

ARAŞTIRMA MAKALESİ

İzmit Körfezi Güncel Ekstrem Dalga İklimi Analizi Ve Yakın Kıyı Dalga Transformasyonu Modellemesi

Izmit Bay Recent Extreme Wave Climate Analysis and Nearshore Wave Transformation Modelling

Yavuz Selim Güçlü¹, Selman Baysal^{2*}, Veysel Şadan Özgür Kırca¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye.

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 17020, Çanakkale, Türkiye.

Geliş / Received: 11.05.2025

Kabul / Accepted: 17.05.2025

*Sorumlu Yazar: Selman Baysal selmanbaysal@comu.edu.tr

ÖZ: Rüzgâr dalgaları kıyı yapılarının tasarımı ve işlevselliği açısından en başta gelen çevresel faktörlerdir. Kıyı yapılarının yapısal tasarımlarında belirleyici kuvvetleri ortaya çıkarmalarının yanında, özellikle düzensiz ve asimetrik yapıları nedeniyle deniz tabanındaki katı maddeyi hareketlendirerek kumlanma ve taban aşınması gibi olumsuzluklara neden olarak kıyı tesislerinin işlevselliklerinin azalmasına yol açabilmektedirler. Bu çalışmada İzmit Körfezi'nde planlanan veya mevcut kıyı ve deniz yapılarının tasarım ve analizine taban oluşturması amacıyla, açık deniz ve yakın kıyı ekstrem dalga koşullarının belirlenmesine yönelik sayısal modelleme yapılmıştır. Çalışmada ayrıntılarının tartışıldığı üzere, küresel iklim değişikliği nedeniyle şiddetlenmekte olan rüzgâr ve dalga ikliminde güncel durumu yansıtabilmek amacıyla 1999-2023 yılları arasındaki 25 yıllık saatlik rüzgâr verileri kullanılarak yapılan rüzgâr iklimi analizleri sonucunda, Gumbel dağılımı ile belirlenen 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem rüzgâr hızı kuzey-kuzeydoğu yönünden 31,0 m/s olarak elde edilmiştir. Bu veriler, Marmara Denizi'nden gelen batı yönlü dalgalarla birlikte İzmit Körfezi'nde oluşabilecek açık deniz belirgin dalga yüksekliği ($H_s = 4,43$ m) ve pik dalga periyodu ($T_p = 6,7$ s) gibi tasarım parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar uygulama projeleri için yapılan ayrıntılı analiz sonuçları ile iyi bir uyum içindedir. Hazırlanan dijital batimetri verileriyle desteklenen Körfez modeli ile dokuz farklı yön için yapılan modellemelerle yakın kıyı dalga özelliklerini belirleyen dalga dönüşümü (transformasyonu) gerçekleştirilerek, beklenebileceği üzere batı yönlü dalgaların körfezde en etkili dalgalar olduğu ortaya koyulmuştur. Buna karşın doğu yönlü dalgaların, sınırlı feç mesafesi nedeniyle daha düşük enerjiye sahip olacağı görülmüştür. Çalışmada alansal dağılım olarak sunulan bulguların İzmit Körfezi'nde yapılacak kıyı yapıları tasarım ve analizleri için uygulamalara bir altlık oluşturma noktasında faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dalga iklimi, ekstrem rüzgâr hızı, dalga transformasyonu, İzmit Körfezi, iklim değişikliği

ABSTRACT: Wind-generated waves are among the primary environmental factors in the design and functionality of coastal structures. In addition to exerting determining forces on the structural design of coastal facilities, their irregular and asymmetric characteristics can mobilize sediment on the seabed, leading to adverse effects such as sedimentation and seabed erosion (scour), which in turn can reduce the functionality of coastal infrastructure. In this study, numerical modeling was conducted to determine offshore and nearshore extreme wave conditions in order to provide a basis for the design and analysis of planned or existing coastal and marine structures in İzmit Bay. To reflect more recent conditions, wind climate analyses were performed using 25 years of hourly wind data from 1999 to 2023. Based on these analyses, the 100-year return period extreme wind speed was determined to be 31.0 m/s from the north-northeast direction using the Gumbel distribution. These data, together with waves approaching from the west through the Sea of Marmara, were used to calculate design parameters such as the significant offshore wave height ($H_s = 4.43$ m) and peak wave period ($T_p = 6.7$ s) that may occur in İzmit Bay. The results obtained show good agreement with detailed analysis results from applied projects. Wave transformation modeling was conducted using a Gulf model supported by digital bathymetry data, considering nine different directions to determine nearshore wave characteristics. As expected, waves from the west were found to be the most effective within the bay. In contrast, waves from the east were observed

to have lower energy due to their limited fetch distance. It is concluded that the spatial distribution findings presented in the study will provide a useful foundation for practitioners involved in the design and analysis of coastal structures in İzmit Bay.

Keywords: Wave climate, extreme wind velocity, wave transformation, İzmit Bay, climate change

1. GİRİŞ

Deniz ve kıyı yapılarının tasarımında, karada inşa edilen yapılardan farklı olarak, oldukça karmaşık bir fiziğe sahip olan dalgaların etkisi büyük önem arz etmektedir. Düzensiz ekstrem rüzgâr dalgaları gerek yüksek momentum ve orbital hızları gerekse barındırdıkları belirsizlikler ve asimetrik yapıları sebebiyle kıyı yapılarının yapısal bütünlüklerini olduğu kadar katı madde taşınımı, taban aşınması ve kumlanma gibi kıyı hidrodinamiği süreçlerini, dolayısıyla kıyı yapılarının işlevselliklerini de olumsuz anlamda etkileme potansiyeline sahiptirler [1]. Bu sebeple tasarım dalgaları, denizde yapılan mühendislik projelerinde belirlenmesi en kritik olan ve deniz yapılarını en çok etkileyen olgulardan biridir [2].

Denizlerde görülen rüzgâr dalgalarının matematiksel olarak tanımlanmaları ancak 19. yüzyıl başında mümkün olmuştur. Gerstner [3], ilk kez, derin denizde trokoidal dalgalar (Gerstner dalgaları) için matematiksel bir çözüm ortaya koymuştur. Airy [4], doğrusal dalga teorisini (linear wave theory) geliştirerek küçük genlikli dalgaların mühendislik projelerinde pratik hesaplamayı kolaylaştıran doğrusal analizine olanak sağlamıştır. Stokes [5], Stokes teorisi olarak bilinen yüksek mertebeli sonlu genlikli dalga teorisini geliştirmiştir. Böylece doğrusal olmayan etkileşimler de dikkate alınarak mühendislik hesaplamalarında daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Öte yandan Russell [6], gerçekleştirdiği kanal deneyleri sırasında gözlemlediği tekil bir dalga hareketi boyunca hızını ve şeklini koruduğunu raporlayarak soliter dalga (solitary wave) konseptinin temelini atmış, bu sayede özellikle uzun dalgalar ve kırılmak üzere olan dalgaları daha iyi temsil eden bir model geliştirilmiştir.

