

RÜZGAR TÜRBİNLERİ VE ÇİFTLİKLERİ İÇİN ÜÇ BOYUTLU TOPRAKLAMA AĞI TASARIMI

Semih Günden¹, Ayтуğ Font¹, Özcan Kalenderli¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Maslak, İstanbul
semih.gunden@gmail.com, font@itu.edu.tr, kalenderli@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, CYMGRD yazılımı kullanarak rüzgar türbini çiftlikleri için üç boyutlu topraklama tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği ve IEEE 80-2000 standardına uygunluğa dikkat edilmiştir. Topraklama sistemi tasarımı farklı toprak özdirenç değerleri için incelenerek bazı durumlarda tasarımda topraklayıcı şekil ve boyutlar değiştirilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen toprak özdirenç değeri kullanılarak ilk önce tekil türbinler için iki farklı tasarım yapılmıştır. Tekil sistem için uygun tasarım belirlendikten sonra seçilmiş tasarım, çok türbinli rüzgar çiftliklerine uygulanmış, topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimindeki değişimler hesaplanmıştır. Yapılan dört farklı tasarımın karşılaştırması yapılmış ve topraklama sistemindeki türbin sayısının topraklamanın kalitesine olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbinleri, Topraklama, Topraklama direnci, Adım gerilimi, CYMGRD

1. Giriş

Artan dünya nüfusuyla birlikte enerji ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi devam etmektedir. Genellikle yüksek yerlere kurulan rüzgar türbinleri ve çiftliklerinin sayısı giderek artmaktadır. Yüksek alanlara kurulan rüzgar türbinlerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri yıldırım çarpma riskidir. Rüzgar türbinlerine isabet eden yıldırım akımları kanatlar, rotor ve türbin kulesi üzerinden akmaktadır. Rüzgar türbinlerinde arıza veya yıldırım darbesi sonucu oluşan tehlikeli gerilimlerin türbin bileşenleri ve canlılara zarar vermesini engellemek adına topraklama sistemi tasarımları yapılır [1, 2].

Topraklama sistemi analizinde topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimleri önemli bileşenlerdir. Ulusal topraklama yönetmeliği [3] ve IEEE 80-2000 standardına [4] göre topraklama tasarımı içinde aranacak koşullardan biri adım ve dokunma gerilimlerinin izin verilen değerlerden küçük olmasıdır. Topraklama direnci ise yine belirtilen değerden küçük olmalıdır. Böylece arıza akımı kolayca dağıtılabilir.

Topraklama sistemi tasarlanırken kullanılan deneyime dayalı formüller doğruluk ve süre açısından yetersiz kalmaktadır. Günümüzde kullanılan kompleks

yapılı topraklama sistemlerinde bu yetersizlikleri gidermek için bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır [5-7]. Kullanılan bilgisayar yazılımları sayesinde gerçeğe uygun üç boyutlu modeller üzerinde çalışılabilmektedir [8]. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapan CYMGDR topraklama hesaplama yazılımı kullanılmıştır [9]. Farklı tabakalı toprak modellerinde uygun tabaka özdirenç ve kalınlıkları belirlenmiştir. Farklı geometrik şekilli topraklama sistemi tasarlanarak CYMGRD yazılımında topraklama dirençleri, toprak potansiyel yükselmesi, adım ve dokunma gerilimleri hesaplanmıştır. Son olarak rüzgar türbinlerinin topraklama ağları birbirlerine bağlanarak rüzgar çiftliklerinin adım ve dokunma gerilimleri incelenmiştir.

