



T.C.

**BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

KAZIKLI DALGAKIRANLARDA DALGA İLETİMİNİN MODELLENMESİ

Serhat OKUR

BURDUR, 2022

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

KAZIKLI DALGAKIRANLARDA DALGA İLETİMİNİN MODELLENMESİ

Serhat OKUR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alp KÜÇÜKOSMANOĞLU

II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat AKSEL

BURDUR, 2022

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“Kazıklı Dalgakıranlarda Dalga İletiminin Modellenmesi”** başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

21 / 10 / 2022

(İmza)

Serhat OKUR

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum Yüksek Lisans Tez çalışmamda bana yön gösteren, destek ve tecrübelerini esirgemeyen, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Alp Küçükosmanoğlu'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırmada karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan, kendisini tanımaktan onur duyduğum değerli ikinci Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat Aksel'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Flow-3D yazılımı ile ilgili verdiği desteklerden dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Şevket Çokgör'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşım Şaban Selçuk'a ve kıymetli büyüğüm Yusuf Katıksız'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında beni her anlamda destekleyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ekim, 2022

Serhat OKUR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL DİZİNİ.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	vvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Flow-3D.....	8
3.2. Hayashi Ve Ark.	8
3.2.1. Deneysel Model.....	9
3.2.2. Teorik Model	9
3.3. Modelleme Çalışmaları	10
3.3.1. Model 1.....	11
3.3.2. Model 2.....	12
3.3.3. Model 3.....	12
3.3.4. Model 4.....	13
3.3.5. Model 5.....	13
3.3.6. Model 6.....	13
3.3.7. Model 7.....	14
3.3.8. Model 8.....	15
3.3.9. Model 9.....	16
3.3.10. Model 10.....	17
3.3.11. Model 11.....	18
3.4. Modelleme Çalışmalarının Değerlendirilmesi	18
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	20
4.1. Model 1 Değerlendirmesi.....	20
4.2. Model 2 Değerlendirmesi.....	22
4.3. Model 3 Değerlendirmesi.....	24
4.4. Model 4 Değerlendirmesi.....	26
4.5. Model 5 Değerlendirmesi.....	28
4.6. Model 6 Değerlendirmesi.....	30
4.7. Model 7 Değerlendirmesi.....	32
4.8. Model 8 Değerlendirmesi.....	34
4.9. Model 9 Değerlendirmesi.....	36
4.10. Model 10 Değerlendirmesi.....	38
4.11. Model 11 Değerlendirmesi.....	48
4.12. Bulgular	49
5. SONUÇ.....	52
KAYNAKLAR.....	54

ŞEKİL DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Dalga kanalı içerisindeki kazık yerleşimi (Hayashi vd., 1966)	9
Şekil 3.2. Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel ve teorik modelleme sonuçları (Hayashi vd., 1966).....	10
Şekil 3.3. Tüm modellemelerde koordinat ekseninin kanal içerisindeki konumu	11
Şekil 3.4. Model 1 için oluşturulan dalga kanalı.....	12
Şekil 3.5. Eleman hesap boyutunun (mesh size) azaltıldığı bölgeler ve ölçüm yapılan noktalar	14
Şekil 3.6. Eleman hesap boyutunun (mesh size) azaltıldığı bölgelere eklenen 7. ve 8. noktalar	15
Şekil 3.7. Model 9 için kanal içerisindeki kazıkların yerleşimi	16
Şekil 3.8. Model 10 için kanal içerisindeki kazıkların yerleşimi	17
Şekil 4.1. Model 1 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	21
Şekil 4.2. Model 1 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%).....	22
Şekil 4.3. Model 2 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	23
Şekil 4.4. Model 2 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%).....	24
Şekil 4.5. Model 3 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	25
Şekil 4.6. Model 3 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%).....	26
Şekil 4.7. Model 4 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	27
Şekil 4.8. Model 4 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%).....	28
Şekil 4.9. Model 5 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	29
Şekil 4.10. Model 5 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	30

Şekil 4.11. Model 6 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	31
Şekil 4.12. Model 6 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	32
Şekil 4.13. Model 7 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	33
Şekil 4.14. Model 7 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	34
Şekil 4.15. Model 8 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	35
Şekil 4.16. Model 8 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	36
Şekil 4.17. Model 9 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	37
Şekil 4.18. Model 9 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	38
Şekil 4.19. $b/D=0,058$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	40
Şekil 4.20. $b/D=0,081$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	41
Şekil 4.21. $b/D=0,100$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	42
Şekil 4.22. $b/D=0,164$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	43
Şekil 4.23. $b/D=0,222$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	44
Şekil 4.24. $H_i=0,186$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri (%)	45
Şekil 4.25. $H_i=0,1566$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	45
Şekil 4.26. $H_i=0,1277$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	46
Şekil 4.27. $H_i=0,0978$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	46

Şekil 4.28. $H_i=0,0684$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	47
Şekil 4.29. $H_i=0,039$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)	47
Şekil 4.30. Model 11 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	48
Şekil 4.31. Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ ve $C=0,9$ katsayıları için yapılan teorik çalışmalar sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)	49



ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Model 1’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	21
Tablo 4.2. Model 2’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	23
Tablo 4.3. Model 3’te elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	25
Tablo 4.4. Model 4’te elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	26
Tablo 4.5. Model 5’te elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	29
Tablo 4.6. Model 6’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	31
Tablo 4.7. Model 7’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	33
Tablo 4.8. Model 8’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	35
Tablo 4.9. Model 9’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	37
Tablo 4.10. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	39
Tablo 4.11. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayılarının devamı (r_T).....	39
Tablo 4.12. Model 11’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	40
Tablo 4.13. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri.....	48
Tablo 4.14. Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ ve $C=0,9$ katsayıları için yapılan teorik çalışmalar sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T).....	50
Tablo 4.15. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ katsayısı için yapılan teorik çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri.....	50
Tablo 4.16. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=0,9$ katsayısı için yapılan teorik çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

H_i	: Gelen Dalga Yüksekliği
H_t	: İletilen Dalga Yüksekliği
(r_T)	: Dalga İletim Katsayısı
D	: Kazık Çapı
b	: Kazık Arası Mesafe
h	: Su Derinliği



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Kazıklı Dalgakıranlarda Dalga İletiminin Modellenmesi

Serhat OKUR

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alp KÜÇÜKOSMANOĞLU

II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat AKSEL

Ekim, 2022

Bu tez çalışmasında daha önce fiziksel olarak modellenmiş bir kazıklı dalgakıran modeli, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımı olan Flow-3D ile sayısal olarak modellenmiştir. Yapılan sayısal modellemeler sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, fiziksel model sonucu elde edilmiş dalga iletim katsayıları ile kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalar ile model içerisindeki sınır koşullar üzerinde değişiklikler yapılarak elde edilen sayısal model sonuçları ile fiziksel model sonuçları arasındaki uyumluluk incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kazıklı dalgakıran, sayısal model, dalga iletim katsayısı

SUMMARY

M. Sc. Thesis

Modeling of Wave Transmission through Pile Breakwater

Serhat Okur

**Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences**

Civil Engineering Department

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Alp KÜÇÜKOSMANOĞLU

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Murat AKSEL

October, 2022

In this thesis, a pile breakwater model which is modeled previously physically is numerically modeled with Flow-3D, a Computational Fluid Dynamics (CFD) software. The wave transmission coefficients obtained as a result of the numerical model were compared with the wave transmission coefficients obtained as a result of the physical model. The compatibility between the numerical model results and the physical model results was examined by making changes on the boundary conditions in the numerical model study.

Keywords: pile breakwater, numerical model, wave transmission coefficient

1. GİRİŞ

Dalgakıranlar isminden de anlaşılacağı üzere kıyıya gelen dalgaları kırmak amacı ile inşa edilen yapılardır (Ergin, 2009). Daha geniş tanımı ile dalgakıranlar; kıyıları açık denizden gelen etkilere karşı korumak, kıyı alanını korumak, saikin su alanları oluşturmak, sahil ve liman işlevlerinin güvenli olarak devam ettirilmesini ve liman stabilitesini sağlamak için dizayn edilen kıyı koruma yapılarıdır (Yüksel, 2016). Dünya üzerinde çok çeşitli dalgakıran tipleri ile karşılaşmak mümkündür. Fakat dalgakıranlar 3 ana başlık altında toplanabilirler. Bunlar; taş dolgu tip dalgakıranlar, düşey veya yatay yüzölçümü kompozit tip dalgakıranlar ve özel tip dalgakıranlardır. Günümüzde ise en yaygın olarak kullanılan dalgakıran tipi taş dolgu dalgakıranlardır (Yüksel, 2011). Bu tip dalgakıranlar taş ocağı taşından ya da özel bir kalıp ve şekilde imal edilen beton elemanlardan seçilen koruma tabakası ile tasarlanmış dalgakıranlardır. Koruma tabakası için seçilen bu taşlar özel şekillerde hazırlanmış ve rastgele yerleştirilmiş beton elemanlardır (Ergin, 2009). Fakat bu tip dalgakıranların, derinliğin büyük olduğu yerlerde tercih edilmesi malzeme miktarını çok fazla arttıracığından, inşa edilirse yüksek maliyetlerle karşılaşılacaktır. Ayrıca dolgu yüksekliğinin artması deniz tabanında işgal edilecek alanında artmasını beraberinde getirecektir. Bu durumun çevresel açıdan uygunluğu da değerlendirilmesi gereken diğer bir konudur. Bazı projelerde uygun yerlerde kazıklı dalgakıranlar tavsiye edilmektedir (Kyung vd., 2006).

Kazıklı dalgakıranlar yan yana tek sıra veya çift sıra halinde deniz tabanına çakılan silindirik kesitli kazıklardan oluşmaktadır. Bu kazıklar çelik veya betonarme olarak tasarlanmaktadır. Kazıklı dalgakıranlar palplanş şeklinde planlanabilmektedir. Bu tip dalgakıranlar düşey ya da eğik olarak inşa edilebilmektedir (Yüksel, 2011).

Açık deniz ve kıyı yapıları, ekonomik ömrü boyunca etkisi altında kalacakları belirgin dalga yüklerine göre tasarlanmaktadır. Bu sebepten dolayı kıyı ve deniz yapılarına olağan dışı şartlarda etkiyecek olan dalga yüklerinin hesaplanması önemli bir husustur (Kabdaşlı, 1985). Bu durum dalgakıran tipi seçimi yapılırken göz önünde bulundurulmalıdır. Dalgakıran tipi seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus; zeminin durumu, maliyet ve dalga koşullarıdır (Yüksel, 2011). Bu koşullar altında günümüzde en çok tercih edilen dalgakıran tipi taş dolgu dalgakıranlardır. Bu tip dalgakıranlar taş dolgu temel üzerine inşa edilirler. Fakat taş dolgu dalgakıranların derinliğin büyük olduğu yerlerde tercih edilmesi malzeme miktarını çok fazla arttırdığından maliyeti büyük oranda artırmaktadır. Benzer durumlarda dalga kuvvetlerinin

uygun olduğu yerlerde dalgakıran tipi olarak kazıklı dalgakıranları seçmek doğru bir karar olacaktır (Yüksel, 2011). Birbirine yakın veya aralıklı şekilde çakılan kazıklar kalıcı yapılardır. Kazıklı dalgakıranların avantajları ise az yer kaplaması, zayıf zemin koşullarına uygun olması, rıhtım olarak kullanılabilmesi, maliyetinin derin sularda taş dolgu dalgakırana göre düşük olması ve su dolaşımına olanak sağlamasıdır. Dezavantajları ise yansımaya neden olması, zeminde erozyona müsait/açık olması ve çürüme tehlikesinin olması söylenebilir (Yüksel, 2011).



2. GENEL BİLGİLER

Kazıklı dalgakıranlar aralıklı inşa edildiğinde dalgakırana gelen dalga enerjisinin bir kısmı kırılmakta ancak bir kısmı geçerek kıyıya doğru ilerlemektedir. Korunaklı bir alan oluşturmak için tasarlanan dalgakıranlardan geçen dalga yüksekliğinin belli bir değeri aşmaması istenmektedir. Bu nedenle literatürde çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Kıyı Mühendisliği laboratuvarında kazıklı dalgakıranların dalga geçirimsizliği deneyi yapılmıştır. Çalışma sonunda geçirimsizlikte en önemli etkenin dalga dikliği olduğu belirlenmiştir. Dalga dikliği arttıkça geçirgenlik katsayısının azaldığı gösterilmiştir (Bilici, 2014).

Bir diğer çalışmada kazıklar arasında dalga geçirimini önleyecek levhalar yerleştirilmiş bir kazıklı dalgakıran modeli incelenmiştir. Kazıklı dalgakıranlara gelen yükler incelenerek performansı gözlemlenmiştir. Deney sonunda ise kazıklar arasına yerleştirilen levhaların gelen dalgayı sönmüleme noktasında etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Buğra, 2005).

Kazıklı dalgakıranlara etkiyen düzenli ve düzensiz dalgalar sonucunda, dalgakıranın dalga iletim performansı ve dalga kırılmaları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonunda kazıklı dalgakıranlarda artan dalga dikliği değeri ile yansıma katsayısının arttığı sonucuna varılmıştır (Mutlu, 1998).

Bir tsunami dalgasının dairesel kesitli kazıklı dalgakıran ile etkileşimi sayısal olarak incelenmiştir. Dalga yüksekliğinin su derinliğine oranı 0,25 değerinden küçük olduğu durumlarda sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçların çok iyi bir uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Bu oran 0,25 değerini geçtiğinde doğru orantılı şekilde sayısal sonuçlar deneysel sonuçlardan uzaklaşmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlarda silindirler arasındaki boşlukların azalması ile dalga iletiminin azaldığı ve dalga yansımasının arttığı gösterilmiştir. Dalga iletim ve yansıma katsayılarının dalga yüksekliğindeki değişime çok duyarlı olmadığı belirtilmiştir (Hongwei vd., 2010).

Kazıklı dalgakıran ile bağlanan kazık destekli bir iskelenin yapısı laboratuvar ortamında 1/30 ölçek ile bir kanalda test edilmiştir. Düzenli ve düzensiz dalgalar altında dalga, oyulma ve yük karakteristiği incelenmiştir. Dalga etkisi altındaki yapının dalga iletimini azalttığı gösterilmiştir. Yapıda şiddetli dalga yansıması gözlemlendiği belirtilmiştir. Dalga iletiminin %20 ile %40 arasında olduğu sonucuna varılmıştır (Huang ve Chen, 2020).

Bir diğerk çalışmada OpenFoam yazılımı kullanılarak tek sıralı bir kazık dalgakıran ile etkileşime giren dalgaların hidrodinamik özellikleri araştırılmıştır. Türbülanslı akış ile başa çıkabilmek adına Büyük Girdap Simülasyon (Large Eddy Simulation) modeli kullanılmıştır. Bu sayısal model yayınlanmış deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Yapılan çalışmanın kazık dalgakıranların pratik tasarımı için kılavuz olacağı belirtilmiştir. Modelde kazıkların ön noktasında en büyük dalga yüksekliği olduğu gösterilmiştir. Dalga yüksekliğinin su derinliğine oranının artması ve kazık aralığının azalması ile kazık önündeki dalga yükselmesinin arttığı belirtilmiştir. Kazık önündeki dalga yükselmesinin kazık çapındaki değişimden nerede ise bağımsız olduğu gösterilmiştir (Yin vd., 2021).

Daha önce dikdörtgen kesitli kazıklar için geliştirilen kazıklı dalgakıran modeli değiştirilerek dairesel kesitli kazıklar kullanılan bir perde duvar-kazıklı dalgakıran modeli oluşturulmuştur. Dalgakıranın hidrodinamik özelliklerini hesaplamak için matematiksel bir model sunulmuştur. Modelin geçerliliğini incelemek için kazıklar arası mesafeler, dalga yüksekliği ve periyodu gibi parametreler üzerinden laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri ve model arasındaki karşılaştırmalarla matematiksel modelin deneysel sonuçlara yeterince yakın olduğu gösterilmiştir. Kazıklar arasındaki mesafe azaldıkça iletim katsayısı azalmıştır. Su derinliğinin artmasının dalga iletimini azalttığı belirtilmiştir (Suh vd., 2007).

Tek sıra dikey dairesel kazıklardan oluşan kazıklı dalgakıran ile dalga etkileşimleri bir dizi benzeşim ile incelenmiştir. Çalışmada sayısal analiz yazılımı olan OpenFoam kullanılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki mevcut deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların çok iyi bir uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Kazık çapı, dalga yüksekliği, kazık merkezleri arası mesafeler gibi farklı değerlerin kombinasyonu incelenerek dalgakıranın hidrodinamik davranışının değerlendirilmesi yapılmıştır. Sabit kazık çapı ve azalan kazık arası mesafesi için iletim katsayısının azaldığı ve yansıma katsayısının arttığı gösterilmiştir. Kazık arası mesafe ve kazık çapı sabit olması durumunda dalga yüksekliğinin artması iletim katsayısının azalmasını sağlamıştır (Frantzis vd., 2020).

Bir diğerk çalışmada kare kesitli kazıklı dalgakıran ile dairesel kesitli kazıklı dalgakıranların hidrodinamik özellikleri karşılaştırılmıştır. Kare kesitli kazıklı dalgakıranlar için sayısal model oluşturulmuştur. Sayısal model oluşturulurken kazıkların pürüzlülüğü dikkate alınmamıştır. Türbülans akışını modellemek için RNG (Re-Normalisation Group) türbülans modeli kullanılmıştır. Yapılan deneysel model sayısal model ile doğrulanmıştır. Kare tip kazıklı dalgakıranların yansıma miktarının dairesel

kesitli kazık dalgakıranlara göre %2,5 daha fazla olduğu gösterilmiştir. Kare kesitli kazıklı dalgakıranların iletim katsayılarının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Yerleştirilen kazıkların açılarının dalga iletim katsayısına etkisi olduğu vurgulanmıştır (Mojtahedi vd., 2020).

Çok sıralı perde duvar-kazıklı dalgakıranın çeşitli hidrodinamik özelliklerini belirleyebilen matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin geçerliliğini incelemek için kazık arası boşluklar ve sıralar arasındaki mesafeler kombine edilerek çift sıralı ve üç sıralı dalgakıranlar için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Ölçüm ve tahmin arasındaki karşılaştırmalar matematiksel modelin deneysel sonuçların önemli özelliklerinin çoğunu yeterince sağladığını göstermiştir. İletim katsayısının su derinliğindeki artışla azaldığı belirtilmiştir. Tek sıralı dalgakıranlara kıyasla çok sıralı dalgakıranlarda dalga iletiminin önemli ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Uzunluğu 10 metre olan prototip dalgakıran için ortalama olarak dalga iletim katsayısının 6 saniyeden küçük dalga periyotları için 0,3'ten küçük olacağı ve 9 saniyelik dalga periyodu için yaklaşık 0,45 olacağı gösterilmiştir. Dalga iletimini azaltmak son derece önemli olmadıkça üç sıralı dalgakıran önerilmemiştir (Suh ve Ji, 2009).

Düzenli dalgaların bir dizi tek sıra dikdörtgen kazıklı dalgakıranlar ile etkileşimi incelenmiştir. Kazıklı dalgakıranların yansıma, iletim ve enerji kaybı katsayılarının açık denklemlerini elde etmek için bir dizi formül türetilmiştir. Elde edilen tahminler literatürdeki deneysel veriler ile kıyaslanmış ve uyumlu olduğu gösterilmiştir. Mevcut yöntemin yeterli tahminler sağladığı belirtilmiştir (Zhu, 2011).

Laboratuvar ortamında bir dalga kanalında genişletilmiş başlıklı kazıklı dalgakıranların hidrodinamik performansı üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Yakın aralıklı kazıklı dalgakıranların inşası zor ve maliyetlidir. Bu sebep ile dalga enerjisinin yoğunlaştığı su yüzeyinin yakınında büyütülmüş kazık başlıkları ile modifiye edilerek kazıklı dalgakıran tasarlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonunda genişletilmiş başlıklı kazıklı dalgakıranlarda en düşük dalga iletim katsayısının, kazık aralığının kazık başlık çapına oranının 0,2 olduğu durumda gerçekleştiği gösterilmiştir. Dalga dikliğinin artması ile iletim katsayısını azalttığı belirtilmiştir (Suvarna, 2020).

Geleneksel daire kesitli kazıklı dalgakıranların su yüzeyine yakın kısımlarına konik şekilde başlık yerleştirilerek laboratuvar ortamında bir dizi deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda çift sıralı konik başlıklı kazık dalgakıran yapısının diğer dalgakıran tipleri ile karşılaştırıldığında iletim katsayısının daha düşük olduğu sonucuna

varılmıştır. Kazık aralığının kazık başlığının en geniş kısmına oranının azalmasıyla iletim katsayısını düşürdüğü belirtilmiştir (Sathyanarayana, 2021).

Laboratuvar ortamında iki sıra kazık dalgakıran arasına yerleştirilen kaya dolgular ile oluşturulan kazıklı-kaya dalgakıranın hidrodinamik performansı deneysel çalışma ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dalga iletim katsayısının 0,3 ile 0,4 arasında olduğu gösterilmiştir. Yapının etkin bir şekilde çalıştığı belirtilmiştir (Xuan, 2020).

