DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAŞ DOLGU DALGAKIRAN TOPUĞUNDA DALGA ETKİSİ SONUCU MEYDANA GELEN YEREL ZEMİN HAREKETLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Selcan KURT

Nisan, 2022
İZMİR

TAŞ DOLGU DALGAKIRAN TOPUĞUNDA DALGA ETKİSİ SONUCU MEYDANA GELEN YEREL ZEMİN HAREKETLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik, Hidroloji Ve Su Kaynakları Programı

Selcan KURT

Nisan, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SELCAN KURT, tarafından **DOÇ. DR. MUSTAFA DOĞAN** yönetiminde hazırlanan **"TAŞ DOLGU DALGAKIRAN TOPUĞUNDA DALGA ETKİSİ SONUCU MEYDANA GELEN YEREL ZEMİN HAREKETLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Yönetici

Doç. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Doğan KISACIK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, değerli bilgilerini paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Mustafa DOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmaları, 218M445 numaralı ve "Düzenli ve Düzensiz Dalga Etkisi Altındaki Şevli Yüzlü (Taş Dolgu) Dalgakıranların Gövde ve Kafa Kesitlerinde Oluşan Yerel Zemin Hareketlerinin Deneysel ve Sayısal Araştırılması" başlıklı proje ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Selcan KURT

TAŞ DOLGU DALGAKIRAN TOPUĞUNDA DALGA ETKİSİ SONUCU MEYDANA GELEN YEREL ZEMİN HAREKETLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde kıyı yapıların işlevselliği, özellikle son yıllarda artan deniz aşırı ticaret, yeni enerji nakil hatları ve jeopolitik konum gereği Asya-Avrupa arası petrol ve doğalgaz iletimi ile daha da önemli bir duruma gelmiştir. Kıyı yapıları içerisinde en önemli grubu, liman ve yanaşma yapıları için sakin su kesimleri oluşturmaya yarayan dalgakıranlar oluşturmaktadır. Şevli yüzlü taş dolgu dalgakıranlar, ülkemizde en sık karşılaşılan dalgakıran türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Aşınabilir bir deniz tabanı üzerinde bulunan şevli yüzlü dalgakıran için dalga aşması ve anroşman tabakasındaki taşların ya da özel elemanların özelliklerini kaybetmesinden sonra en önemli stabilite sorununu, dalgakıran topuğunda dalga etkisi sonucu meydana gelen oyulmalar oluşturmaktadır. Topuk bölgesinde meydana gelen oyulma çukuruna doğru anroşmandaki taşlar ya da özel elemanlar kayabilmekte ve bu durumda dalgakıran şev stabilitesi bozulmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, şevli yüzlü taş dolgu bir dalgakıran gövde kesiti için farklı düzenli dalga koşullarında topuk bölgesinde meydana gelen oyulmalar deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarındaki geniş dalga kanalı kullanılmıştır. Farklı dalgakıran şev eğimleri, farklı temsili deniz taban malzemeleri ve farklı dalga karakteristikleri ile yapılan deneylerde, ultrasonik yöntemle çalışan ölçüm aletleri yardımıyla zamana bağlı seviye ve oyulma/yığılma derinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Deneylerden elde edilen en yüksek oyulma derinliklerinin, literatürde mevcut farklı irilikte taban malzemeleri ile gerçekleştirilen deney sonuçları ile bir arada değerlendirilmesi yoluna gidilmiştir. Bunun sonucunda, dalga yüksekliğine göre boyutsuzlaştırılmış en yüksek oyulma derinlikleri için dalga boyu , taban malzemesi dane medyan çapı ve Iribarren sayısına bağlı bir ampirik ifade türetilerek önerilmiştir. Böylece, hem taban malzemesi boyutunun hem etkiyen dalga karakteristiğinin hem de dalgakıran şev eğiminin dikkate alındığı bir göreceli oyulma derinliği tahmin yöntemi sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Şevli yüzlü dalgakıran, deneysel araştırma, dalga etkisi, zamana bağlı oyulma ve yığılma, göreceli oyulma derinliği.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LOCAL SEDIMENT MOTION OCCURRING AS A RESULT OF THE WAVE EFFECT AT THE TOE OF THE RUBBLE MOUND BREAKWATER

ABSTRACT

The functionality of coastal structures in our country, which is surrounded by sea on three sides, has become even more important with the increase in overseas trade in the recent years, the new energy transmission lines, and the oil and natural gas transmission between Asia and Europe due to the geopolitical position. The most important group amongst the coastal structures is the breakwaters that serve to create calm water sections for the harbor and berth structures. Rubble mound breakwaters are the most common type of breakwater in our country. The most important stability problem for rubble mound breakwaters located on an erodible seabed, following wave overtopping and the stones or special concrete elements in the protection layer losing their property, is created by the scour that occur at the toe of the breakwater as a result of the wave effect. Stones or special concrete elements in the protection layer may slide towards the scour hole at the toe region and, accordingly, the slope stability of the breakwater is deteriorated.

Within the scope of this thesis, the scour that occur at the toe under different regular wave conditions for a rubble mound breakwater trunk section were investigated experimentally. For this purpose, the wide wave channel in the Dokuz Eylul University Civil Engineering Department Hydraulics Laboratory was used. In the experiments performed with different breakwater inclines of slope, different representative seabed materials, and different wave characteristics, time-dependent level and scour/deposition depth measurements were carried out via measuring instruments utilizing ultrasonic methods.

It is preferred to evaluate the maximum scour depths obtained from the experiments together with the results of the experiments performed with bed materials of different coarseness available in the literature. As a result, an empirical expression based on wavelength, median grain size of bed material and Iribarren number has been derived and proposed for the maximum scour depths made dimensionless with respect to wave height. Thus, a relative scour depth estimation method is presented, which takes into consideration both the size of regarding seabed, the characteristics of the effective waves, and the breakwater incline of slope.

Keywords: Rubble mound breakwater, experimental research, wave effect, time-dependent scour and deposition, relative scour depth.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT vi
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xii

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ – MEVCUT ÇALIŞMALAR 3

BÖLÜM ÜÇ – ŞEVLİ YÜZLÜ DALGAKIRAN TOPUĞUNDA DALGA ETKİSİNDE AKIM VE YEREL ZEMİN HAREKETLERİ 20

3.1 Boyut analizi 20
3.2 Oyulma ve Yığılma 24

BÖLÜM DÖRT – DENEY SİSTEMİ VEÇALIŞMA YÖNTEMİ 25

BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME 32

BÖLÜM ALTI – SONUÇ VE ÖNERİLER 63

KAYNAKLAR 64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kararlı akım şartlarında kritik hız 4
Şekil 2.2 Dalgayla oluşan hareketin kritik yörüngesel hızı 5
Şekil 2.3 Dalga ve akıntı durumunda Shields Eğrisi..... 6
Şekil 2.4 Akış görselleştirmesi ve yatak kayma gerilmesi..... 7
Şekil 2.5 Oyulma deneylerinde kullanılan test kurulumu..... 8
Şekil 2.6 Deneysel düzenlemenin fotoğrafı 8
Şekil 2.7 Dalgakıranın baş kısmında sıçrayarak kırılan dalganın aşamaları..... 8
Şekil 2.8 Dalga kanalı açık deniz tarafından şev eğimi 1:1.75 olan dalgakıran modeli nin görünümü 10
Şekil2.9 Şevli yüzlü dalgakıran topuğunda denge hali taban profili 10
Şekil 2.10 Düzensiz dalgalar halinde denge hali taban profili..... 11
Şekil 2.11 Göreceli oyulma derinliğinin düşey yüzlü ve şevli yüzlü dalgalar durumundaki dağılımı 11
Şekil 2.12 Deney düzeneğinin şematik diyagramı..... 14
Şekil 2.13 Deney düzenlemenin fotoğrafı..... 14
Şekil 2.14 Batık dalgakıran önünde vorteks oluşumunun anlık görüntüsü..... 15
Şekil 2.15 Sayısal sonuçlarla Zhang'ın deney verilerinin karşılaştırılması 16
Şekil 2.16 Yatak yükü için sayısal model ve deney verileri arasındaki oyulma kuvvetinin karşılaştırılması 16
Şekil 2.17 Bir dalga kanalında dalga yüklemesi altında kaya topuk fotoğrafları 17
Şekil 2.18 Test edilen yapının bir topuğu 17
Şekil 2.19 Topuk yapıları testleri..... 18
Şekil 2.20 Taş dolgu dalgakıranların topuğunda iç içe geçen v biçimli ünitelerin fotoğrafı..... 18
Şekil 2.21 Deney düzeneğinin planı 19
Şekil 2.22 Aynı yüksekliğe sahip iki farklı konumda yatay hız bileşeninin u güç spektrumu..... 19
Şekil 3.1 Oyulma ve yığılma..... 25

Şekil 4.1 Kanal içinden dalgakıran görünümü 27
Şekil 4.2 Dalga kanalı boykesit ve plan görünümü 27
Şekil 4.3 Ölçüm bölgesi şematik gösterimi 28
Şekil 4.4 Dalga üretecinden çıkan dalga 28
Şekil 4.5 Dalga üreteç sistemi 29
Şekil 4.6 Dalga dubası 29
Şekil 4.7 ULS 80 D cihazı ve USS 20130 algılayıcıları 30
Şekil 4.8 UVP cihazı 30
Şekil 4.9 Elek analizi dane çapı grafiği 31
Şekil 5.1 1.Tip dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği 36
Şekil 5.2 2.Tip dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği 36
Şekil 5.3 3.Tip dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği 37
Şekil 5.4 4.Tip dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği 37
Şekil 5.5 5.Tip dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği 38
Şekil 5.6 6.Tip dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği 38
Şekil 5.7 Deney 1 için zamana bağlı oyulma grafiği 39
Şekil 5.8 Deney 2 için zamana bağlı oyulma grafiği 39
Şekil 5.9 Deney 3 için zamana bağlı oyulma grafiği 40
Şekil 5.10 Deney 4 için zamana bağlı oyulma grafiği 40
Şekil 5.11 Deney 5 için zamana bağlı oyulma grafiği 41
Şekil 5.12 Deney 6 için zamana bağlı oyulma grafiği 41
Şekil 5.13 Deney 7 için zamana bağlı oyulma grafiği 42
Şekil 5.14 Deney 8 için zamana bağlı oyulma grafiği 42
Şekil 5.15 Deney 9 için zamana bağlı oyulma grafiği 43
Şekil 5.16 Deney 10 için zamana bağlı oyulma grafiği 43
Şekil 5.17 Deney 11 için zamana bağlı oyulma grafiği 44
Şekil 5.18 Deney 12 için zamana bağlı oyulma grafiği 44
Şekil 5.19 Deney 13 için zamana bağlı oyulma grafiği 45
Şekil 5.20 Deney 14 için zamana bağlı oyulma grafiği 45
Şekil 5.21 Deney 15 için zamana bağlı oyulma grafiği 46
Şekil 5.22 Deney 16 için zamana bağlı oyulma grafiği 46
Şekil 5.23 Deney 17 için zamana bağlı oyulma grafiği 47

Şekil 5.24 Deney 18 için zamana bağlı oyulma grafiği 47
Şekil 5.25 Deney 19 için zamana bağlı oyulma grafiği 48
Şekil 4.26 Deney 20 için zamana bağlı oyulma grafiği 48
Şekil 5.27 Deney 21 için zamana bağlı oyulma grafiği 49
Şekil 5.28 Deney 22 için zamana bağlı oyulma grafiği 49
Şekil 5.29 Deney 23 için zamana bağlı oyulma grafiği 50
Şekil 5.30 Deney 24 için zamana bağlı oyulma grafiği 50
Şekil 5.31 Deney 25 için zamana bağlı oyulma grafiği 51
Şekil 5.32 Deney 26 için zamana bağlı oyulma grafiği 51
Şekil 5.33 Deney 27 için zamana bağlı oyulma grafiği 52
Şekil 5.34 Deney 28 için zamana bağlı oyulma grafiği 52
Şekil 5.35 Deney 29 için zamana bağlı oyulma grafiği 53
Şekil 5.36 Deney 30 için zamana bağlı oyulma grafiği 53
Şekil 5.37 Deney 31 için zamana bağlı oyulma grafiği 54
Şekil 5.38 Deney 32 için zamana bağlı oyulma grafiği 54
Şekil 5.39 Deney 33 için zamana bağlı oyulma grafiği 55
Şekil 5.40 Deneysel S/H değerleri ile Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında önerilen bağıntıya göre hesaplanan S/H değerlerinin karşılaştırılması.. 56
Şekil 5.41Göreceli oyulma derinliğinin göreceli derinliğe bağlı değişimi 57
Şekil 5.42 L/d_{50} – S/H grafiği üzerinde (5.13) bağıntısına göre çizilen sabit Ir eğrileri ……...59
Şekil 5.43 Deneysel S/H değerleri ile (5.13) bağıntısı ile tahmin edilen S/H değerlerinin karşılıklı olarak noktalandığı saçılma diyagramı..... 60

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo.5.1 Deneylerdeki karakteristik bilgiler 32
Tablo.5.2 Deneysel veriler ile hesaplanan bazı boyutlu ve boyutsuz parametreler ... 34
Tablo.5.3 Karakteristik bilgileri verilen dalga tipleri..... 35

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Ülkemizin jeopolitik konumundan dolayı kıyı yapılarının doğru planlanması büyük önem taşımaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde deniz kıyıları yüzyıllardır insanların yaşamlarını sürdürmek için seçtiği alanlardır. Bu alanlar balıkçılığa, ticarete, ulaşıma ve tarıma elverişlidir. Limanlardaki ticaret, taşımacılık ve balıkçılık gibi faaliyetler kıyı yapılarını önemli bir konuma getirmektedir. Kıyı yapıları canlı ve cansız deniz kaynaklarından en iyi şekilde faydalanmamızı sağlamaktadır.

Kıyı yapıları limanlar, dalgakıranlar, yanaşma yapıları, yüzen iskeleler, mahmuzlar, şamandıralar vb. yapıları kapsamaktadır. Her kıyı yapısının farklı bir amacı vardır. Dalgaların kıyıya olası etkileri kıyı koruma yapılarıyla önlenebilmektedir. Bunun için hangi kıyı yapısının gerçekleştirileceği, hangi malzemelerin kullanılacağı, yeri, boyutu doğru seçilmelidir. İhtiyaca paralel olarak doğa ile uyumlu yapılar inşa edilmelidir.

Dalgakıranlar, deniz ulaşım ve ticaret araçlarını dalgalardan korumak ve onlara korunaklı bir alan sağlamak amacıyla iskele ve rıhtımların önüne teşkil edilen liman yapılarıdır. Dalgakıranlar kıyı ile bağlantılı olabilir veya açıktan denize uzanabilmektedir. Dalgakıranlar, etki eden dalgaların hareket enerjisinin bir kısmını sönümleyerek liman baseninde durgun bir deniz ortamı oluşturmaktadır.

Şevli yüzlü (taş dolgu) dalgakıran gövdesine etki eden dalgalar, şev boyunca tırmanmakta ve geri çekilmektedir. Bu mekanizma sonucu dalgaların hareket enerjisinin büyük bir kısmı sürtünme ile ısı enerjisine dönüşmektedir. Dalgakıran kafa kesitinde (müzvar) dönen dalgaların bir kısmı basen içine girmekte ve çalkantı şeklinde küçük dalgalar oluşturmaktadır.

Dalgakıranlarda en önemli stabilite problemlerine, dalgakıran topuğunda meydana gelen oyulmalar neden olmaktadır. Topuk bölgesinde meydana gelen oyulma sonucu anroşman tabakasındaki büyük taşlar yada özel imalat beton elemanlar şev boyunca kaymakta veya sürüklenebilmektedir. Böylece göçmelere varan stabilite sorunları yaşanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, taş dolgu dalgakıranların (şevli yüzlü dalgakıran) topuğunda dalga etkisi sonucu meydana gelen yerel zemin hareketleri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında mevcut geniş dalga kanalı kullanılmıştır. Kanalda dalgakıran gövde kesiti oluşturarak ve farklı irilikte taban malzemeleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı tipte düzenli dalgalar kırılmadan dalgakıran gövdesine etkimiştir. Ölçümler için ultrasonik yöntemle çalışan cihazlar kullanılmış olup, bulgular analiz edilerek değerlendirilmiştir. İri malzeme olduğunda oyulmanın azaldığı gözlenmektedir.

BÖLÜM İKİ
MEVCUT ÇALIŞMALAR

Dalga ve akıntı etkisi ile aşınabilir deniz tabanı hareket etmeye başlamakta ve oluşan oyulma/yığılmalar kıyı yapıları için olumsuz etki oluşturmaktadır. Deniz tabanındaki hareketler kıyı yapıları etrafında kumlanmaya; doğal kıyı bölgesinin değişimine; boru hatları, kazıklı yapılar, dalgakıranlarda oyulma, kaynak ve stabilite kayıplarına neden olabilmektedir. Bu durum yapıların ekonomik ömrünü kısaltabilir veya bir daha kullanılmayacak hale getirebilmektedir. Bunun önlenebilmesi için kıyı bölgesinde dalga ve akıntı ikliminin bilinmesi, deniz tabanı, morfolojik ve jeolojik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Arazide taban batimetresi, tabandaki katı madde, akıntı, dalga, gelgit, su seviyesi, yoğunluk, tuzluluk ve viskozite incelenmekte, oyulma ve yığılma şekli belirlenmektedir. Katı danelerin hareketi bazı deniz tabanlarında fazla iken bazı deniz tabanlarında daha azdır. Harekete başlama durumu kritik durum olarak adlandırılmakta ve Shields parametresi etkin değişken olmaktadır. Hareket miktarı dalga, akıntı, dane özellikleri ve deniz tabanın etkilendiği alana bağlı değişim göstermektedir.

Kıyı bölgesindeki taban malzemesi, hidrodinamik kuvvetler, direnç kuvvetlerinden fazla olduğunda harekete geçmektedir. Sediment taşınırken hem askıdaki daneler hem de sürüntü maddesi taşınmaktadır. Dalgaların oluşumunda ana parametreler rüzgâr hızı, esme süresi, kabarma boyu ve su derinliğidir. Fredsoe ve diğ. (1992) bunun üzerine çalışma yapmışlardır. Dalgalar kırıldığında çalkantılar ve kabarmalardan dolayı sudaki askı maddesi artmaktadır. Kararlı akımda kesitsel ortalama kritik hız $\bar{u}_{cr}$ yatay düzleminde araştırmalar yapılmaktadır. Kesitsel ortalama kritik hız denklemleri (2.1) ve (2.2) görülmektedir. Kesitsel ortalama kritik hız $\bar{u}_{cr}$, %50'si elekten geçen çap d_{50}, %90'sı elekten geçen çap d_{90} ile gösterilmektedir.

Van Rijn (1984)' te 15 C° 'de tatlı su ve birim hacim ağırlığı γ=2.65 t/m^3 olan sediment için araştırma yapılmıştır.

$$\overline{u}_{cr} = 0.19(d_{50})^{0.1}\log\left(\frac{4}{(d_{90})}\right) \text{ m/s } 100 \leq (d_{50}) \leq 500\mu m \quad (2.1)$$

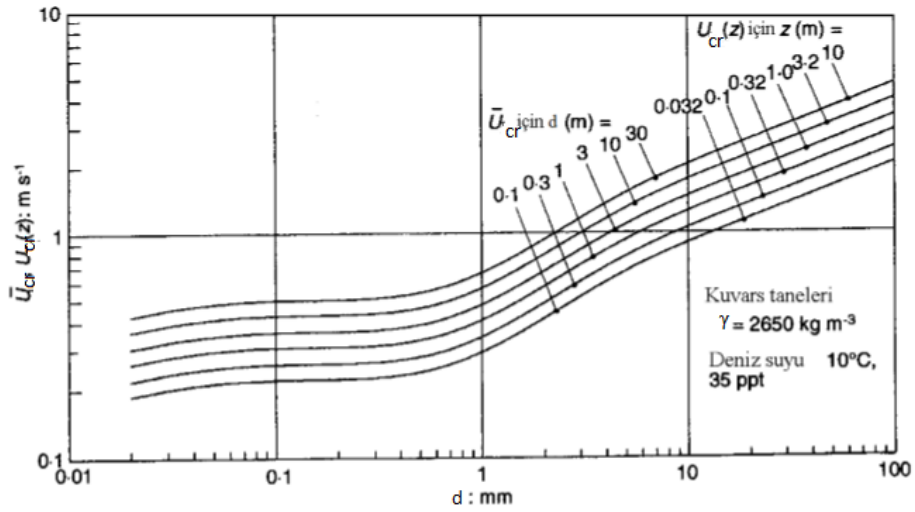
$$\overline{u}_{cr} = 8.5(d_{50})^{0.6}\log\left(\frac{4}{(d_{90})}\right) \text{ m/s } 500 \leq (d_{50}) \leq 2000\mu m \quad (2.2)$$

Soulsby 1997'de aşağıdaki formüllerle hareket için uygun sonuçlar elde edilmektedir. Kesitsel ortalama kritik hız denklemleri (2.3) ve (2.4) görülmektedir. Boyutsuz dane çapı *d**, dane çapı *d*, katı maddenin özgül ağırlığı *s*, yerçekimi ivmesi *g* ile gösterilmektedir. Şekil 2.1'de kritik yörüngesel hız değerleri gösterilmektedir.

d*>0.1 için

$$\overline{u}_{cr} = 7(d/d_{50})^{1/7}[g(s-1)d_{50}f(d_*)]^{1/2} \quad (2.3)$$

$$f(d_*) = \frac{0.3}{1+1.2d_*} + 0.055[1 - A = e^{-0.020d_*}] \quad (2.4)$$



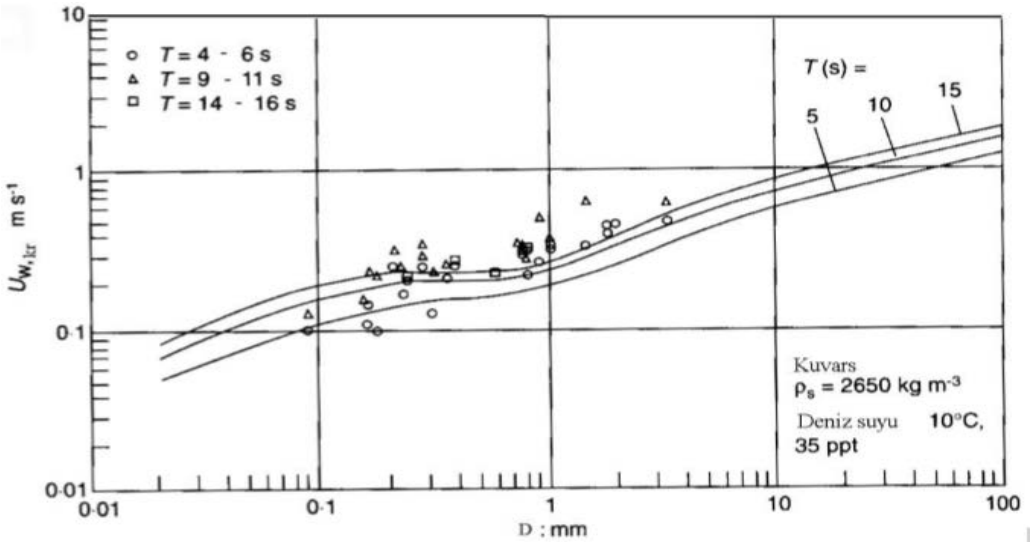
Şekil 2.1 Kararlı akım şartlarında kritik hız (Soulsby, 1997)

Kritik yörüngesel hız ($\bar{u}_{wcr}$) Komar ve Miller (1974)'ün vermiş olduğu (2.5) ve (2.6) denklemleriyle belirlenebilmektedir. Kritik yörüngesel hız $\bar{u}_{wcr}$, katı maddenin özgül ağırlığı *s*, dane çapı *d*, periyot *T*, yerçekimi *g* ile gösterilmektedir.

$$d<0.5mm \text{ için } \overline{u}_{wcr} = [0.118g(s-1)]^{2/3}\, d^{1/3}T^{1/3} \quad (2.5)$$

$$d<0.5mm \text{ için } \overline{u}_{wcr} = [1.09g(s-1)]^{4/7}\, d^{3/7}T^{1/7} \quad (2.6)$$

Şekil 2.2'de dalgayla oluşan hareketin kritik yörüngesel hız değerinin dane çapına göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Dalgayla oluşan hareketin kritik yörüngesel hızı (Soulsby, 1997)

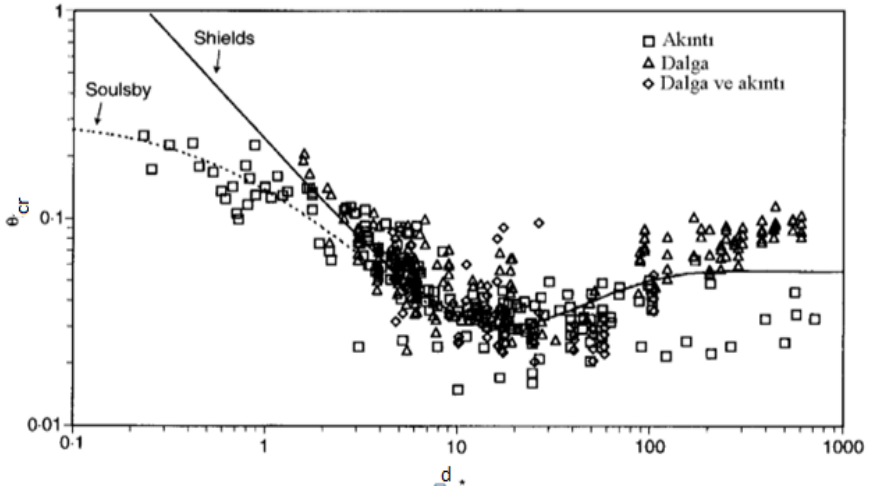
Shields parametresi (θ), tabandaki sedimentin harekete başlaması için bir eşik değer olup (2.7) ifadesi ile verilmektedir. Kritik Shields parametresi θ_{cr}, kritik kayma gerilmesi τ_{cr}, yerçekimi ivmesi g, dane çapı d, boyutsuz dane çapı $d*$, katı maddenin özgül kütlesi ρ_S, özgül kütle ρ ile gösterilmektedir.

