

## Fırtına dalgalarının kıyı profiline yaptığı etkinin analizi

Umut TÜRKER\*, M. Sedat KABDAŞLI

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 80626, Maslak, İstanbul

### Özet

*Bu çalışmada, açıkta oluşan kum tepelerinin konumunun dalga özellikleri ve kıyıyı oluşturan malzemenin özellikleri cinsinden tanımlanması için fiziksel bir model geliştirilmiş ve dalganın kırılması ile harcanan enerji miktarı ile ilişkili basit analitik çözümler yapılmıştır. Bu çözümler daha sonra düzenli ve düzensiz dalga koşullarında yapılan laboratuvar çalışmaları ile karşılaştırılmış ve düzenli dalga ikliminde ortalama kök hatası 4.06%, düzensiz dalga ikliminde ise 6.21% olmuştur. Bütün bu çalışmalar dalganın kırılmasından sonra katı madde taşınımı için gerekli olan birim hacimdeki enerji miktarının, dalganın kırıldığı anda birim hacimde açığa çıkan enerji miktarı ile profilin denge halinde olabilmesi için gerekli olan enerji miktarı arasındaki farka eşit olduğunu göstermiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Bar oluşumu, dalga yüksekliği, dinamik stabilite, katı madde, kıyı profili.

### Beach profile response analysis during storm surges

#### Abstract

*During winter seasons, an increase in wave height and decrease in wave period grounds erosion of foreshore coastal regions where eroded material accumulate at some distance offshore from the coast forming an offshore bar. Knowledge of the characteristics of an offshore bar under wave attack is of great importance in a number of coastal engineering problems particularly in coastal erosion problems. The goal of this investigation is development of a physical model to predict the actual location of offshore bar in terms of wave climates and sediment properties of beach profiles. For this purpose, a simple analytical solution based on energy dissipation relation is developed. The method presented is compared with experimental results where root mean square of 4.06% and 6.21% for regular and irregular waves respectively achieved. Throughout the research, based on dynamic equilibrium profile considerations, the energy required for sediment transport due to wave breaking per unit volume, is expressed in terms of the difference between the actual, and equilibrium levels of wave energy dissipations per unit volume. During experimental studies it is observed that when the wave height increases, the bar formation migrates further offshore progressively, increasing the volume until the equilibrium bar volume is attained.*

**Keywords:** Bar formation, beach profile, dynamic stability, sediments, wave height.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Umut TÜRKER. u\_turker@yahoo.com; Tel: (392) 223 64 64 dahili:466.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Beach profile response analysis during storm waves" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 06.05.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 10.05.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2002 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Kıyılar, doğal hayatın bütün bileşenlerini kapsayan çok dinamik ve son derece hassas, doğal dengeye sahip bölgelerdir. Buraların kullanılırken korunabilmesi için doğal düzenin bütün bileşenlerinin hem tekil hem de bir bütün olarak mümkün olduğunca geniş şekilde anlaşılabilmesi gerekir. Kıyıların doğal dengesinin ana bileşenlerinden biri dalga ve yarattığı diğer etkilerdir. Gerçekte kıyılarda meydana gelen tüm doğal olaylarda dalganın varlığı veya yokluğu temel faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Açık denizden kıyıya yaklaşan dalganın kıyıya belli bir uzaklıktan itibaren değişimlere uğrayarak kıyıya kadar ulaştığı ve sonuçta kırılarak sönümlendiği bilinmektedir (Dally v. diğ., 1984; Janssen ve Battjes, 1978; Battjes, 1986).

Dalga kırılması olayı oldukça uzun yıllardan bu yana araştırılmasına rağmen genel oluşum mekanizmasını tam olarak ifade etmek bugüne kadar mümkün olamamıştır (Peregrine, 1983). Fakat açıkça bilinen özelliği, dalga kırılması sırasında büyük ölçüde enerjinin açığa çıktığıdır. Kabdaşlı ve Türker (2001) açığa çıkan enerjinin, dalgaların kırılma tipine göre gösterdiği değişimleri incelemiş ve en fazla enerjinin plunging tipi kırılmalarda açığa çıktığını gözlemlemiştir. Bu olayın kıyı stabilitesindeki önemi de özellikle Van der Meer (1988) çalışmalarından sonra ortaya çıkmış ve bu konudaki araştırmaları yoğunlaştırmıştır.

Kumsal üzerinde dalga, kırılmadan arta kalan enerjisi ile belli bir noktaya kadar tırmanır ve geri döner. Bu hareket sırasında büyük bir katı madde taşınımı ve enerji harcanması meydana gelir. Kıyıya ulaşan dalgaların yakın kıyı bölgesinde ortalama kıyı çizgisine paralel enerji bileşenleri kıyı boyu katı madde taşınımına yol açarken ortalama kıyı çizgisine dik enerji bileşeni kıyıya dik yönde katı madde taşınımına yol açar (Kabdaşlı, 1992).

Bir kıyı profili denildiğinde bunun belli dalga ve akıntı koşulları altında oluştuğu anlaşılmalıdır. Açıktan gelen dalgaların etkisi altında, kıyı profili iki ana formasyon altında toplanmaktadır; kayalık kıyılar ve kumul kıyılar. Kayalık kıyılarda dalga etkisi ile meydana gelen değişimler

morfolojik yapıda geri dönüşümü olmayan değişiklikler yaratmaktadır. Kum ve çakıl gibi malzemelerden oluşan kumul kıyılarda ise dalga etkisiyle oluşan morfolojik değişimler, bir döngü içerisinde tekrardan eski yapısına kavuşabilmektedir (Horikawa, 1987).

Hareket edebilen malzemedan oluşan yumuşak yapıdaki kıyılarda kıyıya dik yöndeki taşınım, dalga enerjisinin kıyı üzerinde sönümlenmesi olayında önemli işleve sahiptir. Bu taşınım yolu ile kıyı batimetresi açık denizden kıyıya ulaşan her dalganın özelliklerine bağlı olarak, başka bir deyişle, dalga enerji akışına göre değişikliğe uğrar. Bu değişim sırasında kıyı bazı koşullarda erozyona uğrar bazen de malzemeyi geri kazanır.

Herhangi bir dalga etkisi altında kıyıya dik yönde net taşınım açık denize doğru ise kıyıda erozyon, kıyıya doğru ise yığılma meydana gelir (Larson ve Kraus, 1989).