Kazıklı dalgakıranlarda dalga etkileşimleri sayısal model oluşturularak incelenmiştir. Kazıklı dalgakıran modeli için dalga yansıma ve iletim katsayıları literatürdeki mevcut çalışmalar ile kıyaslanmış ve doğrulanmıştır. Yapılan çalışmada dalgakıran pürüzlülüğü, yapı kalınlığı ve akışkan viskozitesi üzerinde durulmuştur. Yapı gözenekliliğinin azalması ile akış direnci daha yüksek olabileceğinden daha fazla dalga enerjisini yayararak iletim katsayısı azaltılabilir. Akışkan viskozitesi iletilen dalga yüksekliğini azaltmada önemli rol oynamıştır. Özellikle dalgakıranın üst bölgelerinde viskozitenin artmasının iletilen dalga yüksekliğini azaltmada önemli etki sağlayacağı belirtilmiştir. Yapı kalınlığının artması sürtünmeyi arttıracığından iletim katsayısında azalmayı sağlamaktadır (Zhu ve Xie, 2015).

Daha önce geliştirilmiş genişletilmiş başlıklı kazıklı dalgakıranlarda başlık kısmına gözenekler yerleştirilerek delikli genişletilmiş başlıklı kazıklı dalgakıran modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen kazıklı dalgakıran hidrolik verimliliğini arttırmak için bir dizi laboratuvar deneyine tabi tutulmuştur. Başlıklardaki gözeneklerin dağılım yüzdesi ve boyutunun dalga iletimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gözenekli kazık başlıklarının gözeneksiz kazık başlıklarına göre dalga iletim katsayısını %10 ile %18 arasında azalttığı gösterilmiştir. Dalga dikliğinin artmasının iletim katsayısını azalttığı, yansıma katsayısını arttığı görülmüştür. Gözeneklerin dağılım oranının %75 olduğu durumda çok iyi hidrolik performans gösterdiği belirtilmiştir (Suvana vd., 2021).

Bir diğer çalışmada tek sıra ve çift sıra kazıklı dalgakıranın verimliliği sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal modelleme hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı REEF3D kullanılarak yapılmıştır. Sayısal olarak modellenen kazıklı dalgakıranların verimliliği iletim katsayısı açısından incelenmiştir. Modellenen çalışma daha önce yapılmış fiziksel model ile kıyaslanmış ve %91,5 oranında uyum sağladığı gösterilmiştir. Simülasyonlar kazık arası ve kazık yığınları arası mesafelerin değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplama zamanını ve depolama alanını azaltmak için simetri sınır koşulu uygulanmıştır. Tek sıralı kazıklı dalgakıranlarda kazık arası mesafeler azaldıkça ve dalga dikliği arttıkça iletim katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Dalga iletimini azaltmak

amacı ile kazık arası mesafelerin azaltılmasının iki sıra kazık uygulamasından daha etkili olduğu gösterilmiştir (Mathew vd., 2018).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kazıklı dalgakıranların verimliliğini arttırmak için çalışmalar devam etmektedir. Deneysel modellemeler kadar sayısal modellemeler de kazıklı dalgakıran tasarımında kullanılabilir. Sonlu elemanlar/farklar metodu temeline dayanan sayısal modelleme programları hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu sayısal modelleme programlarından biri de Flow-3D'dir.

Çalışmada Flow-3D modelleme programının kazıklı dalgakıran modellemelerindeki başarısını görebilmek için daha önce Hayashi ve arkadaşlarının (1966) laboratuvar ortamında yapmış oldukları fiziksel deney çalışması Flow-3D'de modellenmiştir.

3.1. Flow-3D

Flow-3D (Flow Science, Inc., 2019) mühendislik uygulamaları için geliştirilmiş üç boyutlu sıvı akış modellemesi yapan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımıdır. Son zamanlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında sayısal modelleme yazılımı olarak kullanılabilir.

Flow-3D ile yapılan sayısal modellemeler sonlu hacimler metodu ile yapılmaktadır. İçerisinde birçok türbülans modelleri bulunduran yazılım, hesaplamalarını dikdörtgen hacimlere ayrılmış bir hesap ağı içerisinde yapmaktadır. Serbest yüzeyli akımların hesaplanmasında doğruluk oranı yüksek sonuçlar verebilen yazılımda sonlu hacimler yöntemi (VOF) kullanılmaktadır.

Flow-3D sayısal modelleme yazılımı ile hata durumunu önceden uyararak amacı ile ön işlem (pre-process) uygulanabilir. Bu ön işlem sayesinde uzun süreli, hesaplama gerektiren modellemelerde zaman tasarrufu sağlanmaktadır. Kendi içerisinde model hazırlanabildiği gibi diğer yazılımlar ile hazırlanan katı modellerde yazılıma aktarılabilir. Uygun hücre boyutu ve sayısı belirlendikten ve yine uygun akış modeli seçildikten sonra analiz sonuçları yazılı ve görsel olarak elde edilmektedir.

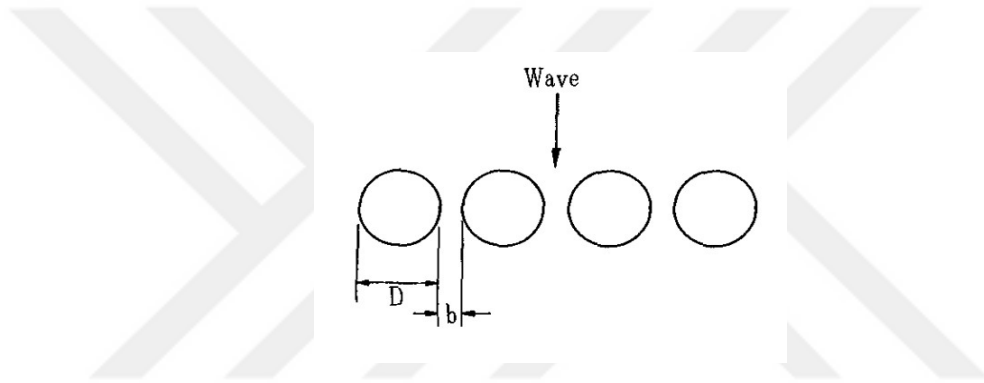
3.2. Hayashi ve Ark.

Hayashi ve arkadaşları tarafından (1966) bir sıra birbirine yakın dairesel kazıklarla oluşturulan dalgakıranın iletim değerleri hem teorik hem deneysel olarak incelenmiştir. Dalga iletim katsayısı ve her bir kazık üzerinde oluşan itme ve eğilme momenti için bir teori sunulmuştur. Model laboratuvar ortamında deneysel olarak test edilmiştir. İletim

katsayısı açısından teori ve deney sonuçları arasındaki karşılaştırmaların uyumlu olduğu gösterilmiştir.

3.2.1. Deneyel Model

Deneyler Tokyo Chuo Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyin yapıldığı dalga kanalı 30 m uzunluğunda, 0,80 m genişliğinde ve 0,70 m derinliğindedir. Kanal içerisine yerleştirilen kazıklar tek sıra halinde 60,5 mm çapında çelik borulardır. Şekil 3.1’de yerleşimi gösterilmiştir. Tüm koşullarda su derinliği 0,40 m ve dalga periyodu 1,7 saniye olarak sabit tutulmuştur. Dalga iletim katsayısı deneyi için gelen dalga yükseklikleri $H_i=18,6-3,9$ cm aralığında belirlenmiştir. 5 farklı kazık aralığı için deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.1. Dalga kanalı içerisindeki kazık yerleşimi (Hayashi vd., 1966)

3.2.2. Teorik Model

Teorik modelleme formüllerinde dalga iletim katsayısı (r_T), iletilen dalga yüksekliğinin (H_t) dalgakıranı gelen dalga yüksekliğine (H_i) bölünmesi olarak tanımlanmaktadır (Denklemler 3.1).

$$r_T = H_t / H_i \quad (3.1)$$

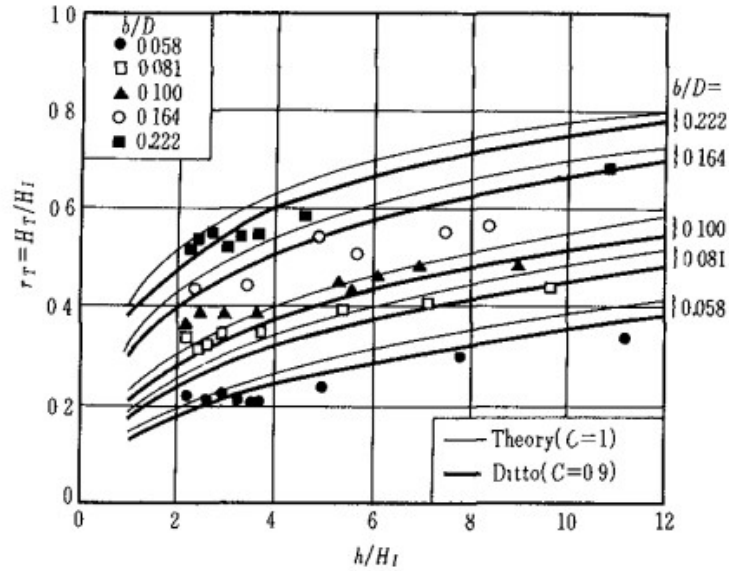
$$H_t = 4h\varepsilon[-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + (H_i/2h)}] \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = C \frac{b}{D+b} / \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b}\right)^2} \quad (3.3)$$

Denklem 3.2’de, su derinliği h ile gösterilmiştir. Geçen dalga yüksekliğini hesaplayabilmek için öncelikle ε değeri hesaplanmaktadır. ε değeri Denklem 3.3’de gösterildiği gibi kazık çapı (D), kazık arası mesafe (b) ve C katsayısı ile hesaplanmaktadır. $C=1$ ve $C=0,9$ için iki ayrı varsayım yapılmıştır.

Bulunan ε değeri Hayashi ve arkadaşları tarafından önerilen Denklem 3.2’de gösterildiği gibi gelen dalga yüksekliği (H_i) ve su derinliği (h) ile birlikte hesaplanarak geçen dalga yüksekliği (H_t) bulunmaktadır.

Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel ve teorik modelleme sonuçları aşağıdaki Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



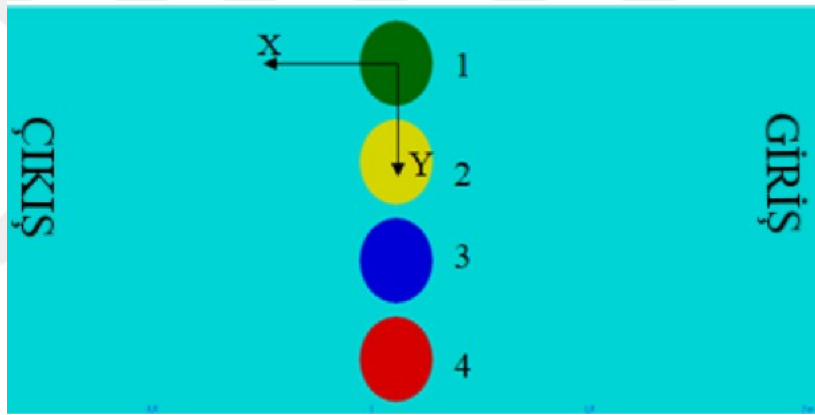
Şekil 3.2. Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel ve teorik modelleme sonuçları (Hayashi vd., 1966)

3.3. Modelleme Çalışmaları

Modelleme çalışması yapılırken farklı senaryolar ve farklı sınır koşulları için analizler yapılmıştır. Yapılan analizler numaralandırılarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bütün modellemelerde işlem süresini ve hacmini kısaltmak adına dalga kanalı uzunluğu sabit 10,2 m olarak belirlenmiştir. Kanal ve kazık yükseklikleri 0,70 m ve su derinliği 0,40 m olarak sabit tutulmuştur. Dalga periyodu bütün modellerde 1,7 saniyedir. X-Y-Z eksen takımına göre $-Z$ yönünde yerçekimi ivmesi $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak girilmiştir. Dalga yönü $+X$ yönünde belirlenmiştir. Dalga kanalı başlangıç noktası giriş (inlet), bitiş noktası çıkış

(outlet) olarak belirlenmiştir. Dalga kanalı sağ, sol ve alt yüzler duvar (wall) olarak tanımlanmıştır. Kanalin üst yüzeyi açık hava (specified pressure) olarak tanımlanmıştır. Modelde 0-100 saniye zaman aralığı için dalga simülasyonu yapılmıştır.

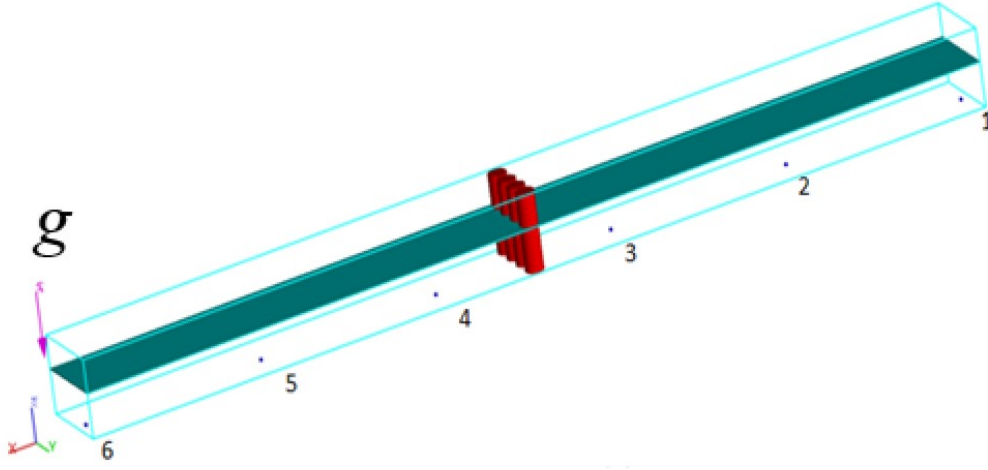
Kazık öncesi ve kazık sonrası kanalın tabanına yerleştirilen gözlem noktalarında (prob) saniyenin 1/10'u kadar süre aralığı ile üzerindeki su yüksekliği okunmaktadır. Okunan su yükseklikleri Excel'de hesaplanarak dalga yüksekliklerine çevrilmiştir. Kazık öncesi ve kazık sonrası hesaplanan dalga yükseklikleri ile dalga iletim katsayısı (r_T) hesaplanmaktadır. Hesaplanan dalga iletim katsayıları (r_T), Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalar ile modelin daha doğru çalışması için bazı sınır koşullar üzerinde kalibrasyon yapılmıştır. Tüm modellemelerde X ve Y koordinat eksenini 1 numaralı kazığın aksına konulmuştur (Şekil 3.3). Tüm modellemelerde 4 adet kazık yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Tüm modellemelerde koordinat ekseninin kanal içerisindeki konumu

3.3.1. Model 1

Model 1'de kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) 0,025 m olarak belirlenmiştir. Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081'dir. Kazık öncesi giriş (inlet) kısmından başlamak üzere sırası ile 3 nokta (1, 2, 3) yerleştirilmiştir. Kazık sonrası çıkış (outlet) kısmına doğru sırası ile 3 (4, 5, 6) nokta yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 m'dir (kanal tabanı).



Şekil 3.4. Model 1 için oluşturulan dalga kanalı

Verilen dalga yükseklikleri (H_i) sırası ile 0,186 m / 0,1566 m / 0,1277 m / 0,0978 m / 0,0684 m / 0,039 m olarak belirlenmiştir. Model sonunda 18 adet dalga iletim katsayısı (r_T) hesaplanmıştır. İlk 5 ve 10 dalga yükseklikleri için farklı noktalar üzerindeki dalga yükseklikleri (H_i) ve (H_t) bulunmuştur.

3.3.2. Model 2

Model 2’de kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) 0,020 m olarak değiştirilmiştir. Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081’dir. Model 1’den farklı olarak ilk 5 dalga için 1. ve 4. noktalarda (H_i) ve (H_t) gözlemlenmiştir. Model 2 için sınır koşulların tutarlılığını görebilmek için dalga yüksekliği (H_i) 0,0684 m için hesaplar yapılmıştır. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 m’dir (kanal tabanı). Model sonunda 4 adet dalga iletim katsayısı (r_T) belirlenmiştir.

3.3.3. Model 3

Modelde kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) 0,0125 m olarak değiştirilmiştir. Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081’dir. Model 3 için sınır koşulların tutarlılığını görebilmek için dalga yüksekliği (H_i) 0,0684 m için hesaplar yapılmıştır. Model 2’den

farklı olarak eleman hesap boyutu (mesh size) 0,0125 metreye indirilmiştir. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 metredir (kanal tabanı). Model sonunda 3 adet dalga iletim katsayısı (r_T) belirlenmiştir.

3.3.4. Model 4

Model 4’de kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) 0,025 m olarak belirlenmiştir. Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081’dir. Model 4 için sınır koşulların tutarlılığını görebilmek için dalga yüksekliği (H_i) 0,0684 m için hesaplar yapılmıştır. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 metredir (kanal tabanı). Diğer modellemelerden farklı olarak akışkan için yüzey gerilimi (Surface Tension) modeli aktif edilerek analizler yapılmıştır. Yüzey geriliminin iletim katsayısı (r_T) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

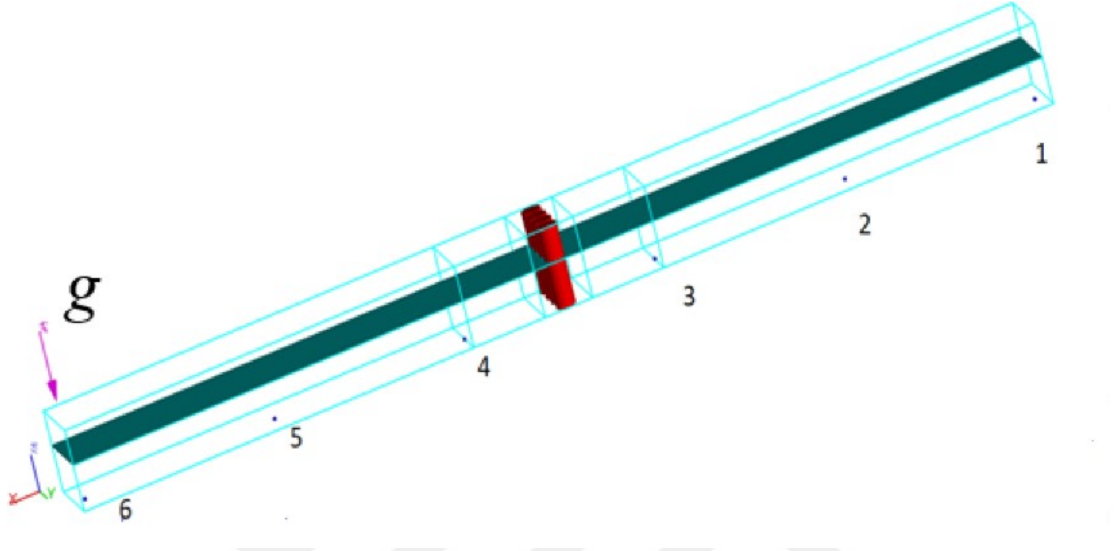
3.3.5. Model 5

Model 5’de kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) 0,025 m olarak belirlenmiştir. Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081’dir. Model 5 için sınır koşulların tutarlılığını görebilmek için dalga yüksekliği (H_i) 0,0684 m için hesaplar yapılmıştır. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 metredir (kanal tabanı). Diğer modellerden farklı olarak silindir şeklindeki kazıklarda yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) modeli aktifleştirilip 0,0015 m olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün iletim katsayısı (r_T) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.3.6. Model 6

Model de kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) bölgesel şekilde kazıklara doğru kademeli olarak azaltılmıştır. Yapılan kademeli azaltma işlemi 0,5 oranda yapılmıştır. Eleman hesap boyutu (mesh size) kanalın başlangıç ve bitiş kısımlarından kazıklara doğru sırası ile 0,025 m / 0,0125 m / 0,00625 m şeklinde belirlenmiştir. Kanal

boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 metredir (kanal tabanı). Şekil 3.5'te eleman hesap boyutunun (mesh size) azaltıldığı alanlar ve ölçüm yapılan noktalar gösterilmiştir.

