

Rüzgar Türbinleri İçin Topraklama Ağı Tasarımı

Grounding Grid Design for Wind Turbines

Aytuğ Font¹, Özcan Kalenderli¹, Semih Günden¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Teknik Üniversitesi

font@itu.edu.tr, kalenderli@itu.edu.tr, semih.gunden@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, CYMGRD yazılımı kullanılarak rüzgar türbini çiftlikleri için yapılan üç boyutlu topraklama ağı tasarımı açıklanmıştır. Yapılan tasarımın Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği ve IEEE 80-2000 standardına uygun olmasına dikkat edilmiştir. Topraklama ağı tasarımı yapılmadan önce farklı toprak modellerinin analizlere olan etkileri ortaya konmuştur. Daha sonra temel analizler yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen toprak öz direnç değeri kullanılarak ilk önce tek bir türbin için iki farklı topraklama tasarımı yapılmıştır. Tekil sistem için uygun tasarım belirlendikten sonra bu tasarım, çok sayıda rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliğine uygulanmış, topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimleri hesaplanmıştır. Yapılan dört farklı tasarım karşılaştırılmış ve topraklama sistemindeki türbin sayısının topraklamaya olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Rüzgar türbini, Rüzgar türbini çiftliği, Topraklama, Topraklama direnci, CYMGRD

Abstract

In this study, 3-D grounding system design for wind turbine farms using computer program CYMGRD was presented. The Guide for Grounding of Electrical Power Systems and IEEE 80-2000 standard were considered during the design. Before the system design, pre simulations for different soil models were done in order to see the effect of soil model on the grounding system. Then main analysis were done firstly, two different designs were done for single wind turbine using the soil resistivity values obtained by experimental methods. The optimum design selected from the single wind turbine grounding system simulations were used to form combined grounding system for wind turbine farms and grounding resistance, step and touch voltages were calculated. Four different grounding designs were compared and the effect of turbine number on grounding quality was investigated.

Keywords: Wind turbine, Wind turbine farm, Grounding, Grounding resistance, CYMGRD

1. Giriş

Artan dünya nüfusuyla birlikte elektrik enerjisi ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından da yararlanılmaktadır. Genellikle yüksek ve açık yerlere kurulan rüzgar türbin-

leri ve çiftliklerinin sayısı giderek artmaktadır. Yüksek yerlere kurulan rüzgar türbinlerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri yıldırım çarpma riskidir. Rüzgar türbinlerine isabet eden yıldırım akımları kanatlar, rotor ve türbin kulesi üzerinden toprağa akmaktadır. Rüzgar türbinlerinde arıza veya yıldırım darbesi sonucu oluşan tehlikeli gerilimlerin türbin bileşenleri ve canlılara zarar vermesini engellemek amacıyla topraklama sistemi tasarımları yapılır [1, 2].

Canlıları ve elektriksel donanımları tehlikeli gerilimlerden korumak için yapılan topraklama, elektriksel bakımdan iletken bir parçayı bir topraklama tesisi üzerinden toprağa bağlamaktır. Başka bir deyişle, işletme için de topraklama yapılmakla birlikte, topraklama, elektrikli işletme araçlarının (generatör, transformator, motor, direk, vb.) normal işletmede gerilim altında olmayan metal kısımlarının bir iletkenle toprakla birleştirilmesidir [1]. Topraklamanın amacı, bir hata durumunda oluşacak adım ve dokunma gerilimlerinin insan hayatını tehlikeye sokacak mertebeyle ulaşmasını engellemektir.

Topraklama sistemi analizinde, topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimlerinin hesabı öncelikli amaçtır. Ulusal topraklama yönetmeliği [3] ve IEEE 80-2000 standardına [4] göre topraklama tasarımında aranan koşullardan ikisi adım ve dokunma gerilimlerinin izin verilen değerlerden küçük olmasıdır. Topraklama direnci de yine standart ve yönetmeliklerde belirtilen değerlerden küçük olmalıdır. Böylece arıza akımı kolayca zararsız ve etkisiz kılınabilmelidir.

Topraklama sistemi tasarlanırken kullanılan deneyime dayalı (amprik) formüller doğruluk açısından yetersiz kalmaktadır. Günümüzde kullanılan kompleks yapıllı topraklama sistemlerinde bu yetersizlikleri gidermek için bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır [5-7]. Kullanılan bilgisayar yazılımları sayesinde gerçeğe uygun iki ve üç boyutlu modeller üzerinde çalışılabilmektedir [8].

