark, CACR Report No. 94-22, 1-172.
50. Mei C.C. ve Tuck E.O. (1980). Forward scattering by thin bodies. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 39, 178–191.
51. Yue D.K.P., ve Mei C.C. (1980). Forward diffraction of stokes waves by a thin wedge. *Journal of Fluid Mechanics*, 99, 33-52.
52. Kaihatu, J.M. (1997). Review and verification of numerical wave models for near coastal areas - part 1: review of mild slope equation, relevant approximations, and technical details of numerical wave models. *Naval Research Laboratory Oceanography Division*, Arlington, 1-27.
53. Maa J.P.-Y., Hsu T.-W. ve Hwung H.-H. (1998), RDE Model: a program for simulating water wave transformation for harbor planning special scientific report, no. 136, *School of Marine Science Virginia Institute of Marine Science College of William and Mary*, ABD, 1-112.
54. Suh K.D., Lee C. ve Park W.S. (1997). Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography, *Coastal Engineering*, 32: 91-117.
55. Hsu T.-W., Wen C.-C. (2001). A parabolic equation extended to account for rapidly varying topography, *Ocean Engineering*, 28: 1479–1498.
56. Watanabe A. T. ve Maruyama K. (1986). Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking, *Coastal Engineering in Japan*, 29: 19-39.

57. Maa, J.P.-Y., Hsu T.-W., Tsai C.-H. ve Juang W.J. (2000). Comparison of wave refraction and diffraction models. *Journal of Coastal Research*, 16, 1073-1082.
58. Thomson E.F., Chen E.S., ve Hadley L. L (1996). Validation of numerical model for wind waves and swell in harbors. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 122, 245-257.
59. AFAD (2020), 30 Ekim 2020 Sisam adası (İzmir Seferihisar açıkları) mw 6.6 depremi raporu, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı İşleri Bakanlığı*, Ankara Türkiye.
60. KOERI (2020), 30 Ekim 2020 Ege Denizi depremi. *Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Boğaziçi Üniversitesi*, İstanbul Türkiye.
61. Dogan, G.G, Yalciner, A.C., Yüksel Y., Ulutaş, E., Polat, O., Güler I., Şahin C., Tarih A. ve Kanoğlu U. (2021). The 30 October 2020 Aegean sea tsunami: post-event field survey along Turkish coast. *Pure and Applied Geophysics*. 178, 785–812.
62. İnternet: Flanders Marine Institute (VLIZ); Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) Sea level station monitoring facility. URL: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>. Son Erişim tarihi: 20.03.2022.
63. İnternet: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. URL:<https://deprem.afad.gov.tr/ddakatalogu>. Son Erişim Tarihi: 30.04.2022.
64. Demirci, H.E., Karaman, M. ve Bhattacharya, S. (2021). A survey of damage observed in İzmir due to 2020 Samos-İzmir earthquake. *Natural Hazards*, 111, 1047–1064.
65. Balas L. ve Eğriboyun O. (2022). Effect of diffracted waves on harbor resonance. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*.

EKLER

EK-1. Fiziksel model düzeneğinin kurulması aşamasına ait görseller



Şekil 1.1 Dalga havuzunda eğimli taban



Şekil 1.2 Dalga havuzunda eğimli taban üzerine dalgakıran çekirdeğinin yerleştirilmesi

EK-1. (Devam) Fiziksel model düzeneğinin kurulması aşamasına ait görseller



Şekil 1.3 Dalga havuzunda eğimli taban üzerine dalgakıran çekirdeğinin yerleştirilmesi



Şekil 1.4 Dalga havuzunda eğimli taban üzerine dalgakıran çekirdeğinin yerleştirilmesi