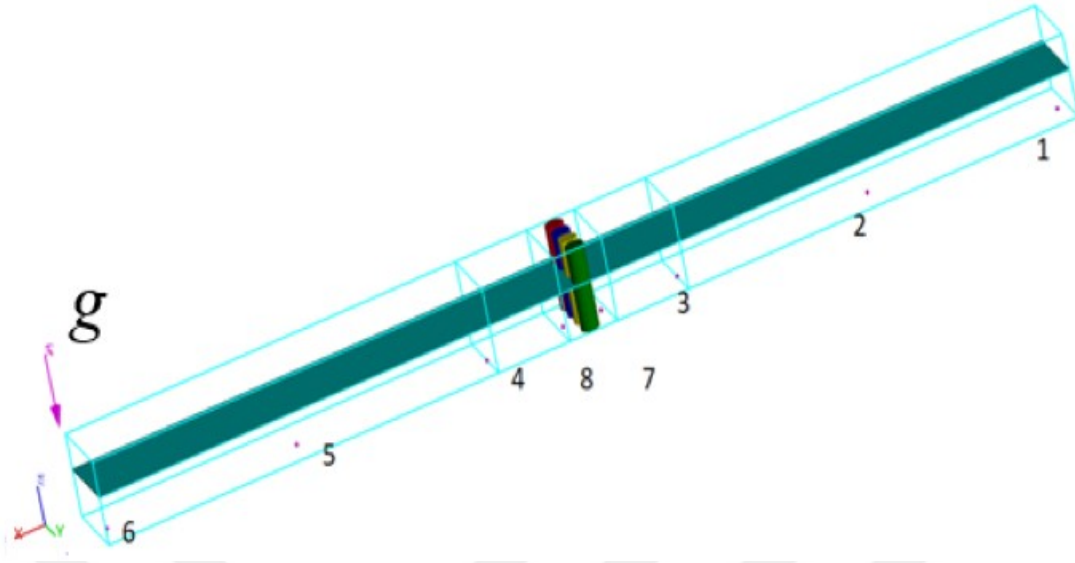


Şekil 3.5. Eleman hesap boyutunun (mesh size) azaltıldığı bölgeler ve ölçüm yapılan noktalar

Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081'dir Model 6 için sınır koşulların tutarlılığını görebilmek için dalga yüksekliği (H_i) 0,0684 m için hesaplar yapılmıştır. Modellemede yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) ve yüzey gerilimi (Surface Tension) modeli ihmal edilmiştir. Eleman hesap boyutu (mesh size) üzerinde yapılan bölgesel iyileştirme çalışmalarının iletim katsayısı (r_T) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.3.7. Model 7

Model 7'de kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) için bölgesel şekilde kazıklara doğru kademeli olarak azaltılma işlemi tekrarlanmıştır. Model 6'dan farklı olarak eleman hesap boyutunun (mesh size) en küçük olduğu bölge olan kazık önü ve arkasına değişimi görmek için 7. ve 8. noktalar olmak üzere Şekil 3.6'da görüldüğü gibi iki adet daha nokta (prob) eklenmiştir. 7. ve 8. noktalardaki dalga yükseklikleri de hesap edilerek mevcut deneysel çalışmalar ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.6. Eleman hesap boyutunun (mesh size) azaltıldığı bölgelere eklenen 7. ve 8. noktalar

Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081'dir. Model 7 için sınır koşulların tutarlılığını görebilmek için dalga yüksekliği (H_i) 0,0684 m için hesaplar yapılmıştır. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 metredir (kanal tabanı). Sonradan eklenen 7. ve 8. noktaların X koordinatı ise sırası ile -0,20 m ve 0,20 m'dir. Modelleme de yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) ve yüzey gerilimi (Surface Tension) modeli ihmal edilmiştir. Eleman hesap boyutu (mesh size) üzerinde yapılan bölgesel iyileştirme çalışmalarının iletim katsayısı (r_T) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.3.8. Model 8

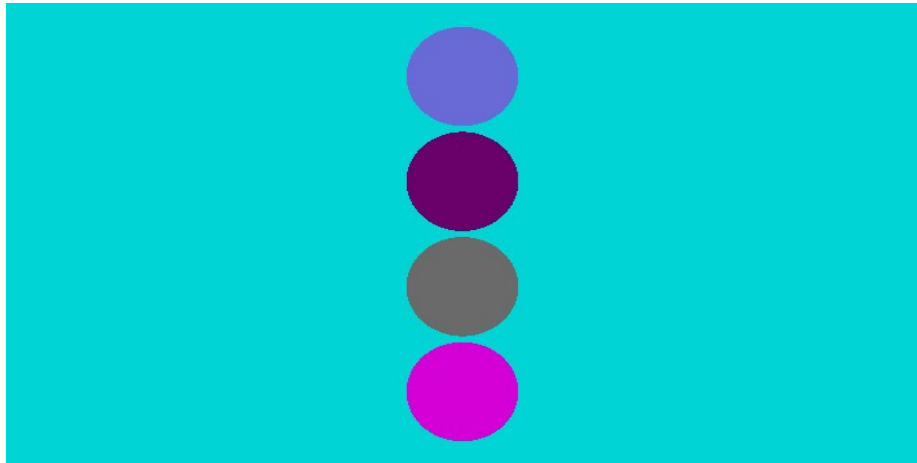
Model 8'de, model 7'de olduğu gibi eleman hesap boyutu (mesh size) bölgesel şekilde kazıklara doğru kademeli olarak azaltılarak değil kanal boyunca sabit 0,025 m olarak belirlenmiştir. Kanal genişliği 0,881 m olarak sabit tutulmuştur. Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafe (b) 0,0162 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,081'dir. Verilen dalga yükseklikleri (H_i) sırası ile 0,186 m / 0,1566 m / 0,1277 m / 0,0978 m / 0,0684 m / 0,039 m olarak belirlenmiştir. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları

ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 metredir (kanal tabanı). Sonradan eklenen 7.ve 8. noktaların X koordinatı ise sırası ile -0,20 m ve 0,20 m'dir.

Kazıklara gelen dalga yüksekliklerinin kazık önündeki dalga yansımalarından etkilenme miktarını azaltmak adına kanal içerisindeki farklı noktalar arasında gelen dalga yüksekliği (H_i) ve dalga iletim katsayısı (r_T) kombinasyonları denenmiştir. Modelleme de yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) ve yüzey gerilimi (Surface Tension) modeli ihmal edilmiştir. Model de yapılan değişikliklerin iletim katsayısı (r_T) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.3.9. Model 9

Model 9'da kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) 0,025 m olarak belirlenmiştir. Diğer modellemelerden farklı olarak kanal genişliği sabit 0,80 metreye düşürülmüştür. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob) Z koordinatı sabit 0 metredir (kanal tabanı). Y koordinatı kanal boyunca $b/D=0,058$ için 0,3348 m, $b/D=0,081$ için 0,3402 m'dir. X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m'dir. Sonradan eklenen 7. ve 8. noktaların X koordinatı ise sırası ile -0,20 m ve 0,20 m'dir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) değiştikçe kazık arası mesafeler orana uygun olarak belirlenirken dış kazıkların duvara olan mesafeleri farklılık göstermektedir (Şekil 3.7).



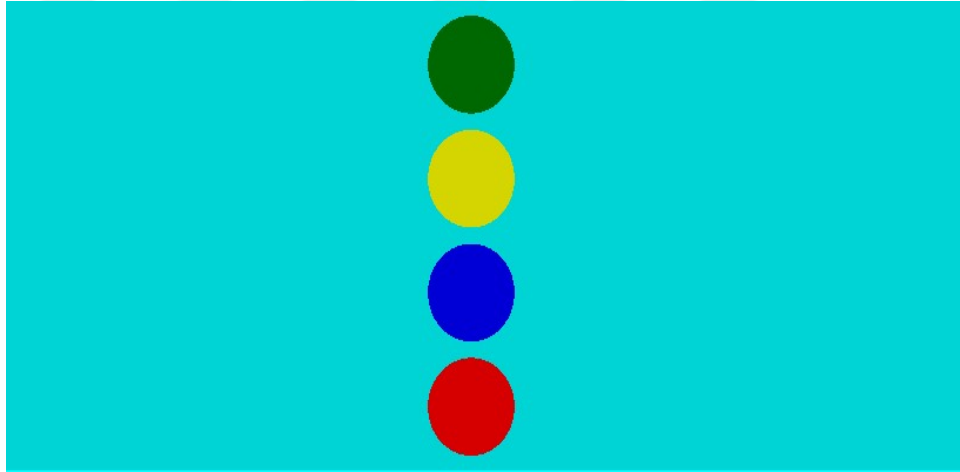
Şekil 3.7. Model 9 için kanal içerisindeki kazıkların yerleşimi

Kanal içerisindeki kazıkların çapı 0,20 metredir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,058 ve 0,100 için hesaplamalar yapılmıştır. Modelleme de yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) Model 5'e göre artırılarak 0,015 m olarak belirlenmiştir.

Yüzey gerilimi (Surface Tension) modeli ihmal edilmiştir. Verilen dalga yükseklikleri (H_i) sırası ile 0,186 m / 0,1566 m / 0,1277 m / 0,0978 m / 0,0684 m / 0,039 m olarak belirlenmiştir.

3.3.10. Model 10

Model 10'da kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) 0,025 m, kanal genişliği sabit 0,80 m olarak belirlenmiştir. Model 9'dan farklı olarak kazık aralıkları ve dış kenar kazıkların duvarlara olan mesafelerinin eşit olması için her bir b/D oranına göre kazık çapları ve aralıkları belirlenmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Model 10 için kanal içerisindeki kazıkların yerleşimi

Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,058 / 0,081 / 0,100 / 0,164 / 0,222 için hesaplamalar yapılmıştır. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob) Z koordinatı sabit 0 m'dir (kanal tabanı). Y koordinatı kanal boyunca $b/D=0,058$ için 0,3479 m, $b/D=0,081$ için 0,3472 m, $b/D=0,100$ için 0,3466 m, $b/D=0,164$ için 0,3448 m, $b/D=0,222$ için 0,3434 m'dir. X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m'dir. Sonradan eklenen 7.ve 8. noktaların X koordinatı ise sırası ile -0,20 m ve 0,20 m'dir. Modelleme de yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) 0,015 m olarak belirlenmiştir. Yüzey gerilimi (Surface Tension) modeli ihmal edilmiştir. Verilen dalga yükseklikleri (H_i) sırası ile 0,186 m / 0,1566 m / 0,1277 m / 0,0978 m / 0,0684 m / 0,039 m olarak belirlenmiştir. (H_i) için 2. nokta üzerindeki okunan değerler, (H_t) için 8. nokta

üzerindeki okunan değerler hesaplanmıştır. Model de yapılan değişikliklerin iletim katsayısı (r_T) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.3.11. Model 11

Model 11’de kullanılan eleman hesap boyutu (mesh size) bölgesel şekilde kazıklara doğru kademeli olarak azaltılmıştır. Yapılan kademeli azaltma işlemi 0,5 oranda uygulanmıştır. Eleman hesap boyutu (mesh size) kanalın başlangıç ve bitiş kısımlarından kazıklara doğru sırası ile 0,025 m / 0,0125 m / 0,00625 m şeklinde belirlenmiştir. Kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,058 için hesaplamalar yapılmıştır. Kanal genişliği sabit 0,80 m olarak belirlenmiştir. Kanal boyunca yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob); X koordinatları ise sırası ile -5 m, -3 m, -1 m, 1 m, 3 m, 5 m, Y koordinatı sabit 0,3824 m, Z koordinatı sabit 0 m’dir (kanal tabanı). Sonradan eklenen 7.ve 8. noktaların X koordinatı ise sırası ile -0,20 m ve 0,20 m’dir. Yüzey gerilimi (Surface Tension) modeli ihmal edilmiştir. Modellemede yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) 0,015 m olarak belirlenmiştir. Verilen dalga yüksekliği (H_i) 0,186 m olarak belirlenmiştir. Kazık çapı (D) model 10’da olduğu gibi 18,6480 cm olarak belirlenmiştir.

Diğer modellemelerden farklı olarak model 11’de türbülans akış modeli olarak Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) modeli kullanılmıştır.

Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) mühendislik uygulamalarında türbülanslı akışların doğru tahmin edilebilmesi adına geliştirilen yöntemlerden biridir. Zamana bağlı 3 boyutlu akış alanlarının çözümünü içeren türbülanslı akışları tahmin etmede etkili sonuçlar veren bir metod olarak kullanılmaktadır.

Model de yapılan değişikliklerin iletim katsayısı (r_T) üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.4. Modelleme Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Yapılan modellemelerde kanal içerisine kazık öncesi ve kazık sonrası yerleştirilen okuma noktaları (prob) üzerindeki ilk 5 ve 10 dalga yükseklikleri ölçülmüştür. Ölçülen değerler ile Denklem 3.1 kullanılarak dalga iletim katsayıları (r_T) hesaplanmıştır. Elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ve Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel model sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) Denklem 3.4 ile kıyaslanarak bağıl hata (%) miktarları hesaplanmıştır. Denklemde bulunan $A(r_T)$ sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayısını, $B(r_T)$ Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayısını ifade etmektedir.

$$\frac{A(r_T)-B(r_T)}{B(r_T)} \times 100 \quad (3.4)$$

Sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T), Hayashi ve arkadaşları tarafından önerilen teorik modelleme denklemleri (Denklem 3.2 ve Denklem 3.3) sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile de kıyaslanmış ve bağıl hata yüzdeleri Denklem 3.5'te verilen denklem ile hesaplanmıştır. Denklemde bulunan $C(r_T)$ sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayısını, $D(r_T)$ Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan teorik modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayısını ifade etmektedir.

$$\frac{C(r_T)-D(r_T)}{D(r_T)} \times 100 \quad (3.5)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yapılan modellemelerde farklı sınır koşullar ve farklı senaryolar analiz edilerek elde edilen sonuçlar Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar sonucunda deneysel ve teorik çalışma sonuçlarına en yakın modellemelerin model 10 ve model 11 olduğu gözlemlenmiştir. Model 11’de türbülans akış modeli olarak Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) seçilmiştir. Bu akış modelinde büyük oranda başarı sağlamak için kullanılan eleman hesap boyutunu (mesh size) çok küçük boyutlarda seçmek gerekmektedir. Gerekli eleman hesap boyutuna (mesh size) ulaşmak için mevcut hesaplama araçlarımız yetersiz kalmaktadır ve analiz süreleri çok uzamaktadır. Model 11’de eleman hesap boyutunda yapılan mevcut iyileştirme ve akış modelini Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) olarak seçmek sonuçlar üzerinde iyileştirme göstermiş fakat hesaplama süresi yaklaşık 8 katına çıkmıştır. Bu nedenle model 10’nun hesap süresi ve başarı yüzdesi olarak olumlu sonuçlar vermesi yapılacak kıyaslamaların model 10 üzerinden yapılmasında etkili olmuştur. Kıyaslamalarda ilk 5 ve 10 dalga ortalaması göz önüne alınmıştır. Daha fazla dalganın hesaplarda kullanılması dalga yansıması nedeni ile sonuçları yanıltmaktadır.

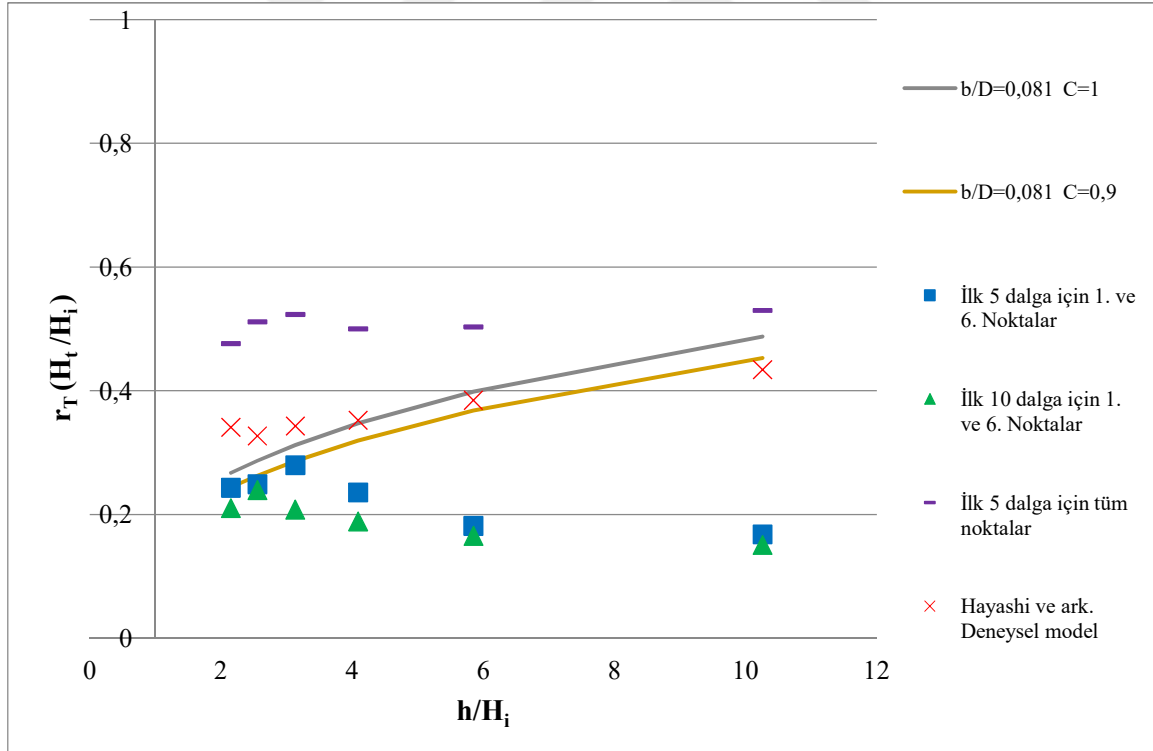
Yapılan sayısal modellemeler sonucu bulunan dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından modellenen deneysel model sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasında yapılan kıyaslamalar aşağıda verilmiştir.

4.1. Model 1 Değerlendirmesi

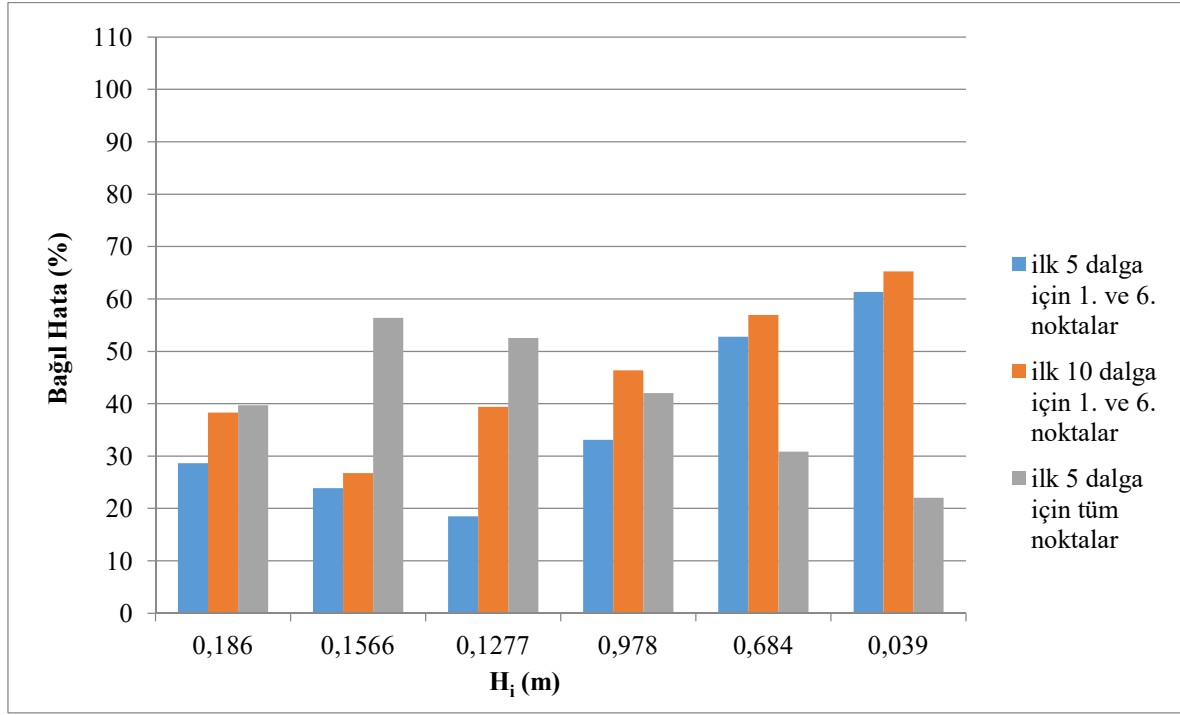
Model 1 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablo 4.1’de 1. 2. ve 3. noktalarda ölçülen ilk 5 dalga yüksekliklerinin ortalaması gelen dalga yüksekliği (H_i), 4. 5. ve 6. noktalarda ölçülen ilk 5 dalga yüksekliklerinin ortalaması (H_t) geçen dalga yüksekliği olarak hesaplandığında sonuçların deneysel sonuçlardan uzaklaştığı görülmektedir. Şekil 4.1’de sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağıl hata miktarları (%) Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Model 1’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	İlk 5 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 10 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 5 dalga için tüm noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,186	0,2433	-28,6539	0,2104	-38,2944	0,4765	39,7285	0,3410
0,1566	0,2490	-23,8689	0,2396	-26,7365	0,5115	56,3648	0,3271
0,1277	0,2796	-18,4994	0,208	-39,3777	0,5234	52,5370	0,3431
0,0978	0,2357	-33,1012	0,1889	-46,3806	0,5003	42,0123	0,3523
0,0684	0,1816	-52,7955	0,1656	-56,9644	0,5035	30,8683	0,3848
0,039	0,1680	-61,3087	0,1509	-65,2452	0,53	220225	0,4343

**Şekil 4.1.** Model 1 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.1’de $b/D=0,081$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları gösterilmiştir. 1. ve 6. noktalarda ilk 5 ve 10 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T), tüm noktalar için elde edilen dalga iletim katsayılarına (r_T) göre deneysel model sonucu dalga iletim katsayılarına (r_T) daha yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2. Model 1 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