Tüm bu gelişmelerin yanı sıra, özellikle deniz inşaat projelerinde analizi elzem olan düzensiz dalgalara yönelik olarak, 20. yüzyılın ortalarından itibaren

dalga tahmin yöntemleri ile ilgili önemli çalışmalar yapılmıştır. Sverdrup ve Munk [7], günümüzde en çok kullanılan basitleştirilmiş dalga tahmin yöntemlerinden biri olan S-M-B yöntemini geliştirmişlerdir. Dalgaların düzensizliği göz önüne alınarak P-N-J yöntemi olarak bilinen ve rüzgâr dalgaları oluşum ve gelişim sürecini ifade eden dalga spektrumu tanımı yapılmış ve bu sayede düzensiz dalgaların frekans tanım kümesinde ölçekler arasındaki enerji dağılımları net biçimde temsil edilebilmiştir [8]. Tam gelişmiş deniz durumu için geliştirilen ve derin denizlerde iyi sonuçlar veren Pierson-Moskowitz (PM) spektrumu [9] ile birlikte kısa feç mesafeli gelişmekte olan deniz durumu için özellikle Kuzey Denizi için geliştirilmiş olan JONSWAP spektrumu da [10] en çok kullanılan spektrum türleridir. Sınırlı feç koşullarında tam gelişmiş rüzgâr dalgası spektrumu için ise Bretschneider-Mitsuyasu spektrumu [11,12] birçok çalışmada tercih edilmektedir.

Dalgalar, oluşum mekanizmalarına, su derinliğine ve periyotlarına göre sınıflandırılmaktadır. Rüzgârların deniz yüzeyi ile etkileşimi sonucu enerji aktarımı ile oluşan ve yukarıda bahsedildiği üzere en yaygın rüzgâr türü olan rüzgâr dalgaları, deniz ve kıyı mühendisliği, oşinografi, iklim bilimi ve yenilenebilir enerji üretimi gibi birçok alanda kritik bir rol oynamaktadır. Deniz ve kıyı yapılarının tasarımı, katı madde taşınımının belirlenmesi ve kumlanma analizi, fırtına ve ekstrem hava olaylarının incelenmesi, kıyı bölgelerindeki planlama çalışmaları gibi mühendislik çalışmalarında dalga ikliminin doğru bir şekilde belirlenmesi tasarım güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr verileri ile açık denizde oluşan rüzgâr dalgalarının tahmini ve bu dalgaların kıyı bölgelerine kadar geçirdikleri transformasyon süreçlerinin modellenmesi çalışmalarını içeren dalga iklimi analizi, uzun dönemli meteorolojik verilerin istatistiksel analizine ve dalga üretim mekanizmalarının fiziksel modellenmesine dayanmaktadır. Açık

denizdeki rüzgâr hızları, esme süreleri ve fec uzunlukları, dalga yükseklikleri ve periyotlarının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu noktada yukarıda bahsedilen S-M-B yöntemi gibi basitleştirilmiş ampirik yöntemlerin ötesinde, rüzgâr hızlarının deniz yüzeyindeki alansal ve yönsel dağılımı ile zaman değişimini de dikkate alacak şekilde rüzgâr enerjisinin dalga oluşumuna aktarımını ve denizde ilerlemesini “enerjinin korunumu ilkesi” esasına bağlı olarak girilen bir hesap ağı üzerinde sayısal olarak çözümleyebilen, bu sayede ilgili hesap ağının her noktasında dalgaların yönsel spektrumlarını ayrıntılı olarak modelleyebilen spektral modeller son 20 yıllık süreçte araştırma ve mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üçüncü nesil (3rd generation) spektral dalga modelleri dalga oluşumu, gelişimi, rüzgâr-dalga etkileşimi (whitcapping, vb.), dalga-taban etkileşimi (sapma, kırılma, sürtünme, vb.), dalga-dalga etkileşimi (frekanslar arası ve yönler arası etkileşim) gibi süreçleri lâyıkıyla modelleyebildikleri için günümüzde en çok tercih edilen sayısal dalga modelleme yöntemleridir. Ticari (MIKE-SW, CMS-Wave) veya açık kaynak kodlu (TOMAWAC, WAVE-WATCH, SWAN, vb.) birçok üçüncü nesil spektral dalga modeli bulunmakta olup, bu çalışmada da en yaygın kullanımı olan ticari dalga modellerinden biri olan CMS-Wave kullanılmıştır. Detayları bölüm 3’te verilen CMS-Wave modeli, birçok bilimsel çalışmada kullanılarak doğrulanmış bir modeldir [13-15].

Ekstrem dalga tahminleri, genellikle belirli bir dönüş aralığına (örneğin 50 veya 100 yıl) sahip maksimum dalga yüksekliklerine göre yapısal tasarımı gerçekleştirilen deniz ve kıyı yapılarında kullanılmakta olup [16], aynı zamanda kıyılarda katı madde hareketinde, kıyı taşkın risklerinin belirlenmesinde ve gemi tasarımı ve deniz ulaşımı gibi alanlarda güvenilir, sürdürülebilir ve ekonomik açık deniz ve kıyı mühendisliği açısından da büyük öneme sahiptir [17]. Nadir ve görece kısa süreli gerçekleşen ancak yıkıcı etkileri olan büyük dalgaların oluşma olasılığının belirlenmesi için yapılan ekstrem dalga tahminleri [18], özellikle küresel ısınmayla birlikte fırtına şiddetlerinin artması sonucunda uzun süreli iklim modelleri, deniz seviyesi ve dalga rejimi değişikliklerini tahmin etmek için sıklıkla kullanılmaktadır [19].

Ekstrem dalga tahmin yöntemleri arasında istatistiksel analiz, sayısal modelleme ve uydu/ölçüm verileri bulunmaktadır. Goda [18], GEV (Genelleştirilmiş Ekstrem Değer) dağılımının ekstrem dalga yüksekliklerinin modellenmesinde oldukça başarılı olduğunu belirtmektedir. Bu dağılımın özel bir formu olan Gumbel dağılımı, özellikle yıllık maksimum dalga yüksekliklerinin analizinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Holthuijsen [19] ise, yine bir GEV dağılımı varyasyonu olan Weibull dağılımın özellikle dalga yüksekliklerinin uzun kuyruklu dağılımlarını modellemede etkili olduğunu vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, İzmit Körfezi’nde ekstrem rüzgâr dalgası iklimi karakteri güncel verilere dayalı olarak belirlenmiştir. Böylece, hem açık deniz (Körfez girişi) hem de yakın kıyıda (Körfez içi) bölgeye özgü farklı dalga koşullarının kıyılarına ve dolayısıyla mevcut veya yakın gelecekte inşa edilebilecek kıyı ve deniz yapılarına etkilerinin ortaya konması hedeflenmektedir. Bu sayede çalışmada elde edilen bulgular, İzmit Körfezi’nde tasarım ve analiz çalışmaları gerçekleştirecek ülkemizdeki araştırmacı ve uygulamacılara ayrıntılı modelleme yapılmasından önce bir ilk değerlendirme yapılabilmesi için altlık teşkil etmiş olacaktır. Bu doğrultuda, NCEP-CFSR (National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis, NOAA) tarafından Marmara Denizi’nde 1999-2023 yılları arasında verilen rüzgâr verileri kullanılarak ekstrem rüzgâr ve dalga iklimi analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle uzun dönemli rüzgâr esme yüzdeleri, ortalama ve maksimum rüzgâr hızları hesaplanarak bölge için tipik rüzgâr gülü elde edilmiştir. İzmit Körfezi girişinde belirlenen kuzey-güney doğrultulu gözlem profili için 100 yıl dönüş aralıklı açık deniz ekstrem dalga yükseklikleri ve pik periyot değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak, İzmit Körfezi içerisinde oluşacak ekstrem rüzgâr dalgaları, sayısal dalga transformasyonu modellemesi ile yakın kıyıya taşınarak farklı yönlerden gelen dalga özelliklerinin alansal dağılımı belirlenmiştir. Körfez içerisindeki kıyı yapıları ve tesisleri göz önüne alınarak, bu tür kıyı ve deniz yapıları için şartnamelerde önerilen [20] 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem tasarım dalgası özelliklerini elde etmek amacı ile W (batı) ~ N (kuzey) ~ E (doğu) yön bandından tüm ara yönleri

de kapsayacak şekilde 9 farklı yönden spektral dalga modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışma, İzmit Körfezi genelinde dalga transformasyonu modeli ile yakın kıyıyı da kapsayacak güncel ekstrem dalga verilerinin uygulamacı ve araştırmacılara sunulduğu bir çalışma olarak ortaya çıkmaktadır.