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_S - \rho)d} \tag{2.7}$$

Kritik Shields sayısının matematiksel ifadeleri (2.8) denklemi ile verilmiştir.

$$\theta_{cr} = \frac{0.24}{d*} + 0.055[1 - \exp(-0.02d*)] \tag{2.8}$$

Şekil 2.3'te dalga akıntı etkisiyle hareketin başlamasını gösteren ve Shields eğrisi ve Soulsby (1997) tarafından modifiye edilen Soulsby eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Dalga ve akıntı durumunda Shields eğrisi (Soulsby, 1997)

Kararlı akım şartlarında θ_{cr} =0.055'tir. Kritik dane çapı denklemleri (2.9) ve (2.10)'da görülmektedir. Ortalama hız u, katı maddenin özgül ağırlığı *s*, yerçekimi *g*, dane çapı *d* ile gösterilmektedir.

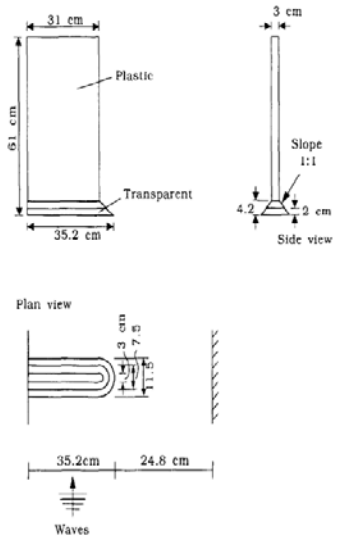
$$\mathrm{d_{cr}} > 10\mathrm{mm} \qquad \mathrm{d_{cr}} = \frac{0.250\mathrm{u}^{2.8}}{\mathrm{d}^{0.4}[g(s-1)]^{1.4}} \tag{2.9}$$

$$\mathrm{d_{cr}} > 10\mathrm{mm} \qquad \mathrm{d_{cr}} = \frac{97.9\mathrm{u}^{3.08}}{\mathrm{T}^{1.08}[g(s-1)]^{2.08}} \tag{2.10}$$

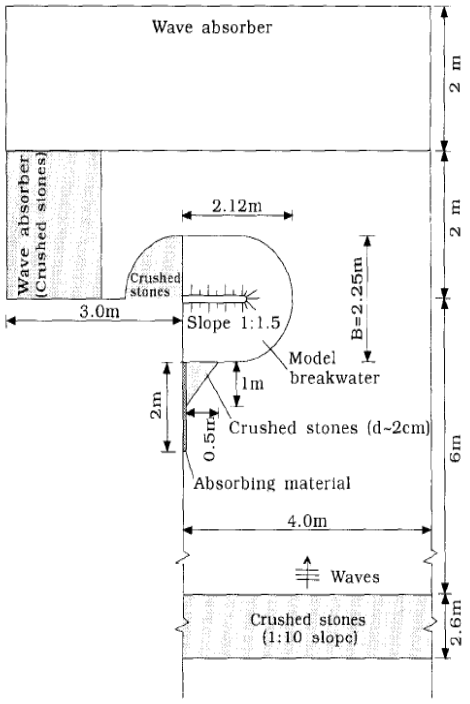
Dalga ve akıntı sonucu dalgakıran topuğunda meydana gelen birikmeler yığılma, aşınmalar ile oyulma olarak tepecikleri oluşturmaktadır. Hareket başladıktan sonra tabanda ripple olarak adlandırılan kum akıma karşı bir direnç oluşturmaktadır. Kararlı akım etkisindeki katı dalga hareketi gibi zamanla değişen akım şartlarında ise Vanoni dağılımıyla belirlenmektedir. Oyulmalar ve yığılmalar hidrodinamik süreçlerle anlaşılmaktadır. Oyulma ve yığılmanın doğru şekilde belirlenmesi dalgakıranın stabilitesi ve dalgakıranın ekonomik ömrünü çok yakından ilgilendirmektedir.

Fredsoe ve Sumer (1997) taş dolgu dalgakıranın kafa kesiti etrafındaki oyulmayı araştırmışlardır (Fredsoe ve Sumer,1997). Taş dolgu dalgakıranların kafa kesiti (müzvar) etrafında meydana gelen akım dalgakıranın önünde yerel oyulmaya neden olmaktadır. Yansıma katsayısı azaldıkça oyulmada azalmaktadır. Dalgakıran şev

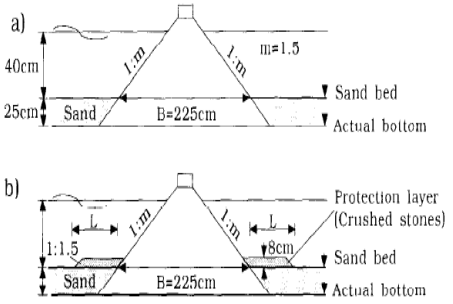
eğimi 1:1, genişliği 2.4 m ve ortalama su derinliği 40 cm olarak çalışılmıştır. Düzensiz dalgalar ile yapılan deneylerde oyulma ve yığılmanın zamanla denge haline ulaşması beklenmiştir. Şekil 2.4'te akış görselleştirmesi ve yatak kayma gerilmesi deneyleri için kullanılan test kurulumu, Şekil 2.5'te oyulma deneylerinde kullanılan test düzeneği Şekil 2.6'da oyulma koruma katmanı testi Şekil 2.7'de dalgakıranın kafa kısmında sıçrayarak kırılan dalganın aşamaları görülmektedir.



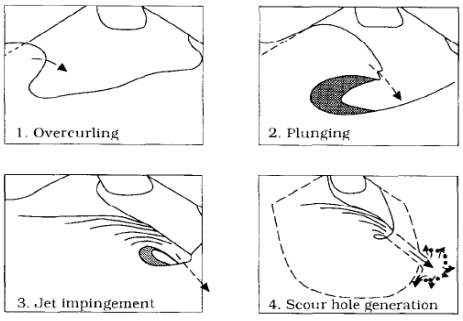
Şekil 2.4 Akış görselleştirmesi ve yatak kayma gerilmesi deneyleri için kullanılan test kurulumu (Fredsoe ve Sumer, 1997)



Şekil 2.5 Oyulma deneylerinde kullanılan test düzeneği (Fredsoe ve Sumer, 1997).



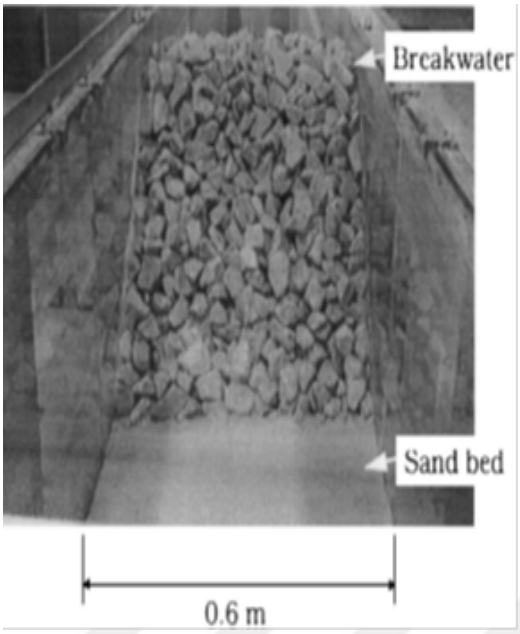
Şekil 2.6 Oyulma koruma katmanı testi (Fredsoe ve Sumer, 1997).



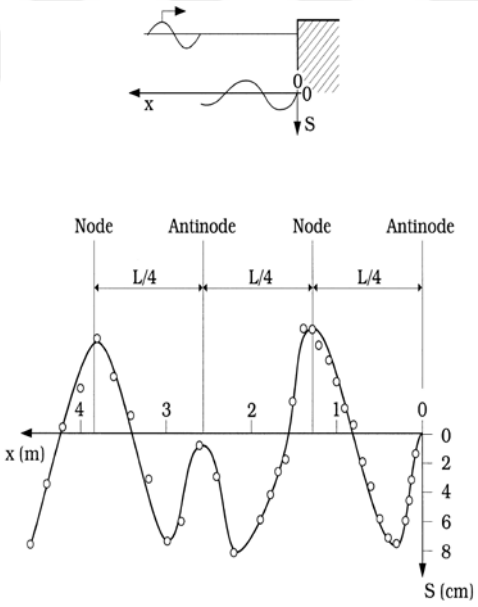
Şekil 2.7 Dalgakıranın baş kısmında sıçrayarak kırılan dalganın aşamaları (Fredsoe ve Sumer, 1997).

Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmalarında, iki boyutlu oyulmayı deneysel olarak araştırmış ve taş dolgu dalgakıranın korunmasını incelemişlerdir (Sumer ve Fredsoe, 2000). Bu bağlamda taş dolgu dalgakıranın gövde kısmındaki oyulma ve yığılma araştırılmaktadır. Deneylerde 0.6 m genişliğinde, 0.8 m derinliğinde ve 28 m uzunluğunda dalga kanalı kullanılmıştır. 1/1.2 ve 1/1.75 şev eğimleri kullanılarak dalgakıran modelleri oluşturulmuştur. Deneyler hem düzenli hem de düzensiz dalgalar etkisinde gerçekleştirilmiştir. Şevli yüzlü dalgakıranlarda en yüksek oyulma derinliği bulunarak, göreceli oyulma derinliğine geçilmiştir. Düzensiz dalgalarda oyulma derinliğinin azaldığı belirlenmiştir.

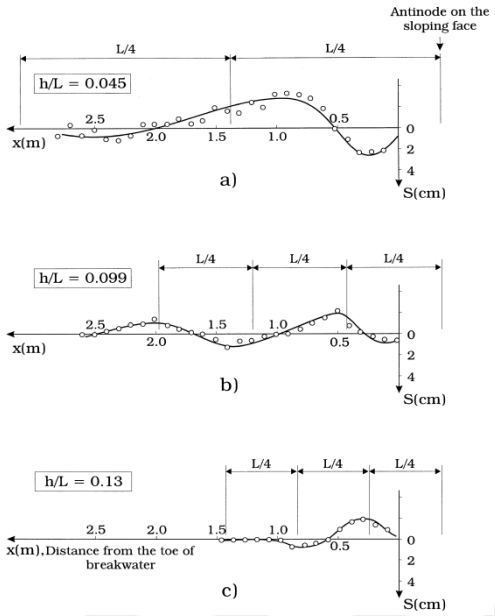
Şevli yüzlü dalgakıranların topuğunda sediment taşınımının denge profiline ulaştığı belirlenmektedir. Taban malzemesi dane çapı küçük ise askıda katı madde taşınımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Daha iri daneler daha alt kısımlara gitmektedir. Dalgakıran şev eğimi azaldıkça oyulma derinliğinin azaldığı anlaşılmıştır. Şekil 2.8'de dalga kanalının açık deniz tarafından bakıldığında dalgakıran model eğimi 1:1.75 olan model görülmektedir. Şekil 2.9'da şevli yüzlü dalgakıran topuğunda denge hali taban profili ve Şekil 2.10'da düzensiz dalgalar halinde denge hali taban profili gösterilmektedir. Şekil 2.11'de dalgakıranda göreceli oyulma derinliğinin düşey yüzlü ve şevli yüzlü dalgakıran durumundaki değişimi gösterilmektedir. (2.11) ve (2.12) denklemlerinde Xie'nin ince ve iri daneler için en yüksek oyulma derinliği görülmektedir.



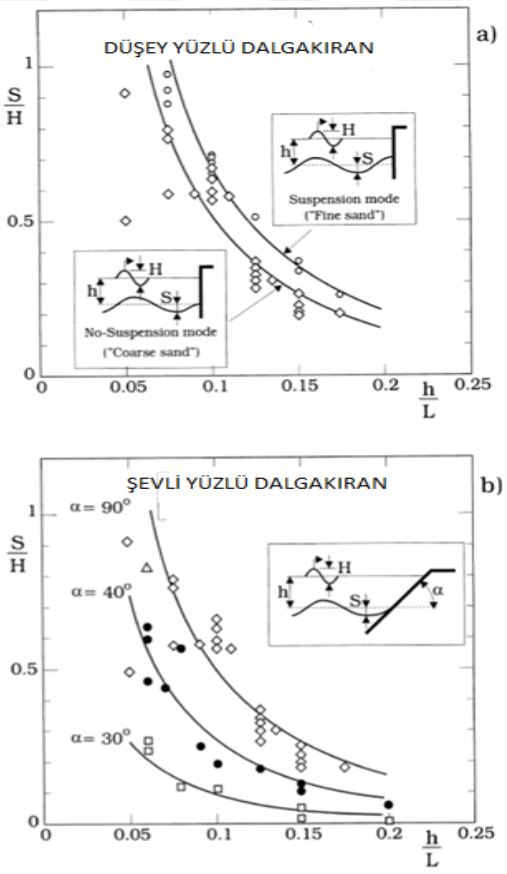
Şekil 2.8 Dalga kanalının açık deniz tarafından şev eğimi 1:1.75 olan dalgakıran modelinin görünümü (Sumer ve Fredsoe, 2000).



Şekil 2.9 Şevli yüzlü dalgakıran topuğunda denge hali taban profili (Sumer ve Fredsoe, 2000).



Şekil 2.10 Düzensiz dalgalar halinde denge hali taban profili (Sumer ve Fredsoe, 2000).



Şekil 2.11 Göreceli oyulma derinliğinin düşey yüzlü ve şevli yüzlü dalgalar durumundaki dağılımı (Sumer ve Fredsoe, 2000).

Maksimum oyulma derinliği *S*, kırılmayan dalga yüksekliği *H*, sakin su derinliği *h*, kırılmayan dalga uzunluğu *L* ile ifade edilmektedir.

Xie (1981) ince danaler için dalgakıranlarda maksimum oyulma derinliği

$$\frac{S}{H} = f\left(\frac{0.4}{[\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)]^{1.35}}\right) \tag{2.11}$$

Xie (1981) iri danaler için dalgakıranlarda maksimum oyulma derinliği

$$\frac{S}{H} = f\left(\frac{0.3}{[\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)]^{1.35}}\right) \tag{2.12}$$

Torum ve diğ. (2004) çalışmasında, düzensiz dalgalara maruz kalan dalgakıranın etrafındaki oyulmayı incelemiştir (Torum ve diğ., 2004). Şevli yüzlü dalgakıranlarda düzenli, düzensiz dalga durumları için oyulma derinliği formülleri kullanılmaktadır. Shields parametresi (2.13) denkleminde verildiği gibi tanımlandığında, boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği (2.14) denklemi ile verilmektedir. Zamana bağlı oyulma derinlikleri ise zaman ve zaman ölçeği parametrelerine bağlı olarak (2.15) ile ifade edilmiştir. Cidar kayma gerilmesi sürtünme hızı U_{fm}, taban malzemesi göreceli özgül ağırlığı *s*, Reynolds sayısı Re, dane medyan çapı d_{50}, Shields parametresi θ, zaman ölçeği T_s, boyutsuzlaştırılmış zaman ölçeği T^* ve zaman *t* ile gösterilmektedir.

$$\theta = \frac{Ufm^2}{g(s-1)d_{50}} \tag{2.13}$$

$$T^* = F(\frac{h}{L}, \theta, \alpha, \frac{L}{d_{50}}, Re) \tag{2.14}$$

$$S_t = S(1-e^{-t/Ts}) \tag{2.15}$$

Sumer ve diğ. (2005)'te, batık dalgakıranların etrafındaki oyulmayı deneysel olarak incelemiştir. Dalgakıran modelleri 1:1.5 şev eğimine göre yapılmıştır. Oyulma ölçümlerini doğrulamak için hız ölçümleri de yapılmıştır. Dalgakıranın gövdesinde yapılan deneyler topukta önemli miktarda oyulma olduğunu göstermiştir. Oyulmanın sadece dalgakıranın açık deniz tarafında değil, kara tarafında da meydana geldiği tespit edilmiştir. Dalgakıranın kafa kısmında yapılan deneyler sonucunda şiddetli

oyulma meydana geldiği tespit edilmiştir. Mevcut laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Kwang ve Norimi (2008) çalışmalarında yerel oyulmaların kıyı yapılarındaki olumsuz etkilerini incelemişlerdir (Kwang ve Norimi, 2008). Düşey kıyı yüzü ile geçirimsiz batık dalgakıran arasındaki yerel oyulmalarla ilgili deneyler yapılmıştır. Batık dalgakıranların ve düşey yüzlü dalgakıranların oyulma ve yığılma mekanizmaları birbirine yakın bulunmuştur. Batık dalgakıranlar etrafında vorteks oluştuğu ve su derinliğinin göreceli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada, mevcut tahmin yöntemlerini kullanmak yerine yeni tahmin yöntemi oluşturulmuştur. Deneysel verilerle tahmin ile bulunan veriler arasındaki ilişki korelasyonla belirlenmektedir. Şekil 2.12'te deney düzeneğinin şematik diyagramı, Şekil 2.13'te deney düzeneğinin fotoğrafı, Şekil 2.14 ile batık dalgakıranın önünde vorteks oluşumunun anlık görüntüsü verilmektedir. Maksimum oyulma derinliği boyut analizinden (2.16) ve (2.17) denklemlerindeki parametrelerin fonksiyonunu ve (2.18) denklemi maksimum oyulma derinliği tahmini vermektedir. En yüksek oyulma derinliği Z_{Smax}, su derinliği h, dalgakıran şev eğimi α, su parçacıklarının yörüngesel hareketi a, maksimum yörünge hızı U_m, kinematik viskozite $\boldsymbol{\nu}$,durgun su derinliğine bakılarak normalize edilen batık derinlik $\hat{\mathbf{q}}$, dalga yansıma katsayısı c_r, dalga sayısı k ile gösterilmektedir.

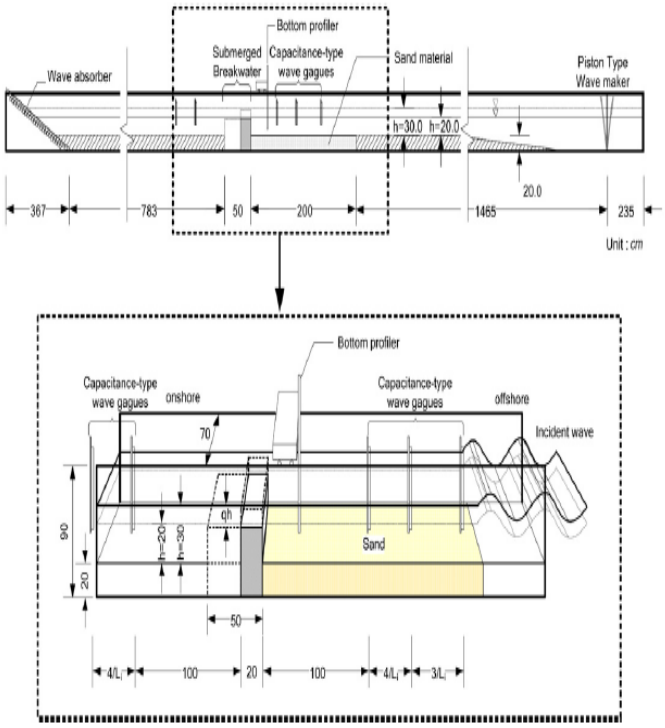
$$\frac{Zs_{max}}{H_i} = f\left(\frac{h}{l}, \alpha, \vartheta_c, \frac{L}{D_{50}}, \frac{aU_m}{\nu}\right) \tag{2.16}$$

taş dolgu dalgakıran için

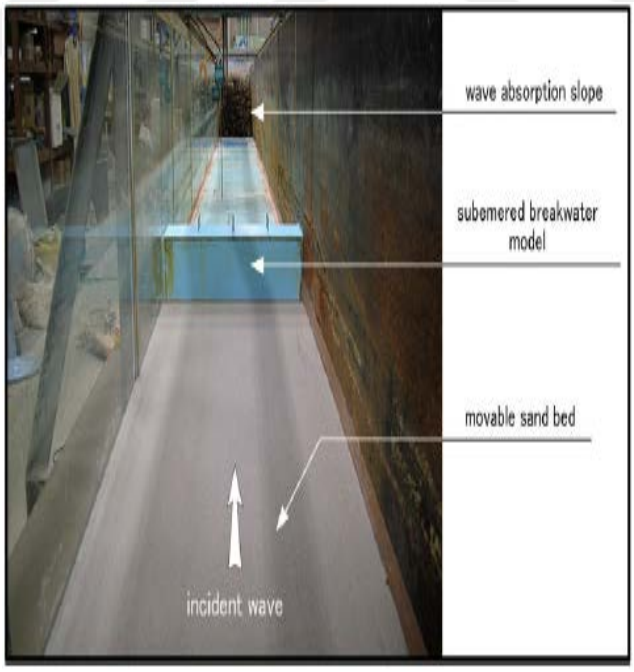
$$\frac{Zs_{max}}{H_i} = f\left(\frac{h}{l}, \alpha, \vartheta_c, \frac{L}{D_{50}}, \frac{aU_m}{\nu}, \hat{q}\right) \tag{2.17}$$

Batık dalgakıran için en yüksek oyulma derinliği tahmini

$$\frac{Zs_{max}}{Hi} = f\left(\frac{0.06}{(1-c_r)[\sinh(kh)]^{2.04}}\right) \tag{2.18}$$



Şekil 2.12 Deney düzeneğin şematik diyagramı (Kwang ve Norimi, 2008).



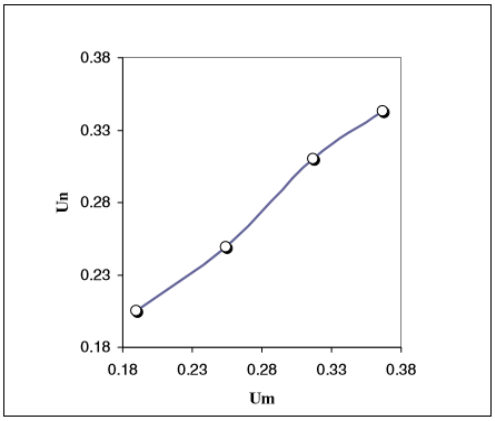
Şekil 2.13 Deney düzenlemenin fotoğrafı (Kwang ve Norimi, 2008).



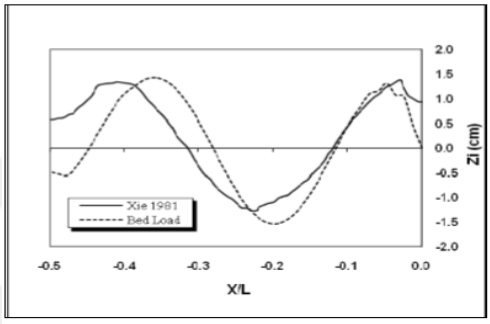
Şekil 2.14 Batık dalgakıran önünde vorteks oluşumunun anlık görüntüsü (Kwang ve Norimi, 2008).