Bir dalga etkisi ile kıyının başlangıç durumunda erozyon oluşmaya başladığında kıyıya dik taşınım sonucunda meydana gelen yeni batimetrik durum bu erozyonun belli bir noktada sınırlanmasına yol açar. Bu olay yumuşak yapıdaki kıyıların gelen dalga özelliklerine göre gösterdiği esnekliğin en belirgin örneğidir ve aynı zamanda dünyanın genel dengesi için de etki-tepki ilişkisinin önemini gösterir. Değişen dalga özelliklerine bağlı olarak kıyı, her dalga koşulu için yeni şekiller alır. Bununla beraber uzun dönem içerisinde kıyının bu değişimleri, daha açık tanımı ile, katı madde kaybı ve kazanımı birbirini dengelediği takdirde kıyının genel bir denge konumuna sahip olduğu söylenebilir. Fakat, asıl önemli özellik, kıyı profili bir etki altında stabil bir şekle ulaştıktan sonra da bu profilin her noktasında katı maddelerin sürekli hareket ve taşınım halinde bulunması buna karşılık bir dalga periyodu sonunda net kıyıya dik taşınımın sıfır olmasıdır. Bu duruma dinamik denge durumu adı verilir.

Doğal kıyıların uzun dönemde sahip oldukları dinamik stabilite yukarıdaki paragraflarda açıklandığı gibi dalga, akıntı ve benzeri etkilerin sonucunda kıyıya ulaşan enerjinin miktarına bağlı olarak meydana gelir.

Genel olarak bir kıyıya bakıldığında bu kıyıya ulaşan dalgalar normal koşullarda uzun periyodlu ve nisbeten küçük dalga yüksekliğine sahiptirler. Böyle bir dalga, kıyı yakınlarında kırıldıktan sonra kıyı profili üzerinde tırmanır. Normal profil üzerinde tırmanan su kütlesinin bir kısmı yer altına sızarak geriye bu yolla döner. Ayrıca kıyıya seyrek dalga ulaşımı dolayısıyla yeraltı su seviyesinde yükselme olmaz. Bunun sonucunda normal dalga koşullarında tırmanma sırasındaki su seviyesi ile geri dönüş sırasındaki büyük su kütlesi hareketi ile kıyıya doğru taşınan katı maddelerin bir kısmı zayıf dönüş akımı nedeni ile kıyıda kalır; geri taşınmaz. Bu oluşum sonucunda kıyıda yığılma meydana gelir. Bu nedenle normal koşullarda kıyının katı madde kazanımı, kıyının yenilenmesi olarak da isimlendirilir.

Fırtına durumunda olaylar oldukça farklı meydana gelir. Dalga yüksekliğinin artması ve periyodunun küçülmesi dolayısıyla hem ortalama su seviyesinde, sakin su seviyesine göre büyük artış olması, hem de kıyıya çok sık dalga gelmesi dolayısıyla derine büyük miktarda su sızması sonucu kıyıda yer altı su seviyesi kısa zamanda taban yüzeyine kadar artış gösterir. Bu artış nedeniyle derine sızan su miktarı ihmal edilebilecek mertebelere iner ve tırmanma ve geri dönüş sırasındaki su seviyeleri hemen hemen eşit hale gelir. Tırmanma sırasında kıyıya doğru taşınımından daha büyük miktarda katı madde geri dönüş sırasında açığa doğru taşınır. Çünkü tırmanma sırasında taşınım, kıyı eğiminin tersine iken; geri dönüş sırasında eğim yönündedir ve katı maddelerin kendi ağırlıkları taşınımı kolaylaştırır.

Bunun sonucunda fırtına başlangıcından itibaren kısa bir süre içerisinde kıyıda hızla bir erozyon meydana gelir. Kıyıdan açığa doğru çekilen katı maddeler bir noktada toplanmaya başlar. Bu noktaya dalga etkisi ile açıktan da katı madde gelmekte olduğundan burada katı maddeler bir tepe oluştururlar. Bu tepe (bar) oluşumu sonucunda daha önce kıyıya daha yakın kırılan dalgalar bu tepe üstünde kırılarak enerjilerini kaybetmeye başlarlar ve kıyıda erozyon sona erer. Açıkta meydana gelen tepe kıyıya yaklaşan dalgaların kırılmasına ve enerjilerini harcama-

larına yardımcı olur. Açığa çıkan enerji erozyona uğrayan malzemenin birim hacimde yapabileceği hareket için yeterli olmadığı zaman, erozyon sona erecektir. Bununla beraber profil üzerinde net katı madde hareketi sıfır olacaktır. Görüldüğü gibi fırtına profilinde tepe oluşumu kıyının erozyonunun sınırlı kalması açısından son derece önemli bir role sahiptir.

Açıkta oluşan bar profili, dinamik denge oluşumuna yardımcı olmakla beraber, lokasyonu önceden bilindiği takdirde kıyı erozyonunun engellenebileceği daha önce kıyı yapıları üzerine yapılan çalışmalarda tanımlanmıştı (Kabdaşlı, 1992). Larson ve Kraus (1989) ile Hsu (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda bar profilinin tepe noktasının, kıyı çizgisine göre konumu tanımlanmaya çalışılmıştır. Ancak, ampirik denklemlerle verilen çözümler kıyı profilini oluşturan malzemenin önemini göz önünde bulundurmazken, durgun su durumunda da bar oluşumunu mümkün kılmıştır. Bu çalışmada özellikle fırtına dalgalarının etkisi altında meydana gelen dinamik profilde, bar oluşumunun lokasyonu hem kıyı malzemesi hem de bölgedeki dalga iklimi kullanılarak tanımlanmaya çalışılmıştır.

