



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Batık Dalgakıranlarda Dalga İletimi

Wave Transmission over Submerged Breakwaters

Rabia Karagöz ^{id}, Doğan Kısacık ^{*id}

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
 Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: dogankisacik@iyte.edu.tr

Öz

Bu çalışma, batık dalgakıranların dalga iletimi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan 2B küçük ölçekli deneysel bir çalışmaya dayanmaktadır. Çalışmada, 15 farklı batık dalgakıran kesiti, dört farklı hidrodinamik koşul altında test edilerek, dalgakıran yüksekliği ve kret genişliğinin dalga iletimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel veriler, Van der Meer, d'Angremond vd., Seabrook vd., Friebel vd. ve Van Gent vd. [1-5] tarafından geliştirilen mevcut dalga iletimi modelleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma özellikle hem daha yüksek hem de daha geniş kretli olan daha büyük batık dalgakıranların iletilen dalga yüksekliğinde daha önemli bir azalmaya katkıda bulunduğunu vurgulamıştır. Test edilen çeşitli formülasyonlar arasında Van Gent [5] formülü deneysel sonuçlarla en yüksek uyumu göstermiş ve kıyı koruma stratejilerinin optimize edilmesinde hem geometrik parametrelerin hem de hidrodinamik koşulların önemini vurgulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Dalga İletimi, Batık Dalgakıran, Kıyı Koruma Yapıları, İklim Değişikliği

Abstract

This study is based on a 2B small-scale experimental investigation carried out to examine the effects of submerged breakwaters on wave transmission. In the study, 60 different submerged breakwater models were tested under four different hydrodynamic conditions, and the effects of breakwater height and crest width on wave transmission were evaluated. The experimental data were compared with existing wave transmission models developed by Meer, d'Angremond et al., Seabrook et al., Friebel et al., and Van Gent et al. [1-5] The study particularly emphasized that larger submerged breakwaters, with both higher and wider crests, contributed significantly to the reduction of transmitted wave height. Among the various formulations tested, the Van Gent [5] formula showed the highest consistency with the experimental results, highlighting the importance of both geometric parameters and hydrodynamic conditions in optimizing coastal protection strategies.

Keywords: Wave Transmission, Submerged Breakwater, Coastal Protection Structures, Climate Change

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Coastal zones face increasing risks from climate change, including sea-level rise and stronger storms. Conventional defenses, such as vertical seawalls, often fail under these conditions, prompting interest in submerged breakwaters (SBWs) as alternative protective structures. SBWs dissipate wave energy by reflection, breaking, and reduced transmission, quantified through the wave transmission coefficient (K_t). Reliable K_t prediction is essential for flood risk assessments and coastal design.

Materials and Methods

A series of two-dimensional physical model tests were performed in the İzmir Institute of Technology wave flume ($40 \times 1 \times 1.4$ m) at 1:16 Froude scale. Trapezoidal SBWs with 1:2 slopes were built with five crest heights (0.09–0.21 m) and four crest widths (3–8 D_{n50} , with $D_{n50} = 0.03$ m). Sixty tests combining 15 geometries and four hydrodynamic conditions ($H_{m0} = 0.075$ – 0.091 m, $T_{m-1,0} = 1.15$ – 1.26 s, water depth = 0.22 – 0.24 m) were conducted using irregular JONSWAP spectra. Wave gauges measured incident, reflected, and transmitted waves. Data were corrected for residual flume reflections and K_t values were computed.

Results and Discussion

Measured K_t values ranged from 0.405 to 0.854. Higher and wider-crested SBWs consistently reduced transmitted wave heights. Model comparisons showed: Meer [1] provided good but scattered predictions; d'Angremond et al. [2] slightly underestimated transmission; Seabrook & Hall [3] underperformed due to scale limitations; Friebel et al. [4] yielded systematic underestimation; Van Gent et al. [5] showed the strongest agreement ($R^2 = 0.99$), accurately representing the influence of crest width and relative freeboard.

Conclusion

The experiments confirmed that SBW performance strongly depends on crest geometry and hydrodynamic forcing. Transmission reduction is most effective for larger structures. Among predictive models, Van Gent [5] proved most reliable, followed by d'Angremond [2] and Friebel [4]. The findings highlight the role of crest width as a critical design parameter and confirm SBWs as effective measures to strengthen coastal resilience against climate-induced hazards.

1. Giriş

İklim değişikliği, özellikle kıyı bölgelerinde çevresel baskıları artırmakta ve bu bölgeleri daha kırılgan hâle getirmektedir.

Küresel ısınmaya bağlı olarak deniz seviyesinin yükselmesi, fırtına sıklığı ve şiddetindeki artışlarla birleştiğinde, kıyı yerleşimlerinde taşkın riskini ciddi oranda artırmaktadır. Nüfus yoğunluğu, kritik altyapılar ve ekonomik faaliyetlerin önemli bir

kısmının kıyı bölgelerinde yoğunlaşması, bu alanların iklim değişikliğine karşı savunmasızlığını daha da derinleştirmektedir. Bu durum, mevcut kıyı koruma yapılarının yeterliliğini sorgulamakta ve daha etkili, uzun vadeli çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Mevcut kıyı koruma sistemleri, özellikle dik deniz duvarları gibi yapılar, artan dalga enerjisine karşı yeterli performansı sergileyememekte; taşkınlara ve yapısal hasarlara yol açabilmektedir. Bu bağlamda, ilave koruyucu önlemler geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Batık dalgakıranlar, bu gerekliliğe yönelik umut vadeden çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Dalgakıranın kret kotunun su seviyesinin altında yer alması sayesinde, gelen dalga enerjisinin bir bölümü yansıtılmakta, bir bölümü kırılmakta, geri kalan kısmı ise azaltılmış enerjiyle iletilmektedir. Böylece, kıyı yapısına ulaşan dalga enerjisi azalarak, dalga aşma riski düşürülmektedir.

Bu iletim süreci, çeşitli hidrodinamik ve yapısal parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Dalgaların batık dalgakıran tarafından ne ölçüde iletildiğini belirlemek amacıyla kullanılan temel kavram, dalga iletim katsayısı (K_t) olarak tanımlanır. K_t değeri, iletilen dalga yüksekliğinin gelen dalga yüksekliğine oranıdır. Bu katsayının doğru tahmin edilmesi, yalnızca dalga iletiminin belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda dalga aşmasının miktarını hesaplayabilmek açısından da kritiktir.

Literatürde, K_t değerinin tahmini için geliştirilmiş çeşitli ampirik formüller mevcuttur. Bu formüller farklı deneysel veri setlerine, yapı tiplerine ve dalga koşullarına göre türetilmiştir. Ancak her formülün belirli sınırlar içinde geçerli olduğu ve farklı senaryolarda farklı doğruluk seviyeleri sergileyebileceği unutulmamalıdır. Bu bağlamda, dalga iletim katsayısını en doğru şekilde tahmin edebilecek formülün belirlenmesi mühendislik uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, fiziksel model deneyleri ile elde edilen veriler ışığında, literatürde önerilen dalga iletim formüllerinin tahmin performanslarını karşılaştırmak ve mevcut formülasyonların deneysel koşullarla olan uyum düzeyini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olan fiziksel model testleri kullanılarak, farklı batık dalgakıran konfigürasyonlarının dalga iletim katsayısına etkisi değerlendirilmiş ve literatürdeki formüller ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulguların, batık dalgakıranların aşmayı azaltması ve kıyı yapılarına entegre edilerek direnç artırımı konularında mühendislik uygulamalarına katkı sağlaması beklenmektedir.

2. Literatür Çalışması

Yapay veya doğal bir engel tarafından kısmen indirgendikten sonra yapının arkasına geçen dalga miktarına dalga iletimi denir. Dalga iletim katsayısı, K_t , Denklem 1'de gösterildiği gibi yapıdan iletilen dalga yüksekliğinin, yapıya yaklaşan dalga yüksekliğine oranı veya alternatif olarak yapıdan iletilen dalga enerjisinin (E_t), yapıya yaklaşan dalga enerjisine (E_i) oranının karekökü olarak tanımlanır. Bu bağıntı spektral dalga yüksekliği (H_{m0}) kullanılarak aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$K_t = \frac{H_{m0t}}{H_{m0i}} = \left(\frac{E_t}{E_i} \right)^{0.5} \quad (1)$$

İletilen dalga enerjisi, yapıya gelen dalgaların karakteristik özelliklerine, yapının geometrisine ve yapının geçirgenliğine bağlıdır.

