

DAMAGE RISK ASSESSMENT OF REVETMENTS IN UK

Can Elmar BALAS

Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Celal Bayar Bulvarı,
06570 Maltepe, Ankara. Tel: 2317400 / 2256, Faks: 2308434.
E-posta: cbalas@gazi.edu.tr

ABSTRACT

The Reliability-based design and risk assessment model REBAD (1), which is used to predict the reliability levels of coastal structures that are subject to high damage risk and vast capital expenditures, was implemented to Wiseman's Bridge revetment in UK by utilizing Van der Meer failure functions. The failure mode probabilities were calculated by the Second Order Reliability Method (SORM), where the failure surface was approximated by a quadratic polynomial having the identical curvature at design point. In this study, a methodology was suggested to determine the lifetime damage probability of coastal structures, which are subject to large tidal ranges and storm surges. As a result, REBAD was successfully implemented to a rubble mound revetment subject to large tidal ranges as a risk assessment study in order to point out the necessity for the development of deformation-based design (DD) methodology instead of the partial safety system used in EU countries.

Key Words: Acute toxicity; Revetment, stability, limit-state, reliability, risk, uncertainty.

İNGİLTERE'DEKİ KIYI ANROŞMANLARININ HASAR RİSKİ ANALİZİ

ÖZET

Maliyeti ve hasar riski yüksek kıyı yapılarının güvenilirlik seviyelerinin tahmininde kullanılan REBAD (1) risk değerlendirme ve tasarım modeli, Van der Meer yıkım fonksiyonları kullanılarak, İngiltere'de Wiseman's Bridge kıyı tahkimat yapısına uygulanmıştır. Yıkım modu olasılıkları, tasarım noktasında yıkım yüzeyinin eş eğriliğine sahip ikinci dereceden bir polinom kullanılarak İkinci Mertebeden Güvenirlik Metodu (IMGM) ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada, yapının tasarım ömrü içindeki hasar olasılıklarının hesaplanmasında, yüksek gelgit seviyesini ve fırtına kaynaklı su kabarmalarını hesaba katan bir yöntem önerilmiştir. Sonuç olarak REBAD modeli, yüksek gel-git aralıklarının etkisi altındaki bir taşdolgu kıyı yapısına başarıyla uygulanmış, AB ülkelerinde kullanılan kısmi güvenilirlik katsayıları yönteminin yerine deformasyona dayalı tasarımın (DT) kullanılması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kıyı tahkimatı, stabilite, limit durum, güvenilirlik, risk, belirsizlik.

1. GİRİŞ

Kıyı yapısının tasarımı, dayanım ve olası yük değişkenlerine bağlı yoğun belirsizlikleri içerdiklerinden, projelendirilmenin risk yönetim modeli ile gerçekleştirilmesi gerekir (2). Belirsizliklerin tasarımda gözardı edilmesi sonucu yapının performansında gözlenecek değişiklikler, yapının risk düzeyini ve güvenilirliğini doğrudan etkiler. Güvenirlik, yapının ekonomik ömrü süresince beklenen performansını yerine getirebilmesidir ve II. yada III. dereceden istatistiksel yöntemler ile belirlenebilir (3). Yapıların belirlenimci (deterministik) tasarım ile projelendirildiği durumda ise, güvenilirlik emniyet katsayıları ile sağlanmaya çalışılır. Ancak,

1. INTRODUCTION

Since the design of coastal structures incorporates a considerable extent of uncertainty in the structural resistance and potential load intensities, the project should be achieved by utilizing a risk management model (2). The changes in the structural performance that may arise from the ignorance of the uncertainties in design, will directly affect the reliability and risk level of the structure. Reliability is the ability to sustain its expected structural performance during its economical lifetime and can be assessed by II or III order statistical methods (3). In the case when structures are designed by using deterministic methods, using safety factors attains the reliability. However, the in order to predict the

projelendirme sırasında güvenilirlik seviyesinin de tahmin edilebilmesi için, yük ve dayanım değişkenlerine ait belirsizliklerin de dikkate alındığı istatistiksel yöntemlerden yararlanılması zorunludur. Malzeme açısından ekonomik olmaları nedeniyle uygulamada yaygın olarak tercih edilen kıyı koruma yapıları taş dolgu anroşmanlardır (4). Buna rağmen yüksek maliyetli olan bu yapıların tasarım aşamasında dikkate alınan en önemli hasar modu koruyucu tabakanın yıkılmasıdır. Wiseman Bridge kıyı koruma yapısının güvenilirlik analizi, geliştirilen REBAD güvenilirlik modeli ile yapılmış, farklı hasar seviyelerinde ve yıkılma biçimlerine bağlı olarak tasarımda, yatırım-onarım maliyeti optimizasyonuna olanak sağlanmıştır.

Modelde, projenin dayanım ve yük parametreleri rassal değişkenler olarak tanımlanmış ve yapının güvenilirliği, limit durum uzayında olasılık dağılımları ile ifade edilmiştir (5). Taş dolgu yapılar için "limit durum", belirlenen bir hasar seviyesinin yapının tümüyle yıkılmasına neden olmayacak, ancak performansını yerine getiremeyecek şekilde aşılması olarak tanımlanmıştır (6). Ayrıca modelin uygulanma aşamasında, tasarımda gözönüne alınması gereken belirsizlik kaynakları, Carmarthen deniz yöresindeki kıyı koşulları gözetilerek araştırılmıştır. Belirsizliğe dayalı değişkenlik, olasılık fonksiyonlarının parametreleri (değişkenlik katsayısı, standart sapma, uygulama aralığı vb.) yardımıyla limit durum aralıklarını doğrudan etkilemiştir.

2. GÜVENİRLİK MODELİ

Bir yapının güvenilirliği yapının dayanımı ile birlikte yapıya etkiyebilecek yüklerin bileşik etkisine bağlıdır. Herhangi bir hasar biçimi için oluşturulacak limit durum fonksiyonu yük ve dayanım değişkenlerini içerir ve bu değişkenler rassal kabul edilirler. Vektörel olarak $\{X\}$ şeklinde tanımlanabilen değişkenlerin, limit durumdaki yıkılma fonksiyonu $g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)=0$ şeklinde tanımlanır. Geometrik olarak bu eşitlik yıkılma yüzeyine karşılık gelmekte ve $g \leq 0$ için yıkılma bölgesini; $g > 0$ için ise güvenilir bölgeyi tanımlamaktadır.