## **Teorik yaklaşım**

### **Taşınım metodu**

Katı madde taşınım modelleri profilin denge koşulunu sağlayabiliyorsa kapalı devre modelleri olarak isimlendirilirler. İlk kapalı devre modeller Kriebel ve Dean (1985) tarafından uygulanmış ve önerilen modelde katı madde taşınım miktarının denge konumundaki bir profilin sahip olduğu enerjiden daha fazla enerjinin harcanmasıyla birim hacimde taşınan katı madde miktarı ile tanımlandığı görülmüştür. Bu çalışmalar fırtına koşulunda bar formasyonu ile dinamik denge konumuna gelen profiller için Larson ve Kraus (1989) tarafından geliştirilmiştir. Denge profili varsayımlarına göre açık deniz yönünde katı madde hareketinin yarattığı birim debi,  $q_s$ , dalganın kırılmasıyla birim hacimde açığa çıkan enerjinin,  $D_w$ , profilin denge halindeyken sahip olduğu enerjisiyle,  $D_{eq}$  olan farkı ile doğru orantılıdır.

$$q_s = K(D_w - D_{eq}) \quad (1)$$

Bu denklemde K taşınım parametresi olup dinamik denge oluşuncaya kadar geçen zaman aralığının etkisini yansıtır. Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda dalğanın kırılmasından sonra katı madde taşınımı için gerekli olan birim hacimdeki enerji miktarının,  $D_s$  dalğanın kırıldığı anda birim hacimde açığa çıkan enerji miktarı ile profilin denge halinde olabilmesi için gerekli olan enerji miktarı arasındaki farka eşit olduğu varsayımı tanımlanabilir.

$$D_s = D_w - D_{eq} \quad (2)$$

Burada profil dinamik denge konumuna ulaşıncaya  $D_w = D_{eq}$  koşulu geçerli olup net katı madde taşınımının sıfır olduğu kabul edilir.

### Katı madde hareketi enerji harcanması

Dalga enerjisinin harcanmasının katı madde taşınımı ile orantılı olduğu bilindiğine göre modelin oluşumuna bu noktadan başlamak doğru olacaktır. Kıyı üzerinde yatay ile belli bir  $\beta$  açısı yapan bir birim alan düşünülüğünde; tırmanma sırasındaki su kütlelerinin hareketinde katı madde hareketine yol açan sürtünme ile meydana gelen gerilme:

$$\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} gm \cos \beta (\tan \varphi - \tan \beta) \quad (3)$$

olarak yazılabilir (Bagnold, 1963). Burada hareket eden maddenin kütlesi  $m$ , katı madde ve suyun yoğunlukları ise sırası ile  $\rho_s$  ve  $\rho$  olarak tanımlanmaktadır. Akışkan tarafından birim zamanda gerçekleştirilecek iş, oluşan gerilme ve bu gerilmenden dolayı katı maddelerin sahip olacağı ortalama hız  $\bar{u}$ , bağlı olarak tanımlanabilir.

$$\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} gm \cos \beta (\tan \varphi - \tan \beta) \bar{u} \quad (4)$$

Burada ortalama hız, katı maddelerin dinamik denge konumuna ulaşana kadar katettikleri ortalama mesafe,  $X_L$  ile bu olayın gerçekleşmesi için geçen zaman,  $T^*$  arasındaki oran ile tanımlanır.

$$\bar{u} = \frac{X_L}{T^*} \quad (5)$$

Bu durumda Denklem (4)'te tanımlanan parametre gerçekte birim zamanda birim alanda meydana gelen katı madde hareketi için akışkanın harcanması gereken enerji miktarını temsil etmektedir (Bagnold, 1963). Denklem içerisinde kütle, yer değiştiren tüm katı maddeyi temsil ediyorsa, katı madde yoğunluğuna oranı açıkta oluşacak olan barın hacmine eşit olacaktır. Bu kabul tüm katı madde hareketinin bar üzerinde son bulunduğu varsayımı üzerine geliştirilmiştir. Bu durumda katı madde hareketi ile birim hacimde meydana gelecek enerji harcanımı  $D_s$  aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$D_s = V_{bar} (\gamma_s - \gamma_w) \cos \beta (\tan \varphi - \tan \beta) \frac{X_L}{T^*} \frac{1}{h} \quad (6)$$

$V_{bar}$  açıkta oluşan barın hacmi,  $\gamma_s$  ve  $\gamma_w$  ise sırasıyla katı maddenin ve suyun birim hacim ağırlığıdır. Birim hacimdeki enerji harcanması birim derinlikle tanımlanırken, bu derinliğin dalğanın kırıldığı andaki derinliğe eşit olduğu kabulü Dally v.d. (1984) tarafından daha önceki çalışmalarda kabul edilmiştir. Enerji harcanması denkleminin türetilmesinde deniz konumu ve koşullarının morfolojik değişim sırasında sabit olduğu yani deniz tabanındaki değişimlerin deniz hidrodinamiğini etkilemediği kabul edilmiştir.

### Dalga enerjisinin harcanması

Dalga yayılma yönüne dik ve deniz tabanından su yüzeyine uzanan sabit bir düşey kesitten birim zamanda taşınan dalga enerjisinin zamansal ortalamasına, ortalama dalga enerji akısı ya da kısaltılarak dalga enerji akısı denilmektedir.

$$P = EC_g \quad (7)$$

$E$ , birim genişlikten birim zamanda geçen enerji  $C_g$  ise dalga grup hızıdır. Dalga enerjisi dalga yüksekliği ile doğru orantılıdır ve birim yüzey alanı için toplam ortalama dalga enerjisi:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (8)$$

olarak tanımlanır. Dalga sığ suda hareket ederse, dalga grup hızı yalnızca su derinliğine bağlı olarak ifade edilir (CERC, 1984):

$$C_g = (gh)^{1/2} \quad (9)$$

$h$  sığ su derinliği olarak tanımlanmaktadır. Dalga enerji akısı denklemi dalga enerjisi ve dalga grup hızı tanımlarıyla tekrardan yazıldığında ve koşullar dalga kırılması anında harcanan enerji miktarını  $P_{\text{wave}}$ , tanımlıyorsa:

$$P_{\text{wave}} = EC_g = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 (gh_b)^{1/2} \quad (10)$$

ifadesi elde edilir. Denklemden kullanılan “ $b$ ” indisi kırılma koşullarını tanımlamaktadır. Dalga kırıldıktan sonra tırmanma anında yeterli mesafe var ise dalga yeniden stabil hale gelebilmektedir. Bu noktada dalganın sahip olduğu enerji akısı denklemi ise

$$P_{\text{stable}} = E_s C_g = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma h)^2 (gh)^{1/2} \quad (11)$$

ile tanımlanır. Burada “ $\Gamma h$ ” dalganın stabil andaki dalga yüksekliğini temsil etmekte ve  $\Gamma$ , stabil dalga sabiti olarak kabul edilmektedir. Dally v.d. (1984) yaptıkları çalışmalarda stabil dalga sabiti için 0,4 sayısını uygun bulmuşlardır. Dalganın kırılmasından stabil hale gelebilmesine kadar sahip olduğu net enerji akısı  $P_{\text{net}}$ :

$$P_{\text{net}} = \frac{1}{8} \rho g^{3/2} [H_b^2 h_b^{1/2} - \Gamma^2 h_b^{5/2}] \quad (12)$$

olarak tanımlanır. Böylece, dalganın kırılmasından sonra katı madde taşınımını sağlayan birim hacimdeki enerji miktarı, net enerji akısının su derinliği ve hareketin gerçekleştiği mesafe boyunca ortalaması alınarak tanımlanabilir.

$$D_w = \frac{1}{8} \rho g^{3/2} [H_b^2 h_b^{1/2} - \Gamma^2 h_b^{5/2}] \frac{1}{h_b} \frac{1}{X_L} \frac{T^*}{T} \quad (13)$$

Denklem (13) tanımında kullanılan boyutsuz birim  $T^*/T$  dinamik denge profilin oluşması için kıyıya yaklaşan dalga adetini vermektedir.

