

Dünyada ve Türkiye’de DALGA ENERJİSİ

İsmail H. Altaş ve Erdiñ Şahin
Karadeniz Teknik Üniversitesi
ihaltas@ktu.edu.tr, esahin@ktu.edu.tr

Dalga enerjisi, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi popüler yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazla enerji yoğunluğuna ve gün içerisinde daha fazla kullanılabilirlik durumuna sahiptir. Fakat dalga enerjisinin kullanımı rüzgâr ve güneş kadar yaygınlaşmamıştır. Bunun başlıca nedeni dalgaların doğal yapısı gereği üretilen enerjinin düzensiz karakteristik göstermesi, dalga enerji dönüştürücülerinin karmaşık ve maliyetli yapısıdır. Özellikle doğrudan sürürlü dalga enerji sistemlerinde üretilen düzensiz gücün şebekeye veya yüke aktarılmadan önce güç elektroniği ara yüzleri, enerji depolama üniteleri veya karma enerji sistemleri ile birlikte kullanılması gerekmektedir.

Bu makalede dalga enerji sistemleri genel olarak ele alınmakta, dalga enerji potansiyeli, dünya genelinde çokça kullanılan dalga enerji dönüştürücülerini ve ülkemizde dalga enerjisine yönelik yapılan projeler sunulmaktadır. Bu makalede verilen bilgiler, ülkemiz için de önemli bir çevre dostu ve yerli enerji kaynağı olabilecek durumdaki dalga enerji potansiyelinin de değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

1. Giriş

Enerji, önemi dünden bugüne taşınan ve geleceğe de taşınacak olan bir konudur. Bu nedenle, ülkeler sürekli enerji politikaları geliştirmekte, yarımın ihtiyacını bugünden planlamakta ve geleceğe yönelik yatırımlar yapmaktadırlar.

Enerji tüketim seviyesi, toplumların gelişmişlik düzeyinin gösterilmesinde kullanılan önemli parametrelerden bir tanesidir. 7,3 milyar olan dünya nüfusunun 2040 yılında 9.1 milyara ulaşması beklenmektedir. Nüfusta beklenen %25’lik artış ve ekonomik gelişmeler ile birlikte dünya mevcut enerji

ihtiyacının (ulaşım, endüstriyel, elektrik üretimi ve konut alanlarında) 2040 yılında, 2015’e göre %25 oranında artacağı tahmin edilmektedir [1].

Küresel elektrik enerjisi ihtiyacının ise 2015-2040 yılları arasında 21-22 bin TWh’dan, 33-34 bin TWh’lara kadar %60 oranında artması beklenmektedir [1]. Dünya üzerinde elektrik enerjisi üretmek için kullanılan kaynaklar; kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, rüzgâr/güneş enerjisi ve diğer (dalga enerjisi, jeotermal, hidroelektrik, biyokütle vb.) yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. 2015 yılında yapılan bir araştırmada elektrik enerjisi üretiminde en çok paya ait kaynağın %40 ile kömür olduğu bildirilmiştir [1]. 2040 yılına gelindiğinde ise elektrik enerjisi üretiminde kömür oranının %30’un altına düşmesi beklenmektedir. Bu düşüşün sebebi ise karbondioksit salınımını azaltmak için ülkelerin enerji politikalarında doğal gaz, nükleer ve yenilenebilir enerjilere olan yatırımlarını artıracak olmalarıdır.

Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgâr enerjisinin 2040 yılına gelindiğinde %360 büyüme göstermesi ve bu kaynaklar kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin, küresel elektrik enerjisi üretiminde yaklaşık %15’lik bir paya sahip olması beklenmektedir [1].

Ülkemizde ise elektrik enerjisi üretiminde 2005 ve 2015 yıllarına ait elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların kurulu güç dağılımları Tablo 1’de gösterilmektedir [2]. Tablo 1’de verilen kaynaklardan termik başlığı, kömür, sıvı yakıtlar, doğal gaz, çok yakıtlı ve atık-atık ısı enerji kaynaklarını içermektedir.

Ülkemizin kurulu gücü 2005 yılından 2015 yılına kadar geçen süre içerisinde yaklaşık olarak iki kat artmış ve hızla artmaya da devam etmektedir.

Tablo 1. Ülkemizin 2005 ve 2015 yıllarına ait elektrik enerjisinde kullanılan kaynak dağılımları ve kurulu güç toplamları [2]

Yıl	Termik	Hidrolik	Jeotermal	Rüzgâr	Güneş	Toplam (MW)
2005	25.902,3	12.906,1	15,0	20,1	-	38.843,5
%	66,68	33,23	0,04	0,05	-	100,00
2015	41.903,0	25.867,8	623,9	4.503,2	248,8	73.146,7
%	57,29	35,36	0,85	6,16	0,34	100,00

Geçen süre içerisinde tıpkı dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de termik santrallere dayalı elektrik enerjisi üretimi yüzde olarak azalmış, yenilenebilir enerji türlerinden hidrolik, jeotermal, rüzgâr ve güneş enerjilerine olan yatırımlar artmıştır.

2. Dalga Enerjisi

Fosil yakıt fiyatlarının sürekli değişken olması ve bu kaynakların çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle yenilenebilir enerjiye olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Öyle görünüyor ki geleceğin enerji ihtiyacının büyük bir bölümü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacaktır [3, 4].

Güneş enerjisi canlı yaşamı ve varlığı için tartışmasız bir kaynaktır. Son yıllarda güneş ışınlarından elektrik üretimi yapan güneş panellerinin kullanımı teknolojik gelişmeler ile birlikte bir hayli dikkat çekmektedir. Güneşin dünya yüzeyini farklı sıcaklıklarda ısıtması ile diğer bir önemli yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr oluşmaktadır. Rüzgârın ise okyanus ve deniz yüzeylerinde esmesiyle dalga oluşumu gerçekleşmektedir. Rüzgâr sayesinde üretilen bu dalgaların enerjisi elektrik üretiminde kullanılabilir. Öyle ki İspanya, Japonya, Portekiz ve Tayland gibi bazı ülkeler dalga enerji potansiyelini göerek gelecek yılların yatırımını şimdiden planlamışlardır [5].

Küresel anlamda teorik olarak hesaplanan dalga enerji potansiyeli yaklaşık 32.000 TWsaat/yıl (3.65 TW)'dır [6]. Dalga enerjisinin, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi popüler enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında öne çıkan en önemli özelliği, en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Güneş enerjisinin rüzgâra, rüzgârın da dalga enerjisine dönüştüğü çevrimde güneşten dalga enerjisine doğru güç yoğunluğunun arttığı bilinmektedir. [7]'de verilen bir araştırmaya göre 15o kuzey enleminde ölçülen solar güneşlenme 0.17 kW/m²'dir. Bu solar güneşlenmenin ortaya çıkardığı ortalama rüzgâr hızı 10 m/s'dir ve bu rüzgârdan elde edilebilecek güç yoğunluğu ise 0.58 kW/m²'dir. Elde edilen bu rüzgârın ise 8.42 kW/m² güç yoğunluğuna sahip dalga oluşturabildiği hesaplanmıştır.

Dalga enerjisi güç yoğunluğunun, rüzgâr enerjisi güç yoğunluğundan yaklaşık 15 kat büyük olması, dalga enerji dönüştürücü (DED) sisteminin fiziksel olarak rüzgâr enerjisi dönüştürücü sisteminden yaklaşık 15 kat daha küçük olması sonucunu doğurabilir. Aynı güç kapasitesine sahip rüzgâr türbini ve dalga enerji dönüştürücüsü [8]'de fiziksel büyüklük açısından da karşılaştırılmıştır. Vestas adında ve 850 kW'lık güç kapasitesine sahip bir rüzgârgülü, 60 m kule yüksekliği ve 52 m pervane çapına sahiptir. Buna karşılık 750 kW güç kapasiteli Pelamis adında DED'in boyu 150 m ve çap genişliği sadece 3.5 m'dir.

