

Sıkıştırılabilir Algılama ile Verimli Dalga Taşması Ölçümleri için Hesaplamalı İstatistiksel Analizler

Ali Rıza ALAN^{1*}, Cihan BAYINDIR²

¹ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*¹ aliriza.alan@bau.edu.tr, ² cbayindir@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 06/04/2025;

Kabul/Accepted: 17/09/2025)

Öz: Dalga taşması (wave overtopping) ve yıkamasının (overwash) analizi, kıyı yapıları ve bölgelerine gelebilecek zararı önlemek için esastır. Bu konu hakkında literatürde günümüz araştırmalarına ışık tutan birçok çalışma bulunmaktadır. Dalga taşması ve yıkaması modelleme yöntemleri, esas olarak taşma parametrelerinin temel girdiler olarak tahmin edilmesine ve üretilmesine dayanmaktadır. Kullanılan mevcut yöntemler büyük alan verilerinin değerlendirilmesi için yetersiz ve verimsizdir. Bu verilerin etkili algılama teknikleriyle kaydedilmesi ve analiz edilmesi, kıyı afetlerinin felaket sonuçlarının gözlenmesi, değerlendirilmesi ve önlenmesi için esas teşkil etmektedir. Bu amaçla, yeni algoritmalar geliştirilmeli, uygulanmalı ve test edilmelidir. Sıkıştırılabilir algılama (SA) (Compressive sensing (CS)) tekniği, kesin bir geri çatma gerçekleştirirken çok daha az ölçüm kullandığından klasik algılama yaklaşımlarından çok daha verimlidir. Bu makalede, kıyı alanları için dalga tırmanması (wave runup), taşması ve yıkamasının tahmini ve analizi için SA'nın olası kullanımı araştırılmıştır. Hesaplamalı ve kuramsal tekniklerle oluşturulan dalga taşması ve yıkaması zaman serisi veri kümelerini kullanarak, SA'nın kıyı alanlarında dalga taşması ve yıkamasının ölçülmesi, tahmini ve analizi için güçlü bir araç olarak kullanılabileceği ve kıyı yapılarının sağlığının izlenmesinde kritik bir araç olabileceği gösterilmiştir. Sonuçlarımız tartışılmış ve bunların önemi ile olası kullanım alanları hakkında yorumlar yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dalga tırmanması, dalga taşması, dalga yıkaması, sıkıştırılabilir algılama.

Computational Statistical Analyses for Efficient Wave Inundation Measurements with Compressive Sensing

Abstract: It is crucial to analyze wave overtopping and overwash in order to protect coastal areas and infrastructure. The literature has a large number of studies that provide insight into the state of this field's study. The estimation and generation of overtopping parameters as fundamental inputs form the basis of wave overtopping and overwash modeling techniques. The current methods used are inadequate and inefficient for the evaluation of large-area data. Effective sensing techniques must be used to record and analyze these data in order to observe, assess, and avert the devastating effects of coastal disasters. New algorithms should be created, performed, and tested for this reason. Compressive sensing (CS) technique is much more efficient than classical sensing approaches since it uses much fewer measurements while performing a precise reconstruction. This work examines the potential application of the CS for the practical prediction and evaluation of wave runup, overtopping, and overwash in coastal locations. Utilizing wave overtopping and overwash time series datasets generated with computational and theoretical techniques, it is demonstrated that how CS may be applied as a potent tool for structural health monitoring and forecasting, examination, and assessment of wave overtopping and overwash in coastal regions. Our results are discussed and comments on their significance and possible applications are made.

Key words: Wave runup, wave overtopping, wave overwash, compressive sensing.

1. Giriş

Günümüzde insan nüfusunun büyük çoğunluğu ekonomik ve insani nedenlerle kıyı alanlarında yaşamaktadır. Bu bağlamda kıyı alanlarının yönetimi, düzenlenmesi ve korunması insanların ideal bir şekilde hayatlarını sürdürebilmeleri için son derece gereklidir. Kıyı alanlarını koruyan yapıların işlevlerini yerine getiremediği bazı durumlarda hem kıyı alanları hem de orada yaşayan insanlar için olumsuz durumlar ortaya çıkmaktadır. Dalga taşması ve dalga yıkaması bu durumların en önemlilerindendir. Dalga tırmanması nedeniyle bir kıyı duvarı, set, dalgakıran vb. kıyı yapılarının tepesi üzerinden suyun akması olayına dalga taşması [1-12], akan suyun bir kumsalın tepesi üzerinden su ve tortu taşması ise dalga yıkaması olarak tanımlanmaktadır [1-12]. Dalga taşması sadece küçük binaların çökmesi ve insanların sel sularında boğulması gibi felaket sonuçlara yol açmakla kalmaz,

