

Dalga Enerjisi Uygulamaları İçin Akı- Anahtarlama Tipi Doğrusal Jeneratörde Kalıcı Mıknatıs Seçiminin Etkisi

Serdal Arslan¹

Özet

Dalga enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi maliyetli bir süreç olmasına karşın birim başına nispeten yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Türkiye'nin coğrafi konumu ve dalga enerjisi potansiyeli açısından önemli yere sahip olsa da gerçekleştirilen çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu bölümde literatürde dalga enerjisi üzerine yer alan özellikle doğrusal jeneratör özelinde kapsamlı araştırma gerçekleştirilmiştir. Özellikle kur kaynaklı değişimden etkilenen nadir toprak elementinin azaltılmış veya kullanılmaması önemlidir. Çalışma kapsamında NdFeB, AlNiCo, SmFeN, Samaryum S24 ve Ferrit Y30 mıknatısları kullanılarak oluşturulan akı anahtarlama tipi doğrusal jeneratör modelleri sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Geçici hal analizleri sonucunda, NdFeB ve SmFeN mıknatıslarının benzer seviyelerde maksimum indüklenen gerilim ürettiği, buna karşın Ferrit ve AlNiCo mıknatısların daha düşük performans sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, SmFeN mıknatıslarının nadir toprak elementi kullanımını azaltma potansiyeli sunarken, NdFeB mıknatıslara yakın elektromanyetik performans sağlayabildiğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, dalga enerjisi uygulamalarında maliyet etkin ve sürdürülebilir mıknatıs alternatiflerinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

1 Doç.Dr.Serdal Arslan, Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Meslek Yüksekokulu Elektrik Programı, Şanlıurfa, Türkiye, serdalararslan@harran.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-1187-5633

1. GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin git gide azalması ve fosil yakıta bağlı yaşanan krizler enerji kaynaklarına yönelik çalışmaları gün geçtikçe artırmaktadır. Bu kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilmesi; kişi başına enerji tüketiminin artışı, elektrik enerjisinin fatura maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel sebeplerden dolayı önemlidir. Son yıllarda özellikle yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde dalga enerjisi üzerine yapılan çalışmalar (ticari firmalar ve araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen) enerji hasatlama teknolojileri içerisinde de değerlendirilebilir [1]. 1799 yılında dünyanın ilk dalga enerjisi dönüştürücüsü üzerine patent alan Girard [2]'tan günümüze dalga enerjisinin teknolojik olgunluğu, bakım zorlukları ve yüksek kurulum maliyetleri düşünüldüğünde dalga teknolojisinin geliştirilmesi için devlet desteği gerekli görünmektedir [3]. Japonya, Hindistan, İngiltere, Portekiz, İsveç, Norveç, İrlanda, ABD, Danimarka vb., gibi kıyı şeridi olan ülkeler dalga enerjisi dönüştürme teknolojileri üzerine halen çalışmaktadır [4-8]. 9 nolu referansta bu alanda ilk çalışmaların çoğu Avrupa'da Salter ve Evans tarafından İngiltere'de ve Falnes tarafından Norveç'te yapıldığı belirtilmiştir. SeaBeaV1; dalga enerjisi dönüştürücüsünün kavramsal tasarımını geliştirmek için sisteme ait bileşenleri detaylı olarak vermiştir [9]. İtalya için yıllık dalga enerjisi tahmini yapılmıştır [10].

Dalga enerjisi ve teknolojileri hakkında detaylı incelemeye 3, 7, 11-15 numaralı referanslardan başlanabilir. Bu kaynaklarda dalga enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için çeşitli yöntemler incelenmiştir. 3 numaralı referansta; dalga enerjisi dönüştürücü sistemleri, jeneratör, güç elektroniği ve kontrol yöntemleri, dalga tipleri ve güç kalitesi konularına odaklanarak literatürdeki genel çalışmalar irdelenmiştir. Ayrıca 7 numaralı referansta dalga enerjisi projeleri değerlendirilmiştir. Ülkemizde gerçekleştirilen çalışmalar sınırlıdır ancak ülkemiz için dalga enerjisinin çevresel ve ekonomik açıdan önemini ele alan çalışmaların incelenmesi elzemdir [16,17]. TEMSAN ve BOREN iş birliği ile Sakarya'nın Karasu ilçesinde kıyıda 100 metre açıktaki 5 kWh'lık enerji kapasiteli dalga enerjisi dönüştürücüsünden elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir [17]. Başka bir çalışmada, oluksuz bir doğrusal jeneratör nümerik analizi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir [11]. Önceki çalışmamızda Türkiye'nin dalga enerjisi potansiyeli, dalga enerjisi enerji dönüşüm sahaları, kullanılan jeneratör topolojileri hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir [17,18].

Dalga enerjisi dönüştürücüleri genel bakımdan kıyıya olan konumlarına göre sınıflandırılmasına karşın enerji potansiyeli ve enerji üreten sistemler oldukça farklılaşmaktadır. Kıyıya yakın cihazlar 20 m'den daha az derinliklerde

suya konumlandırılırken [3], kıyı şeridinden uzakta veya kıyıda ek mekanik tertibatlı yerleştirilebilen nokta emiciler, her yönden enerji elde edebilir [19]. Yüksek elektrik enerjisi üretim potansiyeli nedeniyle özellikle kıyıdan uzak (açık deniz) hatta okyanus uygulamaları için tercih edilmektedir. Kıyı uygulamalarında jeneratörün şebekeye bağlanması alt yapı açısından önemli sorun olarak görülmemesine karşın açık deniz ve okyanus için şebekeye entegrasyonu oldukça önemlidir. Açık deniz ve okyanus ile kara arasındaki deniz altı kablosu, şalt uygulamaları ve şebeke entegrasyonu açık deniz rüzgâr endüstrisinin gelişmesiyle git gide kolay hale gelmiştir [7].

Dalga enerjisi kW/m olarak rüzgâr enerjisinden ve güneş enerjisinden oldukça fazla enerjiye sahiptir [14,20]. Dalga genliği ve periyodu arttıkça metre başına dalga gücü artmaktadır [4]. Dalgalardan güç üretimi; pnömatik, hidrolik ve mekanik sistemler yardımı ile elektrik jeneratörleri üzerinden sağlanmaktadır. Sistemlere bağlanacak jeneratörler temelde dairesel hareketli veya doğrusal hareketli olabilir. Bağlanacak jeneratör topolojisi sisteme göre değişiklik göstermektedir. Özellikle doğrusal hareketli jeneratörler, basit yapıda, sessiz, yüksek verimlilik ve doğrudan tahrik gibi avantajları bulunmaktadır [20,21]. Örneğin kıyıdan uzak Arşimet Dalga Salınım sisteminde doğrusal jeneratörler tercih edilirken kıyı uygulamalarında ise dairesel hareketli jeneratörler tercih edilebilmektedir. Sistem; hareketli hızını arttırmaya yönelik ara dönüştürme ekipmanı (dişli sistemi) ve jeneratörden meydana gelir [22]. Ayrıca yüzer veya suda asılı kalan şamandıralı sistemlere montajı gerçekleştirilen doğrusal jeneratörler doğrudan tahrikli dalga enerjisi dönüştürücüleri için uygundur [19]. Ancak yüzer şamandırayı ve platformu; fırtınalar, tsunamiler gibi kötü doğa olaylarından korumak için dengeli serbest su yüzeyine göre tutacak bir yöntemin geliştirilmesi elzemdir [23]. Özellikle son yıllarda geliştirilen 3 ve 6 serbestlik derecesine sahip sistemlere göre enerji toplama, teknolojik maliyeti, güvenilirliği bakımından orta performanstadır [24]. Ancak 3 veya 6 serbestlik derecesine sahip sistemler diğerlerine göre yüksek performans sınıfında ve yüksek hidrodinamik verimlilik sunmaktadır [24]. Aylık ortalama dalga gücü; yıl içinde büyük ölçüde değişir [10]. Dalga yüksekliğine göre kW/m başına dalga gücü tahmin edilebilir [10,25] ve dalga hareketi sinüzoidal olarak $x = A \sin \omega t$ verilir [23].