Van der Meer [1] tarafından yapılan çalışmalar, batık yapıların dalga iletimine ilişkin formülasyonların geliştirilmesinde öncü

rol oynamıştır (Denklem 2). Söz konusu çalışmalar, dalga iletim katsayısının (K_t), kret fribordu (F) ve gelen dalga yüksekliği (H_{m0i}) ile ilişkili olarak 0,1 ile 0,8 arasında değiştiğini ortaya koymuştur. Ancak Van der Meer'in formülü, kret genişliğinin (B) dalga iletimi üzerindeki etkilerini hesaba katmamıştır.

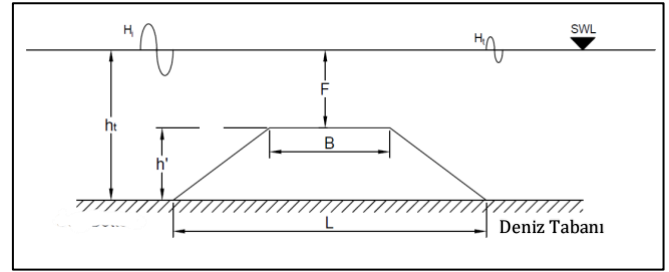
$$K_t = 0.80, \quad -2.0 < \frac{F}{H_{m0i}} < -1.13$$

$$K_t = 0.46 - 0.3 \frac{F}{H_{m0i}}, \quad -1.13 < \frac{F}{H_{m0i}} < 1.2 \quad (2)$$

$$K_t = 0.1, \quad 1.2 < \frac{F}{H_{m0i}} < 2$$

Burada,

F kret fribord ($F = h_t - h'$), h_t yapı önündeki su derinliği ve h' yapının yüksekliğidir (Şekil 1). Batık dalgakıranlar için kret fribord (F) negatif olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1. Batık dalgakıran parametreleri gösterimi.

Van der Meer ve Daemen [6] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada hem batık hem de batık olmayan dalgakıranlar için dalga iletim katsayısı, kret fribordu ve nominal taş çapının bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir

$$K_t = a \frac{F}{D_{n50}} + b \quad (3)$$

Burada D_{n50} dalgakırandaki kullanılan taşların nominal çapını ifade etmektedir. "a" katsayısı,

$$a = 0.031 \frac{H_{m0i}}{D_{n50}} - 0.24 \quad (4)$$

"b" katsayısı ise batık olmayan yapılar için,

$$b = -5.42S_{0p} + 0.0323 \frac{H_{m0i}}{D_{n50}} - 0.0017 \left(\frac{B}{D_{n50}} \right)^{1.84} + 0.51 \quad (5)$$

batık yapılar için,

$$b = -2.6S_{0p} + 0.05 \frac{H_{m0i}}{D_{n50}} + 0.85 \quad (6)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada $S_{0p} = H_{m0,0}/L_{0,p}$ derin deniz pik dalga dikliğidir. Geleneksel taş dolgu dalgakıranlar için dalga iletim katsayısı (K_t) 0.075 ile 0.75 arasında değişmektedir. Batık dalgakıranlar için ise ($\frac{F}{D_{n50}} < -2$ koşulunda) 0.15 ile 0.60 arasında değişmektedir. Önerilen denklem 2.3, $1 < \frac{H_{m0i}}{D_{n50}} < 6$ ve $0.01 < S_{0p} < 0.05$ aralıklarında geçerlidir.

d'Angremond vd. [2], hem geçirimsiz hem de geçirimli yapılar üzerinde çalışmalar yürütmüş ve dalga iletim katsayısını;

normalize edilmiş kret genişliği ve fribord ile Iribarren sayısının bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir.

Geçirimli dalgakıranlar için,

$$K_t = -0.4 \frac{F}{H_{m0i}} + \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)^{-0.31} \times (1 - e^{-0.5\xi}) \quad (7)$$

$\times 0.64$ ve $0.075 < K_t < 0.80$

Geçirimsiz dalgakıranlar için,

$$K_t = -0.4 \frac{F}{H_{m0i}} + \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)^{-0.31} \times (1 - e^{-0.5\xi}) \quad (8)$$

$\times 0.80$ ve $0.075 < K_t < 0.80$

Burada,

$$\xi(\text{irbarren sayısı}) = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L0}}}$$

$\tan \alpha$ yapı şev açısıdır.

Seabrook ve Hall [3], batık dalgakıranlar üzerine yaptıkları 2B ve 3B fiziksel model deneyleri sonucunda aşağıdaki formülü önermiştir.

$$K_t = 1 - \left(e^{0.65 \frac{F}{H_{m0i}} - 1.09 \frac{H_{m0i}}{B}} - 0.047 \left(\frac{B * F}{L * D_{n50}} \right) + 0.067 \left(\frac{F * H_{m0i}}{B * D_{n50}} \right) \right) \quad (9)$$

Formül F , B , H_{m0i} parametrelerinin K_t için önemli parametreler olduğunu göstermiştir. Ayrıca, formülün Denklem 10' da gösterilen sınır koşulları altında incelenmesi önerilmektedir.

$$\begin{aligned} -7.08 &\leq \left(\frac{B * F}{L * D_{n50}} \right) \leq 0 \\ -2.14 &\leq \left(\frac{F * H_{m0i}}{B * D_{n50}} \right) \leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Calabrese vd. [7], Van der Meer [1] tarafından önerilen formülde yer alan D_{n50} parametresini, B (kret genişliği) ile değiştirerek, düşük kretli ve batık dalgakıranlar için aşağıdaki K_t formülünü önermişlerdir. Bu formül büyük ölçekli deney sonuçlarına dayanmaktadır.

$$K_t = a \frac{F}{B} + b \quad (11)$$

a ve b katsayıları,

$$a = (0.6957 \frac{H_{m0i}}{ht} - 0.7021) e^{0.2568 \frac{B}{H_{m0i}}} \quad (12)$$

$$b = (1 - 0.562 e^{-0.0507\xi}) e^{-0.0845 \frac{B}{H_{m0i}}} \quad (13)$$

Şeklinde ifade edilmektedir.

Bu formül aşağıdaki sınır koşulları altında geçerlidir.

$$-0.4 \leq \frac{F}{B} \leq 0.3$$

$$1.06 \leq \frac{B}{H_{m0i}} \leq 8.13 \quad (14)$$

$$0.31 \leq \frac{H_{m0i}}{ht} \leq 0.61$$

$$3 \leq \xi \leq 5.20$$

Briganti vd. [8], d'Angremond vd. [2] tarafından önerilen formülün yalnızca $\frac{B}{H_{m0i}} < 10$ için geçerli olduğunu gösteren sonuçlar elde etmiş ve daha sonra bu formülü daha geniş kretli ($\frac{B}{H_{m0i}} > 10$) batık dalgakıranlar için de kullanılacak şekilde genişletmiştir.

$$K_t = -0.35 \frac{F}{H_{m0i}} + 0.51 \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)^{-0.65} \times (1 - e^{-0.41\xi}) \quad (15)$$

Van der Meer vd. [9] ise, d'Angremond vd. [2] tarafından önerilen formülü $\frac{B}{H_{m0i}} > 12$ aralığını da kapsayacak şekilde genişletmiştir.

$$K_t = -0.3 \frac{F}{H_{m0i}} + 0.75 (1 - e^{-0.5\xi_{op}}) \text{ for } \xi_{op} < 3 \quad (16)$$

Bu formülde K_t değeri 0.075 – 0.8 arasında değişmektedir

Diğer bir çalışmada, Friebel vd. [4], batık dalgakıranların dalga iletimi için aşağıdaki K_t formülünü önermiştir:

$$\begin{aligned} K_t = & -0.4969 \exp\left(\frac{F}{H_{m0i}}\right) - 0.0292 \left(\frac{B}{h_t}\right) \\ & - 0.4257 \left(\frac{h'}{h_t}\right) \\ & - 0.0696 \log\left(\frac{B}{L}\right) \\ & + 0.1359 \left(\frac{F}{B}\right) + 1.0905 \end{aligned} \quad (17)$$