Güvenirliğe dayalı tasarımda, taş dolgu yapıların projelendirilmesi aşamasında yük ve dayanım değişkenleri arasında denge koşulunu sağlayan Van der Meer limit durum fonksiyonları kullanılmaktadır (7). Yapının güvenilirliği, kabul edilebilir bir yıkılma olasılığının (P_f) sağlanması ile aşağıdaki şekilde elde edilir (8):

$$P_f = \int \int \int_{g \leq 0} \dots \int f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1, \dots, dx_n \quad [1]$$

burada, $f_{xi}(x_i)$ rassal değişkenlerin bileşik olasılık yoğunluk fonksiyonu ve P_f taş dolgu yapılar için, belirli bir hasar seviyesinin aşılma olasılığıdır. Ancak pratikte bileşik olasılık yoğunluğunun belirlenmesi mümkün

reliability levels during the project phase, statistical methods in which uncertainties of load and resistance variables are considered, should be utilized. From the material point of view, the mostly utilized structures are the rubble mound revetments, which are preferred due to their economy (4). In spite of this, these structures are significantly expensive and the main damage mode that is considered in design phase is the protective armour layer. Using the reliability-based risk assessment model REBAD, in which the investment-maintenance optimisation could be achieved for various damage levels and failure modes, performed the reliability analysis of the Wiseman's Bridge revetment in UK.

In this model, the safety and serviceability of coastal structures are evaluated by modelling random resistance and load variables of the project with probability distributions at the limit state space (5). The serviceability "limit state" is implemented for the safety evaluations of rubble mound breakwaters, as the exceedance of the failure damage level may not result in complete breakdown of the structure, but an interruption in the achievement of its performance and functions (6). At the implementation phase of the model that can be employed both for design and safety evaluation intentions; the uncertainty sources that should be considered at the design are investigated by considering the coastal conditions of the Carmarthen sea region. The variation that depend on uncertainties, was affected the limit state ranges directly by using probability distribution parameters (variation coefficient, standard deviation, application range etc.)

2. RELIABILITY MODEL

The reliability of a structure depends upon the joint effect of resistance and loading conditions that may apply on the structure. The limit state function that will be obtained for an arbitrary failure mode involves the resistance and loading variables and these variables are considered as random. The primary variable vector $\{X\}$ indicates these random variables and the functional form of these basic variables consistent with the limit state is the failure function denoted by $g(X_1, X_2, \dots, X_n)=0$. Geometrically, the limit state equation is the failure surface, which separates the failure region ($g \leq 0$) from the safe region ($g > 0$).

In the reliability-based design and for the project evaluation of rubble mound structures, the Van der Meer limit state functions (7) that satisfies the equilibrium state of resistance and loading variables, are used. The safety of the structure can be assured by designating an admissible value of the failure probability (P_f) that is defined as follows (8):

where, $f_{xi}(x_i)$ is the joint probability density function of random variables and P_f is the exceedance probability of a particular damage level for rubble mound structures. On the other hand, since in practice it is not possible to

olmadığından (9) geliştirilen model içinde yıkım modu olasılıkları, yıkım yüzeyinin tasarım noktasındaki eğrilğine sahip ikinci dereceden (parabolik) bir polinom ile temsil edildiği İkinci Mertebeden Güvenirlik Metodu (IMGM) ile hesaplanmıştır

Modelde parabolik limit durum yüzeyi $g(\mathbf{Z})$, rassal değişkenlerin Rosenblatt transformasyonu sonucu ($\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Z}$) standart ve bağımsız hale dönüştürüldüğü normal uzayında, Van der Meer – sıçrayarak kırılan dalga yıkım modu fonksiyonu ile aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (10):

$$g(\mathbf{Z}) \approx a_0 + \sum_{i=1}^n b_i Z_i + \sum_{i=1}^n c_i Z_i^2 \quad [2]$$

burada, a_0, b_i , ve c_i ikinci dereceden polinomun, performans yüzey yaklaşımı (7) ile hesaplanmış regresyon katsayılarını, Z_i yıkım modu fonksiyonunun standart normal rassal değişkenlerini ve n de toplam rassal değişken sayısını belirtmektedir. Parabolik limit durum yüzeyinin tasarım noktasındaki (\mathbf{Z}^*) toplam pozitif eğrilikleri (K_s) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır:

determine the joint probability density function (9), in this model developed, the failure mode probabilities were calculated by the Second Order Reliability Method (SORM), where the failure surface was approximated by a quadratic (parabolic) polynomial having the identical curvature at design point.

In the model, the parabolic limit state surface $g(\mathbf{Z})$, where the random variables were transformed into standard independent parameters by Rosenblatt transformations ($\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Z}$) in the standard normal space, was expressed by using the plunging breaking type Van der Meer failure mode functions as follows (10):

where a_0, b_i , and c_i are the regression coefficients of the second-order polynomials calculated by using the response surface approach (7); Z_i are the standardized normal random variables of the failure function and n is the number of total random variables. The positive summations of the principal curvatures (K_s) of limit state surface at the design point (\mathbf{Z}^*) were determined by using the following expressions:

$$K_s = \frac{2}{|\nabla g|} \sum_{i=1}^n c_i \left[1 - \frac{1}{|\nabla g|^2} (b_i + 2c_i Z_i^*)^2 \right] \quad [3]$$

$$|\nabla g| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i + 2c_i Z_i^*)^2} \quad [4]$$

İkinci Mertebeden Güvenirlik İndeksi ise (β_{II}) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\beta_{II} = -\phi^{-1} \left[\phi(-\beta_I) \left(1 + \frac{\phi(\beta_I)}{R\phi(-\beta_I)} \right)^{\frac{n-1}{2} \left(1 + \frac{2K_s}{10(1+2\beta_I)} \right)} \right] \quad [5]$$

Yukarıdaki denklemde, R : ortalama eğrilik yarıçapı $R=(n-1)/K_s$, β_I : birinci mertebeden güvenirlik indeksi, $\beta_I = \mathbf{a}^T \mathbf{Z}^*$; Φ : standart normal dağılım fonksiyonu, ϕ : standart normal dağılım yoğunluk fonksiyonu, \mathbf{a} : tasarım noktasındaki öz vektörlerdir. Başka bir deyişle güvenirlik, standart uzaydaki yıkım yüzeyinin koordinat merkezine olan en kısa mesafesinin (tasarım noktası) bir fonksiyonudur.

3. MODELİN UYGULANMASI

REBAD modeli, Güneybatı Galler'de Carmarthen Körfezi'nde inşa edilen Wisemen's Bridge kıyı koruma yapısına uygulanmıştır (Şekil 1). Güvenirliğe dayalı REBAD modelinin uygulanmasındaki temel amaç, belirlenimci metodun yük parametrelerindeki değişkenliği hesaba katamaması ve ekonomik olmayan sonuçlar vermesidir. Yapının bulunduğu Carmarthen körfezinde, gel-git su düzeyinin kıyı yapılarının tasarımında önemli rol oynayan bir parametre olduğu ve

The Second-Order Reliability Index (β_{II}) was calculated as follows:

In the above equation, R : the average principal curvature radius of the failure surface, expressed as follows: $R=(n-1)/K_s$, β_I : the first order reliability index, $\beta_I = \mathbf{a}^T \mathbf{Z}^*$; Φ : the standard normal distribution function, ϕ : the standard normal probability density function, \mathbf{a} : the Eigen (directional) vectors at the design point. In other words, reliability is a function of the minimum distance between the coordinate centre of the standardized space and the design point on the failure surface.