Dalga enerjisinden doğrusal hareketle elektrik üreten sistemlerde yavaş hareket (yaklaşık 1 m/s ve alt hızlar) söz konusudur. 10 numaralı referansta; hız 0,5 m/sn, periyot 3s olarak alınmıştır. Başka bir çalışmada [5] hareket mesafesi 1,6m, periyot = 4s olarak hız ise 0-1,25 m/s aralığında değiştiği kabul edilmiştir. Hareket mesafesi 7m, 1 MN maksimum kuvvet, maksimum 2,2 m/s hız dikkate alınan doğrusal jeneratör 400 ton ağırlığındadır [20]. Okyanus dalgaları, karakteristik süresi 7 s olan 4 m yüksekliğinde sinüzoidal

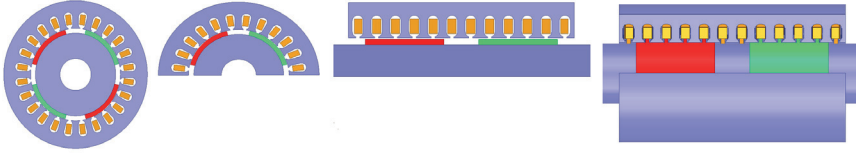
dalga değişimi olarak modellenir [26]. Düşük dalga frekanslarında (0,1Hz) elektrik enerjisi üretebilmek zor olabilir. Bu sebeple yüksek güç elde edebilmek için, yüksek reaksiyon kuvvetleri gerekmektedir ($P=Fv$). Dalga yüksekliği ve boyuna göre şamandıra çap ve yüksekliği belirlenebilir [26].

Geleneksel jeneratörler için en belirgin farklardan biri de doğrudan tahrik konseptinden dolayı yavaş hızdır [22]. Bu sebeple geleneksel jeneratörlere nazaran aynı güç değerlikleri için önemli ölçüde daha büyük ebatlara sahiptir. Dalga hareketinin hareketli kısmı düşük hızlarda tahrik edilmesinden dolayı üretilen gerilim sınırlıdır [12]. Ayrıca dalganın değişken hız karakteristiğinden dolayı kısa süreli değişimlerini kestirilmesinin güçlüğü ortalama gücün sekiz katına varan ani güç değişimleri gösterebileceği belirtilmiştir [22]. Kısa süreli aşırı yüklenme voltaj kararlılığı için güç dönüştürücülerine ihtiyaç oluştururken uzun süreli durumlarda ısınma problemleri meydana getirir [22].

2. DOĞRUSAL HAREKETLİ JENERATÖRLERE GENEL BAKIŞ

Doğrusal sürekli mıknatıslı makineler elektriksel açıdan bakıldığında, döner sürekli mıknatıslı makineler arasında çalışma prensibi açısından önemli farklılık yoktur. Ancak tasarım eşitlikleri, geometri ve hareket eksenine dikkate alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmelidir. Döner makinelerin gücü çapın karesi ve uzunluk çarpımı ile değişir. Doğrusal makinenin geometrik yapısına bağlı olarak örneğin tek yanlı doğrusal makinelerde en ve boy çarpımı, tüp tipi doğrusal makinelerde ise çap ve boy çarpımı olarak değişir [27]. Ayrıca döner makinenin kapalı bir manyetik devresi ile doğrusal makine baş ve son noktaları açık uçlara sahiptir ve bu durum makine performansını etkileyebilmektedir [28, 29]. Dalga enerjisi uygulamalarında dairesel hareketten elektrik üretimi için ek mekanik düzenlemelere ihtiyaç vardır [30]. Doğrusal bir makinenin geometrisi, dönen bir makinenin hayali bir şekilde kesilmesi ve açılmasıyla üretilir [22] (Şekil 1). Doğrusal makine her iki ucunda açık manyetik devrelere sahipken dönen bir makinenin manyetik devresi kapalı bir devre oluşturur [22]. Bir ya da çok fazlı yapılmalarının yanı sıra en yaygın üç fazlı olarak tasarlanırlar. Aslında ister doğrusal ister dairesel hareketli olsun sistemde kullanılacak jeneratör topolojisi çok önemlidir. Doğrusal hareketi dönüştüren bir şanzımandan oluşan bir jeneratör sistemi standart döner jeneratörden daha ucuz ve oldukça verimli bir çözüm olabilir bu sebeple doğrusal jeneratörler kullanılır [31]. Kısacası; doğrudan dalga hareketinden yararlanmak, ek mekanik donanımları (doğrusaldan dönüşe aktarım mekanizmalarını) ortadan kaldırmak ve ilgili güç kayıplarını azaltmak için doğrusal jeneratör kullanılır [12]. Böylece sistemin ömrünü uzattığına

inanılan ara enerji depoları ve dişli kutuları kaldırılır [7]. Şekil 1’de dairesel hareketli sürekli mıknatıslı jeneratörün doğrusal hareketli tüp tipi jeneratöre dönüşüm süreci verilmiştir:



Şekil 1. Soldan sağa doğru sürekli mıknatıslı makinadan tüp tipi sürekli mıknatıslı doğrusal makinaya dönüşüm aşamaları

Şekil 1’deki model diğer makine topolojileri (asenكرون jeneratör/motor, akı anahtarlamalı sürekli mıknatıslı jeneratör/motor, anahtarlamalı relüktans jeneratör/motor, vernier jeneratör/motor vb.) için uygulanabilir. Dönen makinelerin kullanım alanlarında olduğu gibi doğrusal makinelerinde tümü dalga enerjisi dönüşümü için uygun değildir. Doğrusal hareketli jeneratörlerin çok ağır, verimsiz ve pahalı olacağı öngörülmekteydi [15], ancak manyetik malzemeler ve elektronik kontrol ünitelerinin düşen maliyetleri, yeni doğrusal elektrik jeneratör topolojileri ile dalga enerjisinden elektrik üretiminde aktif olarak kullanılabileceği anlamına gelmektedir [15]. Ayrıca paralel bağlanmış birçok dönüştürücü düzenek ile güç artışı sağlanabilir [32]. Yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik; düşük maliyet ve kontrol edilebilirlik aranan özelliklerdir. Doğrusal jeneratörler; boyuna ve enine akı yolu olarak hareket yöne bağlı paralel ve dik olarak konumlandırılmıştır [13]. Çift beslemeli asenكرون jeneratör (ÇBAG) tipinin bakım gereksiniminin bulunması, reaktif güç ihtiyacı ve güç kontrolü yüksek ağırlık/güç oranı nedeniyle dalga uygulamaları için uygun olmadığı [14,15,33], sürekli mıknatıslı senكرون makina, enine akılı [13,34,17] veya vernier tip (bir tür değişken relüktanslı sürekli mıknatıslı) [13,15] jeneratörler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Diğer asenكرون ve sargılı senكرون jeneratörler ile karşılaştırıldığında [7,13]; yüksek kuvvet yoğunluğu, yüksek verimlilik yanı sıra düşük hızlarda makul verimlilik sunması [6,13], sargı bakır kayıplarının azalması (hareketli kısımda sadece mıknatıs bulunması) [7,13], artan maliyetlerine karşın yüksek güç yoğunluğu nedeniyle kalıcı mıknatıslı (PM) senكرون jeneratörler tercih edilmektedir [13,15]. Hava aralığı ortak gerinim (kuvvet/m²) bakımından makineler karşılaştırıldığında yüksekten küçüğe doğru enine akılı, vernier ve boyuna sürekli mıknatıslı senكرون jeneratör olarak sıralanabilir [13]. Enine ve vernier tip doğrusal jeneratörler yüksek kuvvet kütle oranı sunmasına karşın büyük yük açıları nedeniyle düşük güç faktöründen muzdariptir

[13,15,34-37]. Bu sebeple yüksek dereceli bir güç elektroniği dönüştürücüsü gerektirmekte ve büyük manyetik çekim kuvvetleri nedeniyle yatak sorunları da vardır [15]. Ancak kaçak akı azaltılmış yüksek verim sunan yeni enine akılı makine önerileri ve uygulamaları dikkat çekicidir [34,38,39]. Ayrıca üretimdeki zorluklar, yüksek senkron indüktans, karmaşık stator ve hareketli konfigürasyonları nedeniyle geleneksellere [13] nazaran dalga enerjisi sistemleri için araştırmacıları yeni alternatif doğrusal jeneratör [40] topolojilerini aramaya yöneltmiştir [13]. Dalga enerjisi sistemleri için güç yoğunluğu yüksek jeneratör dikkate alınmalıdır [41]. Ayrıca dikkat çekici çalışmalar; bölmelendirilmiş akı tersine çevirme [42] ve anahtarlamalı relüktans doğrusal jeneratör [43-45] ele alınmış ve dalga sistemleri için önerilmiştir.