### Dinamik denge profili

Fırtına dalgalarının kıyıya vurmaya başlaması ile birlikte kıyıda katı madde taşınımı ve enerji har-

canması meydana gelir. Fırtına boyunca devam eden bu morfolojik olay kıyıda erozyon oluşmasına neden olur. Hızla kıyıdan açığa çekilen katı madde bir noktada toplanmaya başlar ve bir tepe (bar) oluşturur. Artık, bu tepe üzerinde kırılan fırtına dalgaları enerjilerini tepe üzerinde harcamaya başlarlar. Tepenin açığa çekilmesi ile birlikte kırılan dalganın harcadığı enerji kıyı bölgesinde erozyon yaratamayacak hale gelir. Kıyı bölgesinde birim hacime düşen enerji bölgedeki katı maddeyi hareket ettiremeyecek kadar azalır ve bir dalga periyodu sonunda net kıyıya dik taşınım sıfırlanır. Kıyı profili bu etki altında dinamik denge durumuna ulaşır ve stabil bir şekil alır. Yukarıdaki tanım doğrultusunda kıyı bölgesini oluşturan katı maddenin özelliklerine bağlı olan dinamik dengedeki birim hacime etkiyen dalga enerjisi aslında stabil halde dalganın kırılması ile birim alana düşen enerjilerin toplamına eşittir.

$$D_{\text{eq}} = \frac{1}{8} \rho g^{3/2} \left[ H_b^2 h_b^{-1/2} + \frac{5}{3} \Gamma^2 h_b^{3/2} \right] \frac{1}{X_L} \quad (14)$$

Tabi ki, dinamik dengenin oluşumu ile birlikte net katı madde taşınımı sıfıra eşit; diğer bir deyişle, dalga kırılması ile açığa çıkan enerji miktarı birim hacimde katı madde taşınımı yaratmak için yetersiz olarak nitelendirilecektir. Bu tanım ile birlikte bar oluşumu için gerekli zaman diliminin alabileceği minimum değer tanımlanabilir. Net katı madde taşınımının sıfır olması durumunda, yani  $D_w = D_{\text{eq}}$  koşulu sadeleştirildiği zaman:

$$\frac{T^*}{T} = 1.89 \quad (15)$$

elde edilir.

### Bar profilinin lokasyonu

Fırtına dalgalarının etkisi altında dinamik denge profiline ulaşan kıyı, açıkta oluşan bar profilinin gelen dalgaları kırarak enerji harcanmasını sağlaması ile daha fazla erozyona uğramayacaktır. Doğal oluşan barın lokasyonunu önceden belirleyebilmek erozyonu engellemek için yapay kıyı yapıları yapabilme imkanı sağlayacaktır. Böyle bir tahmin kıyı bölgesindeki dalga iklimi ve katı madde özelliklerine bağlı parametrelerle tanımlanabilir.

$$X_L = \sqrt{\frac{\frac{1}{8} \rho g^{3/2} \left( \left[ H_b^2 h_b^{1/2} - \Gamma^2 h_b^{5/2} \right] \frac{1}{h_b} \frac{T^*}{T} - \left[ H_b^2 h_b^{-1/2} + \frac{5}{3} \Gamma^2 h_b^{3/2} \right] \right)}{V_{bar} (\gamma_s - \gamma_w) \cos \beta (\tan \varphi - \tan \beta) \frac{1}{T^*} \frac{1}{h_b}}} \quad (16)$$

Denklem (6), (11) ve (13)'te türetilen ilişkileri Denklem (1)'de biraraya getirerek gerçekleştirilecek çözüm, katı maddelerin fırtına dalgaları etkisiyle katedecekleri ortalama mesafeyi yani bar lokasyonunu belirleyecektir.

Denklem (16)'da geçerli bir çözüm üretebilmek için dinamik denge oluşumu ile meydana gelen barın hacmi ve bu olayın gerçekleşmesi için gerekli olan zaman periyodunun sağlıklı bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu gereksinimden dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında model düzeni kurulmuş ve bu parametreler bağımlı oldukları değişkenler ile ifade edilmeye çalışılmıştır. Deney çalışmaları hem düzenli hem de düzensiz dalga etkisi altında yapılmıştır.

## Deneysel çalışma

### Deney Düzenliği

Düzenli dalga deneylerinin tamamı 22.5 metre boyunda, 1 metre genişliğinde ve 0.5 metre yüksekliğinde olan cam kanalda yapılmıştır. Düzensiz dalga deneyleri ise 24 metre boyunda, 1 metre genişliğinde ve 1 metre yüksekliğinde olan cam kanalda yapılmıştır. Her iki deney tipinde de 1/5 eğimli şev kullanılmıştır. Deneyler sırasında kullanılan plaj malzemeleri ve özellikleri Tablo (1)'de verilmiştir. Düzenli dalga deneyleri 33, düzensiz dalga deneyleri ise 36 farklı dalga ikliminde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Katı madde özellikleri

Malzeme Kodu	Dane çapı (mm)	Çökelme hızı (m/sn.)
A	0.38	0.0501
B	0.5	0.0668
C	0.7	0.0928