2. Topraklama Hesabı

CYMGRD yazılımı güvenlik değerlendirmelerini IEEE 80-2000 standardında yer alan formüllere göre yapmaktadır. Bunlar adım ve dokunma gerilimleridir. Bu standarda göre 50 kg ve 70 kg vücut ağırlıkları için maksimum adım ve dokunma gerilimleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır [4]:

50 kg vücut ağırlığı için dokunma gerilimi

$$E_{dokunma-50} = \frac{(1000 + 1.5C_s\rho_s)0.116}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-50} = \frac{(1000 + 6C_s\rho_s)0.116}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

70 kg vücut ağırlığı için dokunma gerilimi

$$E_{dokunma-70} = \frac{(1000 + 1.5C_s\rho_s)0.157}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-70} = \frac{(1000 + 6C_s\rho_s)0.157}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

Bu denklemlerde, t arıza süresi, ρ_s yüzey malzemesinin özdirenç ve C_s yüzey tabakasının azaltma katsayısıdır [4]. C_s katsayısı; h_s kalınlığındaki ve ρ özdirençli, yüksek dirençli yüzey malzemesinin altındaki toprak için:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (5)$$

3. Rüzgar Türbinleri Topraklama Sisteminin Üç Boyutlu Tasarımı

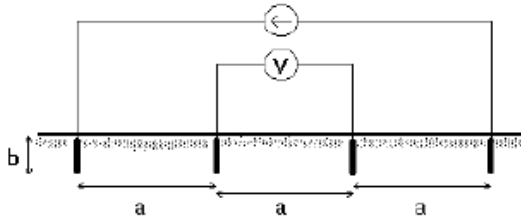
Bu bölümde CYMGRD yazılımı sayesinde rüzgar türbinleri topraklama tasarımı incelenmiştir. Yazılım bir veya iki tabakadan oluşan topraklarda, topraklama ağlarının analizini yaparak IEEE 80-2000 standartına göre adım ve dokunma gerilimlerini hesaplar [4].

CYMGRD yazılımı [9] ile topraklama tasarımı yapılmadan önce M. I. Lorentzou ve diğerlerinin çalışması dikkate alınmıştır [1]. Bu çalışmaya göre tasarım yapılırken izlenecek metodoloji belirlenmiştir.

Bu metodolojiye göre ilk önce topraklama alanının özdirenci ölçümlerle hesaplanır. Daha sonra rüzgar türbini baralarında oluşabilecek tek fazlı kısa devre akımı hesaplanır ve bu akıma göre izin verilen maksimum adım ve dokunma gerilimleri bulunur. Tek bir rüzgar türbininin topraklama tasarımı yapılır ve topraklama direnci ile bir kişinin tehlikeye maruz kalabileceği toprak yüzeyindeki adım ve dokunma gerilimlerinin hesaplanır.

3.1. Toprak Özdirenci Ölçümü ve Toprak Katmanlarının Modellenmesi

Topraklama alanının özdirenci ölçümleri Wenner dört kazık yöntemine göre yapılmıştır. Şekil 1’de Wenner yönteminin prensibi görülmektedir [3, 4].



Şekil 1: Wenner dört kazık yöntemi.

Özdirenci ölçülecek toprak üzerinde dört adet elektrot eşit aralıklarla istenilen derinliğe saplanır. En dıştaki elektrotlara akım uygulanır ve içteki elektrotlar arasında oluşan potansiyel farkı bir voltmetre ile ölçülür. Bu ölçüm değerlerinden denklem (6) yardımıyla toprağın özdirenci her derinlik için hesaplanır [3, 4].

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{V}{I}\right)}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right]} \quad (6)$$

