

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOKUNMA VE ADIM GERİLİMLERİ BAKIMINDAN RÜZGAR TÜRBİNİ
TOPRAKLAMASININ ÜÇ BOYUTLU İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağrı KÖKSAL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

MAYIS 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOKUNMA VE ADIM GERİLİMLERİ BAKIMINDAN RÜZGAR TÜRBİNİ
TOPRAKLAMASININ ÜÇ BOYUTLU İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çağrı KÖKSAL
(504101009)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ömer GÜL

MAYIS 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Çağrı KÖKSAL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DOKUNMA VE ADIM GERİLİMLERİ BAKIMINDAN RÜZGAR TÜRBİNİ TOPRAKLAMASININ ÜÇ BOYUTLU İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Ömer GÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU
Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Nisan 2013**
Savunma Tarihi : **22 Mayıs 2013**

Sevgili aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda her türlü desteği veren ve hoşgörüsünü esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ömer GÜL'e, CYMGRD yazılımını altı ay süre ile kullanmamıza izin veren Cyme yöneticisi Amir ASLANI'ye ve hayatımın her aşamasında beni destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2013

Çağrı KÖKSAL

(Elektrik-Elektronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. TOPRAKLAMAYA İLİŞKİN TANIMLAR	3
2.1 Topraklama Sınıflandırılması	5
2.1.1 Topraklama çeşitlerine göre tanımları	5
2.1.2 Topraklama amaçlarına göre sınıflandırılması.....	5
2.1.3 Topraklama şekline göre tanımlar	6
2.2 Topraklayıcı Çeşitleri.....	6
2.2.1 Şerit topraklayıcı.....	6
2.2.2 Çubuk topraklayıcı.....	7
2.2.3 Levha topraklayıcı	8
2.2.4 Doğal topraklayıcı	9
3. YILDIRIM	9
3.1 Giriş	9
3.2 Yıldırımın Etkileri	9
3.2.1 Elektrodinamik etki	9
3.2.2 Termik etki.....	10
3.2.3 Elektrokimyasal etki.....	10
3.2.4 Yan ark üretme etkisi.....	10
3.3 Yıldırımından Korunma.....	11
3.3.1 Franklin çubuğu.....	11
3.3.2 Faraday kafesi	12
3.3.3 Aktif yıldırımlık	12
3.4 Yıldırımından Korunma Seviyeleri (YKD)	12
3.5 Yıldırımından Korunma Sistemleri (YKS)	13
3.6 Yıldırımından Korunma Bölgeleri (YKB)	14
4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE TOPRAKLAMA VE YILDIRIMDAN KORUNMA.....	15
4.1 Rüzgar Türbinleri	15
4.2 Rüzgar Türbinlerinde Topraklama	16
4.3 Toprak Elektrot Düzenleme Tipleri	16
4.3.1 A tipi düzenleme.....	16
4.3.2 B tipi düzenleme.....	16
4.4 Türbin Bileşenlerinin Yıldırıma Karşı Korunması.....	17
4.4.1 Kanatlar.....	17

4.4.2 Kabin (Nasel).....	17
4.4.3 Generatör	18
4.4.4 Kule	18
5. TOPRAKLAMA TASARIMDA KULLANILAN YAZILIM.....	19
5.1 Toprak Analizi	20
5.2 Toprak Modelinin Belirlenmesi.....	22
5.3 Toprak öz direnci Hesaplama Algoritması.....	23
5.4 İzin Verilen En Yüksek Adım ve Dokunma Gerilimleri Hesabı	23
6. RÜZGAR TÜRBİNLERİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ ÜÇ BOYUTLU	
TASARIMI	27
6.1 Durum 1	28
6.1.1 Toprak öz direncinin belirlenmesi	28
6.1.2 Topraklama ağı, elektrotlar ve iletkenlerin tasarımı	30
6.1.3 Topraklama direnci hesabı	30
6.1.4 Dokunma gerilimi hesabı	33
6.1.5 Adım gerilimi hesabı	35
6.2 Durum 2	38
6.3 Durum 3	42
6.4 Durum 4	45
6.5 Durum 5	48
6.6 Durum 6	51
6.7 Durum 7	54
6.8 Rüzgar Çiftliği	57
6.8.1 Bağlantı 1	57
6.8.2 Bağlantı 2	59
6.8.3 Bağlantı 3	60
6.8.4 Bağlantı 4	61
6.8.5 Bağlantı 5	62
7. SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

GPR	: Toprak Potansiyel Yükselmesi
STD	: Standart
YKD	: Yıldırımdan Korunma Düzeyleri
YKS	: Yıldırımdan Korunma Sistemleri
YKB	: Yıldırımdan Korunma Bölgeleri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : YKD'ye göre yıldırım parametrelerinin en yüksek değerleri	13
Çizelge 3.2 : YKD ile YKS sınıfı arasındaki ilişki	13
Çizelge 6.1 : Durum 1 için topraklama ağı parametreleri	28
Çizelge 6.2 : Toprak verileri	29
Çizelge 6.3 : Wenner yöntemi ile ölçülen toprak öz direnç değerleri	30
Çizelge 6.4 : Hesaplanan toprak verileri	30
Çizelge 6.5 : Sverak yöntemi için parametreler	31
Çizelge 6.6 : Schwarz yöntemi için parametreler	31
Çizelge 6.7 : k_1 ve k_2 parametre hesabı	32
Çizelge 6.8 : k_1 ve k_2 parametreleri	32
Çizelge 6.9 : İzin verilen en yüksek dokunma gerilimi için parametreler	34
Çizelge 6.10 : İzin verilen en yüksek adım gerilimi için parametreler	35
Çizelge 6.11 : GPR için parametreler	36
Çizelge 6.12 : Durum 2 için topraklama ağı tasarımı bilgileri	39
Çizelge 6.13 : Durum 1 ve Durum 2'deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması	39
Çizelge 6.14 : Durum 3 için topraklama ağı tasarımı bilgileri	42
Çizelge 6.15 : Durum 1 ve Durum 3'deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması	42
Çizelge 6.16 : Durum 4 için topraklama ağı tasarımı bilgileri	45
Çizelge 6.17 : Durum 1 ve Durum 4'deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması	45
Çizelge 6.18 : Durum 5 için topraklama ağı tasarımı bilgileri	48
Çizelge 6.19 : Durum 1 ve Durum 5'deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması	48
Çizelge 6.20 : Durum 6 için topraklama ağı tasarımı bilgileri	51
Çizelge 6.21 : Durum 1 ve Durum 6'deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması	52
Çizelge 6.22 : Durum 7 için topraklama ağı tasarımı bilgileri	54
Çizelge 6.23 : Durum 1 ve Durum 7'deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir topraklayıcı etrafındaki potansiyel dağılımı.....	4
Şekil 2.2 : Şerit topraklayıcıların çeşitleri	7
Şekil 2.3 : Çubuk topraklayıcı.....	7
Şekil 2.4 : Levha topraklayıcı	9
Şekil 3.1 : Franklin çubuğu.....	11
Şekil 3.2 : Faraday kafesi.....	12
Şekil 4.1 : Rüzgar türbin kanatlarının yıldırımdan korunma sistemi	17
Şekil 4.2 : Kabin.....	18
Şekil 4.3 : Rüzgar türbini yıldırım korunma bölgeleri	18
Şekil 5.1 : Wenner yöntemi	20
Şekil 5.2 : Toprak analiz modülü	21
Şekil 5.3 : Toprak analiz raporu.....	22
Şekil 5.4 : Toprak model tipi görünümü.....	22
Şekil 6.1 : Durum 1 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.....	29
Şekil 6.2 : Topraklama çubukları arasındaki uzaklığın değişimi ile toprak özdirencinin değişimi	30
Şekil 6.3 : Schwarz yöntemi için k1 ve k2 katsayıları: (a) k1, (b) k2	32
Şekil 6.4 : h'a karşılık gelen Cs değerleri.....	34
Şekil 6.5 : Durum 1'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri	37
Şekil 6.6 : Durum 1'e göre tasarlanan topraklama ağı üstten görünümü	37
Şekil 6.7 : Durum 1'e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.....	38
Şekil 6.8 : Durum 2 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.....	40
Şekil 6.9 : Durum 2'ye göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri	41
Şekil 6.10 : Durum 2'ye göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.....	41
Şekil 6.11 : Durum 3 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.....	43
Şekil 6.12 : Durum 3'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri	44
Şekil 6.13 : Durum 3'e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.....	44
Şekil 6.14 : Durum 4 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.....	46
Şekil 6.15 : Durum 4'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri	47
Şekil 6.16 : Durum 4'e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.....	47
Şekil 6.17 : Durum 5 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.....	49
Şekil 6.18 : Durum 5'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri	50
Şekil 6.19 : Durum 5'e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.....	50
Şekil 6.20 : Durum 6 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.....	52
Şekil 6.21 : Durum 6'ya göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri ..	53

Şekil 6.22 : Durum 6'ya göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri	53
Şekil 6.23 : Durum 7 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü	55
Şekil 6.24 : Durum 7'ye göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri..	56
Şekil 6.25 : Durum 7'ye göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri	56
Şekil 6.26 : Bağlantı 1 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı .	58
Şekil 6.27 : Bağlantı 1'e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri	58
Şekil 6.28 : Bağlantı 2 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı .	59
Şekil 6.29 : Bağlantı 2'ye göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri	59
Şekil 6.30 : Bağlantı 3 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı .	60
Şekil 6.31 : Bağlantı 3'e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri	60
Şekil 6.32 : Bağlantı 4 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı .	61
Şekil 6.33 : Bağlantı 4'e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri	62
Şekil 6.34 : Bağlantı 5 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı .	63
Şekil 6.35 : Bağlantı 5'e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri	63

DOKUNMA VE ADIM GERİLİMLERİ BAKIMINDAN RÜZGAR TÜRBİNİ TOPRAKLAMASININ ÜÇ BOYUTLU İNCELENMESİ

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimle birlikte rüzgar türbinlerinin kullanım alanları genişlemiştir. Rüzgar türbinleri genellikle toprak öz direnci yüksek olan dağlık, yüksek alanlara yapılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde ve rüzgar çiftliklerinde arıza akımları ve yıldırım akımlarına karşı canlıları ve türbin bileşenlerini korumak için topraklama sistemlerine ihtiyaçları vardır.

Topraklama başta insanlar olmak üzere canlıları ve elektriksel donanımları tehlikeli gerilim seviyelerinden koruyacak ve tesisin işletme gerilimi sürekliliğini güvenle sürdürmesi için ihtiyaç duyulan toprak potansiyelini sağlayacak elektrik tesisidir. Topraklama sistemi, topraklanacak donanımın toprak ile bağlantısını sağlayan iletkenler ve toprak içine gömülen topraklayıcı bütününe verilen isimdir. Topraklama sistemi, arıza durumunda meydana gelebilecek akımların tehlikeli gerilimlere dönüşmeden toprağa aktarılmasını sağlar.

Rüzgar çiftlikleri topraklama sistemleri geniş alanları kapsayan kompleks yapıdadır. Daha önceleri topraklama sistemleri basit yapıda sistemlerdi ve topraklama sistemi tasarımında sadece topraklama direncinin belirlenmesi yeterli sayılırdı. Fakat geniş alanlardaki topraklama sistemlerinde sadece topraklama direncinden bahsetmek yanlış sonuçlar ortaya koyabilir. Bu yüzden bu geniş alanlarda doğru topraklama sistemlerinin tasarlanması canlıların güvenliği açısından önemlidir.

Topraklama sisteminin iki önemli parametresi adım ve dokunma gerilimidir. Topraklama sistemleri tasarlanırken adım ve dokunma gerilimlerinin belirli sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir. Adım ve dokunma gerilimleri topraklama sisteminin yapısına, toprak yapısına ve arıza akımına bağlıdır.

Bu çalışmada, rüzgar türbini topraklaması CYMGRD topraklama ağı tasarım yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği ve IEEE Std. 80-2000 standartlarına uygun bir topraklama tasarımı sunulmuştur. İlkesi sonlu elemanlar yöntemine dayanan yazılım ile üç boyutlu topraklama sistemi tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmada önce bir türbin için temel topraklaması tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda topraklama verileri hem formüller hem de yazılım ile hesaplanarak incelenmiştir. Daha sonra topraklama ağı, boyutları ve şekli değiştirilerek farklı durumlar için incelenmiştir. Devamında rüzgar çiftlikleri topraklama sisteminde, rüzgar türbinleri değişik konfigürasyonlarda bağlanarak, dokunma ve adım gerilimleri ile topraklama dirençlerine etkileri incelenmiştir.

THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF WIND TURBINE GROUNDING IN TERMS OF TOUCH AND STEP VOLTAGES

SUMMARY

Along with the inclination to renewable energy resources, wind turbines have spread to wider areas of usage. A wind turbine is a system that converts the kinetic energy from the wind into mechanical energy, then into electric energy. When the energy from the wind rotates the rotor, to which blades are connected, kinetic energy from the wind is converted into mechanical energy. Mechanical energy is transferred into a generator and is converted to electric energy by increasing the rpm in the rotor shaft. Wind turbines are generally built in mountainous lands with a high level of soil resistivity. In order to protect living beings and turbine components from fault currents and lightning currents, grounding systems are required in wind turbines and wind farms.

Grounding is an electrical installation for protecting living beings especially humans and electrical equipments from dangerous levels of voltage; and providing the ground potential required to ensure that the plant safely maintains its operating voltage. Grounding system refers to the entirety of conductive materials connecting the equipment and the ground; and the grounding rod that is buried in the ground. In the event of a fault, grounding system should perform its duty by transferring the possible currents to the ground before they are transformed into dangerous voltage.

Wind turbines are built over the sea, concrete grounds, or rocky grounds. Grounding systems of wind turbines built over the sea can be established by single grounding electrode and foundation reinforcements, as the resistivity of seawater is relatively low, compared to many soil types. In concrete grounds, concrete provides a homogeneous environment; and this causes stability in the natural potential of the metal buried in concrete. In rocky grounds, the smallest resistivity is on the rock's surface. In these grounds, if the ground electrode cannot be buried in the ground and is necessarily placed on the surface, the electrode should be protected against mechanical damage.

Grounding systems of wind farms are in a complex structure, covering large areas. Earlier, grounding systems had simple structures; and determining the grounding resistance was considered adequate for designing the system. However, considering only the grounding resistance may produce faulty results in grounding systems located in large areas. Hence, designing the proper grounding system in these large areas with living beings has become an issue of importance.

Two substantial parameters of grounding system design is touch and step voltages. According to IEEE 80-2000 standard for grounding design; touch and step voltages to be created in the event of a fault should be smaller than the highest touch and step voltages allowed. Touch and step voltages of the grounding system depends on the structure of the grounding system, structure of the ground and the fault current. In this sense, grounding resistance is a substantial component for touch and step

voltages. Grounding resistance should be low enough to discharge the fault current. Otherwise, it will cause danger in high currents by creating high potentials.

Empirical formula can accurately calculate the touch and step voltages and grounding resistance in fixed-depth symmetrical grounding grids established by horizontal conductors and vertical electrodes. Ground resistance and touch/step voltages of grounding grids buried in various depths in multi-layer soil and established by asymmetrical conductors and electrodes can be calculated more accurately with CYMGRD software.

Previous studies used models based on various geometric arrangements of wind turbine grounding system. However, all of them neglected to exactly model the electrodes used as foundation concrete reinforcement and model the grounding system electrodes as a number of simple horizontal electrodes arranged in square or ring shapes, while the effect of reinforcement bars is too much to be neglected

In this study, CYMGRD grounding grid design software is used for wind turbine grounding. Presented grounding design complies with international and national standards. Three dimensional grounding system design is carried out with the program logic based on finite elements method.

In this study, a foundation grounding for a turbine was designed initially. Grounding data of this design were examined, calculating both by formula and the software. Later, grounding grid was examined for various situations, with its dimensions and shape altered. After these examinations; grounding resistance, soil layer resistivity, ground potential rise, reduction factor (C_s) and touch/step voltages were calculated and compared amongst these situations. Then, wind turbines were connected in wind farm grounding system in various configurations; and their effects on touch/step voltages and grounding resistance were examined.

In conclusion, following observations were made in this study:

A significant decrease was observed in grounding resistance, touch and step voltages within the wind turbine grounding grid, regarding the effects of foundation steel reinforcements.

An increase was observed in grounding resistance, touch and step voltages when the length of electrodes in grounding grid were decreased.

A decrease was observed in grounding resistance, touch and step voltages when the length of electrodes in grounding grid were increased.

A slight increase was observed in touch and step voltages when the space between reinforcements was increased.

A significant increase was observed in grounding resistance, touch and step voltages when foundation reinforcements in the grounding system were ignored.

Extreme decreases were observed in touch and step voltages when wind turbine grounding grids, in which the touch voltages alone exceeded safety criteria, were connected to each other.

No significant changes were observed in touch and step voltages when the connection types were altered in the wind farm. Hence, selecting the system that provides the shortest connection was evaluated as the most economic option.

Despite the presence of extreme touch and step voltages in grounding systems in which the reinforcements were ignored, it was observed that touch and step voltages

complied to safety criteria when the wind farm was established with these systems and appropriate number of wind turbines.

Despite the presence of extreme touch and step voltages in the single-electrode grounding system designed as the grounding resistance is $10\ \Omega$ less, it was observed that touch and step voltages complied to safety criteria when the wind farm was established with these systems and appropriate number of wind turbines.

In the final examination, when the wind farm was established with the burial depth of the line connecting the turbines lowered properly in the single-electrode grounding system designed as the grounding resistance is $10\ \Omega$ less, it was observed that the system provided a more economic system that meets safety criteria.