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapan CYMGRD adlı topraklama hesaplama yazılımı kullanılmıştır [9]. Farklı öz direnç ve kalınlığa sahip tabakalı toprak modellerinde uygun toprak tabakası öz direnç 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

Şerit ve çubuk topraklayıcıların bir arada kullanıldığı topraklama sistemlerinde, topraklayıcıların gömülme derinliğine bağlı yayılma dirençleri Laurent formülü ile hesaplanmamaktadır. Bu tür durumlarda topraklama hesabı için Sverak ve Schwarz yöntemleri kullanılır.

Sverak yönteminde bir topraklama ağının yayılma direnci, şerit ve çubuk topraklama elektrotlarının bir arada düşünüldüğü denklem (1) ile hesaplanır.

$$R = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1)$$

Bu denklemde, ρ toprağın öz direnci ($\Omega.m$), L toprak altına gömülmüş çubuk ve şerit iletkenlerin toplam uzunluğu (m), A topraklama ağının kapladığı alan (m^2) ve h iletken ağın gömüldüğü derinliktir (m).

Schwarz yönteminde ise çubuk ve şerit topraklayıcıların yayılma dirençleri ayrı ayrı hesaplanır. Ağın toplam yayılma direnci ise ayrı yayılma dirençleri ile çubuk ve şerit iletkenler arasındaki karşılıklı dirençlerin birleşimi ile birlikte denklem (2)'de verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (2)$$

Bu denklemde R_1 , R_2 ve R_m sırasıyla şerit iletkenlerin oluşturduğu yayılma direnci, çubuk iletkenlerin yayılma direnci ve bu iki iletkenin birbirine göre direncidir.

Schwarz yöntemine göre bir topraklama ağını oluşturan şerit iletkenlerin yayılma direnci (R_1), denklem (3) ile hesaplanır.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{a} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (3)$$

Burada ρ toprağın öz direnci ($\Omega.m$), L_c ağdaki şerit iletkenlerin toplam uzunluğu (m), a iletken yarıçapı (m), h gömülme derinliği (m), A şerit iletkenlerden oluşan ağın kapladığı alan (m^2) ve k_1 , k_2 Schwarz katsayılarıdır.

Çubuk iletkenlerin yayılma dirençleri (R_2) ise; L_R bir çubuğun boyu (m), b çubuk yarıçapı (m), n_R toplam çubuk sayısı ve k_1 Schwarz katsayısı olmak üzere denklem (4) ile hesaplanır.

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi L_R n_R} \left[\ln \left(\frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (4)$$

Çubuk ve şerit iletkenlerin karşılıklı dirençleri R_m de Schwarz denkleminde dikkate alınmaktadır. Bu direnç değeri denklem (5) ile hesaplanmaktadır.

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{L_R} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (5)$$

Schwarz denklemlerindeki k_1 ve k_2 katsayıları, oluşturulan ağın boy/en oranı olan α , gömülme derinliği h ve ağın kapladığı alan A ile ilişkili olarak değişir. k_1 ve k_2 katsayıları Çizelge 1 yardımıyla hesaplanır.

Çizelge 1: Schwarz formülü katsayıları

h	k_1	k_2
0	$-0,04\alpha + 1,41$	$0,15\alpha + 5,50$
$(1/10) \cdot \sqrt{A}$	$-0,05\alpha + 1,20$	$0,10\alpha + 4,68$
$(1/6) \cdot \sqrt{A}$	$-0,04\alpha + 1,13$	$-0,05\alpha + 4,40$

CYMGRD yazılımında, adım ve dokunma gerilimi güvenlik değerlendirmeleri IEEE 80-2000 standardında yer alan formüllere göre yapılmaktadır. 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

$$E_{dokunma-50} = \frac{(1000 + 1,5C_s \rho_s) \cdot 0,116}{\sqrt{t}} \quad (6)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-50} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) \cdot 0,116}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

70 kg vücut ağırlığı için dokunma gerilimi

$$E_{dokunma-70} = \frac{(1000 + 1,5C_s \rho_s) \cdot 0,157}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-70} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) \cdot 0,157}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

Bu denklemlerde, t arıza süresi (s), yüzey malzemesinin öz direnci ($\Omega.m$) ve C_s yüzey tabakasının azaltma katsayısıdır [4]. C_s katsayısı; h_s kalınlığındaki ve öz direnci, yüksek dirençli yüzey malzemesinin altındaki toprak için denklem (10) ile hesaplanır:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09} \quad (10)$$