3. APPLICATION OF THE MODEL

REBAD model was applied to the Wiseman's Bridge revetment that is located in the Carmarthen Bay, Southwest Wales (Figure 1). The fundamental aim for this application of the reliability based REBAD model was that, the deterministic model could not take the variations in the loading parameters and gave uneconomical solutions for the design. In the Carmarthen Bay, where the structure is located, the tidal range is a dominant factor in the design of coastal

gözlenen en yüksek düzeyinin Ortalama Su Seviyesi'nin (OSS) düzeyinde yaklaşık 5.9 m üzerine çıktığı ve kıyı tahkimat yapısının topuk su derinliğinin belirtilen durumda 0.5 m olduğu belirlenmiştir (11). Körfezde 50 yıllık yinelenme dönemine sahip fırtınaya bağlı su kabarması yaklaşık $S_k=2.0$ metredir (12).

Derin denizde, yine 50 yıllık yinelenme dönemine sahip dalga yükseklikleri, Atlantik Okyanusu'nda oluşan soluğan (ölü) dalgalarının etkideği $60^\circ-270^\circ$ (Kuzey'den saat yönünde) aralığında, ekstrem değer dalga istatistiklerinden 14.0 m olarak tahmin edilmiştir (13).

Caldey adasının 30 km güneyinde, yaklaşık 30 m su derinliğinde (OSS) alınan dalga ölçümleri ve Brawdy Kraliyet Hava Kuvvetleri Üssü tarafından ölçülen rüzgar verilerinden, açık deniz dalga iklimi belirlenmiştir. Rüzgar verileri, Doğu ve Batı-kuzeybatı etkin dalga kabarma yön aralıkları için, 1974-1983 yıllarını kapsamaktadır (13). St. Gowan Burnu açıklarında, Eylül 1992-Aralık 1995 tarihleri arasında alınan dalga ölçümlerinden, dalga enerjisinin %60'ından fazlasının, $210^\circ-270^\circ$ aralığından geldiği saptanmıştır. Elde edilen verilerden yıllık maksimum derin deniz dalga yüksekliklerinin 8.5m. ile 3m. aralığında olduğu saptanmıştır (14).

Carmarthen körfezinde, Ortalama Su Seviyesinin üzerinde (+OSS) $R_T=4.54$ m ile $R_T=5.91$ m aralığında değişen yüksek yarı dönemli gel-git rejimleri mevcuttur. Yörede yıllık belirgin tasarım dalga yüksekliği $H_s=3.0$ m olarak sapma (refraction), sığlaşma (shoaling) ve kırılma (breaking) oluşumlarını içeren dalga transformasyon çalışması sonucunda belirlenmiştir. Benzeşimde rassal olarak olasılık fonksiyonlarından 30000 defa yaratılan her gel-git, fırtına kabarması ve dalga yüksekliği kombinasyonu için, dalga transformasyonu lineer dalga teorisi kullanılarak, bu çalışmada geliştirilen bilgisayar programı ile yürütülmüştür. Bunun sonucu olarak, 30000 defa yaratılan her dalga ve gel-git kombinasyonu için, kırılma bölgesi dışında İrlanda Denizi'nden gelen dalgaların St. Gowan Burnu'ndan dolayı oluşan dalga dönmesi, körfezin batimetresinden dolayı meydana gelen sığlaşma ve sapma çalışmaları yürütülmektedir.

Bu çalışmalar kıyı koruma yapısına dalganın gel-git düzeyi yüzünden ulaşmadığı durumlar için de yapılmaktadır. Ancak bu durumda bilgisayar programında, yapı üzerine gelen bir yüklem olmamaktadır. Su seviyesinin yapının topuk seviyesinde yükselmeye başladığı zaman, kırılma kontrolü yapılmaktadır. Kırılma uzaklığı gözetilerek yapılan hesaplamalardan, Belirlenimci (deterministik) yaklaşımda proje dalga yüksekliği olarak belirlenen $H_s=3.0$ m'nin yapının topuğunda kırıldığı görülmektedir. Fırtına kaynaklı dalga kabarması ve 'gel' etkisinin çakışması sonucu topuk su derinliği bu durumda 2.5 m olmaktadır.

structures and the maximum tidal level observed was approximately 5.9 m above Mean Water Level (MWL), which corresponds to 0.5 m above the toe elevation of the structure (11). In the bay, the storm surge has a return period of 50 years and increases the sea level by approximately $S_s=2.0$ meters (12).

In deep water, the wave height with a return period of 50 years was predicted from the extreme value statistics as 14 m from the directions of 60° to 270° (clockwise from the North direction), which is the range effected by swell waves of the Atlantic Ocean (13).

The offshore wave climate of the site was predicted from the wave data taken at a location 30 km south of Caldey Island for *circa* 30 m water depth (MWL) and from the wind data measured for the years of 1974-1983 by the Brawdy Royal Aircraft Establishment considering the effective fetch directions between E and WNW (13). Wave data recorded at a location off St. Gowan's Head for the period of September 1992 - December 1995 indicated that over 60% of the wave energy came from the sector between 210° and 270° . Similarly, the deep-water annual maximum wave heights were hindcasted in the range of 8.5 m to 3 m (14).

The site has diurnal tidal cycles and Carmarthen Bay is subject to large tidal ranges extending from $R_T=4.54$ m to $R_T=5.91$ m +MWL (above Mean Water Level). The annual significant design wave height was determined as $H_s=3.0$ m from the wave transformation study which covered refraction, shoaling and breaking. The tidal range of the site, the storm surge and wave height combinations were randomly generated 30000 times from their probability distributions by the simulation and then the wave transformations were carried out by using the linear wave theory and the computer program developed in this study. As a result for the same number of simulations, waves approaching from the Irish Sea were exposed to diffraction studies due to the St. Gowan Head, shoaling and refraction calculations due to the bathymetry in the bay.

These studies were also carried out for the circumstances where there is no wave action on the revetment, as the waves may not reach the structure due to tidal variations. For this case, the wave loading is not considered in the computer program. When the water level arise at the toe of the structure a wave breaking control will be executed by considering the breaking travel distance.