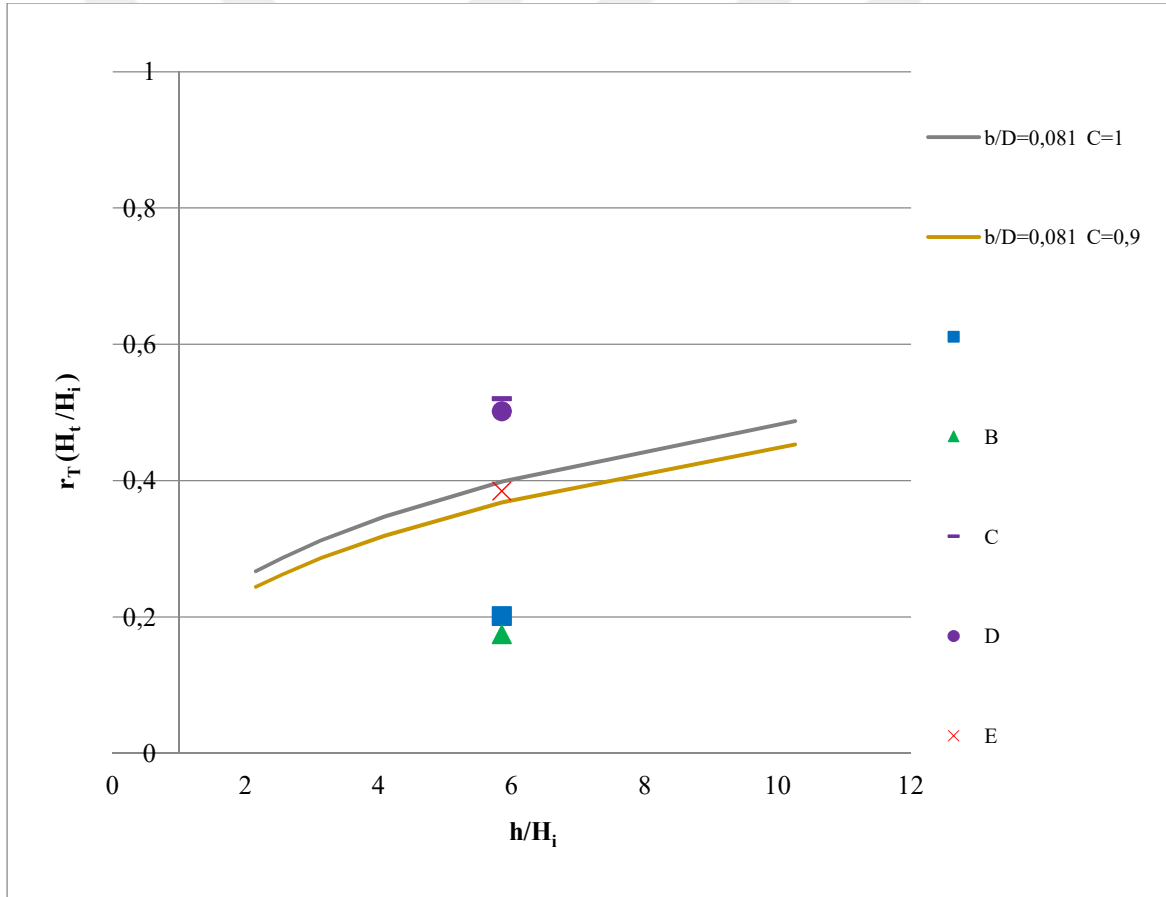
4.2. Model 2 Değerlendirmesi

Model 2 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.2’de verilmiştir. Tabloda A 1. ve 6. noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ilk 5 dalga için ortalamasıdır. B 1. ve 6. noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ilk 10 dalga için ortalamasıdır. C ilk 5 dalga ortalaması için tüm noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ortalamasıdır. D 1. ve 4. noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ilk 5 dalga için ortalamasıdır. E Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonuçlarıdır. Tablo 4.2’de ilk 10 dalga yüksekliği için hesaplanan değerlerin deneysel sonuçlardan diğerlerine göre daha fazla uzaklaştığı görülmüştür. Eleman hesap boyutunun (mesh size) 0,20 metreye düşürülmesinin sonuçlar üzerinde büyük bir iyileştirme göstermediği görülmüştür. Şekil 4.3’te sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim

katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağlı hata miktarları (%) Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Model 2'de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

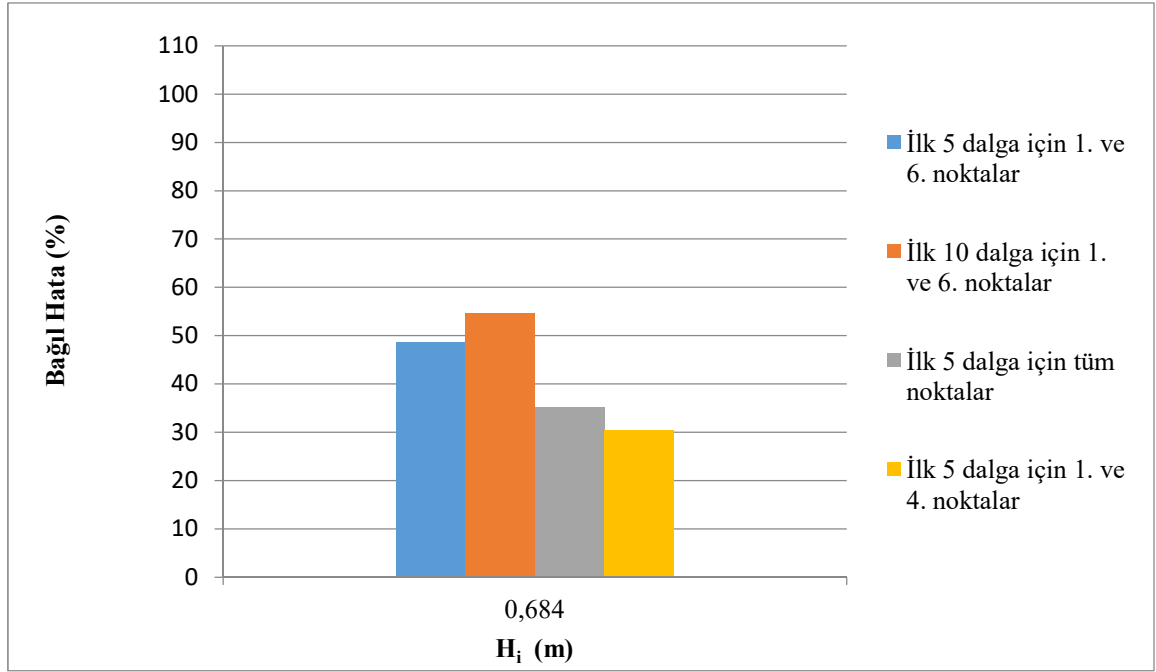
H_i (m)	A	Bağlı hata (%)	B	Bağlı hata (%)	C	Bağlı hata (%)	D	Bağlı hata (%)	E
(r_T)	(r_T)		(r_T)		(r_T)		(r_T)		(r_T)
0,0684	0,2012	-48,7086	0,1747	-54,576	0,5203	35,2336	0,5018	30,405	0,3848



Şekil 4.3. Model 2 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

$H_i=0,684$ m için $b/D=0,081$ kazık aralığında dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) Şekil 4.3'te gösterilmiştir. 1. ve 6. noktalardan yapılan

ölçümler ile ilk 5 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2012 olarak bulunmuştur. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 10 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1747 olarak bulunmuştur. İlk 5 dalganın ortalaması için tüm noktalardaki ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanan dalga iletim katsayısı (r_T) 0,5203 olarak bulunmuştur. 1. ve 4. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 5 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,5018 olarak bulunmuştur.



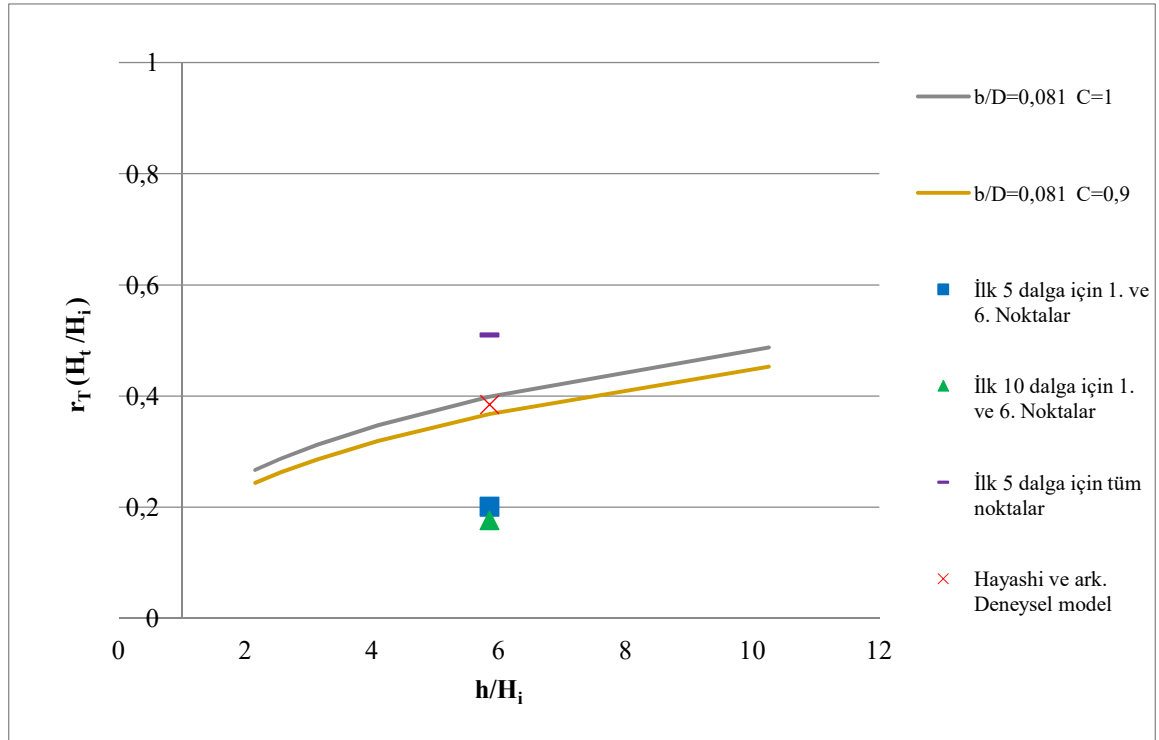
Şekil 4.4. Model 2 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

4.3. Model 3 Değerlendirmesi

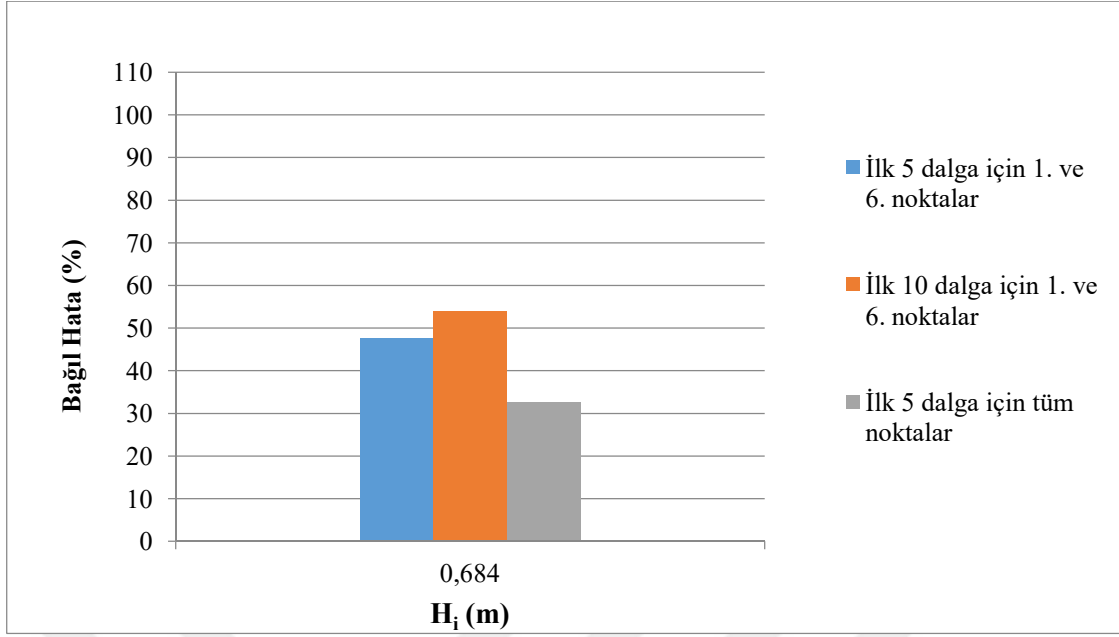
Model 3 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.3'te verilmiştir. Eleman hesap boyutunun (mesh size) 0,125 metreye düşürülmesinin dalga iletim katsayıları (r_T) üzerinde beklenen iyileştirmeyi göstermediği görülmüştür. Örneğin Model 2'de 0,020 metre seçilen eleman hesap boyutu için dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2012 bulunurken, Model 3'te dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2011 elde edilmiştir. Şekil 4.5'te sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağıl hata miktarları (%) Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Model 3'te elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	İlk 5 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 10 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 5 dalga için tüm noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,0684	0,2011	-47,7258	0,1767	-54,0619	0,5101	32,5821	0,3848

**Şekil 4.5.** Model 3 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

$H_i=0,684$ m için $b/D=0,081$ kazık aralığında dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) şekil 4.5'te gösterilmiştir. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 5 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2011 olarak bulunmuştur. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 10 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1767 olarak bulunmuştur. İlk 5 dalganın ortalaması için tüm noktalardaki ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanan dalga iletim katsayısı (r_T) 0,5101 olarak bulunmuştur.



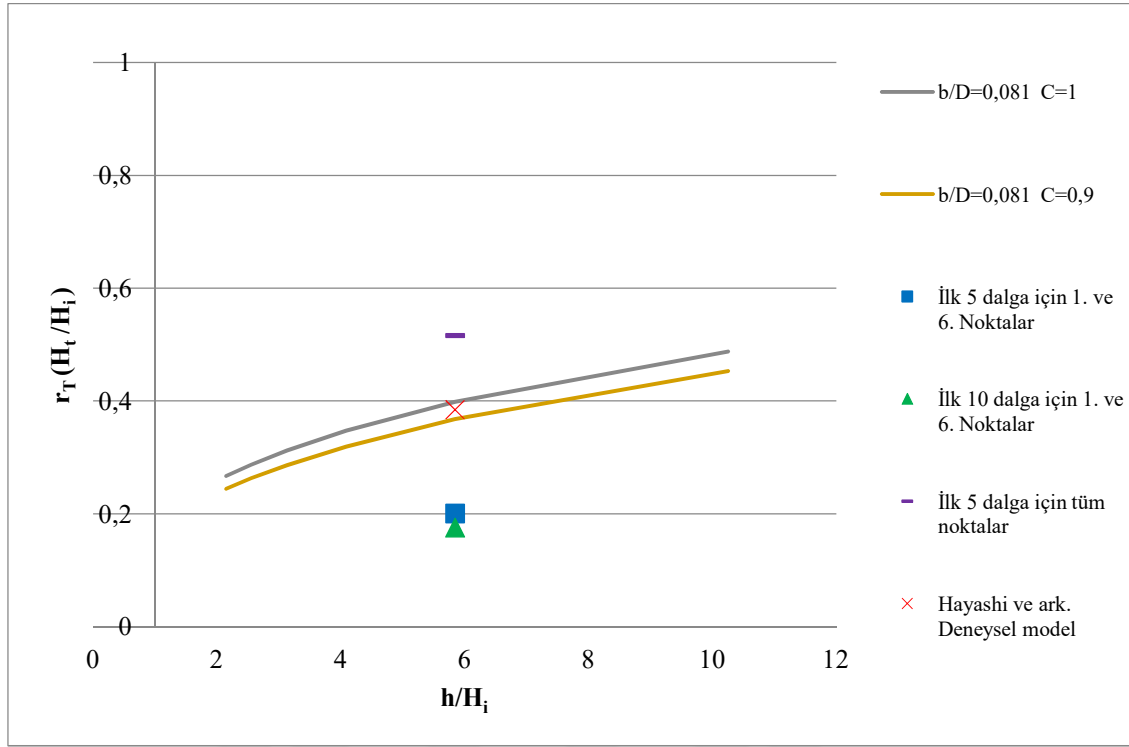
Şekil 4.6. Model 3 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

4.4. Model 4 Değerlendirmesi

Model 4 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.4’de verilmiştir. Akışkan için yüzey gerilimi (Surface Tension) modelinin aktif edilmesi dalga iletim katsayıları (r_T) üzerinde büyük bir değişim sağlamamıştır. Örneğin Model 1’de akışkan için yüzey gerilimi (Surface Tension) modelinin aktif olmadığı durumda dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1816 bulunurken Model 4’te dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2007 elde edilmiştir. Şekil 4.7’de sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağıl hata miktarları (%) Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

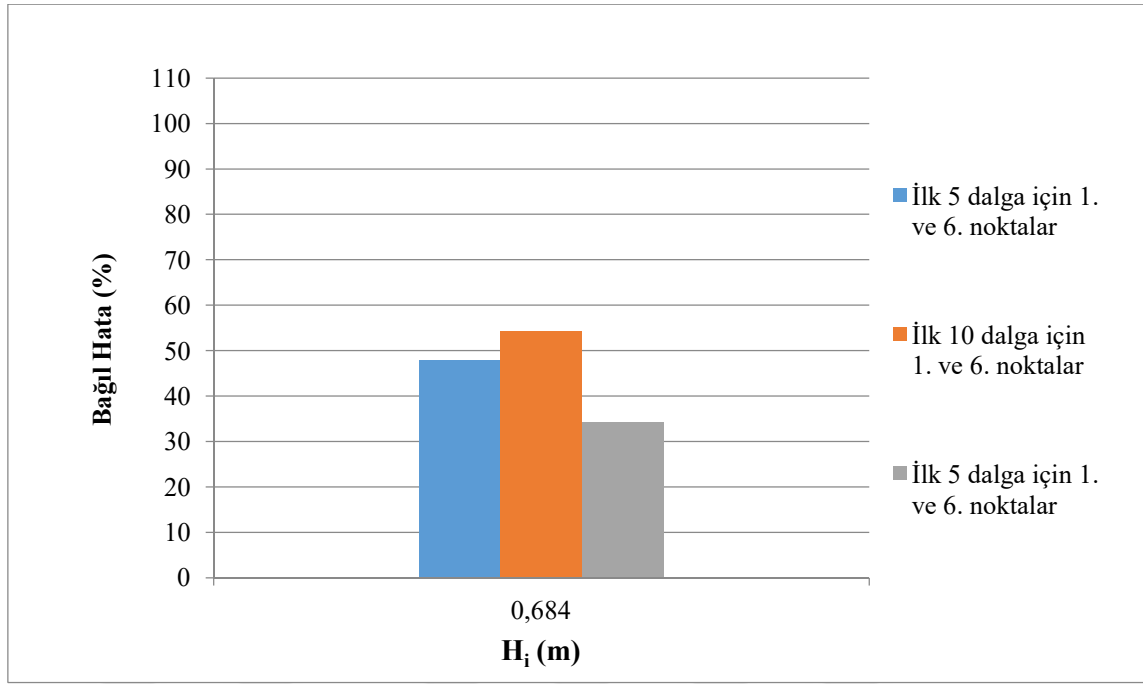
Tablo 4.4. Model 4’te elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H _i (m)	İlk 5 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 10 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 5 dalga için tüm noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,0684	0,2007	-47,8385	0,1757	-54,3272	0,5165	34,2482	0,3848



Şekil 4.7. Model 4 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

$H_i=0,684$ m için $b/D=0,081$ kazık aralığında dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) şekil 4.7’de gösterilmiştir. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 5 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2007 olarak bulunmuştur. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler sonucu ile ilk 10 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1757 olarak bulunmuştur. İlk 5 dalga ortalaması için tüm noktalardaki ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanan dalga iletim katsayısı (r_T) 0,5165 olarak bulunmuştur.