3. Rüzgar Türbinleri Topraklama Sisteminin Üç Boyutlu Tasarımı

Günümüzde bilişim teknolojisinin hızlı gelişimi sayesinde bilgisayar kullanımı hemen her alanda hızlı şekilde artmıştır. Mühendislik uygulamalarında da bilgisayar algoritmalarının kullanımı hızlı çözümler üretmekte, sonuçlar görsel olarak elde edilebilmektedir. Bu çerçevede topraklama sistemlerinin tasarımında birçok bilgisayar yazılımı mevcut olup kullanıcılar ihtiyaçlarına göre tasarımlarında bu programları kullanmaktadır. Topraklama sistemlerinin tasarımlarının doğru sonuçlar verilebilmesi için kullanılan yazılımlarda topraklamada kullanılan şerit ve çubuk topraklayıcıların ayrı olarak tanımlanabilmesi, toprağa akan toprak arıza akımının hesaplanabilmesi, ilgili alandaki istenen herhangi bir noktanın yüzey potansiyelinin hesaplanabilmesi gibi özelliklerin olması gerekmektedir.

CYMGRD yazılımı, mühendislere bina veya şalt sahalasının topraklama hesapları ile ilgili yardımcı olmak üzere tasarlanmış bir yazılımdır. Program, içerisindeki toprak analiz modülü, elektrot boyutlandırma, sistem analiz ve grafik modülleri ile herhangi bir sahanın toprak özdirenç hesaplamaları, topraklama şerit ve çubuklarının tasarımı, toprak potansiyelinin artışı, yüzey potansiyelindeki değişim, adım gerilimi hesabı gibi konularda kullanılabilir. Program yapılan hesaplamalar için IEEE 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding standardını esas almaktadır.

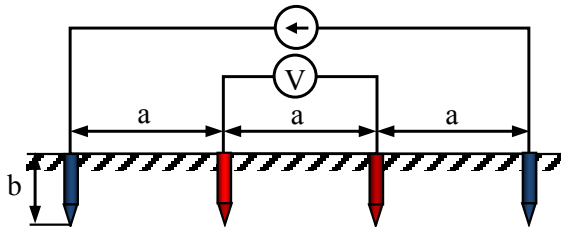
Bu bölümde CYMGRD yazılımı sayesinde rüzgar türbinleri topraklama tasarımı incelenmiştir. Yazılım bir veya iki tabakadan oluşan topraklarda, topraklama ağlarının analizini yaparak IEEE 80-2000 standardına göre adım ve dokunma gerilimlerini hesaplar [4]. CYMGRD yazılımı [9] ile topraklama tasarımı yapılmadan 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 adım ve dokunma gerilimleri hesaplanır.

3.1. Toprak Özdirenç Ölçümü ve Toprak Katmanlarının Modellenmesi

Topraklamanın yapıldığı toprak, bazen önemli derinliklere kadar aynı özelliklere sahip olabilirken bazen de değişkenlik gösterebilmektedir. Toprağın bu yapısını anlamak için son yıllarda önemli çalışmalar yapılmış ve sonuç olarak toprak yapıları değerlendirilirken çok tabakalı sistemler olarak düşünülmektedir. Ancak CYMGRD yazılımı ile tek tabakalı ve iki tabakalı toprak sistemleri tanımlanabilmektedir.

İki tabakalı toprak sistemi, özdirençleri birbirinden farklı belirli bir derinlikteki (kalınlıktaki) üst tabaka ve sonsuz derinlikteki alt tabakadan oluşmaktadır. CYMGRD yazılımı topraklama özdirenç ölçümlerinde Wenner dört kazık yöntemini desteklemektedir. Bu çalışmada da buna uygun olarak topraklama alanının özdirenç ölçümleri Wenner dört kazık yöntemine göre yapılmıştır. Şekil 1'de Wenner yönteminin ilkesel açıklama şekli 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 bir ampermetre ile bu akım ölçülür. İçteki elektrotlar arasında bu akımın yarattığı potansiyel farkı bir voltmetre

ile ölçülür. Bu ölçüm değerlerinden denklem (11) yardımıyla toprak özdirenci her derinlik için hesaplanır [3, 4].