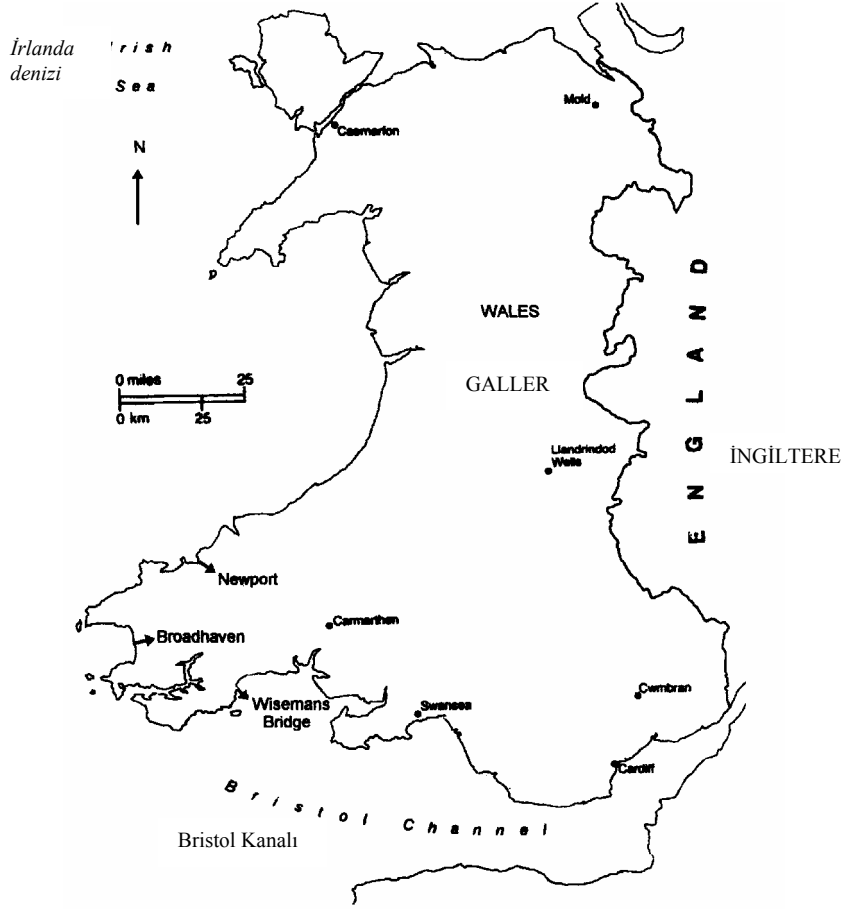


Figure 1. Location of revetments in Wales (UK) for the model applications

Şekil 1.: Modelin uygulandığı Galler (Birleşik Krallık) kıyı koruma yapıları.

Bu çalışmalar kıyı koruma yapısına dalganın gel-git düzeyi yüzünden ulaşmadığı durumlar için de yapılmaktadır. Ancak bu durumda bilgisayar programında, yapı üzerine gelen bir yüklem olmamaktadır. Su seviyesinin yapının topuk seviyesinde yükselmeye başladığı zaman, kırılma kontrolü yapılmaktadır. Kırılma uzaklığı gözetilerek yapılan hesaplamalardan, Belirlenimci (deterministik) yaklaşımda proje dalga yüksekliği olarak belirlenen $H_s=3.0$ m'nin yapının topuğunda kırıldığı görülmektedir. Fırtına kaynaklı dalga kabarması ve 'gel' etkisinin çakışması sonucu topuk su derinliği bu durumda 2.5 m olmaktadır.

Hudson yarı-deneysel denkleminin kullanıldığı belirlenimci yöntemle tasarlanmış ve 1998'de inşaatı tamamlanmış olan yapının, koruma tabakası şev eğim açısı $\theta=45^\circ$ dir. Anroşman olarak, $HS=(0-5)$ hasar seviyesine (Hudson hasarsızlık seviyesi kriteri) göre hesaplanmış ve rasgele yerleştirilmiş 1.7mx1mx2m boyutlarında, yaklaşık $W_{50}=8.7$ ton ağırlığındaki yeşil plutonik (metamorfik) kayalar kullanılmıştır (Şekil 2 ve Tablo 1). Ancak yapının inşaatından sonra koruduğu otel binasının önünde, beklenmeyen ölçüde büyük oranda ($HS \approx \%11$) hasar görmesi üzerine (Şekil 3), yapının değişik kesitlerinde onarım çalışmalarına ihtiyaç duyulmuş ve REBAD güvenilirlik analizi yürütülmüştür.

From this study it is determined that, the annual significant design wave height $H_s=3.0$ m is breaking at the toe of the structure. When the tidal level increase is coinciding with the storm surge, then the water level at the toe of the structure will be 2.5 m during breaking.

In the deterministic design, where the semi-empirical Hudson failure function was utilized, the revetment has an armour layer inclination angle of $\theta=45^\circ$. The $DL=(0-5)\%$ damage level (Hudson no-damage level condition) was accepted for the rock layer which was constructed in the year of 1998. The armour layer constituted randomly placed, green plutonic (metamorphic) rocks of 1.7mx1mx2m size, i.e. approximately $W_{50}=8.7$ tonnes (Figure 2 and Table 1). A notable but unexpected damage of approximately $DL \approx 11\%$ was already observed in front of the hotel building (Figure 3) and repair work was consequently needed in various sections of the structure. Therefore, the REBAD reliability analysis was carried out for the revetment.

Table 1. Deterministic design characteristics of the revetment.**Tablo 1.** Yapının belirlenimci tasarım özellikleri.

Design Variable /Tasarım Değişkeni (X_i)	Mean Value /Ortalama Değer
Nominal stone diameter / Nominal taş çapı D_{n50} (m)	1.50
Weight W_{50} (tonnes) /Ağırlık W_{50} (ton)	8.7
Design wave height / Tasarım dalga yüksekliği H_d (m)	3.0
Tidal elevation (+MWL) / Gel-git yüksekliği (+OSS) R_T (m)	5.9
Storm surge / Fırtına kabarması S_s (m)	2.0
Relative density / Bağlı yoğunluk Δ_p	1.63
Height of structure / Yapının yüksekliği (m)	7
Structure slope / Yapının eğimi $\cot\theta$	1

Güvenirlğe dayalı çalışmada yapının limit durumdaki güvenirlği, n-boyutlu limit durum uzayında koordinat sisteminin merkezinden yıkılma yüzeyi üzerindeki tasarım noktasına olan en kısa uzaklık ile tanımlanmıştır. Model gel-git ve dalga kabarması sonucu oluşan su seviye değişmelerini de hesaba katabilmek için, güvenirlk analizini su seviyesi rassal olarak yapının topuğuna eriştiği zaman yürütmektedir. Başka bir deyişle önce Monte Carlo (MC) simülasyonu (15) ile prototip koşulları benzeştirilmektedir. Yani tasarım değişkenlerine atanan olasılık dağılımlarından, gel-git ve dalga kabarması hesaplanmaktadır (16). Böylece, körefezdeki su seviyesi değişimi bilgisayarda doğadaki durumu yansıtabilecek şekilde benzeştirilmektedir. Eğer su seviyesi yapının topuğuna erişiyorsa, Gumbel olasılık dağılımından rassal olarak yaratılan fırtına dalgası için kırılma kontrolü yapılmaktadır. Benzeşim, hata kriteri sağlanıncaya kadar oldukça yüksek sayıdaki (30000 – 50000) bilgisayar deneyleri ile, doğada yapı için mevcut kritik durumların (topuk su seviyesi + dalga) oluşma olasılığını hesaplamaktadır. Yapıdaki hasar düzeyinin olasılığı, kritik durum ve limit durum olasılıklarının bileşimi olarak belirlenmektedir. Tasarımda kullanılan rassal değişkenler, bu çalışmada korelasyonlu olasılık dağılımları ile modellenmiştir (Tablo 2). MC-İMG (III. Düzey Güvenirlk Yöntemi) benzeşimlerinde kullanılan bu tablodaki rassal değişkenler ve olasılık dağılımları rüzgar, dalga, gel-git ve fırtına kabarması verilerinin istatistiksel analizi sonucunda bulunmuştur. Bu geniş tabanlı veri kaynakları, İngiliz Donanması, deniz araştırma enstitüleri (12), Scarweather dalgaölçeri (51°27'N-03°55'W koordinatlarında), Skomer dalgaölçeri (51°48'20"N-05° 20'00"W) (13), kıyı çizgisi ve çevresel araştırma raporlarına (14) dayanmaktadır. Deniz tabanı topoğrafyası verileri İngiliz Hidrografi Ofisi'nden (E8676, M1535, M2176 numaralı haritalar) alınmıştır (11)