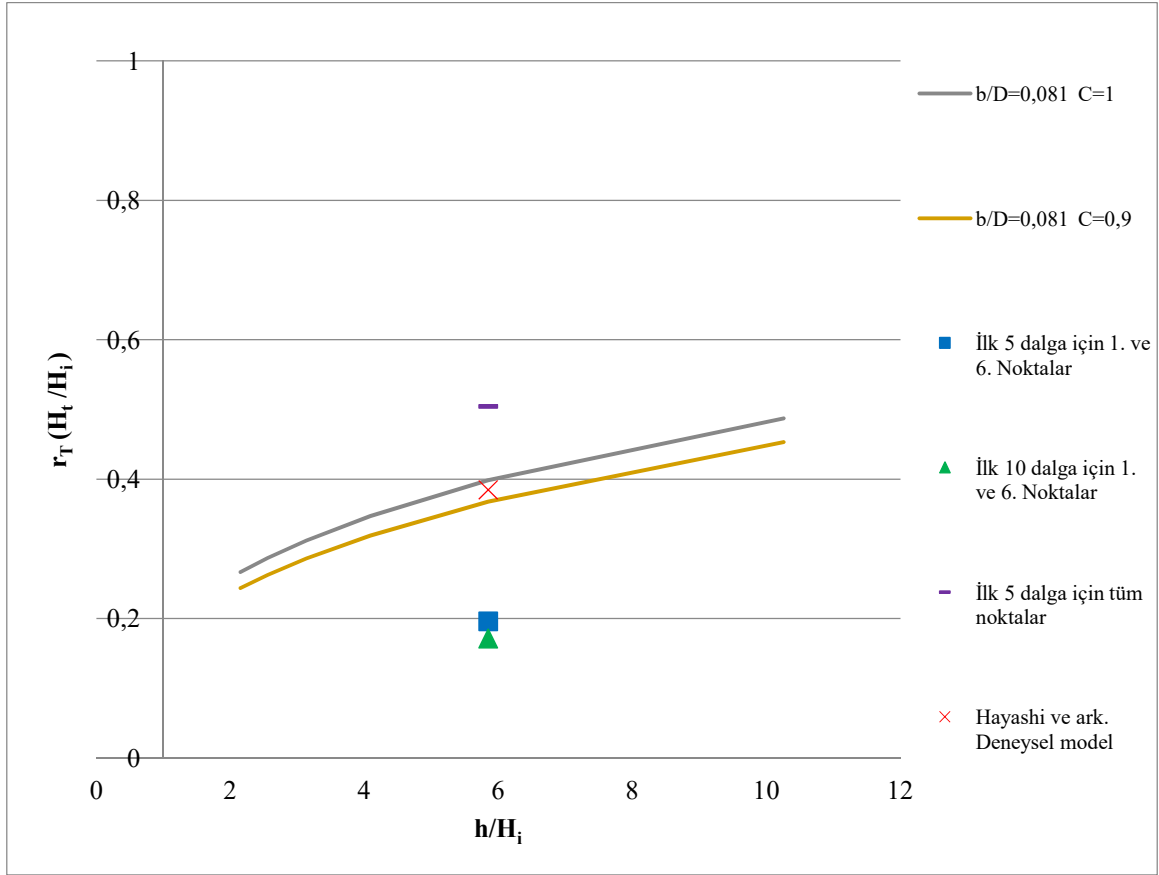
Şekil 4.8. Model 4 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

4.5. Model 5 Değerlendirmesi

Model 5 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.5’de verilmiştir. Kazıklarda yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) modelinin aktifleştirilip 0,0015 m olarak belirlenmesinin dalga iletim katsayıları (r_T) üzerinde büyük bir değişim sağlamadığı görülmüştür. Örneğin Model 1’de kazıklarda yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) modelinin aktif olmadığı durumda dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1816 bulunurken, Model 5’te yüzey pürüzlülüğü (Surface Roughness) modelinin aktifleştirilip 0,0015 m olarak belirlenmesi sonucu dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1961 bulunmuştur. Şekil 4.9’da sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağıl hata miktarları (%) Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

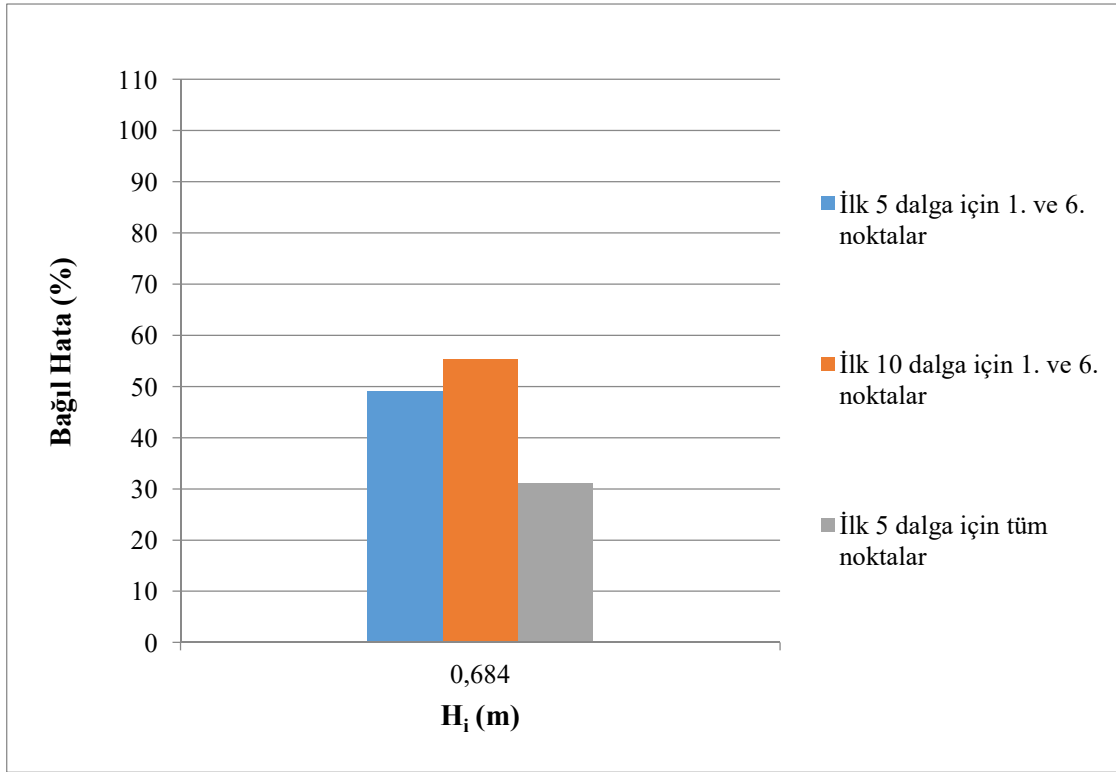
Tablo 4.5. Model 5’te elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	İlk 5 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 10 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 5 dalga için tüm noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,0684	0,1961	-49,0329	0,1716	-55,392	0,5045	31,1136	0,3848

**Şekil 4.9.** Model 5 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

$H_i=0,684$ m için $b/D=0,081$ kazık aralığında dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) Şekil 4.9’da gösterilmiştir. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 5 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1961 olarak bulunmuştur. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 10 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1716 olarak bulunmuştur. İlk 5 dalganın

ortalaması için tüm noktalardaki ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanan dalga iletim katsayısı (r_T) 0,5045 olarak bulunmuştur.



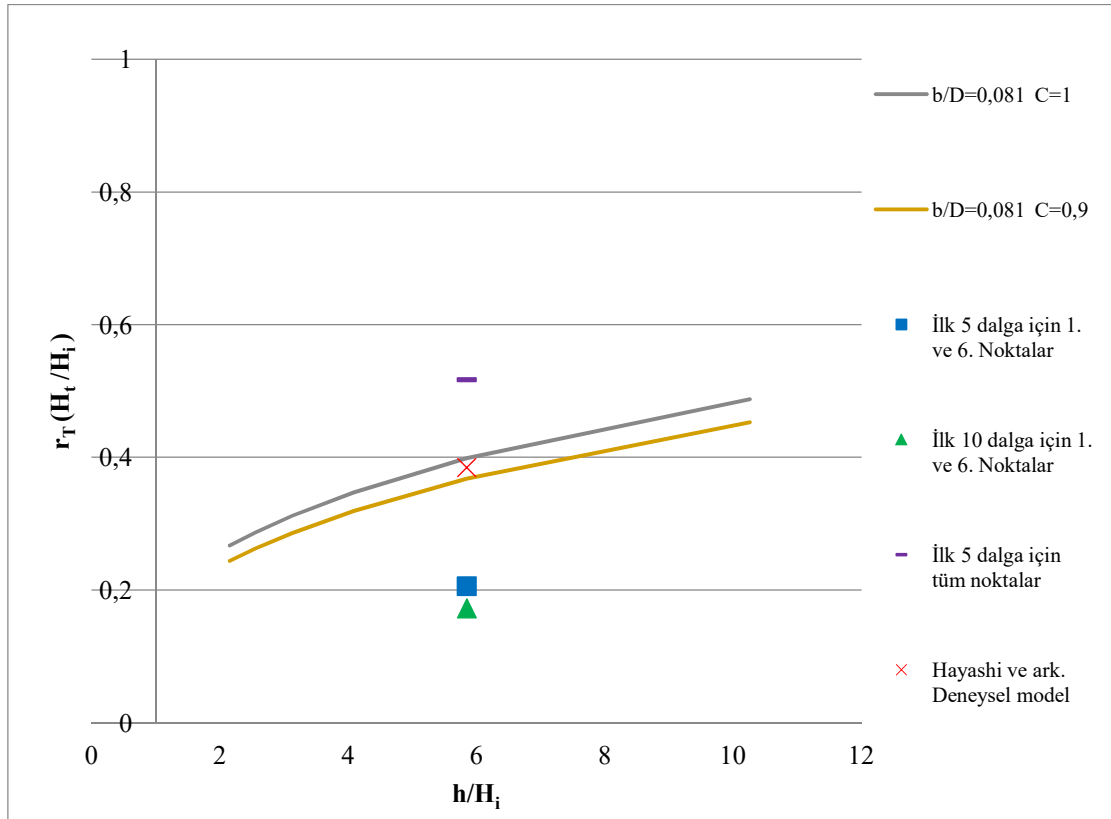
Şekil 4.10. Model 5 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

4.6. Model 6 Değerlendirmesi

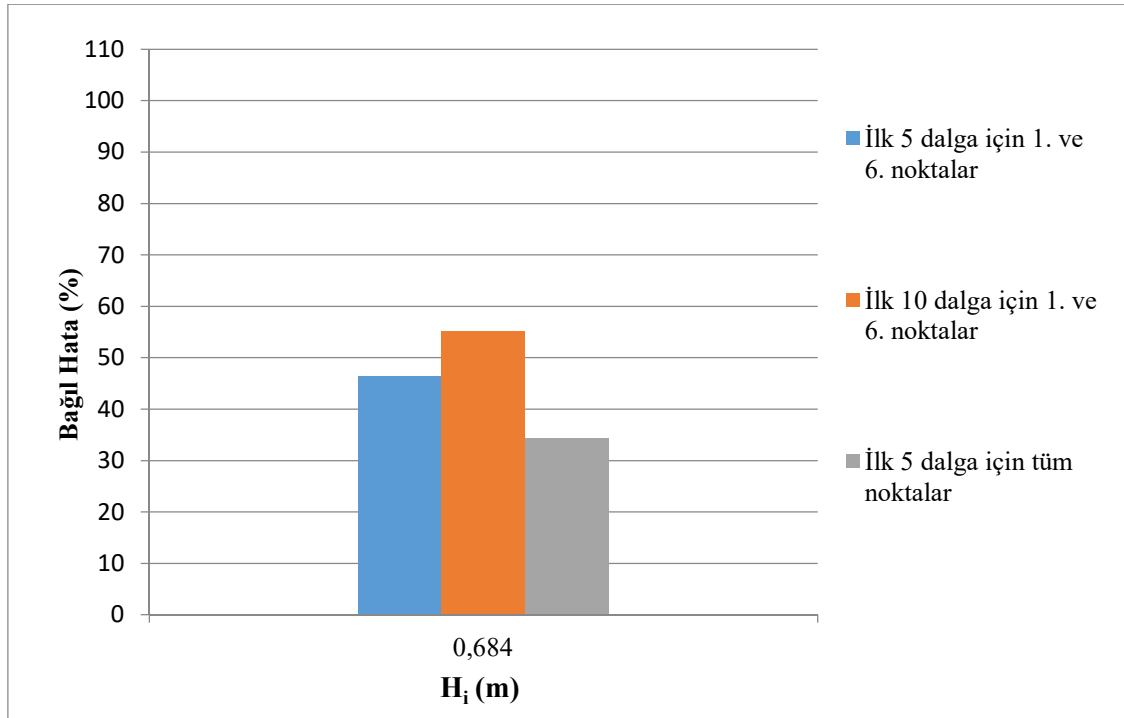
Model 6 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.6'de verilmiştir. Model de kullanılan eleman hesap boyutunun (mesh size) bölgesel şekilde kazıklara doğru kademeli olarak azaltılması dalga iletim katsayıları üzerinde büyük bir iyileştirme sağlamamıştır. Örneğin Model 1'de 0,025 metre seçilen eleman hesap boyutu için dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1816 bulunurken, Model 6'da dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2060 elde edilmiştir. Dalga iletim katsayısı (r_T) hesaplamalarında ilk 5 dalga yüksekliği hesaplanmasının ilk 10 dalga yüksekliği hesaplanmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Şekil 4.11'de sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağıl hata miktarları (%) Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Tablo 4.6. Model 6’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	İlk 5 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 10 dalga için 1. ve 6. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 5 dalga için tüm noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,0684	0,2060	-46,4636	0,1724	-55,1728	0,5172	34,4072	0,3848

**Şekil 4.11.** Model 6 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

$H_i=0,684$ m için $b/D=0,081$ kazık aralığında dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) şekil 4.11’de gösterilmiştir. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 5 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,2060 olarak bulunmuştur. 1. ve 6. noktalardan yapılan ölçümler ile ilk 10 dalganın ortalaması sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,1724 olarak bulunmuştur. İlk 5 dalganın ortalaması için tüm noktalardaki ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanan dalga iletim katsayısı (r_T) 0,5172 olarak bulunmuştur.



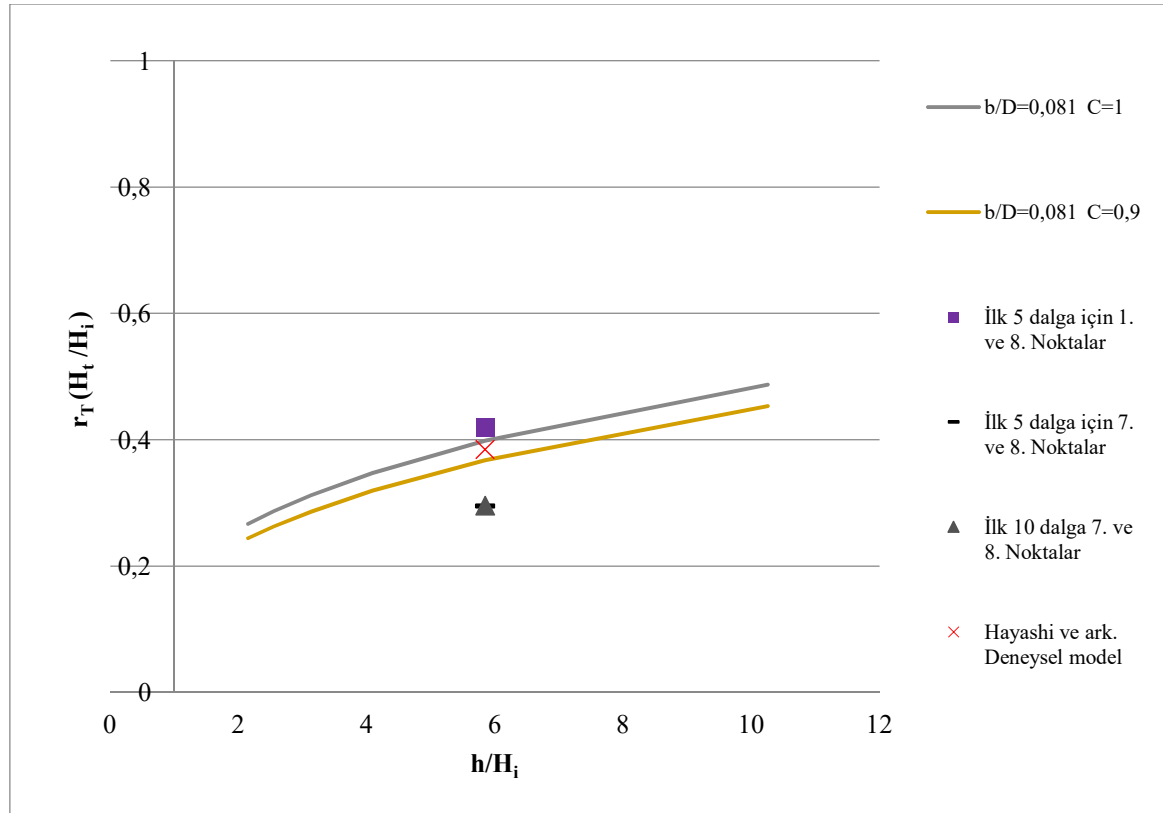
Şekil 4.12. Model 6 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

4.7. Model 7 Değerlendirmesi

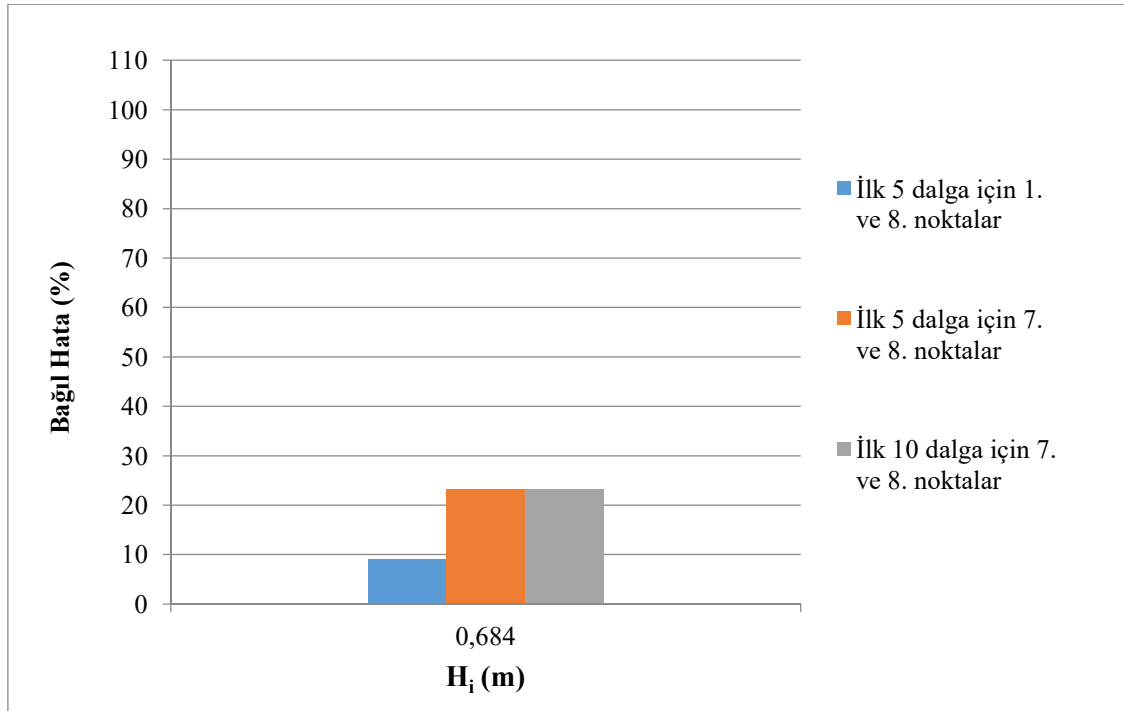
Model 7 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.7’de verilmiştir. Yapılan modellemede eleman hesap boyutunun (mesh size) kademeli olarak azaltıldığı dalga kanalında, eleman boyutunun en küçük olduğu bölgeye (kazık önü ve kazık arkası) konulan 7. ve 8. noktalarda ölçümlerin deneysel sonuçlara büyük oranda yaklaştığı görülmüştür. Örneğin 1. ve 8. noktalarda ilk 5 dalganın ortalaması sonucu dalga iletim katsayısı (r_T) 0,4198 bulunurken Hayashi ve arkadaşlarının deney sonucu 0,3848 elde edilmiştir. Şekil 4.13’te sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağıl hata miktarları (%) Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Model 7’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	İlk 5 dalga için 1. ve 8. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 5 dalga için 7. ve 8. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	İlk 10 dalga 7. ve 8. Noktalar (r_T)	Bağıl hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,0684	0,4198	9,1102	0,2952	-23,2609	0,2957	-23,1442	0,3848

**Şekil 4.13.** Model 7 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

$H_i=0,684$ m için $b/D=0,081$ kazık aralığında dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) Şekil 4.13’de gösterilmiştir. 1. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonuçlarının ilk 5 dalganın ortalaması kullanılarak elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) 0,4198 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan dalga iletim katsayısı (r_T) ile deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı (r_T) arasındaki bağıl hata miktarı ise % 9,1102 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.14. Model 7 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

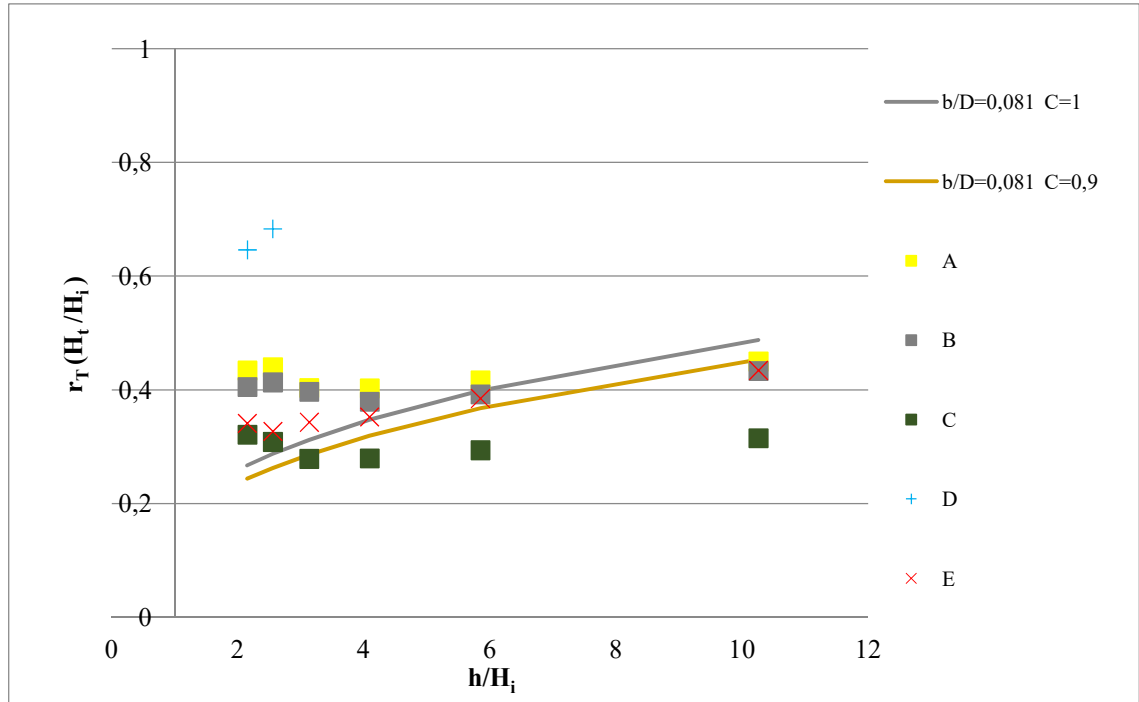
4.8. Model 8 Değerlendirmesi

Model 8 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.8’de verilmiştir. Tabloda A 1. ve 8. noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ilk 5 dalga için ortalamasıdır. B 2. ve 8. noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ilk 5 dalga için ortalamasıdır. C 7. ve 8. noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ilk 5 dalga için ortalamasıdır. D 3. ve 5. noktalardan alınan ölçüm sonuçlarının ilk 5 dalga için ortalamasıdır. E Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonuçlarıdır. Yapılan modellemede eleman hesap boyutunun (mesh size) 0,025 m olarak belirlenmesi ve 2. ve 8. noktalardan ölçüm yapılması sayısal model sonuçlarının deneysel model sonuçlarına büyük oranda yaklaşmasını sağlamıştır. Küçük dalga yüksekliklerinde yapılan modellemelerin büyük dalga yüksekliklerine göre daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Örneğin 0,186 metre dalga yüksekliği için bağıl hata miktarı %27,2383 olarak bulunurken 0,039 metre dalga yüksekliği için bağıl hata miktarı %3,5598 olarak elde edilmiştir. 3. ve 5. noktalardan yapılan ölçümlerin deneysel sonuçlardan çok uzaklaştığı görülmüştür. Örneğin dalga yüksekliği 0,186 metre için 2. ve 8. noktalardan yapılan ölçümler sonucu bağıl hata miktarı %27,2383 olarak hesaplanırken, 3. ve 5. noktalardan yapılan ölçümler sonucu bağıl hata miktarı %89,53 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.15’de sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağlı hata miktarları (%) Şekil 4.16’da gösterilmiştir. 3. ve 5. noktalardan alınan ilk 5 dalga ortalaması için $H_i = 0,1566$ gelen dalga yüksekliğinde bağlı hata %108,8 bulunduğundan $H_i = 0,1277-0,039$ metre aralığında modelleme yapılmamıştır.