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{V}{I}\right)}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right]} \quad (11)$$

Bu denklemde a elektrotlar arası uzaklık (m), b elektrotların boyu (gömülme derinliği) (m), I uygulanan akım (A) ve V oluşan gerilimdir (V). Bu denklem ile b = 2,5 m uzunluğunda elektrotlar kullanarak, 10 farklı a değeri için ölçülen V, I değerleriyle hesaplanan toprak özdirenç değerleri Çizelge 2'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 bu çalışmada da hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

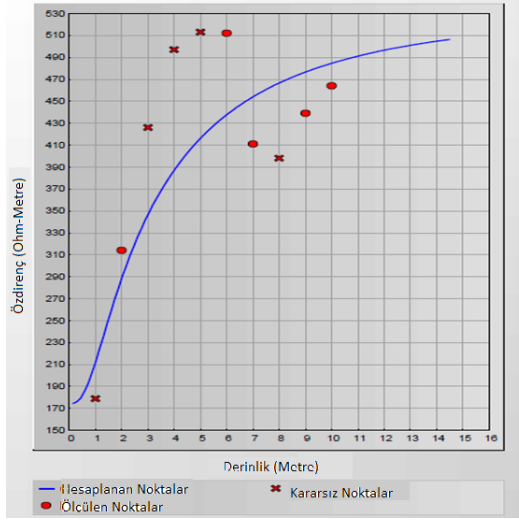
Çizelge 2: Hesaplanan toprak özdirenç değerleri

Ölçüm Sırası	Açıklık, a (m)	Özdirenç 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

Şahadan alınan toprak ölçümleri, kazıklar arası mesafe ile birlikte programa girilir. CYMGRD yazılımında toprak analiz butonuna basıldığında, yaklaşık olarak bir grafik çizdirilir. Bu grafiğe göre program, toprağı iki tabaka olarak değerlendirmektedir. Bunların yanında toprak modellenmesinde kullanıcı girişi ile de tasarım yapılabilir. Burada kullanıcı, her elektrotlar arası açıklık için belirlenmiş toprak özdirençlerini girmek yerine ortalama toprak özdirenç değerini girmek ve program tek bir toprak tipi olarak işlemleri yapmaktadır. Toprak analizi modülünde çıkan sonuçlar rapor kısmında görülmekte ve diğer modüllere otomatik olarak aktarılmaktadır.

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

Çizelge 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 iki tabakalı modeli kullanılmıştır.



Şekil 2: Özdirençin elektrotlar arası açıklıkla değişimi.

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 Çizelge 3'deki değerler belirlenmiştir.

Çizelge 3: Topraklama elektrodunun özellikleri

Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni 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 hesaplamalar bilgisayar ortamında yapılmıştır. İlk model, tekil rüzgar türbini için 1 m² gözlere sahip ağ tasarımına sahiptir. 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.

3.3. Toprak Katmanlarının Değişimini Gösteren Analizler

Yapılacak olan analizlerde kullanılacak toprak modelini (tek katmanlı veya iki katmanlı) belirleyebilmek için ön analizler yapılmıştır. Bu analizlerde, daha önceden rüzgar santrali kuru-

lan bir alanın toprak ölçüm raporlarından yararlanılmıştır. Kullanılan raporlardaki toprak alanı özdirenç değerleri Wenner dört kazık yöntemi ile ölçülmüş ve Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4: Toprak özdirenç değerleri

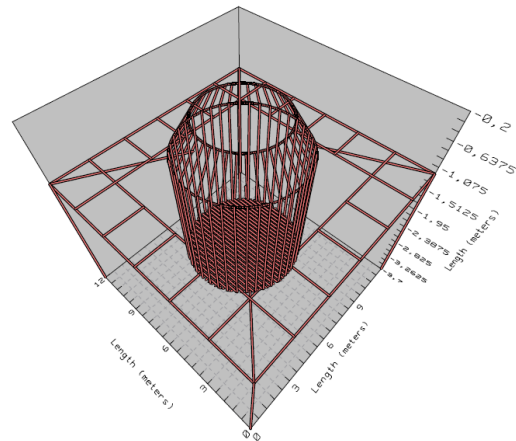
Ölçüm Sırası	Açıklık, a (m)	Özdirenç ρ (Ω .m)
1	1	168
2	2	297
3	3	264
4	4	245
5	5	227
6	6	233
7	7	236
8	8	249
9	9	298
10	10	309
ortalama		252,60

Bu ölçümler yazılım tarafından iki tabakalı toprak modelinde kullanılarak toprağın tabaka özdirençleri ve kalınlıkları hesaplanmıştır. Buna göre sonuçlar Çizelge 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 5: Hesaplanan toprak verileri

Üst tabaka özdirenç	171,01 Ω .m
Üst tabaka kalınlığı	1 m
Alt tabaka özdirenç	271,38 Ω .m

Karşılaştırma analizleri için kullanılacak olan model Şekil 3'de görülmektedir. Topraklama ağının çevre uzunluğu 48 m olacak şekilde 2 m × 2 m gözlerle sahip bir tasarım kullanılmıştır. Kullanılan yapıda çubuk topraklayıcı kullanılmamıştır.