Bu formül aşağıda verilen sınır koşulları altında geçerlidir.

$$-8.639 \leq \left(\frac{F}{H_{m0i}} \right) \leq 0.000$$

$$0.286 \leq \left(\frac{B}{h_t} \right) \leq 8.750$$

$$0.440 \leq \left(\frac{h'}{h_t} \right) \leq 1.000 \quad (18)$$

$$0.024 \leq \left(\frac{B}{L} \right) \leq 1.890$$

$$-1.050 \leq \left(\frac{F}{B} \right) \leq 0.000$$

Sindhu ve Shirlal [10], kıyı koruması için kullanılan batık dalgakıranlarda dalga iletim katsayısı (K_t) için yeni bir denklem geliştirmişlerdir. K_t için dalga yüksekliği ve periyodu, su derinliği, kret genişliği ve fribordu ve D_{n50} içeren bir boyutsal analiz kullanmışlardır. Elde edilen denklem, geliştirilen bir MATLAB tabanlı sayısal modelin sonuçları ile doğrulanarak geçerliliği değerlendirilmiştir.

$$K_t = (0.02 \frac{F}{B} + 0.035 \frac{h'}{h_t}) \times (\frac{h_t}{D_{n50}} + \frac{0.45}{\sqrt{S_p}}) \quad (19)$$

Theodora Giantsi ve C. I. Moutzouris [11] düşük kretli kıyı koruma yapıları için yapılan 3B fiziksel model deneylerinden elde edilen sonuçlar ile d'Angremond vd. [2] (Denklem 7 ve 8) formülünü güncellemişlerdir. Güncellenen formül.

$$K_t = (-0.0175 \frac{F}{H_{m0i}} + 0.64 (\frac{B}{H_{m0i}})^{-0.31}) \times (1 - e^{-0.5\epsilon_{op}}) + 0.06 \quad (20)$$

Kurdistani vd. [12], Flow-3D yazılımı ile gerçekleştirdikleri sayısal modelleme çalışmasında elde ettikleri veriler doğrultusunda, batık ve gözenekli dalgakıranlar için aşağıdaki K_t formülünü önermiştir:

$$K_t = 0.576 \ln \left(0.428(1 + \cot \alpha)^{0.042} (1 - \frac{F}{H_{m0i}})^{0.75} (\frac{B_{eff}}{D_{n50}})^{0.125} (\frac{L_p}{B_{eff}})^{0.39} \omega^{0.413} \Psi^{-0.18} \right) + 0.923 \quad (21)$$

Burada $B_{eff} = \frac{4B + \text{taban genişliği}}{5}$, $\omega = (\frac{1}{2\pi}) \tanh(\frac{2\pi h_t}{L})$ ve $\Psi = \frac{n^{0.5} h x}{BH_{m0}}$ olarak tanımlanan boyutsuz parametrelerdir. Burada n = gözeneklilik (%) ve x = dalgakıranın çekirdek kesiti içerisindeki yatay konum koordinatını ifade etmektedir. Son olarak, Van Gent vd. [5], DELTARES'te gerçekleştirilen fiziksel model deneyleri sonuçlarına dayanarak, batık yapılar için yeni bir K_t formülü önermiştir. Bu formül, Daemen (1991) ve Calabrese vd. [7] tarafından önerilen formüllerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

$$K_t = c_1 \tanh \left(\left(-(\frac{F}{H_{m0i}} + c_2 (\frac{B}{L_{m-1,0}})^{c_3} + c_4 \right) \right) + c_5 \quad (22)$$

Tablo 1'de, Denklem 22'de kullanılan katsayılar gösterilmektedir.

Tablo 1. Denklem. 22 için katsayılar (Kaynak: Van Gent vd. [5]).

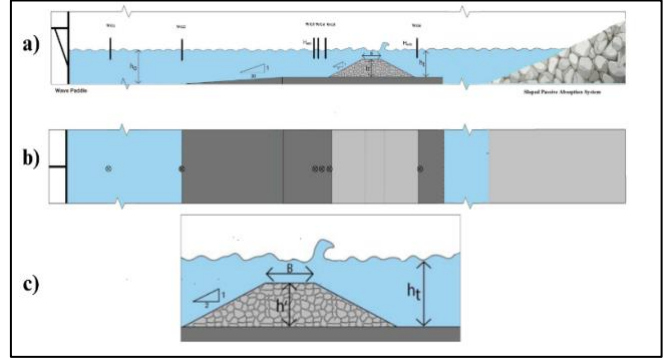
Yapı Özelliği	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Geçirimsiz yapı	0.47	3.1	0.75	0	0.5
Geçirimli yapı (taş dolgu yapı)	0.43	3.1	0.75	-0.25	0.5
Delikli yapı	0.13	3.1	0.75	-0.15	0.82
Paravanlı delikli yapı	0.4	3.1	0.75	-0.15	0.5
Delikli paravanlı, delikli yapı	0.17	3.1	0.75	-0.15	0.75

3. DeneySEL Kurulum ve Yöntem

Çalışmanın amacı, çeşitli hidrodinamik koşullar ve batık dalgakıran konfigürasyonları altında dalgakırandan iletilen dalga özelliklerini ölçmektir. Bu doğrultuda, fiziksel model deneyleri aracılığıyla dalga iletimi incelenmiş ve iletilen dalga özellikleri ölçülmüştür.

Bu çalışmada gerçekleştirilen iki boyutlu (2B) laboratuvar deneyleri, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Hidrolik

Laboratuvarı'nda yer alan dalga kanalında, 1:16 ölçek kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan dalga kanalı 40m uzunluğunda, 1m genişliğinde ve 1.4m yüksekliğinde çelikten üretilmiştir. Kanalin 8 metrelik bir kısmı deneyler sırasında gözlem yapılabilmesi için camdan yapılmıştır. Dalga kanalında 5kW gücünde düzenli ve düzensiz dalgalar üretme kapasitesine sahip piston tipi bir dalga üreticisi vardır. Dalga kanalının sonunda, kanalda oluşan yansımaları en aza indirmek için iri boyutlu kayaç malzemesinden oluşan 1/5 eğimli pasif sönümleme sistemi mevcuttur. Batık dalgakıran modeli, dalga üreticisinden 20.7 m uzaklıkta, dalga kanalının tabanından 0.18 m yukarıda yer alan ve 1/30 geçiş eğime sahip düz bir platforma üzerine yerleştirilmiştir. Eğimli platform, dalga üreticisinin 10.5 m önünde başlamaktadır. (Şekil 2).



Şekil 2. DeneySEL kurulum a) yan kesit görünüm b) üst görünüm c) batık dalgakıran modeli.

Batık dalgakıran modelleri, trapezoid (yamuk) kesit formunda tasarlanmıştır (Şekil 2). Dalga iletimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, dalgakıranlar beş farklı yükseklik (h') ve dört farklı kret genişliği (B) için modellenmiştir. Ön ve arka yüz eğimleri, literatürde yaygın olarak tercih edilen 1:2 eğim oranına göre oluşturulmuştur. Kret genişlikleri ise Rock Manual [13] yönergelerine uygun şekilde, minimum $3D_{n50}$ şartını sağlayacak biçimde $3D_{n50} \leq B \leq 8D_{n50}$ aralığında belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan batık dalgakıranlara ait geometrik parametreler **Tablo 2**'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Batık dalgakıran parametreleri.

Yükseklik (h') (m)	Kret Genişliği (B) (m)
$h'_1 = 0.09$	$B_1 = 3D_{n50} = 0.09$
$h'_2 = 0.12$	$B_2 = 4D_{n50} = 0.12$
$h'_3 = 0.15$	$B_3 = 6D_{n50} = 0.18$
$h'_4 = 0.18$	$B_4 = 8D_{n50} = 0.24$
$h'_5 = 0.21$	

Test edilen batık dalgakıranlar, Hudson formülü (Denklem 23) esas alınarak tasarlanmış, taş ağırlıkları ve nominal taş çapı bu formül yardımıyla belirlenmiştir:

$$W = \frac{\gamma_s \times H_{m0,i}^3}{K_D \times \cot \theta \times (\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1)^3} \quad (23)$$

Burada γ_s ve γ_w sırasıyla taşların ve suyun özgül ağırlığı, H_{m0} tasarım dalga yüksekliği, K_D stabilite katsayısı ve θ dalgakıranın

eğimli yüzünün açısıdır. Dalgakıran tasarımı kullanılarak H_{m0} ve $T_{m-1,0}$ değerleri, Bölüm 3.1'deki hidrokinamik koşullar kısmında verilmiştir.