### Deney sonuçları

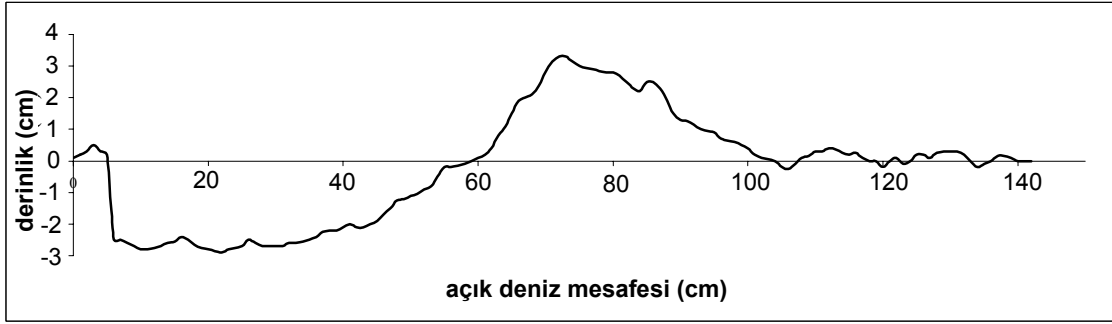
Düzenli dalga koşullarında dinamik denge profilinin oluşumunu etkileyen dalga yüksekliği, kayde-

dilen dalga serisinde dalga sayısının en büyük %30'una karşılık gelen dalga yüksekliği (belirgin dalga yüksekliği) ve periyod ise bunların oluşturduğu dalga periyod değerlerinin ortalaması olarak alınmıştır. Düzensiz dalga koşullarında ise kaydedilen dalga serisinde dalga sayısının en büyük %10'una karşılık gelen dalga yüksekliği ve bunların oluşturduğu dalga periyod değerlerinin ortalaması etkili dalga olarak kabul edilmiştir. Düzenli ve düzensiz koşullarda etkili dalga yüksekliğindeki bu farklılık bar oluşumunda dalganın kırılma doktasının önemini göstermektedir. Düzenli dalga koşullarında sürekli aynı dalga genliğinin meydana gelmesi ardışık kırılmaları yaratırken, düzensiz dalga ortamında düşük genlikli dalgaların kırılmadan sönümlendiği ve enerji açığa çıkmadığı gözlenmiştir.

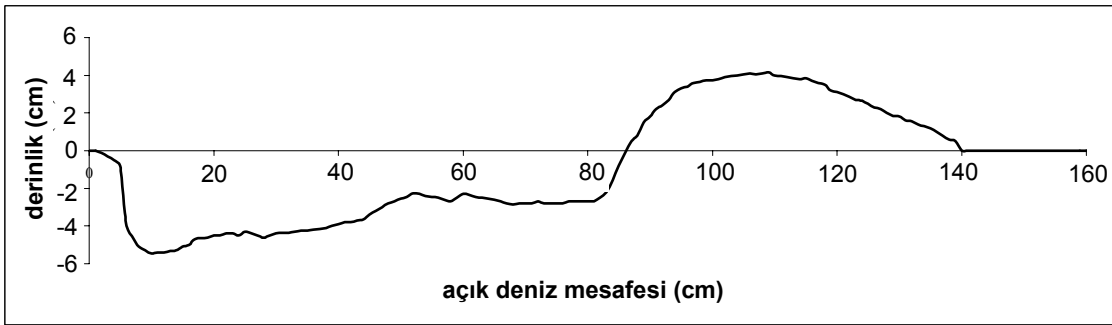
Dalgalar, profil dinamik dengeye ulaşana kadar (35-40 dk.) üretilmiştir. Bu sırada dalgaların özellikleri dalga kaydı alınmak suretiyle belirlenmiştir. Her deneyin sonunda kanal boşaltılarak başlangıçta düz satıhta olan şev üzerinde meydana gelen profil değişimi, kanal yan camına yerleştirilen şeffaf kağıt üzerine bire bir çizilerek profile meydana gelen bar oluşumu ve erozyon bölgesi kayıt edilmiş ve çizilen profiller bilgisayara aktarılmıştır. Deney 1A 16B ve 117B'nin dinamik denge profilleri Şekil (1), (2) ve Şekil (3)'te gösterilmektedir. Daha sonra bu çizimlerden yararlanarak barın hacmi ile yer değiştirme mesafesi ölçülmüştür. Ortalama konum değişikliği, oluşan barın merkezi ile erozyona uğrayan bölgenin merkezi arasındaki mesafe olarak kabul edilmiştir. Bir sonraki deneye geçildiğinde şev tekrar düz hale getirilerek yukarıdaki işlemler tekrarlanmıştır. Düzenli ve düzensiz dalga koşullarında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları Tablo (2) ve Tablo (3)'te verilmektedir.

### Deney sonuçları analizi

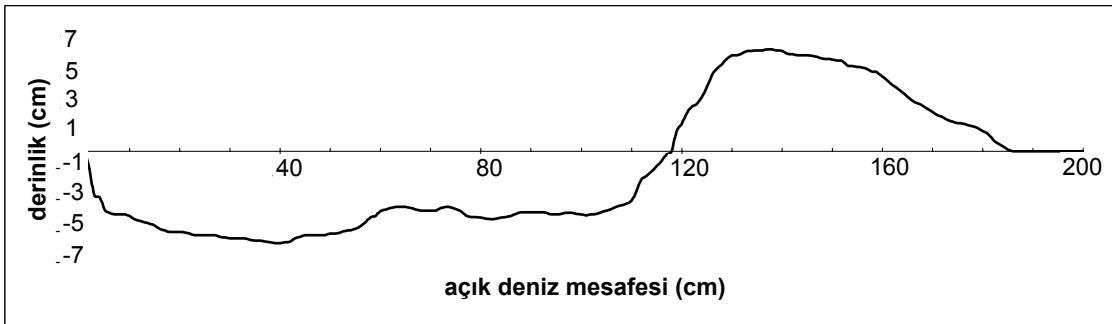
Deneylerde çıkan sonuçların analizleri, dinamik denge profili oluştuğunda meydana gelen barın



Şekil 1. Deney 1A sonucunda meydana gelen dinamik denge profili



Şekil 2. Deney 16B sonucunda meydana gelen dinamik denge profili



Şekil 3. Deney 117B sonucunda meydana gelen dinamik denge profili

hacmi ve oluşum süresini tanımlayan zamanı yarı ampirik denklemlerle tanımlama imkanı sağlamıştır. Fırtına dalgalarının etkisi ile meydana gelen dinamik denge profili dalga yüksekliği, boyu ve periyodu, profili oluşturan malzemenin çapı, çökme hızı ve birim hacim ağırlığı, akışkanın birim hacim ağırlığı ve şevin eğimi ile ilişkilendirilebilir. Böylelikle, dinamik denge profilinde oluşan bar ve oluşum süresi de aynı parametrelerden etkilenecektir.