2. ÇALIŞMA ALANI

Körfezler, denizlerin kara içerisine doğru ilerlediği, genellikle dar bir ağızla denizlere bağlanan kara ile çevrili yarı kapalı su kütleleridir. Morfolojik özellikleri sebebiyle, hidrodinamik ve sediment hareketliliği açısından oldukça özgün sistemler oluştururlar [16]. Ayrıca, sınırlı bir feç mesafesine sahip olan körfezlerde, körfez içerisine giren dalgaların yükseklikleri, yönleri ve enerjileri gibi özellikleri önemli ölçüde değişmekte; buna bağlı olarak açık deniz koşullarından farklı bir dalga iklimi gözlemlenmektedir [21]. Bu farklılıklar hidro-morfolojik süreçleri etkilediği için, körfezler içerisinde gerçekleştirilecek olan kıyı ve liman mühendisliği uygulamalarında körfez özelinde değerlendirmeler ve analizler gerektirmektedir.

Bu bağlamda, önemli sanayi, ticaret, lojistik ve yerleşim faaliyetlerinin yoğunlaştığı bir bölge olan İzmit Körfezi, Türkiye’de ayrıntılı kıyı ve liman mühendisliği çalışmalarına ihtiyaç duyulan başlıca örneklerden biridir. Marmara Denizi’nin doğusunda bulunan (Şekil 1) ve dar-uzun bir yapısı olan İzmit Körfezi, yaklaşık 130 km uzunluğunda bir kıyıya ve 300 km²’lik bir alana sahiptir. Karadeniz ve Ege Denizi bağlantısında yer alması ve İstanbul ile Kocaeli gibi yoğun nüfuslu şehirlerin bulunduğu bir coğrafyada konumlanması sebebiyle, körfez içerisinde çok sayıda liman tesisi, endüstriyel altyapı, kıyı yerleşimi vb. bulunmaktadır. Körfezin özgün bir morfolojiye ve dar bir girişe sahip olması sebebiyle, Marmara

Denizi’nden gelen dalgaların iç kısımlara doğrudan taşınması mümkün değildir. Ayrıca körfez, birinci derece deprem kuşağında yer aldığı için mühendislik ve planlama süreçleri açısından oldukça hassas bir noktadır. Bu nedenlerden ötürü, İzmit Körfezi’nde çok disiplinli (mühendislik, ekolojik vb.) yaklaşımlar ile özellikle uzun dönem ve ekstrem dalga istatistiği, kumlanma analizi, deniz seviyesi değişimleri, kirlilik ve deprem riskleri gibi konulara odaklanan bilimsel çalışmaların gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir.

3. METOT

3.1 Ekstrem Rüzgâr ve Dalga Analizi

Açık denizlerde meydana gelen ekstrem meteorolojik olaylar (fırtınalar, siklonlar vb.) yüksek enerjili dalgaların oluşumunu tetiklemekte, dolayısıyla deniz ve kıyı yapıları üzerinde ciddi yapısal yükler meydana getirmektedir [22]. Mühendislik tasarımlarında, uzun dönemli dalga verilerinin istatistiksel analizinin tasarımın faydalı ömrü de göz önüne alınarak gerçekleştirilmesi, farklı dönüş aralıklarına sahip en büyük dalga yüksekliği ve periyodu ile rüzgâr şiddeti ve yönünün belirlenmesi temel bir adımdır [18]. Elde edilen ekstrem değerler, yapısal tasarım ve yapının kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği riskleri belirlemek için kullanılmaktadır.

Yapısal tasarım için kullanılacak karakteristik rüzgâr hızı ve bu rüzgârın oluşturacağı proje dalgasının seçimi, yapının faydalı ömrü ve tasarım kuvvetleri ile karşılaşma riski değerlendirildiğinde ortaya çıkmaktadır. Bu değerlendirme, tüm mühendislik projelerinde olduğu gibi kıyı ve deniz mühendisliği projelerinde de yapının tasarım faydalı ömrü ve stratejik önem seviyesi düşünülerek karar verilmesi gereken bir noktadır.



Şekil 1: İzmit Körfezi'nin genel coğrafi konumu ve Marmara Denizi rüzgâr verisinin alındığı ölçüm istasyonunun konumu (Google Earth®).

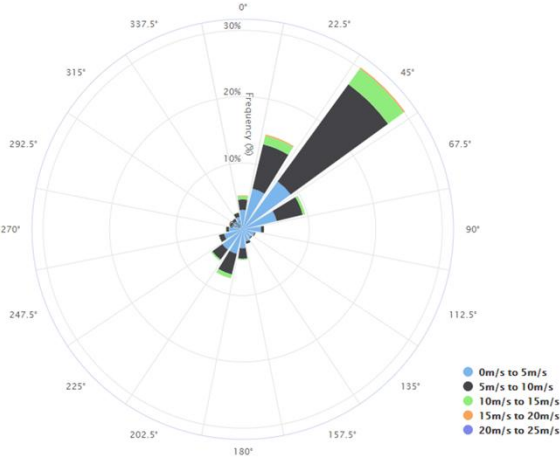
İzmit Körfezi'ndeki kıyı yapıları göz önüne alındığında kıyı tesisleri, deniz dolguları, dalgakıranlar ve iskele/rıhtım gibi yanaşma yapılarının tasarımı için kullanılması önerilen 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem dalga koşullarının incelenmesi, bu çalışma için en uygun kapsam olarak ortaya çıkmaktadır.

3.2 Rüzgâr Verileri ve Ekstrem Rüzgâr İklimi

İzmit Körfezi içerisinde gerçekleştirilecek rüzgâr ve dalga iklimi modellemesi amacı ile öncelikle, Marmara Denizi'nde NCEP (National Centers for Environmental Prediction, NOAA) CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) veri tabanından 40,7°N (kuzey), 28,3°E (doğu) koordinatları (Şekil 1) için temin edilen 1999-2023 yılları arasına ait 25 yıllık saatlik ortalama rüzgâr verileri incelenmiştir. Bu veriler, CFSR veri setindeki rüzgâr hızlarının Marmara'daki ve bölgedeki meteoroloji istasyonlarında (Florya, Gölcük, Derince, Körfez) kaydedilen rüzgâr verileri ile karşılaştırılması neticesinde kalibre edilmiştir. Mevcut ölçümlere ait temel istatistiki bilgiler Tablo 1'de; W (batı) ~ N (kuzey) yön aralığı için yıllık maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları ise Tablo 2'de sunulmuştur. S (güney) yönlü rüzgârların İzmit Körfezi'nde gerçekleştirilen dalga transformasyonundaki etkisi ihmal edilebilir düzeyde olduğundan, bu yönlü rüzgârlar çalışmada dikkate alınmamıştır. Ayrıca, veri grubunun analiz edilmesi ile oluşturulan rüzgâr gücü Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1: NCEP tarafından 1999-2023 yılları arasında verilen rüzgâr verilerine göre esme yüzdeleri, ortalama ve maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları.