Çalışmada kullanılan batık dalgakıranlarda nominal taş çapı 1/16 ölçek için $D_{n50} = 0.03m$ olarak belirlenmiştir. ($K_D=2$, $\theta=1/2$, $H_{m0}=1.2$ ve $T_{m-1,0}=4.6$ s).

Modelde, gelen, yansıyan ve iletilen dalgaların ölçülmesi amacıyla toplam 6 adet dalga ölçek kullanılmıştır. Birinci dalga ölçek (WG1) dalga üreticisinin 3.5 m önüne, ikinci dalga ölçek (WG2) eğimli platformun başlangıç noktasına, yani dalga üreticisinden 10.5 m uzaklığa yerleştirilmiştir. Üçüncü, dördüncü ve beşinci dalga ölçekler (WG3, WG4, WG5) batık dalgakıranın önünde, dalga üreticisine göre sırasıyla 19.42 m, 19.58 m ve 19.9 m, altıncı dalga ölçek (WG6) ise batık dalgakıranın arkasında dalga üreticisine 22 m mesafede konumlandırılmıştır. (**Şekil 2**). Batık dalgakıranına gelen dalga koşulları, Mansard ve Funke [15] yöntemi kullanılarak, WG3, WG4 ve WG5 numaralı dalga ölçeklerden elde edilen veriler aracılığıyla belirlenmiştir. WG6 ise batık dalgakırandan iletilen dalga karakteristiğini ölçmek için kullanılmıştır.

3.1. Hidrokinamik Koşullar

Bu çalışmada kullanılan hidrokinamik koşullar, Kısacık vd. [16] tarafından yürütülen BAP projesi ile Sünger Kent Raporu [17] kapsamında belirlenen ve İzmir Körfezi'ne ait prototip koşullar esas alınarak 1:16 Froude ölçeğinde modellenmiştir. Kısacık vd. [16], İzmir Körfezi'nde Konak kıyı duvarı önünde altı farklı noktadan kıyı kesit verileri toplayarak, taşkın riski açısından en kritik kesiti belirlemiş ve bu kesit için durgun su seviyesini (SWL) 2.8 m olarak tanımlamışlardır. Ayrıca, fırtına koşullarında gözlenen +1 m'lik ekstrem su seviyesi artışıyla, toplamda +3,8 m yüksekliğinde bir başka su seviyesi (HWL) daha kaydedilmiştir. Bu çalışma kapsamında, İzmir Kordon bölgesine ilişkin yürütülen önceki çalışmalar referans alınarak dalga kanalı içerisindeki su seviyesi (h_t), ekstrem koşulları temsil eden 3,8 m ve bu seviyeye yakın olan 3,0 m su derinlikleri olarak belirlenmiş ve deneylerde bu iki su seviyesi çalışılmıştır.

Kısacık vd. [16], BAP Projesi ve Sünger Kent Raporu [17] kapsamında, üçüncü nesil yakın kıyı dalga modeli olan SWAN (Simulating Waves Nearshore) kullanılarak İzmir Körfezi'nde dalga modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Model sonuçlarına göre, iç körfezdeki belirli 6 farklı noktada maksimum dalga yüksekliği $H_{m0}=1.46$ m, bu noktaların ortalama dalga yüksekliği ise $H_{m0}=1.2$ m olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmada, belirlenen her iki su derinliğinde (h_t) bu dalga yükseklikleri çalışılmıştır. Dalga periyotları ise Kısacık vd. [16] tarafından SWAN modeli ile gerçekleştirilen sayısal dalga modelleme çalışmasından elde edilen veriler kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada, iç körfezdeki belirli noktalarda dalga dikliği yaklaşık olarak $S_0 \sim 0.037$ olarak belirlenmiştir. Dalga dikliği, spektral dalga yüksekliği (H_{m0}) ile derin deniz dalga boyu (L_0) arasındaki oranla ifade edilmektedir. Burada L_0 , lineer dalga teorisine göre derin deniz koşullarında dalga periyoduna bağlı olarak şu eşitlikle hesaplanır:

$$L_0 = \frac{g \cdot T_{m-1,0}^2}{2\pi} \quad (24)$$

Bu eşitlikler kullanılarak, iki farklı su derinliği (h_t) için dalga periyotları $T_{m-1,0} = 1.15$ ve 1.26 saniye olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3, yukarıda açıklanan hidrokinamik koşulları özetlemekte olup, bu çalışmada kullanılan 1/16 ölçekli fiziksel model önünde tanımlanan iki farklı su derinliği (h_t) için belirlenen dalga yüksekliği (H_{m0}) ve periyodu ($T_{m-1,0}$) değerlerini içermektedir.

Pedal önündeki su derinliği (h_0) ise model geometrisine bağlı olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Hedef hidrokinamik koşullar.

	h_0 (m)	h_t (m)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	L_0 (m)	S_0
H1	0.4	0.22	0.075	1.15	2.065	0.036
H2	0.4	0.22	0.091	1.26	2.479	0.037
H3	0.4175	0.2375	0.075	1.15	2.065	0.036
H4	0.4175	0.2375	0.091	1.26	2.479	0.037

Testler, **Tablo 3**'te tanımlanan her bir hidrokinamik koşul için pik artırma faktörü $\gamma = 3.3$ olan JONSWAP spektrumu kullanılarak üretilen 1000 düzensiz dalga ile gerçekleştirilmiştir.

3.2. Fiziksel Model Deney Programı

Deneyisel süreçte, beş farklı batık dalgakıran yüksekliği (h') ve dört farklı kret genişliği (B) kombinasyonundan oluşan toplam 15 farklı geometrik konfigürasyon test edilmiştir. İşlevsel gereksinimlerle uyumsuz olan, örneğin aşırı geniş kret genişliği ve çok küçük dalgakıran yüksekliği gibi kombinasyonlar çalışmaya dahil edilmemiştir. Her bir geometrik konfigürasyon, dört farklı hidrokinamik koşul altında test edilerek, toplamda 60 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. İncelenen geometrik konfigürasyonlara ilişkin detaylar, **Tablo 4**'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Batık dalgakıran geometrik konfigürasyonları

h'_1	B1	B2	B3
h'_2			
h'_3			
h'_4	B2	B3	B4
h'_5			

Bu deneylerde, dalga iletimi katsayısı (K_t) hesaplamak için, modelin arkasındaki iletilen dalga yüksekliği (H_{m0t}) ölçülmüştür. Yapıya gelen dalga parametreleri, modelin varlığından etkilenmemesi için modelsiz kanal koşullarında yapılan testler aracılığıyla belirlenmiştir. Deney koşulları ve test edilen konfigürasyonlar aşağıdaki **Tablo 5**'te verilmiştir.

Tablo 5. Deneyisel test programı.

Batık Dalgakıran Modeli			
Geometrik Konfigürasyon	h'	B	Hidrokinamik Koşullar
G01	h'_1	B1	
G02	h'_1	B2	
G03	h'_1	B3	
G04	h'_2	B1	
G05	h'_2	B2	
G06	h'_2	B3	

G07	h3'	B2	H1&H2&H3&H4
G08	h3'	B3	
G09	h3'	B4	
G10	h4'	B2	
G11	h4'	B3	
G12	h4'	B4	
G13	h5'	B2	
G14	h5'	B3	
G15	h5'	B4	

**h', B Tablo 2'de gösterilmiştir.

3.3. Yansıma analizi

Dalgalar, doğada veya laboratuvar ortamında bir yapıyla karşılaştıklarında, dalga yapıdan yansır. Yapı önünde kaydedilen dalga zaman serisi hem gelen hem de yapıdan yansıyan dalgaların süperpozisyonundan oluşur. Ancak, dalga aşımı ya da dalga dönüşümü gibi analizlerde yalnızca gelen dalga bileşenine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, yapıya ulaşan dalgaların yansıyan dalgalarından ayrıştırılması gereklidir.