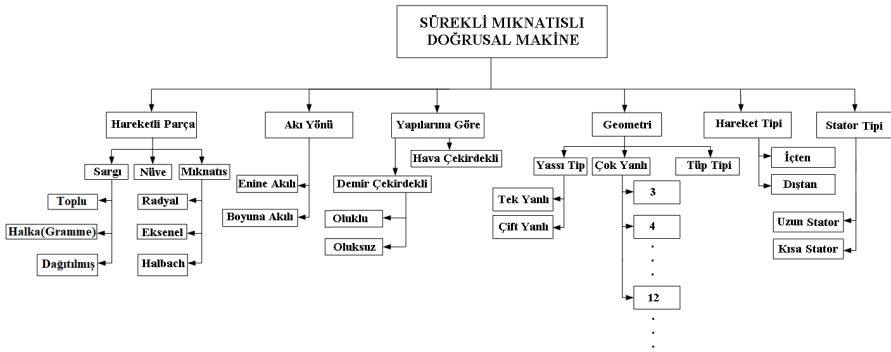
Yapısal olarak statorun (durağan kısmın) hareketli kısımdan uzun olması kayıpları artırır [22]. Bu nedenle maliyet artmasına rağmen manyetik akı yoğunluğunu yükseltmek, kayıpları azaltmak için hareketli statordan daha uzun yapılır [22]. Oluklu yapılar; oluksuz veya hava nüveli yapılara nazaran daha yüksek güç ve gerilim sunar [13]. Ancak oluksuz yapılarda dış bulunmadığından dolayı vuruş kuvveti ihmal edilecek derecede çok küçüktür. Mıknatıslar manyetizasyon durumuna göre; hareketlide akı odaklayacak şekilde eksenel, hareketli yüzeyine monte edilerek radyal şekilde ve her iki yönde akı yöneliminde (eksenel ve radyal) Halbach dizilimle olabilir [46]. Eksenel manyetize edilmiş PM'ler yüksek kuvvet yoğunluğu sunmasına karşın kuvvet dalgalanması önemli bir sorundur [13]. Radyal PM düşük bir kuvvet yoğunluğu sunmasına karşın düşük maliyet sunması ve daha düşük vuruş kuvveti nedeniyle tercih edilirler [13]. Analitik yöntemle hızlı hesaplama, optimizasyon ile vuruş kuvveti azaltılarak sonlu elemanlar yöntemi üzerinden prototip elde edilebilir [47]. Halbach PM'nin indüklenen gerilimde düşük harmonik içermesi, yüksek verimlilik ve kuvvet yoğunluğu açısından birçok avantaja sahiptir [13]. Ancak yüksek PM maliyeti nedeniyle imalat maliyetini düşürmeye yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Güç yoğunluğu ve hareket mesafesini arttırmaya yönelik dıştan hareketli doğrusal tüp tipi sürekli mıknatıslı jeneratör dalga enerjisi uygulamalarında kullanımı da mümkündür [19]. Doğrusal akı anahtarlamalı PM jeneratör başka bir seçenektir. C nüveli bu tip jeneratör Tepki Yüzey Metodu ile optimum boyutlar elde edilmiştir [48]. Başka bir çalışmada sürekli mıknatıslı jeneratör ve aynı metod kullanılarak amaç fonksiyonları üzerinden optimizasyon gerçekleştirmişlerdir [49]. Tüp tipi akı anahtarlamalı ve radyal akılı doğrusal jeneratör ile karşılaştırarak radyal akılı'nın testlerini gerçekleştirmişlerdir [50]. Daha düşük vuruş kuvveti için kutup adımı/oluk adımı oranı 2 yerine 0,66 olarak alınabilir [51]. Yüksek kuvvet değerlikleri için iç çap/dış

çap oranı 0,4-0,55 aralığında alınabilir [52,53]. Dalga enerjisi uygulamaları için akı anahtarlamalı jeneratörde nüve olarak SMC, Silisli sac, Demir tozu (Kool M μ) kullanılabilir [52-54]. SMC ve Silisli sac karşılaştırıldığında Silisli sac net kuvvet bakımından daha yüksek performans göstermektedir [52]. Ancak düşük frekanslarda SMC kaybı azalması, imalat kolaylığı ve simetrik yapısından dolayı 3B SEY analizinin karmaşık yapılara nazaran kısa sürmesi bakımından dikkat çekmektedir [52]. Çift yanlı akı anahtarlamalı 100W güçlü uygulama ve kontrol sistemi ele alınmıştır [55]. Ayrıca son yıllarda akı anahtarlamalı jeneratörlerde süperiletken kullanılması potansiyel bir seçenek olarak değerlendirilmekte ve teknolojik olgunluk bakımından yenidir [13]. Ancak ilerleyen yıllarda süperiletkenlikli jeneratörler potansiyel bir aday olarak görülmektedir [5,13]. Statorun uç tarafında PM yokluğu; son etkinin neden olduğu tutma kuvveti dikkate alınmaz [13]. Hareketli yekpare ferromanyetik malzemeden; statorda mıknatıs, sargılar ve paketlenmiş silisli saclardan meydana gelmektedir. Yüksek manyetik akı yoğunluğu nedeniyle Neodyum mıknatıslar tercih edilir. Mıknatıs maliyetlerini azaltmaya yönelik Ferrit mıknatıslarda önerilmiş ve Neodyum mıknatıslı jeneratör ile karşılaştırıldığında kablo uzunluğundaki, kütleindeki ve yük açısında artışının yanında verim düşüklüğü göstermektedir [56]. Ayrıca bu makinelerde sürekli mıknatıs kullanılması tuzdan dolayı korozyon oluşumu dezavantaj oluşturmaktadır [3]. PVC izoleli iletkenler hem havada hem de deniz suyuunda uzun ömürlüdür ve sürekli çalışma sırasında 70 °C'ye dayanır [35]. Jeneratör soğuk deniz suyu ile çevrili olması stator sırtı ile deniz suyu arasında iyi bir termal bağlantı sağlarsa iletkenler soğuyabilir [35]. Mıknatıslarda demanyetizasyonunu önlemek için süperiletken sargılar kullanılabilir [5]. Süperiletken sargıların kullanımında yüksek maliyeti dikkate alınmadığında omik dirençlerinin küçük olması bakımından avantajlı olduğu söylenebilir. Sürekli mıknatıs ve süperiletken fiyatlarındaki artış nedeniyle mıknatıssız ya da daha az mıknatıs kullanımı içeren hatta süperiletken kullanımı içermeyen tasarımlar ekonomik açıdan hayata geçirilebilecek durumdadır [13].

Mekanik dişli işlevi isteyen uygulamalar (rüzgâr jeneratörleri ve elektrikli araç tahrik sistemi, vb.) gibi dalga enerjisi uygulamaları için son yıllarda doğrusal manyetik dişli içeren doğrusal jeneratör konfigürasyonu önerilmiştir [12]. Dolayısıyla, düşük hızlı dalga hareketini doğrudan yakalayarak dişli oranı yüksek hızlı hareket ettiricinin hızıyla doğrusal jeneratörü yüksek hızlarda tahrik edilebilmektedir [12]. Manyetik dişli sistemiyle, dişli ve doğrusal jeneratör dişlinin manyetik devrelerinin ayrılması ve birleştirilmesi mümkündür [12,13]. Kısacası doğrusal jeneratörle seri/paralel entegrasyonu yapılabilir [12,13]. Yüksek gerinim, verimlilik ve düşük kuvvet dalgalanması nedeniyle dikkat çekmektedir [13].