Dalga enerjisini öne çıkaran diğer bir konu ise gün içerisindeki kullanılabilirlik durumudur. Belirli bir bölgedeki dalga enerjisi kullanılabilirliği zamanın %90'ına kadar yayılabilirken, güneş ve rüzgâr enerjisi kullanılabilirliği yalnızca zamanın %20-30'u seviyesinde bulunmaktadır [9].

Dalga enerjisi kullanımının rüzgâr ve güneş enerjisi gibi artmamasının nedeni, deniz dalgasından enerji çıkarımının yukarıda bahsedilen enerji çeşitleri kadar basit olmamasından kaynaklanmaktadır. Dalgaların genlik ve frekansının doğası gereği düzensiz olması üretilen enerjinin de düzensiz olmasına yol açmaktadır. Üretilen bu enerji direkt olarak yük beslemesinde veya şebeke bağlantısında kullanılamayacağı için ultra-kondansatör, batarya veya diğer enerji kaynaklarının birlikte kullanıldığı bütünlük bir enerji sistemine veya mekanik sistemler (hidrolik-pnömatik devreler) ile DED yapısının değiştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [10].

Dalgalardan enerji çıkarımında karşılaşılan diğer bir önemli zorluk ise olağanüstü hava koşulları yani fırtınalardır. Kıyı şeridinde veya deniz açıklarında konuşlandırılan dalga enerji dönüşüm sistemi bu tarz doğa olaylarına karşı korunaklı olmalıdır.

Sağladığı avantajlar dalga enerjisini diğer yenilenebilir enerji sistemleri arasında her ne kadar ön plana çıkarsa da, dalga enerji sistemlerine yapılan yatırımlar güneş ve rüzgâr enerjisine yapılan yatırımlara oranla daha azdır. Küresel anlamda yaşanan ekonomik kriz nedeniyle de dalga enerji teknolojilerine yatırım yapmak daha da zor hale gelmektedir [10].

Enerji kaynaklarına yapılacak olan yatırımların kararlaştırılmasında üretim ve iletim maliyetlerinin karşılaştırılması büyük önem arz etmektedir. Bu karşılaştırmada ise genellikle seviyelendirilmiş enerji maliyeti (SEM) (levelized cost of energy) dikkate alınmaktadır. SEM, proje yatırımının karlı olması için üretilen elektriğin satılması gereken enerji fiyatı olarak tanımlanmaktadır. 2013 yılı Dünya enerji konseyi raporuna göre SEM değeri dalga enerjisi için ortalama 49.6 cents/kWsaat'tir [11]. Bu değer diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Yapılacak olan yatırımlar ve teknolojik gelişmeler ile dalga enerjisi SEM değerinin 2030 yılına kadar 16-17 cents/kWsaat oranlarına kadar düşürülmesi hedeflenmektedir [11]. Ayrıca dalga enerjisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretim ve iletim masrafları (\$/kWh) açısından karşılaştırılması Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 2'ye göre gelecek yıllarda dalga enerjisi sistemlerinde meydana gelecek olan teknolojik gelişmeler ile ortaya çıkacak maliyet hesabı diğer yenilenebilir enerji sistemleriyle yarışabilir hale gelecektir.

Tablo 2. Yenilebilir enerji kaynakları için hesaplanan yaklaşık üretim ve iletim masrafları [12]

Enerji teknolojisi	2005-2010	2020>
Rüzgâr (Kara)	\$0.04-0.07	≤ \$0.04
Rüzgâr (Açık deniz)	\$0.10-0.17	\$0.08-0.13
Dalga	≥ \$0.11	\$0.04
Jeotermal	\$0.04-0.07	\$0.04-0.07
Hidroelektrik	\$0.04	\$0.04
Fotovoltaik	> \$0.2	\$0.1
Gelgit	> \$0.11	\$0.05-0.07

3. Dünyada ve Ülkemizde Dalga Enerji Potansiyeli

Dünya üzerinde dalga enerjisi açısından en zengin alanlar hem Kuzey hem de Güney yarım kürenin 40°-60° enlemleri arasında kalan alandır. Fakat en yüksek yıllık ortalama potansiyele sahip alan, Güney yarım kürede yer alan 40°-60° enlemleri arasındadır [10]. Dalga enerjisi açısından zengin bazı bölgelerin sahip olduğu net dalga gücü (5 kW/m'den küçük alanlar ve buzullar hariç) Tablo 3'te verilmektedir [13].

Bazı ülkelere ait dalga güçleri; İrlanda 21GW, Portekiz 10GW, Danimarka 3.4 GW, İsveç 1GW, İngiltere 120 GW ve Akdeniz tarafında Fransa, İtalya, İspanya ve Yunanistan'ın toplam dalga gücü 30 GW olarak hesaplanmaktadır [14].

Tablo 3. Dalga enerjisi açısından zengin bazı bölgelerin sahip olduğu net dalga gücü [13]

Bölge	P _{net} (GW)
Avustralya ve Yeni Zelanda	574
Güney Amerika'nın batısı	324
Avrupa'nın kuzeyi ve batısı	286
Asya'nın güney doğusu ve Malenezya	283
Kuzey Amerika'nın batısı	207
Güney Amerika'nın doğusu	202

Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizin kıyı uzunluğu yaklaşık 8210 km'dir. Ancak Türkiye'nin dalga potansiyeli, her kıyı bölgesinde küçük dalga enerji sistemleri kurmak için uygun değildir. Türkiye'nin toplam sahil uzunluğunun yaklaşık beşte biri 18.5 TWsaat/yıl (yaklaşık 2.11GW) dalga enerjisi teknik potansiyeline sahiptir [15]. [16]'da verilen bilgilere göre ise ülkemizin dalga enerjisi potansiyeli 4-17 kW/m (m: dalga tepe uzunluğu) dalga gücü aralığın-

da kullanılabilir kaynak olarak yaklaşık 10 TWsaat/yıl olarak belirtilmiştir. İstanbul Boğazı'nın kuzeyi, Batı Karadeniz bölgesi ve Ege Denizi'nin güneybatı kıyıları (Marmaris, Finike arası) dalga enerjisi için en iyi mevkiler olarak önerilmektedir [16].

Karadeniz Bölgesinin dalga enerji potansiyelinin araştırılmasına yönelik bir kaç bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir [17-20]. [18]'de Karadeniz'in 15 yıllık sayısal verileri temel alınarak dalga enerjisi potansiyeli araştırılmıştır. Buna göre, Karadeniz'in güneybatı kıyıları, bir dalga çiftliği kurulması için en iyi yer olarak önerilmektedir. Karadeniz'in batı bölgelerinin (özellikle güneybatıda yıllık ortalama dalga enerjisi kaynağı 3 kW/m'ye kadar çıkmaktadır) doğu bölgelerden daha enerjik dalgalara sahip olduğu saptanmıştır [18]. [19]'da yapılan çalışmada ise Karadeniz'e ait 13 yıllık rüzgâr verileri 3. Jenerasyon spektral dalga modeli ile analiz edilmiş ve dalga enerji potansiyelinin batıdan doğuya doğru azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre, Karadeniz'in Güney Batı bölümünde en büyük ortalama dalga gücü yaklaşık 7 kW/m ve doğu kesiminde ortalama dalga gücü yaklaşık 3 kW/m'dir. [20]'de yapılan çalışmaya göre ise Karadeniz'in güneydoğu sahillerindeki dalga enerjisi potansiyeli verilmektedir. Bu çalışmada Sinop 10 MWh/m dalga güç akısı ile en yüksek değere sahip il olmuştur. Diğer kıyı şeridi illerinin (Samsun, Ordu, Giresun, Trabzon, Rize ve Hopa) yıllık dalga enerjisi potansiyeli yaklaşık 6 MWh/m olduğu ve bu potansiyeli 0.5-2 m belirgin dalga yüksekliklerine ve 2-5 s dalga periyotlarına sahip dalgaların oluşturduğu belirtilmektedir. Ayrıca [20]'de, gelecekte artacak olan DED'lerin verimliliği ve dalga enerjisinin çıkarılması için teknolojik yeteneklerin geliştirilmesi ile dalga enerjisinin dikkat çekici bir enerji kaynağı haline geleceği ve Karadeniz'in güneydoğusundaki kıyılarında tahmin edilen dalga enerjisi potansiyelinin düşük olduğu belirtilmektedir.