Yön	Esme sayısı	Esme oranı (%)	Ortalama hız (m/s)	Maksimum hız (m/s)
N	10883	4,97	6,1	23,9
NNE	31447	14,35	6,8	23,8
NE	68978	31,48	7,5	25,1
ENE	20778	9,48	6,3	21,0
E	6509	2,97	3,9	18,6
ESE	4172	1,90	3,3	12,6
SE	3914	1,79	3,2	13,7
SSE	5030	2,30	3,8	18,0
S	10896	4,97	5,8	21,4
SSW	16864	7,70	6,5	23,5
SW	12315	5,62	5,4	20,0
WSW	7782	3,55	4,3	19,9
W	5387	2,46	3,9	20,0
WNW	4332	1,98	4,0	18,1
NW	4275	1,95	4,2	18,0
NNW	5582	2,55	4,7	21,3
Toplam	219144	100		



Şekil 2: NCEP verileri kullanılarak hazırlanan rüzgâr gülü.

Tablo 2: 1999-2023 yılları için NCEP veri tabanından elde edilen yıllık maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları (W~E).

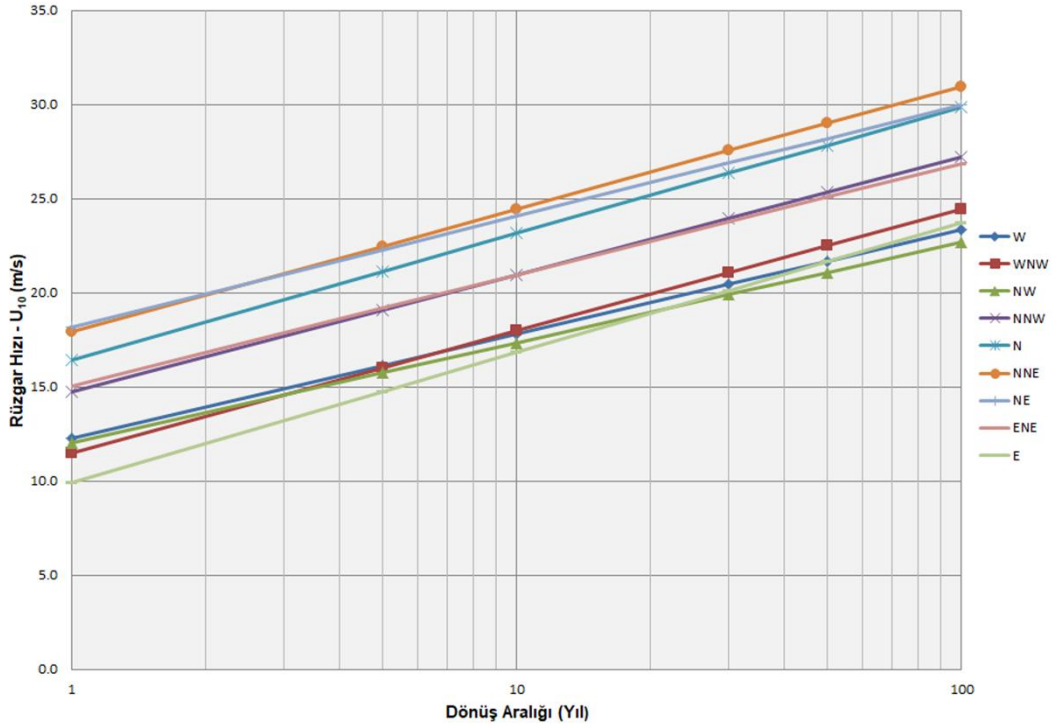
Yıl	Yıllık maksimum saatlik ortalama rüzgâr hızları, U_{10} (m/s)							
	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	NE	ENE
1999	11,8	10,3	12,6	11,7	11,5	16,3	18,7	16,7
2000	14,4	11,9	13,9	12,1	14,5	13,7	13,9	10,9
2001	12,6	12,6	12,6	13,7	15,7	17,7	19,0	16,3
2002	12,2	14,3	11,9	14,1	18,7	18,1	18,2	17,4
2003	15,4	10,0	10,4	16,1	19,1	19,6	17,2	13,7
2004	10,0	9,0	12,5	20,2	19,2	20,2	21,4	16,7
2005	10,8	8,8	8,6	13,5	15,7	14,3	17,1	14,2
2006	11,6	9,9	11,9	9,6	14,3	17,4	19,0	13,6
2007	14,6	16,3	11,1	12,3	12,1	14,6	15,1	12,1
2008	14,6	17,9	16,8	18,2	15,4	18,0	18,4	12,0
2009	11,5	14,0	12,2	15,6	14,5	16,4	16,1	13,1
2010	14,0	8,9	11,9	15,8	17,7	18,7	17,2	13,9
2011	12,6	15,2	13,6	18,5	20,0	23,3	21,6	18,1
2012	14,7	14,3	14,8	17,3	20,1	20,6	19,8	18,6
2013	11,9	14,9	14,0	17,3	18,6	18,0	18,9	18,2
2014	15,7	11,6	16,1	20,8	22,6	21,2	23,7	16,4
2015	9,9	12,3	12,1	15,9	19,2	21,3	21,8	20,2
2016	13,2	14,1	14,8	21,3	22,1	23,7	23,7	18,0
2017	15,7	15,3	15,9	17,5	18,5	20,3	17,6	19,1
2018	19,2	18,1	18,0	19,3	19,7	21,3	20,3	21,0
2019	11,2	8,9	8,4	17,2	21,8	23,8	22,6	18,8
2020	11,8	11,2	10,5	15,6	16,7	23,7	22,4	16,6
2021	20,0	18,0	16,2	17,2	18,6	19,8	18,9	20,5
2022	12,4	10,6	13,3	18,3	19,9	21,6	25,1	17,5
2023	17,1	16,8	17,0	14,8	23,9	23,5	20,9	17,0

Elde edilen veriler ile İzmit Körfezi'nde görülmesi muhtemel ekstrem fırtınaların analiz edilmesi amacıyla bir ekstrem rüzgâr iklimi çalışması yürütülmüştür. Ekstrem değer analizlerinde en çok kullanılan olasılık dağılımlarından biri olan Gumbel dağılımı, özellikle sınırlı veri uzunluğuna sahip denizlerde ekstrem rüzgâr hızlarının ve dalga yüksekliklerinin tahmininde oldukça iyi sonuçlar vermektedir [23-25]. Şekil 3'te, Gumbel dağılımı kullanılarak elde edilen farklı dönüş aralıklarındaki ekstrem saatlik rüzgâr hızı dağılımları verilmiştir. Yukarıda belirtildiği üzere, İzmit Körfezi için gerçekleştirilen dalga iklimi analizinde 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem koşulların göz önüne alınması uygun olacaktır. Bu bağlamda, Şekil 3'te de görüldüğü üzere, en yüksek 100 yıl dönüş aralıklı saatlik ortalama rüzgâr hızı NNE yönünden 31,0 m/s olarak elde edilmiştir.

3.3 Ekstrem Dalga İklimi ve Sayısal Dalga Transformasyonu Modeli

Marmara Denizi'nden gelecek W (batı) yönlü dalgaların etkisini irdeleyebilmek için öncelikle tüm Marmara Denizi'ni kapsayan bir dalga oluşumu ve dalga transformasyonu sayısal (numerik) modeli kurulmuş, W yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına için modelleme çalışması yürütülmüştür.