Hareketli-stator uzunluğunu, oluk/kutup sayısı, mıknatısların geometrik boyutları, hava boşluğu mesafesi, sarım sayısı ve diğer parametreler doğrusal jeneratör için önemli parametrelerdir. Tek yanlı yapı ile karşılaştırıldığında tüp tipi doğrusal makina daha yüksek alan kullanımı, daha az kaçak akı, daha büyük itme kuvveti yoğunluğu, uç sargılar yoktur ve rulmanlara radyal kuvvet uygulanmaması açısından avantajlara sahiptir [12]. Ancak tek yanlı imalatı kolay ve çok yanlı düşünülerek farklı konfigürasyonlar elde edilebilir [13]. Ayrıca tek yanlı yapı üretilen güç ve dengesiz kuvvet çekimi açısından dezavantajlı olmasına karşın çoklu yapılandırma ile dikkat çekici hale gelmiştir. Örneğin çift yanlı [5], dört yanlı [22,35], sekizgen [26] ve daha fazlası olabilir. Hareketli ve stator arasındaki kuvvetleri dengelemek için çift yanlı [31] doğrusal jeneratör modelinin simülasyon ve deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir [57]. Üretim toleransları her iki tarafta da dengesiz hava boşluğundan dolayı çekim kuvvetleri tamamen ortadan kaldırılmamış, destek yapısı ve yatak sistemi tam olarak tasarlanmalıdır [13]. Kutupların eğimi arttıkça vuruuntu kuvveti azalmakta aynı zamanda indüklenen gerilimde düşme meydana gelmektedir [57]. Hareketli boyu stator boyundan uzun olması tüm sargıları aktif kısa olması durumunda ise bazı sargıları pasif hale getirecektir [13]. Hareketlinin çalışma mesafesi gereğinden fazla uzun olması mıknatıs kullanımını ve toplam maliyeti arttıracaktır. 26. Kaynakta indüklenen gerilimdeki harmoniklerin giderilmesi için sargıyı dağıtma, kutup ayaklarının uygun şekillendirilmesi, sargı adımını kutup adımından daha kısa yapma, oluk veya mıknatısları kaydırma, stator paketini dik yerleştirme olarak düzenlemeler yapılabilir. İster içten hareketli ister dıştan hareketli yanlı veya tüp tipi doğrusal sürekli mıknatıslı jeneratörlerin vuruuntu kuvveti önemli bir sorundur. Bu durum stator veya hareketli kısımda enerji bulunmaksızın mıknatıs ile ferromanyetik dış ve uç kısımları arasındaki etkileşimden meydana gelmektedir. Kenar mıknatıslarına komşu mıknatıs; çift yönlü akı kuplajı olarak bilinen simetrik olmayan akı dağılımına yol açar [13]. Son kısımlarda uç etkisi manyetik akı dağılımlarını etkilemektedir [13]. Meydana gelen dış kaynaklı net kuvvet ya da vuruuntu kuvveti mekanik titreşime ve elektromanyetik kuvvet dalgalanmasına neden olabilir [19]. Düşük hava aralığı vuruuntu kuvvetini arttırmasının yanı sıra kuvvet dalgalanmalarından dolayı mekanik parçalarda yıpranma oluştururken büyük hava aralığı ise daha düşük verimlilik sağlar [26]. Tüp tipi makinelerde mıknatıs bölümü ile armatür arasındaki manyetik normal kuvvetlerin dengelenmesini sağlamak için hava aralığı; hareketli çevresinde tek tip olması gerekir [9] aksi durumda mıknatıs ve armatür arasındaki normal kuvvet son derece büyük hale gelir ve sürtünme artar [9]. Harmonikler çıkış gücündeki karşılık gelen dalgalanmaları etkiler ve harmoniklerin bastırılması güç dalgalanmasını azaltır [26]. Bu

açından indüklenen gerilimin harmonik bileşenlerine göre dağılımı için oluk kutup kombinasyonları da dikkate alınmalıdır [26]. Ayrıca oluk ile sürekli mıknatıslar arasındaki etkileşimin neden olduğu vuruntu kuvvetin büyüklüğü en küçük ortak katı dikkate alınarak kutup ve oluk sayısı belirlenebilir. Son etkinin neden olduğu dış kuvvet bileşeni uç tarafların manyetik devresine bağlıdır [19]. Ancak yardımcı dış eklenmesi ya da mevcut son dişin boyut optimizasyonu ile dış kaynaklı kuvveti en aza indirmek mümkündür [19]. Son yıllarda doğrusal jeneratörler dikkate alınarak [40] doğrusal jeneratör çeşitlerine ait sınıflandırma grafiği Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Doğrusal jeneratör çeşitlerine yönelik sınıflandırma [18]

Dalga enerjisi sistemleri iki grupta değerlendirilmekte ve bu sistemler şebekeden bağımsız (offgrid) veya şebekeye bağlı (ongrid) olarak tasarlanmaktadır [2]. Dalgaların doğal hareketinden dolayı doğrusal jeneratörden elde edilen faz gerilimleri genlik bakımından uygun olsa da frekans bakımından elektrik şebekesi için uygun değildir. Kısacası çıkış voltajları ve akımları hem genlik hem de frekans bakımından değişecektir. Ayrıca, yukarı aşağı piston her yön değiştirdiğinde fazların sırası değiştirilir, bu da diğer jeneratörlere veya bir şebekeye doğrudan bağlanmayı imkânsız hale getirir [35]. Bu sebeple jeneratör ve şebeke bağlantısında dikkate alınarak tasarlanmalıdır [7,58-59]. Bağlantı yapıları 58 ve 59. referanslarda ele alınmıştır. Genellikle çalışmalarda [6,7,60,61]; yarı iletken doğrultucularla uygun bir voltaja dönüştürülür. Sargı gerilim harmoniklerinin bastırılması bu açıdan çok önemli değildir [26]. Doğrultma, pasif diyot doğrultucular veya aktif çift yönlü AA/DA dönüştürücü ile gerçekleştirilebilir [35]. Akü/akü grubu şarj edilerek evirici yardımıyla kullanılabilecek voltaj ve şebeke frekansına dönüştürülür. Şebeke bağlantısı için güç elektronik dönüştürücü kıyıya yerleştirilir ve böylelikle karadan güç elektroniği ve kontrolle ilgili olası sorunlar kolayca çözülebilir [31].

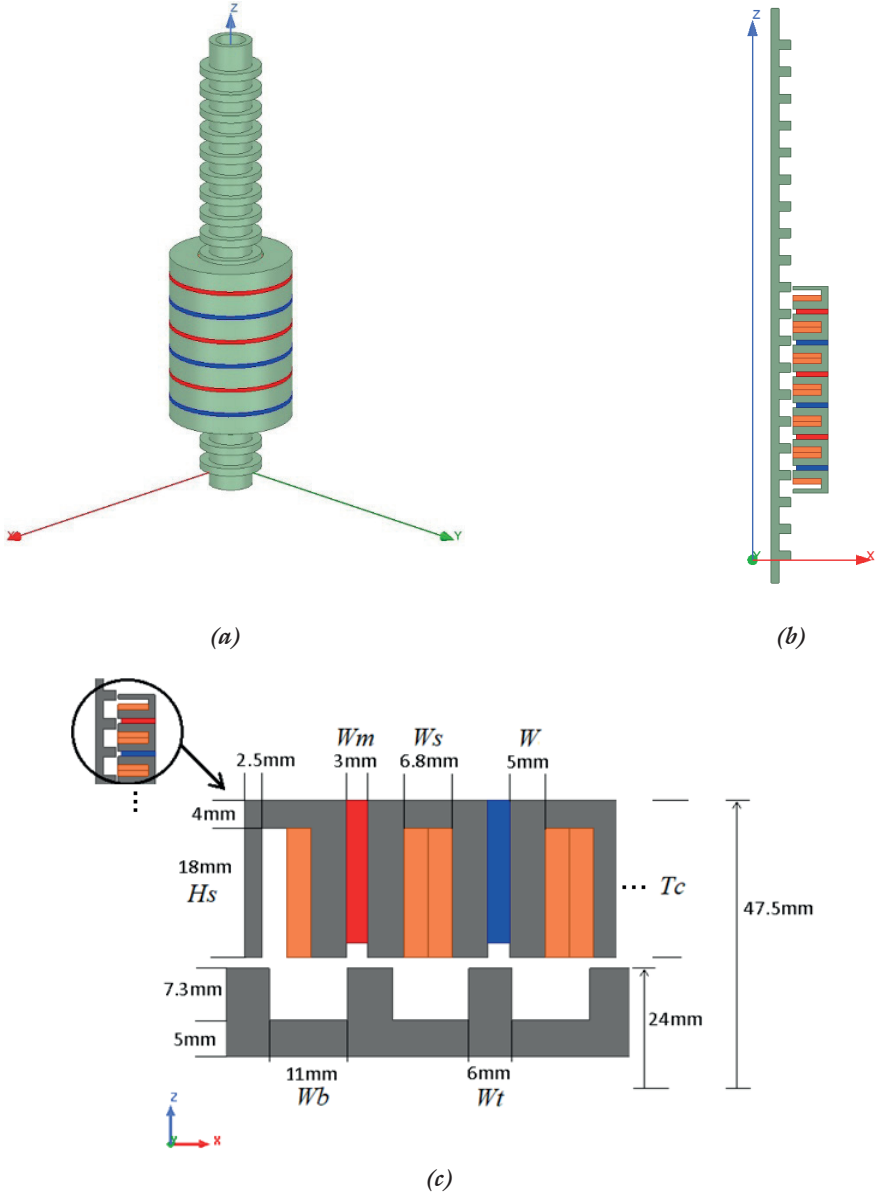
Nokta emici ve referans sistemi, dalga hareketlerinin kuvvet oluşturduğu ve jeneratörün bir damper görevi gördüğü salınımlı bir sistem oluşturur. Nokta emicinin titreşiminin kontrol edilmesi ve enerji çıkışını en üst düzeye çıkarmak için ek bir kütle de kullanabilir [62]. Sistemin sönümlenmesi, emicinin boyutu, ağırlığı, hızı dikkate alınmalıdır [22]. Tasarımlarda genellikle jeneratör hızı sabit kabul edilir [30,32,35]. Dalga hareketinin frekans değeri günün farklı saatlerinde (rüzgâr değişimine bağlı olarak) değişmektedir. Örneğin, dalga hareketinin gerçek zamanlı değişimi 6. referansın 3 numaralı a şekli incelenebilir. Dalga yüksekliği hareketli yüksekliğine çok yakındır [6] ve bu tasarımda eşit alınmıştır. Hareketli hızı dalga hareketine göre değiştiğinden dolayı jeneratörde üretilen gerilim değeri de [63] ve indüktif reaktans değeri de [32] değişmektedir. Hıza bağlı olan elektrik frekansının bu değişimi eşzamanlı olarak reaktiflik miktarını değişken bir parametre haline getirecektir [22]. Üç fazlı rezistif yüklü durum için, deniz kablosunun direnci ihmal edilirse, yük voltajının jeneratörün çıkış voltajı ile aynı olması beklenir [6]. Jeneratör ile kıyı arasındaki mesafeye bağlı olarak bağlantı kablosunun kapasitans değeri dikkate alınabilir ancak oldukça küçük olduğundan dolayı ihmal edilmektedir [6]. Ancak bazı çalışmalarda hat uzunluğu dikkate alınarak hesaplamalara dahil edilmiştir [60,61]. Sönümleme kontrolünün düzenli ve düzensiz dalgalar halinde aktif ve pasif olarak deneysel olarak incelenmiştir [64]. Özellikle zorlu hava şartlarında hareketli hızını ve strok uzunluğunu (vuruş mesafesini) azaltmak için ek sönümlemeye (hidrodinamik amortisörler kullanan sistemlere) ihtiyaç duyulabilir [22].