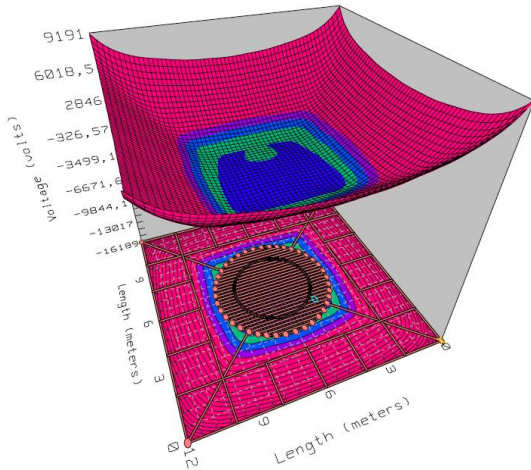
Şekil 3: Karşılaştırma için kullanılacak topraklama sistemi

Bu tasarım için yazılım tarafından hesaplanan topraklama direnci 7,79068 Ω 'dur. IEC 61400 standardında da belirtildiği gibi bireysel rüzgar türbinleri için topraklama direnci 10 Ω 'un altında olmalıdır [2]. Yazılım tarafından hesaplanan toprak potansiyel yükselmesi ise 40142,9 V'tur.

Yapılan üç boyutlu topraklama tasarımında yazılım tarafından IEEE 80-2000 standardına göre ilk olarak potansiyel dağılımı daha sonra adım ve dokunma gerilimleri hesaplanmaktadır. Model için izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimleri sırasıyla 2982,63 V ve 912,18 V olarak hesaplanmıştır.

Yazılım tarafından hesaplanan üç boyutlu potansiyel dağılımı Şekil 4'deki gibidir. Programın grafik modülü, yüzey potansiyel analizinin sonuçlarını görmek için kullanılmaktadır. Sonuçlar tasarımın iki ve üç boyutlu gösterimleri üzerinde, grafiksel olarak alınabilmektedir. Kullanıcı tasarlanan ağdaki çeşitli noktalarda oluşan tehlikeli noktaları görebilmektedir. Bir kez eşpotansiyel grafiği oluşturulduğunda yüzey ve dokunma potansiyeli birlikte incelenebilmektedir.

Oluşturulan eşpotansiyel eğrileri, toprak analizi modülünde elde edilen güvenlik sonuçlarına göre renk kodlamasıyla gösterilir. Burada her renk belirli bir potansiyel aralığını temsil etmektedir. İzin verilen düzeylerin aşıldığı alanlar belirlenen renklerle gösterilir. Seçilen alan üzerinde izin verilen gerilim değerlerine göre en kötü ve en iyi noktalar da görülebilmektedir [10].



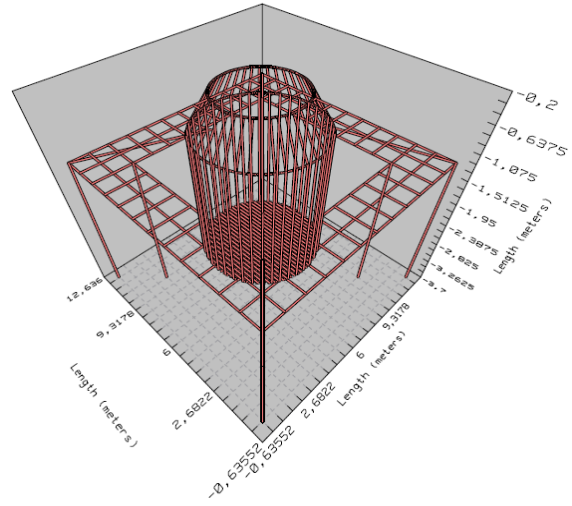
Şekil 4: Durum 1 için hesaplanan potansiyel dağılımı

Modelde kullanılan toprak özdirenç ölçümlerinin ortalama değeri yazılımın tek tabakalı toprak modelinde kullanılarak farklı toprak modellerinde topraklama direncinin, adım ve dokunma gerilimlerinin nasıl değiştiği karşılaştırılmıştır.

