

Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Enterkonnekte Sistemde PSS/E ile Modellenmesi

Wind Power Plants in Interconnected System Modelling with PSS/E

Halil İbrahim Aydınöz¹, Orhan Ekren²

¹Batı Akdeniz Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü
Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)
halil.ibrahim.aydinnoz@gmail.com

²Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji ABD
Ege Üniversitesi
orhanekren@gmail.com

Özet

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinin, elektrik güç sistemindeki payı diğer kaynaklara göre daha hızlı artmaktadır. Bu durum rüzgâr enerjisi santrallerinin şebekeye bağlantısında elektrik güç sistemine olan etkilerinin incelenmesini gerektirmektedir. Bilindiği üzere rüzgâr enerjisinin şebekeye bağlantı noktasında, enerji kalitesi ve şebeke etkileşimi konusunda bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi rüzgârın kesikli ve değişken güç üreten yapısı nedeniyle, rüzgâr enerjisi santrallerinin şebeke bağlantı noktasında bozucu etkilere sebep olmasıdır. Bu bozucu etkiler özellikle sistemin zayıf olduğu yerlerde türbinlerin şebekeye bağlanmasında kısıtlayıcı etkilere neden olmaktadır. Çünkü iletim sisteminde kısa devre akımları, güçleri ve gerilim seviyelerinin belirli sınırlar içinde olması gerekmektedir. Bu çalışmada, Batı Akdeniz Bölgesinde yer alan Dinar Rüzgâr Enerjisi Santralının (RES) PSS/E programı ile modellenmesi yapılarak kısa devre akımları analizi ve yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler kısa devre akımları, güçleri ve gerilim seviyelerinin uluslararası standartlar, TEİAŞ ve EPDK açısından gereklilikleri ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, kısa devre analizi, yük akış analizi, pss/e, enterkonnekte sistem

Abstract

Electricity production from wind energy as a renewable source has been increasing more rapidly than the other sources. In this case effects on the electric power system of wind energy system connection to the electricity network should be investigated As it is known that, connection point of wind energy system to the electricity network has some problems such as energy quality and electricity network interaction. This is due to the fluctuation on wind speed and variable wind power generation. These disturbances restrict wind turbine connection to the electricity network especially at the weak parts of the electricity network. Because short-circuit currents, powers and voltage levels in the transmission system must be within a certain limits. In this study, a case wind power plant (WPP) located in the Western Mediter-

anean Region of Dinar has been modelled by using PSS/E software also analysis of short circuit currents and load flow analysis have been performed. The analysis showed requirements for the short circuit currents, powers and voltage levels according to the international standards, TEİAŞ and EPDK s.

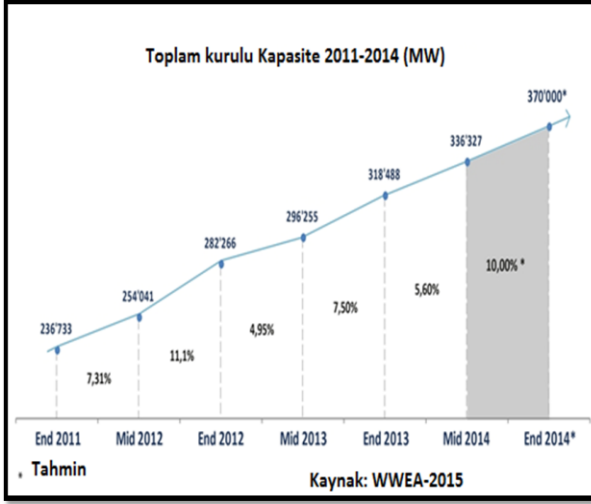
Keywords: Wind power, short circuit analysis, load flow analysis, pss/e, interconnected systems

1. Giriş

Rüzgâr gücünden yararlanmanın tarihi beş bin yıl öncesine kadar dayanmaktadır. Rüzgârdan faydalanma insanlık tarihinin önemli bir bölümünde sadece mekanik güç elde etmek amaçlı olmuştur. Mezopotamya'da sulama amaçlı ilk uygulamaları MÖ 2800'lerde Babil'de yapılmıştır. Yel değirmenlerine ise ilk olarak İskenderiye'de rastlanılmıştır. Türklerin ve Perslerin 7.yy'da yel değirmeni kullandıkları tarih kitaplarında yer almıştır. Avrupa ülkelerinde ise 12.yy'da yel değirmenleri kullanılmaya başlanmıştır[1,2,3]. 20. yüzyılın başlarına kadar rüzgârdan, su pompalamak (su değirmenleri) veya tanecik öğütme (yel değirmenleri) için gerekli mekanik gücü sağlamak amacıyla yararlanılıyordu. Sanayi devrimine bağlı olarak endüstriyel ilerlemenin başlangıcı ile fosil yakıt (petrol, kömür vb) tüketiminin ve elektrik üretiminin büyük oranlara ulaşması ve yüksek verimin elde edilmesi rüzgâr enerjisini bir kenara atmıştır.

Günümüzde gerçekleşmekte olan teknolojik, ekonomik ve toplumsal gelişmelere paralel olarak, ihtiyaç duyulan elektrik enerjinin kesintisiz, kaliteli, güvenilir ve ekonomik koşullarda, çevresel etkileri dikkate alınarak üretilmesi zorunluluğu vardır. Fosil kaynaklı yakıtların sınırlı ömürleri ve çevre kirliliğine yol açmaları alternatif enerji kaynakları üzerinde yeni arayışları kaçınılmaz hale getirmektedir. Çevre kirliliği açısından fosil yakıtlara en büyük alternatif, yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Son yıllarda rüzgâr, güneş, biyokütle, ve jeotermal gibi doğal kaynaklarla elektrik enerjisi üretiminde önemli adımlar atılmaktadır.