Yansıyan dalgaları, gelen dalgalarından ayırmak amacıyla literatürde çeşitli teknikler mevcuttur. Bu yöntemlerden en bilinen ve yaygın olarak kullanılanlardan biri, Goda ve Suzuki [14] tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, yapının önüne yerleştirilen iki dalga ölçerden elde edilen veriler Fourier analiziyle işlenerek, gelen ve yansıyan dalgaların spektral özellikleri birbirinden ayrıştırılabilmektedir.

Yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem ise, Mansard ve Funke [15] tarafından geliştirilen üç dalga ölçerli tekniktir. Bu yöntemde, yapı önüne yerleştirilen üç dalga ölçer, dalga boyuna ve yapı önü su derinliğine (h_t) bağlı olarak belirlenen mesafelerde konumlandırılmakta ve gelen ile yansıyan dalga bileşenleri zaman serileri üzerinden spektral olarak ayrıştırılmaktadır. Yöntem, yalnızca daha geniş bir frekans aralığında uygulanabilir olmasıyla değil; aynı zamanda ölçüm gürültüsüne ve doğrusal teoriden sapmaları da dikkate alınmasıyla da öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, dalga ölçer konumlandırmasındaki küçük sapmalara karşı duyarlılığının düşük olması, yöntemin deneysel güvenilirliğini artıran önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada yapı önünde yansıyan ve gelen dalgaların ayrıştırılmasında Mansard & Funke [15] tarafından geliştirilen üç dalga ölçerli yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem kapsamında, yapı önündeki üç dalga ölçer (3., 4. ve 5. dalga ölçerler), aşağıdaki koşulları sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır:

$$x_{3,4} = \frac{L}{10}, \quad \frac{L}{6} < x_{3,5} < \frac{L}{3}, \quad x_{3,5} \neq \frac{L}{5} \text{ ve } x_{3,5} \neq \frac{3L}{10} \quad (25)$$

L yapı önündeki dalga boyunu temsil eder.

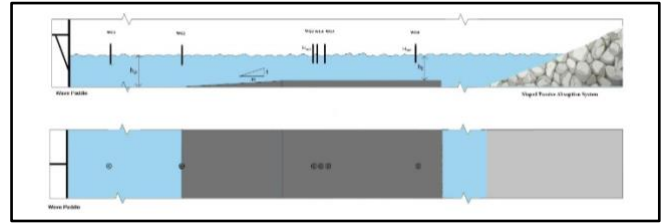
Dalga ölçerlerin konumlandırılmasına ilişkin mesafe değerleri **Tablo 6**'da sunulmaktadır.

Tablo 6. Dalga boylarına göre dalga ölçerler arasındaki mesafe.

Su derinliği h_t (m)	Period $T_{m-1,0}$ (s)	Dalga Ölçer	Dalga boyu $L_{m-1,0}$ (m)	3-4 arası mesafe (m)	3-5 arası mesafe (m)
0.22	1.15		1.5002		
0.22	1.26		1.6782		
0.2375	1.15	3-4-5	1.5432	0.16	0.48
0.2375	1.26		1.7295		

Deneyler iki durum için gerçekleştirilmiştir. Bunlar modelin kanal içinde mevcut olduğu ve olmadığı iki durumu ifade eder. Her iki durumda da dalga karakteristikleri aynı lokasyonlarda ölçülmüştür. Yapının mevcut olmadığı durumda, ölçümler yapıdan etkilenmeyeceği için gelen dalga özelliğini temsil etmesi beklenmektedir. Fakat kanalın sonunda bulunan 1/5 eğimli taş dolgu pasif dalga sönümleyicinin varlığı bir yansıma oluşturmaktadır. Bu yansımanın miktarının belirlenmesi bu açıdan önemlidir.

Bu amaçla, **Şekil 3**'de gösterilen WG3, WG4 ve WG5 dalga ölçerlerinden elde edilen veriler kullanılarak Mansard&Funke [15] yöntemi uygulanmış; modelin kanal içinde bulunmadığı koşullar altında, gelen ve yansıyan dalgaların spektral parametreleri (H_{m0i} ve $T_{m-1,0}$) birbirinden ayrıştırılmıştır.



Şekil 3. Modelin kanal içinde mevcut olmadığı durum a) yandan görünüm, b) üstten görünüm

Yapılan analizler sonucunda yansıma katsayısı (C_r) %19-21 aralığında tespit edilmiştir. Bu bulgu, taş dolgu pasif dalga sönümleyicinin belirli ölçüde yansıma yarattığını ve bu etkinin ihmal edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, çalışmada yapıya gelen dalga yüksekliği olarak Mansard&Funke [15] yöntemiyle ayrıştırılan $H_{m0,i}$ değerleri esas alınmıştır.

Şekil 4, yansıma katsayısının Iribarren sayısına dayalı olarak türetilmiş bir parametre olan β ile nasıl değiştiğini hem yapının mevcut olduğu hem de olmadığı durumlar için göstermektedir. Yoo (1986) tarafından geliştirilen β parametresi, klasik Iribarren sayısından farklı olarak, su derinliğinin (h_t) etkisini de dikkate alacak şekilde tanımlanmıştır. Yapı bulunmadığı durumda C_r değerleri yaklaşık %20 seviyesindeyken yapı bulunduğu durumda elde edilen yansıma katsayısı (C_r) değerleri %21 ile %24 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, batık dalgakıranın yansımayı bir miktar artırdığını, ancak bu artışın sınırlı düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Kanalın sonunda yer alan 1/5 eğimli pasif sönümleme sistemine kıyasla, batık dalgakıran dalga enerjisini daha etkili biçimde dağıtmakta ve yansımayı daha düşük seviyelerde tutmaktadır.

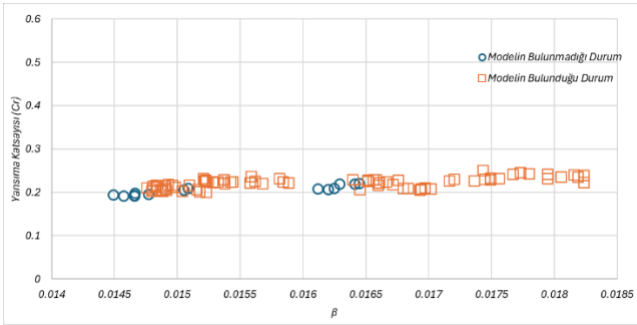
Iribarren sayısı:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (26)$$

şeklinde hesaplanır burada, α , yapı önü deniz taban eğim açısı, H_0 , derin su dalga yüksekliği, L_0 derin su dalga boyudur ve β parametresi ise:

$$\xi = \frac{2 \tan \alpha^2}{k^2 h_t H_{m0i}} = \frac{\tan \alpha^2}{\pi k h_t H_{m0i} / L_{m-1,0}} = \frac{\xi^2}{\pi k h_t} \quad (27)$$

olarak hesaplanır. Burada k lokal dalga sayısı olarak tanımlanır ($k = 2\pi/L$) ve hesaplamada yapı önü H_{m0i} ve $L_{m-1,0}$ değerleri kullanıldı.



Şekil 4. Yansıma katsayısı karşılaştırması.

İletilen dalga yüksekliği ölçümleri, batık dalgakıranının arkasında (kara tarafında) konumlandırılan 6 numaralı dalga ölçer (WG6) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak, daha önce gelen dalga analizinde de ortaya konduğu üzere, kanalın sonunda yer alan pasif sönümleme sistemi yansımayı azaltmakla birlikte, sistemde ihmal edilmeyecek düzeyde yansıma oluşturmaktadır. Bu nedenle, WG6 tarafından ölçülen toplam dalga yüksekliği yalnızca iletilen dalga bileşenini değil, aynı zamanda sönümleyiciden yansıyan dalgaları da içermektedir. Bu bağlamda, elde edilen verilerin doğrudan iletilen dalga yüksekliği (H_t) olarak kabul edilmesi uygun değildir. WG6 ölçümlerinden yansıma etkisinin ayrıştırılması amacıyla, modelin bulunmadığı deneylerden elde edilen yansıma katsayıları (C_r) kullanılarak sonuçlar üzerinden düzeltme yapılmıştır. Bu işlemde, Goda ve Suzuki [14] tarafından önerilen aşağıdaki yöntem kullanılmıştır:

$$H_{m0t} = \frac{1}{\sqrt{1 + C_r^2}} H_s \quad (28)$$

Bu yöntemde WG6'nın ölçtüğü toplam dalga yüksekliği H_s olarak tanımlanmaktadır [14]. Bu değerden yansıma etkisi çıkarılarak iletilen dalga yüksekliği (H_{m0t}) elde edilmektedir. Dolayısıyla, bu bağlamda formülde yer alan H_{m0t} burada yansıma etkisinden arındırılmış iletilen dalga yüksekliğini ifade etmektedir. Bu düzeltmenin ardından, yapı önünde daha önce belirlenmiş olan H_{m0i} değeri kullanılarak dalga iletim katsayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$K_t = \frac{H_{m0t}}{H_{m0i}} \quad (29)$$

Bu çalışmada elde edilen K_t değerleri, $0.405 \leq K_t \leq 0.854$ aralığında bulunmuştur. Bu değerler, farklı yapı konfigürasyonları ve hidrodinamik koşullara bağlı olarak iletilen dalga enerjisindeki değişimi yansıtmaktadır.