Ülkemizde gerçekleştirilen gerçek dalga enerjisi uygulamalarına bakacak olursak, bu konu ile ilgili ülkemizde yapılan ciddi prototip denemelerinden bir tanesi, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) ve Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş. (TEMSAN) işbirliğiyle 15 Şubat 2008 tarihinde başlatılan "Dalga Enerjisinden Elektrik Üretimi" isimli projeye Sakarya'nın Karasu ilçesinde gerçekleştirilmiştir. 5 kW gücünde ve mobil olarak tasarlanan sistem 4 adet duba, şamandıra ve generatörden meydana gelmektedir. Sistem dalgaların dikey hareketinin şamandıra ile generatöre iletilmesiyle çalışmaktadır [21].

Son zamanlarda Karadeniz için dalga enerjisi açısından sevindirici bir gelişme de yaşanmıştır. Batı

Karadeniz Kalkınma Ajansı (BAKKA)'nın 27.03.2017 tarihli duyurusunda Avustralya menşeli CSG Exploration and Production Services firması ile gerçekleştirilen görüşmelerde Zonguldak'a ücretsiz bir pilot tesis kurulmasının talep edildiği ve firmanın 50 kW gücündeki bu tesisi ücretsiz olarak kurmayı kabul ettiği belirtilmiştir [22]. Böylelikle Karadeniz'de dalga enerjisi uygulamasına başlanacaktır. Bu gelişme bölgemiz ve ülkemiz için dalga enerji sistemlerinin geleceği açısından oldukça önemlidir.

4. Dalga Enerjisi Dönüştürücü (Türbin) Teknolojileri

Dalga enerjisi dönüştürücüleri (DED) en temel anlamda dalganın yatay ve dikey hareketlerini yakalayarak bu hareket enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. DED'ler ile ilgili yapılan çalışmaların patent tarihi 1799 yılına kadar dayanmaktadır [23]. DED sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda Japonya, Kuzey Amerika ve Avrupa'da binden fazla dalga enerji dönüşüm yöntemi patentlenmiştir [24]. Tasarımdaki bu büyük değişimlere rağmen, DED'ler genellikle konum ve türe göre sınıflandırılmaktadır [25].

Konumuna göre DED sistemleri kıyı, yakın kıyı ve açık deniz olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Kıyı tipi sistemlerinde DED'ler kıyı şeridinde konumlandırılır ve sığ sulara yerleştirilmektedir. Bu tip DED'lerin en büyük avantajı kurulmasının bakımının kolay olması ve üretilen enerjiyi şebekeye aktarmak için uzun deniz kablosuna ihtiyaç duyulmamasıdır. Bununla birlikte, uygun kıyı alanlarının kısıtlı olması ve kıyı dalgalarının daha az enerji içermesi kıyı enerji sistemlerinin olumsuz yönleri olarak tartışılmaktadır [25].

Yakın kıyı DED sistemleri kıyıya birkaç yüz metre mesafede ve 10-25 m derinlikte konumlandırılan DED'leri içermektedir. Bu alandaki DED'ler genellikle deniz tabanına sabitlenir ve salınan gövde tarzında uygulamaları mevcuttur. Ancak yapı, dalgaların ortaya çıkardığı gerilmeyi taşımalıdır. Tıpkı kıyı sistemlerinde olduğu gibi yakın kıyı sistemlerinin de dalgardan enerji çıkarımı potansiyeli düşük güçlü dalgalar nedeniyle daha azdır [25].

Açık deniz uygulamaları ise genellikle 40 m'den daha derin sularda DED'lerin konumlandırılmasıdır. Bu tarz sistemler açık sularda dalga genliği ve periyodu daha fazla olduğu için dalga gücünden en çok yararlanan sistemlerdir. Fakat açık denize yerleştirilen DED'lerin bakımı pahalıdır ve dönüştürücü büyük genlikli dalgaların verebileceği hasarlara dayanıklı tasarlanmalıdır. Ayrıca, enerjinin kıyıya taşınması için uzun ve pahalı deniz kablolarına ihtiyaç duyulmaktadır [10].

Literatürde DED teknolojileri olarak salınımlı su kolonu (SSK), salınan gövde (SG) ve üstten aşımli sistemler (ÜAS) üzerine yapılan çalışmalar yer almaktadır. Bunlar arasında ise SG'li sistemler en sık kullanılan DED çeşidi olarak belirtilmiştir [26].

SSK sistemlerinde kolon adı verilen yapıların alt kısmında deniz suyu, üst kısmında ise hava yer almaktadır. Dalga hareketinin üstte yer alan havayı sıkıştırmasıyla, oda içerisinde sıkışan havanın elektrik jeneratörünü döndürmesi sonucunda enerji üretilmektedir [27]. En önemli örneği, LIMPET adı verilen, kıyı konumlu DED tipidir [24].

ÜAS'ler bir rampa yardımıyla topladıkları dalgaların kinetik enerjisini sistemin haznesinde toplayarak potansiyel enerjiye dönüştürmektedir. Depolanan bu su tıpkı hidrolik sistemlerde olduğu gibi tribüne iletilmektedir [27]. Bu teknoloji ile çalışan en bilindik DED tipi ve açık deniz uygulamalarında kullanılan ilk ÜAS olma özelliği taşıyan sistem Wave Dragon'dur (2003 yılında Danimarka'da, gücü: 140kW, rezervuar genişliği: 55m3 olan bir sistem kurulmuştur.) [28].

SG adı verilen sistemler ise genellikle açık sularda kurulan sistemlerdir. Dalgaların itici gücü DED gövdesini aşağı-yukarı ve/veya sağa-sola hareket ettirerek enerji indüklenmesini sağlar [27]. Bu tarz sistemler kendi içerisinde hidrolik ve doğrudan sürüslü (DS) olmak üzere ikiye ayrılır.

SG tip hidrolik sistemlerde hidrolik pompalar elektrik jeneratörünü çalıştırmaktadır. Bu tip DED'lerin en bilinen uygulaması Pelamis adı verilen DED'dir [29]. Eklemlili bir yapıdan oluşan Pelamis şu an ticari amaçlı kullanılan bir DED teknolojisidir. Pelamis'in 2008 yılında Portekiz açıklarında (kıyıda 5 km uzaklıkta) konumlandırılan 750 kW'lık bir uygulaması vardır [30].

SG tipi DED'lerin diğer bir uygulaması da DS sistemlerdir. Hidrolik sistemlere göre yapısı daha basit olan DS sistemler, verimli bir şekilde dalgadan enerji çıkarmak için kullanılmaktadır [27]. Yapısı temel olarak deniz yüzeyinde hareket eden bir şamandıra ve doğrusal generatörden (DG) meydana gelen DS sistemler ile üretilen 3-faz elektrik enerjisi dalganın düzensiz karakteristiğini içermektedir. Bu durum üretilen enerjinin direkt yük beslemesinde veya şebeke bağlantısında kullanılmasına engel olmaktadır. Dolayısıyla DS sistemler ile üretilen enerjinin güç elektroniği devreleri ile düzenlenmesi gerekmektedir [27]. DS-DED'in en bilinen uygulaması Archimedes dalga salınacağıdır (ADS). Deniz tabanına sabitlenmiş olan ADS sistemi, içi hava dolu şamandıranın üzerinden geçen dalganın dikey konum hareketiyle elektrik enerjisi üretmektedir [31]. Şamandıranın hareketi doğrusal olduğu için elektrik üretiminde

DG kullanılmaktadır. Su altı uygulaması olan ADS dalga enerji sisteminin ilk prototipi 2000 yılında Portekiz kıyısında konumlandırılmış olup, 2MW'lık maksimum güce sahiptir [32]. Lysekil projesi (gücü:10 kW, ülke: İsveç) ve Oregon Üniversitesinin geliştirildiği L10 DED sistemi (gücü:10k W, ülke: Amerika) DS sistemlere verilebilecek diğer önemli çalışmalardır [33, 34].