Üretim kapasitesi açısından dünyada en fazla büyüyen enerji kaynağı rüzgâr enerjisi olup, 2011 yılı sonunda 236.733 MW olan dünya rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulu gücü, 2014 yılı sonunda 2011 yılına göre 1,5 kat artarak 370.000 MW olmuştur. 2013 yılı ile 2014 yılı arasında bir yıllık süreçte dünya genelinde rüzgâr enerjisi santrallerine 17.613 MW daha yeni kapasite eklenmiştir Şekil 1’de yıllara göre kurulu güç miktarı gösterilmiştir[5].



Şekil 1: 2011-2014 Yılları Arası Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücü [5]

Rüzgâr enerjisi, bu hızla gelişmeye devam eder ve daha fazla destek politikaları uygulanırsa, 2020 yılında dünya kurulu gücünün 1.500.000 MW’ı aşması mümkün olabilecektir [5]. Bu kurulu gücün ülkelere göre dağılımı Şekil 2’de gösterilmiştir.

En büyük kurulu kapasiteye sahip 12 ülke				
Position 2013	Country/Region	Total capacity end 2014 ** [MW]	Added capacity 2014 *** [MW]	Growth rate 2014 [%]
1	China	114'763	23'350,0	25,7
2	USA	65'879	4'854,0	7,8
3	Germany	40'468	5'808,0	16,8
4	Spain	22'987	27,5	0,1
5	India	22'465	2'315,1	11,5
6	United Kingdom	11'998	1'467,0	13,9
7	Canada	9'694	1'871,0	25,9
8	France	9'296	1'042,0	12,6
9	Italy	8'663	107,5	1,3
10	Brazil	6'182	2'783,0	81,9
11	Sweden	5'425	1'050,0	21,4
12	Denmark *	4'850	78,0	1,6
	Rest of the World	47'300	7'000 (estimated)	16,0
	Total	370'000	51'753	16,2

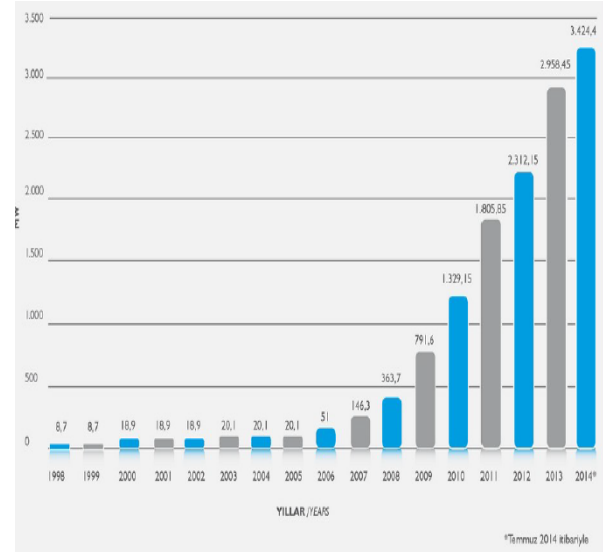
* by november 2014
** Includes all installed wind capacity, connected and not-connected to the grid.
*** Includes the net capacity added during the year 2014.
Kaynak: WWEA

Şekil 2: Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücünün Ülkelere Göre Dağılımı [5]

Avrupa Birliği Komisyonu, 2007 yılında “Yenilenebilir Enerji Yol Haritası” adlı raporunda yenilenebilir enerjinin var olan toplam enerjideki payının 2020 yılında %20 olması hedefini ortaya koymuştur. Ayrıca, toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %35’ini, ısı ihtiyacının %25’ini ve ulaşımın %10’unu yenilenebilir kaynaklardan sağlamayı ana hedef olarak belirlemiştir [6].

Türkiye, rüzgâr potansiyeli bakımından oldukça avantajlı bir ülkedir. Türkiye’de rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi konusunda ilk sistem 1985 yılında Danimarka’dan ithal edilip İzmir-Çeşme Altinyunus Turistik tesislerinde kurulan 55 kW gücündeki rüzgâr türbini. Üç kanatlı yatay eksenli bu türbinden üretilen elektrik enerjisi adı geçen tesiste tüketilmektedir [7].

Türkiye’de halen şebeke bağlantılı yüz onbir (111) rüzgâr santrali vardır. Bu santrallerin toplam gücü 3424,24 MW’tır. Türkiye’de 1998-2014 yılları arası kurulu gücü Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekilden gösterildiği gibi Türkiye 1998 yılında kurulu güç olan 8,7 MW rüzgâr gücü 2014 yılı itibarıyla 370 kat artarak 3424 MW seviyesine gelmiştir[8]. Kasım 2015 tarihi itibarıyla önceki yıla göre 800 MW kapasite artışı ile Türkiye’deki kurulu güç kapasitesi 4280 MW seviyesine gelmiştir.



Şekil 3: 1998-2014 Yılları Arası Türkiye Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücü [8]

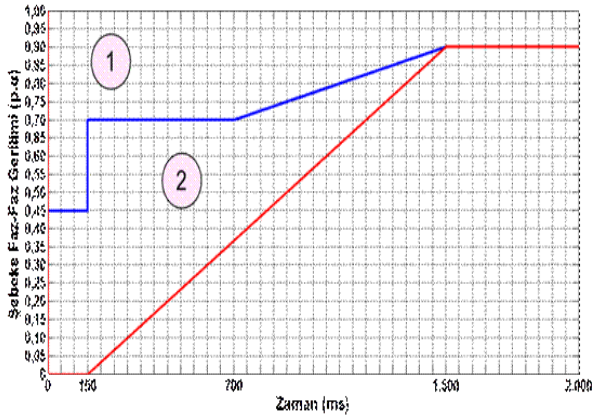
Dünya’da ve Türkiye’de hızla artan güç miktarı kapasitesiyle rüzgâr enerjisi elektrik şebekesine entegre olmaktadır. Ülkemizde, iletim sisteminin güvenilir ve düşük maliyetli olarak işletilmesinde ve enerji kalitesi ile sistem kararlılığının sağlanmasında uygulanacak standartlara ilişkin usul ve esasları belirlemek amacıyla Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği mevcuttur. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK), rüzgâr santrallerinin, hidrolik ve termik santrallerden farklı bir karakteristiğe sahip olması nedeniyle rüzgâr santrallerinin şebeke bağlantısı sırasında uyması gereken kriterleri ayrıca belirtmektedir[9]. Bu amaçla bu çalışmada, Batı Akdeniz Bölgesinde bulunan Dinar Res’i elektrik güç kalitesi yönünden inceleme amaçlı örnek santral olarak belirlenmiştir. Santralin PSS/E programı ile modellenmesi yapılarak yük akış ve kısa devre akım analizleri incelenmiştir.