* Sorumlu yazar: aliriza.alan@bau.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-0243-9493, ² 0000-0002-3654-0469

aynı zamanda civardaki karayolu ve hatta demir yolu için de ciddi tehlikeler yaratabilir [1-12]. Dalga yıkaması ekonomik yönden gelişmiş bölgelerde tehlikelidir, çünkü kumsal yüzünün aşınması fırtınadan sonra bu bölgeleri savunmasız bırakacak ve bu bölgelerdeki altyapı ve üstyapı zarar görecektir [1-12]. Önemleri nedeniyle, bu konular hakkında bugüne kadar birçok çalışma yürütülmüştür [1-12]. [2, 9]'da farklı kumul geometrileri için kumul profili oluşumu ve yıkama taşınım oranları ölçülmüştür. [3]'te kavramsal tasarım formüllerine odaklanılarak eğimli tahkimat duvarı ve deniz duvarı gibi setler ve benzeri yapılar üzerinde dalga tırmanması ve dalga taşmasına ilişkin döneminin yeni elde edilen sonuçları özetlenmektedir. [4]'te dalga ortalama taşıma süresi, göreceli toplam taşıma süresi, taşıma asimetrisi, ortalama maksimum debi ve ortalama anlık debi gibi çeşitli yeni parametreler tanımlanıp formüle edilmiş ve taşıma debisinin parametrelendirilmesinde, dalga periyodunun etkilerini de hesaba katan bir eşdeğer eğim tanımlamak için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. [5]'te XBeach ve IH2VOF numerik modelleri ile Mase formülleri birleştirilerek bir deniz duvarında dalga taşması ele alınmıştır. [6]'da dalga taşması ve kıyı yapılarının tepe seviyesi tasarımıyla ilgili sorunlar açıklanmış ve genel bir tahmin yöntemi geliştirilmiştir. [7]'de farklı dalga yıkaması morfolojilerindeki yıkama süreçlerinin tortul dinamiklerini açıklayan ve fırtına dışı dalga yıkaması oluşumuna yol açan faktörleri belirleyen saha verileri sunulmuştur. [8]'de kıyılarındaki dalga yıkaması için bilgi durumu ve hesaplama yeteneği hakkında eleştirel bir inceleme sunulmuştur. [10]'da Delta dalga kanalında gerçekleştirilen geniş ölçekli BARDEX deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, dalga yıkaması koşullarında dalga ve gelgit zorlamalarına karşı prototip bir çakıl bariyerinin morfolojik tepkisi araştırılmıştır. Farklı eğimlere sahip laboratuvar modelleri oluşturularak taşan dalgaların anlık deşarj zaman serileri [11]'de analiz edilmiştir. [12]'de ekstrem dalgaların taşan hacminin aşılma olasılığını tanımlayan bir istatistiksel model oluşturulmuştur. Bu kısa liste ve içindeki referanslar okuyucuya konunun enginliği hakkında bir fikir verebilir.