In the reliability-based study, the safety of the structure at the limit state was defined as the minimum distance between the center of the coordinate system of n-dimensional limit state space and the design point on the failure surface. In order to include the variations in the water level due to tide and storm surge, the model executes the reliability analysis when the randomly generated water elevation reaches the toe datum of the structure. In other words, Monte Carlo (MC) simulation (15) will firstly simulate the prototype conditions; tidal levels and storm surges are simultaneously calculated from the probability distributions fitted to these random variables (16). Hence, the water level changes in the bay can be simulated similar to their natural occurrence. If the water elevation reaches the structure, then the wave breaking control will be executed for the wave height randomly generated from the Gumbel probability distribution. The simulation will calculate the occurrence probability of critical conditions (water elevation at the toe + waves) in nature for the revetment by a relatively high number (30000-50000) of computer experiments until the error criteria will be satisfied. The damage probability of the structure is determined as the joint probabilities of this critical condition in nature and the structural limit state. The tidal range of the site and the storm surge were randomly generated 30000 times from their probability distributions by the simulation. The joint probability considered both the occurrence probability of the design water level in front of the structure and the structural performance under the wave action superposed. In the application of MC-SORM simulations (Level III), the probability distributions of random variables (Table 2) were obtained from the statistical analysis of wind, wave, tide and storm surge data obtained by the Navy, oceanographic institutions (12), Scarweather wave-rider buoy (51°27'N-03°55'W), Skomer wave buoy (51°48'20"N-05° 20'00"W) (13), studies on shoreline management, environmental assessment and wave prediction, covering an extensive data base of research (14). The bathymetric data of sites were obtained from the Hydrographic Office (surveys of E8676, M1535, M2176). The structural characteristics were assessed from the shoreline and sea defense management studies of Environment Agency (15) and site observations.

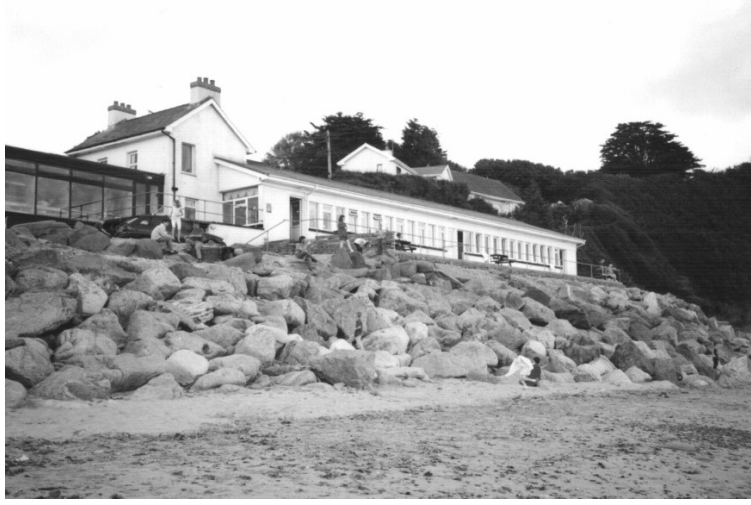


Figure 2. General view of Wiseman's Bridge revetment.
Şekil 2. Wiseman's Bridge kıyı koruma yapısının genel görünüşü.

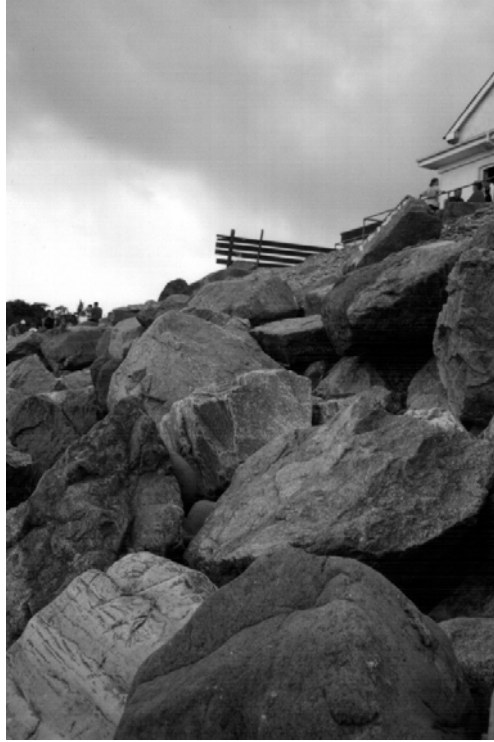


Figure 3. Damage encountered at Wiseman's Bridge revetment in front of the hotel restaurant.
Şekil 3. Wiseman's Bridge kıyı koruma yapısında otel lokantası önünde oluşan hasar.

Kıyı yapısının özellikleri, saha çalışmaları ve Galler Çevre Ajansı raporları (15) ile belirlenmiştir. Yapının güvenilirlik analizinden elde edilen değişik hasar düzeylerinin toplam aşılma olasılıkları Şekil (4-a)'da sunulmaktadır.

Yapının L=50 yıllık tasarım ömründe, S=2 (DL=0-5%) 'hasarsızlık' düzeyinin aşılması kesindir ($P_e=99.79\%$). $S_f=18$ (DL = 40-50%) olan yıkılma hasar düzeyinin ise 25 yılda aşılma olasılığı $P_f=65.7\%$

The cumulative exceedance probabilities of various damage levels obtained from the reliability study are shown in Figure (4-a). The exceedance of S=2 (DL=0-5%) damage level in L=50 years of lifetime was confirmed, i.e. the probability was $P_e=99.79\%$ for the "no damage level"(Figure 4-a).

The probability of exceeding the limit state associated with the failure damage level of $S_f=18$ (DL = 40-50%) in 25 years was determined for this revetment as $P_e=65.7\%$,

olduğundan, yapının yarı ömrü içinde yüksek onarım maliyetleri gerektirdiği anlaşılmaktadır.

Belirlemci tasarım yöntemine göre projelendirilen yapı, REBAD modeli ile güvenli bulunmamış ve prototip hasarları da REBAD sonuçlarını desteklemiştir. Yapının tasarım ömrü içinde limit durumdaki toplam aşılma olasılıkları, özellikle düşük hasar düzeyleri için, kara yapıları ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Bu durum deniz yapılarında, yapının güvenilirliğini etkileyen yoğun risk etkenlerinin bulunduğunu göstermektedir. Bu etkenlerden en önemlisi, ekstrem olasılık fonksiyonu ile modellenen tasarım dalgasıdır, çünkü bu parametre deneysel limit durum fonksiyonlarında temel yük değişkenidir. Bu önemli değişkenin, çok sayıdaki güvenilir dalga ölçüm verilerinden istatistiksel olarak hesaplanması gereklidir.