2. Rüzgâr Enerjisi Santralleri Enerji Kalitesi ve İletim Şebekesine Bağlantı Esasları

Büyük güçlerdeki rüzgâr gücünün şebekeye entegrasyonu çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Güç sistemleri ve onların işletilmeleri senkron jeneratörlü konvansiyonel güç santrallerine göre geliştirilmiştir. Rüzgâr santralleri konvansiyonel santrallardan farklıdır. Rüzgârın güç miktarı önemli olup şebeke performansını ve kararlılığını etkiler. Bu nedenle iletim sistem operatörleri rüzgâr santrallerinin hatta bağlanabilmesi için uyulması gereken çeşitli kurallar koyarlar.

Rüzgâr santrallerinin arıza sonrası sisteme yapması gereken katkı, aktif güç kontrolü, reaktif güç kontrolü, frekans tepkisi vs. gibi kriterler olup, Elektrik Piyasa Şebeke Yönetmeliği EK-18’de detaylı bir şekilde yer almaktadır. Bu kriterler, iletim sistemine bağlı rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri ile kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine bağlı rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerine uygulanır.

İletim veya dağıtım sistemi bağlantı noktasındaki şebeke faz-faz geriliminin Şekil 4’de verilen 1 numaralı ve 2 numaralı bölgelerde kaldığı süre boyunca, herhangi bir fazda veya tüm fazlarda oluşan gerilim düşümlerinde rüzgâr türbinleri şebekeye bağlı kalması zorunludur.



Şekil 4: İletim veya Dağıtım Sistemi Bağlantı Noktasındaki Şebeke Faz-Faz Gerilimi

Arıza sırasında gerilim düşümünün 1 numaralı bölgede kaldığı durumlarda, rüzgâr türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal aktif gücünün en az %20’si oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır [17].

Arıza sırasında gerilim düşümünün 2 numaralı bölgede kaldığı durumlarda ise, rüzgâr türbini aktif gücü, arıza temizlendikten hemen sonra saniyede nominal aktif gücünün en az %5’i oranında artırılarak, üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşmalıdır [17].

Şebeke bağlantı noktasında meydana gelen $\pm 10\%$ ’a kadar olan nominal işletme gerilimi dalgalanmaları (0,9pu-1,1pu) normal işletme koşulları olup, rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri belirtilen esaslara uymalıdır [17].

EPDK’nın rüzgâr santrallerinin kurulum güçlerini sınırlayan bağlantı noktasının kısa devre gücünün %5’ini aşmaması koşulu, her bağlantı noktasının karakteristiğine göre artırılabilir. Ayrıca, bir rüzgâr santralının şebekeye en uygun şekilde enterkonnekte olabilmesi için, istenmeyen gerilim değişimlerinin önlenmesi, mevcut şebeke elemanlarının kısa devre akım limitlerini ve ısı dayanım kapasitelerini zorlamaması gerekir. Buna ek olarak, fliker ve harmoniğin kabul edilebilir sınırlar içinde olması, anahtarlama ve anlık devreye girme gibi geçici durumlarda şebeke kararlılığının sınır değerler içinde kalması gereklidir [10].

Enerji kalite parametrelerinden biri olan rüzgâr santrallerinin kısa devre arızası durumunda vereceği tepkiler, sistem kararlılığı için oldukça önemlidir. Rüzgâr santrallerinin sistem kararlılığına gerekli desteği sağlayabilmeleri için kısa devre arızası durumunda, arıza giderilene kadar belirli bir süre boyunca sistemden ayrılması gerekmektedir. Rüzgâr santral kurulu gücünün sürekli artması, konvansiyonel santraller ile oluşturulan yedek generatörlerin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Bu sorunu gidermek için generatörlerin teknik yetenekleri artırılmalı, yedek konvansiyonel santrallerin çok daha hızlı ve yüksek kapasitede (kısa tepki süreli ve üretim düzeyi yüksek) devreye alınmaları sağlanmalıdır. Üretim dalgalanmalarını dengelemek ve yük eğrisini izlemek amacıyla yeterli yedek konvansiyonel santral bulundurulmalıdır [11].

Rüzgâr enerjisi santrallerinin iletim şebekesine bağlanma şartları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İletim şebekesine bağlanacak bir rüzgâr santrali, ya en yakın TEİAŞ trafo merkezine çekilecek bir iletim hattı ile, ya da en yakın iletim hattına girdi çıktı yaparak şebekeye bağlanabilir.
- İletim şebekesinin gerilim seviyesi 154 veya 380 kV’dır. Bu gerilimdeki trafo merkezlerinin minimum kısa devre güçleri 300-400 MVA’dan başlamakta, 10.000 MVA’e kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle büyük güçteki rüzgâr santralleri ancak iletim şebekesine bağlanabilir.
- Dağıtım sistemine bağlanacak bir rüzgâr çiftliğindeki elektrik bağlantılarının gerilim seviyesi, tercihen bağlanacakları trafo merkezinin gerilim seviyesinde seçilmektedir. Bu durumda santral çıkışına ilave bir yükseltici (veya düşürücü) trafo tesis maliyeti olmamaktadır.
- İletim şebekesine bağlanacak rüzgâr santrallerinde ise gerilim seviyesi olarak en ekonomik dağıtım gerilim seviyesi seçilebilir. Bu durumda, santral çıkışında kullanılacak yükseltici trafonun, ülkemizde kullanılan standartlardan farklı olması durumunda, yedekleme sorunu ortaya çıkabilir.
- Rüzgâr santrallerinin iletim şebekesine bağlanmasının diğer bir şekli ise, kısa devre gücünün oldukça yüksek olduğu 380 kV merkeze bağlanmasıdır. Ülkemizdeki 380 kV merkezlerin minimum kısa devre gücü genelde 5000 MVA’nın üzerinde olduğundan böyle bir merkeze çok sayıda rüzgâr santrali, şebekede probleme sebep olmadan bağlanabilir [12].