Hajivalie ve diğ. (2011) düşey yüzlü dalgakıranın önündeki dalgaların etkisi ile oluşan oyulma şeklini incelemiştir (Hajivalie ve diğ. 2011). Deneyde dalgalar 0.65 m su derinliğinde üretilmektedir. Hızı düşey dalgakırandan 0.675 m ötede ve tabandan 0.25 m yüksekliğe sabitlenmiş bir noktadan ölçülmektedir. Hem sayısal model hem de deneylerdeki hızların birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Sayısal model deneysel verilerle doğrulanmaktadır. Su parçacıklarının en yüksek yatay hızının hafifçe azaldığı gözlenmiştir. Yatak yükü formülü (2.19) formülüyle hesaplanmaktadır. Sayısal sonuçlarla Zhang (2001)'ın deney verileri ile karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.15'te yatak yükü için sayısal model ve deneysel veriler arasındaki oyulma kuvvetinin karşılaştırılması, Şekil 2.16'da sayısal sonuçlarla Zhang (2001)'ın deney verilerinin karşılaştırılması görülmektedir. Ampirik sabit a, Shields parametresi θ, yatak eğim açısı α, sediment boyutu d, dinamik Coulomb sürtünme faktörü μ_c ile gösterilmektedir.

$$\frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = \frac{a}{\cos\alpha(\mu_c - \tan\alpha)}(\theta - \theta_c)(-\sqrt{\theta_c}) \qquad (2.19)$$



Şekil 2.15 Sayısal sonuçlarla Zhang'ın deney verilerinin karşılaştırılması (Hajivalie ve diğer, 2011)



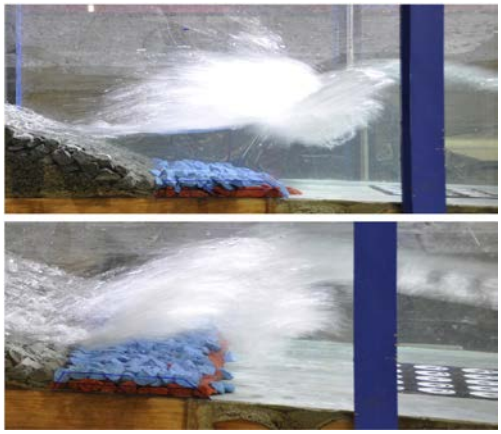
Şekil 2.16 Yatak yükü için sayısal model ve deneysel veriler arasındaki oyulma kuvvetinin karşılaştırılması (Hajivalie ve diğer, 2011)

VanGent ve Van Der Werf (2013) taş dolgu dalgakıranlarda kaya topuk stabilitesi üzerine inceleme yapmıştır (VanGent ve Van Der Werf, 2013). Topuk oyulması nedeniyle dalgakıranda oluşan hasarlar araştırılmıştır. Her testte topuk yapısı hasar görmeden önce ve gördükten sonra gerekli ölçümler yapılmıştır. Deneylerde dalga kanalı genişliği 1 m, yüksekliği 1.2 m ve uzunluğu 55 m'dir. Testler topuk üzerindeki su yüksekliğini, topuk yapısının genişliğini, topuk kalınlığını ve dalga dikliğini de kapsamaktadır. Topuk genişliği için iki farklı genişlik kullanılmıştır. Topuk kalınlığı olarak iki farklı kalınlık ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Su derinliği 0.2 m, 0.3 m ve 0.4 m alınarak test edilmektedir. Yapılan testler kayaların yükseklik, su derinliği, dalga dikliği, topuk genişliği ve kalınlığından da etkilendiğini göstermektedir. Topuk üzerindeki derinlik (2.20) denklemiyle hesaplanmaktadır. Topuk yapısı içindeki kaya malzemesinin stabilitesi tahmin etmek için kullanılan (2.21) denklemidir. Şekil 2.17'te bir dalga kanalında dalga yüklemesi altındaki kaya topuk fotoğrafları Şekil 2.18'te test edilen yapının bir topuğu Şekil 2.19'da topuk

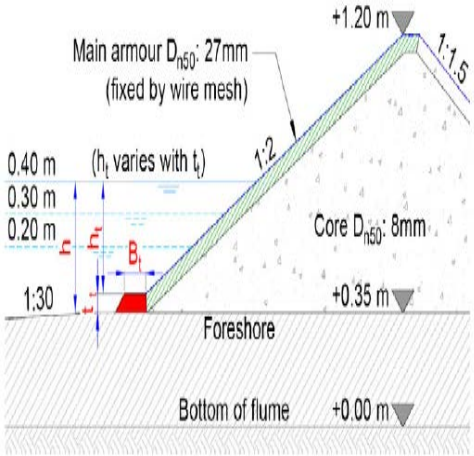
yapıları testleri Şekil 2.20'de taş dolgu dalgakıranların topuğunda iç içe geçen V biçimli ünitelerin fotoğrafları görülmektedir. Derin suya dayalı hız tahmini u_δ, dalga yüksekliği H_S, topuk üzerindeki derinlik h_t, topuk genişliği B_t, topuktaki dane çapı ΔD_{n50} ile gösterilmektedir.

$$u_\delta = \frac{\pi}{T_{m-1,0}} \frac{H_S}{\sinh kh_t} k = \frac{2\pi}{L_{m-1,0}} = \frac{2\pi}{\frac{g}{2\pi} T_{m-1,0}^2} \quad (2.20)$$

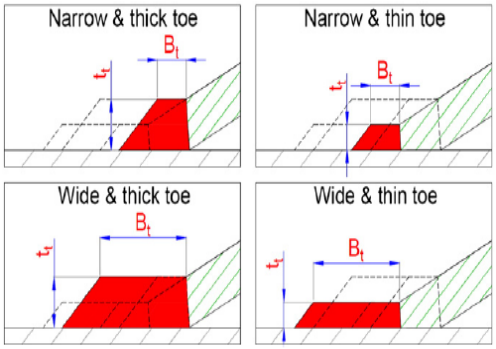
$$N_{OD} = 0.032 * \left(\frac{B_t}{H_S}\right)^{0.3} * \left(\frac{H_S}{\Delta D_{n50}}\right)^3 * \left(\frac{u_\delta}{\sqrt{gH_S}}\right) \quad (2.21)$$



Şekil 2.17 Bir dalga kanalında dalga yüklemesi altındaki kaya topuk fotoğrafları(Van Gent ve Van Der Werf, 2013).



Şekil 2.18 Test edilen yapının bir topuğu (Van Gent ve Van Der Werf, 2013).

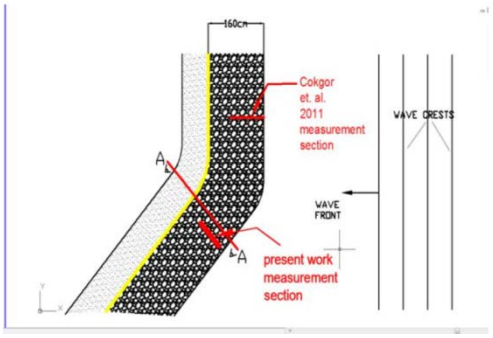


Şekil 2.19 Topuk yapıları testleri (Van Gent ve Van Der Werf, 2013).

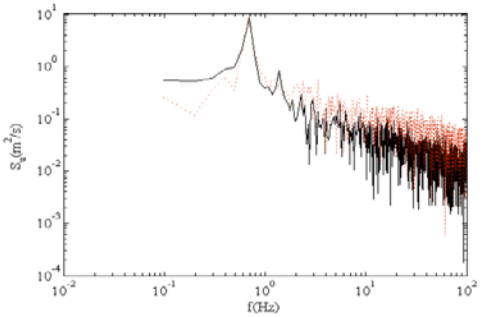


Şekil 2.20 Taş dolgu dalgakıranların topuğunda içiçe geçen V biçimli ünitelerin fotoğrafları(Van Gent ve Van Der Werf, 2013).

Çokgör ve Durmuş (2018) taş dolgu dalgakıran önünde türbülansa bağlı oyulmanın üç boyutlu deneysel analizini yapmıştır (Çokgör ve Durmuş, 2018). Hız ölçümleri akustik doppler velocimetre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 26 m uzunluğunda, 6 m genişliğinde ve 1.4 m yüksekliğinde bir dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. 20 cm yüksekliğinde 1.9 sn periyotlu düzenli dalgalar için incelemeler yapılmıştır. Dalga yüksekliği ve periyodun belirlenmesi için dalgakıranın önünde 1 m, 2 m ve 5 m uzaklıklarından ölçümler alınmıştır. Şekil 2.21'de deney düzeneğinin planı, Şekil 2.22'de aynı yüksekliğe sahip iki farklı konumda yatay hız bileşeninin u güç spektrumu görülmektedir.



Şekil 2.21 Deney düzeneğinin planı (Çokgör ve Durmuş, 2018)



Şekil 2.22 Aynı yüksekliğe sahip iki farklı konumda yatay hız bileşeninin u güç spektrumu (Çokgör ve Durmuş, 2018)

BÖLÜM ÜÇ
ŞEVLİ YÜZLÜ DALGAKIRAN TOPUĞUNDA DALGA ETKİSİNDE AKIM VE YEREL ZEMİN HAREKETLERİ

Bu bölümde şevli yüzlü dalgakıran topuğunda bozulan akım yapısı ve buna bağlı meydana gelen yerel zemin hareketleri anlatılmaktadır. Gerekli bilgilerin büyük bir bölümü boyutsuz parametreler arasındaki ilişki şeklinde verildiğinden, öncelikle boyut analizi ile bu boyutsuz parametrelerin elde edilişi sunulmaktadır.

3.1 Boyut analizi

İncelenen fiziksel olayda etkin boyutlu büyüklükler; akışa ait parametreler, akışkana ait parametreler, zemine ait parametreler ve geometrik parametreler olarak gruplandırılarak aşağıda verilmektedir.

Akışa ait parametreler : U_m, g, H, T, L

Akışkana ait parametreler : ρ, μ

Zemine ait parametreler : ρ_s, d_{50}

Geometrik parametreler : S, α, h

U_m sınır tabakası üzerinde su partikülü yatay hızının en büyük değeri, g yerçekimi ivmesini, L dalga boyunu, T dalga periyodunu, H dalga yüksekliğini, h dalgalanmamış su derinliği, ρ akışkanın yoğunluğunu, μ akışkanın viskozitesini, S oyulma çukuru derinliğini, α dalgakıran şev eğimini, ρ_s deniz zemininin yoğunluğunu, d_{50} deniz zemini için dane medyanı çapını göstermektedir. Tekrarlanan boyutlu büyüklükler U_m, ρ ve h seçilerek Buckingham-π teoremiyle boyut analizi yapılmaktadır. Dalgakıran şev eğimi α halihazırda boyutsuz olduğundan etkin boyutsuz parametrelerden biridir. Boyut analizi sonucu elde edilen denklemler (3.1) ile (3.8) arasında verilmektedir.

$$[\alpha] = 1$$

$$[g]=LT^{-2}$$

[T]=T

[H]=L

[L]=L

$[\rho]=KL^{-4}T^{2}$

$[\mu]=KL^{-2}T$

$[\rho_s]=KL^{-4}T^{2}$

$[d_{50}]=L$

[S]=L

$[U_m]=LT^{-1}$

[h]=L

$\pi_1 = U_m{}^a \rho^b h^c g^1 = (LT^{-1})^a (KL^{-4}T^2)^b (L)^c (LT^{-2})^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b$

T için $0 = -a + 2b - 2$ a=-2

L için $0 = a - 4b + c + 1$ c=1

$$\pi_1 = \frac{h\,g}{U_m{}^2} = Fr^{-2} \text{ Froude sayısı} \qquad (3.1)$$

$\pi_2 = U_m{}^a \rho^b h^c T^1 = (LT^{-1})^a (KL^{-4}T^2)^b (L)^c (T)^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b$

T için $0 = -a + 2b + 1$ a=1

L için $0 = a - 4b + c$ c=-1

$$\pi_2 = \frac{U_m T}{h} = KC \quad \text{Keulegan-Carpenter sayısı (su derinliğine göre)} \qquad (3.2)$$

$\pi_3 = U_m{}^a \rho^b h^c H^1 = (LT^{-1})^a (KL^{-4}T^2)^b (L)^c (L)^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b$

T için $0 = -a + 2b$ a=0

L için $0 = a - 4b + c + 1$ c=−1

$$\pi_3 = \frac{H}{h} \quad \text{göreceli dalga yüksekliği} \qquad (3.3)$$

$\pi_4 = U_m{}^a \rho^b h^c L^1 = (LT^{-1})^a (KL^{-4}T^2)^b (L)^c (L)^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b$

T için $0 = -a + 2b$ a=0

L için $0 = a - 4b + c + 1$ c=−1

$$\pi_4 = \frac{L}{h} \quad \text{göreceli derinlik} \qquad (3.4)$$

$\pi_5 = U_m{}^a \rho^b h^c \mu^1 = (LT^{-1})^a (KL^{-4}T^2)^b (L)^c (KL^{-2}T)^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b + 1$ $b = -1$

T için $0 = -a + 2b + 1$ a=−1

L için $0 = a - 4b + c - 2$ c=−1

$$\pi_5 = \frac{\mu}{h \rho U_m} = Re^{-1} \text{ Reynolds sayısı} \qquad (3.5)$$

$\pi_6 = U_m{}^a \rho^b h^c \rho_s{}^1 = (LT^{-1})^a (KL^{-4}T^2)^b (L)^c (KL^{-4}T^2)^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b + 1$ b=-1

T için $0 = -a + 2b + 2$ a=0

L için $0 = a - 4b + c - 4$ c=0

$$\pi_6 = \frac{\rho_s}{\rho} = G_s \text{ (deniz zemini bağıl özgül ağırlığı)} \quad (3.6)$$

$\pi_7 = U_m{}^a \rho^b h^c d_{50}{}^1 = (LT^{-1})^a (KT^{-4}T^2)^b (L)^c (L)^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b$

T için $0 = -a + 2b$ a=0

L için $0 = a - 4b + c + 1$ c=-1

$$\pi_7 = \frac{d_{50}}{h} \quad (3.7)$$

$\pi_8 = U_m{}^a \rho^b h^c S^1 = (LT^{-1})^a (KT^{-4}T^2)^b (L)^c (L)^1 = K^0 L^0 T^0$

K için $0 = b$

T için $0 = -a + 2b$ a=0

L için $0 = a - 4b + c + 1$ c=-1

$$\pi_8 = \frac{S}{h} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki boyut analizi ile elde edilen parametrelerden başka, incelenen fiziksel olayda etkin boyutsuz parametreler; (3.9) eşitliği ile verilen Shields parametresi, (3.10) eşitliği ile verilen dane yoğunluk Froude sayısı, (3.11) eşitliği ile verilen dalga dikliği, (3.12) eşitliği ile verilen göreceli dane medyan çapı ve (3.13) eşitliği ile

verilen Iribarren sayısıdır (sörf benzerlik parametresi). Irribaren sayısı için düzenli dalga koşullarında derin su formülü kullanılmıştır.

$$\theta = \frac{{U_{fm}}^2}{g\,(s-1)\,d_{50}} \tag{3.9}$$

$$Fr_d = \frac{D\,g}{{U_m}^2} \tag{3.10}$$

$$\frac{H}{L} \tag{3.11}$$

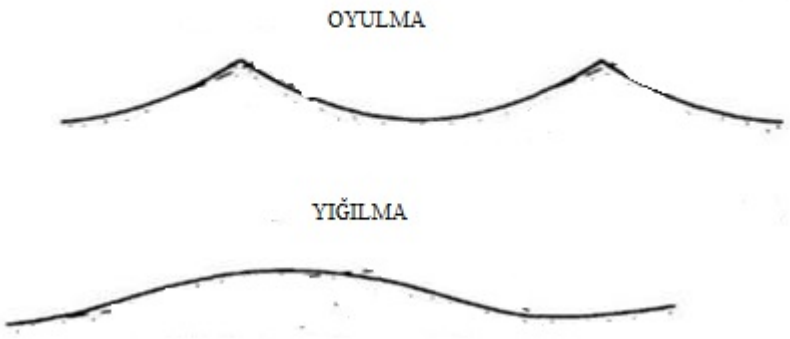
$$\frac{L}{d_{50}} \tag{3.12}$$

$$Ir = \frac{tan\alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \tag{3.13}$$

3.2 Oyulma ve yığılma

Taşınan taban malzemesi miktarı akım hızı, dane çapı ve danenin morfolojik yapısı gibi etkenlerle değişmektedir. Oyulma ve taban malzemesi taşınımı ortalama akım hızı kritik ortalama kayma hızının altına inince sonlanmaktadır. Gelen taban malzemesi miktarı taşınan madde miktarından az ise oyulma oluşmaktadır. Gelen ve taşınan taban malzemesi birbirine eşit ise denge sağlanmaktadır. Gelen taban malzemesi taşınan taban malzemesinden büyük ise yığılma oluşmaktadır. Taş dolgu dalgakıranın topuğunda dalga etkisiyle oluşan aşınmalar oyulma, birikmeler ise yığılma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.1). Bir yapı etrafında oluşan oyulma rejini, hareketli taban oyulması ve temiz su oyulması olarak ikiye ayrılmaktadır. Hareketli taban oyulması ($\theta > \theta_{cr}$) Shields parametresi kritik Shields parametresinden büyük olduğunda meydana gelmekte ve yapıdan yeterince uzakta yani yapıdan dolayı akımın bozulmadığı (etkilenmediği) kesimde de sediment hareketi yaşanmaktadır.

Temiz su oyulmasında ($\theta<\theta_{cr}$) ise Shields parametresi kritik Shields parametresinden küçük olmakta ve yapıdan uzak bölgelerde sediment hareketi gerçekleşmemektedir.



Şekil 3.1 Oyulma ve yığılma

Iribarren sayısı dalgaların sahiller ve kıyı yapısı üzerindeki çeşitli etkilerini modellemek için kullanılan ve dalgaların kırılma türünü belirlemeye yarayan boyutsuz bir parametredir.

BÖLÜM DÖRT
DENEY SİSTEMİ VE ÇALIŞMA YÖNTEMİ

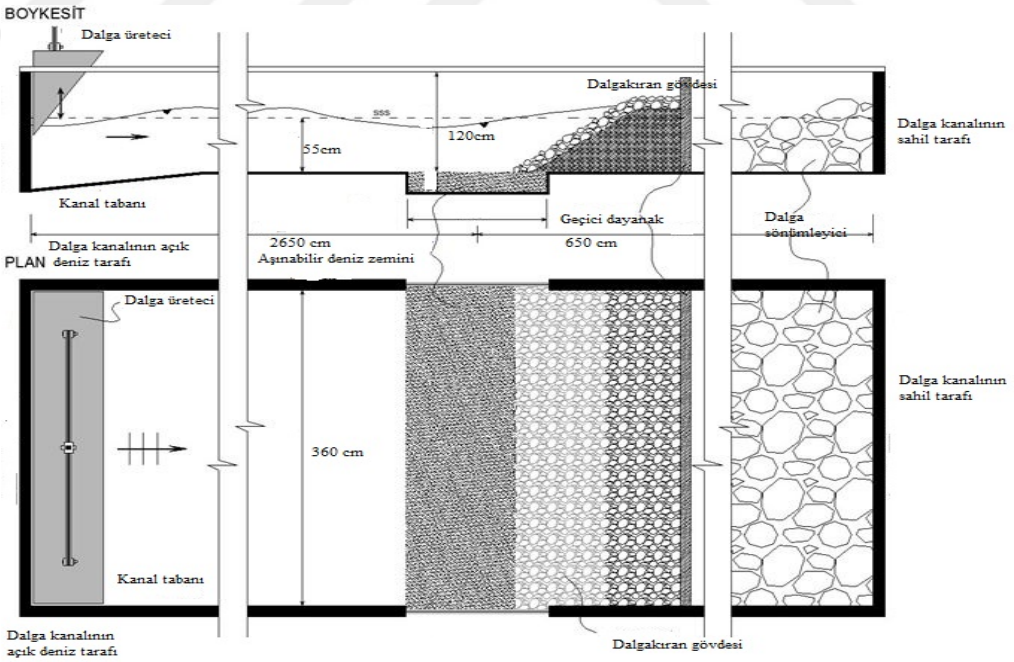
Deneyler, DEÜ İnşaat Mühendisliği Laboratuvarındaki geniş dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Dalga kanalı 33 m uzunluğunda, 1.2 m derinliğinde ve 3.6 m genişliğe sahiptir. Böylece kanal içerisinde taş dolgu ile şevli yüzlü dalgakıran gövdesi oluşturulmuştur. Taş dolgu dalgakıran (şevli yüzlü dalgakıran) topuğunda dalga etkisi sonucu meydana gelen yerel zemin hareketleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde kanalda ilerleyen dalgaların karakteristiklerinin belirlenmesi ve dalgakıranın topuğundaki zamana bağlı oyulma verilerinin elde edilmesi amacıyla yüksek frekanslı ses dalgası prensibine göre çalışan ölçüm aletleri kullanılmıştır.

Deneyler, kanalın açık deniz kesiminde bulunan düzenli dalga üreteci marifetiyle ilerleyen dalgalar ile gerçekleştirilmektedir. Deneylerde UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) ve ULS (Ultrasonic Level System) cihazları kullanılmıştır. Bu cihazlar yüksek frekanslı ses dalgası prensibine göre çalışan donanımlardır. UVP cihazı ve algılayıcıları kullanılarak dalga kanalında farklı noktalarda oyulma, yığılma ve hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Suyun içindeki aparata bağlı üç algılayıcı yardımıyla UVP ölçüm verileri bilgisayara aktarılmaktadır. ULS 80-D cihazı ve USS (Ultra Sound Sensor) 20130 algılayıcıları kullanılarak zamana bağlı su seviyesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. USS20130 algılayıcılarıyla, suyun üzerinde suya temas etmeden sabit bir noktaya bağlı şekilde ölçüm yapılmaktadır. Deneyler, farklı dalgakıran şev eğimleri, temsili deniz zemin dane çapları ve dalga karakteristikleri ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerdeki şev eğimleri 1:1.5, 1:1.75, dane çapları 0.55 mm, 1.85 mm ve dalga periyotları 1.7, 2.0, 2.3, 2.7, 3.1, ve 3.6 sn'dir. ULS ve UVP cihazlarıyla iki noktada ölçüm yapılmaktadır. Deney cihazlarının kurulumu gerçekleştirildikten sonra dalga üretecinde dalganın frekansı ayarlanmaktadır. Dalga frekansları 37.5, 50, 62.5, 75, 87.5 ve 100 hertz'tir. Dalga üreteci hız kontrol cihazı, UVP cihazı ve ULS cihazı aynı anda çalıştırılmaktadır. Deney süreleri 45 ila 60 dakika arasında değişmektedir. Ölçümler ile kanalda ilerleyen dalgaların karakteristikleri elde edilmiş ve zamana bağlı oyulmalar/yığılmalar belirlenmiştir.

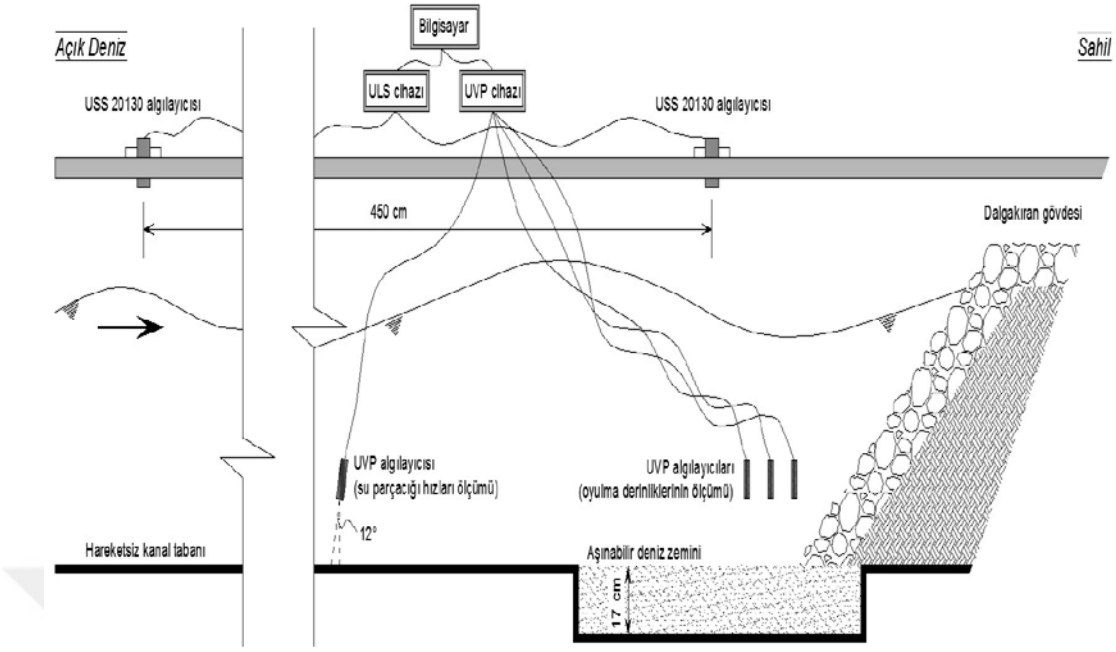
Her bir deney en az bir kere tekrar edilmiştir. Şekil 4.1 Kanal içinden dalgakıran görünümü, Şekil 4.2'de dalga kanalının boykesit ve plan görünümü ve Şekil 4.3'de ölçüm bölgesi şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.1 Kanal içinden dalgakıran görünümü



Şekil 4.2 Dalga kanalı boykesit ve plan görünümü.