Tek tabakalı toprak modelinde toprak özdirenci 252,6 Ω alınarak hesaplama yapıldığında üst ve alt tabaka özdirençleri bu değerle aynı ve tabaka kalınlığı 200 m olarak bulunmuştur. Topraklama modeli olarak Şekil 3'deki tasarımın aynı kullanılmıştır. Tasarımın topraklama direnci 7,62781 Ω olarak hesaplanmıştır. İki tabakalı toprak modeline göre topraklama direncinde % 2.1 oranında bir azalma olmuştur. Tek tabakalı toprak modelinde toprak potansiyel yükselme değeri ise 39304,3 V'tur. Yazılım tarafından hesaplanan en yüksek adım ve dokunma gerilimleri ise sırasıyla 3002,59 V ve 917,17 V'tur. Adım ve dokunma gerilimlerinde ise iki tabakalı toprak modeline göre % 0,66 ve % 0,54 oranında bir artış olmuştur. Hesaplanan bu değerler sonucunda aynı toprak özdirenç değeri için tek ve iki tabakalı toprak modelleri arasında büyük farklılıklar olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle yapılan analizlerde iki tabakalı toprak modeli kullanılmıştır.

4. Tek Bir Rüzgar Türbininin Topraklama Tasarımının Yapılması

Birinci modele göre tek bir rüzgar türbininin temel topraklama Şekil 5'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Çevre topraklama ağının aralıkları 1 m \times 1 m olan gözlerden oluşturulmuştur. Çevre topraklama ağının iç kısımlarının dört köşesine boyları 2,5 m olan çubuk topraklayıcılar yerleştirilmiştir.



Şekil 5: Tek bir rüzgar türbini için oluşturulmuş topraklama modeli I.

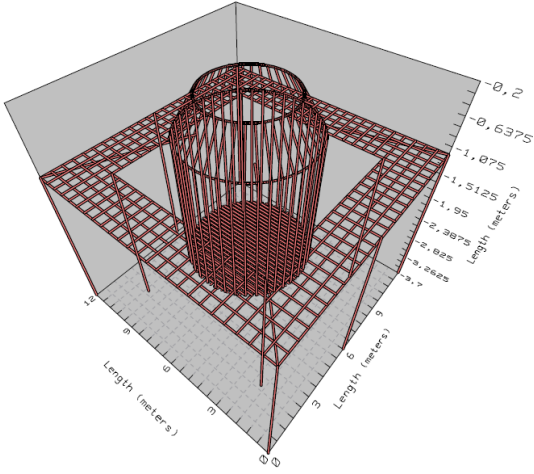
Bu şekilde oluşturulmuş modelde Çizelge 6'daki parametreler kullanılarak topraklama direnci ve toprak potansiyel yükselmesi (GPR: Ground Potential Rise) hesaplanmıştır. Benzetim sonucunda topraklama direnci 13,438 Ω ve potansiyel yükselmesi 69202,8 V olarak bulunmuştur. Hesaplanan topraklama direnci, 10 Ω değerini aştığı için tasarlanan topraklama ağı tek başına uygun değildir. Bu nedenle tasarım izin verilen değerleri aşmıyacak şekilde yeniden tasarlanmıştır.

Çizelge 6: Topraklama hesabında kullanılan veriler

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

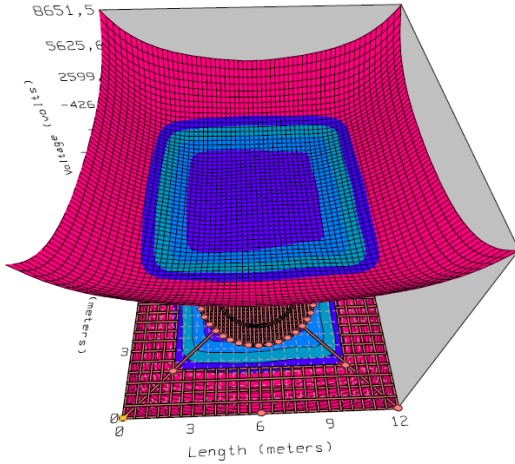
Topraklama direncinin değeri olması gereken değer üzerinde çıktığı için topraklama ağında tasarım değişikliğine gidilmiştir. Çevre topraklama ağı aralıkları 0,5 m \times 0,5 m yapılarak ilk durumdaki tasarıma ek olarak eklenen topraklama çubuklarıyla beraber toplam 10 adet 2,5 m boyunda çubuk topraklayıcı kullanılarak Şekil 6'daki tasarım elde edilmiştir.

Yeni tasarım için yazılım tarafından Çizelge 3'e göre 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 6: Tek bir rüzgar türbini için oluşturulmuş topraklama modeli II.