5. Dalga Enerji Sistemlerinde Güç Elektroniği Uygulamaları

Deniz dalgalarının genlik ve süreklilikleri düzensizdir. Farklı zamanlarda farklı genliklere sahiptirler. Oluşum sıklıkları da sabit aralıklarda değil, rastgeledir. Genlik ve oluşum sıklığının belirsiz olması bu dalgaların karakteristik özelliklerini düzensiz yapar. Bu düzensizlik dalga türbinlerine ve üretilen elektrik gücüne yansır. Bu nedenle dalga enerji sistemleri (DES)nden elde edilen elektrik gücünde süreksizlikler meydana gelir. Yani üretilen gerilim sürekli kullanılabilir değerde olmaz. Gerilimdeki bu süreksizlik üretilen gücün de süreksiz olmasına yol açacağından DES'inde güç düzenleyicilerin kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Bu güç düzenleyiciler filtre, DA/DA, DA/AA, AA/AA gibi dönüştürücüler ve yedekleme ünitelerinden oluşur. Genel adıyla güç düzenleyiciler denilebilecek bu devre elemanları güç elektroniği teknolojilerinin birer uygulamasıdır. Dolayısıyla DES'lerinde önemli bir yere sahiptirler.

Literatürde DES için kullanılan güç elektroniği ara yüzleri ve denetim algoritmaları verilmektedir. Yapılan çalışmalar bu makalede benzetim ve deneysel olarak iki ana başlık altında incelenmiş, deneysel sistemlerde düzenli dalga ve düzensiz dalga modelleri olmak üzere iki alt başlık altında toplanmıştır. İncelenen çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.



Benzetim çalışmaları: Bu kısımda DES'ler ile ilgili yapılan benzetim çalışmaları incelenmiştir.

Boström vd. [35] DS-DG'nin çalışma karakteristiğini farklı yük durumları için incelemektedir. Matlab ortamında geliştirdikleri benzetim modelinin doğruluğunu, Lysekil projesinden elde edilen verileri kullanarak kanıtlamışlardır. Jeneratörün davranışının hem AA karakteristiğini hem de doğrultucu kullanarak DA karakteristiğini inceleyen çalışma herhangi bir denetim yöntemi kullanmamıştır.

Thornburn vd. [36] DG'lerden oluşan bir dalga enerji çiftliğinin (DEÇ) benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada aynı ve farklı frekans ve genlik değerlerine sahip dalgaların uygulandığı beş ve on adet DG'lerden oluşan bir DEÇ'in enerji analizini yapmışlardır. Araştırmacılar birden fazla DG'nin kullanılmasıyla oluşturulan enerji çiftliği sisteminde üretilen enerjinin doğrultulmuş halinin daha az salınım içerdiğini ve böylelikle DES'lerde görülen sıfır geçişlerinin azaltıldığını savunmaktadırlar. Çalışmada herhangi bir denetim yönteminden bahsedilmemektedir.

Nie vd. [37] benzetim ortamında DS-DED sistemine karma enerji depo üniteleri (ultra-kondansatör (UK) ve Li-ion akü) entegre ederek sabit bir DA bara gerilimi elde etmektedir. Düzenli dalga rejiminde genlik değişimini dikkate alan çalışmada DED sistemi için artırıcı AA/DA doğrultucu, enerji depo üniteleri için ise çift yönlü AAC'ler kullanılmaktadır. Güç elektroniği devrelerinin denetiminde PI denetleyici kullanılan araştırmacılar ayrıca bataryaların genellikle güç uygulamalarında sık görülen değişiklikler ile dalgalanmaları gidermede başarısız olduğunu savunmuşlardır.

Luan vd. [38] Matlab/Simulink/SimPower programında dalga enerjisi sisteminde kullanılan DG'den üretilen enerjiyi ilk olarak AA/DA doğrultucu ile DA sinyaline dönüştürdükten sonra DA/DA ARÇ ile optimum yük denetimini gerçekleştirmişlerdir. Düzenli dalga rejiminde dikkate alan çalışmada PI denetleyici tipi kullanılmaktadır.

Gargov vd. [39] çalışmalarında çok fazlı hava-çerçirdekli bir sabit miktatsız doğrusal jeneratörün (SMDG) modelini bilgisayar ortamında gerçekleştirmişlerdir. Düzenli dalga modelinin incelendiği çalışmada yazarlar güç elektroniği devresi olarak pasif diyot doğrultucu ve AAC kullanmışlardır. Denetim algoritması olarak ise aç-kapa denetim kullanılmaktadır.

Barnes vd. [40] SSK tip DED'de karşılaşılan güç salınımlarını düzeltmek için hızlı yanıt veren bir D-STATCOM isimli güç elektroniği cihazı önermiştir. Önerilen devrenin matematiksel analizinin

ve benzetiminin yapıldığı çalışmada denetim için ise ileri-yön denetimi uygulanmıştır.

Murray vd. [41] çalışmalarında açık deniz SSK tip DED'in de görülen düzensiz güç salınımlarını gidermek için sistemin DA barasına UK ünitesi entegre etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca UK'nın çevrim ömrü ile ilgili deneysel incelemeler de gerçekleştirmişlerdir.

Tedeschi vd. [42] yaptıkları çalışmada farklı kontrol teknikleri kullanarak düzensiz dalgaların enerji çıkarımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada güç elektroniği devrelerinden aktif 3-faz doğrultucu ve DA/AA evirici devresi kullanılmaktadır. Bu güç elektroniği devrelerinin denetiminde ise PI denetleyici tabanlı alan etki denetimi ve aktif ön-uç denetimi kullanılmaktadır.

Çolak vd. [43] dalgalardan enerji çıkarım verimliliğini artırmak ve şebekeye iletilen gücün kalitesini iyileştirmek için uzay vektör modülasyonu (UVM) denetimli üç seviyeli DA-AA evirici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Salınımlı su kolonu DED'i için gerçekleştirilen benzetim çalışması düzenli dalga durumu için incelenmiştir.

Andersen vd. [44] Wave Star DED'i için model öngörülmesi denetim (MÖD) ile reaktif denetimin (RD) enerji çıkarım performanslarını benzetim ortamında karşılaştırmışlardır. Generatör tarafı denetim uygulamasını içeren bu çalışma ile yazarlar MÖD kullanarak dalgalardan daha fazla güç çıkarımı elde edileceğini savunmuşlardır.

Mendonça vd. [45] DS-DED'lerde enerji dönüşüm verimliliğini üç farklı akım denetim yöntemi ile incelemektedir. Generatör tarafı denetimi yapan araştırmacılar üç-faz aktif doğrultucuyu histerisiz bant denetimi (HBD), uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (DGM) akım denetimi ve bu denetim yöntemlerinin avantajlarını içeren uzaysal histerisiz akım kaynağı denetimi kullanmışlardır. Her denetleyici tipinin akım kalitesini artırdığı ve en az akım salınımlarının uzay vektör DGM denetimi ile elde edildiği belirtilmektedir.