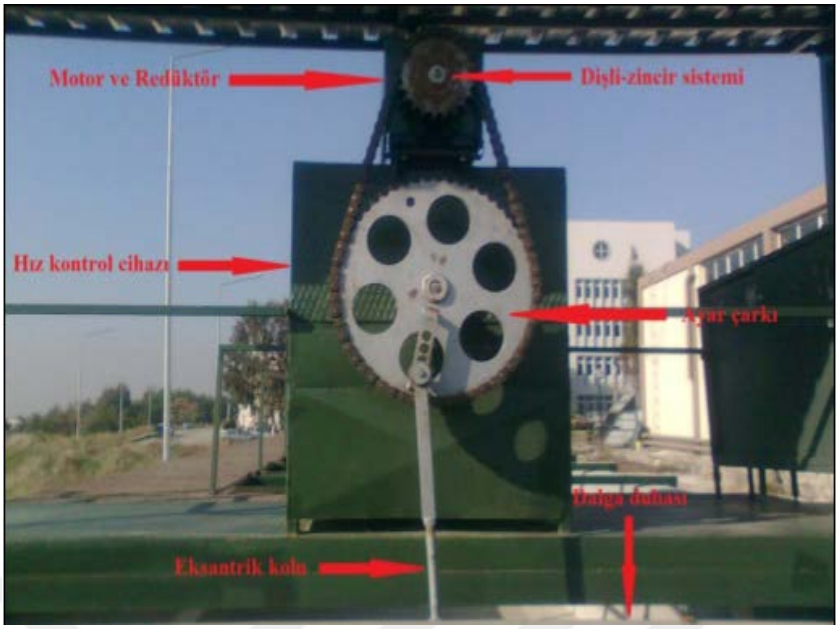


Şekil 4.3 Ölçüm bölgesi şematik gösterimi.

Dalgalar dalga üreteciyle üretilmektedir. Dalga üretecinin olduğu taraf açık deniz tarafını temsil etmektedir. Dalga üreteci değişik genlik ve periyotlarda düzenli dalga üretebilmektedir. Deney yapılırken dalga üretecinde hız kontrol cihazında frekans ayarı yapıldıktan sonra dalga dubasının aşağı yukarı hareketiyle istenilen periyotta dalgalar elde edilmiştir. Şekil 4.4'te dalga üretecinden çıkan dalga, Şekil 4.5'te dalga üreteci sistemi ve Şekil 4.6'da dalga dubası görülmektedir.



Şekil 4.4 Dalga üretecinden çıkan dalga (Kişisel arşiv, 2019).



Şekil 4.5 Dalga üreteç sistemi (Doğan, 2013).



Şekil 4.6 Dalga dubası (Doğan, 2013).

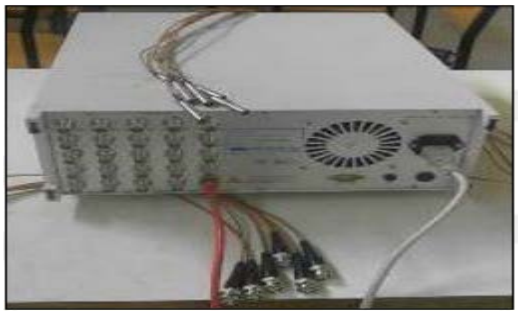
ULS cihazıyla deneylerde iki noktada su seviyesi ölçümü yapılmaktadır. Su seviyesini ölçmek için Ultrasonic Level Sensor (ULS) 80D kullanılmaktadır. Gönderilen yüksek frekanslı ses dalgalarından geriye dönenler yardımıyla su seviyesi belirlenmektedir. Mesafeyi saniyede 30 veri olarak kaydetmektedir. Bu amaçla cihaza bağlı USS20130 algılayıcıları kullanılmaktadır. Veriler eş zamanlı olarak bilgisayara yansımaktadır. Dalga periyodu, dalga yüksekliği ve iki algılayıcıdan elde

edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi ile dalgaların boyları belirlenebilmektedir. Şekil 4.7'de ULS cihazı ve algılayıcıları USS20130 görülmektedir.



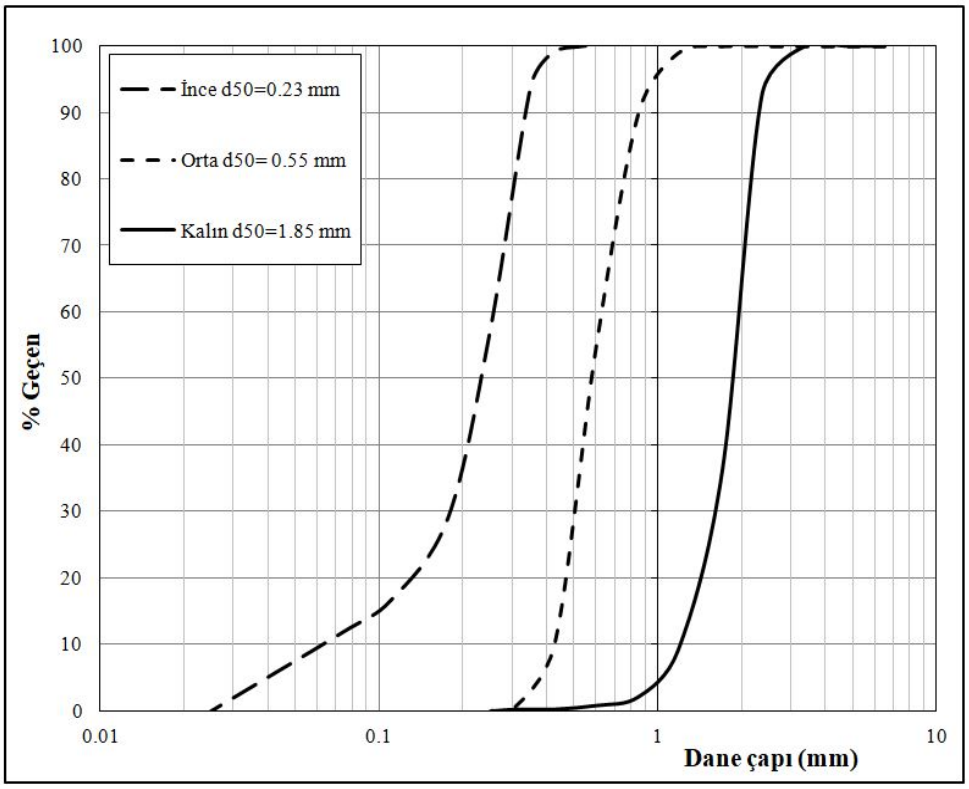
Şekil 4.7 ULS 80D cihazı ve USS 20130 algılayıcıları.

Deneylerde UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) cihazı kullanılarak dalga kanalında oyulmalar ve yığılmalar zamana bağlı olarak belirlenmektedir. Açık kanallarda noktasal olarak hızları ölçmektedir. UVP cihazı açık kanallarda ve serbest yüzeyli akımlarda hız profillerinin çıkarılması için kullanılmaktadır. UVP nin algılayıcıları ses dalgalarının frekanslarına göre sınıflandırılmaktadır. UVP algılayıcılarının mevcut tipleri, 0.5, 1, 2, 4 ve 8 MHz frekanslı olanlarıdır. UVP cihazına, frekansları aynı olmak kaydıyla 20 adet algılayıcı aynı anda bağlanabilmekte ve sıralı bir şekilde ölçüm alınabilmektedir. UVP cihazı, ikincil bir özelliğinden yararlanılarak zamana bağlı oyulma ve yığılma ölçümünde kullanılabilmektedir. Şekil 4.8'de UVP cihazı ve ona bağlı çalışan 4 MHz algılayıcıları gösterilmektedir. Bu algılayıcının seçilme sebebi uç kısmının ince oluşudur. UVP cihazının zamana bağlı oyulma/yığılma derinliği belirlenmesinde kullanımı için Güney ve diğ. (2013) çalışması incelenebilir.



Şekil 4.8 UVP cihazı (Temel, 2019)

Şekil 4.9'da deneylerde kullanılan temsili deniz taban malzemelerine ait elek analizi grafiği verilmektedir. Deneylerde kullanılan malzemeler aşağıdaki grafikte orta ve kalın olarak isimlendirilen ve dane medyan çapları 0.55 mm ve 1.85 mm olan üniform kum malzemelerdir. Tez çalışmasında kullanılan bu kumlar hem birbirlerinden hem de benzer önceki çalışmalarda kullanılanlardan oldukça farklı iriliktedir.



Şekil 4.9 Elek analizi dane çapı grafiği

BÖLÜM BEŞ
DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirlen deneylerin listesi, deneylerdeki karakteristik bilgiler ile birlikte Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo.5.1 Deneylerdeki karakteristik bilgiler.

Deney No	**Statik Su Seviyesi (cm)**	**d_{50} (mm)**	**H (cm)**	**T (sn)**	**L (cm)**	**Dalgakıran Şev Açısı (°)**	**Ur**	***a* (cm)**
1	55	0.55	13	3.6	800	29.74	50.0	14.59
2	55	0.55	13	3.6	800	33.69	50.0	14.59
3	55	0.55	13	3.6	800	33.69	50.0	14.59
4	55	0.55	17	3.1	700	29.74	50.1	16.54
5	55	0.55	17	3.1	700	29.74	50.1	16.54
6	55	0.55	17	3.1	700	29.74	50.1	16.54
7	55	0.55	17	3.1	700	29.74	50.1	16.54
8	55	0.55	17	3.1	700	29.74	50.1	16.54
9	55	0.55	17	3.1	700	29.74	50.1	16.54
10	55	0.55	17	3.1	700	33.69	50.1	16.54
11	55	0.55	20	2.7	600	29.74	43.3	16.44
12	55	0.55	20	2.7	600	33.69	43.3	16.44
13	55	0.55	22	2.3	500	29.74	33.1	14.72
14	55	0.55	22	2.3	500	33.69	33.1	14.72
15	55	1.85	17	3.1	700	33.69	50.1	16.54
16	55	1.85	20	2.7	600	29.74	43.3	16.44
17	55	1.85	20	2.7	600	29.74	43.3	16.44
18	55	1.85	22	2.3	500	29.74	33.1	14.72
19	55	1.85	22	2.3	500	29.74	33.1	14.72
20	55	1.85	22	2.3	500	29.74	33.1	14.72
21	55	1,85	22	2.3	500	29.74	33.1	14.72
22	55	1.85	22	2.3	500	29.74	33.1	14.72
23	55	1.85	22	2.3	500	33.69	33.1	14.72
24	55	1,85	22	2.3	500	33.69	33.1	14.72
25	55	1.85	25	2.0	420	29.74	26.5	13.60
26	55	1.85	25	2.0	420	29.74	26.5	13.60
27	55	1.85	25	2.0	420	33.69	26.5	13.60
28	55	1.85	28	1.7	350	29.74	20.6	12.11
29	55	1.85	28	1.7	350	29.74	20.6	12.11
30	55	1.85	28	1.7	350	29.74	20.6	12.11
31	55	1.85	28	1.7	350	29.74	20.6	12.11
32	55	1.85	28	1.7	350	29.74	20.6	12.11
33	55	1.85	28	1.7	350	29.74	20.6	12.11

Tablo 5.1'den görüldüğü gibi, iki farklı irilikte taban malzemesi, altı farklı karakteristikte düzenli dalga ve iki farklı dalgakıran şev açısı durumları ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde h/L oranı 0.069 ila 0.157 arasında değişmekte olup, göreceli dalga sınıflandırmasına göre orta su dalgaları söz konusudur. UVP cihazı algılayıcıları kullanılarak deneylerde ölçülen tabandaki zamana bağlı nihai oyulma derinlikleri verileri dalga yüksekliğine göre boyutsuzlaştırılmış oyulma derinlikleri bulunmuştur. U_{fm} dalga durumunda maksimum kayma hızını göstermekte olup, (5.1) eşitliği ile belirlenebilmektedir. Dalga sığ su dalgası olsaydı dalga yüksekliğinde azalma olur dalgalar kırılmaya başlardı.

$$U_{fm} = \sqrt{\frac{f_w}{2}}\, U_m \tag{5.1}$$

$$f_w = 0.04\left(\frac{a}{k_b}\right)^{-1/4} \quad ; \quad a/k_b > 50 \tag{5.2}$$

$$f_w = 0.40\left(\frac{a}{k_b}\right)^{-3/4} \quad ; \quad a/k_b \leq 50 \tag{5.3}$$

Burada f_w, dalga durumunda sınır tabakası akımında sürtünme katsayısı olup, a/k_b değerine bağlı olarak (5.2) ve (5.3) eşitlikleri ile hesaplanabilir. Bu denklemlerde a su partiküllerinin yatay yöndeki yer değiştirme miktarını, k_b taban pürüzlülük yüksekliğini ve d_{50} dane medyan çapını simgelemektedir. Hareketli taban durumu için $k_b=2.5 \square d_{50}$ alınabilir. (5.4) eşitliği ile sinüzoidal dalga durumu için a değerinin ifadesi verilmekte olup, Shields parametresi (5.5) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$a = \frac{H}{2}\,\frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \tag{5.4}$$

$$\theta = \frac{{U_{fm}}^2}{g\,(s-1)\,d_{50}} \tag{5.5}$$

Deneylerde kullanılan dalgalar için (5.6) eşitliği ile verilen Ursell parametreleri hesaplanmış olup, Ursell parametresinin $32\cdot\pi^2/3\approx100$ değerinden küçük olduğu durumlar için lineer (küçük genlikli) dalga teorisinin geçerli olduğu kabul edilebilmektedir. Bu durumda, bozulmamış tabandaki su parçacığı en yüksek yatay hızları U_m (5.7) eşitliği ile belirlenebilmektedir.

$$\mathrm{Ur} = \frac{\mathrm{H}\, L^2}{h^3} \tag{5.6}$$

$$U_m = \frac{\mathrm{H}}{2}\,\frac{g\,T}{L}\,\frac{1}{\cosh(\frac{2\pi \mathrm{h}}{\mathrm{L}})} \tag{5.7}$$

Tablo 5.2'de her bir deney için elde edilen U_m değerleri, incelenen fiziksel olayda etkin boyutlu/boyutsuz büyüklükler, ölçülen en yüksek oyulma derinliği ve göreceli en yüksek oyulma derinliği değerleri verilmektedir.

Tablo.5.2 Deneysel veriler ile hesaplanan bazı boyutlu ve boyutsuz parametreler.

Deney No	U_m **(cm/sn)**	U_{fm} **(cm/sn)**	Re_d	Θ	θ_{cr}	**Oyulma Rejimi**	L/d_{50}	Ir	S_{max} **(mm)**	S_{max}/H
1	26.0	2.05	11.28	0.0473	0.0309	Hareketli Taban	14545.5	7.128	11.37	0.0875
2	26.0	2.05	11.28	0.0473	0.0309	Hareketli Taban	14545.5	8.317	12.48	0.0960
3	26.0	2.02	11.28	0.0473	0.0309	Hareketli Taban	14545.5	8.317	7.68	0.0591
4	32.9	2.55	14.06	0.0734	0.0317	Hareketli Taban	12727.3	5.367	12.41	0.0730
5	32.9	2.55	14.06	0.0734	0.0317	Hareketli Taban	12727.3	5.367	10.00	0.0588
6	32.9	2.55	14.06	0.0734	0.0317	Hareketli Taban	12727.3	5.367	13.60	0.0800
7	32.9	2.55	14.06	0.0734	0.0317	Hareketli Taban	12727.3	5.367	6.68	0.0393
8	32.9	2.55	14.06	0.0734	0.0317	Hareketli Taban	12727.3	5.367	8.53	0.0502
9	32.9	2.55	14.06	0.0734	0.0317	Hareketli Taban	12727.3	5.367	6.34	0.0373
10	32.9	2.55	14.06	0.0734	0.0317	Hareketli Taban	12727.3	6.263	7.44	0.0438
11	37.5	2.91	16.04	0.0955	0.0326	Hareketli Taban	10909.1	4.310	9.82	0.0491
12	37.5	2.95	16.04	0.0955	0.0326	Hareketli Taban	10909.1	5.029	9.95	0.0498
13	39.8	3.13	17.26	0.1106	0.0332	Hareketli Taban	9090.9	3.501	6.34	0.0288
14	39.8	3.59	17.26	0.1106	0.0332	Hareketli Taban	9090.9	4.085	12.00	0.0546
15	32,9	3.84	71.18	0,0494	0.0439	Hareketli Taban	3783.8	6.263	4,55	0,0267
16	37.5	4.39	81.31	0.0645	0.0443	Hareketli Taban	3243.2	4.310	4.84	0.0242
17	37.5	4.39	81.31	0.0645	0.0443	Hareketli Taban	3243.2	4.310	3.77	0.0189
18	39.8	4.86	89.96	0.0790	0.0446	Hareketli Taban	2702.7	3.501	1.18	0.0054
19	39.8	4.86	89.96	0.0790	0.0446	Hareketli Taban	2702.7	3.501	1.63	0.0074
20	39.8	4.86	89.96	0.0790	0.0446	Hareketli Taban	2702.7	3.501	1.84	0.0084
21	39.8	4.86	89.96	0.0790	0.0446	Hareketli Taban	2702.7	3.501	0.32	0.0015
22	39.8	4.86	89.96	0.0790	0.0446	Hareketli Taban	2702.7	3.501	5.20	0.0236
23	39.8	4.86	89.96	0.0790	0.0446	Hareketli Taban	2702.7	4.085	3.08	0.0140
24	39.8	4.86	89.96	0.0790	0.0446	Hareketli Taban	2702.7	4.085	4.97	0.0226
25	42.9	5.39	99.86	0.0973	0.0448	Hareketli Taban	2270.3	2.855	3.90	0.0156
26	42.9	5.39	99.86	0.0973	0.0448	Hareketli Taban	2270.3	2.855	1.89	0.0076
27	42.9	5.39	99.86	0.0973	0.0448	Hareketli Taban	2270.3	3.332	3.24	0.0130
28	44.0	5.78	106.98	0.1117	0.0450	Hareketli Taban	1891.9	2.293	2.35	0.0084
29	44.0	5.78	106.98	0.1117	0.0450	Hareketli Taban	1891.9	2.293	2.49	0.0089
30	44.0	5.78	106.98	0.1117	0.0450	Hareketli Taban	1891.9	2.293	0.92	0.0033
31	44.0	5.78	106.98	0.1117	0.0450	Hareketli Taban	1891.9	2.293	5.17	0.0185
32	44.0	5.78	106.98	0.1117	0.0450	Hareketli Taban	1891.9	2.293	2.29	0.0082
33	44.0	5.78	106.98	0.1117	0.0450	Hareketli Taban	1891.9	2.293	0.70	0.0025

Tablodan görüleceği üzere elde edilen Shields parametreleri tüm deneyler için kritik Shields parametrelerinden büyüktür ($\theta > \theta_{cr}$). Bu durumda tüm deneylerin hareketli taban oyulması koşullarında gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Burada Re_d dane Reynolds sayısını simgelemekte olup ν kinematik viskoziteyi göstermek üzere (5.8) eşitliği ile verilmektedir. Kritik Shields parametresi ise $Re_d \geq 1$ koşulu sağlandığında (5.9) eşitliği ile belirlenebilmektedir.

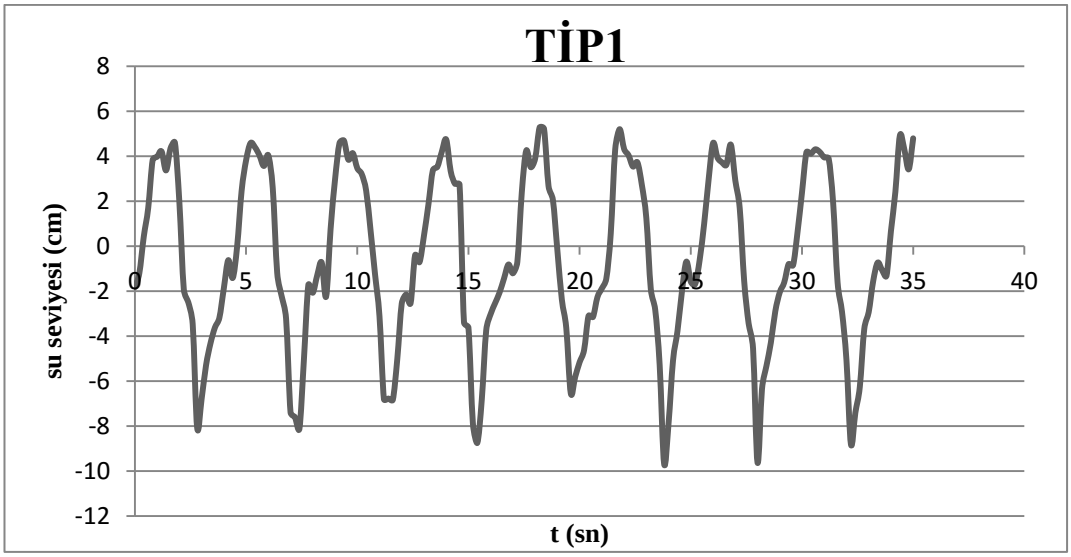
$$\mathrm{Re_d} = \frac{\mathrm{U_m\ d_{50}}}{\nu} \tag{5.8}$$

$$\theta_{cr} = 0.165(\mathrm{Re_d} + 0.6)^{-0.8} + 0.045e^{-40\mathrm{Re_d}^{-1.3}} \quad ; \quad \mathrm{Re_d} \geq 1 \tag{5.9}$$

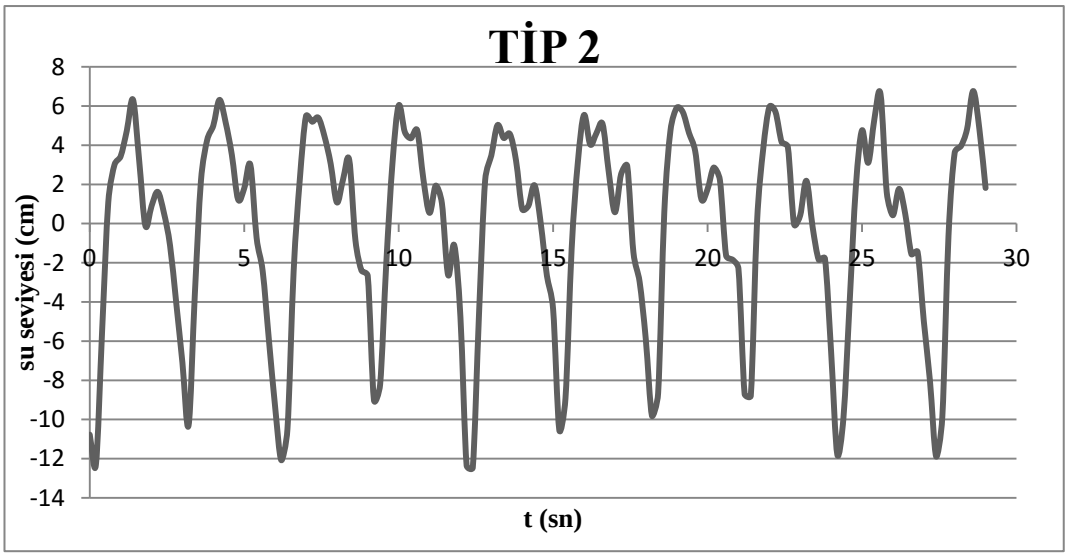
Tablo 5.3'te deneylerde kullanılan altı farklı tipteki dalgalar için karakteristik bilgiler verilmektedir. Şekil 5.1 ile 5.6 arasında bu altı farklı tipteki düzenli dalga durumu için örnek olarak verilen zamana bağlı su seviyesi dağılım grafikleri gösterilmektedir. Bu grafiklerin yardımıyla, Tablo 5.3'te verilen dalga karakteristikleri belirlenebilmektedir. Deneyler düzenli dalgalar için gerçekleştirilmiştir ancak, grafikler dalga kanalında yanısma olduğunu ve dalgaların düzenli formdan bazı durumlarda uzaklaştığını göstermektedir. Bunun temel sebeplerinde biri de dalga üretecindeki titreşimlerdir.

Tablo.5.3 Karakteristik bilgileri verilen dalga tipleri.