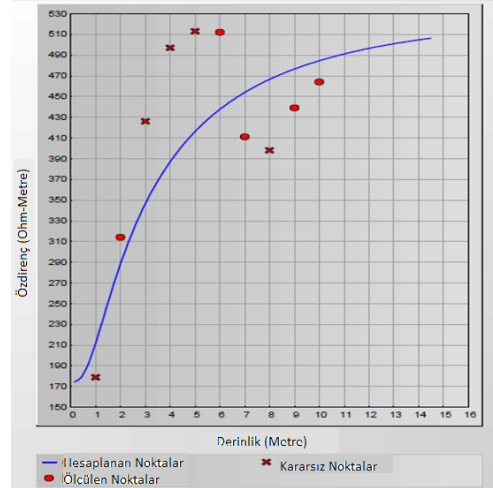
Bu denklemde a elektrotlar arası uzaklık, b elektrotların boyu, I uygulanan akım ve V oluşan gerilimdir. Bu denklem ile 10 farklı a ve b = 2,5 m için ölçülen V, I değerleriyle hesaplanan toprak özdirenci değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu değerler söz konusu programa girildiğinde istenen toprak modeline göre tabaka kalınlıkları ve bu tabakaların özdirençleri belirlenir. M. I. Lorentzou [1] çalışmasında da belirtildiği gibi gerçek toprak modeline en yakın kabul edilen model iki tabakalı

toprak modeli olduğu için hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

Tablo 1: Hesaplanan toprak özdirenci değerleri

Ölçüm Sırası	Açıklık, a (m)	Özdirenci ρ ($\Omega \cdot m$)
1	1	178,7
2	2	314
3	3	426
4	4	497
5	5	513
6	6	512
7	7	411
8	8	398
9	9	439
10	10	464
Ortalama		415,27

Şekil 2’de farklı elektrot açıklıkları için hesaplanmış toprak özdirençlerinin topraklama yazılımına girilmiş hali görülmektedir. Yazılım bu değerlerden yanlış ölçüm nedeniyle oluşan kararsız noktaları atarak derinliğe bağlı toprak özdirenci değişimini kendi elde eder. Bu eğri yardımıyla da kullanılacak toprak modelini oluşturur.



Şekil 2: Özdirencin elektrot açıklığıyla değişimi.

Tablo 1’deki değerler yardımıyla program iki tabakalı bir toprak modeli oluşturmuştur. Bu modele göre toprak, üst katmanı 1 m kalınlığında, 174,37 $\Omega \cdot m$ özdirence sahip ve alt katman 535,1 $\Omega \cdot m$ özdirence sahip olacak şekilde modellenmiştir. Yapılan benzetimlerde toprağın bu modeli kullanılmıştır.

3.2. Topraklama Ağı, Elektrotlar ve İletkenlerin Tasarımı

Tasarımın bu bölümünde sistemin tek fazlı kısa devre arıza akımı hesaplanmıştır. Arıza akımı olarak topraklama tasarımının yapılacağı tesisin kısa devre arıza akımı dikkate alınmıştır. Buna göre maksimum toprak arıza akımı 5 kA olarak, maksimum kısa devre süresi 0,5 saniye olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde maksimum ağ sıcaklığı (bakırın ergime sıcaklığı olan) 1083 °C ve maksimum çevre sıcaklığı

40°C olarak belirtilmiştir. Bu koşullar dikkate alınarak rüzgar türbini temel topraklama elektrotları ve iletkenlerinin boyutları seçilirken yüksek arıza akımı ve mekanik zorlanmaya dayanım göz önünde tutulmuş ve Tablo 2’deki değerler belirlenmiştir.

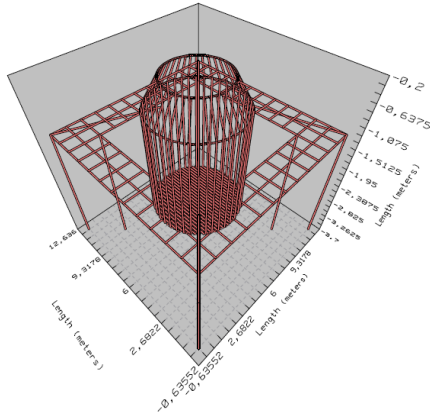
Tablo 2: Topraklama elektrotunun özellikleri

Topraklama Elektrodu Çapı	16 mm
Topraklama İletkeni Çapı	16 mm
Topraklama Elektrodu Uzunluğu	2.5 m
Temel Boyutları (Yarıçap × Yükseklik)	2 m × 2 m
Topraklama Ağı Çevre Uzunluğu	4 × 12 m = 48 m