1. GİRİŞ

Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi artarak devam etmektedir. Rüzgar türbinleri ve rüzgar çiftlikleri sayısı da gün geçtikçe artmaktadır. Rüzgar türbinleri genellikle rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu rakımı yüksek yerlere yapılırlar. Bu durumda kendileri de yüksek yapılar olan rüzgar türbinlerine yıldırım çarpma riski de artmaktadır. Yıldırım akımları kanatlar, rotor ve kule üzerinden akmaktadır. Rüzgar türbinlerinde, yıldırım akımları ve arıza akımları sonucunda oluşacak tehlikeli gerilimlerin türbin bileşenlerine ve canlılara vereceği zararları engellemek için topraklama sistemleri tasarlanmalıdır.

Topraklama sistemi analizi, arıza anında oluşan toprak potansiyel yükselmesinin minimum olması esasına dayanır. IEEE Std. 80-2000’de topraklama tasarımında aranacak şartlar içinde, arıza anında oluşacak adım ve dokunma gerilimlerinin, izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimlerinden küçük olması gerektiği belirtilmektedir. Topraklama sistemi adım ve dokunma gerilimleri topraklama sistemi yapısına, toprak yapısına ve arıza akımına bağlıdır. Bu bağlamda topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimleri için önemli bir bileşendir. Topraklama direnci arıza akımını dağıtabilecek kadar küçük olmalıdır. Aksi halde yüksek akımlarda yüksek potansiyeller oluşarak tehlikeye yol açar.

Topraklama sistemleri tasarlanırken genellikle deneyime dayalı formüller ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplar, toprak ve topraklayıcı şartlarını belirlemede doğruluk ve süre açısından yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizliklerin giderilmesi için gerçeğe uygun modellerle hesap yapan bilgisayar yazılımlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan CYMGRD (CYMe’s GRounDing) topraklama tasarım yazılımı ile topraklama tasarımı yapılmaktadır.

CYMGRD ile homojen olmayan bir veya daha fazla yatay veya düşey tabakadan oluşan toprak için iki tabakalı toprak modeli kullanılarak, tabaka öz dirençleri ve kalınlıkları belirlenmektedir.

Standartlarda belirtilen formüller ile sabit gömölme derinliğine sahip, yatay yerleştirilmiş iletken ve düşey yerleştirilmiş elektrotlarla oluşturulan topraklama ağlarında, topraklama dirençleri, dokunma ve adım gerilimleri doğru olarak hesaplanmaktadır [1], [2]. Asimetrik yapıya sahip elektrot ve iletkenler ile oluşturulan, gömölme derinliği kendi içinde değişen topraklama ağlarının topraklama dirençleri, adım ve dokunma gerilimlerini daha doğru hesaplamak için CYMGRD yazılımı kullanılmıştır.

Rüzgar türbinleri topraklama sistemlerine ilişkin çalışmalarda [3-5] çeşitli geometrik şekillerde rüzgar türbini topraklama sistemleri tasarlanmıştır. Fakat bu çalışmalarda topraklama elektrotlarına bağlanan rüzgar türbininde, temel betonu içerisindeki çelik donatıların etkileri ihmal edilmiştir.

Bu çalışmada, topraklama sistemi, çelik donatılar topraklama sistemine dahil edilerek, elektrot ve iletken boy değişimlerinin adım gerilimi, dokunma gerilimi ve topraklama direncine etkileri incelenmiştir. Bu incelemeler ilk olarak bir rüzgar türbin topraklama ağı, yazılım ile tasarlanıp formüller ile de doğrulanarak yapılmıştır. Devamında yazılım ile topraklama ağı, değişikler yapıp farklı durumlar incelenmiştir.

Daha sonra, rüzgar türbinleri birbirine bağlanarak, çeşitli bağlantı şekillerinin, adım gerilimi, dokunma gerilimi ve topraklama direncine etkileri incelenmiştir.

2. TOPRAKLAMAYA İLİŞKİN TANIMLAR

Topraklama: Topraklanacak olan iletken kısımların bir topraklama tesisi üzerinden toprağa bağlanmasıdır.

Topraklayıcı: Toprağa gömülü ve toprakla iletken bir bağlantısı olan veya beton içine gömülü olan iletken parçalardır.

Topraklama iletkeni: Topraklanacak bir cihazı ya da tesis bölümünü, bir topraklayıcıya bağlayan iletkenidir.

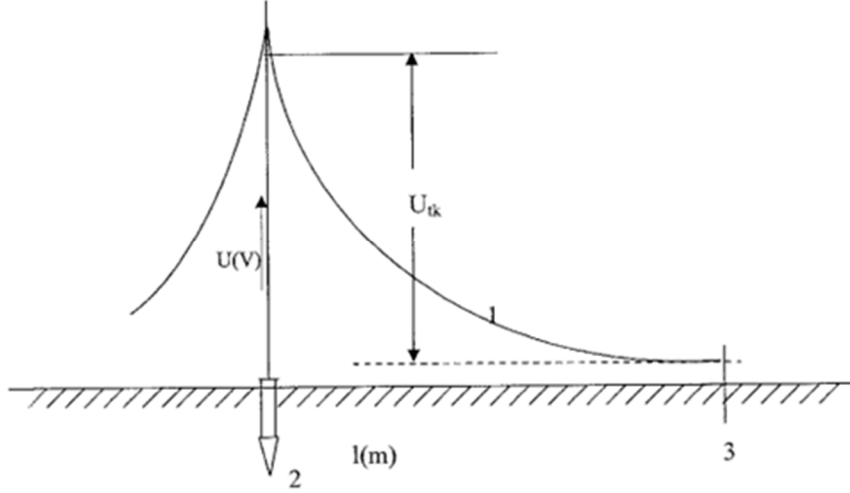
Referans toprak: Topraklayıcıdan yeterince uzakta bulunan ve topraklama tesisinin etki alanı dışında kalan yeryüzü bölümüdür. Bu bölümdeki herhangi iki nokta arasında, topraklama akımının neden olduğu gerilim ihmal edilecek kadar küçüktür.

Toprak öz direnci: Bir kenarının uzunluğu 1 m olan toprak bir küpün karşılıklı iki yüzeyi arasındaki dirençtir. Birimi genellikle ohm.m cinsinden verilir.

Topraklayıcı yayılma direnci: Bir topraklayıcı ile referans toprak arasındaki dirençtir.

Topraklama direnci: Topraklayıcının yayılma direnci ile topraklama iletkenin direncinin toplamına eşittir.

Potansiyel dağılımı: Topraklanmış bir işletme aracında, bir hata sonucu olarak, bir gövde kısa devresi meydana geldiğinde, referans toprağından itibaren ölçülmek üzere sözü geçen işletme aracına doğru yeryüzündeki potansiyelin dağılımıdır. Şekil 2.1’de bir işletme aracında bir toprak teması veya toprak kısa devresi olması halinde bir işletme aracına ait topraklayıcının etrafındaki potansiyel dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Bir topraklayıcı etrafındaki potansiyel dağılımı [6].

$U(V)$: Gerilim eksen

$l(m)$: Uzaklık eksen

U_{ik} : Topraklayıcı gerilimi

1- Potansiyel değişimi

2- Topraklayıcı

3- Referans toprağı

Dokunma gerilimi: Topraklama geriliminin, insan tarafından köprülenebilen bölümüdür. İnsanın bulunduğu noktadaki yüzey potansiyeli ve toprak potansiyel yükselmesi arasındaki potansiyel farktır. Bu durumda insan vücudu üzerindeki akım yolu elden ayağı ya da elden eledir [2].

Adım gerilimi: Topraklama geriliminin, insanın 1 m'lik adım açıklığı ile köprüleyebildiği bölümüdür. İnsanın ayakları arasındaki 1 m mesafede oluşan yüzeydeki potansiyel fark adım gerilimi olarak tanımlanır. Bu durumda insan vücudu üzerindeki akım yolu ayaktan ayağadır [2].

Potansiyel dağılımının düzenlenmesi: Bir topraklama tesisinin potansiyel dağılımının düzenlenmesi, adım ve dokunma gerilimlerini küçültmek için potansiyel düzenleyici topraklayıcılar yerleştirilerek potansiyel dağılımına etki etmektir [2].

Toprak potansiyel yükselmesi (GPR): Topraklayıcı ile referans toprağı arasındaki gerilimdir. Bir toprak arızası sırasında, topraklama ağıyla toprağı iletilen hata akımının bir bölümü, referans toprak potansiyeline bağılı olarak, ağı potansiyelinin yükselmesine neden olur. Bu yükselen ağı potansiyelinin en yüksek değeri GPR'yi

ifade eder. Sistemde meydana gelebilecek herhangi bir toprak arızası anında toprak potansiyel artışı toprak direncinin büyüklüğüyle orantılıdır [1] [7].

2.1 Topraklama Sınıflandırılması

Topraklamalar çeşitlerine, amaçlarına ve şekillerine göre ayırt edilirler:

2.1.1 Topraklama çeşitlerine göre tanımları

Doğrudan topraklama: Topraklama direncinden başka hiçbir direnç içermeyen topraklamadır.

Dolaylı topraklama: Topraklama iletkeni üzerine ek olarak bağlanan omik, endüktif veya kapasitif dirençlerle yapılan topraklamadır.

Açık topraklama: Topraklama iletkeni üzerine bir parafüdr veya eklatör bağlanan topraklamadır [6].

2.1.2 Topraklama amaçlarına göre sınıflandırılması

Elektrik tesislerinde topraklamaların uygulama alanları ve yapılan topraklamaların amaçları ile şekilleri farklıdır. Buna göre topraklamaların başlıca çeşitleri şöyledir:

Koruma Topraklaması: İnsanları ve hayvanları tehlikeli dokunma veya adım gerilimine karşı korumak amacı ile tesislerin işletme akım devresine ait olmayan ve yalıtım hatası veya ark etkisi ile gerilim altına girebilen ve insanların dokunabilecekleri iletken kısımlarını toprağa bağlamak için yapılan ek topraklama tesislerine koruma topraklaması adı verilir.

İşletme Topraklaması: İşletme topraklaması, işletme akım devresinin toprağa karşı potansiyelinin belirli bir değerde bulundurulmasına yarar. Eğer işletme topraklamasında topraklayıcının kendinden başka devrede başka herhangi bir direnç ilavesi yoksa bu tip topraklama dirençsiz işletme topraklaması olarak anılır. Ancak topraklayıcıya ek olarak devrede omik, endüktif veya kapasitif dirençler bağlanmışsa bu tür işletme topraklaması dirençli işletme topraklaması ismini alır.

Fonksiyon Topraklaması: Bir iletişim tesisinin veya birleştirme elemanının istenen fonksiyonu yerine getirmesi amacıyla yapılan topraklamadır. Fonksiyon topraklaması, toprağı dönüş iletkeni olarak kullanan iletişim cihazlarının işletme akımlarını da taşır.

Yıldırımdan Korunma Topraklaması: Yıldırım düşmesi durumunda, işletme gereği gerilim altında bulunan iletkenlere atlamaları geniş ölçüde önlemek ve yıldırım akımını toprağa iletmek için, işletme akım devresine ilişkin olmayan iletken bölümlerinin topraklanmasıdır.

Yıldırım isabet etme olasılığı olan parafudrlar, yıldırım yakalama uçları, açık hava bağlama tesislerinde madeni mesnet iskeleleri, havai hatlara ait koruma iletkeni ve direkler, rüzgar türbinleri ve parçaları topraklanarak yıldırım akımının toprağa akması sağlanır [2],[6].

2.1.3 Topraklama şekline göre tanımlar

Tekil topraklama: İşletme elemanı veya cihazın sadece kendine ilişkin topraklayıcıya bağlı olduğu topraklamadır.

Yıldız şeklindeki topraklama: Birçok işletme elemanının veya cihaza ilişkin topraklama iletkenlerinin topraklanmış bir noktada yıldız şeklinde toplanmasıdır.

Çoklu topraklama: Birleştirme elemanı veya cihazın topraklanmış koruma iletkeni, potansiyel dengeleme iletkeni gibi birçok iletkene bağlandığı topraklamadır.

Yüzeyel topraklama: Topraklanacak işletme elemanları veya cihazların ve iletişim tesislerinin işletme akımı taşımayan iletken kısımlarının ağ şeklinde kendi aralarında fonksiyon veya koruma topraklamasına bağlandığı topraklamadır [2].

2.2 Topraklayıcı Çeşitleri

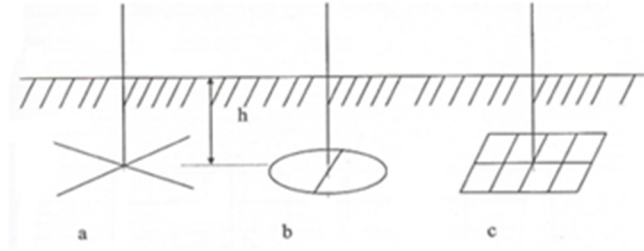
Toprağın durumuna ve topraklayıcı olarak kullanılan malzemenin cinsine göre çeşitli topraklayıcılar kullanılırlar. Topraklayıcıların geometrik şekilleri, kullanılan malzemenin cinsi ve toprağa gömülme derinliği bakımından birçok türleri vardır. Topraklayıcı türünün seçilmesinde ve düzenlenmesinde yerel şartlar, zeminin yapısı ve izin verilen yayılma direnci göz önüne alınır. Aşağıdaki en çok kullanılan topraklayıcı türleri bildirilmiştir.

2.2.1 Şerit topraklayıcı

En az 3 mm kalınlığında ve 100 mm² kesitinde galvanizli demir şeritten yapılırlar. Şerit topraklayıcılar çok derine gömülmediklerinde dolayı yüzey topraklayıcı adı da

verilir. En basit şerit topraklayıcı boylu boyuna döşenen bir şeritten oluşur. Bunun yayılma direnci öncelikle şeridin uzunluğuna bağlıdır.

Şerit topraklayıcılar en çok yıldız, halka, gözlü veya bunların kombinasyonu şeklinde yapılır. Şekil 2.2’de en çok kullanılan şerit topraklayıcıların yapıları gösterilmektedir.

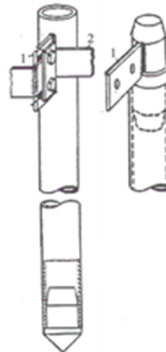


Şekil 2.2: Şerit topraklayıcıların çeşitleri [6].

- a- Dört kollu yıldız topraklayıcı
- b- Halka topraklayıcı
- c- Ağ topraklayıcı
- h- Gömülme derinliği

2.2.2 Çubuk topraklayıcı

Genellikle çelik borudan veya buna eşdeğer çelik profilden yapılırlar ve zemine dik olarak çakılırlar. Çubuk topraklayıcının uzunluğu 3-5 m kadardır ve üst ucu 50 cm kadar toprak altında kalır. Çubuk topraklayıcılar oldukça derine gömüldüklerinden, yazın zemin kurusa bile topraklayıcı nemli zeminde bulunur ve çok iyi bir topraklama sağlar. Bu nedenle buna derin topraklayıcı denir. Şekil 2.3’de bir çubuk topraklayıcı gösterilmiştir.



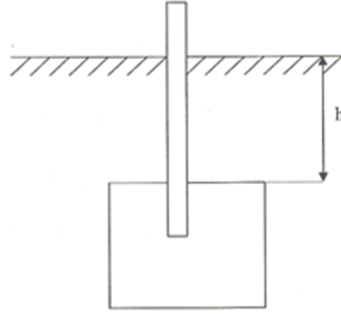
Şekil 2.3: Çubuk topraklayıcı [6].

- 1- Bağlama ucu
- 2- Topraklama iletkeni

Çubuk topraklayıcının çapı, yayılma direnci üzerine çok az etki eder; bu yüzden topraklayıcı kesiti mekanik dayanma ve korozyon olaylarına göre belirlenir. Yayılma direnci, daha çok çubuk uzunluğuna bağlıdır.

2.2.3 Levha topraklayıcı

Zemine düşey olarak yerleştirilen levha şeklindeki topraklayıcıdır. Levha topraklayıcıda belirli bir yayılma direnci elde etmek için başka cins topraklayıcılara göre çok daha fazla malzemeye ihtiyaç vardır. Şekil 2.4’de gösterilen levha topraklayıcının maliyeti yüksek olması ve yayılma direncinin büyük olması sebebiyle şerit ve çubuk topraklayıcılara göre daha az tercih edilir



Şekil 2.4: Levha topraklayıcı [6].

h- Gömülme derinliği

2.2.4 Doğal topraklayıcı

Temel amacı topraklama olmayan, fakat topraklayıcı olarak etkili olan, toprakla veya suyla doğrudan doğruya veya beton üzerinden temasta bulunan yapıların çelik bölümleri, boru tesisatları, temel donatıları gibi metal parçalardır.

3. YILDIRIM

3.1 Giriş

Yıldırım, bulutlar ve yeryüzü arasında meydana gelen doğal bir elektrik boşalmasıdır. Yıldırım, oluşturduğu ve taşıdığı büyük elektrik yükü ve akımlarla çevreye, enerji sistemlerine ve canlılara zarar verebilmektedir. Yüksek gerilim şebekelerinin hızla gelişmesi yüksek gerilim hatlarının santral ve transformatör istasyonlarının yıldırıma karşı korunmasını gerektirmektedir [8].

Yıldırım boşalmasının oluşabilmesi için bulut etrafındaki elektrik alan şiddetinin yaklaşık 25 kV/cm değerine ulaşması gerekir [9], [10].

3.2 Yıldırımın Etkileri

Yıldırım, elektriksel bir olay olduğu için bir akımın bir iletken den geçmesi halinde meydana getirdiği etkilerin benzerlerini ortaya çıkarır.