Yapının limit durumdaki performansının Monte Carlo yöntemi ile benzeşimi belirsizliklerin dağılımını, rassal olarak hesaplanan yıkım yüzeyi değerlerinin bir fonksiyonu olarak vermektedir (Şekil 4-b). Şekil yapılan her benzeşim için hesaplanan limit durum fonksiyon değerine karşılık gelen oluşma olasılığını yansıtmaktadır. Limit durum fonksiyonun minimum ve maksimum değerleri arasındaki farkın fazla olması, etkileyen yük parametrelerinin ve yapının dayanım değişkenlerinin geniş aralıklarda değerler alabileceğini göstermektedir. Yani yapıya etkileyen değişik yük kombinasyonlarının ve yapının bu yükler altındaki davranışlarının tam olarak belirlenemediği durumlarda, tasarımdaki belirsizlik faktörleri artmaktadır. Böylece tasarımda, parametreler oluşma olasılıklarını veren dağılımlarla yansıtılmakta ve sonuçta şekilde verilen limit durum dağılımı elde edilmektedir. Benzeşim sonucunda elde edilen yıkım modu frekans dağılımı, Şekil (4-b)'de sürekli çizgi ile gösterilen Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonuna uymaktadır. Başka bir deyişle, yapının limit durumdaki davranışı da uygun bir olasılık fonksiyonu ile modellenmektedir. Weibull olasılık dağılımının yerleşim, biçim ve oran parametreleri sırasıyla $a=-6.58$, $b=11.08$ ve $c=10.07$ olarak hesaplanmıştır (Tablo 3). Parametreleri belirlenen olasılık dağılımı, benzeşim sonucu oluşan limit durum olasılık değerlerini teorik olarak belirli bir uygunlukta temsil etmektedir. Limit durum benzeşimlerinin AMD K6-2⁺ (3-D) işlemcili dizüstü bilgisayardaki Merkezi İşlem Birimi (CPU) süresi, 30000 rassal denemede kabul edilebilir $\varepsilon=1\%$ 'lik ortalama hata yüzdesi için 2 dakika 10 saniyedir. Yüksek sayıdaki benzeşimlerin, dizüstü bilgisayarda oldukça kısa bir sürede gerçekleştirilmesi, önerilen yöntemin uygulamada kolaylıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Benzeşim sonucu, Van der Meer S=2 (DL=0-5%) hasarsızlık seviyesinin yıllık aşılma olasılığı $P_e=11.64\%$ olarak belirlenmiştir. Yıkım yüzeyi değerleri ortalama değer normalizasyonundan geri dönüşümün sonucunda, $g_{min}=-5.79$ m ve $g_{maks}=13.85$ m aralığında ve yük değişkeni ile aynı birimde elde edilmektedir. Ortalama değeri $\mu_g=3.41$ m. olan yıkım yüzeyi aralığının genişliği, yük değişkenlerinde yoğunlaşan belirsizliğin bir sonucudur (Tablo 3).

Van der Meer yıkım fonksiyonu kullanılarak

signifying the high probability of extensive maintenance works being implemented within 25 years (half lifetime period).

The Wiseman's Bridge revetment designed by using the deterministic approach was considered to be unsafe by the REBAD model, as its serviceability limit state will be attained in 25 years, which corresponds to a high failure probability when compared to land structures. This will indicate the existence of relatively high risk factors and uncertainty sources, which affect the reliability of coastal structures. The main risk factor for this case is the design wave height that is modeled by extreme value probability distributions, because the wave height is the main load parameter in the empirical limit state functions. This parameter should be predicted from a reliable database by statistical analysis.

The simulation of the structural performance at the limit-state gave the variation of uncertainties as a dispersion function of the randomly evaluated performance function values (Figure 4-b). This figure shows the calculated limit state function and its occurrence probability for each of the simulation epoch. The widespread range between the minimum and maximum values of the limit state function indicates that, the loading and resistance parameters of the structure can also attain a broad range of values. In other words, the uncertainty in the design parameters significantly increased, when the loading variables cannot be estimated with a specific accuracy. This will affect the statistical parameters of the probability distributions that model the random variables and the limit state of the structure. In Figure (4-b) the continuous line indicates the Weibull probability density function fitted to the failure function simulation values. The position, shape and ratio parameters of this distribution are $a=-6.58$, $b=11.08$ and $c=10.07$, respectively (Table 3). The Weibull distribution represents with a specified accuracy the values of the limit state function. The simulation of the limit state was repeated for 30000 trials performed for an average CPU (Central Processing Unit) time of 2 minutes and 10 seconds. The standard mean error of simulation was $\varepsilon=1\%$ on a portable computer having an AMD K6-2⁺ (3-D) processor. The CPU time is relatively short for the large number of simulations performed on a portable computer, enabling the efficient utilization of the method in everyday design practice. At the end of the simulations, the annual exceedance probability for the S=2 (DL=0-5%) no-damage level of Van der Meer was calculated as $P_e=11.64\%$. The scatter range of the randomly generated values of the failure function, which was obtained by back-normalization process, was between $g_{min}=-5.79$ m and $g_{maks}=13.85$ m, signifying the effect of uncertainties on the limit-state having a mean value of $\mu_g=3.41$ m (Table 3).

The Wiseman's Bridge revetment designed by using the deterministic approach was considered to be unsafe by the REBAD model in its design life of L=50 years. The revetment is exposed with a high probability to extensive maintenance works being implemented within 25 years (half lifetime period). The structure cannot serve its

gerçekleştirilen güvenilirlik analizinin sonucu olarak, Wiseman's Bridge kıyı koruma yapısı L=50 yıllık tasarım ömrü içinde "güvenilir" bulunmamıştır. Yapının 25 yıl içinde dalga kuvvetlerinin sürekli etkisi altında, fonksiyonlarını sürdürmeyecek ölçüde hasar görmesi olasılığı oldukça yüksektir. Bu sürenin sonunda, yapının inşaat maliyeti oranında onarım masrafı gerektireceği görülmektedir. İnşaatın bitirilmesinden sonraki beş yıllık sürede otelin lokantasının ön kısmındaki kesitte (Şekil 3), belirlenimci tasarıma göre beklenmeyecek ölçüde (%11 düzeyinde) hasarın oluşması ve değişik kesitlerde onarım ihtiyacının belirlenmesi, REBAD'ın prototip koşullarını modelleyebildiğini göstermektedir. Model koruma tabakasının, nominal medyan dane çapı $D_{n50}=2.65$ m ve ağırlığı $W_{50}=30$ ton olan taşlarla onarılmasını öngörmektedir. Önerilen anroşman ile, yıkılma hasar düzeyinin L=50 yıl içindeki aşılma olasılığı $P_f=20\%$ 'ye düşürülmektedir.

function to protect the nearby properties and extensive maintenance works will be required within the specified time period. A notable damage of approximately 11% was already observed in front of the restaurant of the hotel building after 5 years from its construction (Figure 3), which could not be predicted by deterministic and repair work was consequently needed in various sections of the structure. The REBAD model suggests that, the maintenance of the structure would be carried out by armor stones having a median nominal diameter of $D_{n50}= 2.65$ and a median weight of $W_{50}= 30$ tones. With the suggested rubble mound armor layer, the exceedance probability of the failure level of the structure will be decreased to $P_f= 20\%$ in L=50 years.