$$T^* = f(\gamma_w, H_o, T, L_o, \gamma_s, d_{50}, w, s) \quad (17)$$

$$V_{\text{bar}} = f(\gamma_w, H_o, T, L_o, \gamma_s, d_{50}, w, s) \quad (18)$$

Her iki parametre için de boyut analizi uygulandığı zaman 5 adet boyutsuz parametre elde edilmiştir.

$$A_o = \frac{H_o}{d_{50}} \quad (19)$$

$$B_o = \frac{H_o}{wT} \quad (20)$$

$$C_o = \frac{H_o}{L_o} \quad (21)$$

$$D_o = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (22)$$

Tablo 2. Düzenli dalga deney sonuçları

Deney Kodu	Dalga Yüksekliği $H_s$ (cm)	Dalga Periyodu $T_s$ (sn)	Katedilen Mesafe $X_L$ (cm)	Dane Çapı $d_{50}$ (mm)	Bar Hacmi $V_{bar}$ (m <sup>3</sup> )
A	3.338 - 9.790	0.597 - 1.096	31.27 - 80.84	0.38	0.00171 - 0.0015
B	4.941 - 9.04	0.601 - 1.083	33.22 - 69.79	0.50	0.00381 - 0.0110
C	4.566 - 9.369	0.562 - 1.104	23.36 - 58.00	0.70	0.00372 - 0.0110

Tablo 3. Düzensiz dalga deney sonuçları

Deney Kodu	Dalga Yüksekliği $H_{1/10}$ (cm)	Dalga Periyodu $T_{1/10}$ (sn)	Katedilen Mesafe $X_L$ (cm)	Dane Çapı $d_{50}$ (mm)	Bar Hacmi $V_{bar}$ (m <sup>3</sup> )
A	12.068 - 15.620	1.280 - 1.854	86.42 - 111.95	0.38	0.02251 - 0.0332
B	11.132 - 16.368	1.488 - 1.946	75.82 - 112.27	0.50	0.01405 - 0.0312
C	12.068 - 15.620	1.281 - 1.854	75.53 - 91.290	0.70	0.00884 - 0.0204

$$E_o = s \quad (23)$$

Deneyler sırasında dalga sevi sabit tutulduğu için şevdeki değişimlerin parametreleri nasıl etkileyeceği hassas bir şekilde yansıtılamayacaktır. Ayrıca tüm deney boyunca plaj kumu kullanılmış ve birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı da sabit kabul edilmiştir. Dalga dikliğini temsil eden Denklem (21)'deki ifade ise, dalganın orbital hareketinin gözlemlenmesinde önemli rol oynarken, kıyıya dik katı madde taşınımında pek fazla etkisi olmadığı savunulmuştur (Kraus v. diğ., 1991).

Denklem (20)'de tanımlanan boyutsuz tane çökme hızı parametresi ise hem dalga dikliği hem de kıyıya dik katı madde taşınımını en iyi şekilde temsil etmektedir. Bunda en büyük etken denklemin, katı madde özelliği taşıyan çökme hızını ihtiva etmesidir (Larson ve Kraus, 1989). Derinlik parametresi olarak da bilinen Denklem (19) katı madde ile dalga yüksekliğinin oranını vermekte ve özellikle dinamik stabilite çalışmalarında, kıyının stabilite derecesinin belirlenmesinde yardımcı olmaktadır (Van Der Meer, 1988).

Deneyler sırasında dalga yüksekliğindeki artışın bar oluşumunun kıyıdan uzaklığı ile doğru

orantılı olduğu gözlenmiştir. Dalga yüksekliğindeki artış barın kıyıdan uzaklaşmasını sağlamış ve uzaklaştıkça hacminin de artmasına neden olmuştur. Bu oluşumlar büyük ölçekte gözlemlendikleri zaman bar oluşumu boyutsuz tane çökme hızı parametresi ve tane çapı ile dalga yüksekliği oranı ile ilişkilendirilmiştir. Dinamik denge profilinin oluşumu için geçen zaman diliminin ise dalga yüksekliğinin artması ile arttığı ancak kıyı malzemesinin büyümesi ile azaldığı gözlenmiştir. Bu da zamanın direkt olarak boyutsuz tane çökme hızına bağımlı olduğu gerçeğini yansıtmaktadır. Sonuç olarak, dinamik denge profilinin oluşum zamanını tanımlamak için Denklem (20)'de verilen boyutsuz tane çökme hızı parametresi ve barın hacim hesapları için ise Denklem (20) ile Denklem (19)'da verilen derinlik parametresi kullanılacaktır.

Düzenli ve düzensiz dalga koşullarında yapılan deney çalışmalarının sonuçları ile yapılan analizlerde, oluşan barın hacmi ve oluşum süresi elde edilen sonuçların harmanlanması ile eşitlik haline getirilmiştir. Ampirik bağıntılar olarak elde edilen bu eşitlikler düzenli ve düzensiz dalgalar için boyutsuz tane çökme hızı parametresi ve tane çapı-dalga yüksekliği oranının fonksiyonu olarak verilmiştir.



Düzenli dalga koşulları altında eşitlikler:

$$\frac{T^*}{T} = 0.9571(1.89 + \frac{H_o}{wT}) + 0.1286 \quad (24)$$

$$\frac{V_{bar}}{d_{50}^2} = 0.430(\frac{H_o}{d_{50}})^{2.25}(\frac{H_o}{wT})^{0.015} \quad (25)$$

Düzensiz dalga ikliminde ise tanımlamalar:

$$\frac{T^*}{T} = 1.0124(1.89 + (0.742 \frac{H_o}{wT})) + 0.0614 \quad (26)$$

$$\frac{V_{bar}}{d_{50}^2} = 0.0845(\frac{H_o}{d_{50}})^{2.471}(\frac{H_o}{wT})^{0.18} \quad (27)$$

olarak verilmektedir.