Farrok vd. [46] düzenli dalga modeli ile elde ettikleri gerilimi üç-faz doğrultucu ile DA sinyaline çevirdikten sonra bulanık mantık denetimli (BMD) 3-faz DA/AA eviricisi enerjinin R-L-C yüküne aktarılmasında kullanmışlardır. Gerilim denetimi yapılan bu benzetim çalışmasında DED modellemek yerine üç-faz programlanabilir gerilim kaynağı kullanılmıştır.

Grusso vd. [47] yaptığı çalışma tek ve dört adet DED bağlı dalga enerji sistemleri için aktif ve pasif doğrultucuların karşılaştırmasını içermektedir. Benzetim

ortamında düzenli enerji modelinin dikkate alındığı çalışmada pasif doğrultucu tiplerinden köprü tipi tam dalga ve rezonans doğrultucu devreleri ile gerilim denetimli aktif doğrultucu kullanılmaktadır. Aktif doğrultucu denetiminde PI kontrolör kullanılan çalışmanın sonuçlarına göre tek DED'li sistemde pasif doğrultucularla elde edilen gerilim salınımları 250-300 V kadarken, aktif denetimli doğrultucu çıkışta 100V kadar gerilim salınımları sağlamaktadır. Yazarlar ayrıca dizi şeklinde bağlanan DED'li sistemde gerilim düşümlerinin daha az olduğunu belirtmektedir.

Özkop vd. [48] bilgisayar ortamında kurdukları dalga enerji sisteminde, düzenli dalgalardan enerji üretilen bir DED modelinin pasif doğrultulmuş çıkışı ile bir aküyü paralel bağlayarak oluşturdukları DA baranın gerilimini DA/DA kısıyıcı üzerinden DA motor yüklerine aktarmaktadır. Kısıyıcının denetiminde dinamik çevrimli bulanık mantık tansigmoid denetleyici kullanılmıştır.

Jama vd. [49] SMDG'nin sönümlenme kuvvetini kontrol etmek için yeni bir çevrimiçi sönümleme denetim yöntemi önermektedir. Güç elektroniği devresi olarak 3-faz pasif doğrultucuya seri bağlı bir DA/DA ARÇ kullanan yazarlar bu yöntem ile dalgadan elektrik enerjisi çevrim verimliliğinin arttığını benzetim sonuçlarında göstermektedir. Ayrıca çalışmada elde edilen sonuçların yakın zamanda deneysel olarak da doğrulanacağı belirtilmektedir.

Shameem vd. [50] Matlab/Simulink ortamında batarya-güneş paneli ve dalga enerjisinden meydana gelen şebeke bağlantılı karma bir enerji sistemi kurmuşlardır. Dalga enerjisi modelinde salınımlı su kolonu DED tipi kullanılmaktadır ve DA baranın gerilimi bataryalar ile sabit tutulmuştur. Bataryanın şarj-deşarj durumu PI denetimli bir DA/DA AAÇ ile sağlanmaktadır.



Al-Mhana vd. [51] DES'lerde jeneratör ile yük arasında güç faktörünün iyileştirilmesini sağlamak için yön değiştirmeli seri kompensasyon kondansatörlü çevirici adını verdikleri güç elektroniği devresini önermektedirler. Benzetim sonuçları, güç çeviricisi ile önerilen simetrik çalışma oranı denetim stratejisinin güç faktörünün iyileştirilmesinde kullanılabilirliğini göstermektedir. Yapılan bu çalışma düzgün dalga modelini içermektedir.

Müller vd. [52] Wave Dragon adı verilen DED'lerden oluşan bir dalga platformu için bilgisayar ortamında seri bağlı çok seviyeli H-köprüsü (SBÇSHK) güç elektroniği ara yüzü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Şebeke bağlantısında kullanılan SBÇSHK güç elektroniği devresinden önce 3-faz pasif doğrultucu ve DA/DA ARÇ devreleri de kullanılmaktadır. ARÇ denetiminde maksimum güç noktası izleyici algoritması ile PI denetleyici kullanan araştırmacılar, çok seviyeli H-köprüsü için ise PI denetleyici kullanılmaktadır. Benzetim sonuçlarında önerilen güç elektroniği ara yüzü ile güç kalitesinin ve veriminin artırıldığı gösterilmektedir.

Cantarellas vd. [53] yüksek güç DES'lerden oluşan bir DEÇ'in şebeke bağlantısı için uygun güç sistemleri tasarımı ve denetimini araştırmaktadır. Şebeke bağlantısında kullanılan geleneksel pasif LCL filtreye alternatif olarak, pasif LCL+Trap filtre adı verilen bir filtre topolojisi öneren yazarlar, AA/DA-DA/AA güç elektroniği devrelerini de kullanılmaktadır. Çalışmada denetleyici olarak PI denetim kullanılmakta ve önerilen güç elektroniği topolojileri ile daha güvenilir ve düşük maliyetli bir güç işleme ünitesinin tasarlandığı savunulmaktadır.

Wu vd. [54] DED'de üretilen enerjiyi şebekeye aktarılabilir hale getirmek için sisteme batarya ünitesi entegre etmişlerdir. DED çıkışı için AA/DA doğrultucu, batarya sistemi için DA/DA çevirici kullanan yazarlar her iki sistemin çıkışını ortak barada birleştirerek düzensiz DA gerilim DA/AA evirici ile şebekeye aktarılmıştır. Bu benzetim çalışmasının güç elektroniği devrelerinin denetiminde PI denetleyici kullanılmıştır.

Deneyel çalışmalar: Bu kısımda DES'ler ile ilgili yapılan deneyel çalışmalara yer verilmiştir. Deneyel sistemler düzenli dalga durumunu ve düzensiz dalga durumunu inceleyen çalışmalar olmak üzere iki alt başlık halinde sunulmaktadır. İncelenen çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Düzenli dalga durumunu dikkate alan çalışmalar: Özkop vd. [55] tarafından yapılan çalışmada yüksek değerli kondansatörlerden oluşan bir anahtarlamalı güç filtresinin denetimi ile düzenlenen dalga gücü, bir DA/DA azaltan çevirici (AZÇ) üzerinden yüke

aktarılmaktadır. Düzenli dalga durumunun incelendiği makalede güç elektroniği ara yüzlerinin denetiminde çok çevrimli PI denetleyici kullanılmaktadır. Aynı yazar [56]'da yine anahtarlamalı güç filtresini bu kez farklı bir denetim yöntemi ile düzenli dalga rejimi için incelemiştir. Bu çalışmada önerilen güç elektroniği devresi için denetleyici tipi olarak dinamik hatayı kullanan çok değişkenli, bulanık mantık ayarlamalı PI denetleyici kullanılmıştır.

Nie vd. [57] doğrudan sürürlü doğrusal DED emülatörünü laboratuvar ortamında kurmuşlardır. Düzenli dalga modeli ile generatörden elde ettikleri enerjiyi iki farklı AA/DA güç elektroniği topolojisi (AA/DA artıran doğrultucu ve AA/DA H-köprüsü artıran çevirici) kullanarak incelemiştir. Her iki devrenin sağladığı avantajların belirtildiği çalışmada denetleyici olarak PI ve tepki kuvvet denetimi gerçekleştirilmiştir.

Lu vd. [58] çalışmalarında dalga ve rüzgâr enerjisinin süreksizliğini ve belirsizliğini gidermek amacıyla bu iki enerji kaynağı ve batarya ünitesi ile birlikte bir DA mikro şebeke oluşturmuşlardır. Batarya tarafında gerektiğinde şarj olabilmesi veya DA baraya enerji aktarabilmesi için çift-yönlü DA/DA çevirici, rüzgâr ve dalga enerjisi için ise pasif 3-faz doğrultucu ve DA/DA AZÇ güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır. Hazır bir evirici ünitesi ile AA yük beslemesi de yapılan çalışmada düzenli dalga durumu dikkate alınmıştır ve dalga tarafı çeviricinin denetiminde PI denetleyici kullanılmaktadır.