Tüm bu çalışmalardan anlaşılacağı üzere dalga tırmanması, taşması ve yıkamasının analizi bilimsel literatür için şarttır. Bu analizlerin etkin ve hızlı bir şekilde yapılması çalışmaların sonuçlarında verimlilik açısından son derece önemlidir. Bu amaçla kullanılabilecek oldukça kullanışlı algoritmalarından biri de sıkıştırılabilir algılama (SA) algoritmasıdır [13, 14]. Daha az veriyle aynı sonuca ulaşarak zamandan ve depolama alanından tasarruf sağlama gibi temel avantajı olan SA algoritmasının bazı kıyı mühendisliği problemlerinde uygulanmış örnekleri literatürde mevcuttur [15-23]. [15]'te serbest yüzey yer değiştirme verilerinin ekstrapolasyonu için SA tabanlı bir teknik geliştirilmiştir. [16]'da dev dalgaların erken tespiti için SA'nın olası kullanımı tartışılmıştır. [17]'de von Kármán girdaplarının etkili ölçümü ve analizi için SA'nın kullanımı ve uygulaması tartışılmıştır. [18]'de tam doğrusal olmayan okyanus dalgalarının spektral simülasyonları için gereken hesaplama yükünü SA kullanarak azaltmaya yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. [19]'daki konferans bildirisinde zaman serisi veri kümeleri kullanılarak, SA'nın kıyı bölgelerinde dalga taşması ve yıkamasının tahmini, araştırılması ve analizi ile yapısal sağlık izleme için güçlü bir araç olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. [20]'de okyanus dalga enerjisinin ve genel olarak okyanus enerjisi dönüşümünün etkin bir şekilde analiz edilmesi ve değerlendirilmesi için SA'nın kullanımı incelenmiştir. [21]'de 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisi hidrodinamik zaman serilerinin SA kullanılarak verimli ölçümlerle geri çatılması incelenmiştir. [22]'de taşkın izleme için öne çıkan çözümlerden biri olarak kabul edilen kablosuz sensör ağlarındaki teknik sorunlardan biri olan sensörlerin enerji kısıtlamasına SA ile enerji açısından verimli yeni bir uzaktan taşkın izleme sistemi önerilerek çözüm aranmıştır. [23]'te SA kullanılarak belirli bir noktadaki serbest yüzey yer değiştirmesinin zaman geçmişini dalga basıncı yük kayıtlarından ekstrapole etme problemi ele alınmıştır. Ancak literatürde SA'nın kullanıldığı ve bu makalenin de konusu olan dalga tırmanması, taşması ve yıkaması alanıyla ilgili şu anda bir makale örneği bulunmamaktadır. Bu makalenin amacı bu bağlamda öncü bir çalışma ortaya koymaktır. Bu makalenin gelecek kısmında istatistiksel hesaplamalı bir teknikle taşıma zaman serisi elde edilmiş ve SA ile bu zaman serisinin mevcut klasik yöntemlere görece çok daha verimli bir şekilde ölçülebileceği gösterilmiştir.

2. Metodoloji

2.1. Dalga taşmasının olasılıksal zaman serisi analizi için metodoloji

Dalga yüksekliği ve periyot dağılımlarının birleşik istatistiklerini analiz etmek için literatürde çok sayıda teknik ve formül bulunmaktadır. Bu formüllerden biri Denklem 1'de verilmiştir [1]:

$$P(\tau|x) = \frac{P(x|\tau)}{P(x)} = \frac{ax}{\sqrt{\pi v}} \exp \left[-\frac{a^2 x^2}{v^2} (\tau - 1)^2 \right]. \quad (1)$$

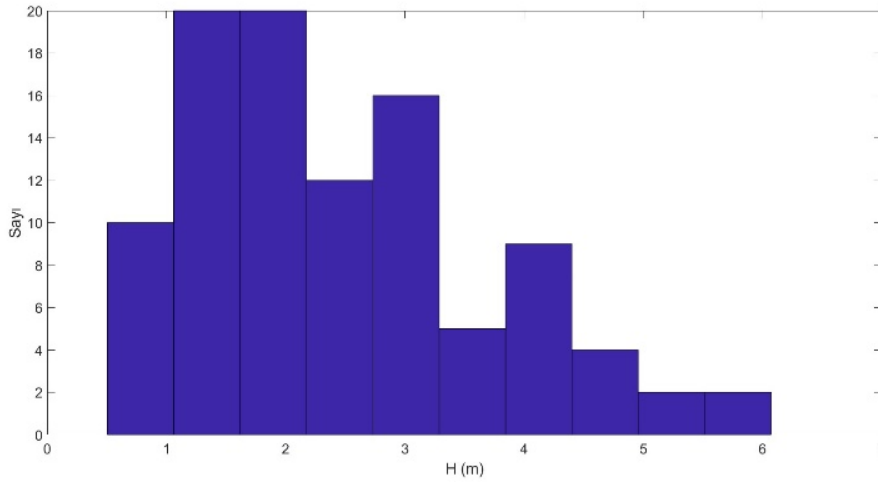
Burada $P(x)$, boyutsuz dalga yüksekliği parametresi $x = H/H'$ 'nin olasılık dağılımını gösterir. Burada H' , referans bir dalga yüksekliğidir ve a parametresi aşağıda Denklem 2'de verilmiştir [1]:

$$a = \frac{H'}{(8m_0)^{1/2}} = \begin{cases} 1/2\sqrt{2}, & \text{eğer } H' = m_0^{1/2} = \eta_{rms} \\ \sqrt{\pi}/2, & \text{eğer } H' = \bar{H} \\ 1, & \text{eğer } H' = H_{rms} \end{cases} \quad (2)$$