4. Analizler ve Değerlendirme

Bu çalışmanın temel amacı, değişen geometrik parametreler ve hidrodinamik koşullar altında batık dalgakıranların dalga iletim davranışını deneysel olarak incelemektir. Dalga iletimi, literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve çok sayıda formülasyon geliştirilmiştir. (bkz. Bölüm 2) Bu çalışma, İYTE Hidrolik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen iki boyutlu, küçük ölçekli deneylerden elde edilen veriler ile literatürdeki bulguları karşılaştırarak, söz konusu bulguların tutarlılığını ve uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, dalga iletim katsayısını (K_t) etkileyen temel parametrelerden nominal taş çapı (D_{n50}), dalgakıranın ön yüz eğimi ve geçirgenliği sabit tutulmuştur. Diğer taraftan, batık dalgakıran yüksekliği (h'), kret genişliği (B) ile gelen spektral dalga parametreleri ($(H_{m0}, T_{m-1,0})$) değişken parametreler olarak ele alınmıştır. Literatürde dalga iletim katsayısına ilişkin çok sayıda formül mevcut olmakla birlikte, bu çalışmada yalnızca beş formülasyonun detaylı karşılaştırmasına yer verilmiştir. Seçilen formüller, mevcut deneysel veri setinin kapsamına uygun parametre aralıklarına sahip olmaları ve parametrelerin benzerliğini sağlamaları bakımından önceliklendirilmiştir. Bu yaklaşım, analizlerin güvenilirliğini artırmakta ve ampirik formüllerin deneysel koşullarda geçerlilik düzeyinin daha sağlıklı biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

4.1. Dalga İletimi için Mevcut Formüller ve Mevcut Veri Seti

Batık dalgakıranlarda dalga iletimi, literatürde çok sayıda çalışmada ele alınmış ve çeşitli ampirik formüller geliştirilmiştir. Bu çalışmada, deneysel olarak elde edilen dalga iletim katsayıları (K_t), Bölüm 2'deki mevcut teorik formüllerle karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırılan formüller; Meer [1], d'Angremond vd. [2], Seabrook vd. [3], Friebe vd. [4] ve Van Gent vd. [5] tarafından önerilen çalışmalar yer almaktadır. Söz konusu formülasyonların her biri, dalga iletim katsayısını etkileyen farklı parametreleri temel alarak geliştirilmiştir. Bu parametreler arasında dalgakıran yüksekliği, kret genişliği, gelen dalga yüksekliği, dalga boyu ve su derinliği gibi hidrodinamik ve yapısal değişkenler yer almaktadır (Bkz. Tablo 7).

Tablo 7. Dalga iletimi için mevcut formüller.

Yazarlar	Formüller
Meer (1990a)	$K_t = 0.80, -2.0 < \frac{F}{H_{m0i}} < -1.13$
	$K_t = 0.46 - 0.3 \frac{F}{H_{m0i}}, -1.13 < \frac{F}{H_{m0i}} < 1.2$
	$K_t = 0.1, 1.2 < \frac{F}{H_{m0i}} < 2$
d'Angremond (1996)	$K_t = -0.4 \frac{F}{H_{m0i}} + \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)^{-0.31} \times (1 - e^{-0.5\xi}) \times 0.64$, geçirimli dalgakıranlar için
	$K_t = -0.4 \frac{F}{H_{m0i}} + \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)^{-0.31} \times (1 - e^{-0.5\xi}) \times 0.80$, geçirimsiz dalgakıranlar için
Seabrook vd. (2000)	$K_t = 1 - \left(e^{0.65 \frac{F}{H_{m0i}} - 1.09 \frac{H_{m0i}}{B}} - 0.047 \left(\frac{B * F}{L * D_{n50}} \right) + 0.067 \left(\frac{F * H_{m0i}}{B * D_{n50}} \right) \right)$
Friebe vd. (2003)	$K_t = -0.4969 \exp\left(\frac{F}{H_{m0i}}\right) - 0.0292 \left(\frac{B}{h_t}\right) - 0.4257 \left(\frac{h_t'}{h_t}\right) - 0.0696 \log\left(\frac{B}{L}\right) + 0.1359 \left(\frac{F}{B}\right) + 1.0905$
Van Gent vd. (2023)	$K_t = c_1 \tanh\left(-\left(\frac{F}{H_{m0i}} + c_2 \left(\frac{B}{L_{m-1,0}}\right)^{c_3} + c_4\right)\right) + c_5$

Şekil 5'te ölçülen K_t değerleri ile Meer [1] formülasyonu kullanılarak hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Formülün

geçerli olduğu aralıktaki değerler mavi renkle, aralığın dışındakiler ise kırmızı renkte gösterilmiştir. Formülün geçerli olduğu aralıktaki değerler ile Elde edilen korelasyon oldukça yüksek olup $R^2 = 0.9488$ olarak hesaplanmıştır. Teorik tahminler ile deneysel veriler genel olarak yüksek düzeyde örtüşmekle birlikte, regresyon doğrusu referans $y=x$ doğrusu ile tam olarak çakışmamakta; bu durum, modelin bazı değerleri hafif sapmayla tahmin ettiğini göstermektedir. Bu, Meer [1] formülünün K_t değeri 0,6'nın altında olan durumlarda hafifçe fazla tahmin ederken, 0,6'nın üzerindeki değerlerde ise hafifçe az tahmin etmektedir. Van der Meer formülasyonunda, dalga iletim katsayısı F/H_{m0} 'nun bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, aynı F/H_{m0} değeri için B , h' gibi diğer parametrelerin değişimi sonuçlardaki saçılmaya neden olmaktadır.

Benzer şekilde, **Şekil 6'**da deneysel olarak elde edilen K_t değerleri ile d'Angremond vd. [2] formülü ile hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu formül, F/H_{m0} parametresine ek olarak B/H_{m0} ve iribarren sayıları ile dalgakıran geometrisini ve eğimin etkisini de dikkate almaktadır. Yapılan karşılaştırmada korelasyon katsayısı $R^2 = 0.9612$ olarak hesaplanmıştır. Ancak formülün tahminleri, deneysel sonuçları hafifçe düşük hesaplamaktadır.

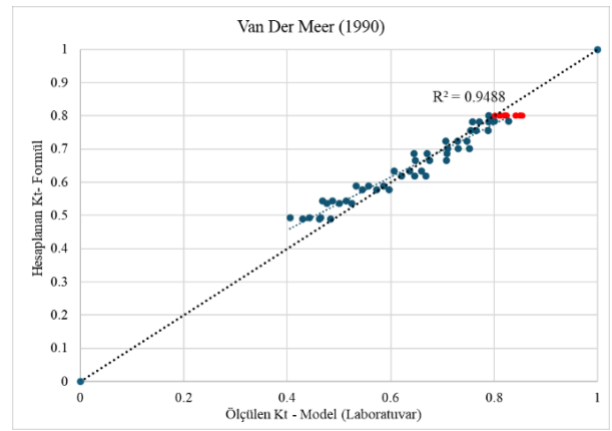
d'Angremond vd. [2] formülasyonunu geliştirirken kullandığı veri setinde, relatif batıklık derinliğini temsil eden F/H_{m0} aralığı -2.5 ile +2.5 arasında tanımlanmıştır. Buna karşılık, bu çalışmada kullanılan deneysel veriler daha dar bir aralıkta, $-1.49 \leq F/H_{m0} \leq -1.28$ sınırları içerisinde yer almaktadır. Ayrıca, hem d'Angremond vd. [2] hem de Meer [1], geliştirdikleri formüllerde dalga iletim katsayısı (K_t) için teorik olarak üst sınırın 0.8 olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, **Şekil 5** ve **Şekil 6'**de yer alan grafiklerde kırmızıyla gösterilen ve bu sınırın üzerinde kalan veri noktaları, formüllerin geçerlilik aralığı dışında kabul edilerek R^2 hesaplamalarına dâhil edilmemiştir.