Buna göre, bir yıldırımdan aşağıdaki etkiler beklenebilir:

1. Elektrodinamik etki
2. Termik etki
3. Elektrokimyasal etki
4. Yan ark üretme etkisi

3.2.1 Elektrodinamik etki

Bir iletken den geçen yıldırım akımının oluşturduğu manyetik alan ile dünyanın manyetik alanı arasında meydana gelen kuvvetler çok küçük değerlerdir. Yıldırım akım yolunun bir kısmı diğer bir kısmının manyetik alanı içinde bulunması halinde ise daha büyük kuvvetler oluşur. Bir iletkendeki yıldırım akımı ile yeryüzü manyetik alanının karşılıklı etkileşimi nedeniyle, iletkenin her bir metresine yaklaşık 10 N mertebesinde önemsiz bir kuvvet uygulanır. Bu kuvvet sonucu, ince anten

borularında ezilme, paralel iletkenlerden karşılıklı çarpışma, iletken kroşelerin sökülmesi vs. gözlenebilir [11].

3.2.2 Termik etki

Joule kanuna göre yıldırım kanalında meydana gelen ısı enerjisi, i akımının karesi, akımın t akış süresi ve iletkenin R omik direnci ile orantılıdır:

$$W = i^2 \cdot t \cdot R \quad (3.1)$$

Buna göre termik etkiler ancak direncin büyük olduğu noktalarda büyük değerler alabilir. Kesitleri yeteri derecede büyük olan iletkenlerde görünür bir şekilde ısı etkisi meydana gelmez. Erime sıcaklığına kadar çıkan ısınmalar ancak kesiti küçük olan veya öz direnci büyük olan iletkenlerde meydana gelir. Ağaçlarda ve kayalarda oluşan yıldırımlarda, geçen akım yolu üzerindeki su birikintileri veya buharlaşabilecek başka maddeler varsa ani genleşme basınçları yüzünden ağaç, kaya gibi cisimler parçalanıp, yaralanabilirler. Buna ek olarak, yıldırım akımının büyüklüğüne göre; yıldırım boşalma noktası etrafındaki 30 m çapında bir daire içindeki alan, adım gerilimi yüzünden oldukça tehlikelidir. Bu yüzden yıldırımlı havalarda açık yerlerde ayakların mümkün mertebe birbirine bitişik tutulması, ağaç ve duvarlara yaslanılmaması önerilir [12].

3.2.3 Elektrokimyasal etki

Elektrolitik parçalanma sonucu demir, çinko, kurşun gibi metaller açığa çıkar. Fakat bu olay için oldukça büyük akım şiddetine sahip yıldırım oluşması gereklidir [12].

3.2.4 Yan ark üretme etkisi

Korunma sisteminin yıldırım çarpma noktasının potansiyeli, yanındaki metallere göre çok yükselebilir. Bu nedenle korunma sisteminde yapının üzerindeki ve içindeki metal bölümlere ark atlaması olabilir. Ark atlaması olduğunda yıldırım akımının bir bölümü elektrik kabloları üzerinden boşalır. Bu boşalma panolardaki sigortaları attırır, kabloların yanmasına sebep olabilir. Çevredeki insanlar için tehlikeli olabilir. Bu durumun etkilerinin azaltılması için iniş iletkenlerinin elektrik kablolarına ve metal donanımlara belirli mesafeden çekilmelidir [13].

3.3 Yıldırımından Korunma

Yıldırımından korunma sistemleri insanları, yapıları ve donanımları yıldırımın zararlı etkilerinden korunma amacıyla birbirine bütünleşmiş iletken donanımlardan meydana gelir. Bu sistemler oluşan yıldırım boşalmalarını yakalayıp toprağa aktarılmasını sağlar.

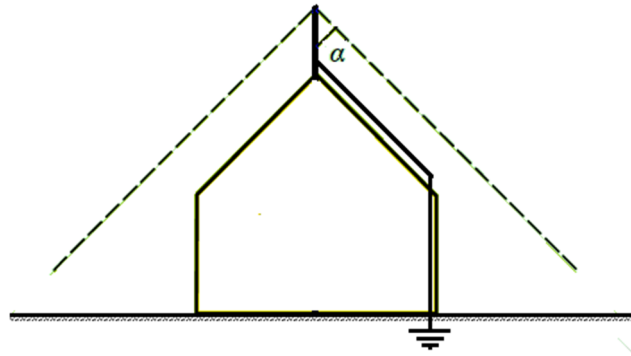
Yıldırımlardan korunma amacıyla ilk adım 1749 da Franklin tarafından atılmıştır. Bunun için Franklin korunacak bina yakınına toprakla irtibatı olan uzun madeni çubuklar, yani paratonerler yerleştirilmesini teklif etmiştir.

Yıldırımı yakalayan ve bulut yükünü toprağa boşaltan düzenekler yakalama ucu, indirme iletkeni ve topraklama elektrodundan oluşur.

3.3.1 Franklin çubuğu

Franklin çubuğu ile yıldırımından korunma yüksek noktalara sivri uçlu metaller konularak toprakla bağlantının yapılması ile sağlanır. Burada, amaç yıldırımın sivri uca düşerek toprağa aktarılmasıdır. Böylece düşen yıldırımın bina ve çevresine zarar vermesi engellenmiş olur.

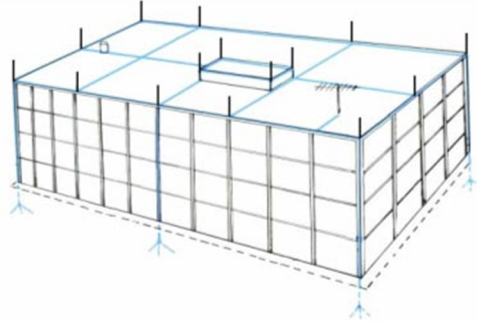
Franklin çubuğu iniş iletkeni ile toprağa bağlanır. Franklin çubukları, yıldırımın ortaya çıkardığı büyük elektrik akımlarına düşük dirençli bir toprak yolu sağlarlar. Franklin çubuğu korunacak yapının bütün bölümlerini Şekil 3.1’de görüldüğü gibi α koruma açısı ile oluşturduğu koruma bölgesi içine almalıdır.



Şekil 3.1: Franklin çubuğu.

3.3.2 Faraday kafesi

Faraday kafesi ile korunması istenen hacmin etrafının Şekil 3.2’de görüldüğü gibi kafes şeklinde bir metalle toprağa kadar sürekli ve kesintisiz iletken bir yol teşkil edecek şekilde sarılmaktadır. Yatay bağlantılarla tamamlanan iletkenlerin oluşturduğu birçok yakalama ucuna sahip bu kafes, topraklama sistemine bağlanarak yıldırımdan koruma gerçekleştirilir



Şekil 3.2: Faraday kafesi.

3.3.3 Aktif yıldırımlık

Aktif yıldırımlıklar Franklin çubukları gibi yıldırımı yakalayan cihazlar. Bu sistemlerin, Franklin çubuklarından farklı olarak, yıldırımı daha etkin yakalayacak şekilde donatıldıkları belirtilmektedir. Aktif yıldırımlıklar radyoaktif maddeler veya elektriksel tetiklemeyle oluşturulan iyonizasyon sayesinde çubuk ucunda elektrik alan şiddeti artırılarak, çubuktan buluta doğru bir boşalma başlatılmaktadır. Bu boşalma ile buluttan çubuğa olan boşalmanın buluşma olasılığı artırılarak yıldırımın boşalması için güvenli bir yol sağlanmış olacağı savunulur [14]. Aktif yıldırımlıklarda radyoaktif maddelerin kullanılması yasaklanmıştır.

3.4 Yıldırımından Korunma Düzeyleri (YKD)

Yıldırımından korunma düzeyleri, yıldırımda en düşük ve en yüksek tasarım değerlerinin aşılmaması ihtimaline ilişkin yıldırım akımı parametreleri ilgili bir sayıdır. Amacı bakımından dört yıldırımından korunma düzeyi (I ila IV) tanımlanmıştır. Her YKD için bir en düşük ve en yüksek yıldırım akımı parametreleri belirlenmiştir.

Yıldırımdan farklı korunma düzeyleri için yıldırım akımı parametrelerinin en yüksek değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bunlar yıldırımdan korunma bileşenlerinin tasarımında ve bu bileşenler üzerinde yıldırımın etkilerini göstermek için kullanılır.

Çizelge 3.1: YKD’ ye göre yıldırım parametrelerinin en yüksek değerleri [15].

Birinci kısa darbe			YKD			
Akım parametreleri	Sembol	Birim	I	II	III	IV
Tepe akımı	I	kA	200	150	100	
Kısa darbe yükü	$Q_{kısa}$	C	100	75	50	
Özgül enerji	W/R	MJ/Ω	10	5,6	2,5	
Zaman	T1/T2	μs /μs	10/350			
Sonraki kısa darbe			YKD			
Akım parametreleri	Sembol	Birim	I	II	III	IV
Tepe akımı	I	kA	50	37,5	25	
Ortalama diklik	di/dt	kA/μs	200	150	100	
Zaman parametreleri	T1/T2	μs /μs	0,25/100			
Uzun darbe			YKD			
Akım parametreleri	Sembol	Birim	I	II	III	IV
Uzun darbe yükü	Q_{uzun}	C	200	150	100	
Zaman parametreleri	T_{uzun}	s	0,5			
Boşalma			YKD			
Akım parametreleri	Sembol	Birim	I	II	III	IV
Boşalma yükü	$Q_{boşalma}$	C	300	225	150	

3.5 Yıldırımdan Korunma Sistemleri (YKS)

Bir yapıya yıldırım düşmesinden dolayı meydana gelebilecek fiziksel hasarı azaltmak için kullanılan sistemlere yıldırımdan korunma sistemleri denir. Bir YKS’nin karakteristikleri, korunacak yapının karakteristikleri ve yıldırımdan korunma düzeyi ile belirlenir. TS EN 62305-1’de tanımlanan yıldırımdan korunma düzeylerine karşılık gelen YKS’ye ait dört sınıf (I - IV), Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: YKD ile YKS sınıfı arasındaki ilişki [16].

YKD sınıfı	YKS sınıfı
I	I
II	II
III	III
IV	IV

3.6 Yıldırımından Korunma Bölgeleri (YKB)

YKS, ekranlama telleri, manyetik ekranlar ve aşırı gerilim koruyucu cihaz gibi korunma tedbirleri yıldırımından korunma bölgelerini (YKB) belirler. Yıldırım tehdidine göre aşağıdaki YKB'ler tarif edilmiştir:

YKB 0: Tehdidin zayıflamamış yıldırım manyetik alanından oluştuğu bölge. İç sistemler yıldırım akımının tamamına veya bir kısmına maruz kalabilir.

YKB 0A: Tehdidin doğrudan yıldırım çakması ve tam yıldırım manyetik alanından oluştuğu bölge. İç sistemler yıldırım akımının tamamına veya bir kısmına maruz kalabilir.

YKB 0B: Doğrudan yıldırım çakmasından korunmuş olan fakat tehdidin tam yıldırım manyetik alanından oluştuğu bölge. İç sistemler yıldırım akımının bir kısmına maruz kalabilir.

YKB 1: Yıldırım akımının etkilerinin aşırı gerilim koruyucu cihazlar yoluyla azaltıldığı bölge. Ekranlama yıldırım manyetik alanını zayıflatabilir.

YKB 2,...,n: Yıldırım akımının etkilerinin ilave aşırı gerilim koruyucu cihazlar yoluyla daha fazla azaltıldığı bölge. İlave ekranlama ile yıldırım manyetik alanı daha da fazla zayıflatılabilir [15].

4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE TOPRAKLAMA VE YILDIRIMDAN KORUNMA

Yıldırım ve arıza akımlarına ve bunların oluşturacağı tehlikeli dokunma ve adım gerilimlerine karşı insanları, diğer canlıları ve türbin bileşenlerini korumak için rüzgar türbinlerine yıldırımdan korunma ve topraklama sistemi yapılmalıdır. Bu bölümde türbin ve bileşenlerinin topraklaması ve yıldırımdan korunması ele alınmaktadır.

4.1 Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbini, rüzgardaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemdir. Rüzgardaki enerji, kanatların bağlı olduğu rotoru döndürerek, havadaki kinetik enerji mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir sayısı arttırılarak, mekanik enerji generatöre aktarılır ve elektrik enerjisine çevrilir. Bir rüzgar türbini ana hatlarıyla aşağıda kısaca tanımlanmış kısımlardan meydana gelir.

Generatör: Kanatlardan gelen hareket enerjisini elektrik enerjisine çevirir.

Rotor: Rüzgar türbinlerindeki generatörün hareketli parçasıdır.

Kanat: Rüzgar enerjisini hareket enerjisine dönüştüren elemandır.

Kanat flanşı: 3 adet kanadın bağlandığı elemandır.

Ana mil: Kanatları taşıyan ve döndürme hareketini üretece ileten elemandır.

Dişli kutusu: Dişliler, düşük hızlı mili, yüksek hızlı mile bağlarlar

Açı kontrol motoru: Kanatların rüzgara karşı ideal açılarını ayarlayan servomotordur.

Yön kontrol motoru: Her koşulda kabinin rüzgara dik açı yapacak şekilde pozisyon almasını sağlayan servomotordur.

Kabin: Motorlar ve üreteç dahil rüzgar türbinlerinin tüm elemanlarını içinde barındıran taşıyıcı elemandır [17],[18].

4.2 Rüzgar Türbinlerinde Topraklama

Rüzgar türbinleri yüksek yerlere, denizlere veya kayalık kesimlere kurulur. Kayalık ve yüksek yerlerde toprağın yüksek direnç göstermesinden dolayı topraklama yapmak zordur. Rüzgar türbinleri bulundukları alandaki en yüksek yapı oldukları için yıldırıma maruz kalır. Bu sebeplerden dolayı rüzgar türbinlerinin iyi bir topraklamaya ihtiyacı vardır [3]. Rüzgar türbini topraklama sistemleri güç sistemi hataları ve yıldırıma karşı korunma için tasarlanır [4].

Deniz üzeri rüzgar türbinlerinde deniz suyunun öz direnci, birçok toprak yapısına göre çok düşük olması sebebiyle, denizlerdeki rüzgar türbin topraklama sistemlerinde tek kazık veya temel donatıları yeterli olmaktadır [15].

Beton zeminlerde, betonun her yerde özelliği aynı olan ortam oluşturmamasından dolayı betona içine gömülen metalin doğal potansiyelinde bir kararlılığa sebep olur. Kayalık zeminlerde, en düşük özgül direnç kayanın yüzeyindedir. Bu zeminlerde topraklama elektrodunun toprak içine yerleştirilememesi ve zorunlu olarak yüzey üzerine yerleştirilmesi durumunda, bu elektrot mekanik hasara karşı korunmalıdır [19]. Rüzgar çiftliği topraklama sistemi oluşturulurken, rüzgar türbini topraklama sistemleri birbirine bağlanarak düşük topraklama direnci elde edilir.

4.3 Toprak Elektrot Düzenleme Tipleri

Topraklama sistemleri için iki tip toprak elektrot düzenlemesi uygulanır.

4.3.1 A tipi düzenleme

A tipi düzenleme, korunacak yapının dışına yerleştirilen her iniş iletkenine bağlı yatay veya düşey toprak elektrotlarından meydana gelir. A tipi düzenleme rüzgar çiftliklerindeki ofis binaları gibi alçak yapılarda kullanılır. A tipi bir düzenlemede, toprak elektrotlarının sayısı en az iki olmalıdır [20], [15].

4.3.2 B tipi düzenleme

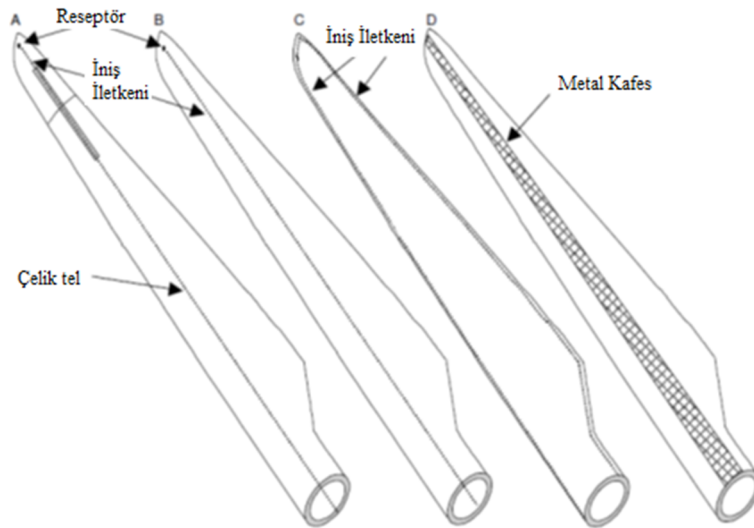
B tipi düzenleme, korunacak yapının dışında bulunan, uzunluğunu en az % 80'i toprakla temas halinde halka topraklayıcıdan veya bir temel elektrodundan oluşur. Ayrıca, bu topraklama elektrotları kafes biçiminde de olabilir [15], [20]. Rüzgar türbinlerinde B tipi kullanılır.

4.4 Türbin Bileşenlerinin Yıldırıma Karşı Korunması

4.4.1 Kanatlar

Kanatlar yıldırım akımlarının ve yıldırım sebebiyle oluşan elektrik alanının tam etkilerine maruz kalmaktadır. Kanatlar, rüzgar türbin maliyetinin yaklaşık dörtte birini oluşturmakta ve rüzgar türbininin en pahalı parçalarında birisidir [21].

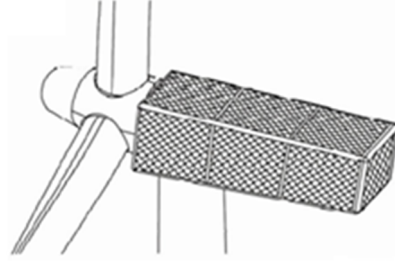
IEC 61400-24 göre kanatlar YKB 0A yıldırım korunma bölgesinde yer alır ve buna göre korunması yapılır [15]. Kanatları yıldırımdan korumak için kanatlara reseptör adı verilen bakır iletkenler yerleştirilir. Reseptörler kanat yüzeyinin üzerine doğru çıkıntı yapar. Kanat içinde bulunan iletken, reseptörlerden rotor göbeğine bağlanır. Rotor göbeği içinde bulunan elektriksel ve hidrolik ekipman, göbeğin kendisinin Faraday kafesi tarafından yıldırımdan korunmaktadır [22]. Şekil 4.1’de rüzgar türbin kanatlarının yıldırımdan korunma sistemi gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Rüzgar türbin kanatlarının yıldırımdan korunma sistemi [15].