Denklem 2'de η_{rms} dalga profilinin kare ortalamalarının kökü, $\bar{H}$ ortalama dalga yüksekliği ve H_{rms} dalga yüksekliğinin kare ortalamalarının köküdür [1]. Doğrusal, dar bantlı bir deniz durumu için $P(x)$ 'in Rayleigh dağılımı biçiminde olduğu iyi bilinmektedir [1]. Denklem 1'de, $P(\tau|x)$, verilen bir $P(x)$ için boyutsuz periyot parametresi $\tau = T/\bar{T}$ 'nin koşullu olasılığıdır [1]. $\bar{T}$ ortalama dalga periyodunu gösterir ve ν parametresi, spektral bant genişliğinin darlığını gösterir. Bu parametre Denklem 3'te verildiği gibidir [1]:

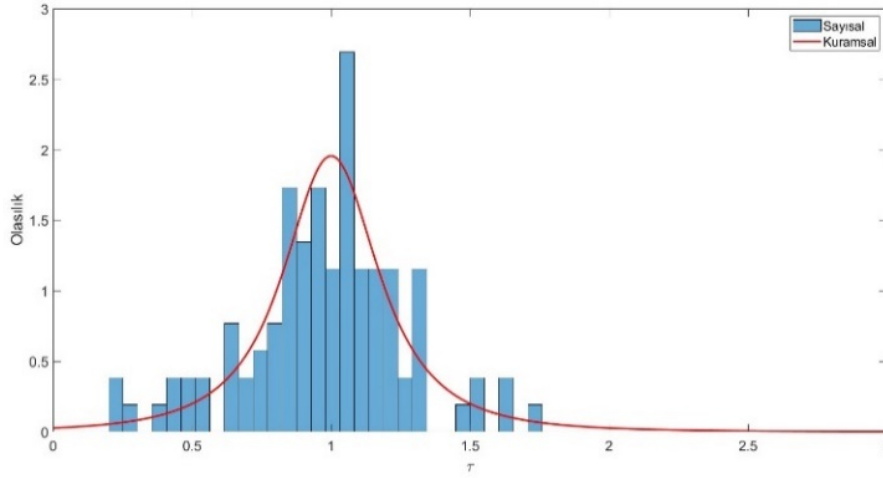
$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^2 \quad (3)$$

Burada m_0, m_1, m_2 spektrumun sıfıncı, birinci ve ikinci momentleridir. [1]'i takiben, bu çalışma boyunca $\nu = 0,26$ değeri kullanılmıştır. Rastgele dalga yüksekliği ve dalga periyodu serileri üretmek için aşağıda özetlenen yaklaşım izlenmiştir. $H' = H_{rms} = 3m$ değeri kullanılmıştır. Böylece, a parametresi $a = 1$ olur. Dalga yüksekliklerinin istatistiksel dağılımlarını temsil etmek için MATLAB rastgele sayı üreticini kullanarak Rayleigh dağıtılmış rastgele sayı üretimi yapılmıştır. Bu şekilde üretilen $H_{rms} = 3m$ 'lik 100 dalgayı içeren bir histogram Şekil 1'de gösterilmektedir.



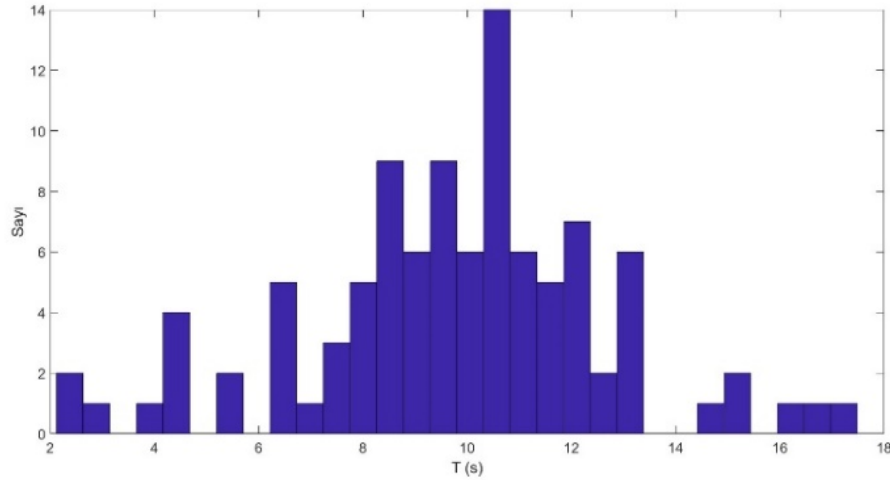
Şekil 1. $H_{rms} = 3m$ olan 100 dalganın dalga yüksekliklerinin histogramı.