Üç fazlı jeneratör çıkışında üç durum (sadece rezistif yük, pasif doğrultma-filtreleme ve rezonans devresi bağlanması) ayrı ayrı ele alınmıştır [6]. Çıkış güç değerlerinde önemli değişim rezonans durumunda görülmesi beklenen durum olmasına karşın verimlilik sırasıyla %90,8, %78, %66 olarak hesaplanmıştır [6]. Ucuz, basit, güvenilirlik ve verim dikkate alındığında aktif doğrultma yerine pasif doğrultma tercih edilmektedir [61,65]. Aktif doğrultma ile güç faktörü kontrol edilebilir ve faz kompanzasyon kondansatör blokları bağlanarak sistem daha karmaşık hale gelir [22]. 6. Referansta hem pasif doğrultma-filtreleme devresi hem de rezonans devresi bağlanması durumunda güç faktörü hesabı dikkate alınmıştır. Yüke daha fazla güç sağlamak için sönümleme faktörünün arttırılması jeneratör çıkışına rezonans devresi bağlanarak sağlanabilir [6]. Örneğin [65]. Referansta tek fazlı bir rezonans devresi üzerinden uygulama gerçekleştirilmiş ve 60. referansta ise üç fazlı jeneratör, kontrolsüz doğrultucu, hattın π devresi üzerinden yükün beslenmesi olarak modellenir. Diğer bir çalışmada jeneratörden şebekeye kadar güç sistemi ele alınmış ve sönümleme fonksiyonun yüke göre değişimi

incelenmiştir [61]. Güç üretimini optimize etmek için optimum DA voltajının bilinmesi önemlidir [61]. Ayrıca sistemde maksimum güç ve maksimum verimin meydana geldiği optimum yük direnç değeri belirlenmelidir [63]. Dalgalardan elde edilecek elektrik enerjisini en üst düzeye çıkarmak için jeneratör gelen dalgalarla rezonansta olacak şekilde kontrol edildiğinde aktarılan güç maksimize edilir [3,66]. Jeneratöre bağlanan bir veya üç faz için yeni bir rezonans devresi önerilmiştir [48]. Aktif doğrultma ile jeneratörün terminal çıkış voltajı büyüklük olarak artırılabilir ve fazda kontrol edilebilir ve böylece doğrultucunun sürüş durumunun kontrolü ile, jeneratörün farklı çalışma durumuna göre ayarlama avantajı sunar [3,65]. Aktif gücü en üst düzeye çıkarmak ve reaktif gücü kontrol etmek için bu yöntem kullanılır [3,65]. Anahtarlama kayıpları, sistemin soğutulması ve redresörün doğrusal olmayan özelliği dikkate alınmalıdır. Nominal yükte küçük bir yük açısı, faz kompanzasyonu olmadan maksimum aktif gücün çıkarılabileceğini ve ayrıca aşırı yükte gelişmiş özelliklere yol açar [35]. Büyük yük açılarında sahip makinelerde gerekli olan faz telafisi, [27]'de kapasitör/kapasitör bankları, [28]'de ise redresör olarak aktif bir çift yönlü AA/DA dönüştürücü kullanarak ile gerçekleştirilebilir [35]. Maksimum güç takip algoritması ile çıkış gücü kontrol edilebilir [67]. Faz kompanzasyonu; akımların değişen frekansı nedeniyle karmaşıklıkla ve ek ekipman anlamına gelir [35]. Küçük yük açısına sahip bir jeneratör tasarlanıp faz kompanzasyonu yapılmaksızın doğrultucu olarak basit bir diyot devresi kullanılabilir [35]. Ayrıca maksimum güç izleme ve alan odaklı kontrol yöntemleri [33] ve kayma kipli kontrol tekniği ile sisteminin performansı etkili biçimde geliştirilebilir [55]. Güç kontrolü ve metodolojileri için 3, 58, 64-65 numaralı kaynakları inceleyiniz.

3. AKI ANAHTARLAMALI TÜP TİPİ ÜÇ FAZLI JENERATÖR MODELİ

Jeneratörün hareketli parçası tek parça olarak primer (stator) U şeklindeki silisli saclar arasına sabit mıknatısların yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Sabit mıknatısın durağan parçada olması makinenin ısı yönetimi oluşturabilir ancak çok sayıda mıknatıs ve ebatları düşünüldüğünde maliyetin artması kaçınılmazdır. Modelde çift katmanlı sargı tipi A,B,C fazları sırası ile yerleştirilmiştir. A fazı dizimi AaaA olarak verilmiştir. Diğer fazlarda benzer şekilde sıralanmaktadır. Şekil 3'te modelin hareketli dişleri hizalandıkça manyetik devre relüktansı minimum hale gelir.



Şekil 3. Tüp tipi akı anahtarlamalı doğrusal jeneratör modeli, a) 3D görünümü, b) 2D görünümü, c) 2D boyutlandırma büyüklükleriyle görünümü,

3.1. Mıknatıs Çeşitleri

Motor/jeneratör uygulamaları için çeşitli mıknatıslar kullanılmaktadır. Özellikle geleneksel Neodyum mıknatısların yerine nadir toprak elementi içermeyen veya belirli oranda azaltılmış mıknatıslar halen araştırma

konusudur. Özellikle bu durumun iki temel sebebi vardır. Birincisi nadir toprak elementi ihtiyacını azaltmak, ikincisi ise nadir toprak elementindeki kur kaynaklı dalgalanmalardır. Bu çalışmada ele alınan mıknatıs çeşitleri ve Alan Şiddeti ve Akı Yoğunluğu değerlikleri Tablo 1’de verilmiştir.

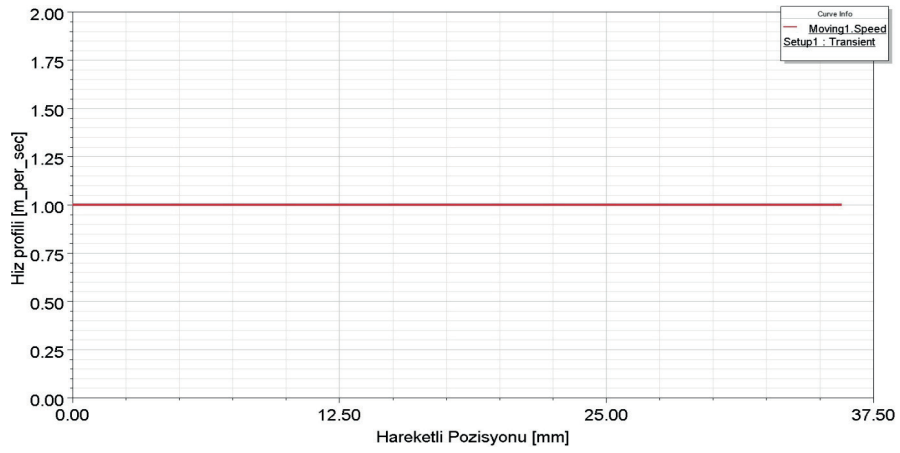
Tablo 1. Mıknatıs çeşitleri [68-72]