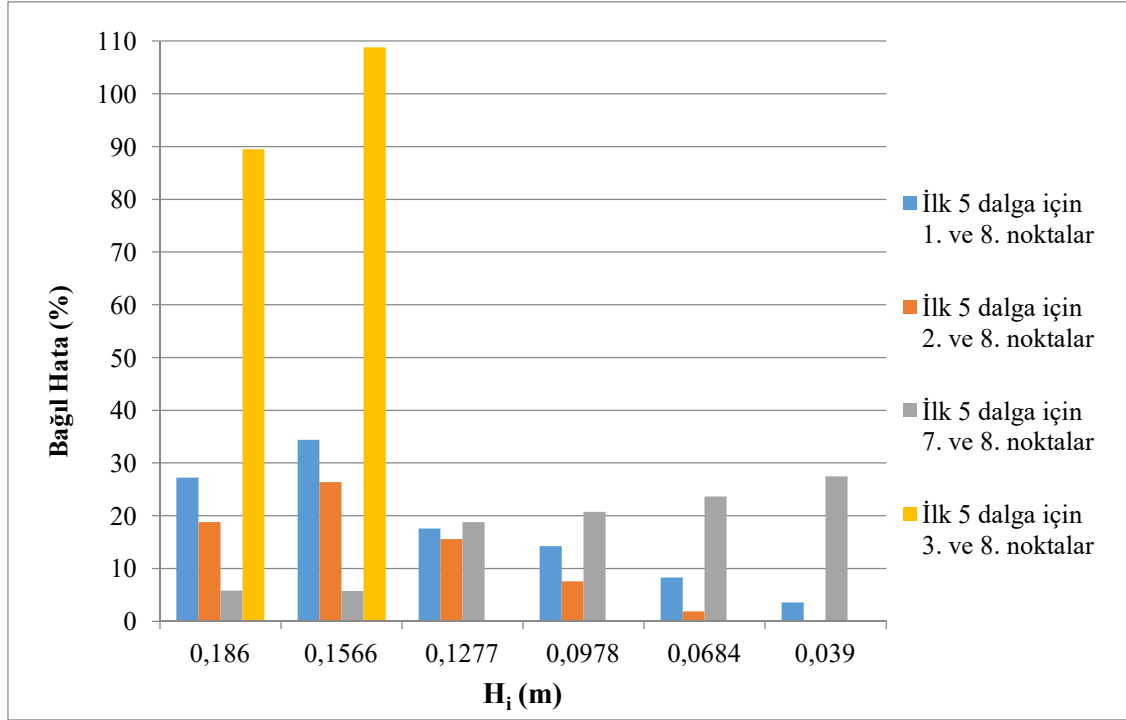
Tablo 4.8. Model 8’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	A (r_T)	Bağlı Hata (%)	B (r_T)	Bağlı Hata (%)	C (r_T)	Bağlı Hata (%)	D (r_T)	Bağlı Hata (%)	E (r_T)
0,186	0,4339	27,2383	0,4050	18,7647	0,3212	-5,7999	0,6464	89,53	0,341
0,1566	0,4397	34,4061	0,4133	26,3575	0,3084	-5,7193	0,6833	108,8	0,3271
0,1277	0,4034	17,5659	0,3965	15,5738	0,2786	-18,780	-	-	0,3431
0,0978	0,4026	14,2684	0,3790	7,5653	0,2794	-20,705	-	-	0,3523
0,0684	0,4167	8,3088	0,3920	1,8778	0,2938	-23,639	-	-	0,3848
0,039	0,4498	3,5598	0,4333	-0,2238	0,3149	-27,497	-	-	0,4343



Şekil 4.15. Model 8 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.15'te $b/D=0,081$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları gösterilmiştir. 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu ilk 5 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,4339 ile 0,4498 aralığında olduğu görülmüştür. Deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları arasındaki bağıl hata miktarının ise %27,2383 ile %3,5598 aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16. Model 8 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

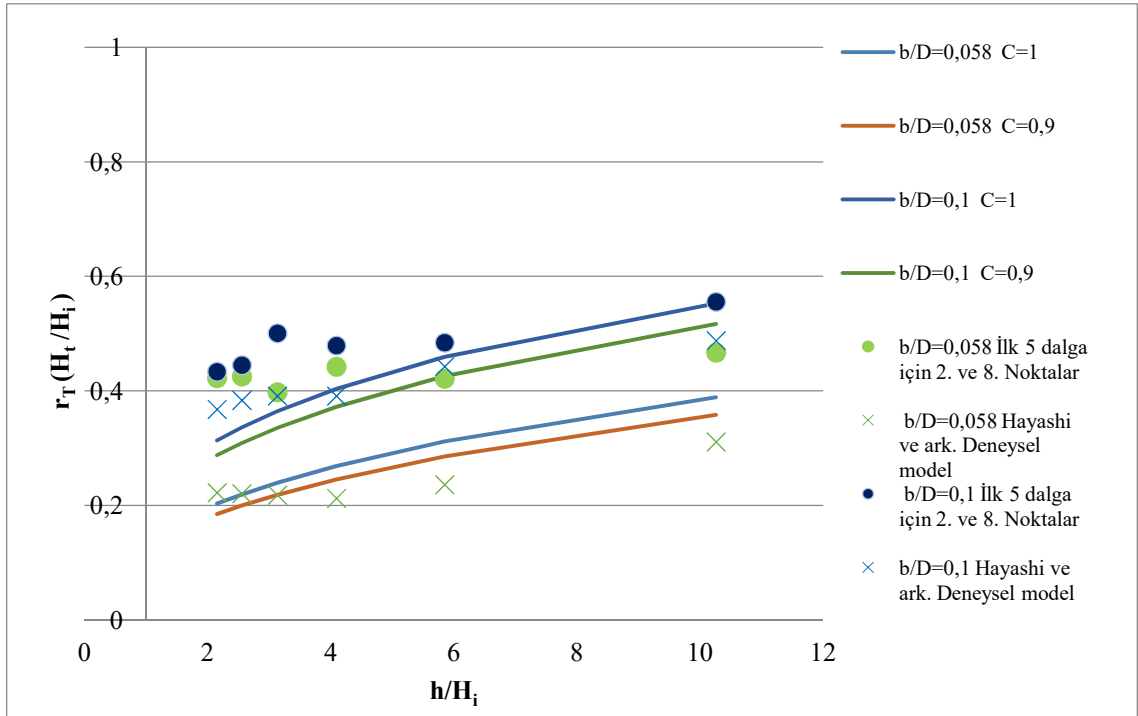
4.9. Model 9 Değerlendirmesi

Model 9 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.9'da verilmiştir. Yapılan modellemelerde kazık arası mesafenin, kenar kazıkların kanalın yan duvarına olan mesafesinden daha kısa olduğu durumlarda (Şekil 3.6), dalganın daha geniş taraftan geçme eğiliminden dolayı elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) deneysel sonuçlardan çok uzaklaştığı görülmüştür. Kazık arası mesafenin kenar duvarlara olan mesafeye yakın olduğu durumda ise deneysel sonuçlara daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Şekil 4.17'de sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga

iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır. Bağlı hata miktarları (%) Şekil 4.18’de gösterilmiştir.

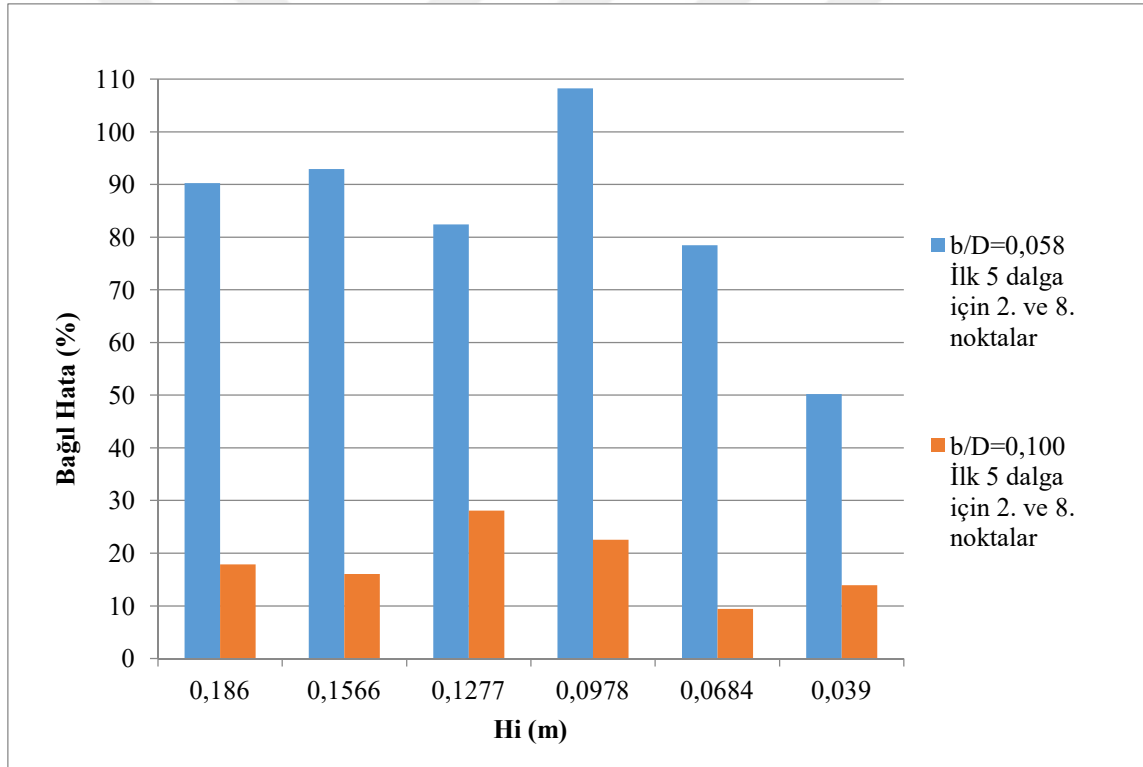
Tablo 4.9. Model 9’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

	$b/D = 0,058$			$b/D = 0,100$		
$H_i(m)$	İlk 5 dalga için 2. ve 8. Noktalar (r_T)	Bağlı Hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)	İlk 5 dalga için 2. ve 8. Noktalar (r_T)	Bağlı Hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,186	0,4223	90,2238	0,2220	0,4334	17,8765	0,3677
0,1566	0,4252	92,9018	0,2204	0,4449	16,031	0,3835
0,1277	0,3976	82,3949	0,2179	0,5005	28,0569	0,3909
0,0978	0,4421	108,227	0,2123	0,4791	22,5525	0,3909
0,0684	0,4213	78,4783	0,2361	0,4842	9,4507	0,4424
0,039	0,4668	50,1835	0,3108	0,5554	13,9476	0,4875



Şekil 4.17. Model 9 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.17’de $b/D=0,058$ ve $b/D=0,100$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları gösterilmiştir. İlk 5 dalga ortalaması için $b/D=0,058$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,3976 ile 0,4668 aralığında olduğu görülmüştür. Hesaplanan dalga iletim katsayıları (r_T) ile deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarının ise %108,227 ile %50,1835 aralığında olduğu görülmüştür. İlk 5 dalga ortalaması için $b/D=0,100$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,5554 ile 0,4334 aralığında olduğu görülmüştür. Hesaplanan dalga iletim katsayıları (r_T) ile deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları arasındaki bağıl hata miktarı ise %28,0569 ile %9,4507 aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.18. Model 9 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

4.10. Model 10 Değerlendirmesi

Model 10 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları Tablo 4.10’da ve Tablo 4.11’de verilmiştir. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları

(r_T) arasında hesaplanan bağıl hata yüzdesel olarak Tablo 4.12’de verilmiştir. Yapılan modellemelerde elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T), deneysel modellemelerde elde edilmiş dalga iletim katsayılarına (r_T) en yakın olduğu sonuçların model 10’da olduğu görülmüştür. Örneğin Model 8’de 0,186 m dalga yüksekliği için 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçümlerde bağıl hata miktarı %18,7647 olarak bulunurken Model 10’da %9,8152 olarak bulunmuştur. Sayısal model ile deneysel model arasındaki sonuçlarda en iyi uyum kazık arası mesafenin kazık çapına oranının (b/D) 0,100 olduğu durumda olmaktadır. Örneğin 0,186 m dalga yüksekliği için kazık arası mesafenin kazık çapına oranının (b/D) 0,058 olduğu durumda bağıl hata miktarı %45,0783 bulunurken, kazık arası mesafenin kazık çapına oranının (b/D) 0,100 olduğu durumda bağıl hata miktarı %10,3279 bulunmuştur.

Tablo 4.10. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	İlk 5 dalga için 2. ve 8. noktalar					
	$b/D=0,222$		$b/D=0,164$		$b/D=0,100$	
	D=15,65557 (cm)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)	D=16,5975 (cm)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)	D=17,778 (cm)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,186	0,6097	0,5229	0,5491	0,4410	0,4057	0,3677
0,1566	0,6221	0,5482	0,5551	0,4418	0,4334	0,3835
0,1277	0,6029	0,5288	0,5505	0,4458	0,4353	0,3909
0,0978	0,6112	0,5610	0,5424	0,4682	0,4136	0,3909
0,0684	0,6228	0,6024	0,5476	0,5312	0,4227	0,4424
0,039	0,6903	0,6698	0,6221	0,5694	0,4744	0,4875

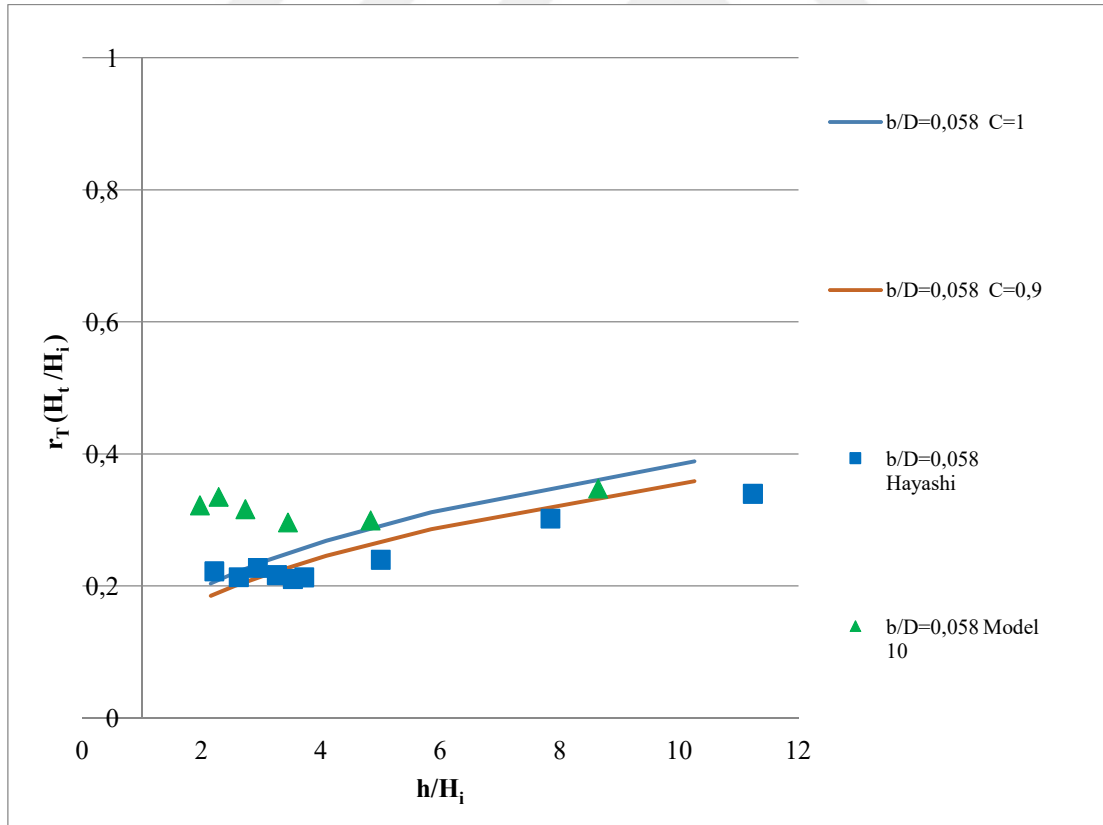
Tablo 4.11. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayılarının devamı (r_T)

H_i (m)	İlk 5 dalga için 2. ve 8. noktalar			
	$b/D=0,081$		$b/D=0,058$	
	D=18,16118 (cm)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)	D=18,6480 (cm)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,186	0,3745	0,3410	0,3221	0,2220
0,1566	0,4049	0,3271	0,3348	0,2204
0,1277	0,3853	0,3431	0,3163	0,2179
0,0978	0,3665	0,3523	0,2961	0,2123
0,0684	0,3665	0,3848	0,2993	0,2361
0,039	0,4272	0,4343	0,3475	0,3108

Tablo 4.12. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri

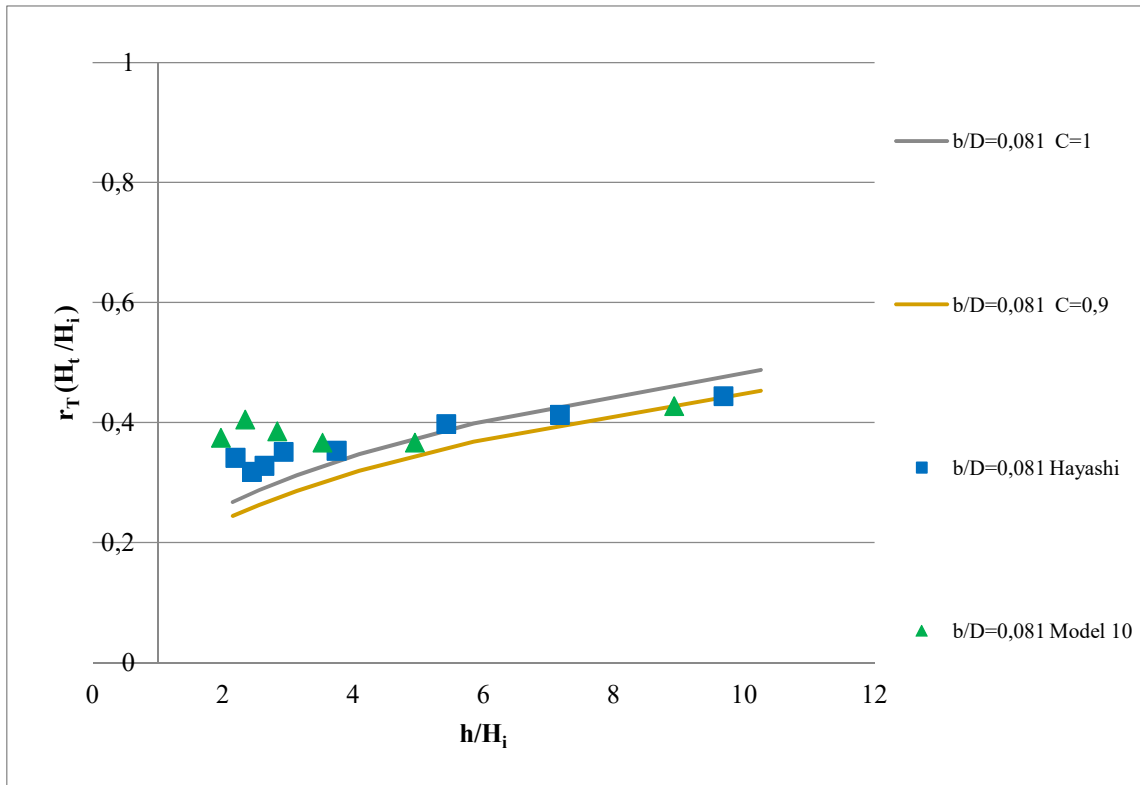
	Bağıl Hata (Sayısal-Deneysel)/Deneysel (%)				
H_i (m)	$b/D=0,058$	$b/D=0,081$	$b/D=0,100$	$b/D=0,164$	$b/D=0,222$
0,186	45,0783	9,8152	10,3279	24,5068	16,6100
0,1566	51,8976	23,7930	13,0254	25,6519	13,4710
0,1277	45,0973	12,2894	11,3607	23,4852	14,0144
0,0978	39,4644	4,0190	5,81005	15,8477	8,9507
0,0684	26,7936	-4,7493	-4,4624	3,0992	3,3776
0,039	11,8114	-1,6229	-2,6847	9,2419	3,0635

Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T), model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile grafik üzerinden kıyaslanmış ve aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir (Şekil 4.19 - Şekil 4.23).