Table 2. Distribution parameters used in reliability analysis (Van der Meer limit state function).

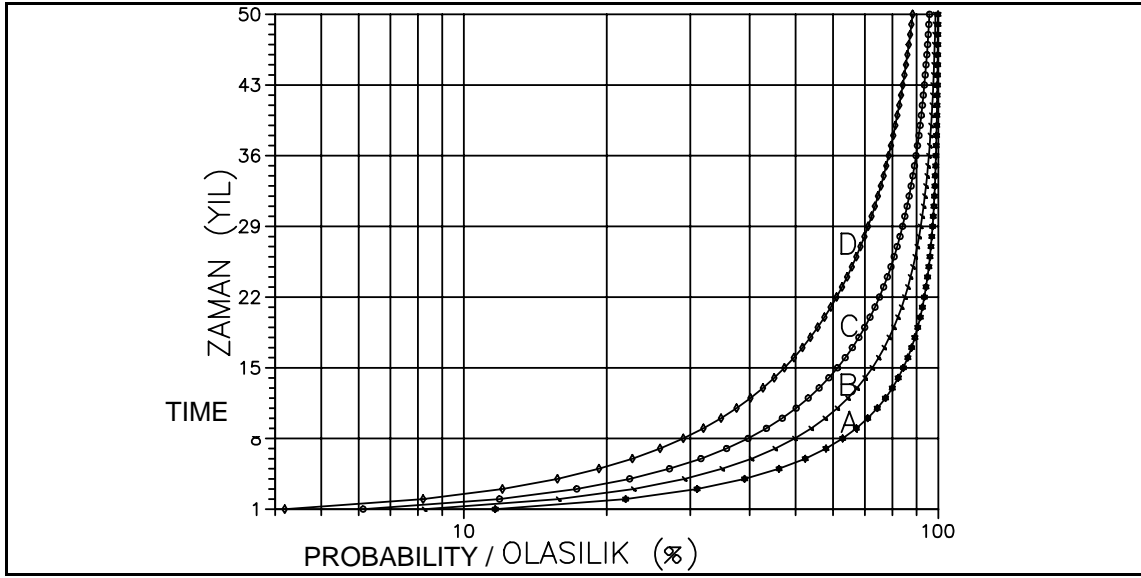
Tablo 2. Güvenirlik analizinde (Van der Meer limit durum fonksiyonu) kullanılan dağılım parametreleri.

X_i	Distribution/ Dağılım	Parameter/ Parametre
Y	Beta	a=3; b=2; c=1.5
D_{n50}	Beta	a=3.5; b=1.5; c=2
H_d	Gumbel (FTT- I)	a=3.0; c=0.30
R_T	Triangular/ Üçgensel	mode=2.95
L_z	Weibull	b=40.0 ; c=2.0
N	Weibull	b=800.0; c=2.0
$Cot\theta$	Beta	a=3 ; b=1.5 ; c=1
Δ_p	Normal	$\mu_{xi}=1.63$; $\sigma_{xi}=0.15$
P	Normal	$\mu=0.4$

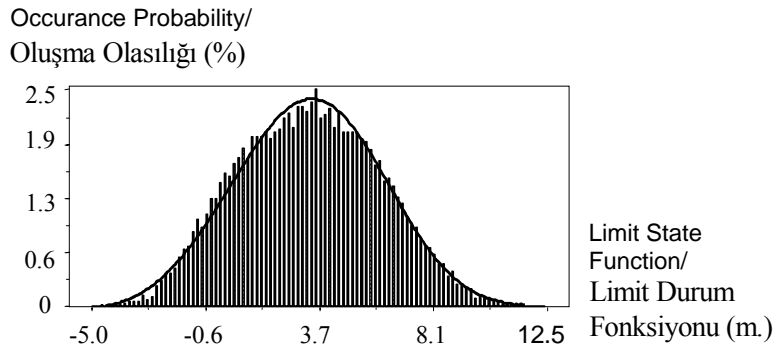
Table 3. Simulation characteristics of limit state function.

Tablo 3. Limit durum fonksiyonunun benzeşim özellikleri.

Characteristics /Özellik	Value / Değer
The fitted probability distribution of limit state function (g)/ Limit durum fonksiyonuna (g) atanan olasılık dağılımı	Weibull
Distribution parameters / Dağılım parametreleri	a=-6.6 b=11.1 c=10.1
Mean / Ortalama (μ_g m)	3.4
Coefficient of Variation / Değişkenlik katsayısı ($\delta\%$)	81
Annual exceedance probability of S=2 damage level P_e (%) / S=2 hasar düzeyinin yıllık aşılma olasılığı P_e (%)	11.64
Minimum of simulation range / Benzeşim aralığının minimum değeri (m)	-5.79
Maximum of simulation range /Benzeşim aralığının maksimum değeri (m)	13.85



(a)



(b)

Figure 4. (a) Cumulative exceedance probabilities of Van der Meer damage levels A: S=2; B: S=6; C: S=10; D: S=18. (b) Frequency distribution of limit state simulation.

Şekil 4. (a) Van der Meer hasar düzeylerinin toplam aşılma olasılıkları A: S=2; B:S=6; C: S=10; D: S=18. (b) Limit durum benzeşiminin frekans dağılımı.

4. SONUÇLAR

Kıyı yapılarında güvenilirlik analizini içeren REBAD risk tahmin modeli, yapının ekonomik ömrü içinde hasar riskin saptanmasında temel oluşturmakta ve zaman, maliyet ve risk bilgilerinin bir bütün olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Güvenirlik modeli farklı hasar seviyelerini ve yıkılma biçimlerini göz önüne alarak yapının, yatırım - onarım maliyeti optimizasyonu ile projelendirilmesini sağlamaktadır.

Önerilen yöntem ile, rassal yük ve dayanım değişkenleri korelasyonlu olasılık dağılımları ile modellenmekte ve güneybatı Galler kıyısında (İngiltere) bulunan kıyı koruma yapısının güvenilirliği, tasarım noktasında yıkım yüzeyi ile eş eğriliğe sahip ikinci dereceden polinomların kullanıldığı İkinci Mertebeden Güvenirlik Metodu (İMG) ile hesaplanmaktadır. Gelgit etkisinin önemli olduğu yapılarda ise, ilk aşamada Monte Carlo (MC) benzeşimi kullanılmaktadır. Olasılık

4. CONCLUSIONS

The REBAD risk assessment model that includes the reliability analysis of coastal structures, determines the basis for the damage risk evaluation during the economical lifetime of the structure and enables the joint assessment of time, cost and risk information. This facilitates the designer to perform a cost optimisation project study, in which the total cost composed of initial and maintenance costs spent over the economical lifetime can be minimized, results in an economical design associated with low damage risk and prevents design variations observed.