Blanco vd. [59] DS'li anahtarlamalı relüktans doğrusal generatörünü (ARDG) sürmek için iki farklı güç elektroniği topolojisi klasik H-köprüsü ve Miller çevirici kullanmışlardır. Deneyel ortamda üretilen düzenli dalga enerjisini işlemek için ise evirici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Generatörden maksimum enerji çıkarımını sağlamak için faz veya reaktif kontrol adı verilen denetim algoritması uygulanan çalışmada deneyel testler döner ARG kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Vermaak vd. [60] çalışmalarında yeni bir doğrusal generatör tasarımına yer vermektedir. Düzenli deniz dalgasından üretilen enerjinin işlendiği deneyel test düzeninde jeneratörden maksimum enerji çıkarımının elde edilmesi için öngörülü denetim (ÖD) algoritması kullanılmaktadır. Hem benzetim ortamında hem de deneyel ortamda önerilen denetleyici tipinin performans değerlendirmesini yapan araştırmacılar güç elektroniği devrelerinden denetimli AA/DA doğrultucu ve tasarlanan doğrusal jeneratörü sürmek için DA/AA evirici kullanılmaktadır.

Kazmierkowski vd. [61] çalışmalarında Wave Dragon adı verilen DED için güç elektroniği devresi olarak

aktif AA/DA/AA güç elektroniği topolojisi kullanılmaktadır. Düzenli dalga enerjisinin dikkate alındığı bu çalışmada UVM tabanlı güç ve tork denetimi gerçekleştirilmiştir.

Düzensiz dalga durumunu dikkate alan çalışmalar: Hazra vd. [62] küçük güçlü pedal tipi bir dalga enerji sisteminde görülen enerji düzensizliğinin UK ünitesi ve güç elektroniği devreleri ile kısa süreli giderilmesi üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır. DED çıkışı ilk olarak pasif doğrultucu ile DA sinyaline çeviren yazarlar daha sonra generatör akımı denetimli DA/DA ARÇ üzerinden üretilen gücü DA baraya aktarmışlardır. Güç salınımlarının giderilmesi için ise sisteme paralel bağlı UK ünitesi ve DA bara arasında çift yönlü çalışabilen çevirici tipi kullanmışlardır. Çeviricilerin denetiminde klasik PI denetleyici kullanılmış olup, denetleyici parametrelerinin nasıl ayarlandığı belirtilmemektedir. Ayrıca çalışmada sunulan çıkış geriliminin ciddi şekilde gerilim sıçramaları içerdiği görülmektedir.

Hazra vd. [63] diğer bir çalışmalarında benzetim ortamında UK ve akü ünitelerini birlikte kullanarak oluşturdukları bir karma enerji depo sistemini güç elektroniği devreleri ile DED'lerde karşılaşılan enerji salınımları gidermek için kullanmışlardır. Benzetim ortamında akü ve UK'yı birlikte kullanmanın avantajlarından bahseden yazarlar deneysel çalışmalarında sadece UK ünitesini kullanarak güç düzenlemesi gerçekleştirmişlerdir. Güç elektroniği devrelerinden 3-faz evirici ve çift-yönlü aktif köprü tipi çevirici kullanan yazarlar denetleyici algoritması olarak PI denetleyici tercih etmişlerdir.

Boström vd. [64] rezonans doğrultucu (REZD) adı verilen ve kondansatör içeren yeni bir pasif doğrultucu tipini hem benzetim ortamında hem de deneysel ortamda test etmişlerdir. Uppsala Üniversitesinde geliştirilen doğrusal generatörlü L9 DED sisteminde denenen doğrultucu tipi klasik pasif diyot doğrultucu ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre REZD ile generatörün sönüm oranı artırılarak daha yüksek güç emilimi ve üretimi elde edilmiştir.

Cantarellas vd. [65] düzensiz dalgalardan maksimum enerji çıkarımının elde edilmesi için uyarlamalı vektör yaklaşımına dayalı yeni bir DED kontrol yöntemi önermektedir. Önerilen vektörel yaklaşım ile maksimum güç çıkarımı sağlanırken ayrıca ani güç dalgalanmalarının azaltıldığı da deneysel sonuçlar ile gösterilmektedir. Çalışmada güç elektroniği ara yüzü olarak AA/DA-DA/AA aktif güç çeviricisi ve eviricisi kullanılmaktadır.

Boström vd. [66] DS-DED'de üretilen düzensiz AA gücün doğrultulması ve filtrelenmesi üzerine yapılan benzetim ve deneysel çalışmaları incelemektedir.

Deneysel testlerin gerçek bir açık deniz DED'inde gerçekleştirildiği çalışmada doğrultucu elemanı olarak 3-faz pasif diyot doğrultucu, filtreleme elemanı olarak ise UK üniteleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada herhangi bir denetim yönteminden bahsedilmemektedir.

Rahm vd. [67] Lysekil projesi kapsamında geliştirilen doğrudan sürüslü ve birbirine bağlı DED'lerde üretilen değişken elektrik enerjisinde salınımları azaltmak için her bir DED'in çıkışı pasif doğrultulmuş ve sonra elde edilen gerilim ortak DA barada toplanmıştır. Daha sonra ise DA gerilim PID denetimli bir evirici yardımıyla AA sinyaline dönüştürülüp, trafo ile yükseltildikten sonra kıyıda yer alan direnç yüküne iletilmektedir.

Sonuç olarak hem benzetim hem de deneysel ortamda düzenli ve düzensiz dalga enerjisi ile yapılan çalışmalar incelendiğinde güç elektroniği devrelerinden; aktif/pasif-AA/DA doğrultucu devreleri, AA/DA artıran doğrultucu, STATCOM cihazları, AA/DA H-köprüsü artıran doğrultucu, tek faz-üç faz DA/AA evirici devreleri, DA/DA artıran, azaltan ve artıran-azaltan çeviriciler, farklı tip denetimli-denetimsiz filtre ve benzeri devreler kullanılmaktadır. Adı geçen devreler maliyet, güvenilirlik, verim ve tasarım olarak birbirinden ayrılmaktadır. [26]'da verilen bilgilere göre aktif-pasif AA/DA doğrultucu ve DA/AA evirici devreleri DES'lerde en çok kullanılan güç elektroniği devreleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca dalga enerji sistemlerinin çok değişkenli güç yapısı nedeniyle, akü ve ultra-kondansatörler gibi enerji depo üniteleri ve rüzgâr/güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte kullanımını içeren çalışmalar da mevcuttur.

Dalga enerjisini içeren yayınlarda elde edilen sonuçlar benzetim, deneysel ve hem benzetim hem de deneysel olarak doğrulanmaktadır. DES'lerin kurulumunun zor ve pahalı olması nedeniyle yapılan çalışmaların büyük bir kısmının (%70) benzetim çalışması olduğu görülmektedir [26]. Sadece düzenli dalga modelini içeren benzetim ve deneysel çalışmalar da bulunmaktadır. Dalgaların karakteristik yapısı gereği düzensiz olması nedeniyle sadece düzenli dalga modelini içeren çalışmaların, gerçek deniz durumunda ne kadar başarılı olacağı bilinmemektedir.

DES'lerde kullanılan denetleyici tiplerine bakılacak olunursa bu tip çalışmalar genelde dalgalardan enerji çıkarımını artırarak DED verimin artırılmasını yöneliktir. [26]'da en çok tercih edilen ilk beş denetleyici tipi; faz denetimi, kilitleme denetimi, PI denetleyici, optimal denetim ve öngörülü denetim olarak bildirilmiştir. Bu denetleyicilerin dışında PID denetleyici, pasif yük denetimi, kayan tip denetimi, uyarlamalı bulanık PI denetim, BMD, gürbüz denetim, sinir

ağı denetimi, doğrudan tork denetimi, seri bağlı P-PI denetim, aç-kapa denetim, MÖD, reaktif denetim, karmaşık eşlenik denetimi, UVM ve çok çevrimli PI denetleyici çeşitleri de hem jeneratör tarafı hem de şebeke tarafı uygulamaları için kullanılan diğer denetim yöntemleridir [8, 26, 68].