Burada önemli olan, çok sayıda trafo maliyetinden tasarruf etmek için, gerektiğinde sadece rüzgâr santrallerinin bağlanacağı bir kirli bara tesis ederek en ekonomik çözümün bulunmasıdır.

3. Dinar Res'in Dinamik Olarak PSS/E ile Modellenmesi

Bu çalışmada PSS/E programı ile yük akış analizi ve kısa devre analizi yapılmıştır. PSS/E programı dünyadaki bir çok elektrik şirketi yanında TEİAŞ tarafından da iletim sisteminin planlaması ve işletilmesi için yapılan etüt çalışmalarında kullanılmaktadır. PSS/E programıyla iletim sisteminin ve üretim performansının etütleriyle ilgili olarak sürekli durum ve dinamik analizleri gerçekleştirmek mümkündür. Bunlar;

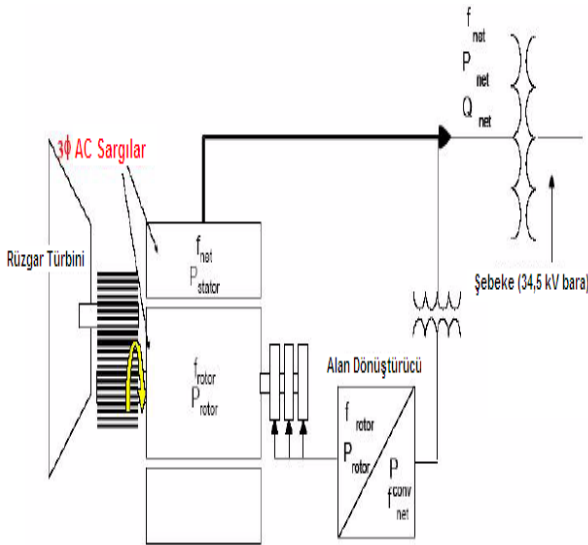
- Yük akış analizi
- Kısa devre analizi
- N-1 kriteri analizi
- Dengeli ve dengesiz arıza analizi
- PV/QV analizleri
- Dinamik simülasyon

olarak sıralanabilir [13].

Kullanımda olan 4 tip rüzgâr türbini (RT) modeli:

- RT 1- Doğrudan bağlı (sabit hızlı) asenkron generatörler
- RT 2- Kademeli değişen rüzgâr türbinleri (harici rotor direnç kontrollü)
- RT 3- Çift beslemeli asenkron generatör
- RT 4- Tam kapasiteli dönüştürücülü rüzgâr generatör türbini

Söz konusu sınıflama esas alınarak PSS/E programının güncel versiyonunda (ver.33), piyasada en yaygın kullanılan rotor bağlantı uçlarına bağlı güç dönüştürücü ile aktif gücün kontrol edildiği çift beslemeli asenkron generatör kullanılarak bir rüzgâr türbininin performansını simüle etmek ve iletim/dağıtım sisteminde RES bağlantısının gerçekleştirilmesi için RT3 (çift beslemeli asenkron generatör) PSS/E rüzgâr türbin modeli geliştirilmiştir. PSS/E programında geliştirilen rüzgâr modeli genel şeması Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5: Rotor Bağlantı Uçlarına Bağlı Güç Dönüştürücü ile Aktif Gücün Kontrol Edildiği Çift Beslemeli Asenkron Generatör

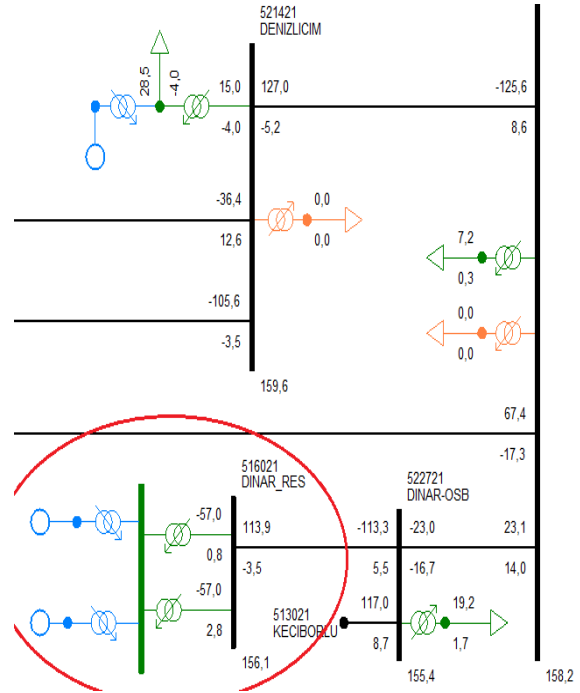
Bu model, elektrik iletim ve dağıtım sisteminde RES'lerin bağlantısıyla ilgili çalışmalarda kullanılmak için geliştirilmiş olup bu çalışmada yük akış ve kısa devre akım analizlerinde kullanılmıştır.

3.1. Dinar RES'in Yük Akış Analizleri

Mevcut çalışmada esas alınan Dinar RES ve Türkiye'de kullanılan tüm RES'ler (ilk kurulan birkaç tane hariç) çift beslemeli asenkron generatör tipinde olduğundan analizlerde bu model kullanılmıştır.