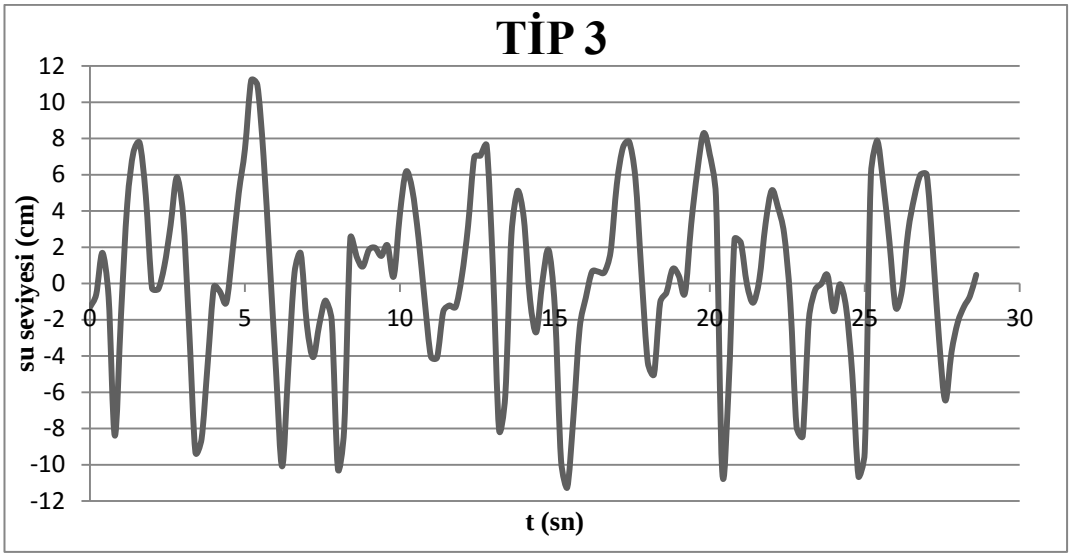
Dalga Tipi	***H* (cm)**	***T* (sn)**	***L* (cm)**
1	13	3.6	800
2	17	3.1	700
3	20	2.7	600
4	22	2.3	500
5	25	2.0	420
6	28	1.7	350



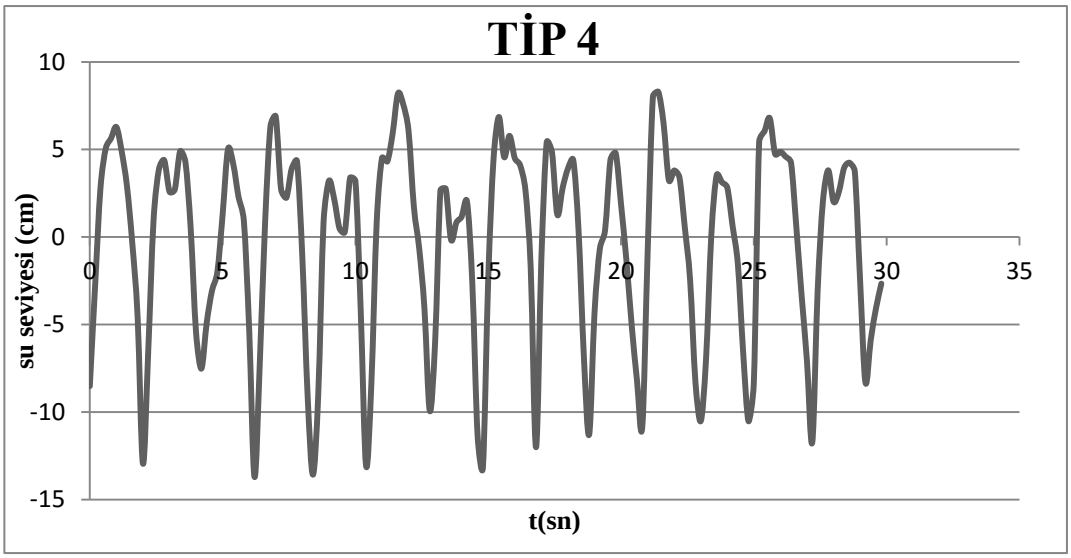
Şekil 5.1 Tip-1 dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği.



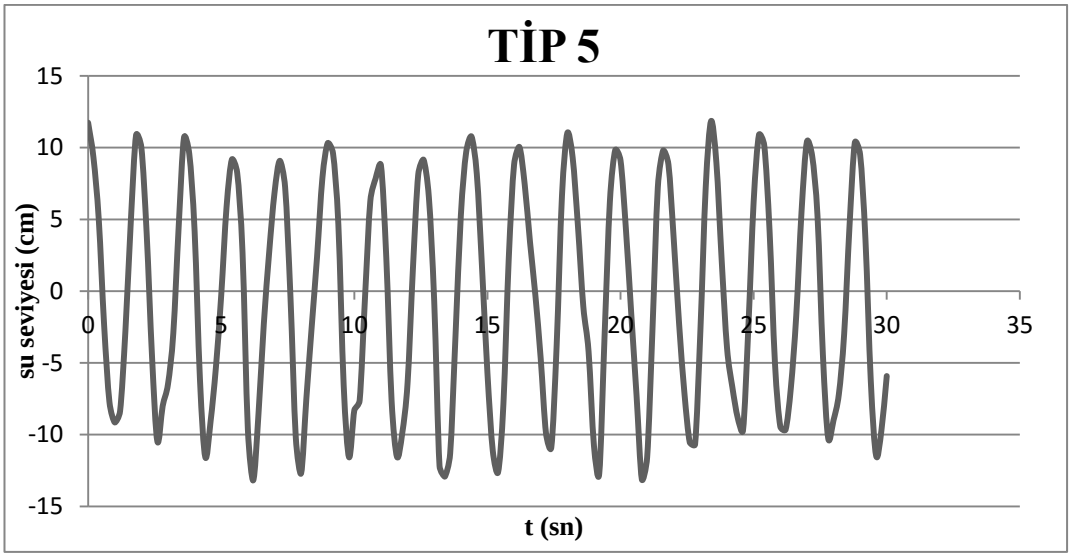
Şekil 5.2 Tip-2 dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği.



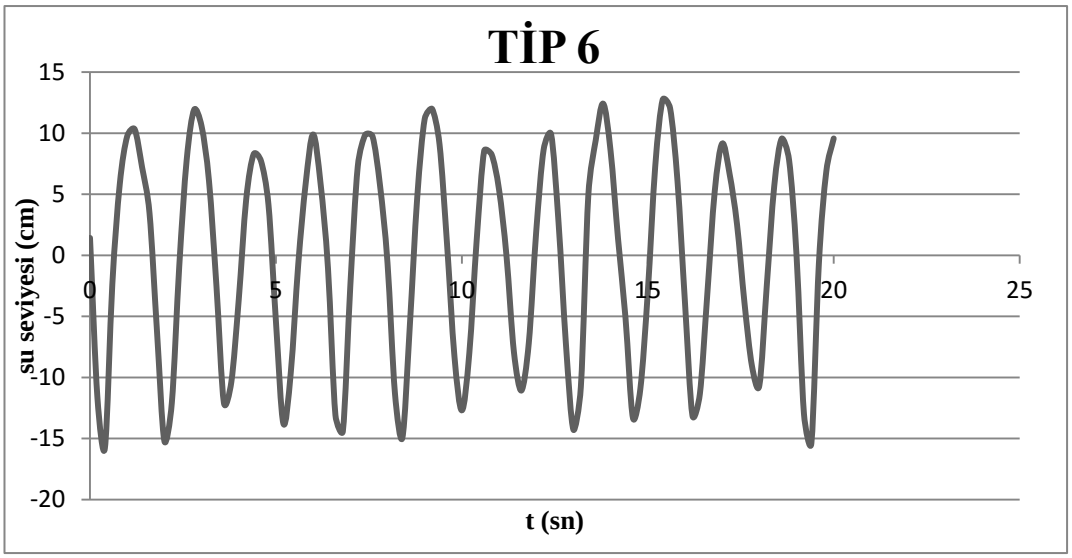
Şekil 5.3 Tip-3 dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği.



Şekil 5.4 Tip-4 dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği.

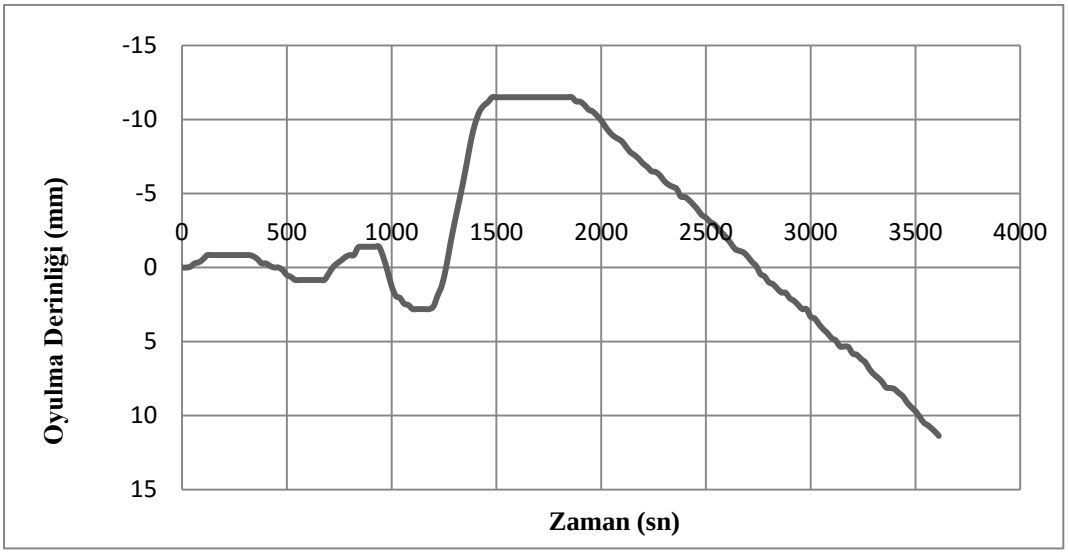


Şekil 5.5 Tip-5 dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği.

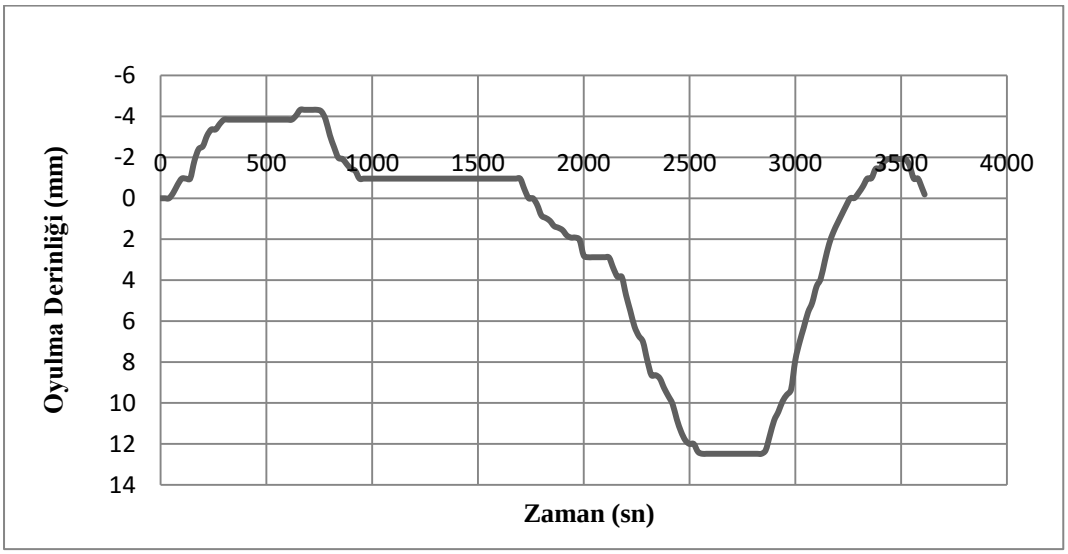


Şekil 5.6 Tip-6 dalga için zamana bağlı su seviyesi grafiği.

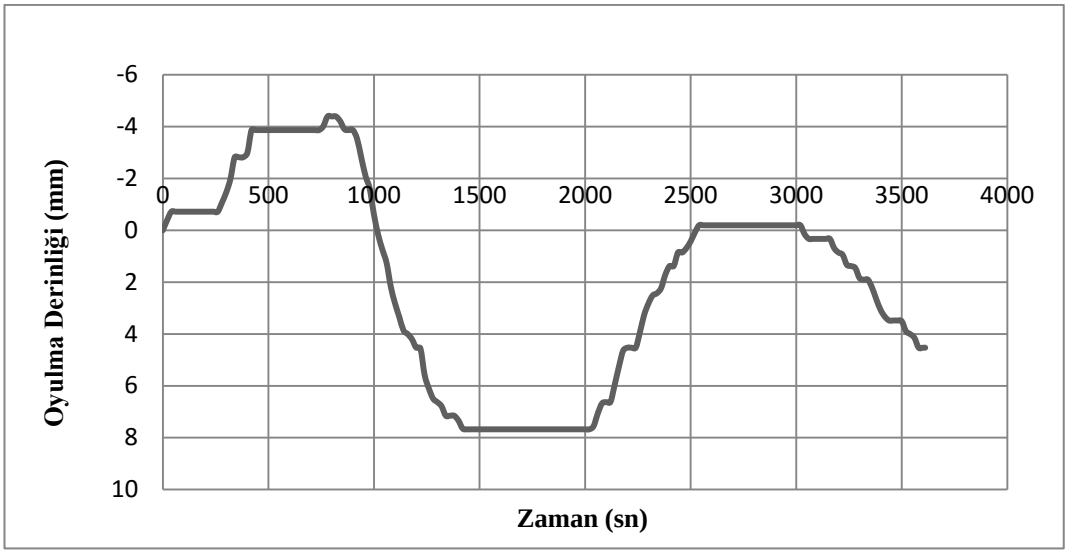
Deneylerde UVP algılayıcıları ile elde edilen zamana bağlı oyulma derinlikleri Şekil 5.7 ile Şekil 5.40 arasında gösterilmektedir. Zamana bağlı oyulma grafiklerinde oyulma derinliği mm zaman saniye olarak verilmektedir. Grafiklerde oyulma ve yığılma görülmektedir. Deneysel en yüksek oyulma derinliği değeri bu grafikler elde edilmiştir.



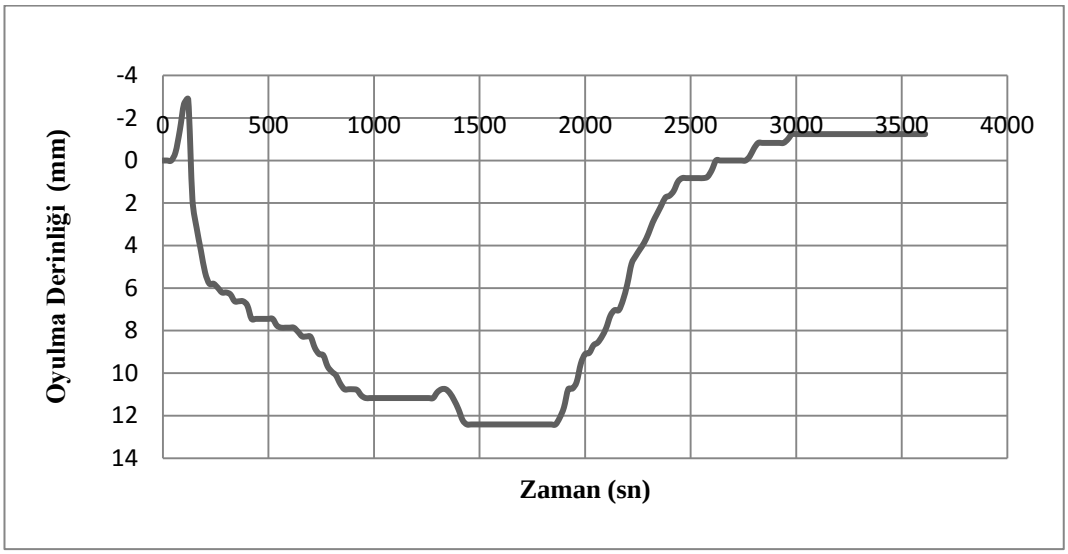
Şekil 5.7 Deney 1 için zamana bağlı oyulma grafiği.



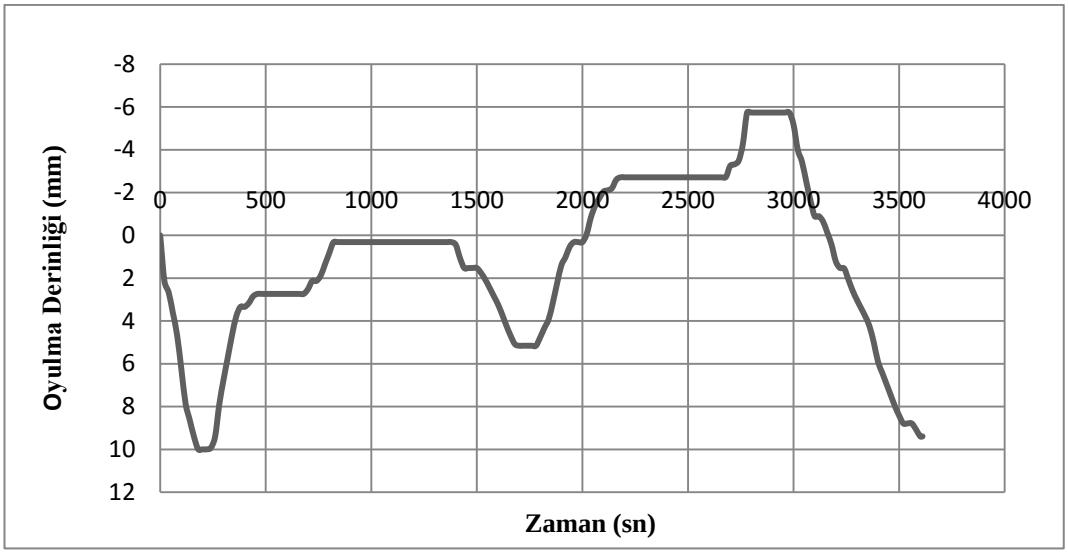
Şekil 5.8 Deney 2 için zamana bağlı oyulma grafiği.



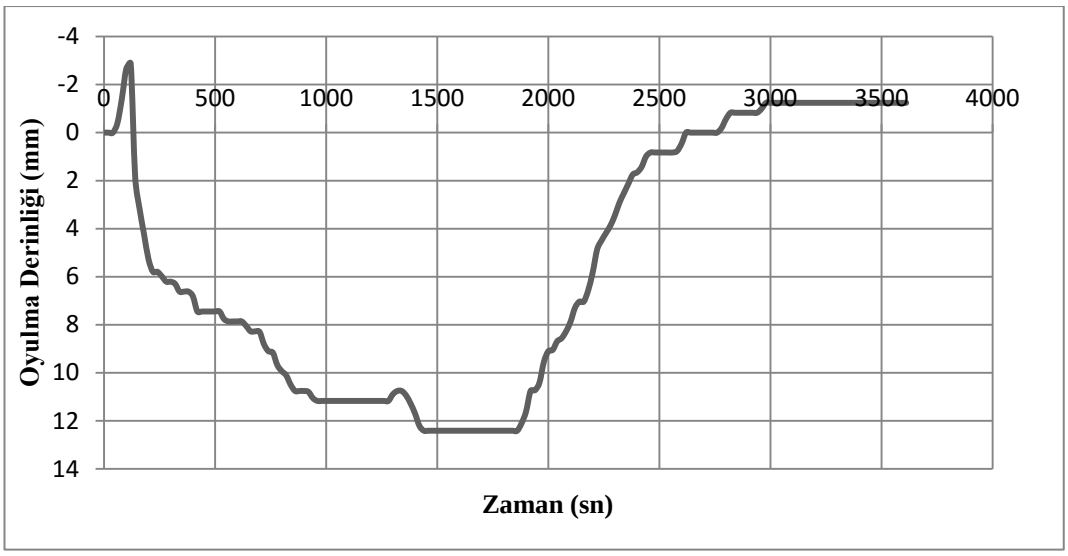
Şekil 5.9 Deney 3 için zamana bağlı oyulma grafiği.



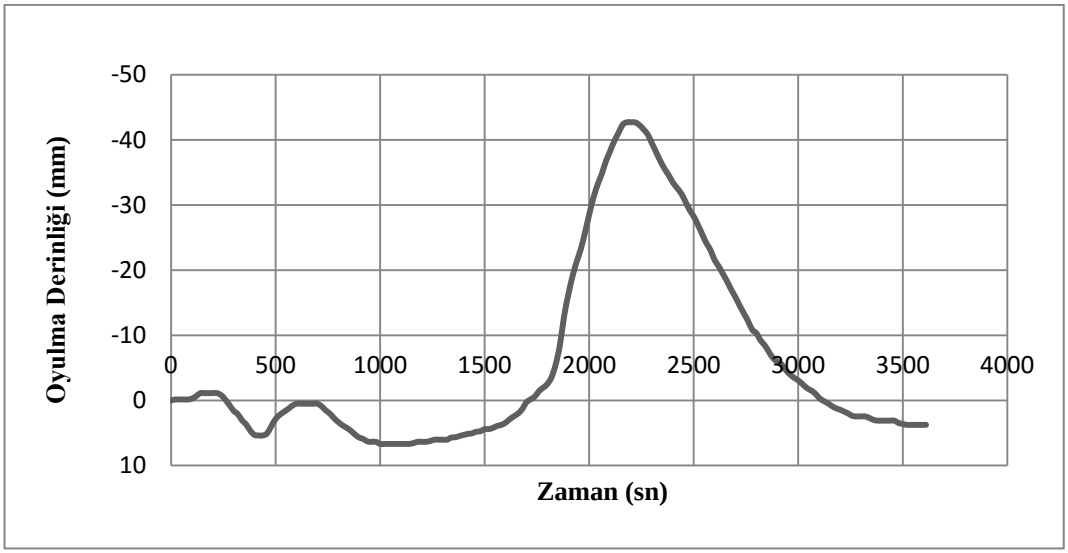
Şekil 5.10 Deney 4 için zamana bağlı oyulma grafiği.



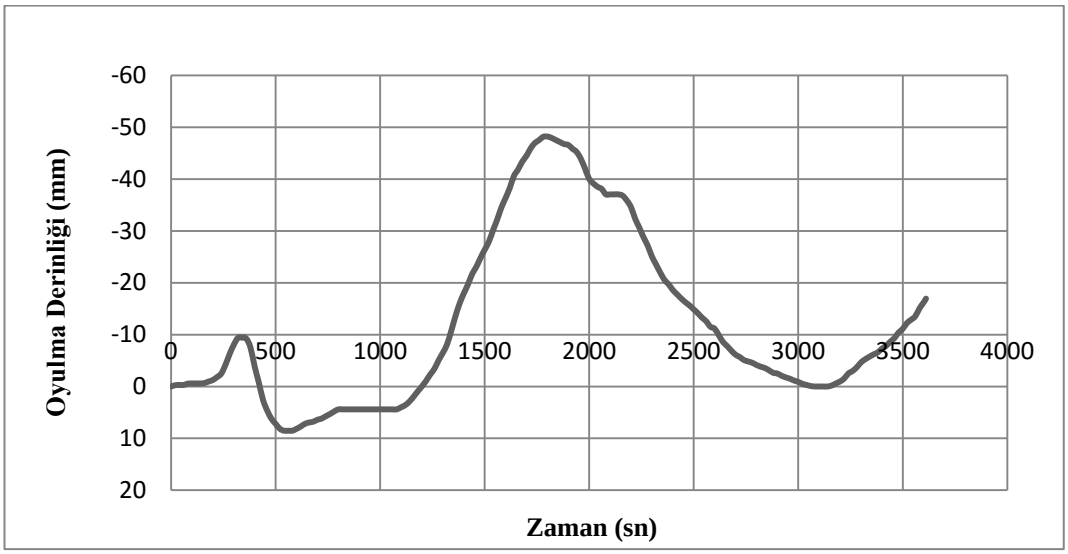
Şekil 5.11 Deney 5 için zamana bağlı oyulma grafiği.



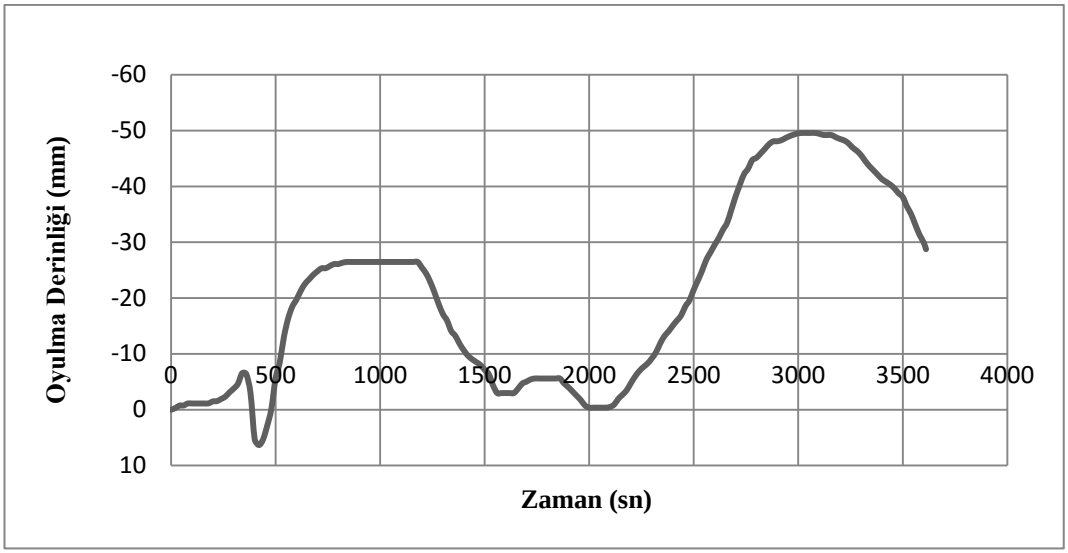
Şekil 5.12 Deney 6 için zamana bağlı oyulma grafiği.