Daha sonra boyutsuz dalga yüksekliği parametresi x ve Denklem 1 tarafından verilen koşullu olasılık dağılımı $0 \leq \tau \leq 3$ tipik aralığı için hesaplanmıştır. Olasılık dağılımının hesaplanmasından sonra, basit toplama formülleri ile kümülatif olasılık dağılımı oluşturulmuştur. Daha sonra bu kümülatif dağılım rastgele ters çevirme tekniği vasıtasıyla ters çevrilerek rastgele x değerlerine karşılık gelen rastgele τ değerleri elde edilmiştir. Bu şekilde sayısal olarak hesaplanan τ 'nun sayısal olasılık dağılımı ve Denklem 1'deki x parametresi üzerinde analitik olarak tümlemlenerek hesaplanan teorik dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Boyutsuz zaman parametresi $\tau = T/\bar{T}$ için olasılık dağılım fonksiyonu, rastgele ters çevirme tekniği ile sayısal olarak elde edilene karşı, Denklem 1'in x üzerinde tümlevlenmesi ile kuramsal olarak elde edilen.

Rastgele τ değerleri elde edildikten sonra, rastgele dalga periyotları $T = \tau \bar{T}$ formülü ile hesaplanmıştır. Bu hesaplama için $\bar{T} = 10s$ olan bir dalga sahası dikkate alınmış ve ortaya çıkan dalga periyodu histogramı Şekil 3'te gösterilmiştir.



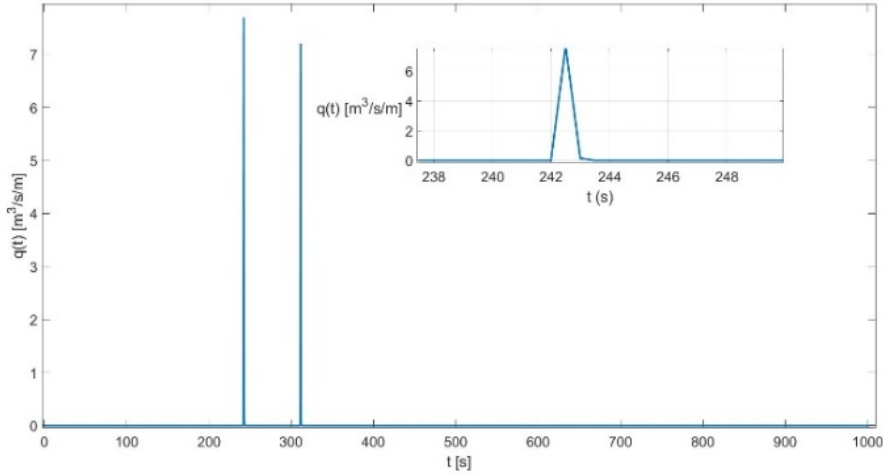
Şekil 3. $\bar{T} = 10s$ olan 100 dalganın dalga periyodunun histogramı.

Rastgele dalga yüksekliği ve buna karşılık gelen rastgele dalga periyodu dağılımları yukarıda özetlenen yaklaşım kullanılarak elde edilmiştir. Dünyanın birçok yerinde olduğu gibi Avrupa'da da bazı kıyı koruma yapıları %2 taşıma kriterine göre tasarlanır, yani tasarım fırtınası boyunca sadece en yüksek %2'lik dalga tırmanmasının yapıyı aşarak dalga taşmasına neden olmasına tolerans sağlayacak şekilde ekonomik tasarım yoluna gidilir. Bu nedenle, bu olasılıksal eşik kriteri rastgele dalga taşmasının zaman serisini sayısal olarak modellemek için kullanılmıştır. T 'nin bireysel dalga periyodunu gösterdiği $0 \leq t \leq T$ taşıma periyodu sırasında, taşıma hacmi zaman serisi Weibull formülü Denklem 4'te verilmektedir [11].