Rüzgâr dalgası oluşumu, ilerlemesi ve transformasyonunun sayısal olarak modellenmesi için USACE (U.S. Army Corps of Engineers) Coastal and Hydraulics Lab. tarafından geliştirilen CMS-Wave numerik modeli tercih edilmiştir. CMS-Wave, 2 boyutlu bir spektral dalga modeli olup rüzgâr dalgalarının oluşumu, açık deniz dalgalarının yakın kıyı transformasyonu ve inşası planlanan kıyı yapıları için tasarım dalgalarının elde edilmesi gibi amaçlar için kullanılabilir. CMS-Wave 2 sayısal (nümerik) modeli, kararlı (atmosfer ve deniz arasında enerji aktarımının dengeye ulaştığı, zamanla değişmeyen) durum için dalga hareketi denge denklemini kullanıcı tarafından tanımlanan grid sistemli bir hesap alanında sonlu farklar yöntemi ile hesap ederken, batimetri kaynaklı dalga sapması (refraction), sığlaşma (shoaling), akıntı kaynaklı sapma ve sığlaşma, derinlik ve dalga dikliği kaynaklı dalga kırılması (wave breaking), dalga dönmesi



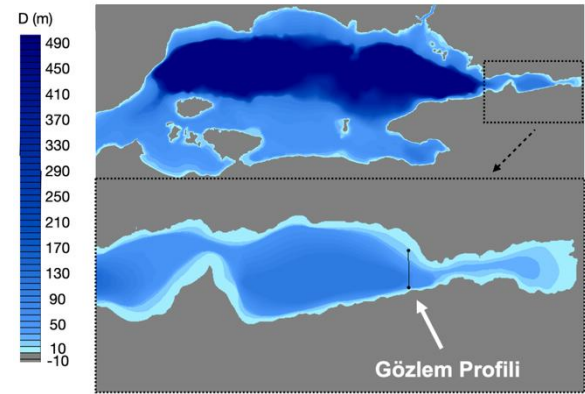
Şekil 3: NCEP veri tabanından temin edilen veriler ile W ~ E (batı ~ doğu) yön aralığı için elde edilen ekstrem saatlik ortalama rüzgâr hızı dağılımları.

(diffraction), dalga yansımaları (reflection), dalga kaynaklı ortalama su seviyesindeki artış (wave-induced set-up), rüzgâr kaynaklı dalga oluşumu, düzensiz dalga-dalga etkileşimi ve gelişmekte olan bir dalga alanı içerisinde enerjiyi dağıtan ve yayan “whitecapping” gibi süreçleri dikkate almaktadır.

Dalga oluşumu ve transformasyonu (dönüşümü) için iki aşamalı bir model kurulmuştur: (1) Tüm Marmara Denizi’ni kapsayan genel model ve (2) çalışma bölgesini daha hassas bir hesap ağı ile tanımlayan İzmit Körfezi Modeli.

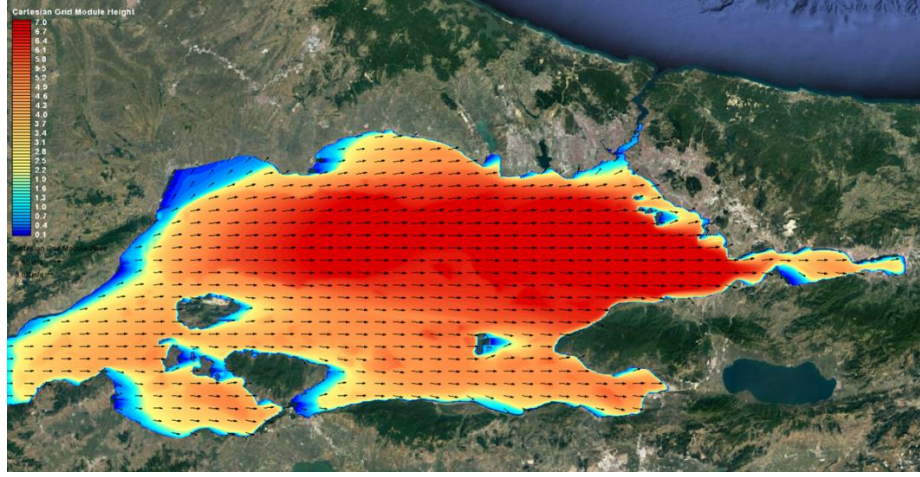
Tüm Marmara Denizi’ni kapsayan dalga modeli için sayısallaştırılan batimetri kullanılarak 400 m x 200 m hücre boyutuna (grid aralığına) sahip bir hesap alanı (grid) tanımlanmıştır (Şekil 4). Model sonuçlarının daha hassas yakın kıyı modeli olan İzmit Körfezi Modeli’nde sınır koşulu olarak kullanılacak olan W yönlü dalga karakteristiklerini belirlemek (bir diğer deyişle, Marmara Denizi’nde elde edilen ekstrem dalgaların İzmit Körfezi girişine taşıyabilmek) için Marmara Denizi ile körfezin birleştiği açık deniz sınırına yakın bir konumda bir gözlem profili tanımlanmıştır (Şekil 4). Her iki model için de deniz seviyesi, fırtına

kabarması dikkate alınarak harita sıfırı üzerinde 1 m şeklinde (+1,00 m CD) tanımlanmıştır.



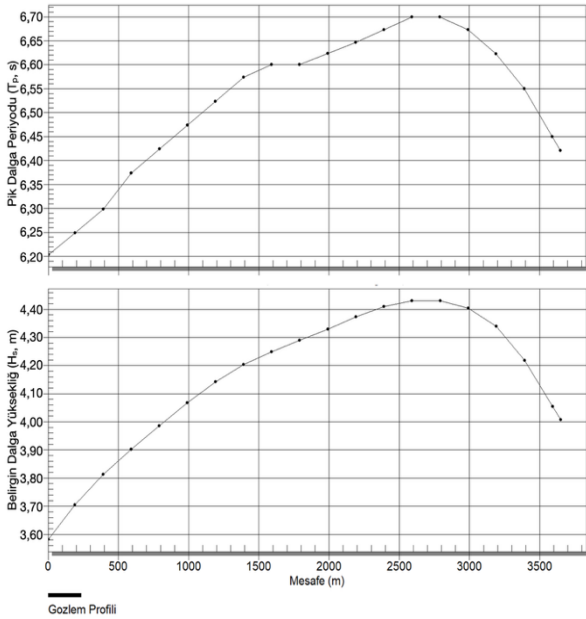
Şekil 4: Marmara Denizi sayısal dalga modeli için hazırlanan model hesap alanı (400 m x 200 m grid aralığı) ve İzmit Körfezi girişinde tanımlanan gözlem profili. D, derinliği ifade etmektedir.

Dalga modeli ile tüm Marmara Denizi üzerinden esmesi öngörülen 100 yıl dönüş aralıklı $U_{10} = 31,0$ m/s saatlik ortalama rüzgâr hızının W yönünden esmesi ile oluşacak belirgin dalga yükseklikleri (H_s) Şekil 5’te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4’teki harita üzerinde gösterilmiş olan gözlem profili boyunca okunan belirgin dalga yükseklikleri ve pik dalga



Şekil 5: W yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için belirgin dalga yükseklikleri 0~7 m renk skalası, $U_{10} = 31,0$ m/s, su seviyesi: CD+1,0 m.

periyodları (T_p) Şekil 6'da ilgili grafikler ile sunulmuştur. Model sonuçlarına göre, gözlem profilinde okunan en büyük belirgin dalga yüksekliği $H_s = 4,43$ m ve pik dalga periyodu $T_p = 6,7$ s olup, İzmit Körfezi Modeli ile W yönlü ve 100 yıl dönüş aralıklı fırtına dalga koşulunun modellenmesi için bu açık deniz tasarım dalgası özellikleri modelin sınır koşulu olarak alınmıştır.



Şekil 6: W yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için Körfez Modeli girişinde tanımlanan gözlem profilinde elde edilen belirgin dalga yükseklikleri (H_s) ve pik dalga periyodları (T_p).