Sonuç

Bu çalışmada gelecek yıllarda, enerji üretimi açısında oldukça gelecek vaat eden yenilenebilir enerji kaynaklarından dalga enerji potansiyeli ve dönüştürücü sistemleri incelenmiştir. Hiçbir atığı olmayan, doğaya zehirli gazlar salgılamayan ve sadece kurulu sistem eskiyip atıl duruma geldiğinde kullanılan metal atıkların geri dönüşümüyle kazanılacağı dalga enerji sistemleri ülkeler tarafında yakından araştırmaya alınmış ve gelecek yatırımları planlanmıştır. Ülkemizde ise tam anlamıyla bir DES kurulumu gerçekleştirilememiştir. Fakat devam eden projeler ile DES konusunda ülkemiz adına önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar desteklenmeli ve Ar-Ge çalışmalarının önü açılarak gerekli planlamalar yapılmalıdır. Ülkemizde üretilip kurulabilecek DES'lerini yurt dışından satın almak için bunların başka ülkelerde geliştirilmesini beklemeden kendi olanaklarımızla yapıp hem ülkemizdeki kullanımı canlandırılmalı, hem de başka ülkelere satışında pazar oluşturulmalıdır. Bu konuda öncü olunabilecek adımlar zamanında atılmazsa tıpkı rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinde olduğu gibi DES'nin pazarı da başka ülkelere oluşturulacak ve sonradan bu pazara girmek için uğraşılacaktır. Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde özellikle Ege ve Batı Karadeniz Bölgelerinde önemli dalga potansiyeli vardır. Orta ve Doğu Karadeniz bölümlerindeki potansiyel de yadsınamayacak düzeydedir. Son zamanlarda ülkemizde kurulacak DES'nin yerlerinin belirlendiği ve bu konuda mevzuat hazırlandığı duyumları alınmaktadır. Bunlar önemli gelişmelerdir. Ancak Ar-Ge amacıyla deneysel çalışmasını denizde yapmak isteyen akademisyenlere de gerekli kolaylıklar sağlanmalıdır. Ülkemizin enerjide dışa olan bağımlılığını azaltma yönünde de DES'nin önemli bir yeri olacaktır. Çünkü kıyılarda kurulu bir çok tesisin elektrik enerjisi dalgadan sağlanabilir. Bu konuda yapılan Ar-Ge çalışmaları ile nereye nasıl bir DES kurulacağı belirlenebilir. Bu konuda artık kendi insanlarımıza güvenilmesi ve onlara destek olunması beklenmektedir.

Kaynaklar

1. ExxonMobil, Outlook for energy: a view to 2040, Technical Report, 2017.
2. <https://teias.gov.tr/tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri/2015>. 1 Mart 2017.

3. Wang L. ve Chen Z.J., Stability analysis of a wave-energy conversion system containing a grid-connected induction generator driven by a wells turbine, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25, 2 (2010) 555-563.
4. Vining J.G. ve Muetze A.M., Economic factors and incentives for ocean wave energy conversion, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45, 2 (2009) 547-554.
5. REN21, Renewables 2015 Global Status Report, 2015
6. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlomer S., Von Stechow C. ve Matschoss P., Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 2012.
7. McCormick M., Ocean Wave Energy Conversion, Wiley, New York, 1981.
8. Ringwood J.V., Bacelli G. ve Fusco F., Energy-maximizing control of wave-energy converters: the development of control system technology to optimize their operation, *IEEE Control Systems*, 34, 5 (2014) 30-55.
9. Pelc R. ve Fujita R.M., Renewable energy from the ocean, *Marine Policy*, 26, 6 (2002) 471-479.
10. López I., Andreu J., Ceballos S., De Alegría I.M. ve Kortabarria I., Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27 (2013) 413-34.
11. World Energy Council, World energy perspective, cost of energy technologies, Bloomberg New Energy Finance, 2013.
12. Delucchi M. A. ve Mark Z. J., Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs and policies, *Energy policy*, 39, 3 (2011) 1170-1190.
13. Mork G., Barstow S., Kabuth A. ve Pontes M.T., Assessing the global wave energy potential, ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Ocak 2010, Shanghai, Bildiriler Kitabı: 447-454.
14. Vicinanza D., Contestabile P. ve Ferrante V., Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy), *Renewable Energy*, 50 (2013) 506-521.
15. Hepbasli A., Ozdamar A. ve Ozalp N., Present Status and Potential of Renewable Energy Sources in Turkey, *Energy Sources*, 23, 7 (2001) 631-648.
16. Sağlam M., Sulukan E. ve Uyar T. S., Wave energy and technical potential of Turkey, *Journal of Naval Science and Engineering*, 6, 2 (2010) 34-50.
17. Rusu E., Wave energy assessments in the Black Sea, *Journal of marine science and technology*, 14, 3 (2009) 359-372.
18. Akpınar A. ve Kömürcü M. İ., Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year

numerical hindcast data, *Applied Energy*, 101, (2013) 502-512.

19. Aydoğan B., Ayat B. ve Yüksel Y., Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data, *Renewable energy*, 57, (2013) 436-447.

20. Akpınar A. ve Kömürcü M. İ., Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea, *Energy*, 42, 1 (2012) 289-302.

21. Kapluhan E., Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Dalga Enerjisinin Dünyada'ki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu, *Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi*, 5, 17 (2014) 65-86.

22. <http://www.bakka.gov.tr/site/haber/951/>. 27 Mart 2017.

23. Antonio F. D., Wave energy utilization: A review of the Technologies, *Renewable and sustainable energy reviews*, 14, 3 (2010) 899-918.

24. Clément A., McCullen P., Falcão A., Fiorentino A., Gardner F., Hammarlund K., Lemonis G., Lewis T., Nielsen K., Petroncini S. ve Pontes M.T., Wave energy in Europe: current status and perspectives, *Renewable and sustainable energy reviews*, 6, 5 (2002) 405-431.

25. Drew B., Plummer A. R. ve Sahinkaya M. N., A review of wave energy converter technology, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223, 8 (2009) 887-902.

26. Ozkop E. ve Altas I. H., Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, (2017) 106-115.

27. Hong Y., Waters R., Boström C., Eriksson M., Engström J. ve Leijon M., Review on electrical control strategies for wave energy converting systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, (2014) 329-342.

28. Kofoed J.P., Frigaard P., Friis-Madsen E. ve Sørensen H.C., Prototype testing of the wave energy converter wave dragon, *Renewable Energy*, 31, (2006) 181-189.

29. Yemm R., Pizer D. ve Retzler C., Floating apparatus and method for extracting power from sea waves, U.S. Patent No: 6,476,511, 5 Kasım 2002.

30. Henderson R., Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power takeoff system for the Pelamis wave energy converter, *Renewable Energy*, 31, 2 (2006) 271-283.

31. Costa J. S. D., Pinto P., Sarmiento A. ve Gardner F., Modeling of an ocean waves power device AWS, *IEEE Control Applications Conference*, Haziran 2003, İstanbul, *Bildiriler Kitabı*: 618-623.

32. Beirdol P., Valério D. ve Costa J. S. D., Linear model identification of the Archimedes wave swing, *International conference on power engineering, energy and electrical drives*, Nisan 2007, Portekiz, *Bildiriler Kitabı*: 660-665.