$$q(t) = \frac{V_T b}{\hat{a}} \left(\frac{t}{\hat{a}} \right)^{(b-1)} \exp \left[- \left(\frac{t}{\hat{a}} \right)^b \right] \quad (4)$$

Burada $\hat{a}$ ölçek faktörünü, b şekil faktörünü ve V_T taşmanın hacmini göstermektedir. Bu çalışmada [11]'e göre tipik olarak $\hat{a} = 0,4$ ve $b = 2$ değerleri kullanılmıştır. Taşmaya neden olan en küçük dalga için taşıma hacmi,

aynı zamanda Hollanda taşma simülatörü için en büyük hacim olan $V_T = 5,5 \text{ m}^3/\text{m}$ olarak seçilmiştir. Taşma hacminin dalga yüksekliğiyle doğrusal olmayan bir şekilde ilişkili olduğu bilinmektedir [12], ancak yapı kotu-dalga genliği oranının küçük değerleri için doğrusallaştırılabilir [12]. Dolayısıyla, taşmaya neden olan en küçük dalgadan daha yüksek dalgalar için taşma hacmi doğrusal olarak ölçeklenir. Bu metodolojiyle elde edilen taşma zaman serilerinden biri Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. %2 taşma olasılığına sahip rastgele dalganın taşma hacmi zaman serisi.

Şekil 4'te sunulan %2 taşma olasılığına sahip rastgele dalganın taşma hacmi zaman serisinin sağ üst köşesinde verilen ek şeklinin içerisinde, taşmaya neden olan en küçük dalgadan daha yüksek dalganın olduğu bölge olan 243. saniyeye yakınlaştırma yapılarak taşma hacminin doğrusal olarak ölçeklendiği net bir şekilde gösterilmiştir.

2.2. Sıkıştırılabilir algılama yöntemi

Sinyal işleme alanında çok önemli bir yenilik olan Sıkıştırılabilir Algılama (SA), mühendislikten tıba kadar pek çok bilim dalından araştırmacının dikkatini çekmiş ve bu araştırmacıların çalışmalarında kullanılmıştır. SA, N elemanından sadece K tanesi sıfırdan farklı olan K -seyrek bir q sinyalinin Ψ matrisi (ortogonal dönüşüm matrisi) ile ortogonal bir alana (yani Fourier'e) dönüştürülebileceğini göstermiştir. Bu şekilde sinyal $q = \Psi\hat{q}$ şeklinde gösterilir. Bu formüldeki $\hat{q}$, dönüşümün katsayı vektörünü temsil etmektedir. Girişlerdeki sıfırlar elendikten sonra $q_s = \Psi\hat{q}_s$ elde edilebilir. Burada q_s , sıfırdan farklı bileşene sahip sinyali tanımlar. N elemanlı bir K -seyrek q sinyali, SA algoritması kullanılarak $M \geq C\mu^2(\Phi, \Psi)K\log(N)$ ölçümleriyle tam olarak geriçatılabilir. Bu formülde C pozitif bir sabiti, Φ algılama bazını ve $\mu^2(\Phi, \Psi)$ ise algılama ve dönüşüm bazının karşılıklı tutarlılığını simgeler [13, 14]. M rastgele örneklem kullanılarak yapılan rastgele örneklemeden sonra $g = \Phi\Psi\hat{q}$ elde edilir. Böylece SA problemleri şu hale gelir:

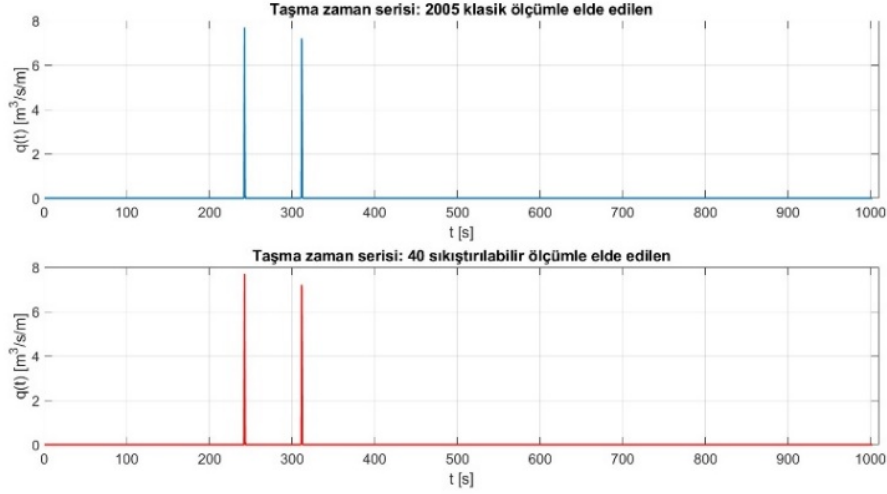
$$g = \Phi\Psi\hat{q} \text{ şartı altında } \min\|\hat{q}\|_{l_1} \quad (5)$$