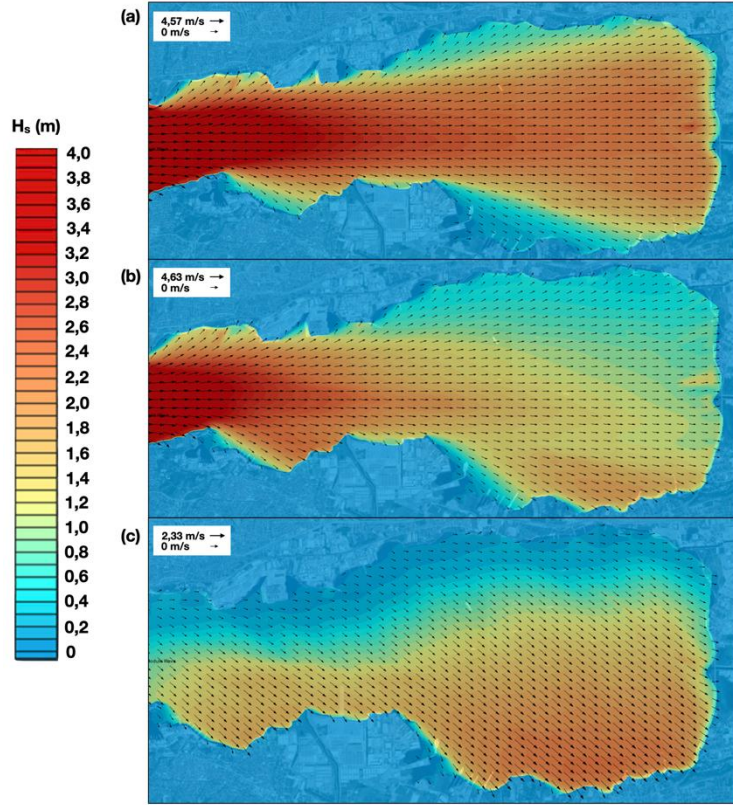
Yatay ekseninde gözlem profili olarak tanımlanan mesafe kuzey-güney istikametindedir. Elde edilen W yönlü ekstrem dalga özellikleriyle birlikte Körfez içerisinde oluşabilecek rüzgâr kaynaklı dalgalar, yakın

kıyıya yukarıda belirtildiği üzere ikinci bir dalga transformasyonu sayısal (numerik) modeli vasıtası ile taşınmıştır. Yakın kıyı modeli (Körfez Modeli) için seyir haritalarından elde edilen batimetrik veriler ile Şekil 7'de görülen dijital batimetri hazırlanmıştır.

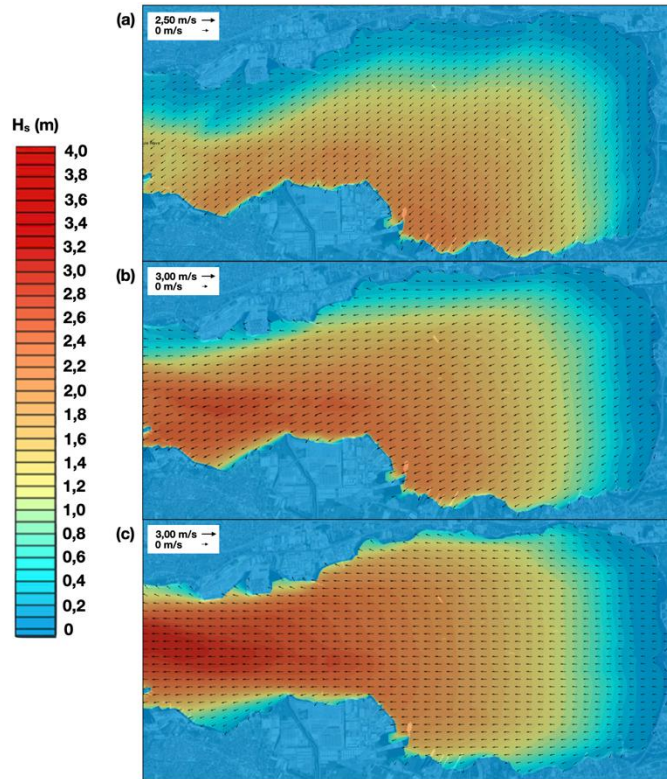


Şekil 7: Yakın kıyı dalga modeli (Körfez Modeli) için sayısallaştırılan batimetri.

Yürütülen dalga transformasyonu sayısal modelleme çalışmasında, W ve WNW (batı-kuzeybatı) yönlü testlerde İzmit Körfezi Modeli girişinde Marmara Denizi Modeli'nden W için elde edilen dalga özellikleri bölgedeki rüzgâr dalgası spektrumuna uygun biçimde sınır şartı olarak kullanılmış, ayrıca ilgili yönden esen 31,0 m/s rüzgâr hızı tanımlanmıştır. NW (kuzeybatı), NNW (kuzey-kuzeybatı), N (kuzey), NNE (kuzey-kuzeydoğu), NE (kuzeydoğu), ENE (doğu-kuzeydoğu) ve E (doğu) yönleri için yürütülen testlerde ise sadece ilgili yönden esen 31,0 m/s rüzgâr hızı tanımlanmıştır. Modelde grid aralıkları, yüksek bir hassasiyet elde edebilmek adına 15 m x 10 m olarak seçilmiştir. İzmit Körfezi Modeli'nden W-N-E hâkim yön bandındaki tüm ara yönler için elde edilen belirgin dalga yüksekliği (H_s) dağılımları Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8: (a) W (batı) yönlü, (b) WNW (batı-kuzeybatı) yönlü, (c) NW (kuzeybatı) yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için belirgin dalga yükseklikleri.



Şekil 9: (a) NE (kuzeydoğu) yönlü, (b) ENE (doğu-kuzeydoğu) yönlü, (c) E (doğu) yönlü 100 yıl dönüş aralıklı fırtına koşulu için belirgin dalga yükseklikleri.

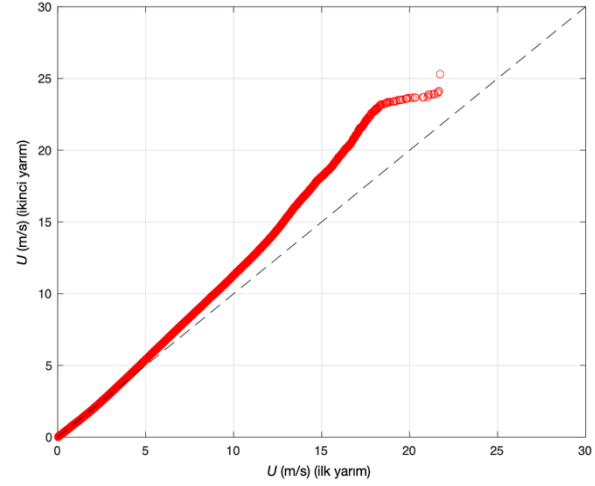
4. TARTIŞMA: EKSTREM DALGA İKLİMİNDE KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ETKİSİ

Bilindiği üzere, küresel iklim değişikliği nedeniyle gerek meteorolojik gerekse hidrolojik ve oşinografik parametrelerin uzun dönemli davranışları zamanla değişmektedir [26]. Yapılan çalışmalar yalnızca deniz seviyeleri, yağışlar ve hava/su sıcaklıklarının değil, aynı zamanda rüzgâr hızı ve dalga yüksekliklerinin ekstrem ve ortalama değerlerinin de kayda değer biçimde değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu itibarla denizlerdeki fırtınaların sıklıkları, süreleri ve şiddetleri de bazı denizlerde dikkate değer biçimde artma eğilimindedir.