Şekil 7'de tasarlanan topraklama ağının üç boyutlu potansiyel dağılımı görülmektedir. Potansiyel dağılımında kırmızı ve tonları adım geriliminin izin verilen değerlerden yüksek olduğu yerleri, mavi ve tonları ise izin verilen sınırların altında olduğunu yerleri göstermektedir. Şekil 7'den de görüleceği gibi rüzgar türbini ve çevresinde izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimi değerleri aşılmadığı için tasarım güvenli bir topraklama sistemidir.



Şekil 7: Model II için potansiyel dağılımı.

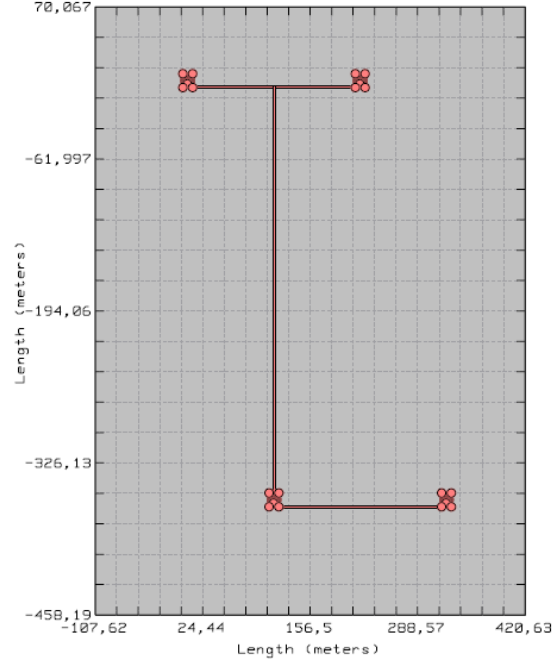
5. Rüzgar Çiftliğinin Topraklama Tasarımı

Bir rüzgar türbini için yapılan hesabın istenilen toprak direnci ve gerilim değerlerini sağladıktan sonra birbirine bağlı rüzgar türbinlerinin oluşturduğu rüzgar çiftlikleri için tümesik 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 uzaklık bırakılmalıdır.

Bu plana göre türbinler arasında hakim rüzgar yönünde kanat çapının 5 veya 9 katı kadar, düşey yönde ise 3 veya 5 katı kadar

uzaklık 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. Belirtilen açıklıklara sahip rüzgar çiftliği bölümü için tasarlanan topraklama sisteminin kuşbakışı görünüşü Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8: Dört türbinden oluşan sistemin topraklaması.

Burada her bir rüzgar türbini Şekil 6'daki topraklama tasarımı na sadık kalınacak şekilde yapılmış ve birbirlerine bağlanmıştır. Bu şekilde yapılan sisteme ilişkin potansiyel dağılımı tek bir türbin için Şekil 9'da verilmiştir.

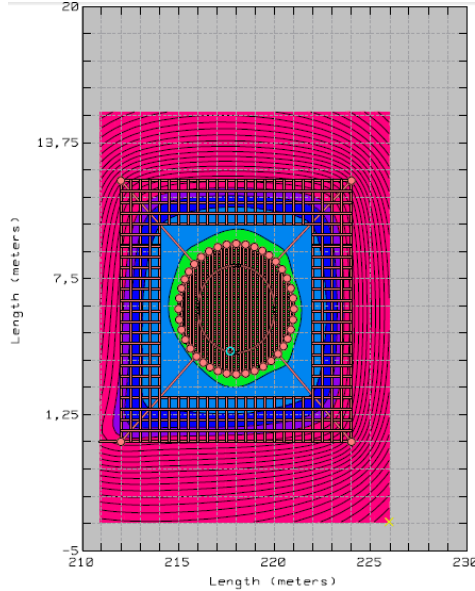
Şekil 8'deki yeni rüzgar çiftliği için yazılım tarafından hesaplanan topraklama direnci $5,11017 \Omega$ 'dur. Rüzgar türbini sayısının artması topraklama direncinin değerini azaltmıştır. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise $26338,1 V$ 'tur. Rüzgar türbini ve çevresinde adım ve dokunma gerilimi değerleri sırasıyla $3185,47 V$ ve $962,89 V$ olarak hesaplanmıştır.