Şekil 7'de deneysel olarak elde edilen K_t değerleri ile Seabrook vd. [3] formülü ile hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Onların çalışmasında, kret genişliği 0.3 ila 3.5 m arasında değişen geniş bir aralık esas alınmıştır. Bu nedenle, bu formül daha geniş kretli dalgakıranları temsil etmek için daha uygundur. Bu nedenle, daha dar kret aralığının kullanıldığı bu çalışma ile sonuçlar kıyaslandığında, $R^2=0.7152$ düşük değeri elde edilmiştir. Grafik üzerinde kırmızı ile işaretlenen veri noktaları, formülün geçerlilik sınırları dışında kaldığı için R^2 hesaplamasına dahil edilmemiştir. Bu noktalar, veri setinde yer alan en düşük batık dalgakıran yüksekliği ve en dar kret genişliğine sahip konfigürasyonlara karşılık gelmektedir.

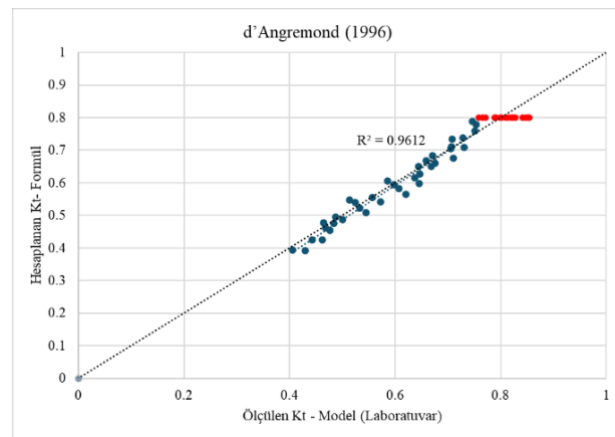
Şekil 8, Friebe vd. [4] tarafından geliştirilen formülasyon ile hesaplanan dalga iletim katsayısı (K_t) değerlerinin, bu çalışmada deneysel olarak ölçülen K_t değerleri ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Friebe vd. [4], Seelig [18], Daemrich ve Kahle [19], Van der Meer [1], Daemen (1991), and Seabrook (1997) tarafından çalışılan beş farklı veri setini birleştirerek formülasyonlarını geliştirmiştir. Bu sayede elde edilen formül, daha büyük kret genişlikleri ve daha yüksek dalgakıranları da kapsayıcı bir formüle dönüşmektedir. Grafik incelendiğinde, veri noktalarının tamamının $y=x$ doğrusunun altında konumlandığı görülmektedir. Bu durum, bu genel formülün bu veri seti için dalga iletim katsayısını sistematik olarak düşük tahmin ettiğini göstermektedir. Buna rağmen, elde edilen $R^2=0.9462$ değeri, formülasyonun genel eğilimleri başarıyla yansıttığını ve deneysel verilerle yüksek düzeyde bir doğrusal ilişki kurduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 9'da Van Gent vd. [5] tarafından önerilen formülasyon ile yapılan karşılaştırma sonucunda elde edilen R^2 değeri 0.9854

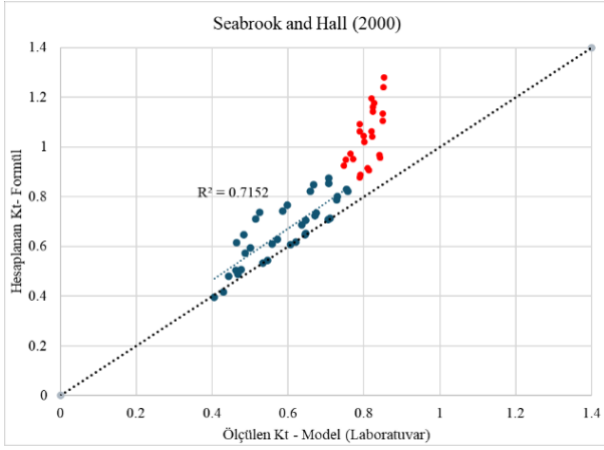
olup bu formülasyonun deneysel verilerle yüksek düzeyde uyum sağladığını göstermektedir. Literatürde mevcut diğer formüllerle kıyaslandığında, Van Gent vd. [5] formülasyonu mevcut veri setiyle en güçlü korelasyonu sağlayan model olmuştur. Van Gent vd. [5] tarafından önerilen formülde kullanılan temel parametreler, batıklık derinliğinin dalga yüksekliğine oranı (F/H_{m0}) ile kret genişliğinin dalga boyuna ($B/L_{m-1,0}$) oranını hiperbolik tanjant ($\tanh$) fonksiyonu ile ifade etmektedir. Bu çalışmada elde edilen veriler, Van Gent formülünün geçerlilik sınırları içerisinde kalmaktadır. Öte yandan, deneylerde kullanılan geçirimli batık dalgakıran geometrisinin eğimi 1:2 olan trapezoidal bir kesitten oluşması, Van Gent vd. [5] çalışmasındaki fiziksel modellemeyle benzerlik göstermekte ve bu yapısal benzerlik de formülasyonun doğruluk düzeyini artıran bir başka unsur olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, veri noktalarının önemli bir kısmının $y=x$ doğrusunun üzerinde konumlanması, formülün deneysel sonuçlara kıyasla daha yüksek tahminlerde bulunma eğilimi gösterdiğini işaret etmektedir.



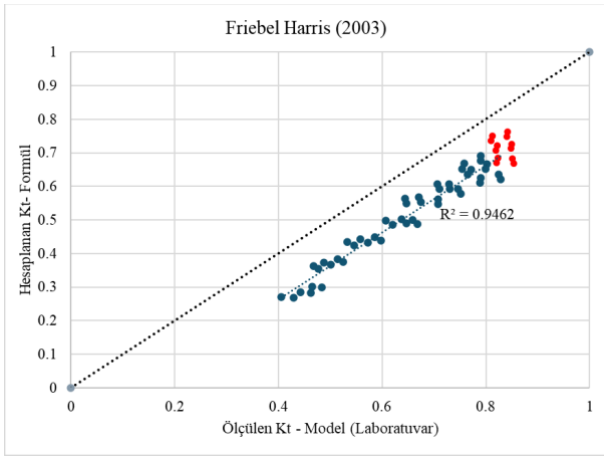
Şekil 5. Ölçülen ve hesaplanan dalga iletim katsayıları (Van der Meer [1]).



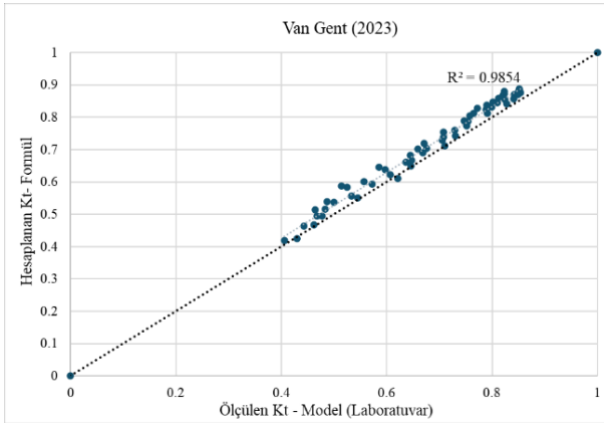
Şekil 6. Ölçülen ve hesaplanan dalga iletim katsayıları (d'Angremond vd. [2]).



Şekil 7. Ölçülen ve hesaplanan dalga iletim katsayıları (Seabrook ve Hall [3]).