Marmara Denizi'nde ve özellikle çalışma bölgesinde (İzmit Körfezi'nde) küresel iklim değişikliğinin eldeki rüzgâr ve dalga verileri üzerinde ne gibi etkilerinin olduğunun daha net anlaşılması için "yenilikçi Şen metodu" kullanılarak 45 yıllık rüzgâr ve dalga verisi üzerinde bir eğilim analizi gerçekleştirilmiştir [27]. Bu yöntem oldukça basit olmakla birlikte, verideki artma veya azalma eğiliminin çok açık biçimde incelenmesini mümkün kılmaktadır. Yöntemin uygulanması için eldeki zaman serisi (veri) kronolojik olarak iki eşit parçaya ayrılmakta, verinin her iki yarısı da küçükten büyüğe sıralanmaktadır. Daha sonra verinin ilk yarısı (geçmiş dönem) ve ikinci yarısı (yakın dönem) sırası ile yatay ve düşey eksenlerde olacak şekilde karşılıklı olarak çizilmektedir. Veri noktalarının aynı grafik üzerinde çizdirilen 1:1 eğim çizgisine göre konumları incelenerek ilgili verinin artış veya azalış eğiliminde olup olmadığı görsel olarak ortaya konabilmektedir.

"Yenilikçi Şen metodu" eğilim analizi uyarınca, rüzgâr hızı ve dalga yüksekliği parametreleri için 1979-2023 yıllarını kapsayan 45 yıllık rüzgâr verisi bu şekilde iki eşit parçaya (22,5 yıl) ayrılarak birbirlerine göre çizdirilmiş ve Şekil 10'da sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere küresel iklim değişikliğinin etkisi özellikle ekstrem rüzgâr hızı verilerinde (fırtına koşullarında) çok belirgin biçimde ortaya çıkmaktadır. Şekildeki rüzgâr hızı değerleri incelendiğinde, 2001-2023 arasındaki değerlerin 1979-2001 arasındaki değerlere göre dikkate değer miktarda yüksek olduğu, bu farkın

rüzgâr hızı değerleri arttıkça daha da arttığı görülmektedir. 2001-2023 arasındaki en yüksek değerler 1979-2001 arasındaki en yüksek değerlere göre %15-%20 mertebesinde artmıştır. Nitekim, bu sonuçlar gözlemlerle de örtüşmektedir.



Şekil 10: 45 yıllık saatlik rüzgâr hızı verisinin iki yarı halinde birbirlerine göre çizdirilmesi sonucu ortaya çıkan "yenilikçi Şen metodu" eğilim grafiği.

Bu durumun somut bir örneği olarak, İzmit Körfezi girişinde 19.11.2023 tarihinde oldukça şiddetli bir fırtına meydana geldiği raporlanmaktadır [28]. Bu fırtına, bölgedeki deniz ve kara ulaşımını olumsuz etkilemekle kalmamış, aynı zamanda bölgedeki kıyı tesislerinde çeşitli maddi hasarlara yol açmıştır. Fırtına öncesinde Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 18 Kasım sabahından itibaren Kocaeli ilinde kuzey ve kuzeybatı yönlerinden fırtına beklendiğini duyurmuş, yapılan duyuruda 19 Kasım Pazar günü ise rüzgârın kuvvetli fırtına (20-25 m/s), yer yer tam fırtına (25-30 m/s) şeklinde eseceği tahmin edilmiştir [29]. Fırtına sırasında Hereke Vapur İskelesi'ndeki yolcu aktarmasında kullanılan 400 metre karelik yüzer iskele yaklaşık 50 metre açığa sürüklenmiş, Körfez ilçesinde ise Tütünçiftlik Balıkçı barınağında bulunan 7 balıkçı teknesi batmıştır [28]. Son 15-20 yıl içinde artarak yaşanan bu ve benzeri olaylar, bölgedeki denizcilik faaliyetlerini ve kıyı altyapısını ciddi şekilde etkilemiş, yetkililer tarafından çeşitli önlemler alınmasına yol açmıştır.

Bu sonuçlar, küresel iklim değişikliğinin Marmara Denizi'ndeki fırtınaların sıklığını ve şiddetini arttırdığını kesin biçimde ortaya koymaktadır. Kıyı yapıları tasarımında küresel iklim değişikliğinin dikkate alınması elzemdir. Dolayısıyla bu çalışmada son 50 yıldan ziyade 25 yılı kapsayan veriler ile çalışılarak ekstrem rüzgâr ve dalga

analizi yapılması tercih edilmiş, bu sayede İzmit Körfezi civarında şiddetlenen fırtına koşullarının (ekstrem rüzgâr ve dalga koşullarının) yapılan analize daha gerçekçi biçimde yansıtılması ve daha güncel bir ekstrem dalga iklimi elde edilmesi sağlanmıştır. 25 yıldan daha kısa sürelerde yapılan ekstrem analizlerde ise belirsizliğin ve saçılımın artacağı görüldüğünden çalışma bu şekilde yürütülmüştür.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, İzmit Körfezi içerisinde planlanan veya yer alan kıyı ve liman yapılarının tasarım ve analizine esas teşkil edecek ekstrem dalga karakteristiklerinin belirlenmesi ve elde edilen sonuçların ilgili mühendislik çalışmalarına altlık teşkil etmesi amacıyla, önce ekstrem rüzgâr analizi yapılmış ve ardından açık deniz ve yakın kıyı ekstrem dalga analizi sayısal (nümerik) bir model ile gerçekleştirilmiştir.

Bu doğrultuda ilk olarak, seyir haritaları kullanılarak Marmara Denizi ve İzmit Körfezi özelinde dijital batimetri hazırlanmıştır. Marmara Denizi 40,7° N (kuzey), 28,3° E (doğu) koordinatları için NCEP-CFSR (NOAA, USA) veri tabanından 1999-2023 yılları arasına ait 25 tam yılı kapsayan saatlik ortalama rüzgâr hızı ve yönü güncel verileri alınarak küresel iklim değişikliğinin tetiklediği şiddetli rüzgâr ve dalga koşullarının en iyi şekilde temsil edilmesi amaçlanmıştır. İzmit Körfezi içerisindeki çok sayıda mevcut kıyı ve deniz yapıları göz önüne alınarak, dalgakıranlar, iskele ve rıhtım gibi yanaşma yapıları, deniz dolguları gibi tesis ve yapıların tasarım ömrüne yönelik olarak mevcut standartlar [20] tarafından önerilen 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem rüzgâr hızları, kısa feç mesafelerine sahip kapalı denizlerde güvenilir sonuçlar verdiği bilinen Gumbel dağılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda, kuzey-kuzeydoğu yönünden gelen 100 yıl dönüş aralığına sahip ekstrem rüzgâr hızı 31,0 m/s olarak belirlenmiştir.