4.4.2 Kabin (Nasel)

Kabin, Faraday kafesi olarak görev yapacak şekilde üretildiğinden içindeki cihazları yıldırımdan koruyacaktır. Kabinin yanları ve üstü direk olarak yıldırıma maruz kaldığından YKB 0B yıldırımın korunma bölgesi içinde yer alır [15]. Kabin içinde bulunan bileşenler yıldırım azaltılmış etkilerine maruz kaldıkları için YKB 1 yıldırımdan korunma bölgesinde yer alır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kabin tamamen iletken olmayan malzemeler ile kaplanabilir.



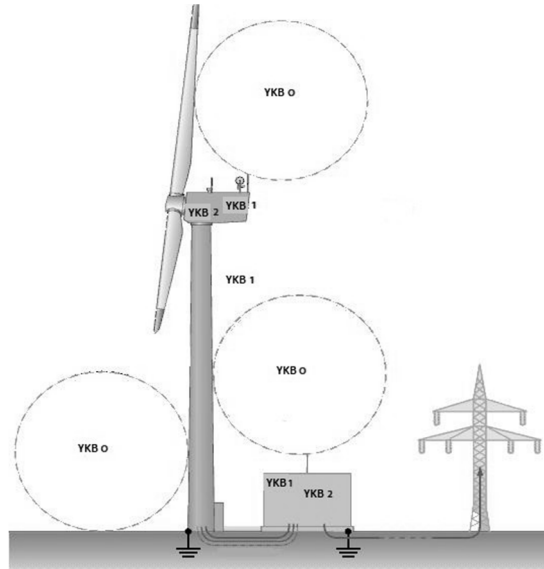
Şekil 4.2: Kabin [23].

4.4.3 Generatör

Generatör, rotor şaftı üzerinde bulunduğu için direk yıldırım akımlarına maruz kalabilir. Kabinin iç bölgesinde bulunan generatör, YKB 1 yıldırımdan korunma bölgesinde yer alır [23].

4.4.4 Kule

Boru şeklinde çelik kuleler bir Faraday kafesi olarak görev yapar ve temel topraklama sistemi ve kabin arasında bir iletken görevi görerek topraklamaya yardımcı olur. Beton kuleler en az dört adet paralel çelik donatıyla güçlendirilerek yapılırlar. Bu donatılar kulenin üst ve altı arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlayarak yıldırımdan korunmaya yardımcı olur [23]. Kuleler YKB1 veya YKB2 korunma bölgelerinde yer alır. Rüzgar türbini yıldırımdan korunma bölgeleri Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Rüzgar türbini yıldırımdan korunma bölgeleri [24].

5. TOPRAKLAMA TASARIMINDA KULLANILAN YAZILIM

Topraklama sistemleri tasarlanırken genellikle deneyime dayalı formüller ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplar, toprak ve topraklayıcı şartlarını belirlemede doğruluk ve süre açısından yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizliklerin giderilmesi için gerçeğe uygun modellerle hesap yapan bilgisayar yazılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan CYMGRD (CYMe's GRounDing) topraklama tasarım yazılımı kullanılmaktadır.

CYMGRD ile bir veya daha fazla tabakadan oluşan toprak için iki tabakalı toprak modeli kullanılarak tabaka özdirençleri ve kalınlıkları belirlenmektedir.

Deneysel formüller, yatay yerleştirilmiş iletken ve düşey yerleştirilmiş elektrotlarla oluşturulan gömülme derinliği sabit olan simetrik topraklama ağlarında, dokunma ve adım gerilimleri ile topraklama dirençlerini doğru olarak hesaplayabilmektedir. CYMGRD yazılımı ile birden fazla tabakadan oluşan toprakta, gömülme derinliği kendi içinde değişen asimetric yapıda iletkenler ve elektrotlardan oluşturulan, topraklama ağlarının topraklama dirençleri, adım ve dokunma gerilimleri daha doğru olarak hesaplanmaktadır.

Topraklama sistemi tasarımda kullanılan CYMGRD yazılımı topraklama iletkeni ve elektrotlarını ayrı birer eleman olarak modelleyerek, toprağa akan faz toprak arıza akımına göre istenen herhangi bir noktada, yüzey potansiyelini hesaplamaktadır.

Topraklama tasarımının gerçekleştirilmesinde ilk olarak yapılacak çalışmanın kapsamı tanımlanmalıdır.

İkinci olarak kullanılacak toprak modeli belirlenmelidir. Bu aşamada belirlenen toprak modeli ve yüzey için IEEE Std. 80-2000'e göre, izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimini hesabı yapılır.

Üçüncü aşamada ise, bir elektrik tesisinde meydana gelebilecek en kötü arıza parametreleri hesaba katılarak iletkenlerin ve elektrotların boyutları kararlaştırılmaktadır.

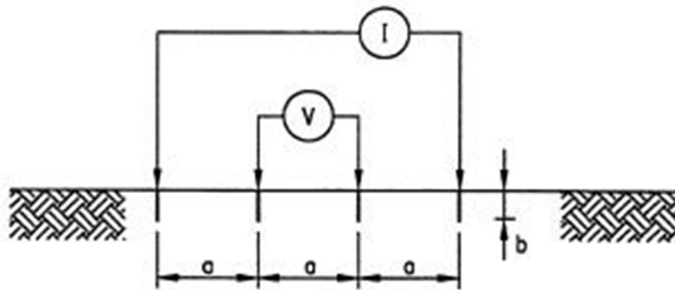
Dördüncü aşamada, elektrik tesisinin koordinatları, iletkenin gömülme derinliği ve fiziksel boyutları gibi sahanın geometrik boyut ve biçim bilgileri girilmektedir.

Son olarak, tesis tasarımının istenilen güvenlik ölçütlerini karşılayıp karşılamadığı doğrulanmaktadır. Potansiyel dağılımı çizimi, belirlenen limit değerleri için dokunma ve adım gerilimlerinin aşılmadığını doğrulamak için oluşturulmaktadır. Güvenlik ölçütleri sağlanmadığında, ağ tasarımının yeniden gözden geçirilmesi gerekir. Kabul edilebilir sonuçlar elde edilene kadar yöntem üçüncü aşamadan itibaren tekrarlanır [25], [26].

5.1 Toprak Analizi

Toprak, farklı özdirençleri olan çok tabakalı katmanlardan oluşması nedeniyle, topraklama direnci ölçümü çok katmanlı toprak modeline göre yapılmaktadır. Bu yazılımda çok tabakalı toprak yapısını modellenenbilmesi için, farklı özdirençlere sahip sonlu derinlikte üst katman ve sonsuz derinlikte alt katmandan oluşan iki tabakalı model kullanılmaktadır.

CYMGRD yazılımı Wenner dört kazıklı toprak özdirenci ölçüm tekniğini desteklemektedir. Wenner dört kazıklı toprak özdirenci ölçüm tekniğini ilişkin ölçüm şeması Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu yöntemle göre, dıştaki elektrotlardan, ampermetre ile ölçülen I akımı uygulanırken, içteki elektrotlar arasında, uygulanan akımın toprağın direncinde yarattığı V gerilimi voltmetreyle ölçülür ve direnci bulmak için ohm yasası uygulanır [25].



Şekil 5.1: Wenner yöntemi.

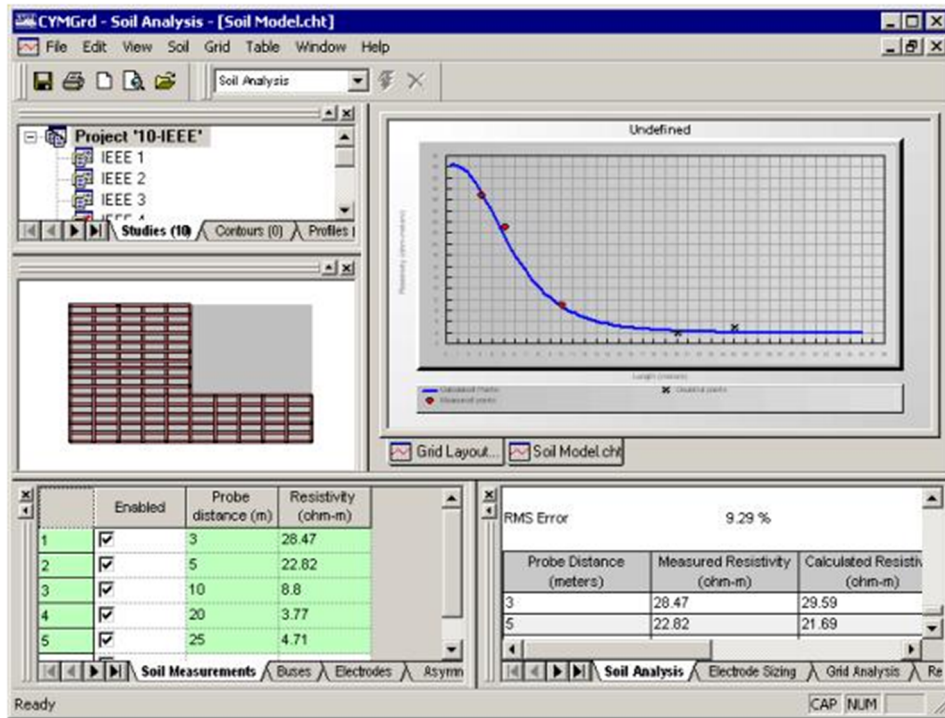
Ölçülen V ve I değerlerine, topraklama kazığının boyuna (b) ve kazıklar arası uzaklığa (a) göre toprak özdirenci (ρ) aşağıdaki bağıntıyla bulunur:

$$\rho = \frac{4\pi a(V/I)}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right]} \quad (5.1)$$

Eğer a, b'den çok büyük ise b ihmal edildiğinde (5.1) eşitliği (5.2) eşitliğine dönüşmektedir.

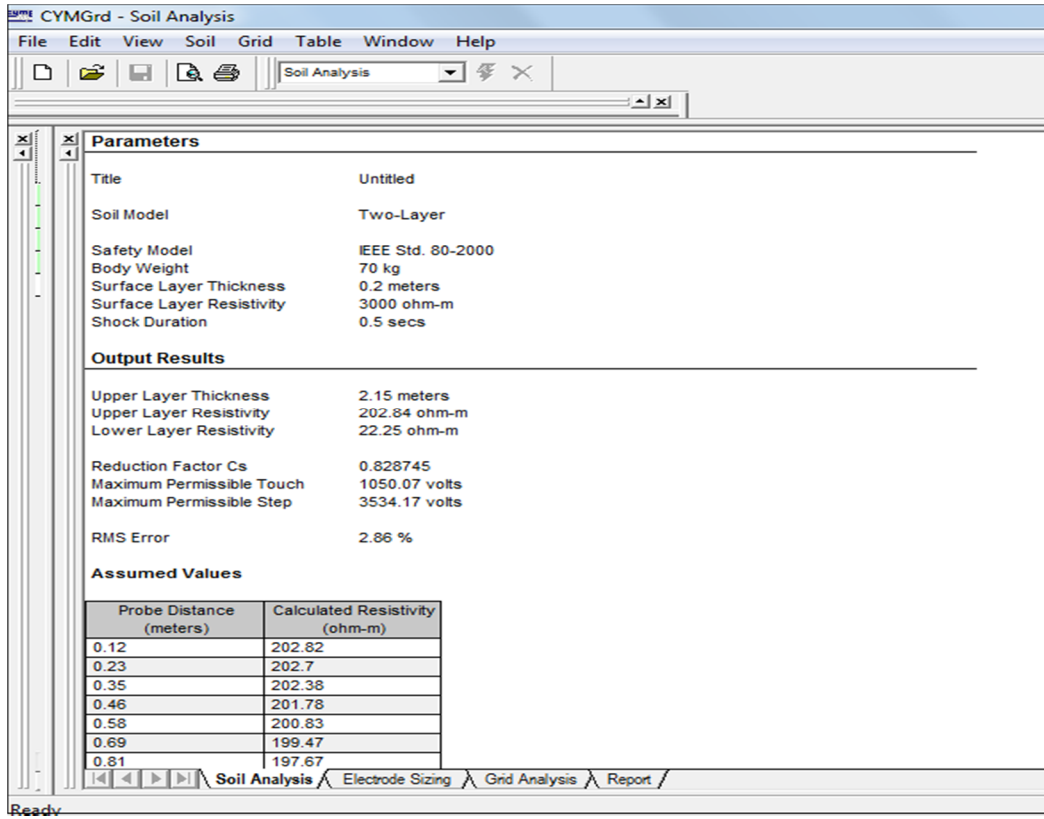
$$\rho = 2\pi a(V/I) \quad (5.2)$$

Yazılımın toprak analiz modülü Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Bu modüle Wenner yöntemi ile ölçülen toprak özdirençleri girilir.



Şekil 5.2: Toprak analiz modülü.

Toprak analizinin yapılmasında sonra elde edilen sonuçları Şekil 5.3'de gösterilen toprak analiz raporunda yer alır.

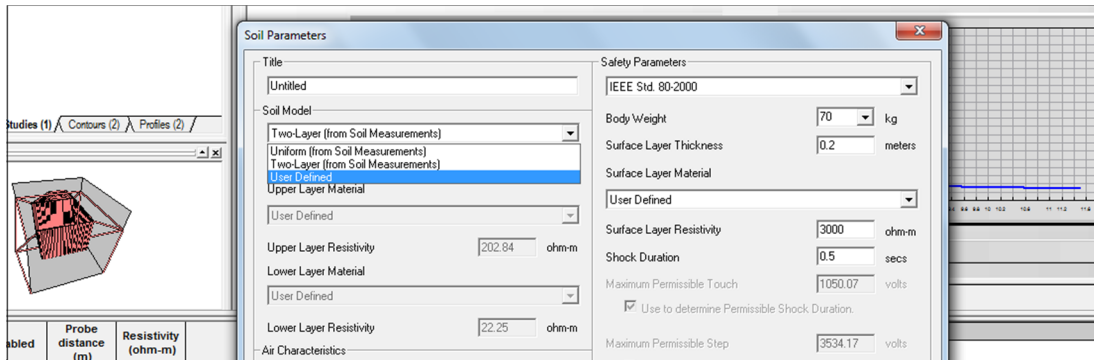


Şekil 5.3: Toprak analiz raporu.

5.2 Toprak Modelinin Belirlenmesi

CYMGRD yazılımı tek tabaka (düzgün) ve iki tabaka toprak modeli seçim imkanı sunmaktadır. Şekil 5.4’de görüldüğü gibi kullanıcı tarafından da tanımlanabilir, yazılıma girilebilmektedir.

Yazılım iki tabaka toprak modeli için alt tabaka kalınlığını sonsuz alıp, üst tabaka kalınlığını kullanarak üst ve alt tabaka toprak öz dirençlerini hesaplar. Tek tabaka seçilirse yazılım girilen toprak öz direnç ölçümlerinin ortalama değerlerini alarak hesaplama yapar.



Şekil 5.4: Toprak model tipi görünümü.

5.3 Toprak Öz direnci Hesaplama Algoritması

İki tabakalı toprak modelinde görünür toprak öz direnci ρ_a eşitlik (5.3) ile alt tabaka kalınlığı sonsuz alınarak hesaplanır. Yazılım Wenner yöntemi ile ölçülen ve eşitlik (5.3) ile hesaplanan öz direnç değerleri arasındaki hata fonksiyonunu (5.4) minimum yaparak en uygun toprak tabaka öz dirençlerini (ρ_1, ρ_2) ve kalınlığını(h) belirler.

$$\rho_a / \rho_1 = 1 + 4 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{((\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1))^n}{\sqrt{1 + (2 \cdot n \cdot h / a)^2}} - \frac{((\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1))^n}{\sqrt{4 + (2 \cdot n \cdot h / a)^2}} \right] \quad (5.3)$$

ρ_1 : üst tabaka toprak öz direnci [$\Omega.m$]

ρ_2 : alt tabaka toprak öz direnci [$\Omega.m$]

h: üst tabaka kalınlığı [m]

n: 1'den ∞ 'a değişen tamsayı

a: elektrot aralığı [m]

Yazılım aşağıdaki fonksiyon minimize ederek, en uygun ρ_1, ρ_2 ve h değerlerinin bulur.

$$f(x) = \sum_{n=1}^N \left[\left(\rho_{mi} - \rho(i) \right)^2 / \rho_{mi}^2 \right] \quad (5.4)$$

ρ_{mi} : çubuk mesafelerine göre ölçülen toprak öz direnci [$\Omega.m$]

$\rho(i)$: çubuk mesafelerine göre hesaplanan toprak öz direnci [$\Omega.m$]

Öz direnç ölçümleri ve direnç değerleri değerlendirilirken düşey toprak tabakaları dikkate alınmayıp, yatay toprak tabakaları kullanılır [25].

5.4 İzin Verilen En Yüksek Adım ve Dokunma Gerilimleri Hesabı

Yazılım tarafından izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimleri, IEEE Std. 80-2000 standardına göre farklı vücut ağırlıkları için (5.13), (5.14), (5.15), (5.16) numaralı eşitliklerde verilmiştir.

İzin verilen dokunma ve adım gerilimlerini sade şekilde ifade edersek:

$$E_{dokunma} = (R_B + R_f / 2) \cdot I_B \quad (5.5)$$

$$E_{adım} = (R_B + 2 \cdot R_f) \cdot I_B \quad (5.6)$$

R_B : İnsan vücut direnci [Ω]

R_F : Ayak geçiş direnci [Ω]

I_B : İzin verilen en yüksek vücut akımı [A]

İnsan vücut direnci R_B , 50 kg ve 70 kg canlılar için 1000 Ω kabul edilir.