EK-1. (Devam) Fiziksel model düzeneğinin kurulması aşamasına ait görseller



Şekil 1.5 Dalgakıran filtre ve koruma tabakasının yerleştirilmesi



Şekil 1.6 Dalgakıran koruma tabakasının yerleştirilmesi

EK-1. (Devam) Fiziksel model düzeneğinin kurulması aşamasına ait görseller



Şekil 1.7 Dalgakıran koruma tabakasının yerleştirilmesi



Şekil 1.8 Dalgakıran koruma tabakasının yerleştirilmesi

EK-1. (Devam) Fiziksel model düzeneğinin kurulması aşamasına ait görseller



Şekil 1.9 Ana dalgakıranın tamamlanmış hali



Şekil 1.10 Deney düzeneğinin tamamlanmış hali

EK-1. (Devam) Fiziksel model düzeneğinin kurulması aşamasına ait görseller



Şekil 1.11 Deney düzeneğinin tamamlanmış hali



Şekil 1.12 Deney düzeneğinin tamamlanmış hali

EK-2. Kare ve dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri

Çizelge 2.1. Kare liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Sensör Numarası					
		1	2	3	4	5	6
1,70	0,58824	1,322	1,199	1,694	0,972	1,487	0,921
1,76	0,56818	1,416	1,093	3,521	1,895	0,997	2,365
1,82	0,54945	1,487	1,229	3,162	1,782	1,656	1,318
1,85	0,54054	1,463	1,153	2,842	1,474	1,487	1,191
1,87	0,53476	1,487	1,381	2,358	1,215	1,605	1,683
1,90	0,52632	1,440	1,897	2,390	1,183	1,622	2,127
1,93	0,51813	1,156	2,732	2,326	1,102	2,112	2,365
1,98	0,50505	1,746	3,779	3,731	1,523	3,025	2,191
2,04	0,49020	1,750	3,019	3,229	0,810	2,793	1,390
2,09	0,47847	1,558	2,109	2,794	0,859	1,927	1,381
2,15	0,46512	1,514	1,897	2,132	0,745	1,521	1,683
2,26	0,44248	2,289	1,639	2,132	1,134	1,555	2,270
2,35	0,42553	2,549	1,411	2,180	1,085	2,434	2,127
2,43	0,41152	1,510	1,108	0,937	0,761	1,791	0,476
2,51	0,39841	1,451	1,077	0,985	0,956	2,620	0,714
2,58	0,38760	1,204	1,502	1,712	0,875	2,907	1,048
2,67	0,37453	0,684	1,396	1,744	0,988	2,315	1,000
2,75	0,36364	1,038	1,502	1,340	1,118	1,656	1,349
2,80	0,35714	1,227	1,153	0,969	0,956	1,048	1,349
2,86	0,34965	1,628	1,396	0,856	1,085	0,794	2,016
3,14	0,31847	1,204	0,759	0,921	0,680	0,456	1,413
3,30	0,30303	2,053	0,835	1,405	0,697	0,541	2,016
3,43	0,29155	2,832	0,895	2,600	1,426	0,930	3,302
3,50	0,28571	2,738	0,865	2,665	1,085	0,625	3,191
3,60	0,27778	2,030	0,971	2,842	0,907	0,811	2,619
3,71	0,26954	3,044	0,986	4,021	1,361	1,082	3,445
3,77	0,26525	2,974	1,153	4,060	1,190	0,976	3,826
3,85	0,25974	3,705	2,246	6,315	2,041	1,960	5,572
3,95	0,25316	3,658	2,614	6,486	2,283	1,918	4,951
4,01	0,24938	3,422	2,275	6,842	2,170	2,103	4,34
4,05	0,24691	3,092	1,937	6,470	2,202	2,086	4,131
4,15	0,24096	2,738	1,775	5,927	2,608	2,011	3,778
4,36	0,22936	1,391	1,184	4,585	2,038	1,683	1,860
4,69	0,21322	2,355	1,593	3,818	2,313	2,557	1,399
4,85	0,20619	1,652	1,599	4,464	2,443	3,045	1,977
4,99	0,20040	3,115	2,913	4,983	2,955	2,919	3,467