Mıknatıs Adı	H(A/m)	B(T)
NdFeB	-890000	1,1
AlNiCo	-119366	1,05
SmFeN	-903204	0,97
Samaryum S24	-661000	0,92
Ferrit Y30	-188000	0,4

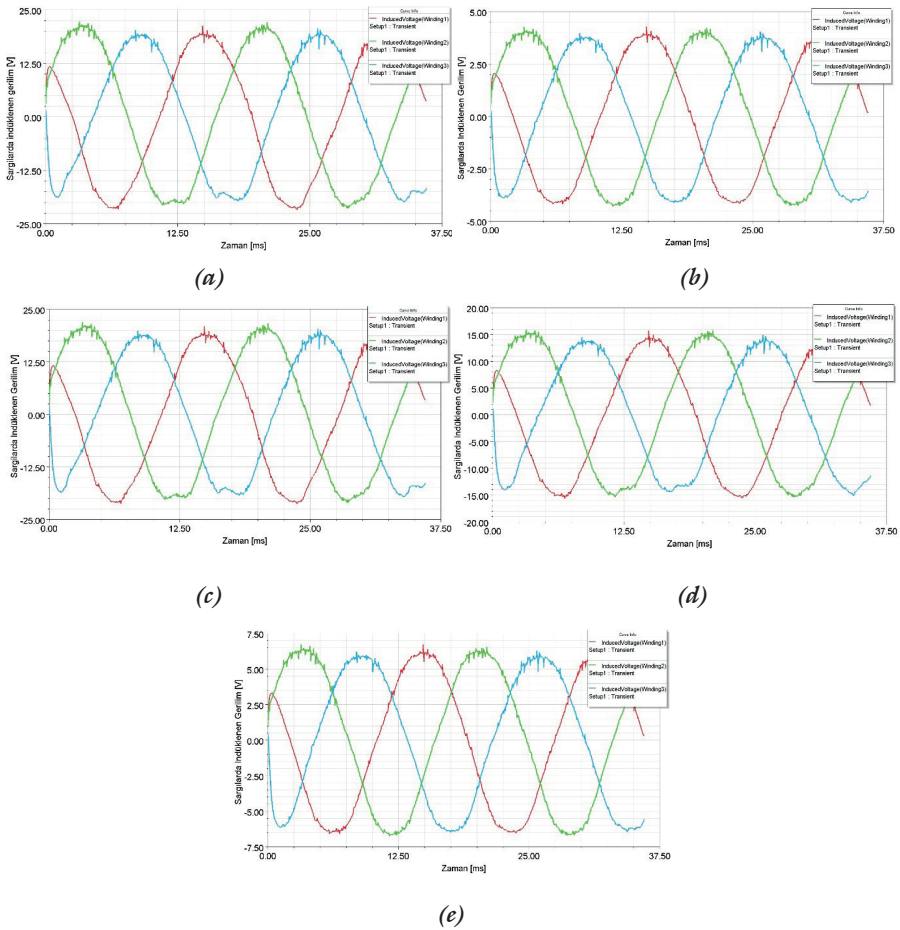
Burada H alan şiddetinin negatif işareti, malzemenin kalıcı mıknatıs olduğunu (manyetizasyon yönüne zıt alan altında çalıştığını) gösterir.

3.2. Analiz Sonuçları

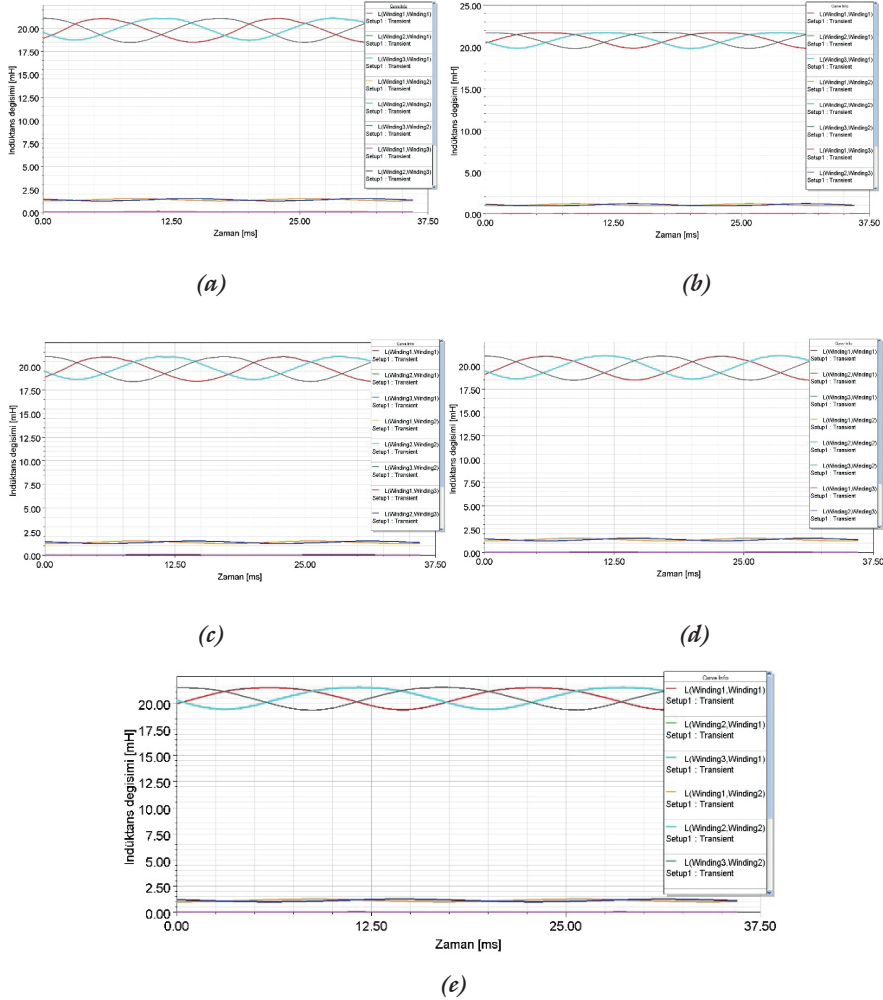
Karmaşık geometrileri sonlu elemanlar yöntemi ile çözmek hem yüksek doğruluk hem de zamandan tasarruf sağlamaktadır. Geçici hal analizi ile belirlenen hareketli hızı değişimine göre sargılarda indüklenen gerilim değişimi ve sargı indüktans değişimi Tablo 1’deki mıknatıs çeşitleri için elde edilmiştir. Hız profili dalga enerjisi sistemlerinde sinüzoidal olsa da jeneratör dalga formunu sabit hız değeri için elde etmek mümkündür. Hareketli hızı 1m/s [5,10] olarak değiştiği kabul edilmiştir. Şekil 4’te hareketli hız ve pozisyon değişimi verilmiştir.



Şekil 4. Hareketli parça hız ve pozisyon değişimi



Şekil 5. Sargılarda İndüklenen Gerilim değişimi, a)NdFeB, b)AlNiCo, c)SmFeN, d) Samaryum S24, e)Ferrit Y30



Şekil 6. İndüktans değişimi, a)NdFeB, b)AlNiCo, c)SmFeN, d)Samaryum S24, e)Ferrit Y30

4. SONUÇ

Ülkemizin coğrafi konumu düşünüldüğünde yüksek dalga enerjisi potansiyeline sahiptir. Ancak dalga enerjisi üzerine çalışan kıyı şeridi olan ülkelere nazaran ülkemizde dalga enerjisi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Özellikle doğrusal jeneratör ve topolojileri üzerine çalışmalar gittikçe artmaktadır. Teknolojik olgunluk bakımından son yirmi yılda hızlı gelişmesine karşın ilk yatırım maliyetleri bakımından oldukça yüksektir. Bu uygulamalar için doğrusal hareketli jeneratörlerin avantaj ve dezavantajları 71 nolu referansta detaylandırılmıştır. Özellikle burada yanlı