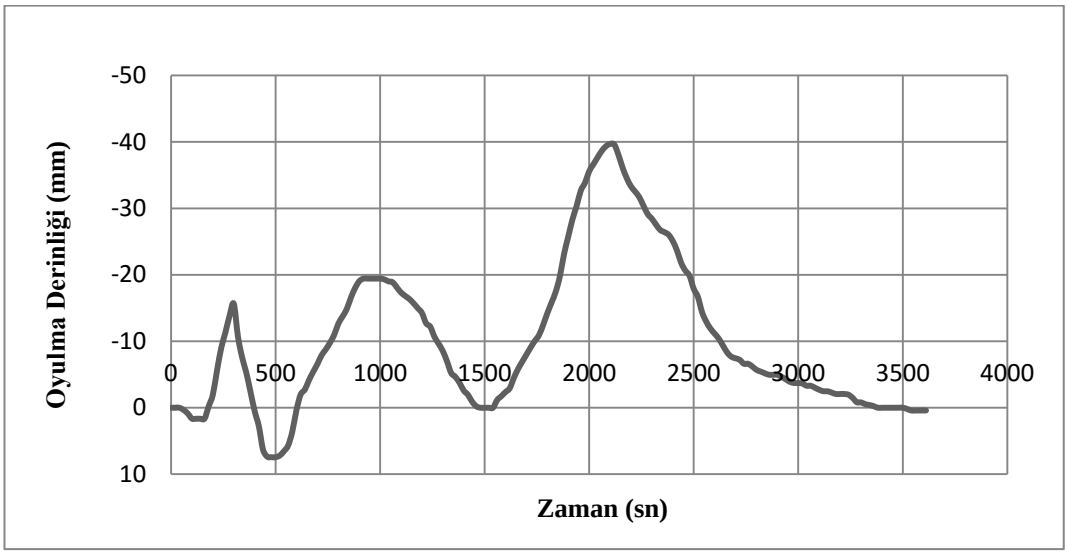
Şekil 5.13 Deney 7 için zamana bağlı oyulma grafiği.



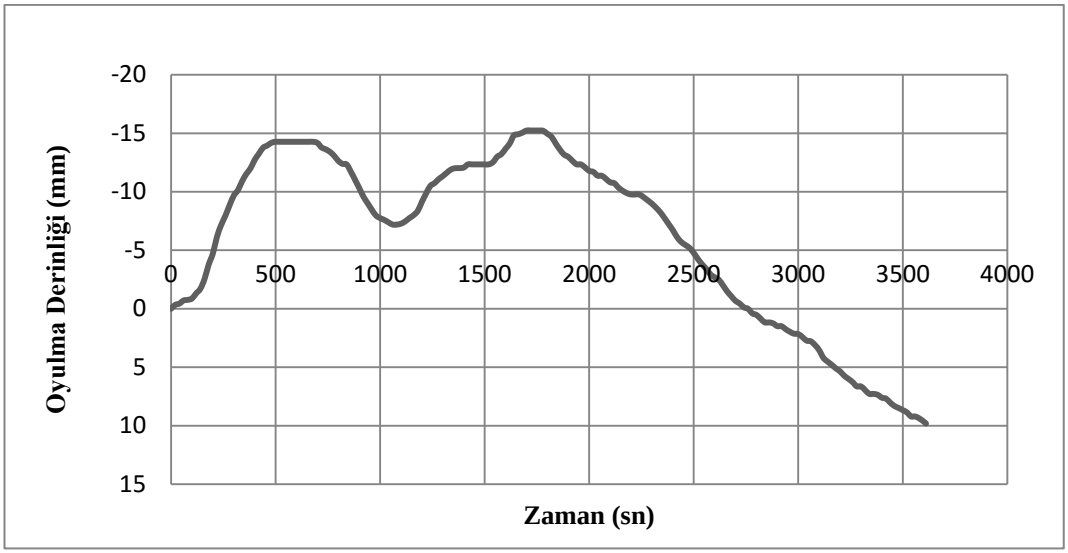
Şekil 5.14 Deney 8 için zamana bağlı oyulma grafiği.



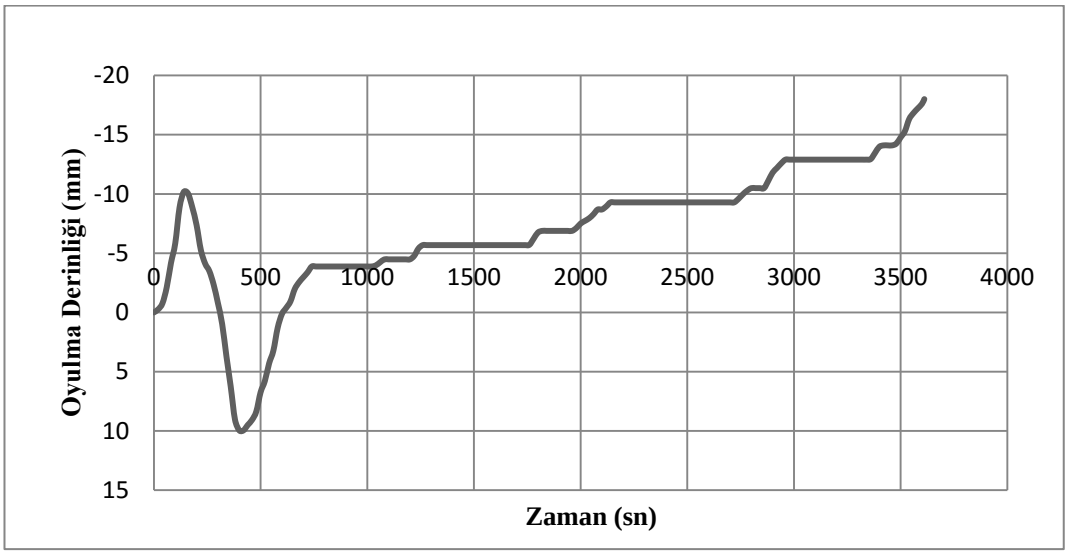
Şekil 5.15 Deney 9 için zamana bağlı oyulma grafiği.



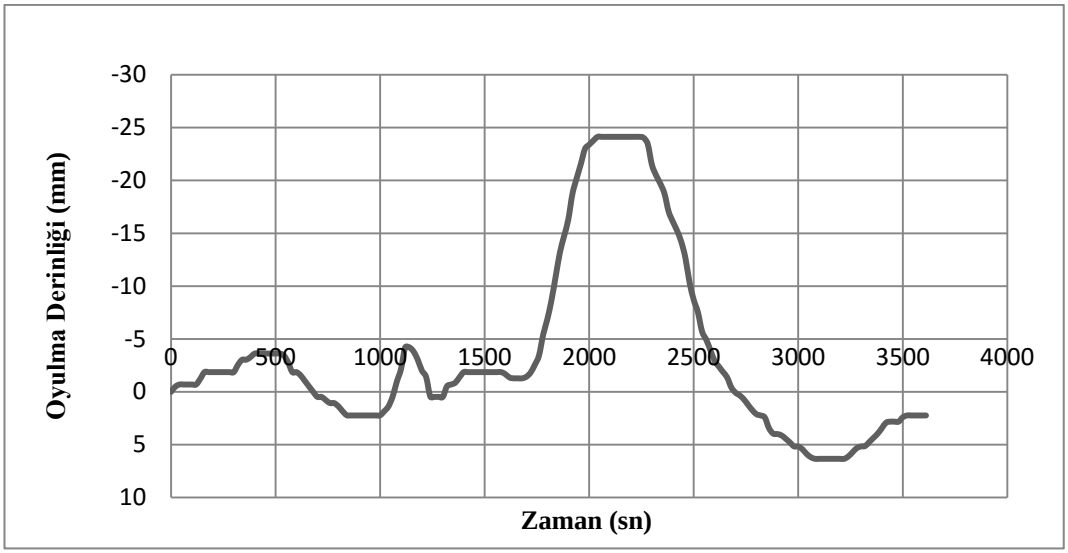
Şekil 5.16 Deney 10 için zamana bağlı oyulma grafiği.



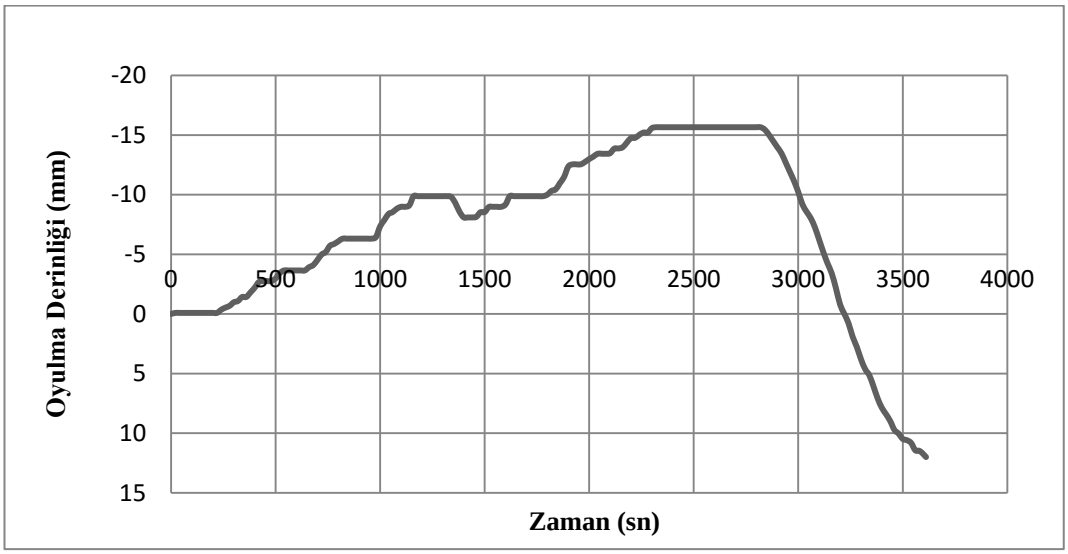
Şekil 5.17 Deney 11 için zamana bağlı oyulma grafiği.



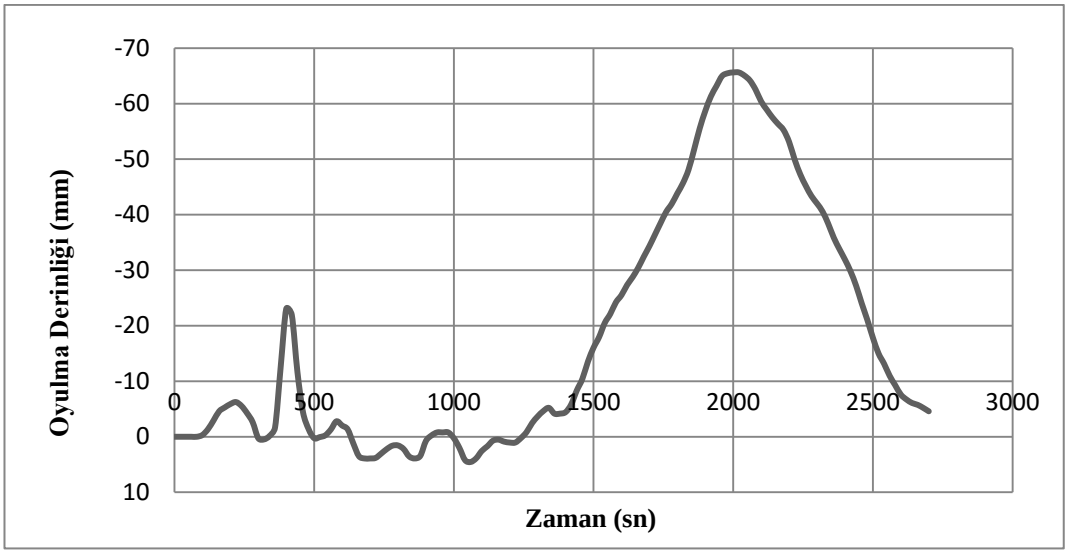
Şekil 5.18 Deney 12 için zamana bağlı oyulma grafiği.



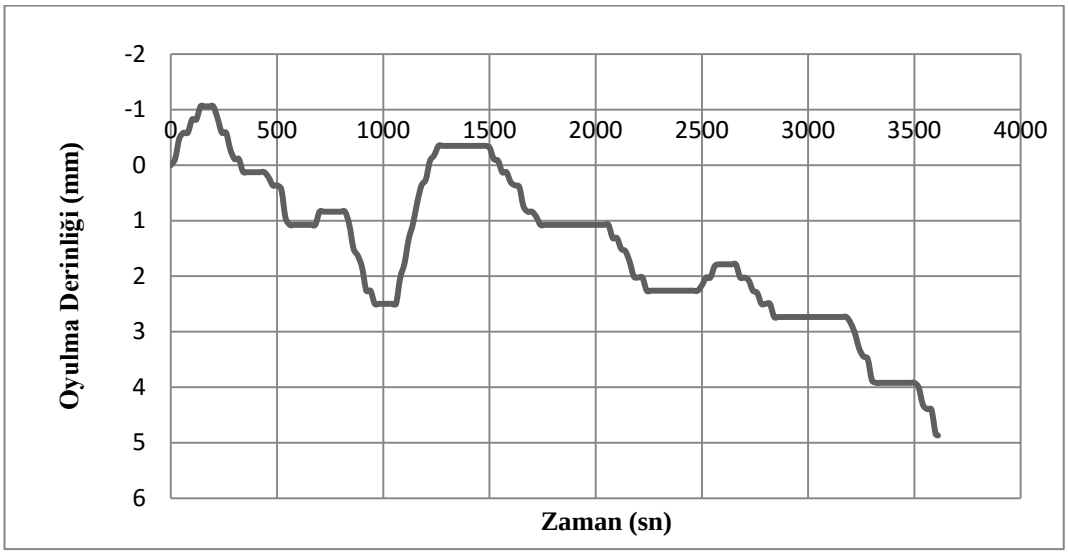
Şekil 5.20 Deney 13 için zamana bağlı oyulma grafiği.



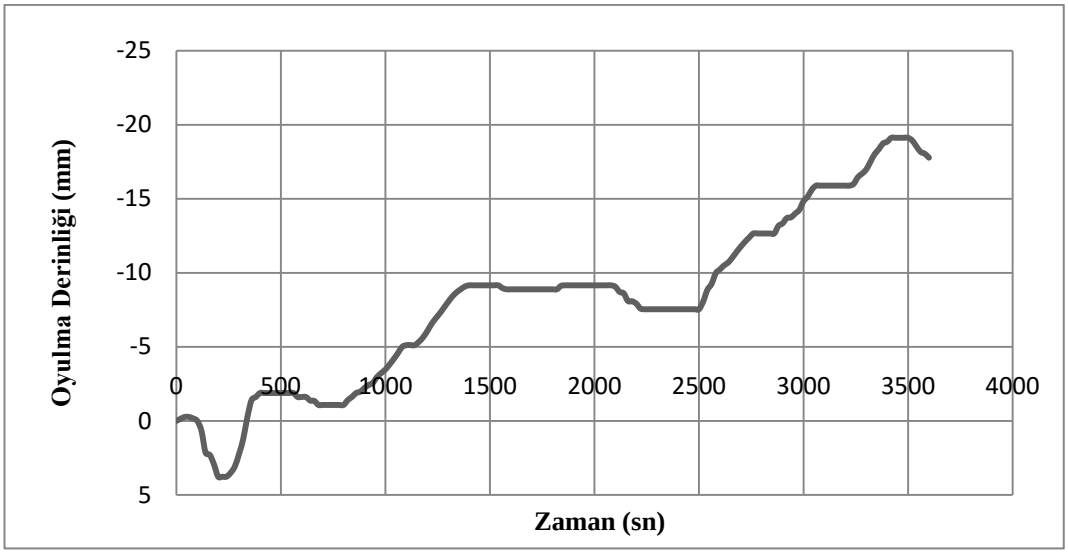
Şekil 5.21 Deney 14 için zamana bağlı oyulma grafiği.



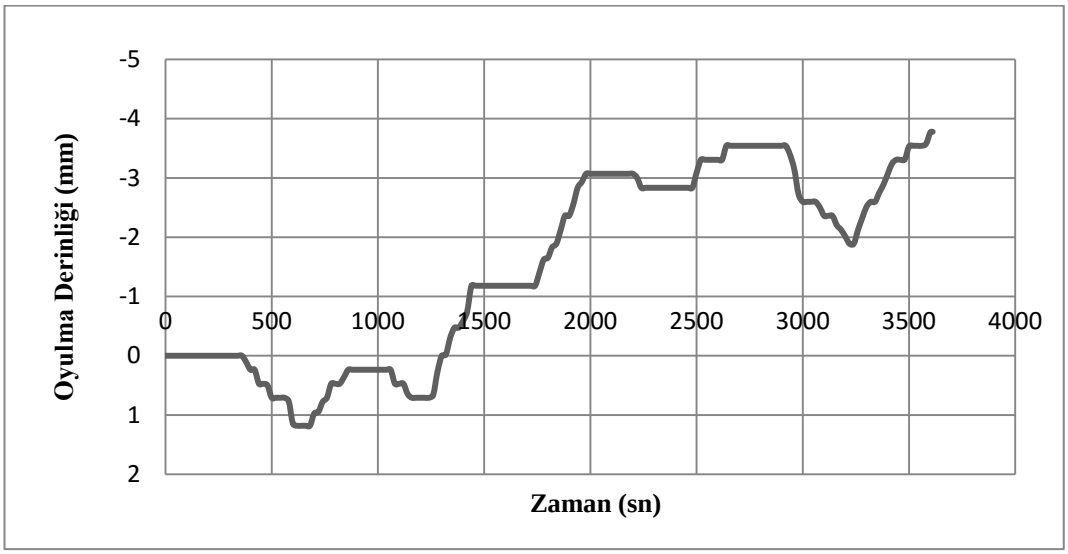
Şekil 5.22 Deney 15 için zamana bağlı oyulma grafiği.



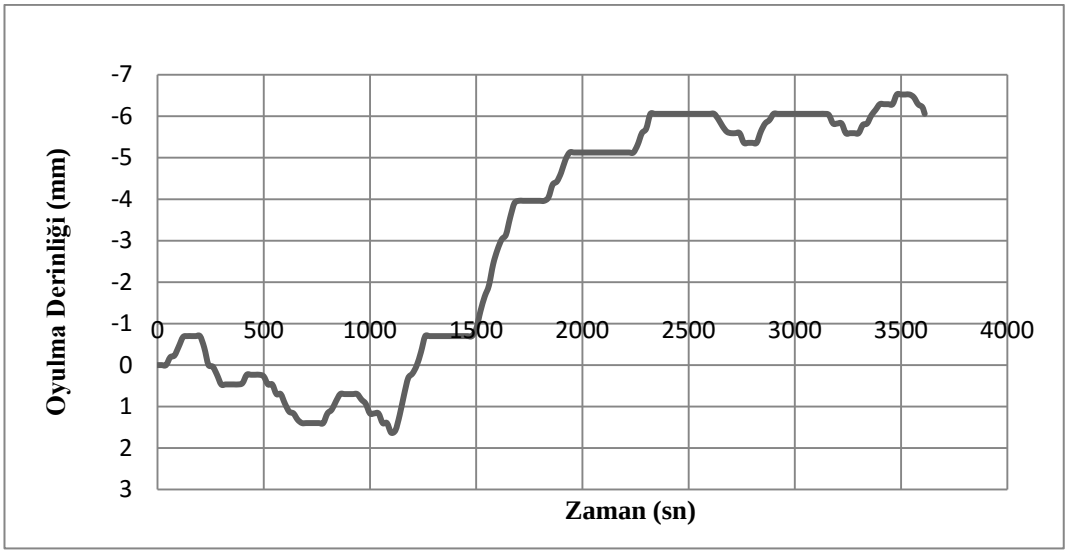
Şekil 5.23 Deney 16 için zamana bağlı oyulma grafiği.



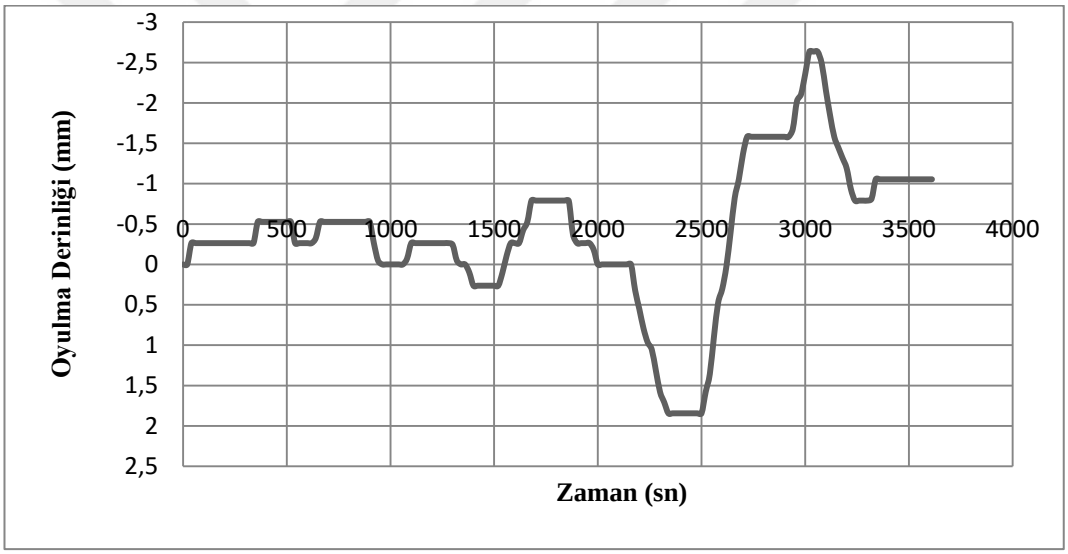
Şekil 5.24 Deney 17 için zamana bağlı oyulma grafiği.



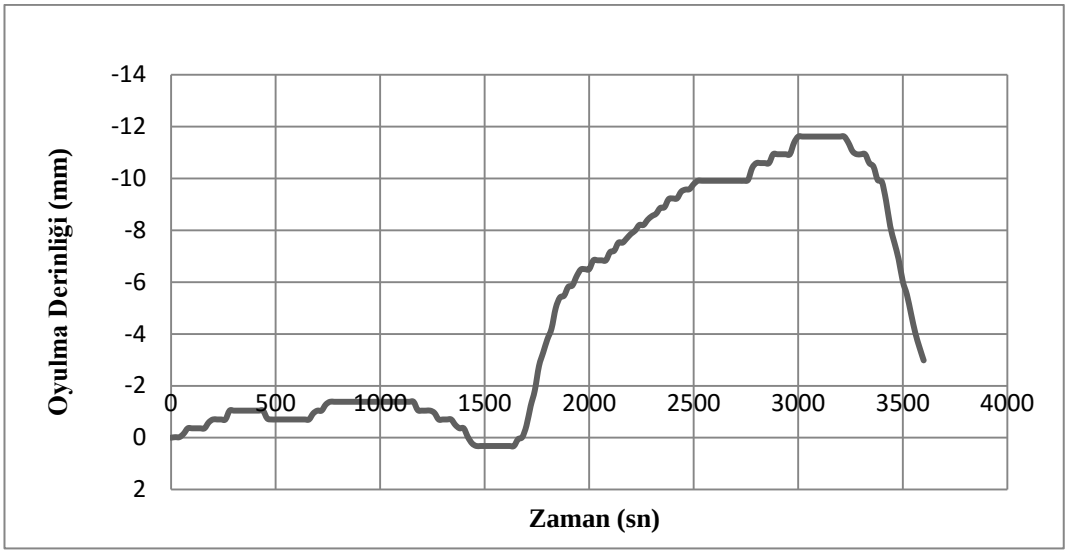
Şekil 5.25 Deney 18 için zamana bağlı oyulma grafiği.



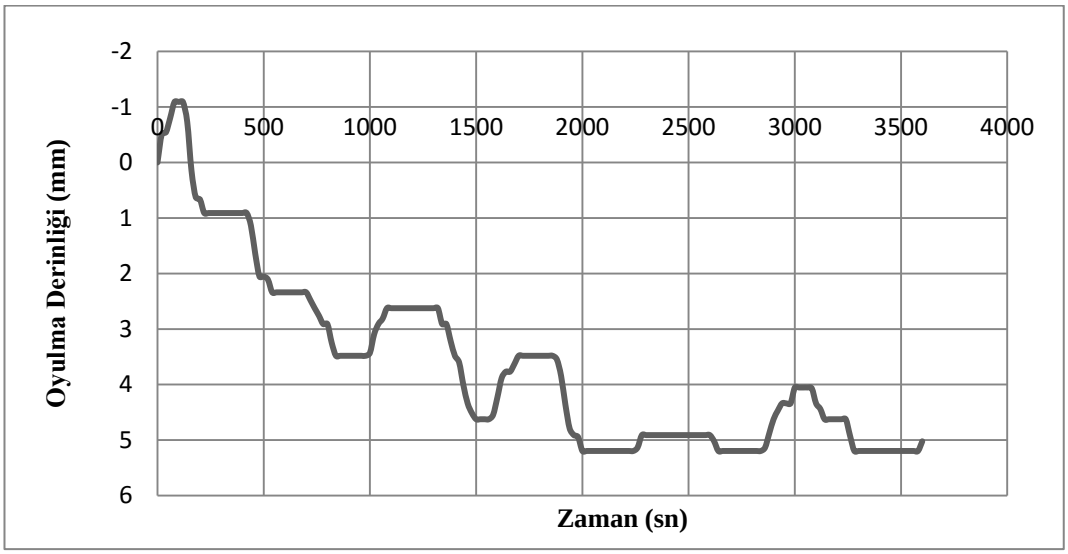
Şekil 5.26 Deney 19 için zamana bağlı oyulma grafiği.