#### Teorik yaklaşım ile karşılaştırma

Teorik yaklaşım ile elde edilen bar profilinin lokasyonu, deney sonuçlarında ölçülen değerlerle karşılaştırıldığında düzenli dalga ikliminde ortalama kök hatası %4.06, düzensiz dalga ikliminde ise %6.21 olmuştur. Ortalama kök hatası:

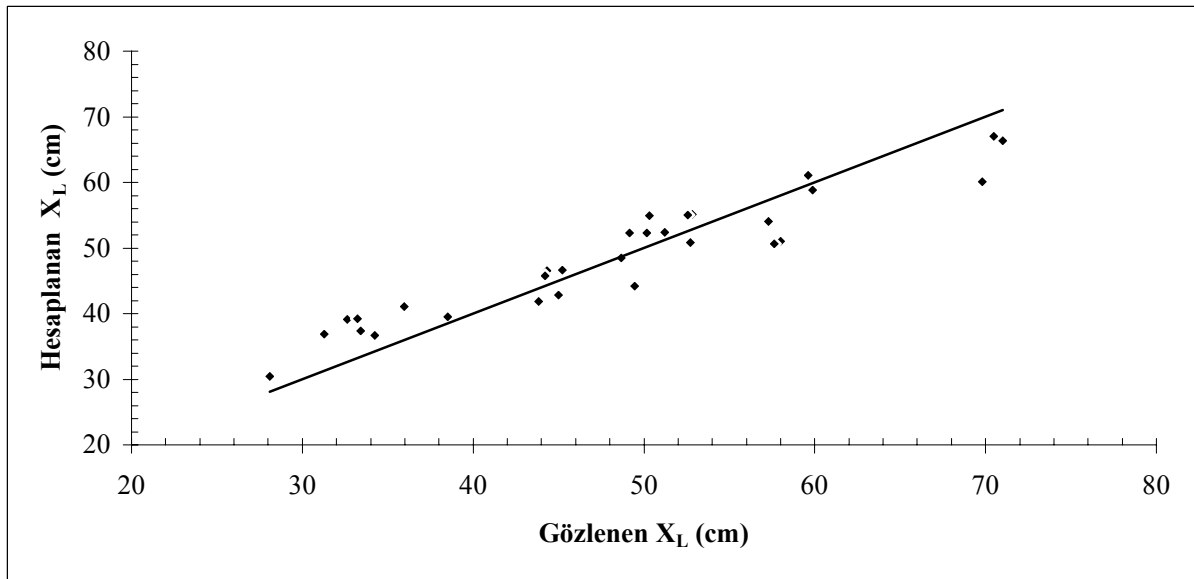
$$\text{hata} = \left( \frac{X_{Lp}}{X_{Lo}} - 1 \right) \times 100 \quad (29)$$

denklemleri kullanılmış ve düzenli dalga koşullarında gerçekleştirilen 33 deneyin sadece üçünde hesaplanan ortalama mesafe %15'in üzerinde, beş deneyde ise %10'un üzerinde hata vermiştir. Düzensiz dalga koşullarında gerçekleştirilen 36 deneyde ise sadece 2 deney %10'un üzerinde hata vermiştir.

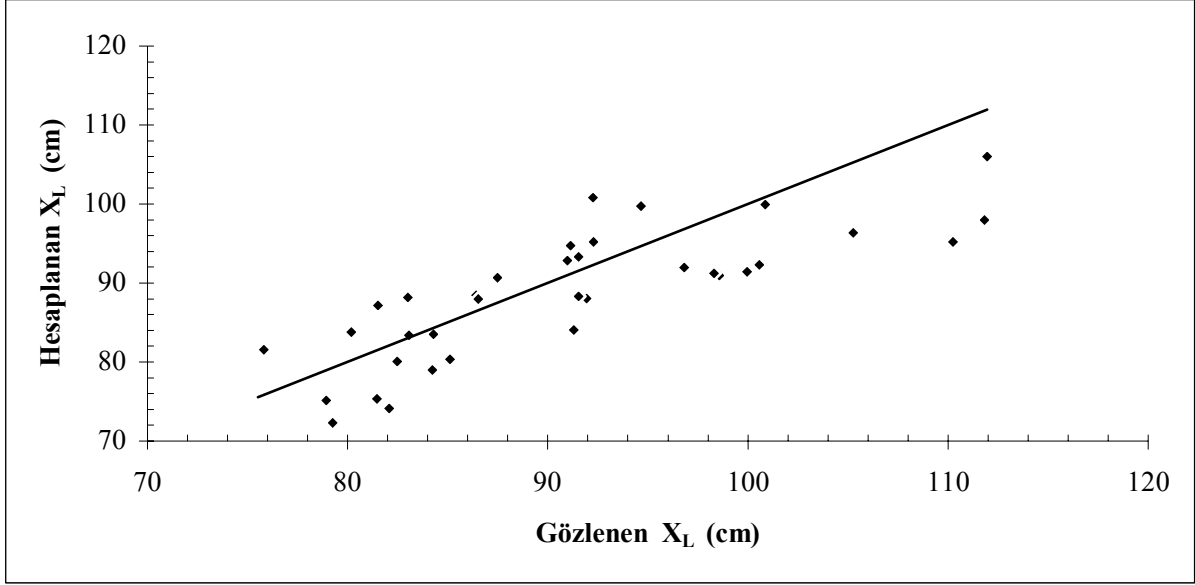
#### Sonuç

Yapılan çalışmada düzensiz ve düzenli dalga koşullarında fırtına profilinin yaratacağı morfolojik değişim (bar oluşumu) hem analitik hem de deneysel yöntemlerle irdelenmiştir. Kış mevsiminde dalga yüksekliğinin artması ve dalga periyodunun azalması ile kıyıdaki yer altı su seviyesi kısa bir süre içerisinde yükselmekte ve kıyıya tırmanan dalga geri dönüşümünde yer çekimi kuvvetinin de etkisiyle kıyıda erozyon meydana getirmektedir. Kıyıdan açığa doğru çekilen katı maddeler bir noktada toplanmaya başlar ve burada bir kum tepesi (bar) oluştururlar.

Bütün bu çalışmalar kumsalın dinamik denge profili göz önünde bulundurulduğunda dalganın kırılmasından sonra katı madde taşınımı için gerekli olan birim hacimdeki enerji miktarının, dalganın kırıldığı anda birim hacimde açığa çıkan enerji miktarı ile profilin denge halinde olabilmesi için gerekli olan enerji miktarı arasındaki farka eşit olduğu varsayımı ile tanımlanmıştır.