Bu veriler kullanılarak dört farklı topraklama modeli oluşturulmuş ve standarda göre gerekli hesaplamaları bilgisayar ortamında yapılmıştır. İlk model tekil rüzgar türbini için 1 m² gözlere sahip ağ tasarımıdır. İkinci modelde gözlerin alanı 0,25 m² olacak şekilde küçültülmüştür. Üçüncü modelde, ikinci modelde kullanılan topraklama yapısı dört rüzgar türbininden oluşan bir çiftlik için birlikte tasarlanmıştır. Son model ise üçüncü modeldeki türbin sayısının iki katı olması durumunu kapsamaktadır.

4. Tek Bir Rüzgar Türbininin Topraklama Tasarımının Yapılması

Birinci modele göre tek bir rüzgar türbininin temel topraklaması Şekil 3’de görüldüğü gibi yapılmıştır. Çevre topraklama ağının aralıkları 1 m × 1 m olacak şekilde gözlerden oluşturulmuştur. Çevre topraklama ağının iç kısımlarının dört köşesine boyları 2,5 m olan çubuk topraklama elektrodu yerleştirilmiştir.



Şekil 3: Tek türbin için oluşturulmuş topraklama modeli I.

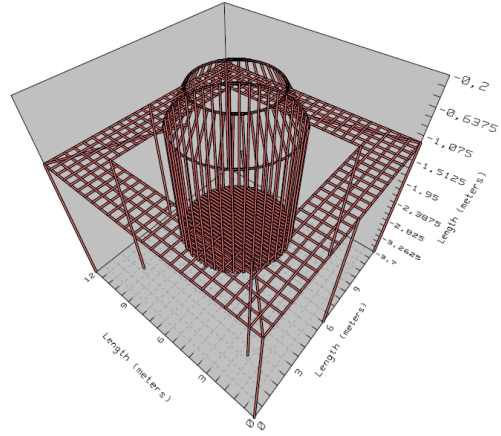
Bu şekilde oluşturulmuş modelde Tablo 3’deki parametreler kullanılarak topraklama direnci ve potansiyel yükselmeleri (GPR: Ground Potential Rise) hesaplanmıştır. Benzetim sonucunda topraklama direnci 13,438 Ω ve potansiyel yükselmesi 69202,8 V olarak bulunmuştur. Hesaplanan topraklama direnci 10 Ω değerini aştığı için tasarlanan topraklama ağı tek

başına kullanılamaz. Tasarım izin verilen değerleri aşmayacak şekilde yeniden tasarlanmıştır.

Tablo 3: Topraklama hesabında kullanılan değerler

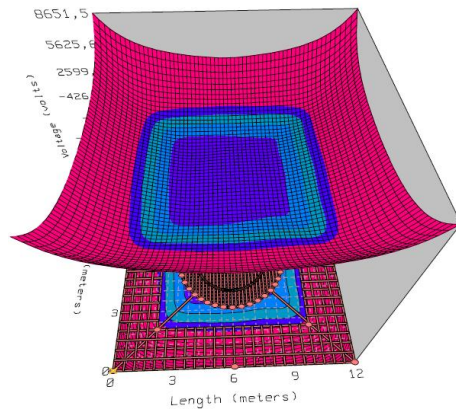
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci	1000 Ω
Yüzey tabakasının öz direnci	3000 Ω.m
Yüzey tabakasının kalınlığı	0,2 m
Arıza açma süresi, t_s	0,5 s

Topraklama direncinin değeri olması gereken değerin üzerinde çıktığı için topraklama ağına tasarım değişikliğine gidilmiştir. çevre topraklama ağı aralıkları 0,5 m × 0,5 m yapılarak ilk durumdaki tasarıma ek olarak eklenen topraklama çubuklarıyla beraber toplam 10 adet 2,5 m boyunda çubuk topraklama çubuğu kullanılarak Şekil 4’teki tasarım elde edilmiştir.