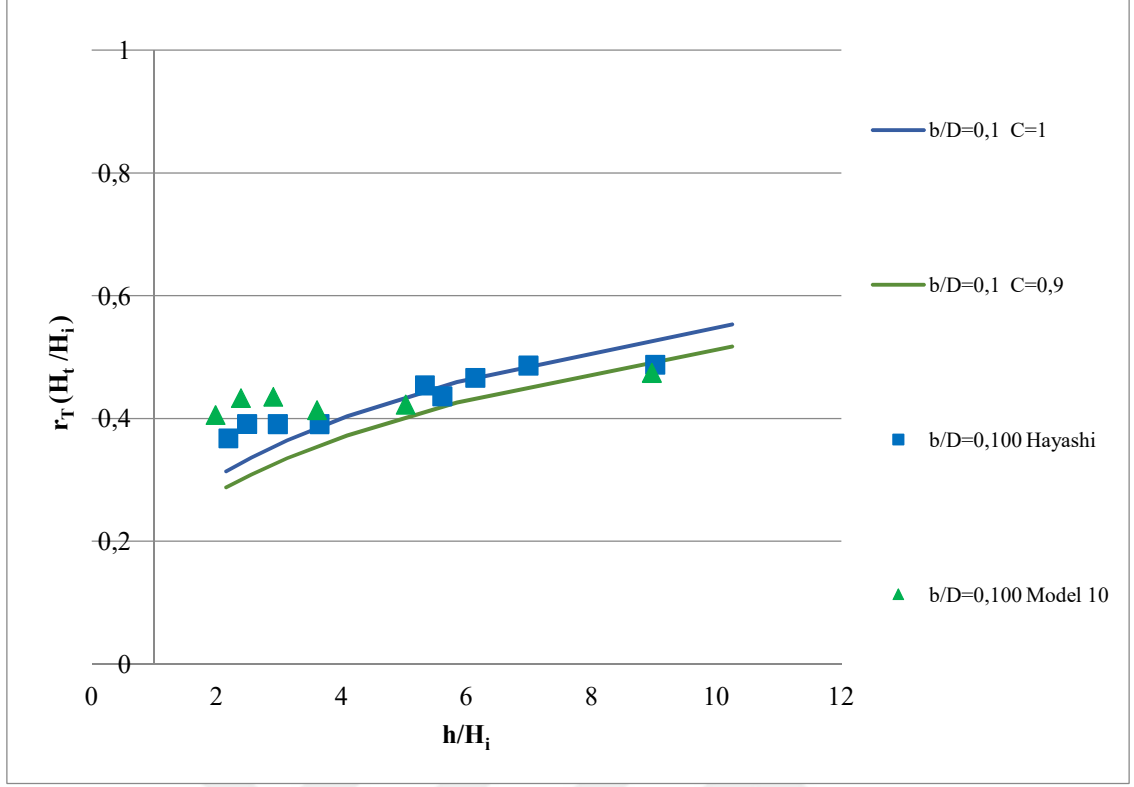
Şekil 4.19. $b/D=0,058$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.19’da $b/D=0,058$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları gösterilmiştir. $b/D=0,058$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu ilk 5 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,2123 ile 0,3108 aralığında olduğu görülmüştür. Hesaplanan dalga iletim katsayıları (r_T) ile deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarının ise %51,8976 ile %11,8114 aralığında olduğu görülmüştür.



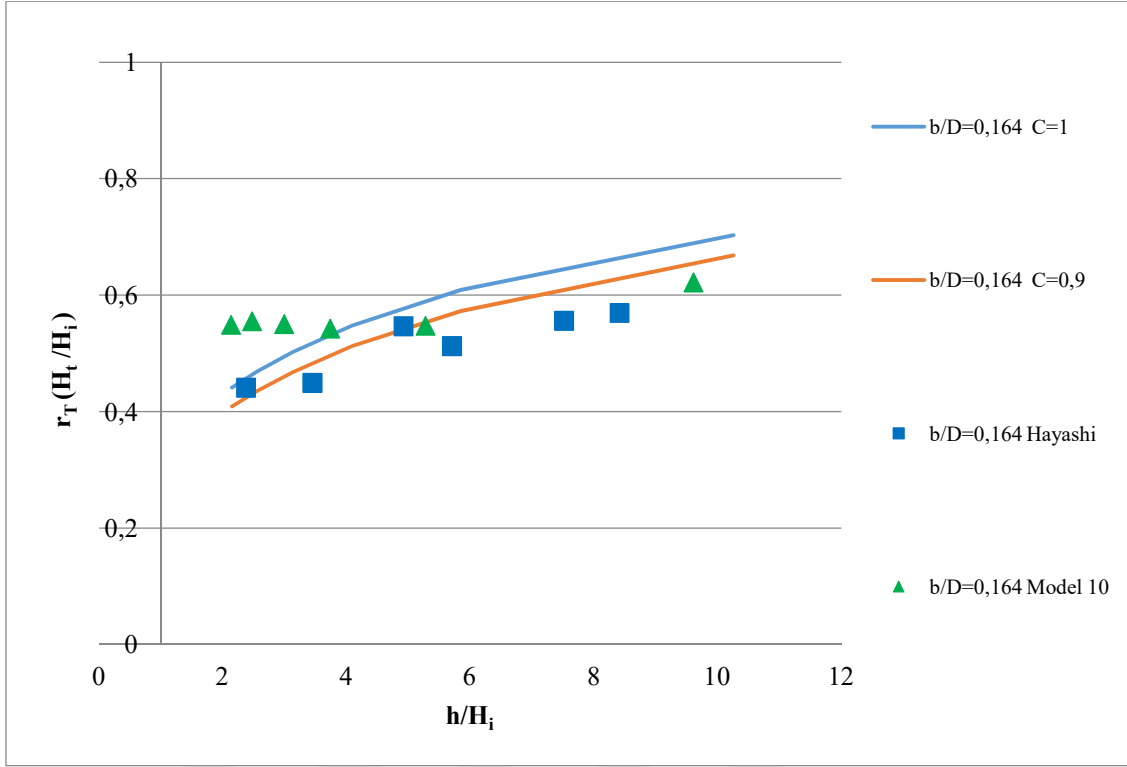
Şekil 4.20. $b/D=0,081$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.20’de $b/D=0,081$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları sunulmuştur. $b/D=0,081$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu ilk 5 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,4272 ile 0,3665 aralığında olduğu görülmüştür.



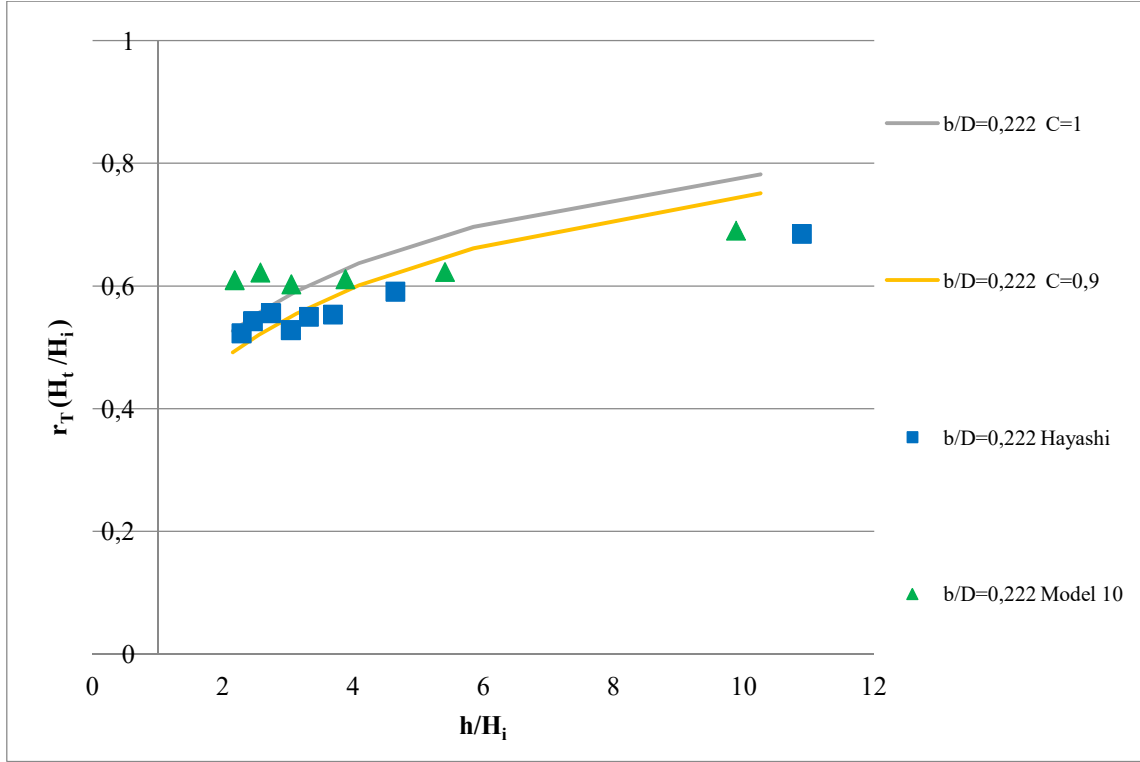
Şekil 4.21. $b/D=0,100$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.21’de $b/D=0,100$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları gösterilmiştir. $b/D=0,100$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu ilk 5 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,4136 ile 0,4744 aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.22. $b/D=0,164$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

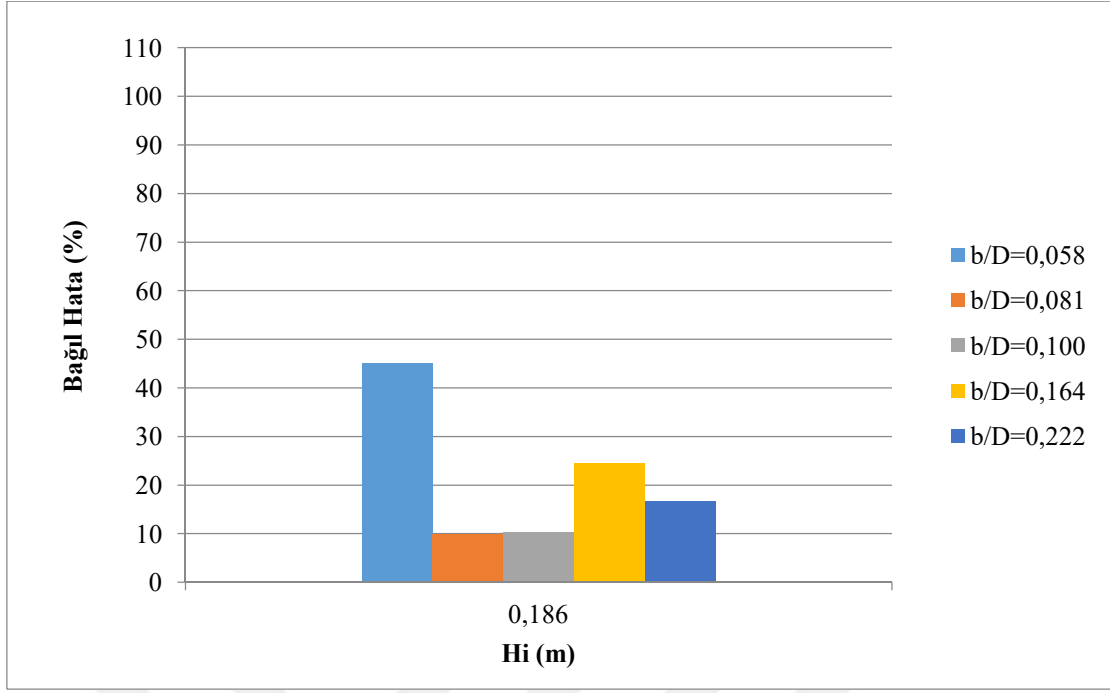
Şekil 4.22’de $b/D=0,164$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları gösterilmiştir. $b/D=0,164$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu ilk 5 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,5424 ile 0,6221 aralığında olduğu görülmüştür.



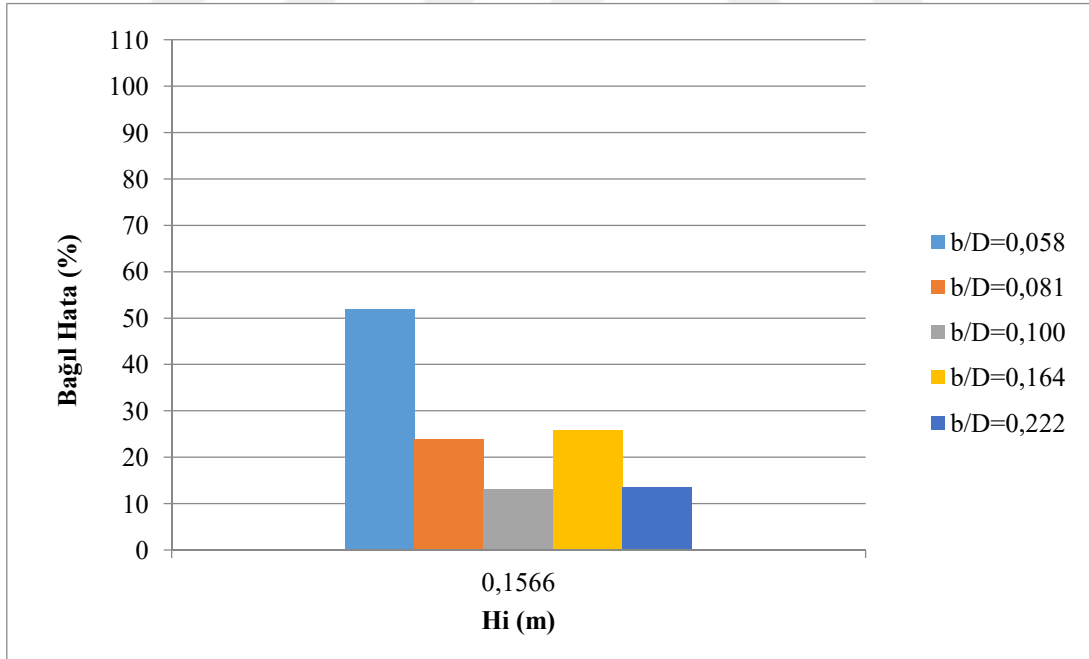
Şekil 4.23. $b/D=0,222$ için deneysel ve sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.23’de $b/D=0,222$ için 6 farklı dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayıları gösterilmiştir. $b/D=0,222$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu ilk 5 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) 0,6029 ile 0,6923 aralığında olduğu görülmüştür.

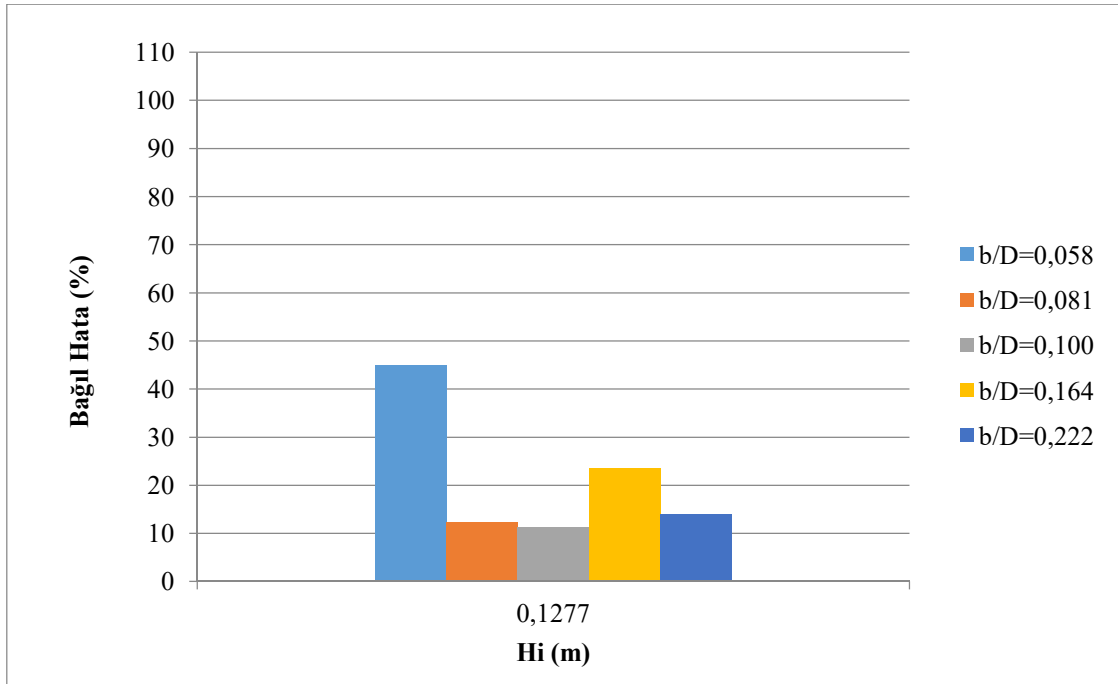
Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir (Şekil 4.24-Şekil 4.29).



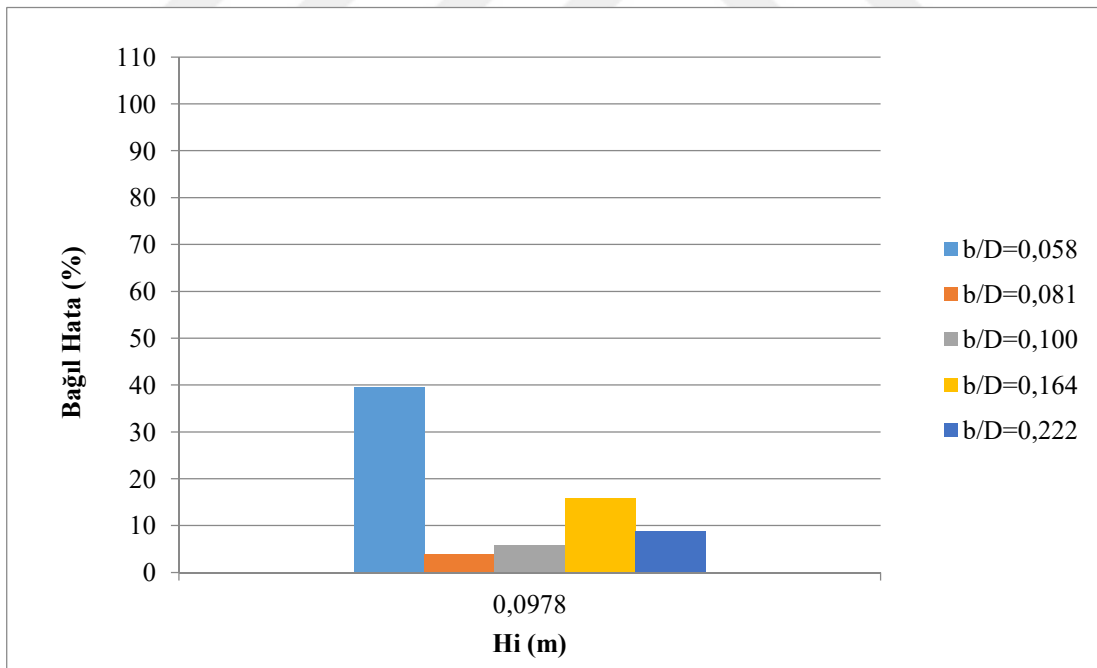
Şekil 4.24. $H_i=0,186$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri (%)



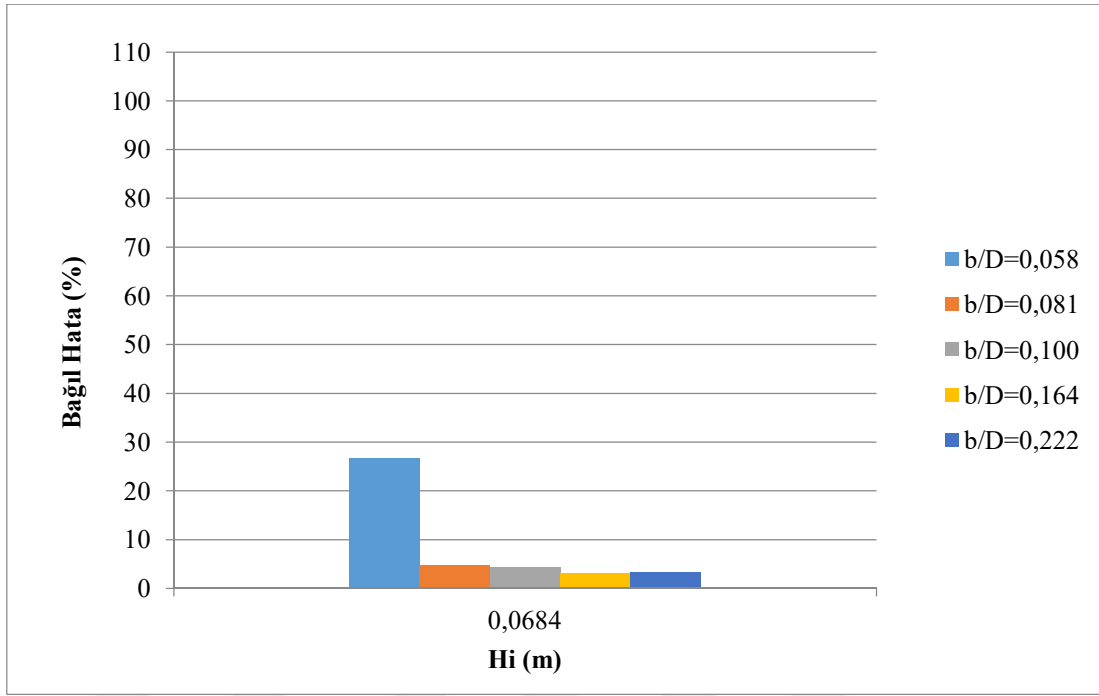
Şekil 4.25. $H_i=0,1566$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)