33. Leijon M., Boström C., Danielsson O., Gustafsson S., Haikonen K., Langhamer O., Strömstedt E., Stålberg M., Sundberg J., Svensson O. ve Tyrberg S., Wave energy from the North Sea: Experiences from the Lysekil research site, *Surveys in geophysics*, 29, 3 (2008) 221-240.

34. Brekken T.K., Von Jouanne A. ve Han H.Y., Ocean wave energy overview and research at Oregon State University, *Power Electronics and Machines in Wind Applications Conference*, Haziran 2009, USA, 1-7.

35. Boström C. ve Leijon M., Operation analysis of a wave energy converter under different load conditions, *IET renewable power generation*, 5, 3 (2011) 245-250.

36. Thorburn K. ve Leijon M., Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters, *Ocean Engineering*, 34, 5 (2007) 908-916.

37. Nie Z., Xiao X., Yi H. ve Kang Q., Direct drive wave energy converters integrated with a composite energy storage system, *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems*, Ağustos 2011, Çin, 1-5.

38. Luan H., Onar O.C. ve Khaligh A., Dynamic modeling and optimum load control of a PM linear generator for ocean wave energy harvesting application, *In Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Şubat 2009, Washington, *Bildiriler Kitabı*: 739-743.

39. Gargov N.P. ve Zobaa A.F., Multi-phase air-cored tubular permanent magnet linear generator for wave energy converters, *IET Renewable Power Generation*, 6, 3 (2012) 171-176.

40. Barnes M., El-Feres R., Kromlides S. ve Arulampalam A., Power quality improvement for wave energy converters using a D-STATCOM with real energy storage, *IEEE First International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, Kasım 2004, Hong Kong, *Bildiriler Kitabı*: 72-77.

41. Murray D.B., Hayes J.G., O'Sullivan D.L. ve Egan M.G., Supercapacitor testing for power smoothing in a variable speed offshore wave energy converter, *Journal of Oceanic Engineering*, 37, 2 (2012) 301-308.

42. Tedeschi E., Carraro M., Molinas M. ve Mattavelli P., Effect of control strategies and power take-off efficiency on the power capture from sea waves, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26, 4 (2011) 1088-1098.

43. Colak I. ve Kocabas A.D., Space vector modulation controlled three-level converter for ocean wave energy conversion, *18th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Nisan 2016, Lemosos, *Bildiriler Kitabı*: 1-5.

44. Andersen P., Pedersen T.S., Nielsen K.M. ve Vidal E., Model predictive control of a wave energy converter, *IEEE Conference on Control Applications*, Eylül 2015, Sydney, *Bildiriler Kitabı*: 1540-1545.

45. Mendonça H. ve Martinez S., Energy conversion efficiency assessment of a direct drive wave energy converter with different current controllers, IEEE International Energy Conference, Nisan 2016, Leuven, 1-6.
46. Farrok O., Islam M.R. ve Sheikh M.R.I., Fuzzy logic based an improved controller for wave energy conversion systems, International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology, Mayıs 2015, Dhaka, Bildiriler Kitabı: 1-6.
47. Grusso G., Zhou Q. ve Bizzozero F., Comparison among passive and active rectifier for seawave energy production, International IEEE Conference on Clean Electrical Power, Haziran 2015, Taormina, Bildiriler Kitabı: 493-498.
48. Ozkop E., Altas I.H. ve Sharaf A.M., A novel fuzzy logic tansigmoid controller for wave energy converter-grid interface dc energy utilization farm, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Mayıs 2009, Canada, Bildiriler Kitabı: 1184-1187.
49. Jama M. ve Wahyudie A., Online Damping Strategy for Controlling Heaving Wave Energy Converters Using Three-Phase Bridge Boost Rectifier, IEEE Access, 14 8 (2015) 1-9.
50. Ahmad S., Uddin M.J., Nisu I.H., Ahsan M.M.U., Rahman I. ve Samrat N.H., Modeling of grid connected battery storage wave energy and PV hybrid renewable power generation, IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering, Şubat 2017, Bangladesh, Bildiriler Kitabı: 375-380.
51. Al-Mhana T., Zahawi B. ve Pickert V., Symmetrical duty cycle control for FCSC converter for wave energy applications, IEEE 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing, Temmuz 2014, Manchester, Bildiriler Kitabı: 56-60.
52. Muller N., Kouros S., Malinowski M., Rivera S. ve Wu B., Cascaded H-bridge multilevel converter interface for Wave Dragon energy conversion system, IEEE 39th Annual Conference in Industrial Electronics Society, Kasım 2013, Vienna, Bildiriler Kitabı: 6201-6206.
53. Cantarellas A.M. Rakhshani E., Remon D. ve Rodriguez P., Grid connection control of VSC-based high power converters for wave energy applications, IEEE 39th Annual Conference in Industrial Electronics Society, Kasım 2013, Vienna, Bildiriler Kitabı: 5092-5097.
54. Wu F., Zhang X.P. ve Ju P., Application of the battery energy storage in wave energy conversion system, International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nisan 2009, Nanjing, Bildiriler Kitabı: 1-4.
55. Ozkop E., Altas I.H. ve Sharaf A.M., A novel switched power filter-green plug (SPF-GP) scheme for wave energy systems, Renewable energy, 44 (2012) 340-358.
56. Ozkop E., Sharaf A. and Altas I.H., An adaptive fuzzy PI controlled bus quantity enhancer for wave energy systems, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 24, 4 (2016) 2454-2468.
57. Nie Z., Xiao X., McMahan R., Clifton P., Wu Y. ve Shao S., Emulation and control methods for direct drive linear wave energy converters. IEEE Transactions on Industrial informatics, 9, 2 (2013) 790-798.
58. Lu S.Y., Wang L., Lo T.M. ve Prokhorov A.V., Integration of wind power and wave power generation systems using a DC microgrid, IEEE Transactions on Industry Applications, 51, 4 (2015) 2753-2761.
59. Blanco M., Navarro G. ve Lafoz M., Control of power electronics driving a switched reluctance linear generator in wave energy applications, IEEE 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Eylül 2009, Barcelona, Bildiriler Kitabı: 1-9.
60. Vermaak R. ve Kamper M.J., Experimental evaluation and predictive control of an air-cored linear generator for direct-drive wave energy converters, IEEE Transactions on Industry Applications, 48, 6 (2012) 1817-1826.
61. Kazmierkowski M.P. ve Jasinski M., Power electronics for renewable sea wave energy, IEEE 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Mayıs 2010, Brasov, Bildiriler Kitabı: 4-9.
62. Hazra S. ve Bhattacharya S., Short time power smoothing of a low power wave energy system, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Ekim 2012, Montreal, Bildiriler Kitabı: 5846-5851.
63. Hazra S. ve Bhattacharya S., Hybrid energy storage system comprising of battery and ultra-capacitor for smoothing of oscillating wave energy, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Eylül 2016, Milwaukee, Bildiriler Kitabı: 1-8.
64. Boström C., Ekegård B., Waters R., Eriksson M. ve Leijon M., Linear generator connected to a resonance-rectifier circuit, IEEE Journal of oceanic engineering, 38, 2 (2013) 255-262.
65. Cantarellas A.M., Rodriguez D.R. ve Rodriguez P., Adaptive Vector Control of Wave Energy Converters, IEEE Transactions on Industry Applications, 52, 3 (2017) 2382-2391.
66. Boström C., Lejerskog E., Stålberg M., Thorburn K. ve Leijon M., Experimental results of rectification and filtration from an offshore wave energy system, Renewable Energy, 34, 5 (2009) 1381-1387.
67. Rahm M., Boström C., Svensson O., Grabbe M., Bülow F. ve Leijon, M., Offshore underwater substation for wave energy converter arrays, IET Renewable Power Generation, 4, 6 (2010) 602-612.
68. Ringwood, J., Control techniques for ocean energy applications, IET, 2013. ■