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

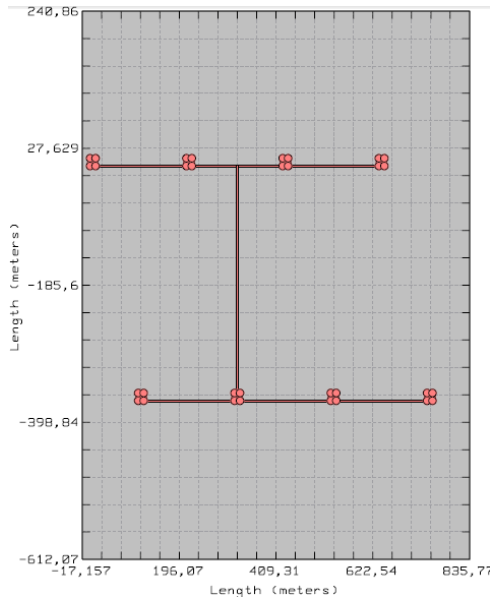
Tek türbin için kullanılacak topraklama modeli üzerinde değişiklik yapılmadan Şekil 10'da görülen sistem için topraklama sistemi tasarlanmıştır. Bu durumda elde edilen topraklama direnci $3,03138 \Omega$ 'dur. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi ise $15627,2 V$ 'tur.

Çizelge 7'de topraklama tasarımı yapılan dört farklı modelin sonuçları görülmektedir. Topraklama modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması hesaplanan topraklama direnci ve toprak potansiyel yükselmelerine (GPR) göre yapılmıştır. Çizelge 7'den görüleceği gibi topraklama ağı oluşturulan gözler küçüldükçe daha fazla iletken kullanılmasından dolayı topraklama direnci ve buna bağlı olarak GPR değerleri azalmaktadır. Ayrıca topraklama sistemi genişletilip çok sayıda türbini içine alacak şek-

le getirildiğinde topraklama direncinde büyük ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Bu azalış topraklama sistemine dahil edilen türbin sayısı ile orantılı olacak şekilde azalmaktadır.



Şekil 9: Dört rüzgar türbininden oluşan sistemde türbin çevresinde potansiyel dağılımı.



Şekil 10: Sekiz rüzgar türbininden oluşan sistemde türbinlerin yerleşimleri.

Çizelge 7: 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 tabakalı toprak modeli kullanılmıştır. Her bir durumda yapılan topraklama tasarımında topraklayıcı 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.

Analizlerde kullanılacak toprak modelini belirlemek amacıyla başka bir topraklama sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem üzerinde deneysel olarak elde edilen toprak ölçümlerinden sırasıyla bir ve iki tabakalı toprak modelleri oluşturulmuş ve bu modeller kullanılarak topraklama direnci ve toprak potansiyelleri hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda bir veya iki tabakalı toprak modeli kullanmanın sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Yapılan benzetimler sonucunda tek başlarına kullanılan rüzgar türbinlerinin topraklama tasarımından temel donatılarının yanında ek topraklayıcı ve iletkenlerle topraklamayı iyileştirme gereği duyulmuştur. Ağ topraklama sisteminin göz büyüklükleri küçültülerek topraklama direnci ve GPR değeri azaltılmıştır. Topraklama direnci tek başına 10Ω '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., Hatzigryriou, 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] Esmailian, 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/>



Aytuğ Font

1986 yılında İstanbul'da doğdu. 2004 yılında İstanbul Dede Korkut Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde lisansı, 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansını tamamlayıp doktora başlamıştır. 2011 yılından beri Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma konuları, yüksek gerilim tekniği, HVDC iletim sistemleri, DC korona, elektrostatik ve ısı analiz, yapay sinir ağları ve sınıflandırma algoritmalarıdır.



Özcan Kalenderli

1956 yılında İstanbul'da doğdu. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Elektrik-Elektronik Fakültesi'nden 1979 yılında "Mühendis", 1981 yılında "Yüksek Mühendis" ve 1991 yılında "Doktor Mühendis" unvanlarını almıştır. Kalenderli, İTÜ Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda 1979-1991 arasında "Mühendis" olarak çalışmıştır. İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde 1991'de "Yardımcı Doçent", 1998'de "Doçent" ve 2010'da "Profesör" unvanını almış ve 1991 yılından beri aynı bölümde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Kalenderli, yüksek gerilim tekniği konuları içinde elektriksel boşalma olayları, aşırı gerilimler ve aşırı gerilimlere karşı koruma, yüksek gerilimlerin üretilmesi ve ölçülmesi, yüksek gerilim deney teknikleri başta olmak üzere sayısal elektromanyetik alan analizi, elektromanyetik alanların çevre etkileri, elektriksel yalıtkan maddeler ve elektriksel topraklama konularında çalışmaktadır.



Semih Günden

1992 yılında Gaziantep'te doğdu. 2010 yılında Gaziantep Lisesi'nden, 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Mezuniyetinden bu yana elektrik enerji sektöründe elektrik mühendisi olarak çalışmaktadır. Rüzgar santralleri ve topraklama ilgi alanlarındandır.