EK-2. (Devam) Kare ve dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri

Çizelge 2.1. (Devam) Kare liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Sensör Numarası					
		1	2	3	4	5	6
5,03	0,19881	3,068	2,028	4,388	2,584	2,751	3,403
5,11	0,19569	3,044	3,152	4,173	2,042	2,389	3,038
5,22	0,19157	1,935	3,111	5,080	1,453	2,886	3,035
5,37	0,18622	1,392	2,074	3,585	1,098	1,974	2,061
5,50	0,18182	0,897	1,132	2,508	0,791	1,283	1,406
5,76	0,17361	1,345	1,556	2,315	0,824	1,569	1,486
5,88	0,17007	1,558	1,647	2,411	0,824	1,451	1,198
6,00	0,16667	1,534	1,516	1,849	0,727	1,519	1,118
6,17	0,16207	1,062	0,991	1,334	0,517	1,080	1,060
6,32	0,15823	1,038	0,762	0,997	0,438	0,506	0,735
6,59	0,15175	1,652	2,135	2,427	0,484	1,637	0,607
6,91	0,14472	1,534	2,089	3,119	0,775	1,721	1,374
7,11	0,14065	1,770	1,906	3,151	0,759	1,321	1,917
7,51	0,13316	1,676	2,196	2,717	0,824	1,721	1,504
7,85	0,12739	1,982	2,410	3,054	0,808	2,362	1,693
8,00	0,12500	1,860	2,200	3,195	0,841	2,574	1,813
8,35	0,11976	2,190	2,716	3,323	1,084	2,692	2,035
8,75	0,11429	2,614	2,853	3,754	1,278	2,827	1,765
9,18	0,10893	2,564	2,625	3,850	1,715	2,742	2,019
9,62	0,10395	2,308	2,443	2,971	1,795	1,514	2,019
9,98	0,10020	1,601	1,851	2,236	1,407	2,002	1,431
10,78	0,09276	1,797	2,467	3,213	1,134	1,929	2,300
11,52	0,08681	1,253	1,257	1,963	0,761	1,286	1,182
12,32	0,08117	0,591	0,739	1,090	0,471	0,609	0,631
12,84	0,07788	0,899	1,027	1,801	0,535	1,016	0,687
13,24	0,07553	1,301	1,425	1,947	0,923	1,269	0,623
14,00	0,07143	2,341	2,479	2,702	1,836	2,386	2,119
14,52	0,06887	2,862	3,004	3,359	2,219	2,928	2,444
15,00	0,06667	3,240	3,387	3,716	2,479	3,385	2,700
15,80	0,06329	3,997	4,153	4,332	3,321	4,282	3,85
16,44	0,06083	4,683	4,920	5,136	3,726	4,731	4,252
17,28	0,05787	5,179	5,394	5,711	4,131	5,331	4,808
17,96	0,05568	5,298	5,456	5,76	4,455	5,450	4,888
20,56	0,04864	6,078	6,084	6,409	5,330	6,127	5,591
21,04	0,04753	6,385	6,590	6,847	5,868	6,550	6,118
22,00	0,04545	7,332	7,356	7,820	6,642	7,481	6,917

EK-2. (Devam) Kare ve dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri

Çizelge 2.1. (Devam) Kare liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Sensör Numarası					
		1	2	3	4	5	6
23,00	0,04348	8,071	8,476	6,993	8,042	7,587	8,071
23,50	0,04255	7,977	8,540	7,025	7,992	7,620	7,977
24,00	0,04167	7,639	7,663	8,048	7,209	7,819	7,301
25,00	0,04000	7,179	7,165	7,327	6,751	7,235	6,88
26,50	0,03774	6,254	6,165	6,276	5,851	6,158	5,851
28,00	0,03571	6,835	6,743	7,042	6,512	6,888	6,566
30,00	0,03333	6,301	6,242	6,357	5,948	6,293	5,996
35,00	0,02857	4,323	4,285	4,295	4,144	4,32	4,128