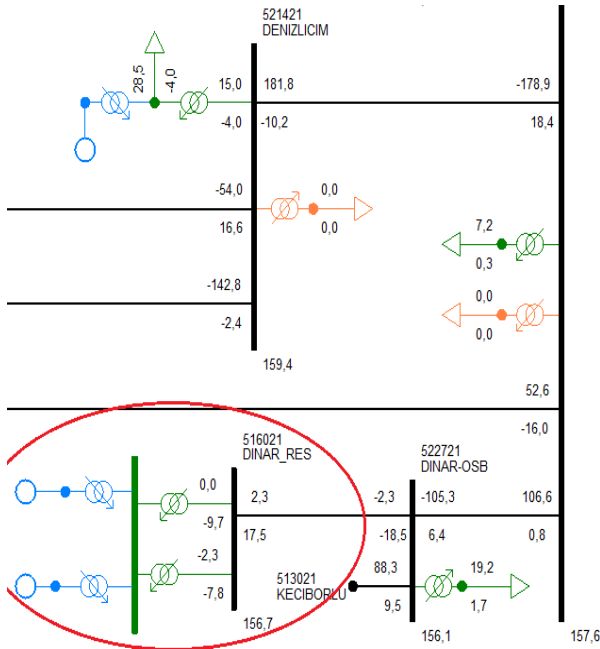
Dinar RES 50x2,3 olmak üzere toplamda 50 ünitenin olduğu 115 MW kurulu güce sahip bir rüzgâr enerjisi santralidir. Üretilen enerji 154 kV enterkonnekte sisteme verilmektedir. Santral 14,8 km 795 MCM kesitli 154 kV tek hatla Dinar OSB TM'ye bağlıdır. Santralda iki adet 154/33,6 kV 50/62,5 MVA trafo bulunmaktadır.

Dinar RES'in 50 adet 2,3 MW generatörden oluşan rüzgâr parkı PSS/E'de modellenmiştir. Buna bağlı Dinar RES'in 115 MW (anma gücü) ve 2,3 MW üretim yaptığı durumlara ilişkin olarak Newton-Raphson yöntemine göre yük akış analizleri yapılarak sistem bağlantı noktasında sisteme verilen aktif güç ve reaktif güç değerleri belirlenmiştir. Yapılan yük akış analizleri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6: Dinar RES'in 115 MW Üretim Yaptığı Durumu

Yapılan yük akış analizlerinde Dinar RES tam yükte iken radyal bağlı olduğu Dinar OSB hattına tam yükte 113 MW aktif güç göndermekte 3,5 MVar (endüktif) reaktif yük çekmektedir. Tek grup çalışma durumunda yapılan analizde 2,3 MW aktif güç ve 17,5 MVar (kapasitif) reaktif yük göndermektedir.



Şekil 7: Dinar RES'in 2,3 MW Üretim Yaptığı Durumu

3.2. Dinar RES'in Kısa Devre Akım Analizi

Enerji sisteminde yıldırım düşmesi, açma kapama olayları, mekanik hatalar, buz yükü, toprak kayması, deprem, kuş, haşarat, nem, kir ve benzer sebebi ile meydana gelen aşırı gerilimler, üzerinde gerilim bulunan sistem parçalarını elektriksiz olarak zorlar. Zorlama, gerilim yalıtım seviyesini aşarsa kısa devre oluşur. Kısa devre akımının değeri, hata noktasından sistemi besleyen kaynağa doğru bakıldığında görülen Thevenin eşdeğer devresi tarafından belirlenerek, hesaplanır [14].

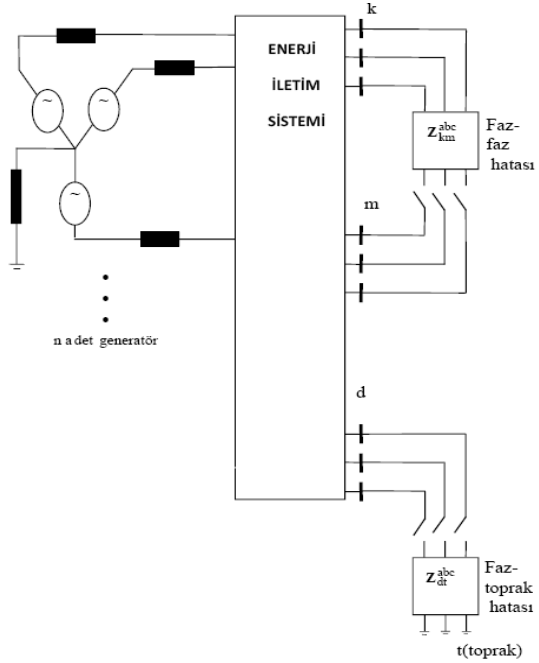
Kısa devre olayları dengeli ve dengesiz kısa devre olarak iki şekilde incelenir. Hata öncesi hat akımları birbirine eşit olan bir sistemde, hatadan sonra da hat akımları genlik olarak birbirlerine eşit değer alıyorsa, oluşan hata türü dengeli kısa devre olarak isimlendirilir [15].

Hata esnasında sistemde dolaşan akımların fazlara göre genliklerinin değişmemesi nedeniyle simetrik hata olarak isimlendirilirken, hata akımlarının genliklerinin fazlara göre değişenleri ise simetrik olmayan olarak adlandırılmaktadır. Simetrik olmayan hatanın incelenmesinde ise dengesiz akım ve gerilim değerlerinden dolayı, sisteme ilişkin ters ve sıfır bileşen devre bara empedans ve admittans matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır [16].