Ayak geçiş direnci (5.7) eşitliği ile hesaplanır.

$$R_F = \frac{\rho}{4 \cdot b} \quad (5.7)$$

Burada ρ toprak özdirenci, b ayak temas yüzeyi yarıçapıdır. b yaklaşık olarak 0.08 m alınarak (5.8) eşitliği ile hesaplanır.

$$R_F = \frac{\rho}{(4) \cdot (0.08)} = 3 \cdot \rho \quad \Omega \quad (5.8)$$

IEEE Std. 80-2000'e göre izin verilen en yüksek vücut akımı:

$$50 \text{ kg vücut ağırlığı için: } I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (5.9)$$

$$70 \text{ kg vücut ağırlığı için: } I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (5.10)$$

bulunur.

t_s arıza açma süresi [s]

İzin verilen dokunma ve adım gerilimini yüksek tutmak için yüksek özdirence sahip yüzey tabakası eklenebilir. Böyle bir durumda ayak geçiş direncine etkisi C_s yüzey tabakası azaltma katsayısı ile bulunur.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot (1 - \rho / \rho_s)}{2h_s + 0.09} \quad (5.11)$$

ρ_s toprağın yüzey kısmının özdirenci [$\Omega \cdot m$]

h_s yüksek dirençli yüzey malzemesinin kalınlığı [m]

Yüzey tabakası azaltma katsayısının etkisi R_F ayak geçiş direnci ile çarpılarak eşitlik (5.12) gibi bulunur.

$$R_F = \frac{\rho}{4 \cdot b} \cdot C_s \quad (5.12)$$

Bulanan R_F , R_B , I_B ve C_s değerlerini eşitlik (5.5) ve (5.6) yerine koyarsak:

Vücut ağırlığının 50 kg olması durumunda dokunma ve adım gerilimleri:

$$E_{dokunma} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (5.13)$$

$$E_{adım} = (1000 + 6,0 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (5.14)$$

Vücut ağırlığının 70 kg olması durumunda dokunma ve adım gerilimleri:

$$E_{dokunma} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (5.15)$$

$$E_{adım} = (1000 + 6,0 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (5.16)$$

olarak bulunur. Canlıların güvenliği açısından topraklama ağları, adım ve dokunma gerilimleri bu değerleri geçmeyecek şekilde tasarlanır.

6. RÜZGAR TÜRBİNLERİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ ÜÇ BOYUTLU TASARIMI

Bu bölümde, CYMGRD yazılımı kullanılarak rüzgar türbin temel topraklaması incelenmektedir. Toprak modeli, geometrik model ve benzetimler ile elde edilen sonuçların doğrulanması için M. Salay Naderi ve diğerlerinin çalışması referans alınmıştır [28]. Yazılım bir veya iki tabakadan oluşan topraklarda, simetrik veya asimetrik yapıya sahip topraklama ağlarının analizini yapmaktadır. Bu analiz sonucunda topraklama direnci, toprak tabaka öz dirençlerini, toprak potansiyel yükselmesi, yüzey tabakası azaltma katsayısı (Cs), adım ve dokunma gerilimlerini hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar iki ve üç boyutlu grafikler ile gösterilmektedir. Yazılım IEEE Std. 80-2000'e göre adım ve dokunma gerilimlerini hesaplar. Bu hesaplar iki ve üç boyutlu grafiklerde kullanılarak topraklama ağının güvenliği konusunda bilgi verilir.

Bu çalışmada durum 1 olarak adlandırılan bir rüzgar türbin topraklama ağı, yazılım ile tasarlanıp formüller ile de doğrulanarak yapılmıştır. Daha sonra farklı durumlarda, topraklama sistemi şekli, elektrot ve iletken boy değişimlerinin adım gerilimi, dokunma gerilimi ve topraklama direncine etkileri incelenmiştir. Devamında, rüzgar türbinleri birbirine bağlanarak, çeşitli bağlantı şekillerinin, adım gerilimi, dokunma gerilimi ve topraklama direncine etkileri incelenmiştir.

Aşağıda bu çalışmada incelenen rüzgar türbini topraklama tasarımları açıklanmıştır.

Durum 1: Bölüm 6.1'de hesapları yapılan rüzgar türbini topraklama tasarımı CYMGRD yazılımı ile tekrar yapılmıştır. Sonuçlar birbirini doğrulamaktadır.

Durum 2: Durum 1'de tasarlanan topraklama ağını çevreleyen Şekil 6.1'deki kare biçimindeki topraklama iletkeni uzunluğu %21 oranında azaltılıp Şekil 6.8'deki halka biçimine getirilerek inceleme tekrarlanmıştır.

Durum 3: Durum 1'de tasarlanan, Şekil 6.1'deki topraklama ağında köşelerde yer alan topraklama elektrotlarının boyları %17 oranında azaltılarak, 3 m'den 2.5 m'ye Şekil 6.11'de görüldüğü gibi kısaltılmış ve inceleme tekrarlanmıştır.

Durum 4: Durum 1’de tasarlanan, Şekil 6.1’deki topraklama ağında köşelerde yer alan topraklama elektrotlarının boyları %17 oranında artırılıp, 3 m’den 3.5 m’ye Şekil 6.14’de görüldüğü gibi uzatılarak inceleme yapılmıştır.

Durum 5: Durum 1’de tasarlanan Şekil 6.1’deki topraklama ağındaki donatıların aralıkları %100 oranında artırılıp, Şekil 6.17’de görüldüğü gibi 20 cm’den 40 cm’ye uzatılarak inceleme yapılmıştır.

Durum 6: Durum 1’de tasarlanan topraklama ağının tek kullanılması için izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimlerini aşmamalıdır. Bu amaç ile Şekil 6.1’deki topraklama ağı uzunluğu ek topraklama ağları ile %51 artırılıp, Şekil 6.20’deki ağ tasarlanarak inceleme yapılmıştır.

Durum 7: Durum 1’de tasarlanan, Şekil 6.1’de gösterilen topraklama ağındaki temel donatılar ihmal edilerek Şekil 6.23’deki topraklama ağı oluşturulmuş ve inceleme yapılmıştır.

6.1 Durum 1

Bu durumda iki tabaka toprak modeli için temel donatıları dikkate alınarak Şekil 6.1’de gösterilen topraklama ağı tasarlanmıştır. Yazılım ile yapılan tasarım hesaplamalar ile tekrarlanmıştır. Toprak modeli ve topraklama ağı boyut bilgileri için M. Salay Naderi ve diğerlerinin çalışması referans alınmıştır [28].

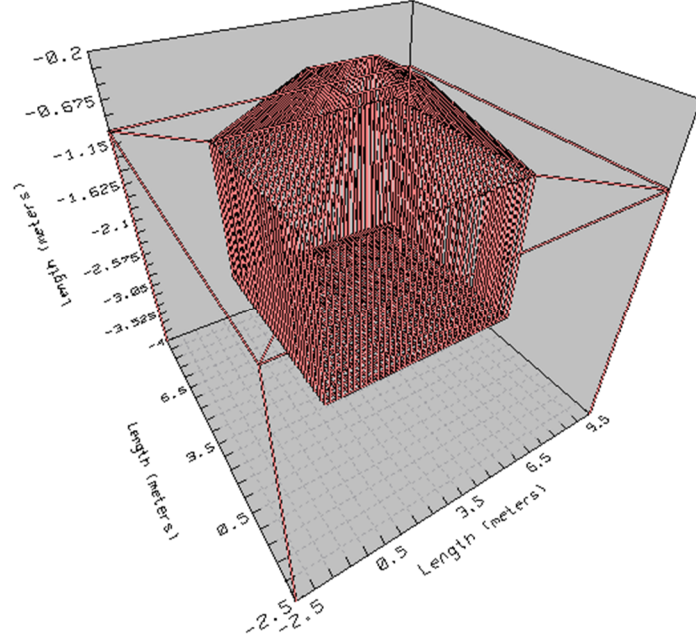
6.1.1 Topraklama ağı, elektrotlar ve iletkenlerin tasarımı

Rüzgar türbini temel topraklama elektrotları ve iletkenlerinin boyutları seçilirken en yüksek arıza akımına, mekanik strese dayanacak şekilde seçilmelidir. İletken, elektrot ve topraklama ağı bilgileri Çizelge 6.1’de yer almaktadır.

Çizelge 6.1: Durum 1 için topraklama ağı parametreleri [28].

Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Topraklama elektrodu uzunluğu	3 m
Temel boyutları (en x boy x derinlik)	7 m x 7 m x 2.5 m
Donatı aralığı	20 cm
Topraklama ağı çevre uzunluğu	4 x 12 m = 48 m

Çizelge 6.1'deki parametrelere göre yazılımda çizilen rüzgar türbini temel topraklamasının üç boyutlu görünümü Şekil 6.1'dedir.



Şekil 6.1: Durum 1 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.

6.1.2 Toprak öz direncinin belirlenmesi

Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'deki veriler yazılım tarafından eşitlik (5.3)'de kullanılarak tabaka öz dirençleri ve kalınlığı Çizelge 6.4'de gösterildiği hesaplanmıştır. Temel içerisindeki elektrotları çevreleyen betonun öz direnci etrafındaki toprak ile eşit kabul edilmiştir.

Çizelge 6.2: Toprak verileri.

Yüzey tabakasının kalınlığı	20 cm
Yüzey tabakasının öz direnci	3000 Ω .m
Ortam sıcaklığı	40°C

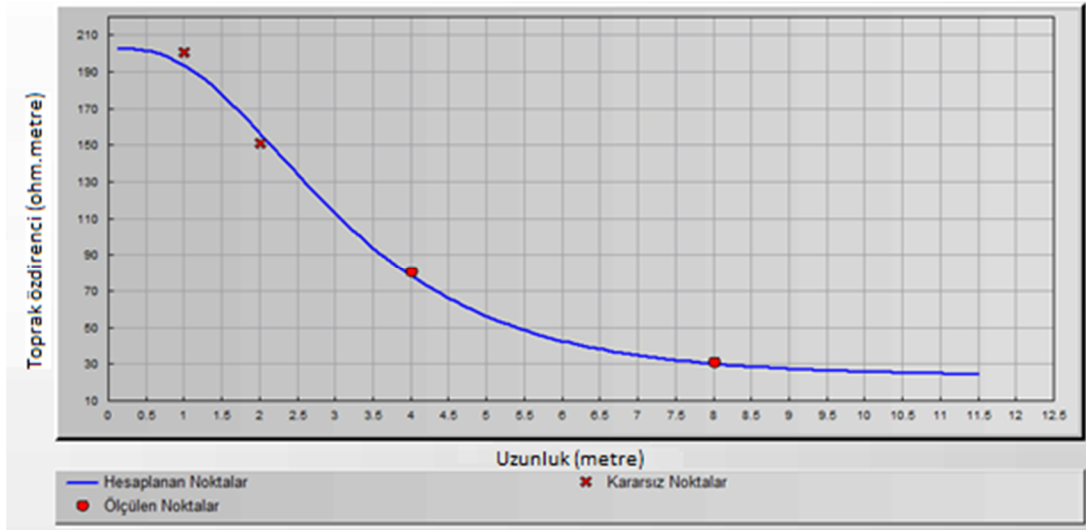
Çizelge 6.3: Wenner yöntemi ile ölçülen toprak özdirenci değerleri [28].

Elektrot aralığı (m)	Toprak özdirenci ($\Omega.m$)
1	200
2	150
4	80
8	30

Çizelge 6.4: Hesaplanan toprak verileri.

Üst tabaka özdirenci	202.84 $\Omega.m$
Üst tabaka kalınlığı	2.15 m
Alt tabaka özdirenci	22.25 $\Omega.m$

Yapılan toprak analizi sonucunda elde edilen toprak özdirencinin uzaklığa bağlı değişimi Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2: Topraklama çubukları arasındaki uzaklığın değişimi ile toprak özdirencinin değişimi.

Bu bölümde hesaplamalarda kullanılan deneysel formüller, tek tabaka toprak için görünür toprak özdirenci ile hesaplar yapmaktadır. Bu yüzden üst tabaka özdirenci 202.84 $\Omega.m$, alt tabaka özdirenci 22.25 $\Omega.m$ olarak hesaplanan toprağın, görünür toprak özdirenci hesaplanmalıdır. Görünür toprak özdirenci, Şekil 6.2’de görüldüğü gibi Wenner yöntemi ile 8 metre uzaklığa kadar ölçülen toprak özdirenci değerlerinin kararlılığa ulaştığı nokta olan 7.5 m’deki 32 $\Omega.m$ olarak belirlenmiştir.

6.1.3 Topraklama direnci hesabı

Topraklama direnci yazılım tarafından $R_g = 0.929457 \, \Omega$ olarak belirlenmiştir. Bu bölümde topraklama direncini doğrulamak amacı ile Sverak ve Schwarz yöntemleri ile tekrar hesaplama yapılmıştır.

Sverak yöntemi ile topraklama direnci, Çizelge 6.5'deki parametreler (6.1) eşitliğinde kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.5: Sverak yöntemi için parametreler.

Özellik	Değer
Toprak öz direnci, ρ	32 $\Omega.m$
Topraklama ağını kapladığı alan, A	144 m ²
Elektrot ve iletkenlerin toplam uzunluğu, L_T	250 m + 993 m = 1243 m
Ağın gömülme derinliği, h	1 m

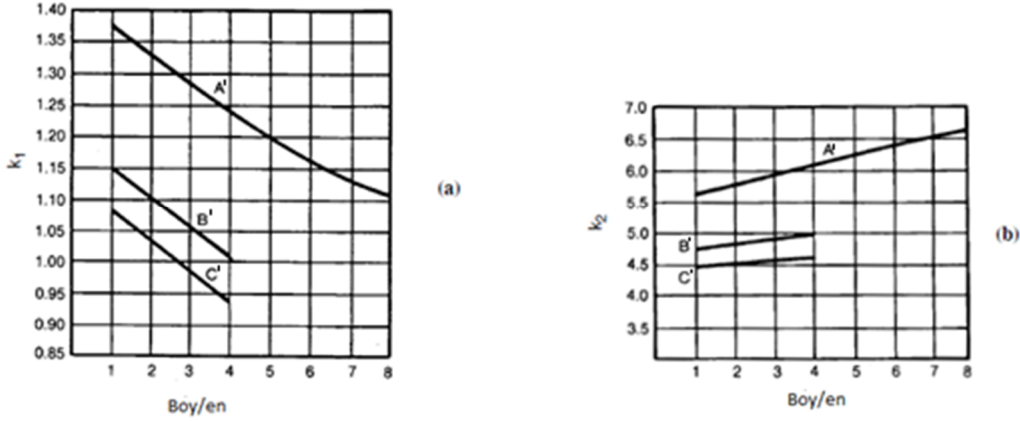
$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] = 1.056 \, \Omega \quad (6.1)$$

Schwarz yöntemi ile Çizelge 6.6'daki verileri eşitlik (6.2), (6.4), (6.6) ve (6.8)'de kullanarak topraklama direncini hesaplarsak:

Çizelge 6.6: Schwarz yöntemi için parametreler.

Özellik	Değer
İletkenlerin toplam uzunluğu, L_c	993 m
İletken çapı, 2a	0.016 m
Ağın gömülme derinliği, h	1 m
a'	$\sqrt{a \cdot 2h}$
Ağ alanı, A	144 m ²
Boy/en oranı, x	1
Toprak öz direnci, ρ	32 $\Omega.m$
Elektrotların ortalama uzunluğu, L_r	1.7 m
Elektrot çapı, 2b	0.016 m
Elektrot sayısı, n_R	144
k_1 katsayısı	1.18
k_2 katsayısı	4.92

Schwarz formülü katsayıları, k_1 ve k_2 Şekil 6.3 ve Çizelge 6.7 kullanılarak Çizelge 6.8'deki gibi hesaplanır;



Şekil 6.3: Schwarz yöntemi için k_1 ve k_2 katsayıları: (a) k_1 , (b) k_2 [1].

Çizelge 6.7: k_1 ve k_2 parametre hesabı.

Eğri	h	k_1	k_2
A'	0	$-0.04x + 1.41$	$0.15x + 5.50$
B'	$1/10.(A)^{1/2}$	$-0.05x + 1.20$	$0.10x + 4.68$
C'	$1/6.(A)^{1/2}$	$-0.05x + 1.13$	$-0.05x + 4.40$

Çizelge 6.8: k_1 ve k_2 parametreleri.

h	k_1	k_2
0	1.37	5.65
1	1.18	4.92
1.2	1.15	4.78
2	1.08	4.35

Çizelge 6.6'da verileri aşağıdaki eşitlik (6.2), (6.4), (6.6) ve (6.8)'de kullanarak topraklama direncini hesaplırsak:

Ağ iletkenleri direnci:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (6.2)$$

$$R_1 = \frac{32}{\pi \cdot 993} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 993}{\sqrt{0.008 \cdot 2 \cdot 1}} \right) + \frac{1.18 \cdot 993}{\sqrt{144}} - 4.92 \right] = 1.05 \Omega \quad (6.3)$$

Elektrotların direnci:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (6.4)$$

$$R_2 = \frac{32}{2 \cdot \pi \cdot 144 \cdot 1.7} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot 1.7}{0.008} \right) - 1 + \frac{2 \cdot 1.18 \cdot 1.7}{\sqrt{144}} (\sqrt{144} - 1)^2 \right] = 0.96 \Omega \quad (6.5)$$

Ağ ve elektrotlar arası karşılıklı direnç:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (6.6)$$

$$R_m = \frac{32}{\pi \cdot 993} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 993}{1.7} \right) + \frac{1.18 \cdot 993}{\sqrt{144}} - 4.92 + 1 \right] = 1.033 \Omega \quad (6.7)$$

Eşdeğer direnç:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (6.8)$$

$$R_g = \frac{1.05 \cdot 0.96 - 1.033^2}{1.05 + 0.96 - 2 \cdot 1.033} = 1.055 \Omega \quad (6.9)$$

bulunur.