Çizelge 2.2. Dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Sensör Numarası						
		1	2	3	4	5	6	7
1,50	0,66667	2,072	0,729	1,352	1,739	0,402	1,691	0,322
1,54	0,64935	1,507	0,680	1,049	1,272	0,498	1,177	0,445
1,58	0,63291	1,413	0,632	0,668	1,079	0,354	0,928	0,430
1,62	0,61728	1,766	0,826	0,715	1,191	0,418	0,713	0,399
1,68	0,59524	1,342	0,761	0,604	0,886	0,434	0,481	0,322
1,75	0,57143	1,790	0,859	0,779	0,998	0,643	0,431	0,246
1,80	0,55556	1,908	0,923	1,129	0,982	0,948	0,862	0,706
1,84	0,54348	1,837	1,264	1,208	0,950	0,997	1,210	0,767
1,86	0,53763	1,743	1,296	1,336	0,998	0,981	1,260	0,783
1,90	0,52632	2,002	1,426	1,797	1,288	1,190	1,641	1,059
1,94	0,51546	2,167	1,782	2,687	2,013	1,704	2,171	1,335
1,99	0,50251	1,884	2,122	3,911	3,300	2,250	1,575	1,827
2,04	0,49020	1,672	2,122	3,323	2,818	2,283	1,989	1,995
2,10	0,47619	1,554	1,782	2,306	2,270	1,865	1,890	1,612
2,16	0,46296	1,815	1,779	2,393	2,077	1,841	2,069	1,722
2,22	0,45045	1,792	1,731	2,251	1,835	1,696	2,019	1,430
2,28	0,43860	1,414	1,537	2,219	1,803	1,599	1,936	1,261
2,36	0,42373	1,155	1,440	1,823	1,368	1,389	1,506	0,953
2,44	0,40984	0,754	0,663	0,903	0,805	0,630	0,645	0,492
2,52	0,39683	0,967	0,938	1,252	1,095	0,937	0,910	0,492
2,63	0,38023	0,896	0,987	1,316	0,805	0,888	0,861	0,292

EK-2. (Devam) Kare ve dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri

Çizelge 2.2. (Devam) Dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Sensör Numarası						
		1	2	3	4	5	6	7
2,75	0,36364	1,084	1,213	1,379	1,095	0,969	1,076	0,231
2,86	0,34965	1,438	1,617	1,965	1,288	1,227	1,225	0,507
3,00	0,33333	1,721	1,795	2,393	1,352	1,227	1,506	0,923
3,12	0,32051	1,391	1,391	1,553	0,821	0,840	0,960	0,800
3,26	0,30675	1,249	1,278	1,522	0,725	0,646	0,728	0,876
3,43	0,29155	2,452	2,362	2,647	1,224	0,985	1,258	1,937
3,62	0,27624	2,075	2,103	2,457	0,934	0,872	0,976	1,691
3,78	0,26455	2,829	3,057	3,344	1,014	1,034	1,241	2,583
4,00	0,25000	3,701	3,348	3,915	1,079	1,082	1,274	3,321
4,11	0,24331	3,253	3,009	3,883	0,934	1,017	1,043	3,044
4,24	0,23585	3,018	2,847	3,598	0,789	0,824	1,092	3,09
4,46	0,22422	2,617	2,459	2,520	0,596	0,565	0,679	2,245
4,85	0,20619	3,449	3,078	3,760	1,423	1,359	1,498	2,468
5,03	0,19881	3,253	2,928	3,503	1,513	1,534	1,655	2,414
5,11	0,19569	3,348	2,944	3,455	1,546	1,405	1,622	2,398
5,15	0,19417	3,065	2,831	3,503	1,465	1,421	1,688	2,352
5,31	0,18832	2,900	2,572	3,122	1,401	1,357	1,523	1,922
5,55	0,18018	1,815	1,698	1,807	0,869	0,824	0,894	1,153
5,80	0,17241	2,214	2,070	2,393	1,290	1,244	1,293	1,141
5,96	0,16779	2,167	1,941	2,251	1,548	1,389	1,459	1,126
6,28	0,15924	2,590	2,402	2,734	1,620	1,445	1,500	1,187
6,62	0,15106	3,014	2,863	3,218	1,693	1,502	1,541	1,249
6,94	0,14409	3,391	3,558	3,978	2,096	2,051	2,204	1,419
7,26	0,13774	3,674	3,656	4,089	2,499	2,487	2,635	1,496
7,92	0,12626	4,168	4,125	4,549	3,306	3,182	3,514	0,864
8,48	0,11792	5,793	5,516	5,769	4,063	4,134	4,392	1,095
9,00	0,11111	6,288	5,985	6,292	5,063	5,007	5,022	1,820
9,18	0,10893	5,935	5,629	6,118	5,079	5,233	5,205	2,175
9,40	0,10638	5,840	5,839	6,150	4,628	4,684	4,873	2,468
9,60	0,10417	5,275	5,289	5,738	3,983	4,037	4,160	2,375
9,88	0,10121	4,239	4,157	4,486	3,144	3,133	3,232	1,974
10,56	0,09470	4,380	4,189	4,184	3,193	3,182	3,298	1,758
10,96	0,09124	4,639	4,303	4,898	3,644	3,650	3,763	1,450
11,37	0,08795	3,933	3,656	4,089	3,144	3,133	3,216	1,743
11,90	0,08403	3,014	2,847	3,138	2,419	2,390	2,470	1,450