Şekil 4. Hesaplanan ve düzenli deney sonuçlarında gözlemlenen ortalama katı madde hareketlerinin karşılaştırması



Şekil 5. Hesaplanan ve düzensiz deney sonuçlarında gözlemlenen ortalama katı madde hareketlerinin karşılaştırması

Çalışmalarda, kullanılan üç farklı malzeme değişik çaplarda kıyı dengesindeki oluşumun göstereceği farkları ortaya çıkarmıştır. Malzeme çapının artması ile birlikte ortalama katedilen mesafede azalma gözlemlenmiş, bu da dinamik dengenin daha kısa sürede oluşmasına sebep olmuştur.

Aynı malzemeden oluşan profillerde dalga yüksekliğindeki artış dinamik dengenin oluşumunu geciktirirken, meydana gelen tepenin hacmindeki artış net bir şekilde gözlenebilmiştir. Özellikle deney sonuçları incelendiği zaman dalga periyodu ile morfolojik değişim arasında zayıf bir ilişki gözlemlenmiştir.

Çalışmalarda kullanılan profil eğimi sürekli sabit (1:5) tutulmuş ve dalga yüksekliğinin artması ve dalga periyodunun azalmasının farklı eğimlerde ortalama katı madde taşınımını nasıl etkileyeceği gözlemlenmemiştir.

Kıyı profilleri üzerinde yapılan bu çalışma yeni kıyı yapılarının yeri ve boyutları ile yakından ilgilidir ve bu tür çalışmalara ışık tutabilecektir.

### Semboller

$A_o$  = boyutsuz derinlik parametresi  
 $B_o$  = boyutsuz çökme hızı parametresi  
 $C_g$  = dalga yayılma hızı  
 $C_o$  = dalga dikliği parametresi

$D_{eq}$  = birim hacimde kıyı denge enerjisi  
 $D_o$  = boyutsuz birim hacim ağırlık parametresi  
 $D_s$  = birim hacimde malzeme taşınım enerjisi  
 $D_w$  = dalganın birim hacime dağılan enerjisi  
 $d_{50}$  = karakteristik ortalama tane çapı  
 $E$  = enerji yoğunluğu  
 $E_o$  = boyutsuz eğim parametresi  
 $E_s$  = malzeme taşınımında açığa çıkan enerji  
 $e_{rms}$  = ortalama kök hata karesi  
 $g$  = yerçekimi ivmesi  
 $H$  = dalga yüksekliği  
 $H_b$  = kırılan dalga yüksekliği  
 $H_o$  = açık deniz dalga yüksekliği  
 $H_s$  = belirgin dalga yüksekliği  
 $H_{1/10}$  = en yüksek 10% dalganın ortalama yüksekliği  
 $h$  = su derinliği  
 $h_b$  = dalganın kırıldığı andaki su derinliği  
 $K$  = katı madde taşınım parametresi  
 $L_o$  = derin su dalga boyu  
 $m$  = katı maddenin kütlesi  
 $N$  = gözlem sayısı  
 $P$  = enerji akısı  
 $P_{net}$  = net enerji akısı  
 $P_{stable}$  = dalganın stabil haldeki enerji akısı  
 $P_{wave}$  = dalga kırılma anındaki enerji akısı  
 $q_s$  = bölgesel net katı madde taşınım miktarı  
 $s$  = kıyı profilinin eğimi  
 $T$  = dalga Periyodu  
 $T_s$  = belirgin dalga periyodu  
 $T^*$  = zaman parametresi  
 $T_{1/10}$  = en yüksek 10% dalganın ortalama periyodu

$\bar{u}$	= katı maddelerin ortalama hızı
$V_{bar}$	= kum tepesinin hacmi
$w$	= tane çökme hızı
$X_L$	= ortalama katı madde taşınımı
$X_{Lo}$	= gözlenen ortalama katı madde taşınımı
$X_{Lp}$	= hesaplanan ortalama katı madde taşınımı
$\Gamma$	= stabil dalga katsayısı
$\beta$	= kıyı profilinin açısı
$\gamma_s$	= katı maddenin birim hacimdeki ağırlığı
$\gamma_w$	= suyun birim hacimdeki ağırlığı
$\rho$	= su yoğunluğu
$\rho_s$	= katı madde yoğunluğu
$\varphi$	= içsel sürtünme açısı

## Kaynaklar

- Bagnold, R. A., (1963). *Beach and nearshore processes; Part I: Mechanics of Marine Sedimentation in Hill*, M. N. eds, *The Sea: Ideas and Observations*, **3**, 507-528, Interscience, New York.
- Battjes, J. A. ve Janssen, J. P. F. M., (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, 569-587, ASCE, Hamburg.
- Battjes, J. A., (1986). Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves, Delft University of Technology. Report, 86-5, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University, Netherlands.
- CERC, (1984). *Shore Protection Manuel*, 4<sup>th</sup> Edition, US Army Engineer Waterway Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, US Government Printing Office, Washington DC, USA.
- Dally, W. R., Dean, R. G. ve Dalrymple, R. A., (1984). A model for breaker decay on beaches, *Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, 82-98 ASCE, Houston, New York.
- Horikawa, K., (1987). *Nearshore Dynamics and Coastal Processes theory, measurement and predictive models*, University of Tokyo Press, Japan.
- Hsu, T. W., (1998). Geometric characteristics of storm-beach profiles caused by inclined waves, *Ocean Engineering*, **25**, 1, 69-84.
- Kabdaşlı, M. S., (1989). Kıyıların yapısını bozmayan düşük maliyetli kıyı koruma yapıları, Teknik Rapor, 132sh, İ.T.Ü. Araştırma Projesi, İstanbul.
- Kabdaşlı, M. S., (1992). *Kıyı Mühendisliği*, 277sh, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Kabdaşlı, M. S. ve Türker, U., (2001). The wave breaking phenomena as a tool for environmental friendly shore protection, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> Black Sea International Conference*, 6-8 June, Varna, Bulgaria, 412-420.
- Kraus, N. C., Larson, M. ve Kriebel, D. L., (1991). Evaluation of beach erosion and accretion predictors, *Proceedings of Coastal Sediments 91*, ASCE, Seattle, 572-588.
- Kriebel, D. L. ve Dean, R. G., (1985). Numerical simulation of time dependent beach and dune erosion, *Coastal Engineering*, **9**, 221-245.
- Larson, M. ve Kraus, N. C., (1989). SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1, empirical foundation and model development, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station Technical Report, CERC-89-9, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi.
- Peregrine, D. H., (1983). Breaking waves on beaches, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **15**, 149-179.
- Van der Meer, J. W., (1988). Rock slopes and gravel beaches under wave attack, PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.