modelleri yüksek güç, tüp tipi modeller düşük güç, hava nüveli yapıların yerine demir çekirdekli, tek faz yerine üç faz modelin daha yüksek elektrik enerjisi eldesinin yanı sıra hareketli üzerine mıknatısların yerleştirilmesinin daha etkili olduğu belirtilmiştir [71]. Literatür araştırmasında doğrusal hareketli jeneratörler içerisinde boyuna akılı sürekli mıknatıslı doğrusal jeneratörler yaygın olarak tercih edilmektedir [71,72]. Ancak doğrusal hareketli vernier ve akı anahtarlama jeneratörler geleneksel radyal akılılara göre daha ekonomik ve bazı özellikler açısından daha iyi performans sergilediğinden dolayı son yıllarda araştırma konusu olmuştur. Ayrıca bu jeneratörlerin yapısal olarak türetilen farklı konfigürasyonları dalga enerjisi sistemleri için önerilmektedir. Dalga enerjisi sisteminde her bir bileşen için öncelikle bilgisayar benzetim modelleri kullanılarak analizleri gerçekleştirilmelidir [3]. Doğrusal jeneratör üzerinde tasarım maliyetini azaltmak için, gelişimde ilk adım olarak teorik ve sonlu elemanlar tabanlı çoklu fizik tabanlı benzetimler yapılması elzemdir. Özellikle farklı konfigürasyonlar seçilmesi ile meydana gelecek asimetri yüzünden üç boyutlu analizler oldukça uzun zaman almaktadır [73]. Dalga enerjisi, enerji dönüşümü için kullanılan jeneratör tipleri, genel özellikleri ve bu jeneratörlerin şebeke bağlanmaları hakkında literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kullanılabilecek jeneratör konfigürasyonların avantaj ve dezavantaj açısından değerlendirilmiştir. Önerilen jeneratör dalga ve 2 kat uzunluğundaki modeli süspansiyon sisteminden enerji hasadı için de önerilmiştir [74,75]. Modelin baş ve son kısımlarında vuruntu kuvvetini azaltmak için dış kısaltması gerçekleştirilmiştir [75]. Düşük güçlü dalga enerjisi dönüştürücüsü olarak kullanımı araştırılmıştır. Model için kullanılan mıknatıslar sırasıyla NdFeB, AlNiCo, SmFeN, Samaryum S24, Ferrit Y30 olarak verilmiştir. Sargılarda indüklenen maksimum gerilim sırasıyla 21.3V, 4.27V, 20.99V, 15.73V, 6.71V'tur. Özellikle elde edilen gerilim açısından NdFeB ile SmFeN arasındaki fark oldukça küçüktür. SmFeN'nin performans bakımından oldukça bir fark sunmaması beklenirken gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla NdFeB mıknatısların yerini alması beklenmektedir.

Kaynakça

1. "Ocean energy," Report of the US Department of Interior, Minerals Management Service, 2007.
2. Rhinefrank, K., Agamloh, E. B., Von Jouanne, A., Wallace, A. K., Prudell, J., Kimble, K., & Schacher, A. (2006). Novel Ocean Energy Permanent Magnet Linear Generator Buoy. *Renewable Energy*, 31(9), 1279-1298.
3. Ozkop, E., & Altas, I. H. (2017). Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 106-115.
4. Özger, M. (2011). *Dalga Enerjisi Tahmini Ve Stokastik Modelleme* (Doctoral Dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
5. Farrok, O., Islam, M. R., Sheikh, M. R. I., Guo, Y., Zhu, J., & Lei, G. (2018). Oceanic wave energy conversion by a novel permanent magnet linear generator capable of preventing demagnetization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6), 6005-6014.
6. Hong, Y., Eriksson, M., Castellucci, V., Boström, C., & Waters, R. (2016). Linear generator-based wave energy converter model with experimental verification and three loading strategies. *IET Renewable Power Generation*, 10(3), 349-359.
7. Greaves, D., & Iglesias, G. (Eds.). (2018). *Wave and tidal energy*. John Wiley & Sons.
8. Leijon, M., Bernhoff, H., Agren, O., Isberg, J., Sundberg, J., Berg, M., ... & Wolfbrandt, A. (2005). Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator. *IEEE Transactions on energy conversion*, 20(1), 219-224.
9. Elwood, D., Yim, S. C., Prudell, J., Stillinger, C., Von Jouanne, A., Brecken, T., ... & Paasch, R. (2010). Design, construction, and ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off. *Renewable Energy*, 35(2), 348-354.
10. Bozzi, S. I. L. V. I. A., Miquel, A. M., Scarpa, F., Antonini, A., Archetti, R., Passoni, G. I. U. S. E. P. P. E., & Gruosso, G. I. A. M. B. A. T. T. I. S. T. A. (2013, June). Wave energy production in Italian offshore: Preliminary design of a point absorber with tubular linear generator. In *2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 203-208). IEEE.
11. Baker, N. J., Almoraya, A., Raihan, M. A., McDonald, S., & McNabb, L. (2022). Development and Wave Tank Demonstration of a Fully Controlled Permanent Magnet Drive for a Heaving Wave Energy Converter. *Energies*, 15(13), 4811.
12. Li, W., Chau, K. T., & Jiang, J. Z. (2011). Application of linear magnetic gears for pseudo-direct-drive oceanic wave energy harvesting. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 2624-2627.

13. Faiz, J., & Nematsaberi, A. (2017). Linear electrical generator topologies for direct-drive marine wave energy conversion-an overview. *IET Renewable Power Generation*, 11(9), 1163-1176.
14. López, I., Andreu, J., Ceballos, S., De Alegría, I. M., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 413-434.
15. Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology.
16. Akar, S., & Akdoğan, D. A. (2016). Environmental and economic impacts of wave energy: Some public policy recommendations for implementation in Turkey. In *Handbook of research on green economic development initiatives and strategies* (pp. 285-309). IGI Global.
17. Arslan Serdal, (2016). Dalga Enerjisinden Elektrik Üreten Sistemlere Genel Bakış ve Arşimet Dalga Salınımı Sistemlerinde Kullanılan Jenaratör Topolojilerinin İncelenmesi, *International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16)* March 19-20, Kilis
18. Arslan, S., Gurdal, O. (2022). Polygonal tubular linear permanent magnet generator analysis and experimental test. *Scientia Iranica*, 29(1), 168-182. doi: 10.24200/sci.2019.50094.2739
19. Huang, L., Hu, M., Yu, H., Liu, C., & Chen, Z. (2017). Design and experiment of a direct-drive wave energy converter using outer-PM linear tubular generator. *IET Renewable Power Generation*, 11(3), 353-360.
20. Molla, S., Farrok, O., Islam, M. R., & Xu, W. (2023). A systematic approach for designing a highly efficient linear electrical generator for harvesting oceanic wave energy. *Renewable Energy*.
21. Zheng, Z. Q., Huang, P., Gao, D. X., & Chang, Z. Y. (2015). Analysis of electromagnetic force of the linear generator in point absorber wave energy converters. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(4), 10.
22. Danielsson, O., Thorburn, K., & Leijon, M. (2008). Direct Drive-Linear Generators, Chapter: 6.2. Ocean wave energy-Current status and future perspectives.
23. Binh, P. C., Truong, D. Q., & Ahn, K. K. (2012, October). A study on wave energy conversion using direct linear generator. In *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems* (pp. 64-69). IEEE.
24. Zhang, Y., Zhao, Y., Sun, W., & Li, J. (2021). Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110764.
25. Shangguan, L., Lu, K., & Wang, H. (2023). Research on Laboratory Test Method of Wave Energy Converter Wave-Wire Conversion Ratio in Irregular Waves. *Energies*, 16(2), 1001.

26. Ivanova, I. A., Agren, O., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2005). Simulation of wave-energy converter with octagonal linear generator. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(3), 619-629.
27. Boldea, I. "Linear electric machines, drives, and MAGLEVs handbook", Boca Raton: CRC Press, pp.1-660 (2013).
28. Tarimer, I., & Sakar, S. (2010). Computer Aided Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Generator. *Przegląd Elektrotechniczny*, 86(3), 230-234.
29. Danielsson, O., Leijon, M., "Flux Distribution in Linear Permanent-Magnet Synchronous Machines Including Longitudinal End Effects", *Ieee Transactions on Magnetic*, Vol. 43, No. 7, July 2007.
30. Küçük, Ali Osman, "Dalga Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üreten Yeni Bir Sistem Tasarımı Ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014
31. Cruz, J. (2007). *Ocean wave energy: current status and future prespectives*. Springer Science & Business Media.
32. Thorburn, K., & Leijon, M. (2007). Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters. *Ocean Engineering*, 34(5-6), 908-916.
33. Herrera, F., Pereda, J., Bravo, P., & Rojas, F. (2019, November). Wave energy conversion: Overview and control of a permanent magnet linear generator. In *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (pp. 1-6). IEEE.
34. Ghaheri, A., Afjei, E., & Torkaman, H. (2022). Design optimization of a novel linear transverse flux switching permanent magnet generator for direct drive wave energy conversion. *Renewable Energy*, 198, 851-860.
35. Danielsson, O., Eriksson, M., & Leijon, M. (2006). Study of a longitudinal flux permanent magnet linear generator for wave energy converters. *International Journal of Energy Research*, 30(14), 1130-1145.
36. Harris MR, Pajooman GH, Abu Sharkh SM. 1997. The problem of power factor in VRPM (transverse-flux) machines. *Proceedings of Eighth International Conference Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444)*, Cambridge, England.
37. Polinder, H., Mecrow, B. C., Jack, A. G., Dickinson, P. G., & Mueller, M. A. (2005). Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion. *IEEE Transactions on energy conversion*, 20(2), 260-267.
38. Qiu, S., Zhao, W., Zhang, C., Shek, J. K., & Wang, H. (2021). A novel structure of tubular staggered transverse-flux permanent-magnet linear ge-