Büyük boyutlu veya çok devreli enerji sistemlerine ilişkin kısa devre hesaplamalarında sistemin doğru, ters ve sıfır bara empedans ile bara admittans matrislerinin oluşturulması gerekir. Bara empedans matrisi [Z_{bara}] oluşturulması için ise iki ayrı yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşımda tüm sisteme ilişkin bara admittans matrisi [Y_{bara}] oluşturularak, bunun tersi [Z_{bara}] elde edilmektedir. İkincisinde ise adım adım [Z_{bara}] oluşturularak, [Y_{bara}] matrisine gerek duyulmamaktadır [16].

Dengeli hatalarda sisteme ilişkin empedansların doğru bileşen değeri kullanılırken, Şekil 8'de enerji sistemine ilişkin genel hata modeli gösterimi bulunmaktadır. Hata öncesi sistem den-

geli olduğu için doğru, ters ve sıfır bileşen devreler arasında kupaş bulunmamakta olup, dolayısıyla bu devrelere ilişkin I_1 , I_2 ve I_0 akımları da sıfırdır [16].



Şekil 8: Enerji Sistemi Hata Modeli Gösterimi

Söz konusu santralde iki adet 154/33,6 kV 50/62,5 MVA trafo bulunmakta olup radyal olarak bağlı olduğu trafo merkezinin 154 kV ve 31,5 kV baralarının kısa devre akım analizi yapılmıştır.

Dinar Res ve Dinar OSB için yapılan en ağır koşul olan 3 faz kısa devre analizini Dinar RES anma gücü olan 115 MW ve servisi harici (üretim yapılmadığı zamanda) PSS/E programında *sequence* data kullanılarak analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarının program çıktıları Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.

X----- BUS -----X X----- TO BUS -----XCKT	THREE PHASE FAULT	/I+/	AN(I+)
516021 [DINAR_RES 154.00]	AMP	3452.3	-72.96
516021 [DINAR_RES 154.00] 516041 [DINAR_RES1 33.600] 1	OUT AMP	3220.0	-75.99
516021 [DINAR_RES 154.00] 516042 [DINAR_RES2 33.600] 1	OUT AMP	3227.4	-76.01
516021 [DINAR_RES 154.00] 522721 [DINAR-OSB 154.00] 1	OUT AMP	578.3	-36.72
516041 [DINAR_RES1 33.600]	AMP	6311.4	-70.99
516041 [DINAR_RES1 33.600] 516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	1645.4	-37.78
516041 [DINAR_RES1 33.600] 516061 [G-DINAR_RES 0.6600] 1	OUT AMP	5016.4	-81.34
516042 [DINAR_RES2 33.600]	AMP	6281.5	-70.93
516042 [DINAR_RES2 33.600] 516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	1616.7	-36.69
516042 [DINAR_RES2 33.600] 516062 [G-DINAR_RES 0.6600] 1	OUT AMP	5028.0	-81.36
522721 [DINAR-OSB 154.00]	AMP	4171.5	-74.07
522721 [DINAR-OSB 154.00] 513021 [KEÇİBORLU 154.00] 1	OUT AMP	3058.4	-67.94
522721 [DINAR-OSB 154.00] 516021 [DINAR_RES 154.00] 1	OUT AMP	3740.7	-79.35
522721 [DINAR-OSB 154.00] 521621 [BOZKURT 154.00] 1	OUT AMP	1599.9	-73.71
522721 [DINAR-OSB 154.00] 522741 [DINAR-OSB 31.500] 1	OUT AMP	4171.5	-74.07
522741 [DINAR-OSB 31.500]	AMP	5634.1	-78.77
522741 [DINAR-OSB 31.500] 522721 [DINAR-OSB 154.00] 1	OUT AMP	0.0	0.00

Şekil 9: Dinar RES 115 MW Üretim Yaptığı Durumda Dinar RES ve Dinar OSB TM 3 Faz Kısa Devre Akımları Sonuçları

X----- BUS -----X X----- TO BUS -----XCKT		THREE PHASE FAULT		/I+ /	AN(I+)
516021	[DINAR_RES 154.00]			AMP	3007.1 -82.85
516021	[DINAR_RES 154.00]	516041	[DINAR_RES1 33.600]	1 OUT AMP	3007.1 -82.85
516021	[DINAR_RES 154.00]	516042	[DINAR_RES2 33.600]	1 OUT AMP	3007.1 -82.85
516021	[DINAR_RES 154.00]	522721	[DINAR_OSB 154.00]	1 OUT AMP	0.0 0.00
516041	[DINAR_RES1 33.600]			AMP	4889.4 -88.61
516041	[DINAR_RES1 33.600]	516021	[DINAR_RES 154.00]	1 OUT AMP	0.0 0.00
516042	[DINAR_RES2 33.600]			AMP	4889.4 -88.61
516042	[DINAR_RES2 33.600]	516021	[DINAR_RES 154.00]	1 OUT AMP	0.0 0.00
522721	[DINAR_OSB 154.00]			AMP	3743.1 -82.70
522721	[DINAR_OSB 154.00]	513021	[KECIBORLU 154.00]	1 OUT AMP	2602.4 -77.21
522721	[DINAR_OSB 154.00]	516021	[DINAR_RES 154.00]	1 OUT AMP	3743.1 -82.70
522721	[DINAR_OSB 154.00]	521621	[BOZKURT 154.00]	1 OUT AMP	1203.3 -94.94
522721	[DINAR_OSB 154.00]	522741	[DINAR_OSB 31.500]	1 OUT AMP	3743.1 -82.70
522741	[DINAR_OSB 31.500]			AMP	5423.9 -88.00
522741	[DINAR_OSB 31.500]	522721	[DINAR_OSB 154.00]	1 OUT AMP	0.0 0.00

Şekil 10: Dinar RES Servis Harici Durumunda Dinar RES ve Dinar OSB TM 3 Faz Kısa Devre Akımları Sonuçları

Yapılan kısa devre analizlerde 154 kV merkezler olan Dinar RES ve Dinar OSB trafo merkezlerinin Dinar RES tam yükte ve servis harici olma durumunda 3 faz kısa devre akımları 154 kV ve 31,5 kV bara için elde edilmiştir.