Şekil 4: Tek türbin için oluşturulmuş topraklama modeli II.

Yeni tasarım için yazılım tarafından Tablo 3’e göre yapılan hesaplanan topraklama direnci 8,1309 Ω’dur. Bu direnç değeri standartlara uygundur. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise 43786,6 V’dur. Ayrıca IEEE 80-2000 standardına dayanılarak hesaplanan en yüksek adım ve dokunma gerilimleri sırasıyla 2983,45 V ve 912,39 V’dur.



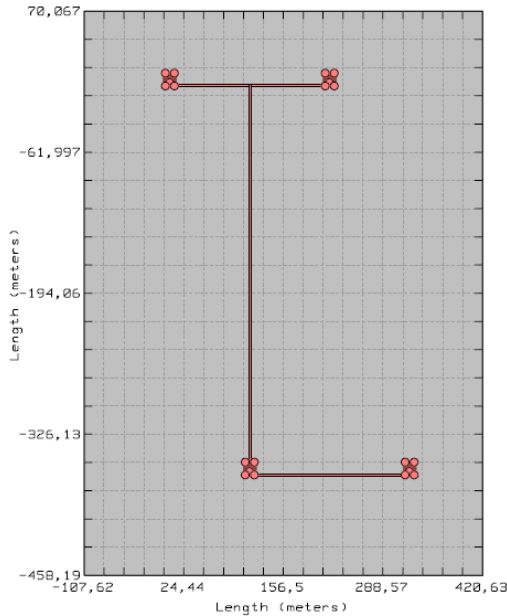
Şekil 5: Model II için potansiyel dağılımı.

Şekil 5’de tasarlanan topraklama ağının üç boyutlu potansiyel dağılımı görülmektedir. Potansiyel dağılımında kırmızı ve tonları adım geriliminin izin verilen değerlerden yüksek olduğu değerleri, mavi ve tonları ise izin verilen sınırların altında olduğunu göstermektedir. Şekil 5’den de görüleceği gibi rüzgar türbini ve çevresinde izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimi değerleri aşılmadığı için tasarım güvenli bir topraklama sistemidir.

5. Rüzgar Çiftliğinin Topraklama Tasarımı

Bir rüzgar türbini için yapılan hesabın istenilen toprak direnci ve gerilim değerlerini sağladıktan sonra birbirine bağlı rüzgar türbinlerinin oluşturduğu rüzgar çiftlikleri için tümleşik topraklama sistemleri tasarlanmış ve elde edilen değerler tekil topraklama tasarımı değerleri ile karşılaştırılarak çiftlikler için optimum topraklama tasarımı belirlenmiştir.

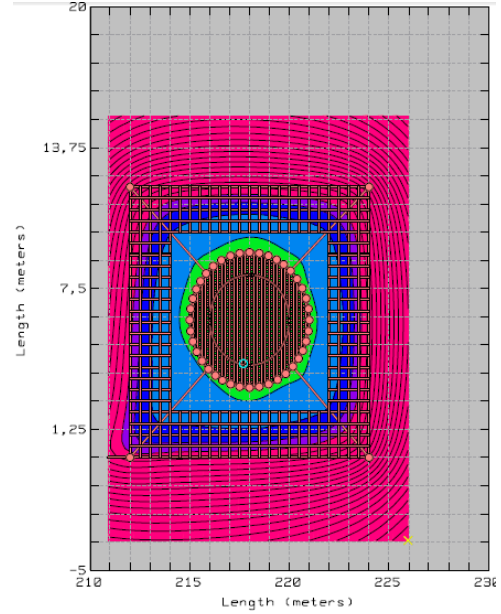
İlk olarak dört türbinden oluşan bir sistem için tasarım yapılmıştır. Rüzgar türbinleri rüzgardaki enerjiyi elektrik enerjisine çevirirken rüzgarı yavaşlattığından dolayı türbin yerleşim planında türbinler arasında yeteri kadar mesafe bırakılmalıdır. Bu plana göre türbinler arasında hakim rüzgar yönünde kanat çapının 5 veya 9 katı kadar, düşey yönde ise 3 veya 5 katı kadar mesafe bırakılır. Tasarımda ise kanat çapı 50 m olan Nordex N50 rüzgar türbini baz alınarak aynı sıradaki türbinler arasında kanat çapının 4 katı (200 m) sıralar arasında ise rotor çapının 7 katı (350 m) mesafe bırakılmıştır.