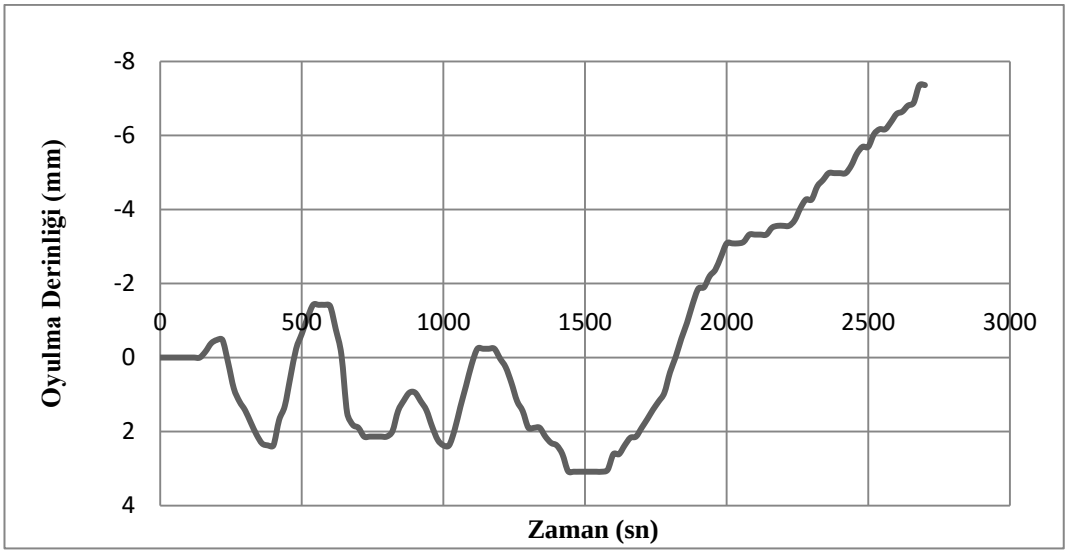
Şekil 5.27 Deney 20 için zamana bağlı oyulma grafiği.



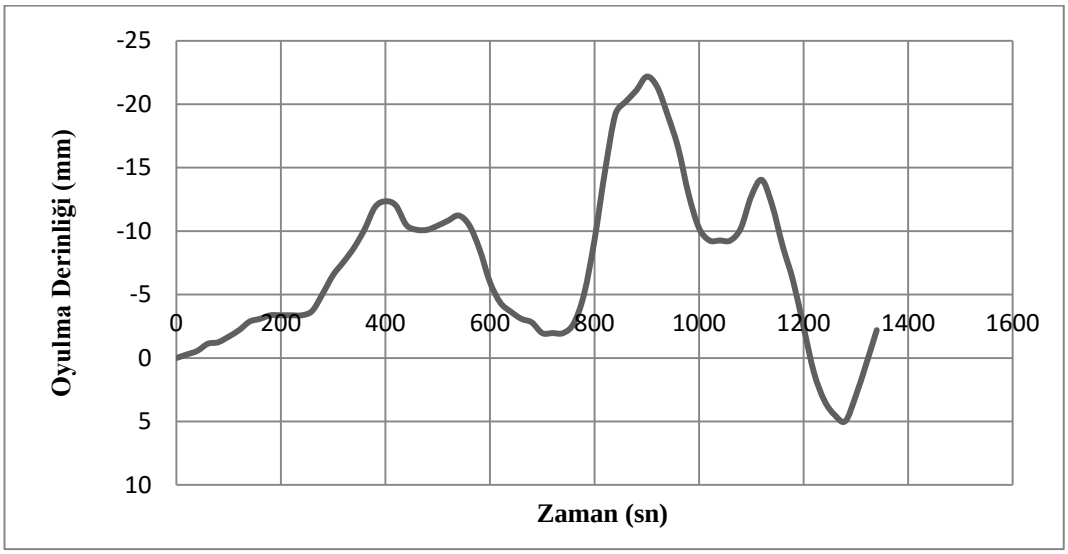
Şekil 5.28 Deney 21 için zamana bağlı oyulma grafiği.



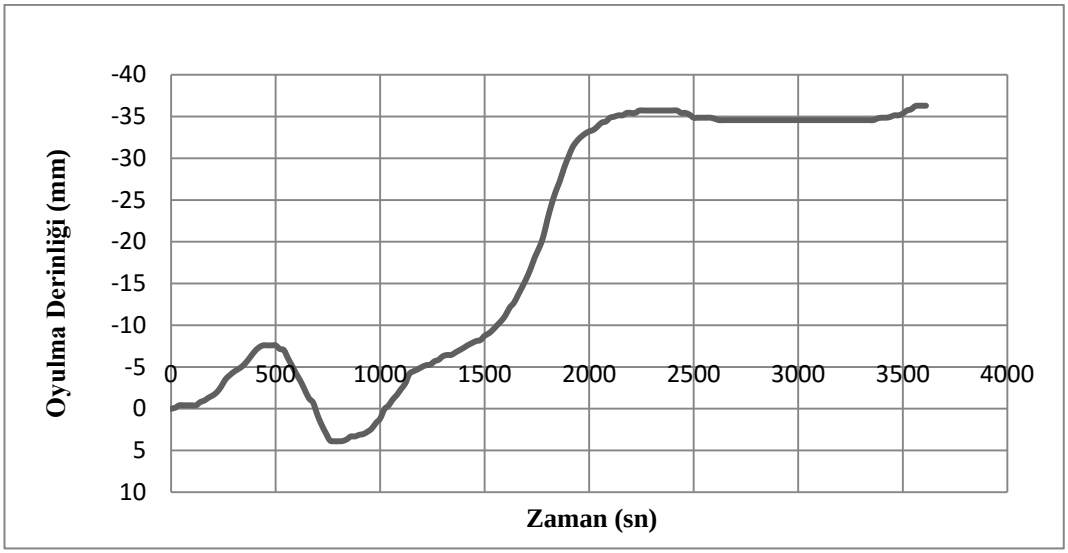
Şekil 5.29 Deney 22 için zamana bağlı oyulma grafiği.



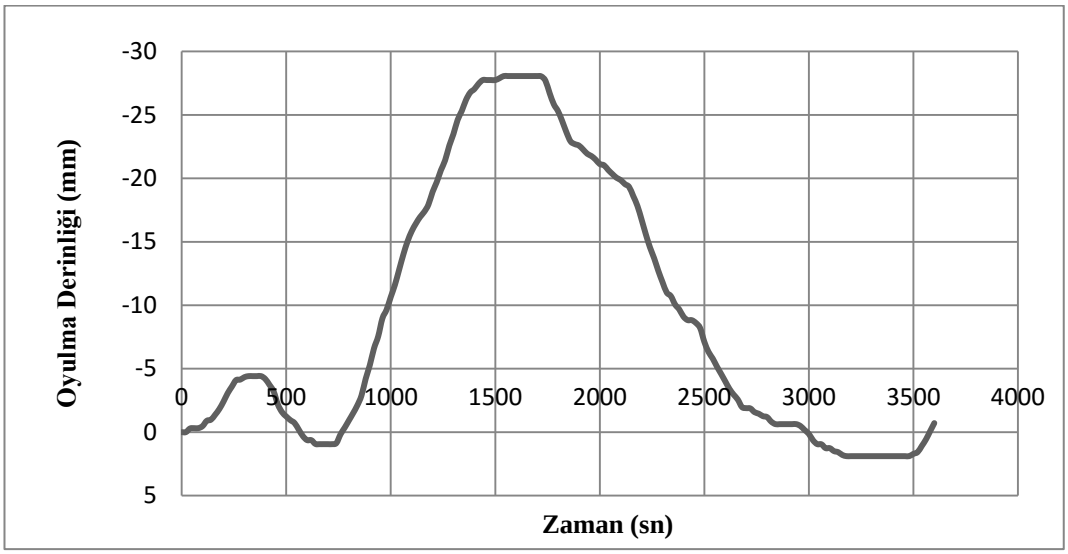
Şekil 5.30 Deney 23 için zamana bağlı oyulma grafiği.



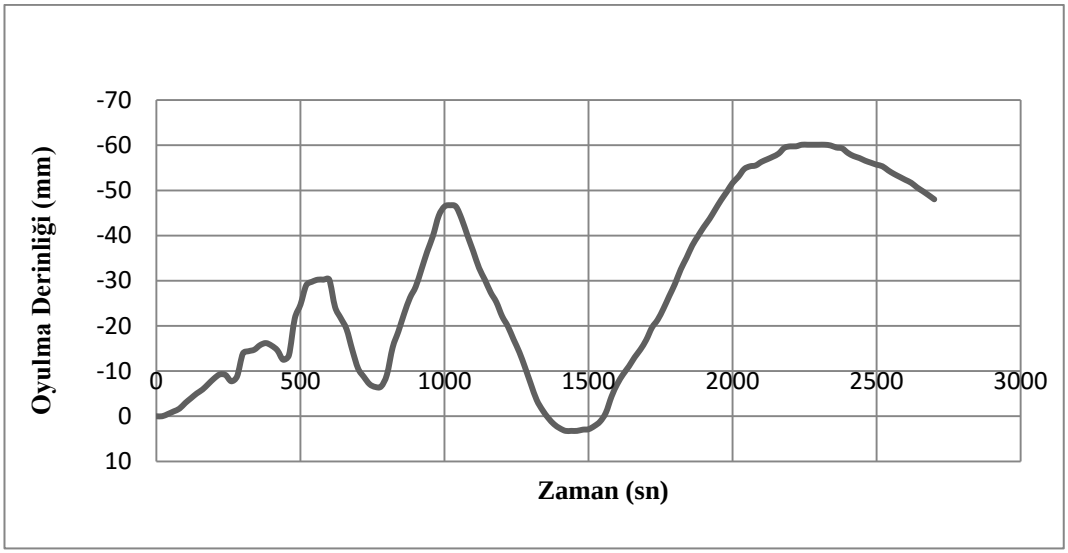
Şekil 5.31 Deney 24 için zamana bağlı oyulma grafiği.



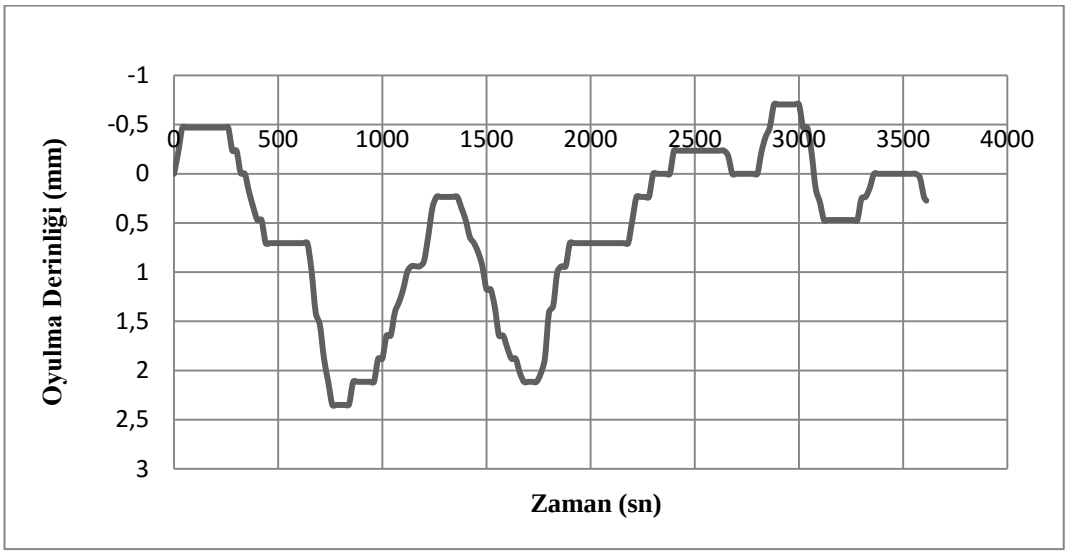
Şekil 5.32 Deney 25 için zamana bağlı oyulma grafiği.



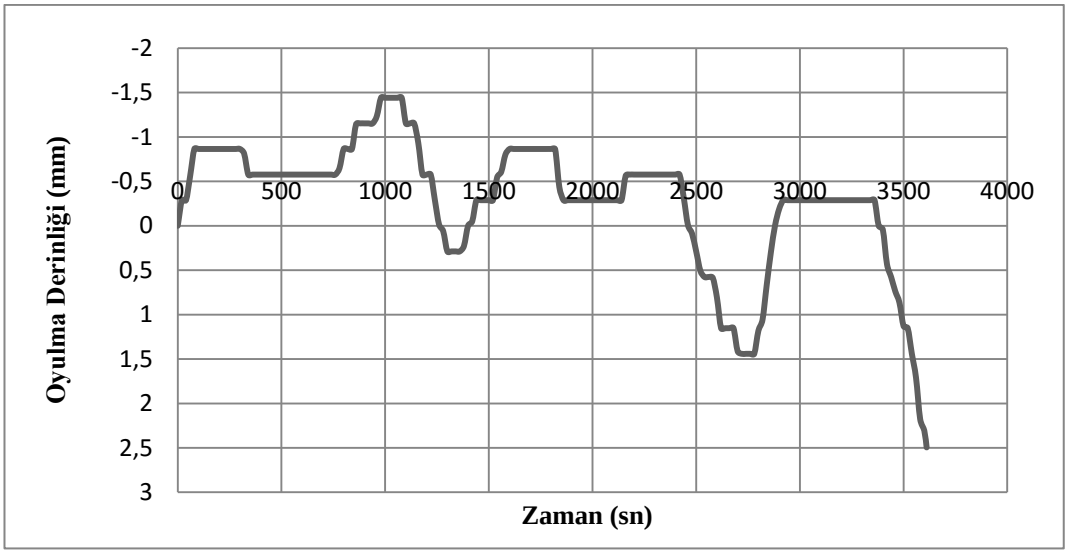
Şekil 5.33 Deney 26 için zamana bağlı oyulma grafiği.



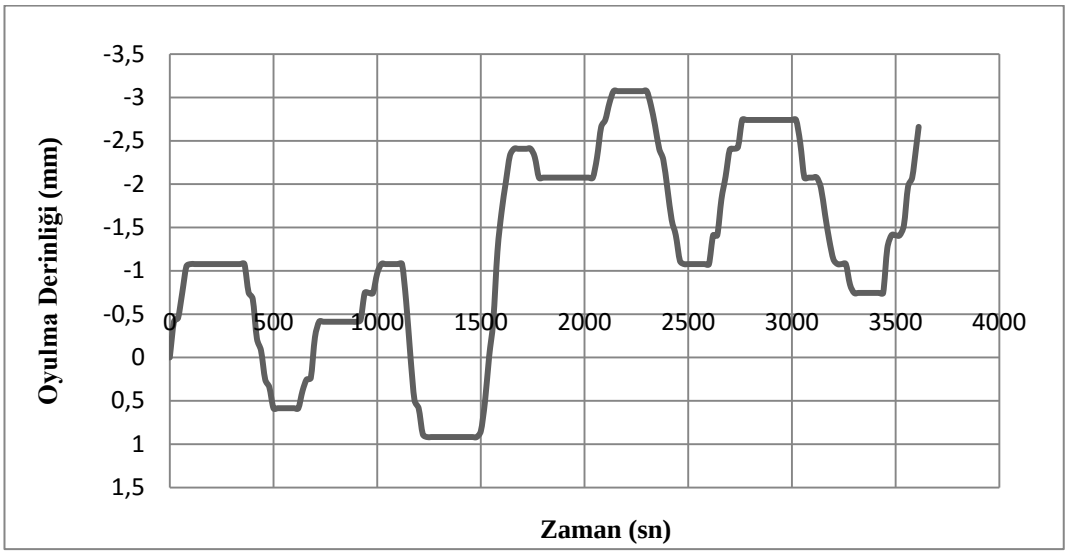
Şekil 5.34 Deney 27 için zamana bağlı oyulma grafiği.



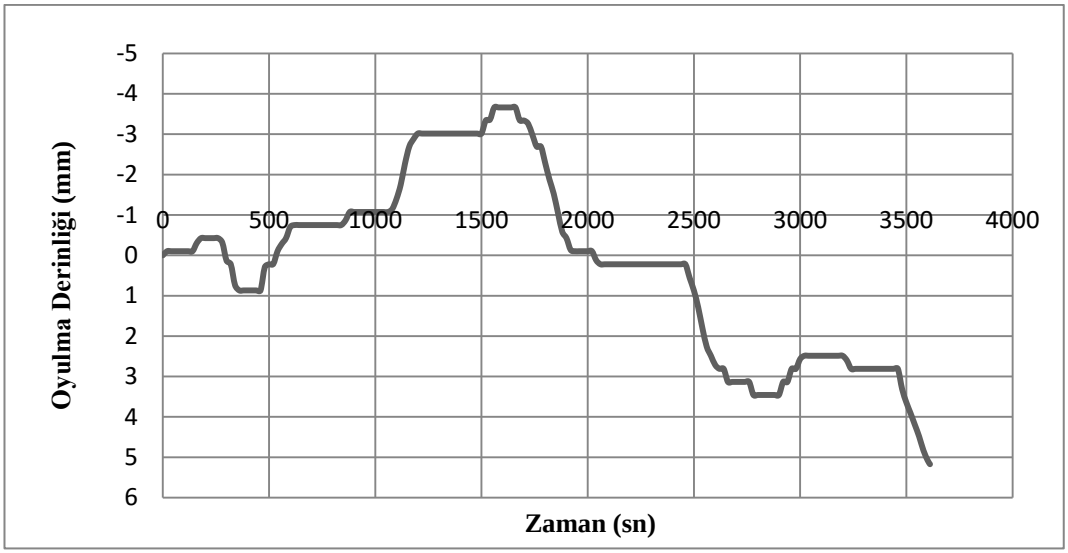
Şekil 5.35 Deney 28 için zamana bağlı oyulma grafiği.



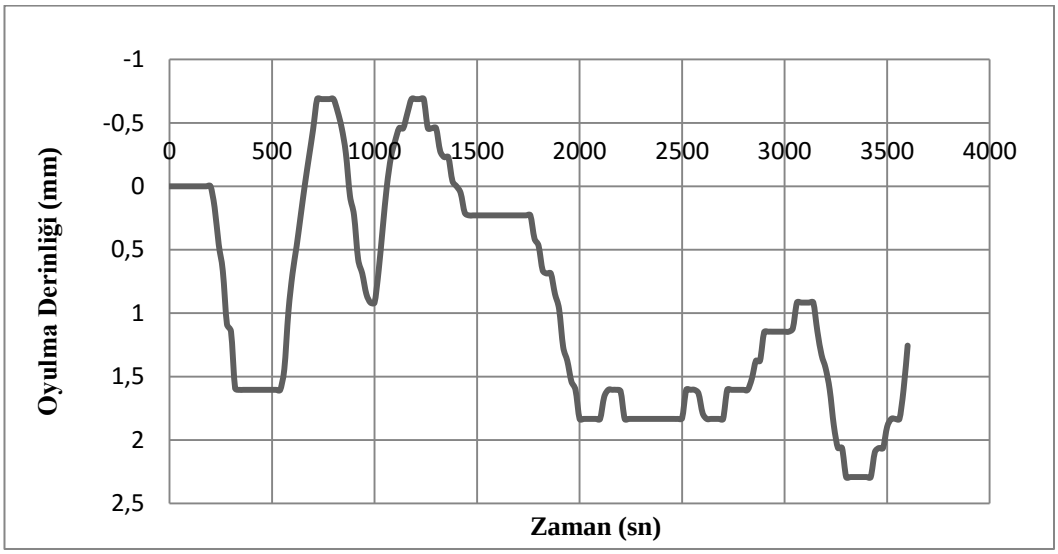
Şekil 5.36 Deney 29 için zamana bağlı oyulma grafiği.



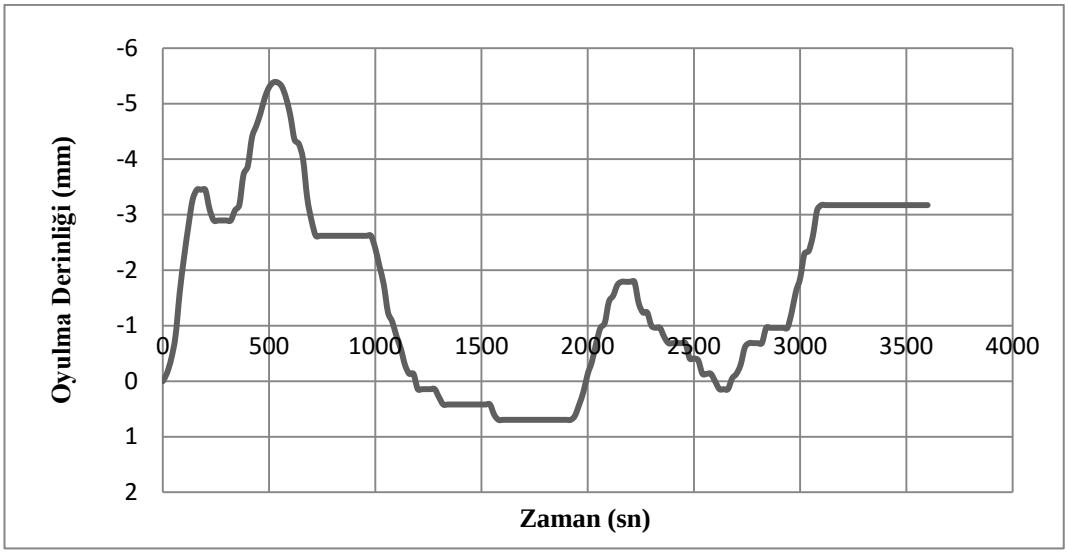
Şekil 5.37 Deney 30 için zamana bağlı oyulma grafiği.



Şekil 5.38 Deney 31 için zamana bağlı oyulma grafiği.



Şekil 5.39 Deney 32 için zamana bağlı oyulma grafiği.

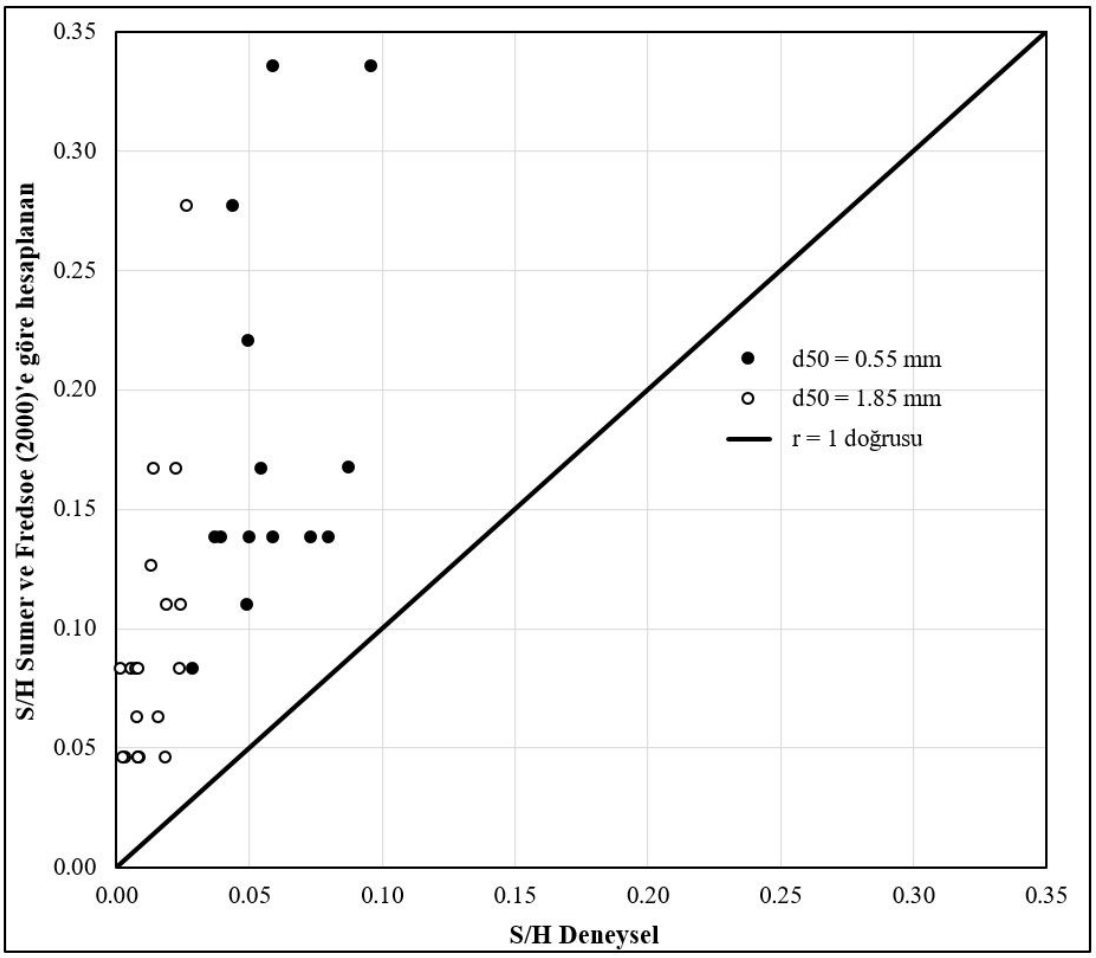


Şekil 5.40 Deney 33 için zamana bağlı oyulma grafiği.