Analitik yöntemler ve yazılımın sonuçlar karşılaştırıldığında aralarında yaklaşık yüzde 13 bağıl hata bulunmaktadır. Analitik yöntem tek tabakalı toprak için sabit gömülme derinliğine sahip, yatay yerleştirilmiş iletken ve düşey yerleştirilmiş elektrotlarla oluşturulan topraklama ağlarında, topraklama dirençleri doğrulukla hesaplamaktadır [29]. Bu çalışmada olduğu gibi birden çok tabakadan oluşan, derinliği kendi içerisinde değişen asimetrik yapıdaki topraklama ağlarında yazılım daha doğru sonuçlara vermektedir.

6.1.4 Dokunma gerilimi hesabı

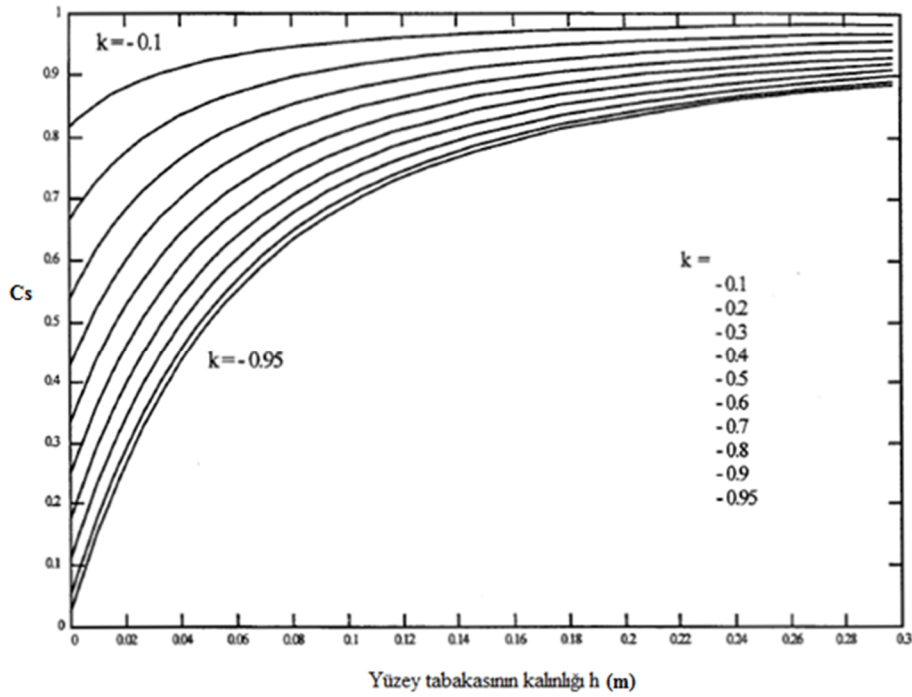
Dokunma gerilimi, yüzey potansiyeli ile toprak potansiyel yükselmesi arasındaki farktır. Ağ tasarlanırken IEEE Std. 80-2000'e göre izin verilen en yüksek dokunma gerilimi belirlenerek, bu gerilimi aşmayacak şekilde dokunma gerilimine sahip bir ağ tasarlanmaya çalışılır.

Bölüm 5.5’de ayrıntıları ile verilen (5.15) eşitliği ile yazılım tarafından 1050.07 V olarak hesaplanan izin verilen en yüksek dokunma gerilimini doğrulamak için Çizelge 6.9’daki verileri kullanarak hesaplama yaparsak:

Çizelge 6.9: İzin verilen en yüksek dokunma gerilimi hesabı için parametreler.

Özellik	Değer
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasını öz direnci, ρ_s	3000 $\Omega.m$
Üst tabaka toprak öz direnci, ρ	202.84 $\Omega.m$
Yüzey tabakasının kalınlığı, h_s	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 s
Vücut ağırlığı	70 kg

Öncelikle yazılım tarafından Şekil 6.4 kullanılarak 0.828745 olarak hesaplanan yüzey tabakası azaltma katsayısını, (6.10) eşitliğini kullanarak hesaplırsak [1], [30]:



Şekil 6.4: h 'ya karşılık gelen C_s değerleri [1].

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} = 0.828745 \quad (6.10)$$

bulunur. Yazılım tarafından hesaplanan yüzey tabakası azaltma katsayısı ve formülle hesapladığımız değer arasında fark oluşmuştur. Bu farkın sebebi yazılım Şekil 6.4'ü kullanarak grafik üzerinden daha doğru olarak değeri belirlemesidir.

İzin verilen en yüksek dokunma gerilimi:

$$E_{dokunma70} = \frac{(R_B + 1.5C_S \cdot \rho_S) \cdot 0.157}{\sqrt{t_s}} = 1050.07 \text{ V} \quad (6.11)$$

bulunur.

6.1.5 Adım gerilimi hesabı

Adım gerilimi topraklama geriliminin, insanın 1m'lik adım açıklığı ile köprüleyebildiği bölümüdür. Ağ tasarlanırken izin verilen en yüksek adım gerilimi belirlenerek bu gerilimi aşmayacak şekilde adım gerilimine sahip bir ağ tasarlanmaya çalışılır.

Topraklayıcı yakınında potansiyel değişimi en büyük değeri aldığından, topraklayıcıya yakın olan yerlerde adım gerilimi daha büyük değerler alır ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım geriliminin değeri düşer.

Yazılım tarafından 3534.17 V olarak hesaplanan izin verilen en yüksek adım gerilimini doğrulamak için Çizelge 6.10'daki verileri kullanarak hesaplarsak:

Çizelge 6.10: İzin verilen en yüksek adım gerilimi hesabı için parametreler.

Özellik	Değer
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasının öz direnci, ρ_s	3000 $\Omega.m$
Azaltma katsayısı, C_s	0.828745
Yüzey tabakasının kalınlığı, h	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 s
Vücut ağırlığı	70 kg

İzin verilen en yüksek adım gerilimi:

$$E_{adım70} = \frac{(R_B + 6C_S \cdot \rho_S) \cdot 0.157}{\sqrt{t_s}} = 3534.17 \text{ V} \quad (6.12)$$

bulunur.

Yazılım tarafından 4398 V olarak hesaplanan toprak potansiyel yükselmesini (GPR) doğrulamak için Çizelge 6.11’de gösterilen verilere göre yaklaşık olarak hesaplarsak:

Çizelge 6.11 GPR hesabı için parametreler.

Özellik	Değer
Azaltma katsayısı, D_f	1.0517
Ayrılma katsayısı, S_f	1
Faz toprak arıza akımı, I_{LG}	4500 A
Topraklama direnci, R_g	0.929457

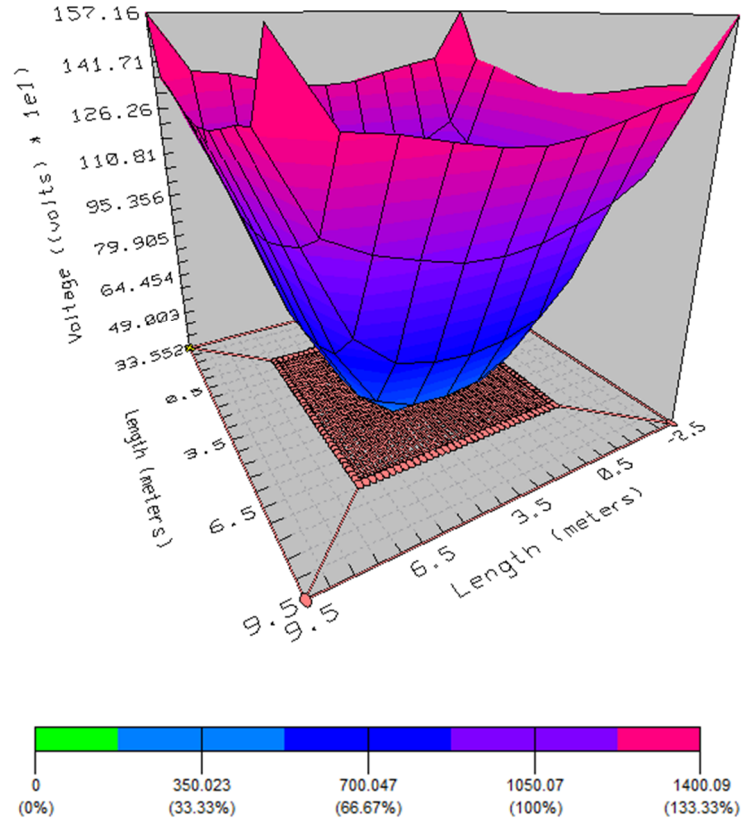
$$GPR = D_f \cdot S_f \cdot I_{LG} \cdot R_g = 4398 \text{ V} \quad (6.13)$$

bulunur.

Hesaplamalar sonucunda bu çalışmada IEEE Std. 80-2000’e göre güvenlik ölçütleri olarak; izin verilen en yüksek adım gerilim için 3534.17 V, izin verilen en yüksek dokunma gerilimi için 1050.07 V olarak belirlenmiştir.

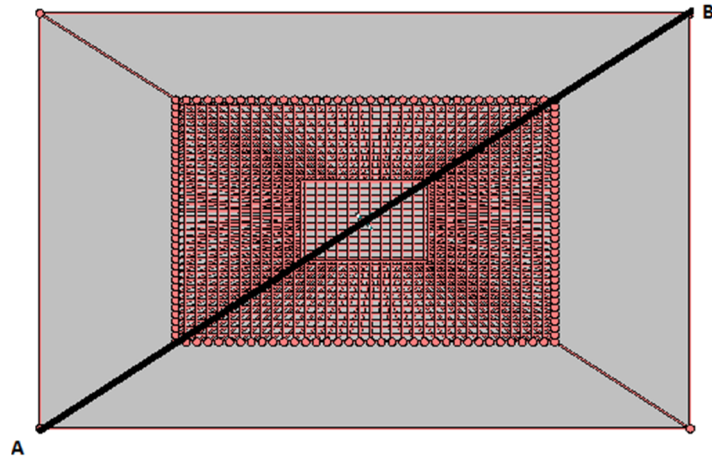
Analitik yöntemler ile sabit derinlikte, düşey ve yatay yerleştirilmiş iletken ve elektrotlardan oluşan sistemlerde hesaplamalar doğrulukla yapılabilmektedir. Fakat bu durumda incelediğimiz asimetrik yapıya sahip topraklama ağında, sonlu elemanlar yöntemi kullanan yazılım ile adım ve dokunma gerilimlerinin Şekil 6.5 ve Şekil 6.7’deki gibi hesaplanması daha doğrudur.

Şekil 6.5’deki potansiyel dağılımı incelendiğinde topraklama sisteminin köşelerinde 1571.5 V olan en yüksek dokunma gerilimi değeri, izin verilen en yüksek dokunma gerilimi 1050.07 V değerini aştığı görülmüştür. Bu dokunma gerilimi değeri canlılar için tehlike oluşturmaktadır. Topraklama ağının bu şekilde kullanılması güvenlik açısından uygun değildir.



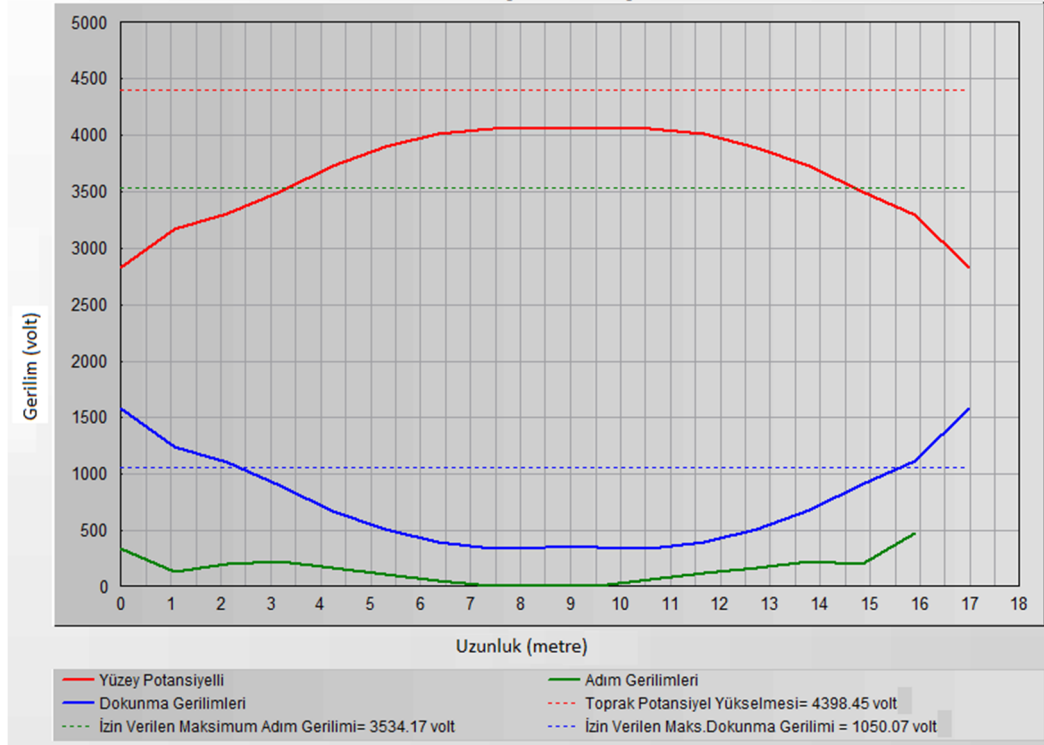
Şekil 6.5: Durum 1'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri.

Şekil 6.6'da topraklama ağının üstten görünümü gösterilmiştir. Şekil 6.7'deki adım ve dokunma gerilimleri iki boyutlu gösterimi, Şekil 6.6'daki A noktasından, B noktasına doğru hesaplanmaktadır. Yazılım bu çalışmada farklı durumlar için de hesaplanan iki boyutlu adım ve dokunma gerilimlerini [A,B] doğru parçasını referans alarak hesaplar.



Şekil 6.6: Durum 1'e göre tasarlanan topraklama ağı üstten görünümü.

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi, yazılım tarafından 468.94 olarak hesaplanan en yüksek adım gerilimi, izin verilen en yüksek adım gerilimi (3534.17 V) değerinden düşük olduğu için adım gerilimi canlılar açısından güvenli sınırlar içerisindedir.



Şekil 6.7: Durum 1’e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.

Bu topraklama ağı, dokunma gerilimi izin verilen değerleri aştığı için tek başına kullanılamaz. Tek başına kullanılabilmesi için durum 6’da Şekil 6.20’de tasarlandığı gibi ek iletken ve elektrotlar ile izin verilen gerilimleri aşmayacak biçimde yeniden tasarlanmalıdır. Eğer bu topraklama sistemine sahip rüzgar türbinleri ile rüzgar çiftliği oluşturulursa, Bölüm 6.8.1 olduğu gibi, oluşan yüksek adım ve dokunma gerilimlerinin düştüğü görülür.

6.2 Durum 2

Bu durumda, durum 1’de hesaplamalarını yaptığımız toprak modelini için, topraklama ağı tasarımını değiştirerek dokunma ve adım gerilimleri ve topraklama direncindeki değişimleri incelenmiştir.

Durum 1’deki topraklama ağı tasarımında, kare şeklinde ağ çevresini uzunluğu %21 oranında azaltılıp, halka şeklinde tasarlayarak yazılım ile incelenmiştir. Topraklama ağı Çizelge 6.12’deki bilgileri kullanarak Şekil 6.8’deki gibi tasarlanmıştır. Analiz sonuçlar Çizelge 6.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.12: Durum 2 için topraklama ağı tasarımı bilgileri.

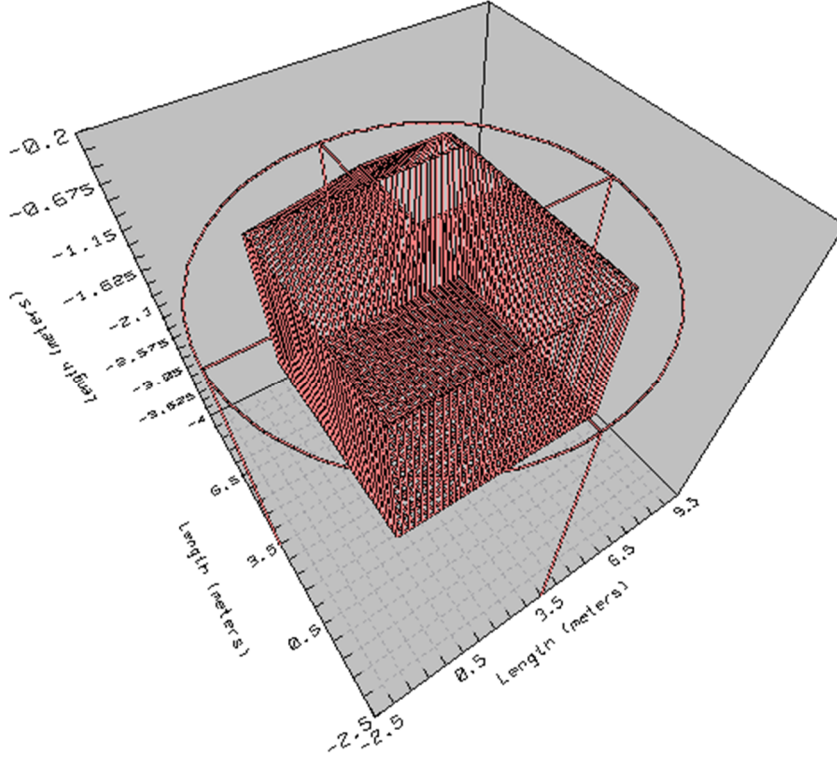
Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasının özdirenci	3000 $\Omega.m$
Yüzey tabakasının kalınlığı	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 sn
Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Temel boyutları	7 m x 7 m x 2.5 m
Donatı aralığı	20 cm
Toplam elektrot ve iletken uzunluğu, L_T	250 m + 979 m = 1229 m
Topraklama ağı çevresi uzunluğu	$2.\pi.6 = 37.7$ m
Topraklama ağı alanı, A	114 m ²

Çizelge 6.13: Durum 1 ve Durum 2’deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması.