Şekil 8. Ölçülen ve hesaplanan dalga iletim katsayıları (Friebel vd. [4]).



Şekil 9. Ölçülen ve hesaplanan dalga iletim katsayıları (Van Gent vd. [5]).

5. Sonuçlar

Bu çalışma, farklı batık dalgakıran geometrilerinin dalga iletim katsayısı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektedir. Elde edilen veriler, literatürde yer alan mevcut formüllerle karşılaştırılarak bu formülasyonların geçerliliği değerlendirilmektedir. Deneysel veriler, İzmir Körfezi'ni temsil eden prototip koşullar esas alınarak İYTE Hidrolik

Laboratuvarı'nda 2 boyutlu küçük ölçekli fiziksel model testleriyle elde edilmiştir. Deneyler 15 farklı geometrik konfigürasyonu kapsayan 60 simülasyon sonucundan oluşmaktadır.

Deneysel bulgular, dalga iletim katsayısının (K_t), kret fribordu (F), kret genişliği (B), gelen dalga karakteristiği (H_{m0i} , $L_{m-1,0}$) olmak üzere yapının geometrik özelliklerinden ve dalga parametrelerinden etkilendiğini göstermektedir.

Bu çalışmada ölçülen K_t değerleri $0.405 \leq K_t \leq 0.854$ aralığında değişmektedir. Bu geniş aralık, deneylerde kullanılan farklı yapı konfigürasyonlarının iletilen dalga enerjisini azaltmadaki rolünü yansıtmaktadır.

Çalışmada kullanılan temel boyutsuz parametrelerin deneysel aralıkları aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 -1.48 < \frac{F}{H_{m0i}} < -0.098 \\
 0.37 < \frac{B}{h_t} < 1.09 \\
 0.37 < \frac{h'}{h_t} < 0.95 \\
 0.03 < \frac{B}{L} < 0.09 \\
 -1.63 < \frac{F}{B} < -0.04 \\
 0.828 < \frac{B}{H_{m0i}} < 2.58 \\
 0.405 < K_t < 0.854 \\
 2.4 < irribaren sayısı < 2.6
 \end{aligned} \tag{30}$$

Bu parametreler, laboratuvar ortamında oluşturulan batık dalgakıranların geometrik çeşitliliği ve dalga koşulları çerçevesinde kapsamlı bir değişkenlik göstermekte olup, analiz edilen formüllerin geçerlilik alanlarının değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Meer [1], d'Angremond vd. [2], Seabrook vd. [3], Friebel vd. [4] ve Van Gent vd. [5] tarafından önerilen ampirik formüller bu çalışmada ölçülen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, formüllerin sadece geçerli olduğu aralıktaki veriler ile yapılmıştır.

Van Gent vd. [5] formülü, $R^2 = 0.9854$ ile en yüksek korelasyonu sağlamış, onu sırasıyla d'Angremond vd. [2] ve Friebel vd. [4]'nin formülleri izlemiştir. Van Gent formülünde kullanılan model geometrisi (1/2 ön yüz eğimli geçirimli batık dalgakıran) bu çalışmada kullanılan model geometrisine benzediği için en yüksek korelasyonu sağlamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma batık dalgakıranların dalga enerjisini azaltmadaki performansı dalgakıranın geometrisine ve hidrodynamic koşullara bağlıdır. Bu parametrelere bağlı olarak, K_t değerleri 0.405- 0.854 aralığında değişmektedir. Bu sonuçlara göre batık dalgakıranlar kıyı koruma yapılarına gelen dalgaların enerjisini azaltmak suretiyle kıyı koruma yapılarının direncini artırmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Rabia Karagöz'ün İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde, Doğan Kısacık danışmanlığında tamamladığı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)

tarafından 122M553 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Yazar katkılarının beyanı

Rabia Karagöz; kavramsallaştırma, yöntem, deneylerin yürütülmesi, veri düzenleme, biçimsel analiz, görselleştirme ve ilk taslağın yazımına katkı sağlamıştır. Doğan Kısacık; kavramsallaştırma, yöntem, danışmanlık, proje yönetimi, fon temini ve metnin gözden geçirilip düzenlenmesine katkı sağlamıştır. Tüm yazarlar makalenin son hâlini okumuş ve onaylamıştır.

Üretken yapay zeka beyanı

Bu makalenin kabul sonrası yayına hazırlık sürecinde; dergi şablonuna uyumun kontrolü, Türkçe ve İngilizce dil düzenlemesi, genişletilmiş özetin yayın kurallarına göre düzenlenmesi ve kaynakça biçiminin gözden geçirilmesi amacıyla OpenAI tarafından geliştirilen ChatGPT kullanılmıştır. Araç; bilimsel veri üretimi, deneysel analiz, bulguların yorumlanması veya sonuçların oluşturulması amacıyla kullanılmamıştır. Nihai metin ve kaynakların doğruluğu yazarlar tarafından kontrol edilmiş ve onaylanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Van der Meer JW. Data on Wave Transmission due to overtopping. Delft Hydraulics report no. H986, prepared for CUR C67; 1990.
- [2] d'Angremond K, Van der Meer JW, De Jong RJ. Wave transmission at low-crested structures. İçinde: Proc. 25th ICCE, ASCE, Orlando, ABD; 1996, s. 2418-2427. doi:10.1061/9780784402429.185.
- [3] Seabrook SR, Hall KR. Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters. İçinde: Proc. 27th ICCE, ASCE, Sydney, Avustralya; 2000, s. 2000-2013. doi:10.1061/40549(276)154.
- [4] Friebe HC, Harris JM, Smith JM. Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters. İçinde: Coastal Structures Conference, Portland, ABD; 2003.
- [5] Van Gent MRA, Van der Werf IM, Van der Meer JW. New formula for wave transmission at low-crested and submerged structures. Coastal Engineering 2023;183:104-122. doi:10.1016/j.coastaleng.2022.104122.
- [6] Van der Meer JW, Daemen IFR. Stability and Wave Transmission at Low-Crested Rubble-Mound Structures. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE 1994;120:1-19.
- [7] Calabrese M, Vicinanza D, Buccino M. 2D experiments on low crested rubble mound structures. Coastal Engineering 2003;48:1-24. doi:10.1016/S0378-3839(02)00123-5.
- [8] Briganti R, Van der Meer JW, Buccino M, Calabrese M. Wave transmission at low-crested structures. Coastal Engineering 2003;48(3):229-249.
- [9] Van der Meer JW, Briganti R, Zanuttigh B, Wang B. Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. Coastal Engineering 2005;52(10-11):915-929. doi:10.1016/j.coastaleng.2005.09.005.
- [10] Sindhu B, Shirlal KG. Wave transmission characteristics of submerged breakwaters. Indian Journal of Geo-Marine Sciences 2015;44(5):703-710.
- [11] Giantsi T, Moutzouris CI. Evaluation of Wave Transmission Coefficient at Low Crested Structures in 3D Conditions Using Residual Analysis. Environ Process 2017;4(Suppl 1):277-291. doi:10.1007/s40710-017-0237-8.
- [12] Kurdistani SM, Shafieefar M, Heidarpour M. Formula for Wave Transmission at Submerged Homogeneous Porous Breakwaters. Ocean Engineering 2022;266. doi:10.1016.
- [13] Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. CIRIA, C683, London; 2007.
- [14] Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. İçinde: Proc. 15th ICCE, Honolulu, ABD; 1976, s. 828-845.
- [15] Mansard EPD, Funke ER. The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using A Least Squares Method. Coastal Engineering Proceedings 1980;(17):8. doi:10.9753.
- [16] Kısacık D, vd. İzmir Körfezi kıyı alanlarında dalga iklimi ve taşkın risk analizi. TÜBİTAK-BAP Projesi Raporu. İzmir: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü; 2017.
- [17] Sünger Kent Raporu. İzmir Büyükşehir Belediyesi Sürdürülebilir Kıyı Yönetimi Raporu; 2022.
- [18] Seelig WN. Two-Dimensional Tests of Wave Transmission and Reflection Characteristics of Laboratory Breakwaters. T.R. 80-1, Coastal

Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS; 1980.

- [19] Daemrich KF, Kahle W. Schutzwirkung von Unterwasserwellenbrechern unter dem einfluss unregelmässiger Seegangswellen. Eigenverlag des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Heft 61; 1985.