In this study with the recommended methodology, the safety of a revetment constructed on the southwest coast of Wales, UK was investigated by utilizing the risk assessment model, where the Monte Carlo simulation generated the design conditions (toe water elevation + wave) and the Second Order Reliability

dağılımlarından rassal olarak gel-git ve dalga kabarması sonucu değişen su seviyeleri oluşturulmakta, seviyenin yapının topuğuna erişmesi durumunda, kırılma kriteri dikkate alınarak rassal dalga oluşturulmaktadır. Böylece, bilgisayar deneyler ile, tasarım koşulunun (topuk su seviyesi + dalga) oluşma olasılığı hesaplanmaktadır. Yapıdaki hasar düzeyinin oluşma olasılığı ise, tasarım koşulunun oluşması ve limit durum olasılıklarının bileşimi olarak belirlenmektedir.

REBAD modelinin rassal değişkenleri bulanık mantık üye fonksiyonları ile temsil etme ve hidrolik model verileri kullanarak tasarımda yapay sınırları geri besleme yöntemi ile eğitime seçenekleri de mevcuttur. Ancak, kıyı yapılarının tasarımında geliştirilen teorik modeller deneysel verileri temel aldıklarından yapı güvenliğinin, REBAD ve hidrolik model deney sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Royal Society of London ve Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK-ESEP) tarafından desteklenmiştir.

SEMBOLLER

D_{n50}	:Koruyucu tabaka nominal taş çapı
FTT-1	:Fisher-Tippett Tip 1 (Gumbel) olasılık dağılımı
g	:Yıkılma (limit durum) fonksiyonu
H_d	:Tasarım belirgin dalga yüksekliği
P_f	:Yıkılma hasar seviyesinin geçilme olasılığı
S	:Van der Meer hasar seviyesi
S_f	:Yıkılma halinde hasar seviyesi
W_{50}	:Medyan cinsinden koruyucu tabaka taş ağırlığı
X_i	:Temel değişken
Y_i	:Belirsizlik değişkeni
Z	:Normalize uzayda ana değişken vektörü
β	:Güvenlilik indeksi
θ	:Koruyucu tabaka şev eğimi
Δ_p	:Koruyucu tabakadaki taşın bağıl yoğunluğu

Method (SORM), where the failure surface was approximated by a quadratic polynomial having the identical curvature at design point, determined the structural safety at the limit state. The tidal range, the storm surge and wave height combinations are randomly generated from their correlated probability distributions by the simulation and then the wave transformations were carried out by considering the breaking criteria. The joint probability considered both the occurrence probability of the design water level in front of the structure and the structural performance under the wave action superposed.

The REBAD model also includes the fuzzy logic and artificial neural network with back propagation learning algorithm modules in order to have the advantage of robustness in computations. On the other hand, it is recommended to carry out hydraulic model tests to compare the REBAD model results for the reliability evaluations of structures, since the theoretical models utilized for the design of coastal structures are generally based on experimental studies.

ACKNOWLEDGMENT

The financial support for this research was in part by the Royal Society of London and by the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TÜBİTAK-ESEP), which is gratefully acknowledged.

NOTATION

D_{n50}	:Nominal diameter of armour rock
FTT-1	:Fisher-Tippett Type 1 probability distribution
g	:Failure (limit state) function
H_d	:Significant design wave height
P_f	:Exceedance probability of failure damage level
S	:Van der Meer damage level
S_f	:Damage level at failure
W_{50}	:Median weight of the armour layer stone
X_i	:Basic variable
Y_i	:Uncertainty variable
Z	:Primary variable vector in the normalized space
β	:Reliability index
θ	:Angle of armour layer slope
Δ_p	:Relative density of armour layer stone

KAYNAKLAR/ REFERENCES

1. Balas, C.E., "A Risk Management Model for Coastal Projects", PhD Thesis, *Middle East Technical University*, Ankara, Turkey (1998).
2. Balas C.E., Hapoğlu H., "Risk Management of Breakwaters: A Case Study of Finike Yacht Harbor", *Ocean Cities 95 Conference*, 317-320, 20-23 November, Monaco (1995).
3. Balas C.E., Ergin A., Yüçemen S.M., "Comparison of the Reliability-Based and Deterministic Design Procedures for Rubble Mound Breakwaters", *Proceedings of the Second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 95)*, 3, 1767-1782, 24-27 November, Spain (1995).
4. Ergin A., Balas C.E., "Implementation of a Reliability-Based Design Model in Turkey", *Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Proceedings on CD-ROM*, 98-1351, 5-9 July, Portugal (1998).

5. Williams A.T., Davies P., Ergin A., Balas C.E., "Coastal Recession and the Reliability of Planned Responses: Colhuw Beach", The Glamorgan Heritage Coast, Wales, UK, *Journal of Coastal Research*, SI 26, 72-79 (1998).
6. Ergin A., Balas C.E., "Failure Mode Response Functions in Reliability-Based Design of Rubble Mound Breakwaters", *Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE'97, 3, 861-868, 25-30 May, USA (1997).
7. Van der Meer, J.W., "Deterministic and probabilistic design of Breakwater Armour Layers", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE., 114, 1, 66-80 (1988).
8. Burcharth, H.F., "Reliability and Optimization of Structural Systems", *Proceedings of the Sixth IFIP WG7.5 Conf. on Reliability and Optimization of Structural Systems* (1994).
9. PIANC, "Analyses of Rubble Mound Breakwaters", *Permanent International Association of Navigation Congresses*, Working Group No: 12, 78/79, Belgium, (1992).
10. Balas C.E., Ergin A., "A sensitivity study for the second order reliability based design model of rubble mound breakwaters", *J. Coastal Engineering*, 42, 1, 57-86 (2000).
11. HN, "Hydrographer of the Navy"; *Admiralty Tide Tables*, 1, UK (1999).
12. CCC, *Carmarthenshire County Council; Carmarthen Bay Shoreline Management Plan*, 10-25, *Shoreline Management Partnership*, UK (1999).
13. PCC, *Pembrokeshire County Council; Milford Haven Shoreline Management Plan*, 20-30, *Posford Duvivier Ltd.*, UK (1999).
14. CCC, "Carmarthenshire County Council; Carmarthen Bay Coastal Study", Stage III, 5-21, *British Maritime Technology*, UK (1989).
15. Madsen, H.O., Krenk, S. and Lind, N.C.. *Methods of Structural Safety*, **Prentice-Hall, Inc.**, New Jersey, pp. 71-125 (1986).
16. Balas, C.E.; "Reliability - based Risk Assessment in Coastal Projects: A case study in Turkey", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE (2002).

Received/ Geliş Tarihi: 14.03.2003 Accepted/Kabul Tarihi: 07.08.2003