Durum	En yüksek Dokunma Gerilimi (V)	En yüksek Adım Gerilimi (V)	Topraklama Direnci R_g (Ω)	GPR (V)	Azaltma Katsayısı C_s
1	1571.5	468.94	0.929457	4398.45	0.828745
2	2622.72	970.9	0.999	4732.08	0.828745

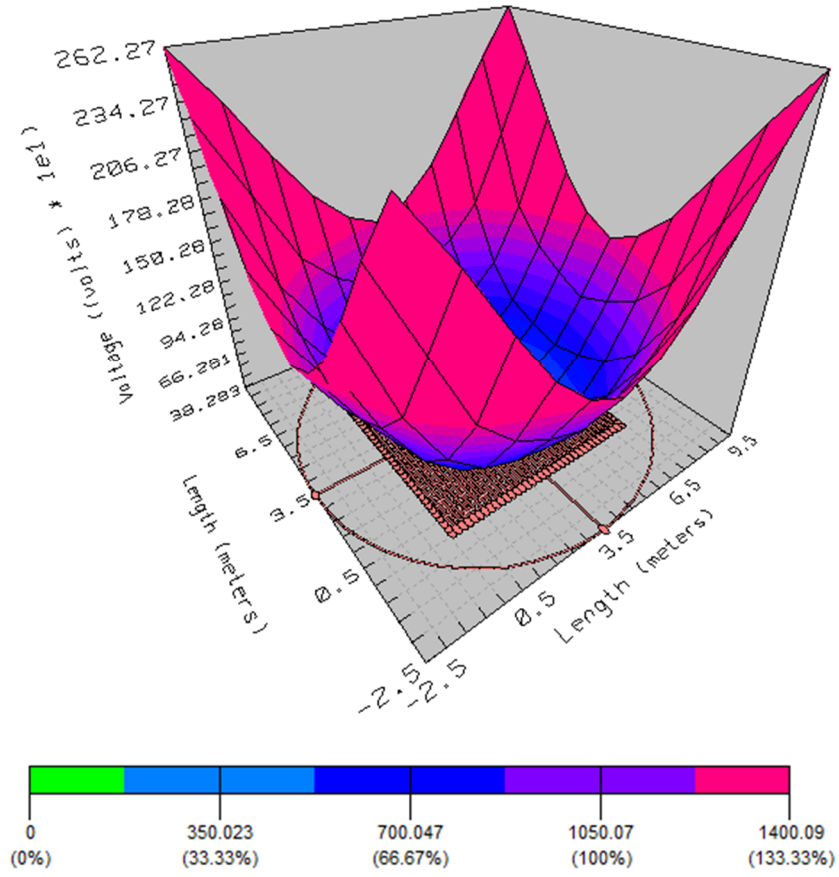
Sonuçlar incelendiğinde, durum 1’e göre köşe noktalarda oluşan en yüksek dokunma geriliminde %67 ve en yüksek adım geriliminde %107 oranında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tasarımda izin verilen en yüksek dokunma gerilimi (1050.07 V) aşıldığı için tek başına kullanımı uygun olmayıp ek elektrot ve iletkenler ile iyileştirilmeli ya da rüzgar çiftliği oluşturulacaksa diğer türbin topraklama ağlarına bağlanarak güvenlik ölçütlerini sağlayacak hale getirilmelidir.

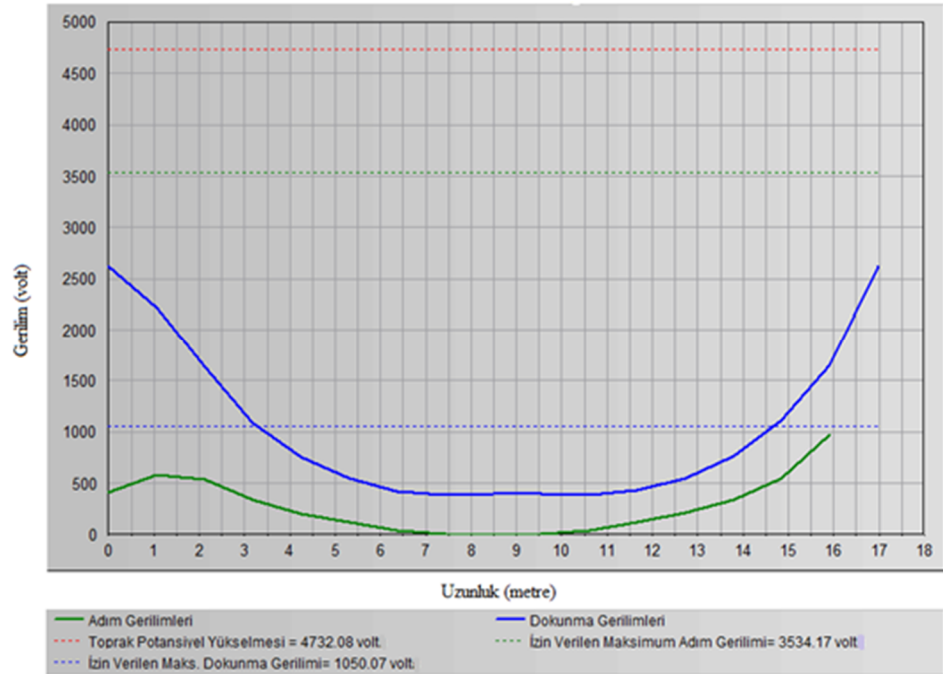


Şekil 6.8: Durum 2 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.

Dokunma geriliminin üç boyutlu, adım ve dokunma gerilimlerinin iki boyutlu olarak mesafeye göre değişimleri Şekil 6.9’da ve Şekil 6.10’da gösterilmiştir.



Şekil 6.9: Durum 2'ye göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri.



Şekil 6.10: Durum 2'ye göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.

6.3 Durum 3

Bu durumda toprak modelini değiştirmeden, durum 1’de tasarlanan şekil 6.1’deki topraklama ağı kőşelerindeki topraklama elektrotlarının boyları %17 oranında azaltılarak 3 m’den 2.5 m’ye kısaltılmış ve topraklama direnci, dokunma ve adım gerilimlerinin değişimleri incelenmiştir. Topraklama ağı, yazılım ile Çizelge 6.14 kullanılarak şekil 6.11’deki gibi tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.14: Durum 3 için topraklama ağı tasarımı bilgileri.

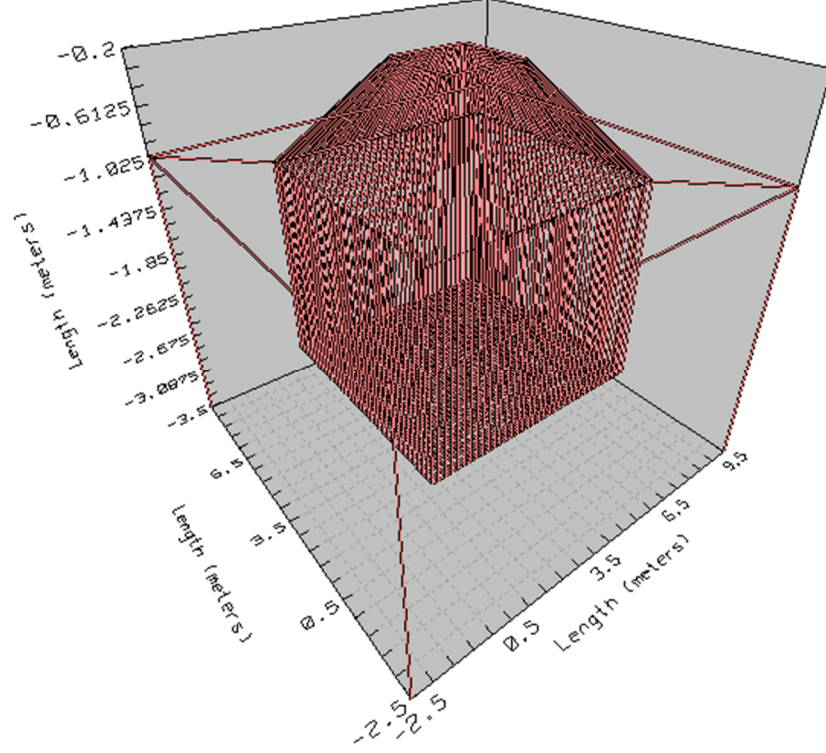
Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasının özdirenci	3000 $\Omega.m$
Yüzey tabakasının kalınlığı	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 sn
Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Temel boyutları	7 m x 7 m x 2.5 m
Donatı aralığı	20 cm
Toplam elektrot ve iletken uzunluğu, L_T	248 m + 993 m = 1241 m
Topraklama ağı çevresi uzunluğu	48 m
Topraklama ağı alanı, A	144 m ²

Çizelge 6.15: Durum 1 ve Durum 3’deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması.

Durum	En yüksek Dokunma Gerilimi (V)	En yüksek Adım Gerilimi (V)	Topraklama Direnci R_g (Ω)	GPR (V)	Azaltma Katsayısı C_s
1	1571.5	468.94	0.929457	4398.45	0.828745
3	1657.48	493.95	0.954	4517.52	0.828745

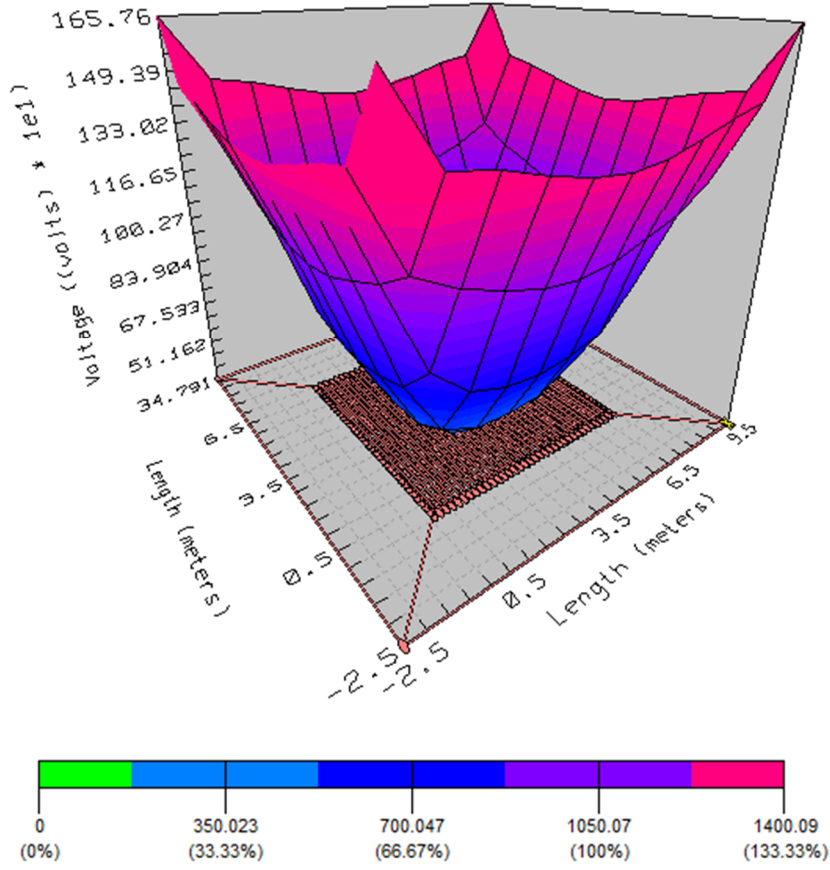
Sonuçlara bakıldığında durum 1’e göre köşe noktalarda oluşan en yüksek dokunma ve adım geriliminde gerilimde %5 oranında artış olmuştur.

Şekil 6.12’de görüldüğü üzere izin verilen en yüksek dokunma gerilimi (1050.07 V) aşılmaktadır. Bu yüzden bu tasarımın kullanımı uygun olmayıp ek topraklama ağı ile iyileştirilmeli veya rüzgar çiftliği oluşturulacaksa diğer türbin topraklama ağlarına bağlanarak izin verilen en yüksek dokunma gerilim değerini aşmayacak şekilde tasarlanmalıdır.

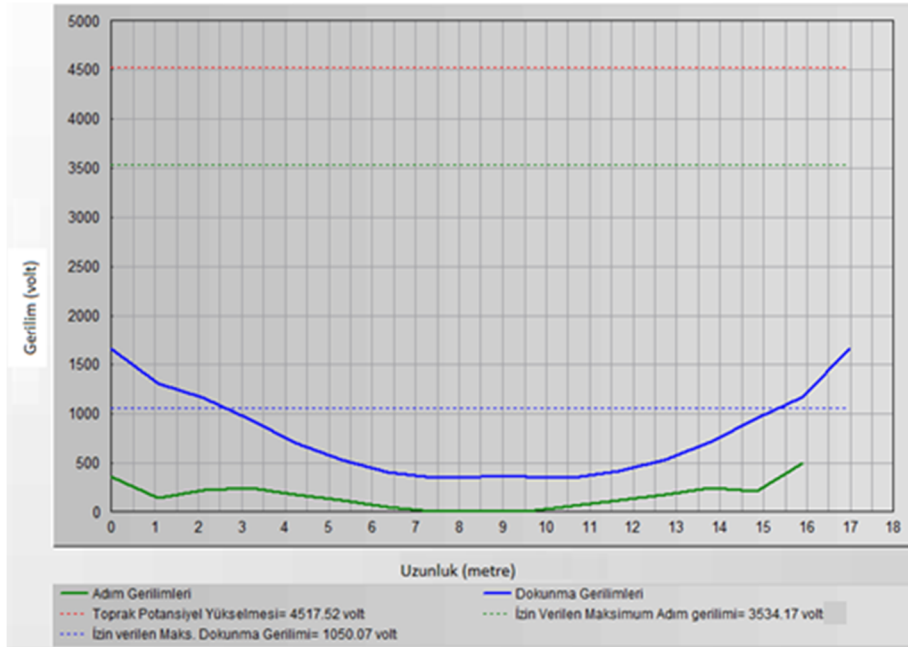


Şekil 6.11: Durum 3 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.

Durum 4 için dokunma geriliminin üç boyutlu, adım ve dokunma gerilimlerinin iki boyutlu olarak mesafeye göre değişimleri Şekil 6.12’de ve Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12: Durum 3'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri.



Şekil 6.13: Durum 3'e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.

6.4 Durum 4

Durum 1’de, Şekil 6.1’de gösterilen topraklama ağında, köşelerdeki topraklama elektrotları boyları %17 oranında artırılarak 3 m’den 3.5 m’ye uzatılmış, dokunma ve adım gerilimleri ile topraklama direncindeki değişimler incelenmiştir. Çizelge 6.16’daki değerler ile Şekil 6.14’de gösterilen topraklama ağı tasarlanmıştır. Yazılımla yapılan inceleme sonucunda durum 1 ve durum 4’ün karşılaştırılması Çizelge 6.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.16: Durum 4 için topraklama ağı tasarımı bilgileri.

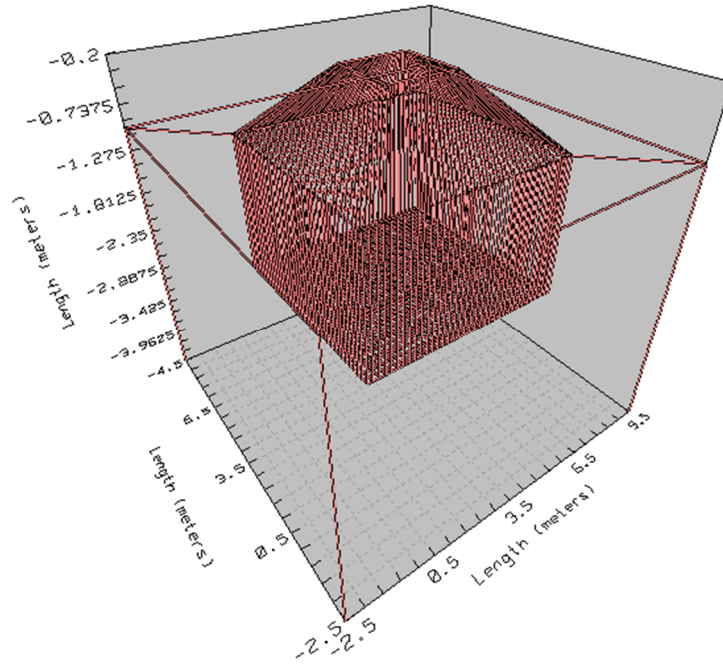
Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasının özdirenci	3000 $\Omega.m$
Yüzey tabakasının kalınlığı	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 sn
Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Temel boyutları	7 m x 7 m x 2.5 m
Donatı aralığı	20 cm
Toplam elektrot ve iletken uzunluğu, L_T	252 m + 993 m = 1245 m
Topraklama ağı çevresi uzunluğu	48 m
Topraklama ağı alanı, A	144 m ²

Çizelge 6.17: Durum 1 ve Durum 4’deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması.