Elde edilen zamana bağlı oyulma derinliklerinin değerlendirilmesi ve önceki çalışmalar ile kıyaslayabilmesi adına Sumer ve Fredsoe (2000) çalışması sonuçları ile karşılaştırma yoluna gidilmiştir. Karşılaştırma için Sumer ve Fredsoe çalışmasının seçilmesinin temel nedeni, şevli yüzlü dalgakıran gövdesinde oyulmanın incelendiği ve ince taban malzemesi ile gerçkeleştirilen bir çalışma olmasıdır. Böyle, tez kapsamında daha iri taban malzemeleri ile elde edilen sonuçlar hem karşılaştıırlabilmiş hem de Sumer ve Fredsoe (2000) çalışması sonuçları ile bir arada değerlendirilebilmiştir. Bu amaçla dalga yüksekliğine oranlanarak boyutsuzlaştırılan en yüksek oyulma derinlikleri ve (5.10) eşitliği ile verilen Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında önerilen bağıntı ile hesaplanan S_{max}/H değerleri Şekil 5.41'de birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. (5.10) bağıntısında yer alan f(α) değerleri (5.11) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$\frac{S}{H} = \frac{f(\alpha)}{\sinh(\frac{2\pi h}{L})^{1.35}} \tag{5.10}$$

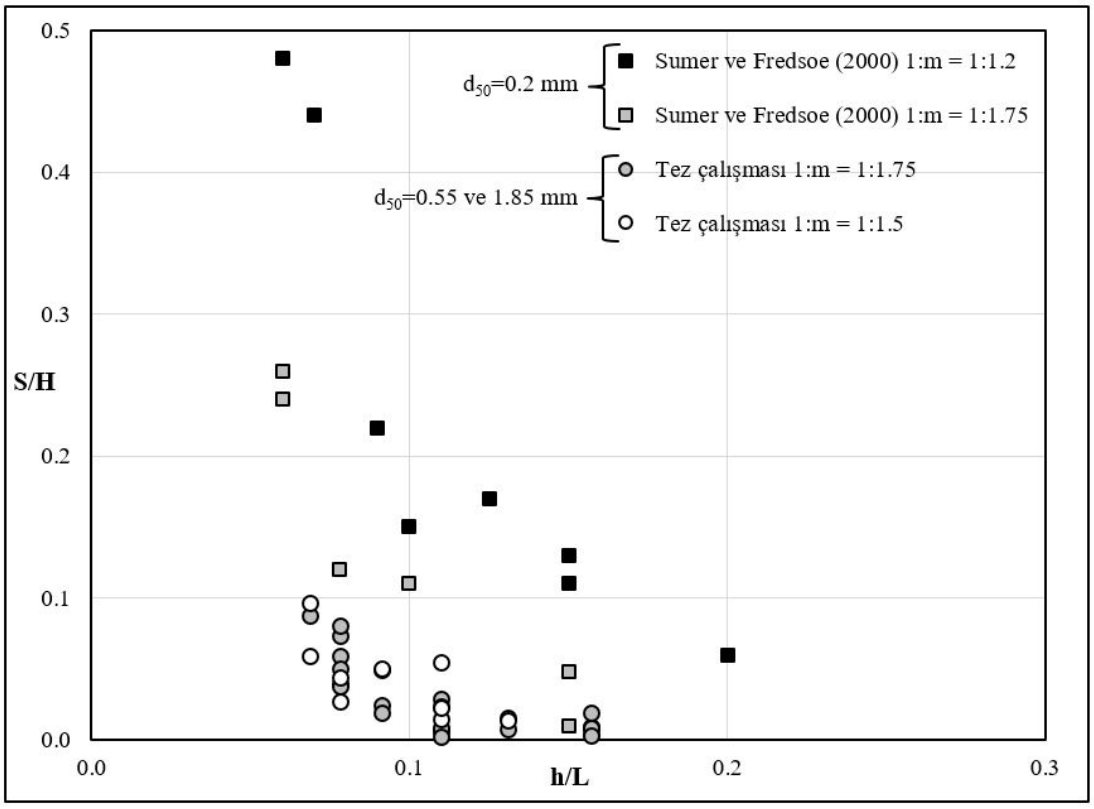
$$f(\alpha) = 0.3 - 1.77\ e^{-\alpha/15} \tag{5.11}$$



Şekil 5.40 Deneysel S/H değerleri ile Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında önerilen bağıntıya göre hesaplanan S/H değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.40'ta verilen saçılma diyagramı incelendiğinde, deneysel olarak elde edilen S/H ile bu deneysel koşullar ile Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında önerilen ve (5.10) eşitliği ile verilen bağıntıya göre hesaplanan S/H değerlerinin uyumlu olmadığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında kullanılan taban malzemesi dane çapının, bu tez kapsamında kullanılan dane çaplarından oldukça küçük olmasıdır. Beklendiği üzere, daha küçük taban malzemesi ile gerçekleştirilen Sumer ve Fredsoe (2000) çalışması ile önerilen bağıntı sonucu hesaplanan *S/H* verileri, tez çalışması kapsamında ölçülen değerler ile hesaplanan *S/H* verilerinden oldukça büyük çıkmaktadır.

Bu durumda öncelikle, Sumer ve Fredsoe (2000) çalışması deneysel *S/H* değerleri ile bu tez kapsamındaki deneysel *S/H* değerleri, göreceli derinlik (*h/L*) değerlerine göre bir arada çizdirilmiştir. Burada amaç, farklı deneysel koşullar altında *S/H* ile *h/L* değişim gruplarının belirlenebilmesidir. Şekil 5.41'de göreceli oyulma derinliklerinin göreceli derinliğe bağlı değişim grafiği verilmektedir.



Şekil 5.41 Göreceli oyulma derinliğinin göreceli derinliğe bağlı değişimi (Sumer ve Fredsoe (2000) verileri ile tez çalışmasındaki veriler bir arada kullanılmıştır).

Şekil 5.41 incelendiğinde Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasındaki 1/1.2 şev eğimli deneylerin bir grup, Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasındaki 1/1.75 eğimli deneylerin bir grup ve tez çalışması kapsamındaki tüm deneylerin bir grup olarak dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu durumda, göreceli oyulma derinliği *S/H* üzerinde hem dalgakıran şev eğiminin hem de taban malzemesi dane çapının etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Göreceli oyulma derinliği üzerinde, dalgakıran şev eğimi ile birlikte taban malzemesi iriliğinin de etkili olduğu görüldükten sonra, tez çalışmasında elde edilen

deneysel *S/H* değerleri ile Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında elde edilen deneysel *S/H* değerleri bir arada kullanılarak yeni bir ampirik ifadenin belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu amaçla, fiziksel olayda etkin taban malzemesi iriliğini matematiksel olarak regresyon bağıntısında temsil etmesi için L/d_{50} parametresi ve fiziksel olayda etkin dalgakıran şev eğimini matematiksel olarak regresyon bağıntısında temsil etmesi için Iribarren (Ir) sayısı (sörf benzerlik parametresi) seçilmiştir. Her iki parametrede, ilgili bölümde anlatıldığı gibi incelenen fiziksel olayda etkin boyutsuz büyüklükler arasında yer almaktadır. Yukarıda bahsedilen bu iki parametreye alternatif olarak Shields parametresi (θ) ve Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında tanımlanan $f(\alpha)$ boyutsuz parametresi çifti de denenmiş ancak, $L/d_{50} - Ir$ çiftinden daha iyi istatistiksel sonuç alınmıştır. Ayrıca, Shields parametresi en yüksek göreceli oyulma derinliğinden ziyade oyulmanın başlaması ve gelişimi açısından kritik bir öneme sahiptir.

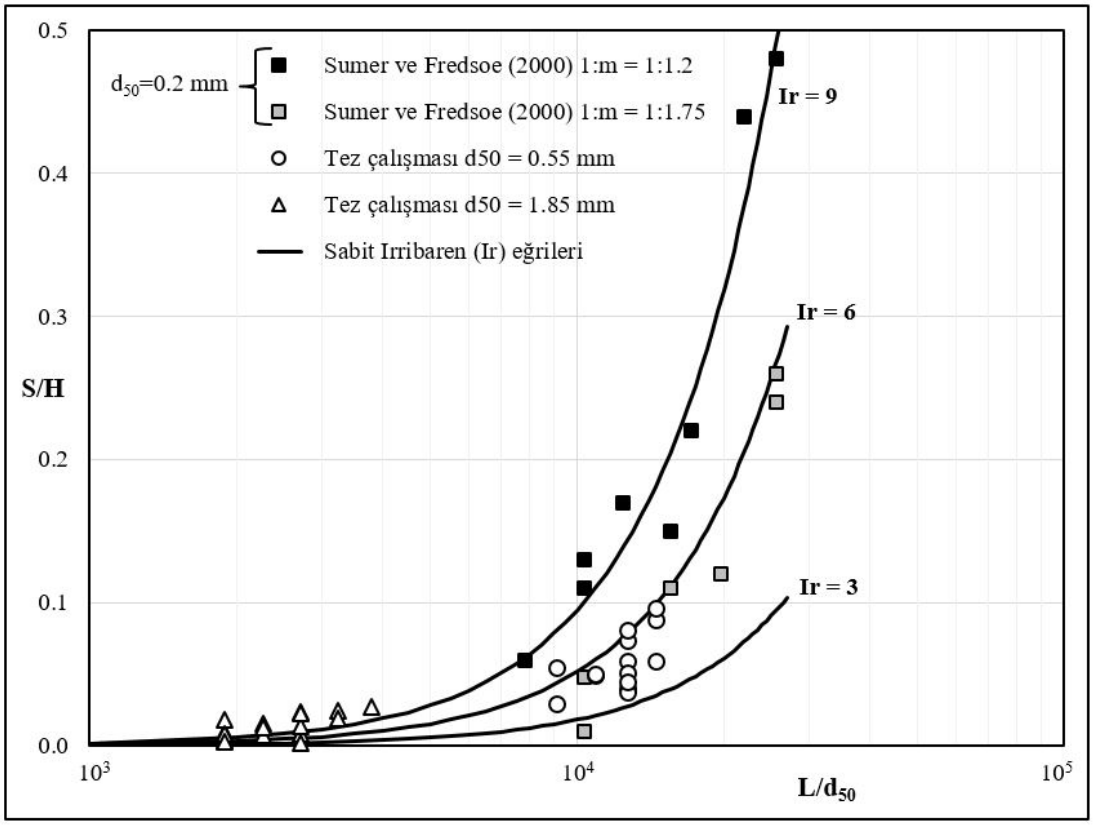
Göreceli en yüksek oyulma derinliği için araştırılan regresyon bağıntısı (5.12) eşitliği ile verilen çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon ifadesi biçimindedir.

$$\frac{S}{H} = a \left(\frac{L}{d_{50}}\right)^{b} (Ir)^{c} \tag{5.12}$$

SPSS Statistics programı kullanılarak yapılan çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizi sonucu, (5.12) eşitliği ile verilen regresyon denklemindeki katsayılar en küçük kareler yöntemi kullanılarak (5.13) eşitliği ile verildiği şekli ile belirlenmiştir.

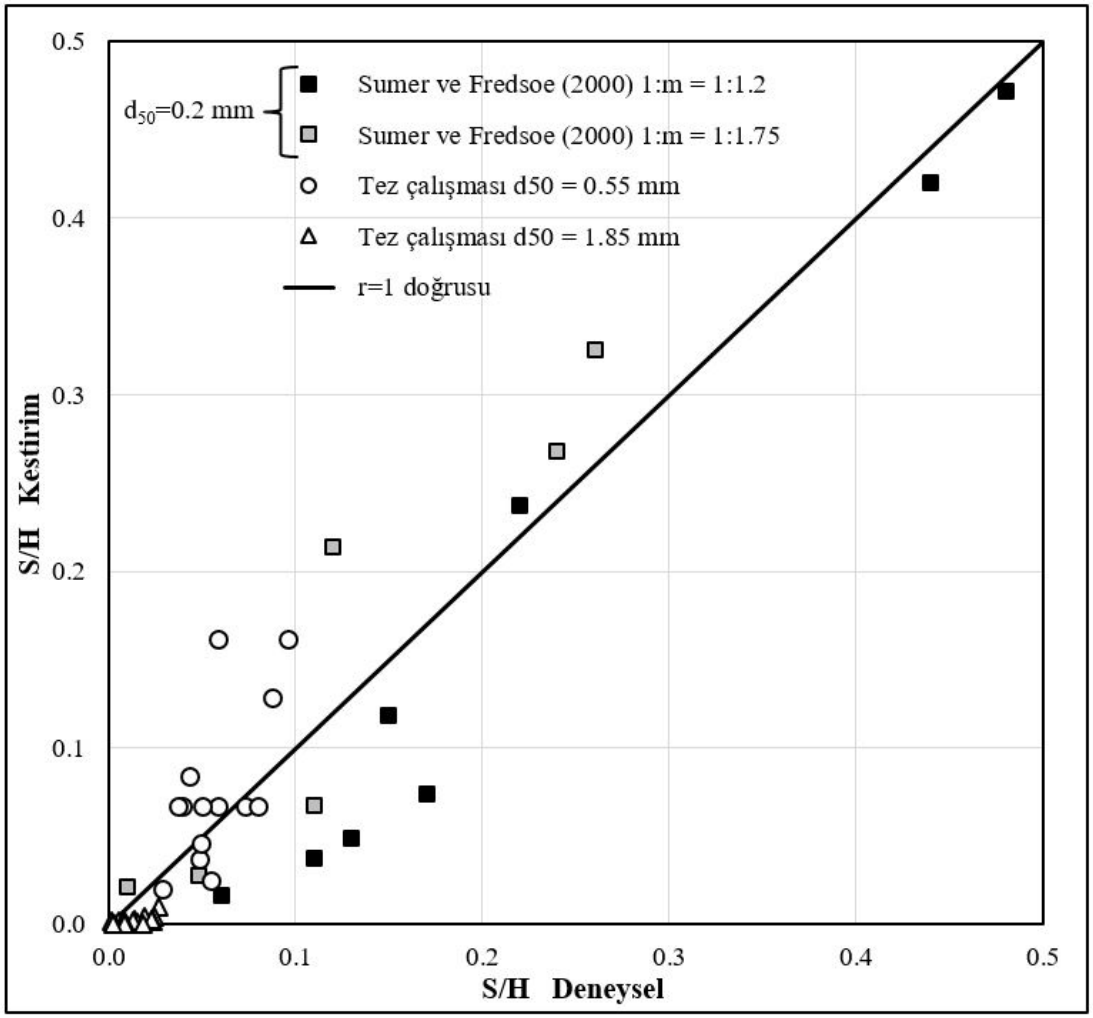
$$\frac{S}{H} = 3.5 \cdot 10^{-10} \left(\frac{L}{d_{50}}\right)^{7/4} (Ir)^{3/2} \tag{5.13}$$

Şekil 5.43'te L/d_{50} değerlerine göre noktalanmış *S/H* değerleri ile birlikte (5.13) eşitliği ile verilen regresyon denklemine göre sabit Iribarren sayıları için çizilmiş eğriler gösterilmektedir.



Şekil 5.42 $L/d_{50} - S/H$ grafiği üzerinde (5.13) bağıntısına göre çizilen sabit *Ir* eğrileri.

(5.13) eşitliği ile verilen ve göreceli oyulma derinliği tahmini için L/d_{50} ve *Ir* değerlerini kullanılan yeni regresyon ifadesinin istatistiksel anlamlılığının kontrolü için öncelikle Şekil 5.43 ile verilen saçılma diyagramı çizilmiştir.



Şekil 5.43 Deneysel *S/H* değerleri ile (5.13) bağıntısı ile tahmin edilen *S/H* değerlerinin karşılıklı olarak noktalandığı saçılma diyagramı.

Şekil 5.43 incelendiğinde, regresyon analizine tabii tutulan tez çalışması kapsamındaki deneysel veriler ile Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasındaki deneysel verilerin, (5.13) bağıntısı sonucu hesaplanan veriler ile *r*=1 doğrusu (45° doğrusu) etrafında iki yönlü salınım yaptığı görülmektedir. Bu durum, doğru bir regresyon analizinin ilk göstergesidir.

Tez çalışmasında 0.55 mm dane çapı ile yapılan deneylerden üç veri r=1 doğrusundan uzaktır. Bu üç verinin dalga periyodu, dalga yüksekliği, dalga uzunluğu, L/d_{50} değerleri aynı dalgakıran şev eğimleri bir deneyin farklı iki deneyin aynıdır. Irribaren parametreleri diğer deneylerdekinden büyüktür. Ampirik bağıntıyla hesaplanan göreceli oyulma derinliği değerleri diğer deneylerden oldukça büyük

çıkmaktadır. İstatistiksel olarak nicel değerlendirme için (5.14) eşitliği ile verilen determinasyon katsayısı önem kazanmaktadır.

$$R^2 = \frac{SSR}{SSR+SSE} \tag{5.14}$$

Burada SSR regresyon çizgisinin tanımladığı varyansı ve SSE ise hatalara kalan varyansını göstermekte (5.15) ve (5.16) eşitlikleri ile hesaplanabilir.

$$SSR = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2 \tag{5.15}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{5.16}$$

Bu eşitliklerde y_i deneysel verileri, $\hat{y}_i$ (5.13) bağıntısı ile hesaplanan değerleri, $\bar{y}$ deneysel verilerin ortalamasını ve n veri sayısını simgelemekte olup, determinasyon katsayısı R^2=0.90 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, kurulan regresyon bağıntısının istatistiksel olarak kuvvetli olduğuna işaret etmektedir. Determinasyon katsayısına ilave olarak, (5.17) eşitliği ile verilen saçılma göstergesi değeri de önemli bir istatistiksel ölçüttür.

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{y}} \tag{5.17}$$

Burada *RMSE* hata karelerinin ortalamasının karekökü olup, (5.18) eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Gerçekleştirilen hesaplama sonrası saçılma göstergesi *SI*=%48 olarak belirlenmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}SSE} \tag{5.18}$$

BÖLÜM ALTI
SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan tez çalışması kapsamında, şevli yüzlü taş dolgu dalgakıran topuğunda dalga etkisi sonucu meydana gelen yerel oyulmalar deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı bünyesindeki geniş dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. İki farklı dalgakıran şev eğiminin, iki farklı irilikte kum taban malzemesinin ve altı farklı karakteristikteki düzenli dalgaların kullanıldığı deneylerde zamana bağlı oyulma derinlikleri ultrasonik yöntemle çalışan donanımlar ile ölçülmüştür. Zamana bağlı oyulma derinlikleri ile birlikte, kanalda ilerleyen dalgaların karakteristiklerinin belirlenmesi için yine ultrasonik yöntem ile çalışman ölçüm donanımları kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında öne çıkan temel bulgular aşağıda sıralanmaktadır. Elde edilen deneysel bulguların genel değerlendirme sonucunda;

- Aynı dalga karakteristikleri ve dalgakıran şev eğimi için taban malzemesi dane çapı artıkça oyulma derinliğinin azaldığı,
- Aynı taban malzemesi ve dalgakıran şev eğimi için dalgakırana etkiyen dalgaların dikliği arttıkça oyulma derinliğinin arttığı,
- Aynı taban malzemesi ve dalga karakteristikleri için dalgakıran şev eğimi arttıkça oyulma derinliği arttığı,

anlaşılmaktadır.

Deneylerden elde edilen oyulma derinlikleri dalga yüksekliğine bağlı olarak boyutsuzlaştırılarak göreceli oyulma derinlikleri elde edilmiştir. Buradan hareketle deneylerden elde edilen en yüksek göreceli oyulma derinlikleri, Sumer ve Fredsoe (2000) çalışması sonucunda önerilen bağıntı sonuçları ile karşılaştırılmış ve bunun sonucunda Sumer ve Fredsoe (2000) bağıntısının ölçülen sonuçlardan yüksek tahmin yaptığı görülmüştür. Bunun temel nedeni Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasında kullanılan taban malzemesinin tez kapsamındaki taban malzemelerinden oldukça ince oluşudur. Gelinen noktada hem bu tez çalışmasında elde edilen deneysel

bulguların hem de Sumer ve Fredsoe (2000) çalışmasındaki deneysel verilerin bir arada değerlendirildiği ve daha geniş bir dane çapı aralığını kapsayan yeni bir *S/H* regresyon bağıntısının önerilmesine gidilmiştir. İki çalışmadaki deneysel bulgular kullanılarak $S/H = 3.5\times10^{-10}\times(L/d_{50})^{7/4}\times(Ir)^{3/2}$ şeklindeki yeni ampirik bağıntı elde edilmiştir. Yeni sunulan bu ampirik bağıntı dane medyan çapı 0.2 mm, 0.55 mm ve 1.85 mm olan taban malzemeleri kullanılarak gerçekleştirildiğinden oldukça geniş bir aralıkta kum taban malzemeleri için geçerlilik söz konusudur. *S/H* değerinin tahmininde L/d_{50} boyutsuz sayısının kullanımı ile taban malzemesi dane çapının incelenen fiziksel olaydaki etkisi hesaba katılabilmektedir. Aynı zamanda *Ir* sayısı hem dalgakıran şev eğimi hem de dalga dikliği parametrelerinin barındırdığından bu dalgakıran şev eğimi ve dalga karakteristikleri de denklemde etkin parametreleri olarak yer alabilmektedir. Yukarıda verilen denklem kullanılarak elde edilen determinasyon katsayısı ve saçılma göstergesi değerleri kurulan regresyon bağıntının istatistiksel olarak kuvvetli olduğuna işaret etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen bulguların, önceki çalışma sonuçları ile bir arada değerlendirilmesi sonucu üretilen ampirik bağıntı yardımıyla boyutsuz parametrelere bağlı olarak göreceli oyulma derinliği tahmini yapılabilecektir. Boyutsuz parametreler olarak regresyon bağıntısı kurulduğundan, bu denklem genel geçer özellikte olup, denklemdeki bağımsız değişkenler olan boyutsuz parametreler ilgili koşullar için hesaplanarak buradan göreceli oyulma derinliğine ve dolayısı ile dalgakıran topuğundaki oyulma derinliği belirlenebilecektir.

Kırılmamış dalgaların şevli yüzlü taş dolgu dalgakırana etkimesi sonucu oluşan oyulmaların incelendiği bu çalışmanın, dalgakırana kırılmış dalgaların etkimesi sonucu oyulma sürecinin değişimi, kırılma sonucu yeni dalga oluşumu ve dalgakıran önünde taban morfolojisinin gelişimi konularındaki çalışmalar ile devam ettirilmesi, araştırmanın bütünlüğü açısından gelecek çalışma planı olarak önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Cokgor, S. ve Durmus, O. (2018, Mayıs). 3D Experimental Analysis of Turbulence Induced Scour in Front of the Ruble Mound Breakwater. *Proceedings of the 15th International Coastal Symposium*, Busan.

Doğan, M. (2013). *Dalga etkisindeki su altı borusu altında zamana bağlı olarak oluşan oyulmaların araştırılması.* Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Güney, M.Ş., Doğan, M., Ö. Aksoy A. ve Bombar, G. (2013,b.t.). Uvp Algılayıcıları Kullanılarak Su Altındaki Oyulmaların Zamanla Değişimlerinin Deneysel Araştırılması . *Kıyı Yapıları Sempozyumu*, İzmir.

Kwang, H.L. ve Norimi, M. (2008). Experimental study on scour occurring at a vertical impermeable submerged breakwater. *Applied Ocean Research 30*, 92-99.

Myrhaug, D., Rue, H. ve Torum, A.(2004).Tentative engineering approach to scour around breakwaters in random waves. *Coastal Engineering, 51*, 1051– 1065.

Sumer, B.M. ve Fredsoe, J.(1997).Scour at the round head of a rubble mound breakwater.*Coastal Engineering*, *29*, 231– 262.

Sumer, B.M. ve Fredsoe, J.(2000). Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater.*Coastal Engineering 40*,59-87.

Sumer, B.M., Fredsoe ,J.,Lamberti, A., Zanuttigh, B., Dixen, M., Gislason, K., ve Di Penta , A.F. (2005). Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures. *Coastal Engineering* , *52*, 995– 1025.

Tahersima, M., Yeganeh-Bakhtiary, A. Ve Hajivalie, F. (2011,b.t.). Scour Pattern In Front Of Vertical Breakwater With Wave Overtopping. *Proceedings of the 11th International Coastal Symposium*,Poland.

Van Gent M.R.A. ve Van derWerf I.M.(2014).Rock toe stability of rubble mound breakwaters.*Coastal Engineering, 83,* 166– 176.