Spektral dalga modellemesi ise iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiş, önce tüm Marmara Denizi'ni kapsayan genel bir model kurularak, coğrafi konumu nedeniyle Marmara Denizi'nde oluşan batı yönlü dalgaların etkisi altında olan İzmit Körfezi girişindeki dalgalar modellenmiştir. Bu doğrultuda, açık denizde elde edilen 100 yıl dönüş

aralıklı ekstrem rüzgârların oluşturduğu ve İzmit Körfezi girişinde etkili olacak batı yönlü dalgalar modellenerek körfezin açık deniz sınırında tanımlanan "gözlem profilinde" batı hâkim yönlü dalgalar belirlenmiş, bu noktada belirgin dalga yüksekliği $H_s = 4,43$ m ve pik dalga periyodu $T_p = 6,7$ s olarak hesaplanmıştır. Bu tasarım dalgaları, ikinci aşamada yakın kıyıdaki dalga ikliminin incelenmesi için oluşturulan yüksek uzamsal çözünürlüklü İzmit Körfezi Modeli'nde (yakın kıyı modeli) sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

Körfez içerisindeki yakın kıyı ekstrem dalga karakteristiklerini belirlemek amacıyla dijital batimetri verileri kullanılarak hazırlanan ve dalga dönüşümünün (transformasyonun) de göz önüne alındığı İzmit Körfezi Modeli, W (batı) ~ N (kuzey) ~ E (doğu) yön bandından dokuz farklı yön için çalıştırılmıştır. Bu sayede hem Marmara Denizi'nden gelen açık deniz dalgalarının hem de körfez içinde esen ekstrem rüzgârların yerel olarak oluşturduğu dalgalar dikkate alınarak, İzmit Körfezi içindeki 100 yıl dönüş aralıklı ekstrem dalga iklimi alansal olarak elde edilmiştir.

Beklenebileceği üzere, batı yönlü dalgaların körfez içerisindeki en etkili dalgalar olduğu; buna karşın doğu yönlü dalgaların sınırlı feç mesafesi nedeniyle daha düşük enerjiye sahip oldukları görülmüştür. Dolayısıyla İzmit Körfezi'nde yapılacak olan mühendislik çalışmalarında ve planlamalarda, Marmara Denizi'nde görece daha uzun feç mesafelerinde oluşup körfez içerisine ilerleyen batı hâkim yönlü ekstrem dalga özelliklerinin hassas bir şekilde belirlenmesi ve körfez kıyılarındaki kıyı yapılarına etki edecek tasarım dalgalarının güvenilir yöntemlerle tahmin edilmesinin oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Küresel iklim değişikliğinin etkilerini gözlemek amacıyla 45 yıllık rüzgâr verisi ile eğilim (trend) analizi "Yenilikçi Şen Metodu" ile gerçekleştirilerek özellikle 2001-2023 arasında ekstrem rüzgâr hızlarının son dönemde geçmiş dönemlere göre %15-%20 mertebesinde arttığı görülmüştür. Bu bağlamda, 1999-2023 yılları arasındaki 25 yıllık ölçüm verileri ile gerçekleştirilen bu çalışmada alansal dağılım olarak sunulan bulguların, İzmit Körfezi'nde yapılacak olan kıyı ve deniz yapıları tasarım ve analizlerinde uygulamacılar ve

araştırmacılar için güncel bir altlık oluşturma noktasında faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkıları: Tüm yazarlar literatür taraması, sayısal modelin oluşturulması, sonuçların değerlendirilmesi ve analizlerin yapılması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi süreçlerine katkı sağlamışlardır.

Teşekkür: Bu çalışma 1773 İTÜ Teknopark Teknoloji Transfer Ofisi (1773TTO) A.Ş. bünyesinde yürütülen 202400103 numaralı Ar-Ge projesinin bir çıktısı olarak yayınlanmıştır. Ayrıca, bu makalede bilgi birikiminden faydalandığımız ve modelleme konusunda desteklerini esirgemeyen Sayın Atakan Yüce'ye teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışmaları: Çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

6. KAYNAKLAR

- [1] S. Baysal, "Liman yaklaşım kanallarında kumlanma analizi ve uygulamacılar için basitleştirilmiş bir model," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [2] S. Kabdaşlı, *Kıyı Mühendisliği*, İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1990.
- [3] F. Gerstner, "Theorie der wellen," *Ann. Phys.*, vol. 32, no. 8, pp. 412–445, 1802.
- [4] G. B. Airy, *Tides and Waves: Extracted from the Encyclopaedia Metropolitana*, Chichester, UK: William Clowes and Sons, 1845.
- [5] G. G. Stokes, "On the theory of oscillatory waves," *Trans. Cam. Philos. Soc.*, vol. 8, pp. 441–455, 1847.
- [6] J. S. Russell, *Report on Waves: Made to the Meetings of the British Association in 1842–43*, London, 1845.
- [7] H. U. Sverdrup and W. H. Munk, "Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting," Hydrographic Office, no. 601, 1947.
- [8] W. J. Pierson, G. Neumann, and R. James, "Observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics," *Hydrogr. Off. Publ.*, vol. 603, p. 180, 1955.
- [9] W. J. Pierson Jr and L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii," *J. Geophys. Res.*, vol. 69, no. 24, pp. 5181–5190, 1964.
- [10] K. Hasselmann *et al.*, "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)," *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, Reihe A, Hamburg, 1973.
- [11] C. L. Bretschneider, "Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves," The Board, Tech. Rep. 118, 1959.
- [12] H. Mitsuyasu, "On the growth of the spectrum of wind-generated waves," *Coastal Eng. Japan*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 1970.
- [13] L. Lin, Z. Demirbilek, H. Mase, F. Yamada, and J. Zheng, "CMS-Wave: A nearshore spectral wave processes model for coastal inlets and navigation projects," U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Tech. Rep. ERDC/CHL-TR-08-13, Mississippi, 2008.
- [14] L. Lin, Z. Demirbilek, R. Thomas, and J. Rosati III, "Verification and validation of the coastal modeling system, report 2: CMS-Wave," U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Tech. Rep. ERDC/CHL-TR-11-10, Mississippi, 2011.
- [15] C. Favaretto, L. Martinelli, E. M. P. Vigneron, and P. Ruol, "Wave hindcast in enclosed basins: comparison among SWAN, STWAVE and CMS-Wave models," *Water*, vol. 14, no. 7, p. 1087, 2022.
- [16] Coastal Engineering Manual (CEM), U.S. Army Corps of Engineers, 2002.
- [17] S. Baysal and V. S. O. Kırca, "Prescreening of sedimentation potential in harbor approach channels: a parametric model," *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.*, vol. 151, no. 3, p. 4025009, 2025.
- [18] Y. Goda, *Random Seas and Design of Maritime Structures*, vol. 33, Singapore: World Scientific, 2010.
- [19] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [20] AYGM, *Kıyı Yapıları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları*, T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, 2016.
- [21] R. G. Dean and R. A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, vol. 2, Singapore: World Scientific, 1991.

- [22] I. R. Young, *Wind Generated Ocean Waves*, vol. 2, Elsevier, 1999.
- [23] E. J. Gumbel, *Statistics of Extremes*, New York: Columbia Univ. Press, 1958.
- [24] V. V. Kharin and F. W. Zwiers, "Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM," *J. Clim.*, vol. 13, no. 21, pp. 3760–3788, 2000.
- [25] S. Coles, *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, vol. 208, Springer, 2001.
- [26] IPCC, *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2019.
- [27] Z. Şen, "Innovative trend analysis methodology," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 17, no. 9, pp. 1042–1046, 2012.
- [28] Anadolu Ajansı (AA), "Kocaeli, Bartın, Sakarya, Düzce ve Zonguldak'ta sağanak ve kuvvetli rüzgar hayatı olumsuz etkiliyor," Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/kocaeli-bartin-sakarya-duzce-ve-zonguldakta-saganak-ve-kuvvetli-ruzgar-hayati-olumsuz-etkiliyor/3058307>
- [29] Çağdaş Kocaeli Gazetesi, "Kocaeli için fırtına ve sağanak yağış uyarısı," Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.cagdaskocaeli.com.tr/haber/17668246/kocaeli-icin-firtina-ve-saganak-yagis-uyarisi>