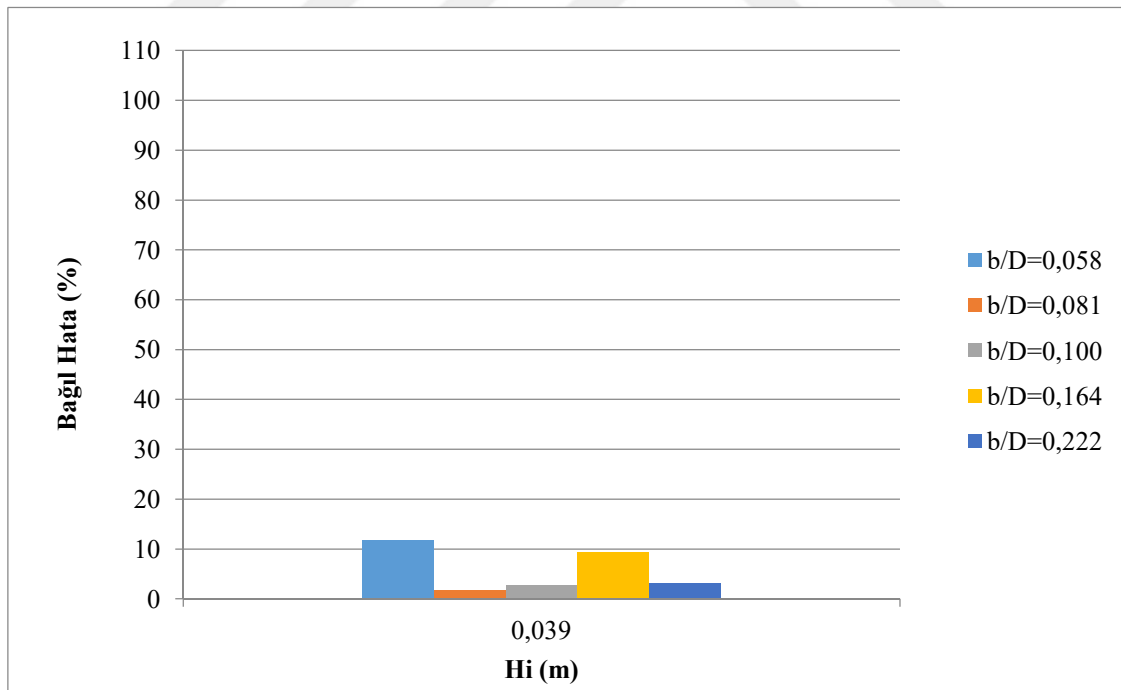
Şekil 4.26. $H_i=0,1277$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağlı hata miktarları (%)



Şekil 4.27. $H_i=0,0978$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağlı hata miktarları (%)



Şekil 4.28. $H_i=0,0684$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)



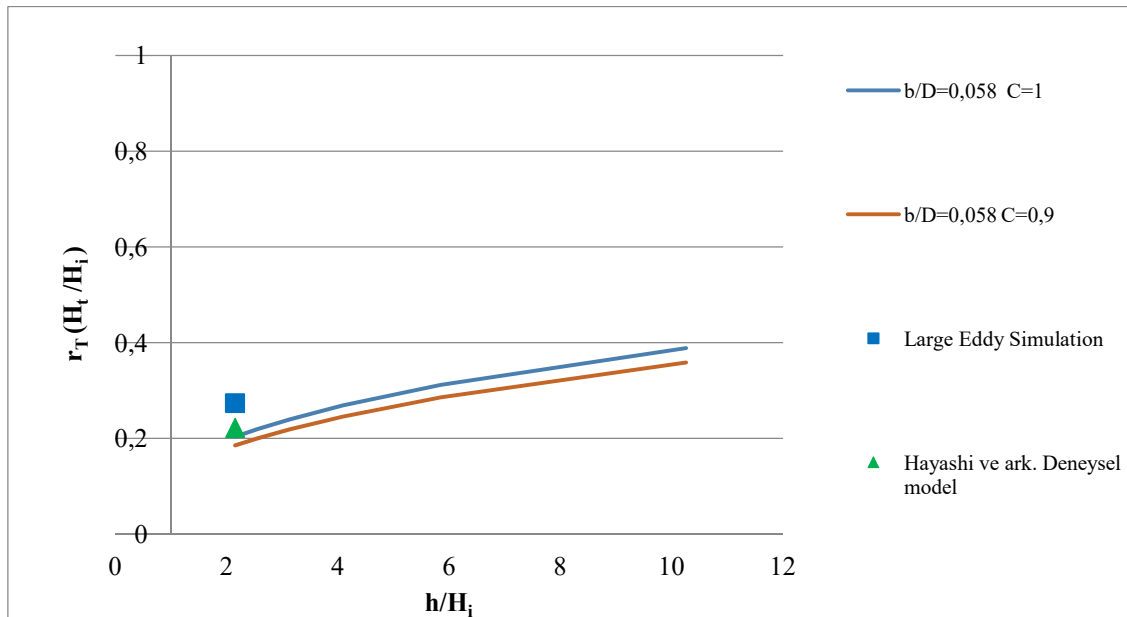
Şekil 4.29. $H_i=0,039$ m için Model 10 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki bağıl hata miktarları (%)

4.11. Model 11 Değerlendirmesi

Model 11 sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ve bağıl hata miktarları (%) Tablo 4.13’de verilmiştir. Diğer modellemelerde en büyük bağıl hata miktarları büyük dalga yüksekliklerinde görüldüğü için model 11’de verilen dalga yüksekliği (H_i) 0,186 m olarak belirlenmiştir. Model 11’de akış modeli olarak Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) modelinin kullanılması sonuçlar üzerinde iyileştirme göstermiş fakat hesaplama süresi yaklaşık 8 katına çıkmıştır. Örneğin $H_i=0,186$ m ve $b/D=0,058$ kazık aralığı için Model 10’da bağıl hata miktarı %45,0783 bulunurken, Model 11’de %23,3327 bulunmuştur. Şekil 4.30’da sayısal modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları, Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları ile grafik üzerinden kıyaslanmıştır.

Tablo 4.13. Model 11’de elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

2. ve 8. Noktalar İlk 5 dalga ortalaması $b/D = 0,058$			
H_i (m)	Large Eddy Simulation (r_T)	Bağıl Hata (%)	Hayashi ve ark. Deneysel model (r_T)
0,186	0,2738	23,3327	0,2220

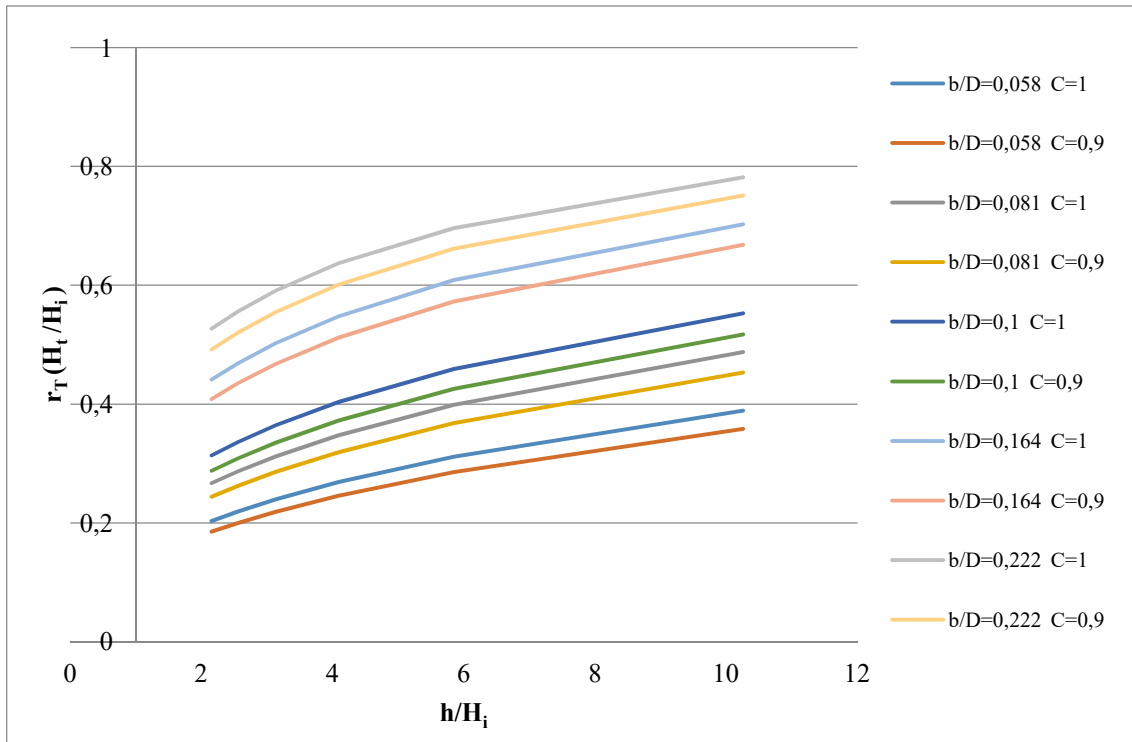


Şekil 4.30. Model 11 ile Hayashi ve arkadaşları tarafından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Şekil 4.30’da $b/D=0,058$ için 0,186 m dalga yüksekliği ile dalga simülasyonu yapılmış ve elde edilen dalga iletim katsayısı gösterilmiştir. $b/D=0,058$ kazık aralığında 2. ve 8. noktalarda yapılan ölçüm sonucu ilk 5 dalga ortalaması için elde edilen dalga iletim katsayısının 0,2738 olduğu görülmüştür.

4.12. Bulgular

Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ ve $C=0,9$ katsayıları için yapılan teorik çalışmalar sonucu elde edilen dalga iletim katsayısı eğrileri (r_T) Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31. Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ ve $C=0,9$ katsayıları için yapılan teorik çalışmalar sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ ve $C=0,9$ katsayıları için yapılan teorik çalışmalar sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14. Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ ve $C=0,9$ katsayıları için yapılan teorik çalışmalar sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T)

H_i (m)	b/D=0,058		b/D=0,081		b/D=0,100		b/D=0,164		b/D=0,222	
	C=0,9	C=1	C=0,9	C=1	C=0,9	C=1	C=0,9	C=1	C=0,9	C=1
0,186	0,1850	0,2032	0,2439	0,2668	0,2876	0,3136	0,4085	0,4412	0,4916	0,5270
0,1566	0,1998	0,2192	0,2625	0,2868	0,3087	0,3362	0,4351	0,4688	0,5204	0,5562
0,1277	0,2186	0,2396	0,2860	0,312	0,3353	0,3643	0,4677	0,5024	0,5551	0,5912
0,0978	0,2455	0,2685	0,3191	0,3472	0,3723	0,4033	0,5118	0,5475	0,6008	0,6368
0,0684	0,2856	0,3115	0,3677	0,3985	0,4258	0,4591	0,5726	0,6088	0,6615	0,6963
0,039	0,3584	0,3888	0,4530	0,4873	0,5171	0,5529	0,6682	0,7027	0,7512	0,7817

Model 10'da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan teorik çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları arasında hesaplanan bağıl hata yüzdesel olarak aşağıdaki Tablo 4.15'te ve Tablo 4.16'da sunulmuştur.

Tablo 4.15. Model 10'da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=1$ katsayısı için yapılan teorik çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri

H_i (m)	Bağıl Hata (Sayısal-Teorik)/Teorik (%)				
	C=1				
	b/D=0,058	b/D=0,081	b/D=0,100	b/D=0,164	b/D=0,222
0,186	58,476	40,3468	29,3408	24,4558	15,2000
0,1566	60,5934	46,5619	32,5458	19,7885	11,5671
0,1277	40,2622	28,8774	23,1791	11,3135	2,8248
0,0978	18,9050	12,2320	7,79355	9,4440	-2,5119
0,0684	4,4176	-1,5436	-2,4039	-7,0160	-8,6200
0,039	-3,6026	-7,2180	-9,7238	-9,7142	-10,8568

Tablo 4.16. Model 10’da elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından $C=0,9$ katsayısı için yapılan teorik çalışma sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları arasında hesaplanan bağıl hata yüzdeleri

	Bağıl Hata (Sayısal-Teorik)/Teorik (%)				
	$C=0,9$				
H_i (m)	$b/D=0,058$	$b/D=0,081$	$b/D=0,100$	$b/D=0,164$	$b/D=0,222$
0,186	74,1023	53,5554	41,0590	34,4098	23,4451
0,1566	76,3675	60,2491	44,4122	29,1229	19,2272
0,1277	53,8729	40,6924	33,9466	18,5847	9,56499
0,0978	30,2417	22,2780	16,9414	9,4440	3,42671
0,0684	14,0771	6,8981	5,45236	-0,9645	-3,6658
0,039	4,73582	-0,0005	-3,2694	-4,916	-7,1516

5. SONUÇ

Bu çalışmada daha önce Hayashi ve arkadaşları tarafından laboratuvar ortamında deneysel olarak modellenen bir kazıklı dalgakıran modeli Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımı olan Flow-3D ile modellenmiştir. Yapılan modelleme sonuçlarında elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T), Hayashi ve arkadaşları tarafından sunulan teorik ve deneysel modelleme sonuçlarından elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalar göz önüne alınarak Flow-3D ile yapılan sayısal modellemenin daha doğru benzeşim sağlaması için girdi parametreleri, hesap yöntemi ve sınır koşulları üzerinde kalibrasyon yapılmıştır. Yapılan değişikliklerin bazılarının sayısal modelleme sonuçlarına olumlu yansıdığı, bazılarının da etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

Yapılan 11 adet sayısal modellemede Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel modelleme sonucu elde edilen dalga iletim katsayılarına (r_T) en yakın olan sonuçları model 10 verdiği görülmüştür. Model 10'da kabul edilen sınır koşullar ve girdiler ile 5 adet farklı kazık aralığı ve 6 adet farklı dalga yüksekliği için analizler yapılmış ve 30 adet dalga iletim katsayısı (r_T) elde edilmiştir. Elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) daha sonra Hayashi ve arkadaşları tarafından sunulan teorik çalışmalar sonucu elde edilen katsayılar ile de kıyaslanmıştır.

Yapılan analizlerden ve kıyaslamalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Flow-3D sayısal analiz programında kazıklı dalgakıran modeli oluşturulurken, doğruluk yüzdesi yüksek sonuçlar almak ve hesap süresini kısa tutmak için eleman hesap boyutunu (mesh size) 0,025 m seçmenin en uygun olduğu görülmüştür.
- Yapılan sayısal modellemeler sonucunda yüzey gerilimi (Surface Tension) modelinin aktif olması dalga iletim katsayısı üzerinde önemli ölçüde değişim göstermemiştir.
- Flow-3D sayısal analiz programında kazıklı dalgakıran modeli oluşturulurken, dalga kanalı içerisine yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktaları (prob), kanalın giriş (inlet) ve çıkış (outlet) noktalarına yakın konulduğunda (Şekil 3.3 1. ve 6. nokta) elde edilen dalga iletim katsayılarının (r_T) sınır koşullardan etkilendiği ve deneysel modellemelerde elde edilen sonuçlardan uzaklaştığı görülmüştür.

- Kanal içerisinde kazık öncesi yerleştirilen dalga yüksekliği okuma noktalarının (prob) kazıklara yakın yerleştirildiğinde (Şekil 3.5, 7. Nokta) kazıklardan dolayı yansıyan dalgaların gelen dalga yüksekliğini (H_i) etkilediği görülmüştür. Dalga yansımalarından az etkilenmek ve sağlıklı sonuçlar almak için gelen dalga yüksekliği (H_i) okuması yapılan noktaların (prob) kazıklara çok yakın konulmaması gerektiği görülmüştür (Şekil 3.5, 2. nokta).
- Yapılan modelleme çalışmalarında gelen dalga yüksekliği (H_i) küçüldükçe bağlı hata oranının azaldığı görülmüştür.
- Flow-3D sayısal analiz programında modellenen kazıklı dalgakıran modellerinde elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) ile Hayashi ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel model sonucu elde edilen dalga iletim katsayıları (r_T) arasındaki en tutarlı sonuçlar, kazık arası mesafenin kazık çapına oranı (b/D) 0,100 olduğu durumda görülmüştür.
- Yapılan kazıklı dalgakıran modelinde eleman hesap boyutunun (mesh size) bölgesel şekilde kazıklara doğru azaltılmasının dalga iletim katsayısı (r_T) üzerinde büyük bir iyileştirme gerçekleştirmediği görülmüştür (Model 6).
- Model 11’de türbülans akış modeli olarak Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) modelinin kullanılması, dalga iletim katsayısı (r_T) üzerinde iyileştirme göstermiş fakat hesaplama süresi yaklaşık 8 katına çıkmıştır. İlerleyen çalışmalarda Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) modelinde daha küçük eleman hesap boyutlarında analiz yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Bilici, Ç., 2014. Kazık Tipi Dalgakıran yapısının Dalga Geçirirliği Üzerine Model Çalışması, Yüksek Lisans Tezi. Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Buğra, C.E., 2005. Kazıklı Dalgakıranların Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Ergin, A., 2009. Coastal Engineering, ODTU yayınevi, Ankara, 203 s.
- Flow-3D, 2019. *Flow-3D*, Flow Science, Inc. Santa Fe, NM, ABD.
- Frantzis, C., Grigoriadis, D.G.E., Dimas, A.A., 2020. Numerical Study Of Solitary Waves Past Slotted Breakwaters With A Single Row Of Vertical Piles:Wave Processes And Flow Behavior, *Ocean Engineering*, 211, 107667.
- Hayashi, T., Kano, T., 1966. Hydraulic Research on the Closely Spaced Pile Breakwater, *Costal Engineering Journal*, 1, 873-884.
- Hongwei, L., Ghidaoui, M.S., Huang, Z., Yuan, Z., Wang, J., 2010. Numerical Investigation of the Interactions Between Solitary Waves and Pile Breakwaters using BGK-Based Methods, *Computers and Matematics With Applications*, 61, 3668-3677.
- Huang, J., Chen, G., 2010. Experimental Modeling of Wave Load on a Pile-Supported Wharf With Pile Breakwater, *Ocean Engineering*, 201, 107149.
- Ji, C.H., Kyung, D.S., 2010. Wave Interactions With Multiple-Row Curtainwall-Pile Breakwaters, *Coastal Engineering*, 57, 500-512.
- Kabdaşlı, S., 1985. Kıyı Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Kyung, D.S., Jung, H.Y., Pyun, C.K., 2007. Wave Reflection And Transmission By Curtainwall- Pile Breakwaters Using Circular Piles, *Ocean Engineering*, 34, 2100-2106.
- Kyung, D.S., Shin, S., 2006. Hydrodynamic Characteristics Of Pile Supported Vertical Wall Break Waters, *Journal of Water Way Port Coastal & Oceane Engineering*, 83-96.
- Mathew, S.E., Suvarna, P.S., Sathyanarayana, H.A., Umesh, P., 2018. Numerical Investigation of Wave Interaction With Pile Breakwater, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Washington DC, USA, 1618-1628.
- Mojtahedi, A., Beiragh, M.S., Farajpour, I., Mohammadian, M., 2020. Investigation On Hydrodynamic Performance Of An Environmentally Friendly Pile Breakwater, *Ocean Engineering*, 217, 107942.

- Mutlu, T., 1998. Sempatik Kıyı Koruma Yapısı Olarak Kazıklı Dalgakıranların Düzenli ve Düzensiz Dalgalar Altındaki Performanslarının ve Üzerine Gelen Yüklerin İncelenmesi, Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Suvarna, P.S., Sathyanarayana, H.A., Umesh, P., Shirlal, K.G., 2020. Laboratory Investigation On Hydraulic Performance Of Enlarged Pile Head Breakwater, *Ocean Engineering*, 217, 107989. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107989>.
- Suvarna, P.S., Sathyanarayana, H.A., Umesh, P., Shirlal, K.G., 2021. Hydraulic performance of perforated enlarged pile head breakwaters through laboratory investigation, *Ocean Engineering*, 241, 110089. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110089>.
- Xuan T.L., Ba, H.T., Manh, H.L., Van, D.D., Nguyen, N.M., Wright, D.P., Bui, V.P., Mai, S.T., Anh, D.T., 2020. Hydraulic Performance And Wave Transmission Through Pile-Rock Breakwaters, *Ocean Engineering*, 218, 108229. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108229>.
- Yin, M., Zhao, X., Luo, M., Sun, H., 2021. Flow Pattern and Hydrodynamic Parameters of Pile Breakwater Under Solitary Wave Using OpenFOAM, *Ocean Engineering*, 235, 109381.
- Yüksel, Y., 2011. Dalgakıran Tasarımı, Beta yayınevi, İstanbul.
- Yüksel, Y., 2016. Kıyı Yapıları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, İstanbul, 267 s.
- Zhu, D.T., Xie, Y.F., 2015. Hydrodynamic Characteristics Of Offshore And Pile Breakwaters, *Ocean Engineering*, 104, 257-265.
- Zhu, D., 2011. Hydrodynamic Characteristics Of A Single-Row Pile Breakwater *Coastal Engineering*, 58, 446-451.