Analiz sonuçlarının TEİAŞ Elektrik Şebeke Yönetmeliği'ndeki sınır baz değerlerine uygun olduğu görülmektedir.

4. Bulguların Değerlendirmesi

Bu çalışmada, yük akış ve kısa devre akım analizleri yapılmıştır.

Elde edilen yük akış analizleri incelendiğinde rüzgâr enerjisi santrallerinin diğer (hidrolik, termik vb.) santral tiplerine benzer şekilde çalıştığı gerek aktif gerekse reaktif güç akışından görülmektedir.

Dinar RES rüzgâr 115 MW üretim yapıldığında, rüzgâr parkı (Dinar RES OG, 516061) ile 154 kV şalt sahası (Dinar RES, 516021) arasındaki orta gerilim kablosundan çekilen kapasitif güç 3,5 MVar'dır (Şekil 7). Bu durumda güç faktörü ($\cos\phi$)=1 olmaktadır. Dinar RES rüzgâr parkında 2,3 MW üretim yapıldığında, rüzgâr ile 154 kV şalt sahası arasındaki orta gerilim kablosundan çekilen kapasitif güç 17,5'dir (Şekil 8). Bu durumda güç faktörü ($\cos\phi$) 0,18 (kapasitif) olmaktadır.

Rüzgâr üretilen gücün düşük olduğu durumlarda rüzgâr ile şalt sahası arasındaki Orta Gerilim (OG) kablolarının kapasitif etkisinin baskın duruma geldiği analiz sonuçlarında görülmüştür. Bu nedenle, güç faktörünü düzeltmek amacıyla öngörülecek kompanzasyon tesisinin rüzgâr parkının içine değil Sistem Bağlantı Noktası'nda (SBN) tesis edilmesi daha uygun olacaktır.

115 MW kurulu güçteki Dinar RES'in sisteme bağlanması bu güçteki bir termik veya hidrolik santralin bağlanması sırasında oluşan etkiyi yaratmıştır. Yük dağılımında görüldüğü gibi tam yükte çalışırken yükün önemli kısmı Dinar Organize Sanayi Bölgesi (OSB) Trafo Merkezi (TM) üzerinden Keçiborlu

lu TM'ye aktığı için, tek grup (2,3 MW) yükte iken yine tam yükteki gücünü %80 oranında Dinar OSB üzerinden Keçiborlu TM'ye aktığı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi Dinar RES radyal bağlı olduğu Dinar OSB TM'nin yük akışını değiştirmekte diğer TM'lerin yük akışında büyük farklara sebep olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan diğer bir analiz kısa devre analizidir. Dinar RES'in tam yükte (115 MW) ve servis harici (0 MW) olma durumunda Dinar RES TM ve Dinar OSB TM'nin TEİAŞ'ın belirlediği 154 kV ve 31,5 kV baralardaki kısa devre akım değerlerinin dışında olmadığı görülmektedir. Bu durumda böyle bir rüzgâr enerjisi santrali enterkonnekte sisteme dahil olduğunda herhangi bir kısa devre arıza durumu sorun çıkmadan arızanın sönümleştirebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1: Dinar RES Tam Yükte (115 MW) Çalışırken Dinar RES ve Dinar OSB TM 3 Faz Kısa Devre Akımları

Trafo Merkezi	Gerilim Seviyesi (kV)	Sistem Kısa Devre Sınır Akım Değeri (kA)	Hesaplanan Kısa Devre Değeri (kA)
Dinar RES	154	31,5	3,452
Dinar RES1_OG	33,6	25	6,311
Dinar RES2_OG	33,6	25	6,281
Dinar OSB	154	31,5	4,171
Dinar OSB_OG	31,5	16	5,634

Tablo 2: Dinar RES Servis Harici (0 MW) Durumunda Dinar RES ve Dinar OSB TM 3 Faz Kısa Devre Akımları

Trafo Merkezi	Gerilim Seviyesi (kV)	Sistem Kısa Devre Sınır Akım Değeri (kA)	Hesaplanan Kısa Devre Değeri (kA)
Dinar RES	154	31,5	3,007
Dinar RES1_OG	33,6	25	4,889
Dinar RES2_OG	33,6	25	4,889
Dinar OSB	154	31,5	3,743
Dinar OSB_OG	31,5	16	5,423

Tablo 1 ve Tablo 2'de değerler incelendiğinde Dinar RES aktif durumda iken her iki TM'nin 3 faz kısa devre değerleri servis harici olma durumuna göre daha yüksektir. olduğu bu değerler yönetmeliğin sınır değerleri olan 154 kV için 31,5 kA ve 31,5 kV için 16 kA olan sınır değerleridir. Dinar RES'in bağlı olduğu 33,6 kV bara sisteme bağlantı konusunda en önemli değeri teşkil etmekte bu değer 6,311 kA olup belirtilen sınır değerinin çok altındadır.

5. Sonuçlar

Rüzgâr, yenilenebilir enerji kaynağı olması, genel olarak basit bir yapıda olması, elde edilen verimin yüksek olması, diğer santrallara göre çok kısa sürede kurulabilmesi gibi nedenlerle elekt-

rik enerjisi üretimindeki payı sürekli artmaktadır. Ancak, rüzgâr santrallerinin diğer konvansiyonel santrallardan farklı yapıda olması nedeniyle buldukları bölgelerde elektrik şebekesine bağlantıları sırasında güç kalitesi yönünden bazı sorunlar meydana gelmektedir. Bu sorunları giderebilmek amacıyla yapılan çalışmalar göstermektedir ki; doğruluk oranı yüksek rüzgâr tahminlerinin yapılması, uygun ve teknik kapasitesi yüksek generator seçimi, gerilim dalgalanmalarının en aza indirilmesi, harmonik ve flikerin belirlenen sınır değerler içinde tutulması, rüzgâr türbininin arıza ve arıza sonrası tepkilerinin ilgili kriterlere uyması, aktif ve reaktif gücün kontrolünün yapılması güç kalitesini artıran en önemli faktörlerdir.