Şekil 6: Dört türbinden oluşan sistemin topraklaması.

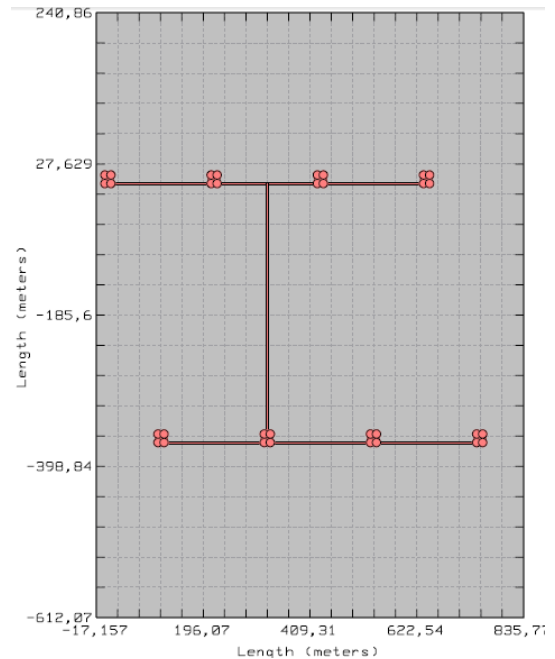
Belirtilen açıklıklara sahip rüzgar çiftliği bölümü için tasarlanan topraklama sisteminin kuşbakışı görünüşü Şekil 6’da görülmektedir. her bir rüzgar türbini Şekil 4’deki topraklama tasarımına sadık kalınacak şekilde yapılmış ve birbirlerine

bağlanmıştır. Bu şekilde yapılan sisteme ilişkin potansiyel dağılımı –tek bir türbin için- Şekil 7’de verilmiştir. Yeni rüzgar çiftliği için yazılım tarafından hesaplanan topraklama direnci $5,11017 \Omega$ ’dur. Rüzgar türbini sayısının artması topraklama direncinin değerini azaltmıştır. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise 26338,1 V’dur. Rüzgar türbini ve çevresinde adım ve dokunma gerilimi değerleri sırasıyla 3185,47 V ve 962,89 V hesaplanmıştır.



Şekil 7: Dört türbinden oluşan sistemde türbin çevresinde potansiyel dağılımı.

İncelenen son tasarımda rüzgar çiftliğindeki türbin sayısı iki katına çıkartılarak sekiz türbin için topraklama modeli tasarlanmıştır. Türbinler arası mesafeler önceki sistemle aynı alınmıştır.



Şekil 8: Sekiz türbinden oluşan sistemin topraklaması.

Tek türbin için kullanılacak topraklama modeli üzerinde değişiklik yapılmadan Şekil 8'de görülen sistem için topraklama sistemi tasarlanmıştır. Bu durumda elde edilen topraklama direnci 3,03138 Ω 'dur. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise 15627,2 V'dur.

Tablo 4'de topraklama tasarımı yapılan dört farklı modelin sonuçları görülmektedir. Topraklama modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması hesaplanan topraklama direnci ve toprak potansiyel yükselmelerine (GPR) göre yapılmıştır. Tablo 4'ten görüleceği gibi topraklama ağını oluşturan gözlerin alanı küçüldükçe daha fazla iletken kullanılmasından dolayı topraklama direnci ve buna bağlı olarak GPR değerleri azalmaktadır. Ayrıca topraklama sistemi genişletilip çok sayıda türbini içine alacak şekle getirildiğinde topraklama direncinde büyük ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Bu azalış topraklama sistemine dahil edilen türbin sayısı ile orantılı olacak şekilde azalmaktadır.