- nerator for wave energy conversion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(1), 24-35.
39. Chen, M., Huang, L., Hu, M., Hu, B., & Ahmad, G. (2021). A spiral translator permanent magnet transverse flux linear generator used in direct-drive wave energy converter. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(7), 1-5.
 40. Zhang, Z., Wu, B., Lu, Q., & Xu, W. (2021, July). Novel Linear Generator Concepts and Topologies for Wave Energy Conversion Systems: A Review. In *2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)* (pp. 1-6). IEEE.
 41. Fan, X., Wang, C., Zhu, Z., & Meng, H. (2022, November). Design and Analysis of a High Power Density Permanent Magnet Linear Generator for Direct-Drive Wave Power Generation. In *Actuators* (Vol. 11, No. 11, p. 327). MDPI.
 42. L. Zhao and Q. Lu, "A novel tubular partitioned stator flux-reversal permanent magnet linear machine for direct-drive wave energy generation," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 55, no. 11, Nov. 2019
 43. J. Pan, Y. Zou, and G. Cao, "Investigation of a low-power, double-sided switched reluctance generator for wave energy conversion," *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, iss. 2, pp. 98-109, 2013.
 44. Mendes, R. P. G., Calado, M. R. A., Mariano, S. J. P. S., & Cabrita, C. M. P. (2011, September). Design of a tubular switched reluctance linear generator for wave energy conversion based on ocean wave parameters. In *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference* (pp. 146-151). IEEE.
 45. Wang, D., Shao, C., & Wang, X. (2016). Design and performance evaluation of a tubular linear switched reluctance generator with low cost and high thrust density. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(7), 1-5.
 46. Oh, Y. J., Park, J. S., Hyon, B. J., & Lee, J. (2018). Novel control strategy of wave energy converter using linear permanent magnet synchronous generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3), 1-5.
 47. Liu, C., Chen, Y., Dong, R., & Ye, B. Optimization Design of Tubular Permanent Magnet Linear Generator Based on Entropy Model for Wave Energy Conversion. Available at SSRN 4312827.
 48. Boström, C., Ekergård, B., Waters, R., Eriksson, M., & Leijon, M. (2013). Linear generator connected to a resonance-rectifier circuit. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 38(2), 255-262.
 49. Arslan, S., Gurdal, O., & Akkaya Oy, S. (2020). Design and optimization of tubular linear permanent-magnet generator with performance improvement using response surface methodology and multi-objective genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 27(6), 3053-3065. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.50093.1506>

50. Huang, L., Yu, H., Hu, M., & Yuan, B. Research on the Characteristics of A Novel Tubular Primary Permanent Magnet Linear Generator for Wave Energy Conversion.
51. Harms, J., & Kern, T. A. (2022, June). Pole Pitch Optimization of a Flux Switching Permanent Magnet Linear Machine for Small Scale Wave Energy Harvesting. In ACTUATOR 2022; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications (pp. 1-4). VDE.
52. Wang, S., Wang, Y., Liu, C., Lei, G., Guo, Y., & Zhu, J. (2023). Performance Comparison of Tubular Flux-Switching Permanent Magnet Machines Using Soft Magnetic Composite Material and Hybrid Material Magnetic Cores. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
53. Zhu, Z. Q., Chen, X., Chen, J. T., Howe, D., & Dai, J. S. (2008, October). Novel linear flux-switching permanent magnet machines. In 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems (pp. 2948-2953). IEEE.
54. Farah, M. M., Farrok, O., & Ahmed, K. (2019, November). Kool M μ powder core used in a flux switching linear electrical machine for electricity generation from the oceanic wave. In 2019 IEEE International Conference on Power, Electrical, and Electronics and Industrial Applications (PEEIA-CON) (pp. 127-130). IEEE.
55. Zou, Y., & Cheng, K. W. E. (2017). A vertical flux-switching permanent magnet based oscillating wave power generator with energy storage. *Energies*, 10(7), 887.
56. Danielsson, O., Thorburn, K., Eriksson, M., & Leijon, M. (2003, September). Permanent magnet fixation concepts for linear generator. In Proceedings of the 5th European Wave Energy Conference (pp. 117-124).
57. Trapanese, M., Boscaino, V., Cipriani, G., Curto, D., Di Dio, V., & Franzitta, V. (2018). A permanent magnet linear generator for the enhancement of the reliability of a wave energy conversion system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(6), 4934-4944.
58. Yu, W., Ma, R., Xu, D., Huang, L., & Wang, S. (2023). A Novel Multiport Hybrid Wave Energy System for Grid-Connected and Off-Grid Applications. *Sustainability*, 15(3), 2175.
59. Thorburn, K., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2004). Wave energy transmission system concepts for linear generator arrays. *Ocean engineering*, 31(11-12), 1339-1349.
60. Engström, J., Kurupath, V., Isberg, J., & Leijon, M. (2011). A resonant two body system for a point absorbing wave energy converter with direct-driven linear generator. *Journal of applied physics*, 110(12), 124904.
61. Boström, C., Svensson, O., Rahm, M., Lejerskog, E., Savin, A., Strömstedt, E., ... & Leijon, M. (2009, November). Design proposal of electrical

- system for linear generator wave power plants. In 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (pp. 4393-4398). IEEE.
62. Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). Fundamentals of ocean renewable energy: generating electricity from the sea. Academic Press.
 63. Luan, H., Onar, O. C., & Khaligh, A. (2009, February). Dynamic modeling and optimum load control of a PM linear generator for ocean wave energy harvesting application. In 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (pp. 739-743). IEEE.
 64. Son, D., & Yeung, R. W. (2017). Real-time implementation and validation of optimal damping control for a permanent-magnet linear generator in wave energy extraction. *Applied Energy*, 208, 571-579.
 65. Ekergård, B., Boström, C., Hagnestål, A., Waters, R., & Leijon, M. (2013). Experimental results from a linear wave power generator connected to a resonance circuit. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(4), 456-464.
 66. Bard, J., & Kracht, P. (2013). Linear generator systems for wave energy converters. Fraunhofer IWES.
 67. Ayub, M. W., Hamza, A., Aggidis, G. A., & Ma, X. (2023). A Review of Power Co-Generation Technologies from Hybrid Offshore Wind and Wave Energy. *Energies*, 16(1), 550.
 68. Çirozlar, İ., Murakami, S., Nakamura, K., Ogawa, T., Yamamoto, S., Kobayashi, N., & Yamamoto, H. (2025). Characteristics of PMSM with Sm₂Fe₁₇N₃/Fe₁₆N₂ Hybrid Bonded Magnets. *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2503R001. <https://doi.org/10.3379/msjmag.2503R001>
 69. HSMAG. (2025, May 10). SmFeN rare earth permanent magnetic materials.
 70. <https://www.hsmagnets.com/blog/smfen-rare-earth-permanent-magnetic-materials/>
 71. Goudsmit Samarium Cobalt Grade System. Samariumcobalt grade system. www.goudsmitmagnets.com
 72. Ahamed, R., McKee, K., & Howard, I. (2022). A review of the linear generator type of wave energy converters' power take-off systems. *Sustainability*, 14(16), 9936.
 73. Khatri, P., & Wang, X. (2020). Comprehensive review of a linear electrical generator for ocean wave energy conversion. *IET Renewable Power Generation*, 14(6), 949-958.
 74. Wang, S.; Wang, Y.; Liu, C.; Lei, G.; Guo, Y. Performance Comparison of Tubular Flux-Switching Permanent Magnet Machines Using Soft Magnetic Composite Material and Hybrid Material Magnetic Cores. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2023, 38 (2), 1118 – 1129. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3235992>

75. Gao, Y., Shao, S., Zou, H., Tang, M., Xu, H., & Tian, C. (2016). A fully floating system for a wave energy converter with direct-driven linear generator. *Energy*, 95, 99-109.
76. Arslan, S. (2024). Developing a Tubular Type Flux-Switching Permanent Magnet Linear Machine for a Semi-active Suspension Systems. *International Journal of Automotive Technology*, 25(5), 1201-1214.