Burada $\|\hat{q}\|_{l_1} = \sum_i |\hat{q}_i|$ 'dir. l_1 çözümü bu optimizasyon probleminin tüm olası çözümleri arasında $q_{cs} = \Psi\hat{q}$ olmaktadır. Okuyucu SA ile ilgili daha kapsamlı bir tartışma için [13, 14]'e ve kıyı hidrodinamiğindeki diğer uygulamalar için [15-23]'e yönlendirilmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu makalenin amacı, dalga taşması zaman serisinin etkili bir şekilde algılanması için SA'nın uygulanabilirliğini önermek ve incelemektir. Tipik taşma hacmi zaman serisi, Şekil 4'te gösterildiği gibi zaman düzleminde seyrek bir davranışa sahiptir. Bu nedenle, Fourier düzleminde rastgele sıkıştırılabilir algılama

gerçekleştirilmiş ve l_1 minimizasyon problemi zaman düzleminde çözülmüştür. Şekil 5'te, Şekil 4'te de gösterilen rastgele dalga taşması zaman serisi ve onun SA ile geriçatılması gösterilmiştir.



Şekil 5. %2 taşma olasılığı olan rastgele dalga taşma hacminin zaman serisi.

Şekil 5'te, rastgele dalga taşması zaman serisinin geriçatımının SA tarafından kesin olarak yapıldığı görülebilir. SA tabanlı yaklaşımın temel avantajı, klasik gözlem sisteminin $N=2005$ klasik örnek kullanmasına rağmen, SA tabanlı gözlem sisteminin yalnızca $K=40$ rastgele örnek kullanmasıdır. Bu önemli farktaki alt örnekleme oranı, kıyı ölçümü ve gözlem sistemleri için bellek, maliyet ve ölçüm süresi açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ek olarak, SA tabanlı yaklaşım eksik verilerin enterpolasyonu ve ekstrapolasyonu için de faydalıdır. Bu sonuç dalga taşması ve yıkaması için gösterilmiş olsa da bulgularımızı rastgele dalga tırmanmasına kolayca genişletmek de mümkündür. Tırmanma, kıyı yapısının üst kotundan taşsa da taşmasa da zaman düzleminde rastgele çok frekanslı bir davranışa sahiptir ve spektral düzlemde seyrek bir temsile sahiptir. Böylece, zaman düzleminde rastgele örnekleme yapılabilir veya tipik rastgele tırmanma zaman serilerinin verimli analizi için zaman düzlemi ile Fourier düzleminde ölçüm ve l_1 minimizasyon yapmak için hibrit bir yaklaşım izlenebilir.

4. Çıkarımlar

Bu çalışmada, sıkıştırılabilir algılama ile dalga taşması, yıkaması ve tırmanması parametrelerinin etkili ölçümü araştırılmıştır. Dalga yükseklikleri ve dalga periyotlarının ortak olasılık dağılımı ve bunların rastgele ters çevrilmesi yapılmıştır. Sonrasında yapı üst kotundan taşma olasılığı %2 olan bir dalga taşması zaman serisi bunlar kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen seri, zaman düzleminde seyrek bir sinyal olarak ele alınabilir. Bu tür seyrek verilerin, Shannon'ın klasik örnekleme teorisinin belirttiğinden çok daha az sayıda örnek kullanılarak sıkıştırılabilir algılama ile etkili bir şekilde geriçatılabileceği gösterilmiştir. Bulgularımız, kıyı ve okyanus mühendisliğinde daha düşük maliyet ve veri depolama gereksinimleri ile daha ucuz ve daha hızlı dalga taşması, yıkaması ve tırmanması ölçüm sistemleri geliştirmelerine yardımcı olacaktır. Ek olarak, bulgularımız eksik verileri aradeğerleme veya dışdeğerleme için de kullanılabilir.