Tablo 4: Topraklama modellerinin karşılaştırılması

Topraklama modeli	Topraklama direnci (Ω)	Toprak Potansiyel Yükselmesi (GPR) (V)
1	13,438	69202,8
2	8,1309	43788,6
3	5,11017	26338,1
4	3,03138	15627,2

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, dört farklı durum için rüzgar türbinleri topraklama tasarımı incelenmiştir. Türbin temel donatıları dikkate alınarak tasarlanan topraklama sisteminde toprak öz direnç değeri sabit tutulmuş ve iki toprak modeli kullanılmıştır. Her bir durumda kullanılan topraklama tasarımında elektrot boyları ve topraklama ağı boyutları değiştirilerek standartlara [4] uygun topraklamalar oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı durumlar topraklama analizi için kullanılan CYMGRD programı ile topraklama direnci, toprak potansiyel yükselmesi (GPR), adım ve dokunma gerilimleri ve yüzey potansiyelleri bakımından karşılaştırılmıştır. Tasarımda güvenlik ölçütleri olarak IEEE 80-2000 standardı sınır değerleri alınmıştır.

Yapılan benzetimler sonucunda tek başlarına kullanılan rüzgar türbinlerinin topraklama tasarımından temel donatılarının yanında ek elektrot ve iletkenlerle topraklamayı iyileştirme gereği duyulmuştur. Ağ topraklama sisteminin göz büyüklükleri küçültülerek topraklama direnci ve GPR değeri azaltılmıştır. Topraklama direnci tek başına 10 Ω 'dan yüksek olan rüzgar türbini uygun sayıda rüzgar türbini ile rüzgar çiftliği oluşturunca topraklama direnç değeri uygun güvenlik ölçütlerini sağlamıştır.

7. Kaynaklar

- [1] Lorentzou, I. M., Hatziaargyriou, N. D., Manos, G. A., and Sietis, T., "Integrated Grounding System of Wind-Farms for Lightning and Fault Protection" *Proceedings of the Mediterranean Power Conference (Med Power)*, Lemesos, Cyprus, 14-17 November 2004
- [2] Esmaeilian, A., Akmal, S. A. A. and Naderi, S. M., "Wind Farm Grounding Systems Design Regarding the Maximum Permissible Touch & Step Voltage", *Environment and Electrical Engineering International Conference (EEEIC)*, Tehran, Iran, 18-25 May 2012
- [3] "Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği", *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, Ankara, 2001.
- [4] IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", *IEEE Standard Board*, New York, USA, 2000.
- [5] Yıldırım, H., Kalenderli, Ö., Türkay, B., Çelikyay, M. "Topraklama ağlarının bilgisayar destekli analizi", *Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, Bursa, s. 130-133, 11-17 Eylül 1995.
- [6] Kalenderli, Ö., Şentürk, E., Öztürk, O. I., "Bir Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının Sonlu Farklar Yöntemi ile Hesabı", *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İstanbul, s. 197-200, 18-21 Eylül 2003.
- [7] Öztürk, O. I., Kalenderli, Ö., "Bir Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımına Toprak Özelliklerinin Etkisi", *EVK 2005 Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, s. 223-227, 17-18 Mayıs 2005.
- [8] Uzunlar, F. B., Kalenderli, Ö., "Topraklama Ağlarının Üç Boyutlu Tasarımı", *EVK 2009 Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, s. 307-312, 21-22 Mayıs 2009.
- [9] CYMGRD: Substation grounding grid design and analysis program, CYME International T&D Inc., Canada, <http://www.cyme.com/software/cymgrd/>