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin enerji sistemi içinde yük olarak değil enerji santralleri olarak kabul edilerek dinamik tepkilerin incelenmesi yeni şebeke bağlantı koşullarının temelini oluşturmakta ve modellenmenin bu yaklaşımla oluşturulmasını da zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle ele alınan örnek rüzgâr santrali Dinar RES PSS/E programında modellenmiş yük akış analizleri ve kısa devre analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde sistem davranışları önceden kestirilebildiği ve buna göre planlama yapılabileceği görülmüştür.

Dinar RES'in 115 MW anma gücünde ve 2,3MW gibi oldukça düşük güçte üretim yaptığı durumlara ilişkin yük akışı analizlerinden sisteme verilen aktif ve reaktif güç değerleri bulunmuştur. Buna göre;

- 115 MW üretim yapıldığında rüzgâr ile 154 kV şalt sahası arasındaki OG kablosundan çekilen kapasitif güç 3,5 MVar, güç faktörü ise yaklaşık 1 olmaktadır.
- 2,3 MW üretim yapılması durumunda ise çekilen güç 17,5 Mvar, güç faktörü 0,18 kapasitif olmuştur. Yani üretim çok düşük olduğunda, kablonun kapasitif etkisi baskın olmaktadır.
- 115 MW güçteki Dinar RES'in sisteme bağlanması bu güçteki bir termik veya hidrolik santralin bağlanması sırasında oluşan yük akışı aynı olmuştur.
- PSS/E ile modellenen sistemde 154 kV Dinar RES ve Dinar OSB baraları ile 34,5 kV Dinar RES ve Dinar OSB OG baralarında yapılan kısa devre analizlerinde bulunan kısa devre akım değerlerinin, sistem sınır değerlerinin altında olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmada, Türkiye elektrik iletim sistemine entegre olmuş büyük güçteki bir rüzgâr santralının PSS/E ile modellenmesi ile yük akış ve kısa devre simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar örnek uygulamanın uygun bir modelleme olduğu ve gelecekte sisteme entegre edilecek rüzgâr enerjisi santralleri için örnek bir çalışma olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] Ackermann, T., Söder, L., "Wind Energy Technology and Surrent Status: a Review" Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 4, pp. 315-374, 2000.
- [2] Ackerman, T., and Söder, L., An overview of wind energy status 2002, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 6, pp 67-128, Pergamon Press, 2002.
- [3] Heier, S., translated Waddington, R., Grid integration of wind energy conversion systems, John Wiley&Sons, ABD, 1998.
- [4] Kocaman, M. 2010. Rüzgâr Enerjisi Santrallerinin Türkiye Elektrik Sistemine Olan Etkilerinin Analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [5] World Wind Energy Report 2015, www.wwindea.org (World Wind Energy Association).
- [6] Dunder, P. "Daha İyi Rüzgâr Türbinleri", Tübitak Bilim ve Teknoloji Haberleri, www.biltek.tubitak.gov.tr
- [7] Özaktürk, M., "Rüzgar Enerjisinin Güç Kalitesi Açısından İncelenmesi", Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2007.
- [8] Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu Temmuz 2014 www.tureb.com.tr s. 7.
- [9] Güç Kalitesi Milli Projesi, www.guckalitesi.gen.tr
- [10] Akdeniz E., "Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin şebekenin enerji kalitesi ve kararlılığı üzerine etkilerinin incelenmesi", Yüksek lisans tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [11] Rajveer Mittal, "Low Voltage Ride-Through (LVRT) of Grid Interfaced Wind Driven PMSG" ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 4, No. 5, p.73-83, July 2009.
- [12] Arsan, F., 2001. Şebeke Bağlantı Yöntemleri, Rüzgâr Enerjisi Sempozyumu 2001 s. 143-147.
- [13] w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/pages/pss-e.aspx
- [14] Saner, Y., Güç Dağıtım Kısa Devre Hesapları, 4(1), 41-48, 2000.
- [15] Hewitson L.G., Brown M., Balakrishnan R., Simple calculation of short-circuit currents, Practical Power System Protection, 4, 11-25, 2005.
- [16] Kaşıkçı, İ., Elektrik Tesislerinde Kısa Devre Hesapları ve Uygulamaları IEC 60909, 27-39, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [17] http://www3.epdk.org.tr/index.php/elektrik piyasasi/mevzuat?id=1533/07.05.2015, Syf 173-175.



Halil İbrahim Aydınöz

1987 yılında Diyarbakır'da doğdu. 2009 yılında Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesi aldı. 2014 yılında Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans derecesi aldı. 2014 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Ana Bilim Dalı'nda doktora programına başladı ve halen devam etmektedir. 2010-2011 yılları arası Batman Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2011 yılından bu yana TEİAŞ Batı Akdeniz Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü'nde mühendis olarak çalışmaktadır. Araştırma alanları yenilenebilir enerji sistemleri, asenkron makineler, sürücü sistemleri, güç kalitesi ve optimizasyonu ve ekserji.



Orhan Ekren

İzmir'de doğdu. 1999 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesi aldı. 2003 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Mühendisliği programından yüksek lisans derecesini aldı. 2009 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Termodinamik programından doktora derecesi aldı. 2000-2003 yılları arasında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. Dr. Ekren 2008-2011 yılları arasında Amerika'da misafir akademisyen olarak bulundu. 2014 yılından bu yana Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde öğretim üyesi görevinde bulunmaktadır. Çalışma alanları; yenilenebilir enerji kaynakları, hibrit enerji sistemlerinin boyutlandırılması ve optimizasyonu, soğutma sistemlerinde enerji verimliliği, ısı pompaları ve alternatif soğutma metotları.