EK-2. (Devam) Kare ve dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri

Çizelge 2.2. (Devam) Dikdörtgen liman rezonans deneyinde basen içindeki sensörlerde ölçülen dalga yükseklikleri (cm)

Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Sensör Numarası						
		1	2	3	4	5	6	7
12,06	0,08292	2,708	2,604	2,853	2,225	2,164	2,155	1,327
12,84	0,07788	1,672	1,634	1,728	0,839	0,775	0,812	0,925
13,50	0,07407	3,580	3,526	3,772	2,938	2,988	3,017	1,866
14,00	0,07143	5,464	5,435	5,484	4,950	4,942	4,906	2,946
14,50	0,06897	6,406	6,389	6,388	5,853	5,798	5,901	3,717
14,80	0,06757	6,665	6,632	6,609	6,031	6,024	6,100	3,887
15,00	0,06667	7,089	6,988	7,133	6,547	6,476	6,564	4,365
15,11	0,06618	7,418	7,360	7,418	7,030	6,912	6,962	4,689
15,35	0,06515	7,206	7,004	7,228	6,692	6,670	6,680	4,396
15,50	0,06452	7,300	7,096	7,344	6,761	6,696	6,760	4,365
15,90	0,06289	7,891	7,679	7,936	7,327	7,327	7,326	5,013
16,30	0,06135	8,559	8,505	8,496	8,007	8,104	8,059	5,707
16,90	0,05917	10,206	10,206	10,064	9,576	9,624	9,624	7,142
17,50	0,05714	11,458	11,243	11,36	10,805	10,886	10,689	7,928
18,00	0,05556	11,813	11,729	11,728	11,193	11,258	11,006	8,129
18,12	0,05519	11,836	11,761	11,648	11,209	11,242	11,006	8,175
18,25	0,05479	11,742	11,745	11,568	11,064	11,224	10,989	8,114
19,00	0,05263	10,82	10,498	10,72	10,239	10,368	10,156	7,651
20,56	0,04864	8,174	8,185	8,192	7,877	7,910	7,809	6,016
22,00	0,04545	6,237	6,257	6,304	5,985	5,985	6,044	4,334
23,50	0,04255	4,394	4,418	4,560	4,351	4,254	4,262	3,178
25,00	0,04000	3,165	3,353	3,696	3,623	3,624	3,563	2,823



Gazili olmak ayrıcalıktır