Teşekkür

Bu makale "Alan AR, Bayındır C. Analysis of wave runup, overtopping and overwash parameters via compressive sensing. no. 10. 2nd International Conference on Applied Mathematics in Engineering (ICAME 2021); 01-03 September 2021; Balıkesir, Turkey." isimli konferans bildirisine dayanılarak yazılmıştır. C.B., fikir sahibi, A.R.A. ve C.B. konsepti oluşturdu, A.R.A. orijinal taslağı hazırladı, C.B. kodları yazdı, C.B. makaleyi denetleyip sonuçlandırdı.

Kaynaklar

- [1] Goda Y. Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientific Publishing Company, 2010.
- [2] Kobayashi N, Tega Y, Hancock MW. Wave reflection and overwash of dunes. *J Waterw Port Coastal Ocean Eng*, 1996; 122(3): 150-153.
- [3] van der Meer JW. Wave run-up and wave overtopping at dikes. Wave forces on inclined and vertical structures, ASCE 1995.
- [4] Tuan TQ, Verhagen HJ, Visser P, Stive MJ. Wave overwash at low-crested beach barriers. *Coastal Eng J*, 2006; 48(4): 371-393.
- [5] Oliveira JNC, Oliveira FS, Neves MG, Clavero M, Trigo-Teixeira AA. Modeling wave overtopping on a seawall with XBeach, IH2VOF, and mase formulas. *Water* 2020; 12(9): 2526.
- [6] Geeraerts J, Troch P, De Rouck J, Verhaeghe H, Bouma JJ. Wave overtopping at coastal structures: prediction tools and related hazard analysis. *J Cleaner Prod*. 2007; 15(16): 1514-1521.
- [7] Matias A, Ferreira Ó, Vila-Concejo A, Morris B, Dias JA. Short-term morphodynamics of non-storm overwash. *Mar Geol* 2010; 274(1-4): 69-84.
- [8] Donnelly C, Kraus N, Larson M. State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. *J Coastal Res* 2006; 22(4): 965-991.
- [9] Hancock MW, Kobayashi N. Wave overtopping and sediment transport over dunes. *Coastal Eng*. 1995; 2028-2042.
- [10] Matias A, Williams JJ, Masselink G, Ferreira Ó. Overwash threshold for gravel barriers. *Coastal Eng*. 2012; 63: 48-61.
- [11] Hughes SA, Thornton CI. Estimation of time-varying discharge and cumulative volume in individual overtopping waves. *Coastal Eng*. 2016; 117: 191-204.
- [12] Mori N, Cox DT. Statistical modeling of overtopping for extreme waves on fixed deck. *J Waterw Port Coastal Ocean Eng*, 2003; 129(4): 165-173.
- [13] Candès EJ, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Trans Inf Theory* 2006; 52(2): 489-509.
- [14] Candès EJ. Compressive sampling. *Proceedings of the International Congress of Mathematicians* 2006; 3: 1433-1452.
- [15] Malara G, Kougioumtzoglou IA, Arena F. Extrapolation of random wave field data via compressive sampling. *Ocean Eng*. 2018; 157: 87-95.
- [16] Bayındır C. Early detection of rogue waves using compressive sampling. *TWMS J App Eng Math*, 2019; 9(2): 198-205.
- [17] Bayındır C, Namlı B. Efficient sensing of the von Karman vortices using compressive sensing. *Comput Fluids* 2021; 104975.
- [18] Bayındır C. Compressive spectral method for the simulation of nonlinear gravity waves. *Sci Rep* 2016; 22100.
- [19] Alan AR, Bayındır C. Analysis of wave runup, overtopping and overwash parameters via compressive sensing. no. 10. 2nd International Conference on Applied Mathematics in Engineering (ICAME 2021); 01-03 September 2021; Balıkesir, Turkey.
- [20] Alan AR, Bayındır C. Ocean energy conversion analysis by compressive sensing. no. 24. 2nd International Conference on Applied Mathematics in Engineering (ICAME 2021); 01-03 September 2021; Balıkesir, Turkey.
- [21] Alan AR, Bayındır C. 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisi ölçümlerinin sıkıştırılabilir algılama yöntemiyle analizi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2024; 36(2): 837-845.
- [22] Abolghasemi V, Anisi MH. Compressive sensing for remote flood monitoring. *IEEE Sens Lett* 2021; 5(4): 1-4.
- [23] Malara G. Compressive sampling - based extrapolation of free surface displacement data from pressure measurements. *Ocean Eng*. 2022; 266: 113044.