Durum	En yüksek Dokunma Gerilimi (V)	En yüksek Adım Gerilimi (V)	Topraklama Direnci R_g (Ω)	GPR (V)	Azaltma Katsayısı C_s
1	1571.5	468.94	0.929457	4398.45	0.828745
4	1496.64	446.52	0.905	4286.32	0.828745

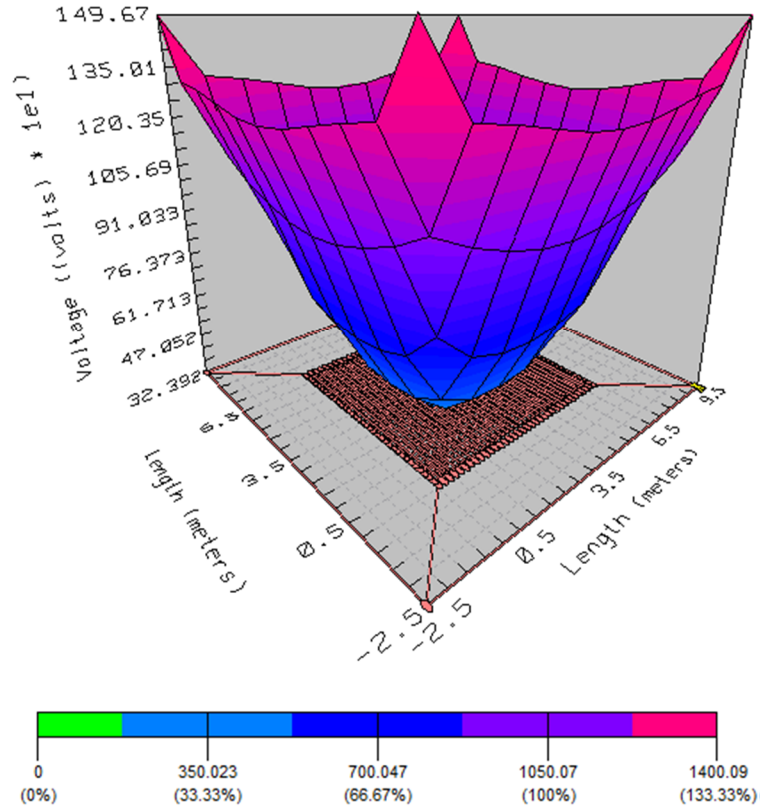
Çizelge 6.17’de gösterilen sonuçlar incelendiğinde durum 1’e göre köşe noktalarda oluşan en yüksek dokunma ve adım geriliminde %5 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 6.14’de görüldüğü üzere bu tasarımda uzatılan elektrot boylarına rağmen izin verilen en yüksek dokunma gerilimi (1050.07 V) aşıldığı için bu tasarımın tek başına kullanımı uygun değildir. Bu topraklama ağı ek elektrot ve iletkenler ile iyileştirilmeli ya da rüzgar çiftliği oluşturularak topraklama ağı genişletilip güvenlik ölçütlerini sağlayacak hale getirilmelidir.

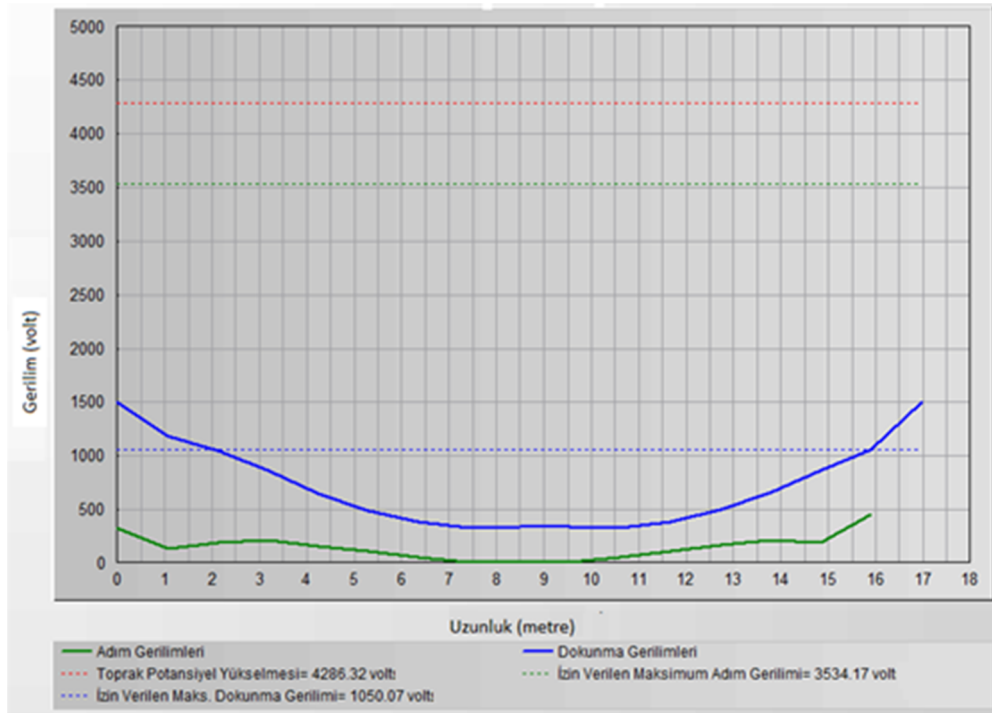


Şekil 6.14: Durum 4 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.

Aşağıda dokunma geriliminin üç boyutlu, adım ve dokunma gerilimlerinin iki boyutlu olarak mesafeye göre değişimleri Şekil 6.15’de ve Şekil 6.16’da gösterilmiştir.



Şekil 6.15: Durum 4'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri.



Şekil 6.16: Durum 4'e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.

6.5 Durum 5

Bu durumda aynı toprak modelin için, durum1'deki topraklama ağındaki donatı aralıkları %100 oranında artırılarak Çizelge 6.18'de görüldüğü gibi 20 cm'den 40 cm'ye çıkarılmış, dokunma ve adım gerilimleri ve topraklama direncindeki değişimler incelenmiştir. Yeni oluşan topraklama ağı Şekil 6.17'de gösterilmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.18: Durum 5 için topraklama ağı tasarımı bilgileri.

Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasının özdirenci	3000 $\Omega.m$
Yüzey tabakasının kalınlığı	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 sn
Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Temel boyutları	7 m x 7 m x 2.5 m
Donatı aralığı	40 cm
Toplam elektrot ve iletken uzunluğu, L_T	133 m + 574 m = 707 m
Topraklama ağı çevresi uzunluğu	48 m
Topraklama ağı alanı, A	144 m ²

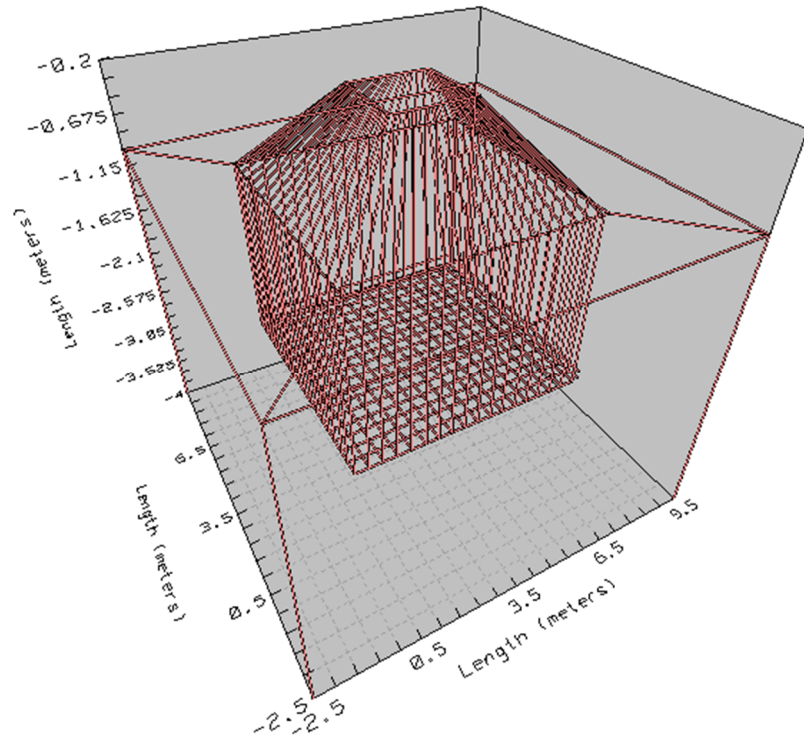
Çizelge 6.19: Durum 1 ve Durum 5'deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması.

Durum	En yüksek Dokunma Gerilimi (V)	En yüksek Adım Gerilimi (V)	Topraklama Direnci R_g (Ω)	GPR (V)	Azaltma Katsayısı C_s
1	1571.5	468.94	0.929457	4398.45	0.828745
5	1591.52	469.13	0.936	4431.57	0.828745

Çizelge 6.19'daki sonuçlara bakıldığında topraklama direnci ile köşe noktalarda oluşan en yüksek dokunma ve adım gerilimlerinde durum 1'e göre %1 oranında artış olduğu görülmektedir.

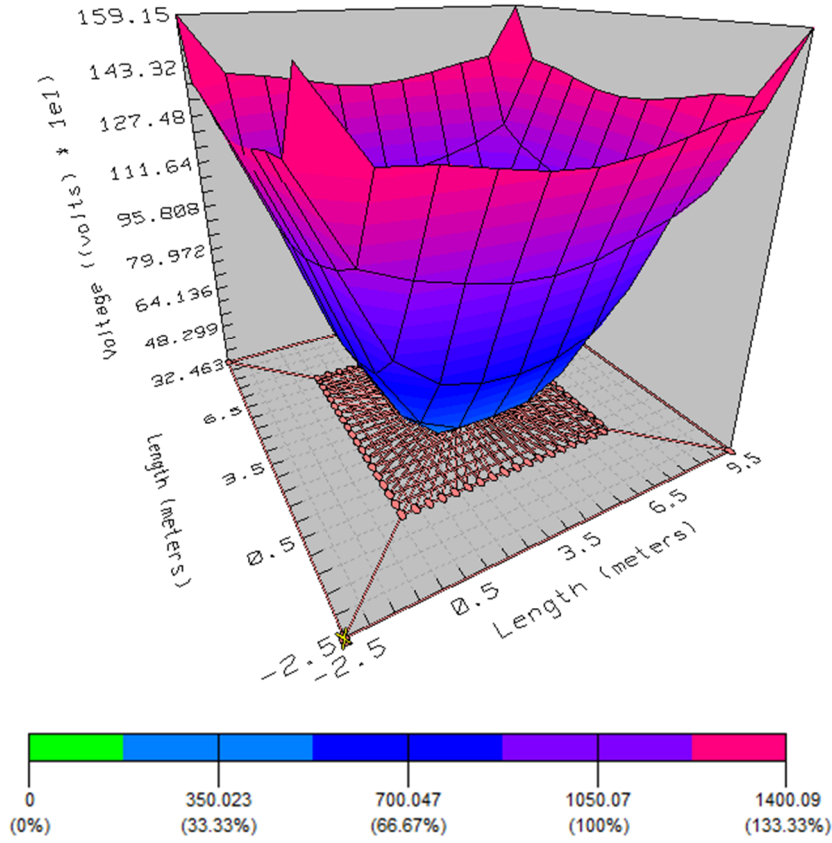
Şekil 6.18'deki dokunma gerilimleri incelendiğinde izin verilen en yüksek dokunma gerilimi (1050.07 V) aşıldığı görülmektedir. Bu tasarımın tek olarak kullanımı uygun olmayıp ek elektrot ve iletkenler ile iyileştirilmeli ya da rüzgar çiftliği oluşturulacak ise komşu türbin topraklama ağları birbirine bağlanarak izin verilen en yüksek dokunma gerilimini aşmayacak duruma getirilmelidir.

Sonuç incelendiğinden 40 cm aralıkla yerleştirilen donatıların oluşturduğu durum 5 ve 20 cm aralıkla yerleştirilen donatıların oluşturduğu durum 1'de oluşan gerilimler arasında küçük farklar vardır. Bu durum kullanılan malzeme az olduğu için ekonomik olarak durum 5'i daha avantajlı yapar. Fakat deprem yönetmeliğine [31] göre en fazla 20 cm donatı aralığı olacak şekilde tasarlanan temelin, zemin şartlarına göre donatı aralıklarının artırılması yer bilimciler ve inşaat mühendisleri tarafında verilmesi gereken bir karardır.

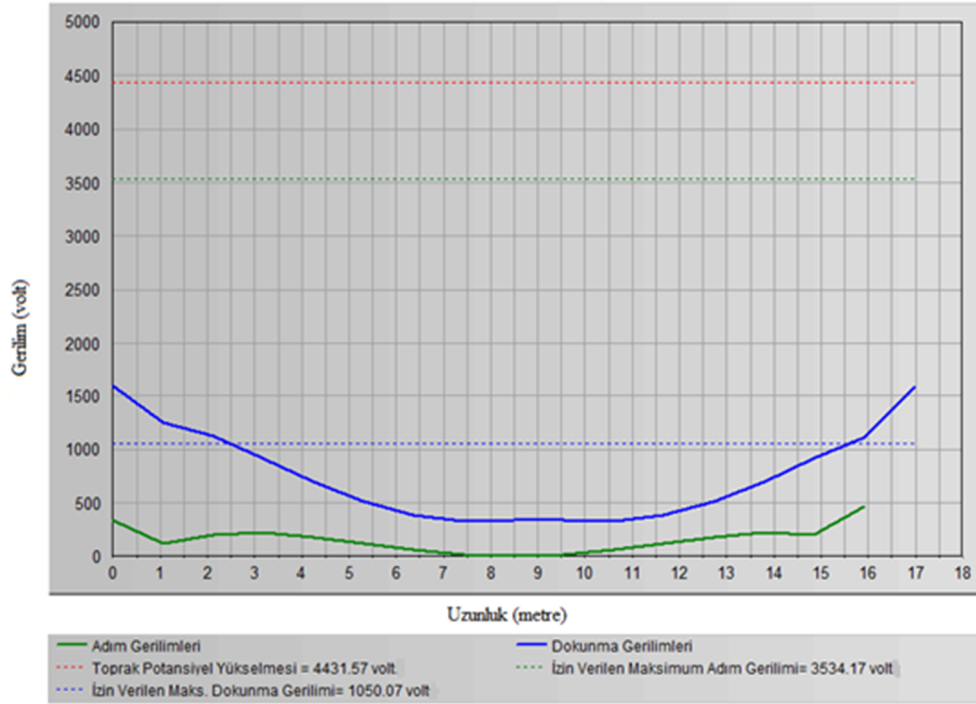


Şekil 6.17: Durum 5 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.

Dokunma geriliminin üç boyutlu, adım ve dokunma gerilimlerinin iki boyutlu olarak mesafeye göre değişimleri Şekil 6.18'de ve Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.18: Durum 5'e göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri.



Şekil 6.19: Durum 5'e göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.

6.6 Durum 6

Yukarıdaki durumlarda incelendiğimizde adım gerilimleri güvenlik ölçütleri içerisinde yer almasına rağmen dokunma gerilimleri sınır değerlerini aşmaktadır. Buna rağmen rüzgar çiftlikleri oluşturulurken, rüzgar türbinleri birbirine bağlanacakları için bu gerilimlerde düşüşler yaşanacağı öngörülerek tasarımlar bu şekilde yapılmıştır.

Eğer rüzgar türbininin topraklama ağının başka bir türbine bağlanmadan, tek başına kullanılacağı durumda adım ve dokunma gerilimleri güvenlik ölçütleri içerisinde kalmalıdır.

Bu durumda, durum 1'deki rüzgar türbin topraklama ağını başka rüzgar türbin topraklama ağına bağlamadan tek kullanılacağı durum için topraklama ağı tasarlanırken, durum 1 topraklama ağı çevresine, ek topraklama ağı eklenerek uygun tasarım yapılmıştır. Bu durumda topraklama ağı toplam elektrot ve iletken uzunlukları %51 oranında artmıştır

Topraklama ağı Çizelge 6.20'de gösterilen veriler ile izin verilen en yüksek dokunma gerilimi (1050.07 V) ve izin verilen en yüksek adım gerilimini (3534.17 V) geçmeyecek biçimde Şekil 6.20'deki gibi tasarlanmıştır.

Çizelge 6.20: Durum 6 için topraklama ağı tasarımı bilgileri.

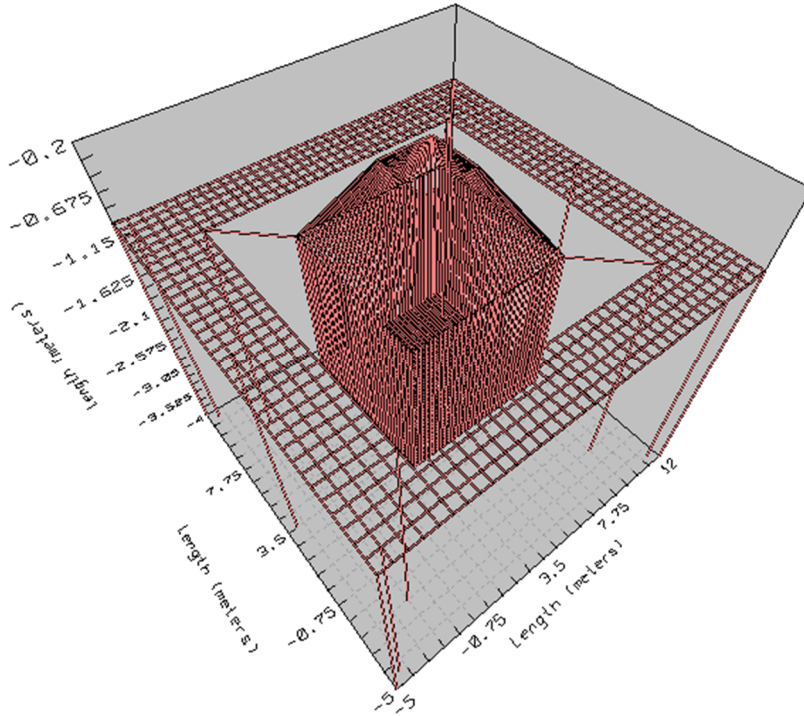
Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasının öz direnci	3000 $\Omega.m$
Yüzey tabakasının kalınlığı	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 sn
Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Temel boyutları	7 m x 7 m x 2.5 m
Donatı aralığı	20 cm
Toplam elektrot ve iletken uzunluğu, L_T	280 m + 1594 m = 1874 m
Topraklama ağı çevresi uzunluğu	68 m
Topraklama ağı alanı, A	289 m ²

Durum 1’de ve durum 6’da elde edilen sonuçların karşılaştırılması Çizelge 6.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.21: Durum 1 ve Durum 6’deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması.

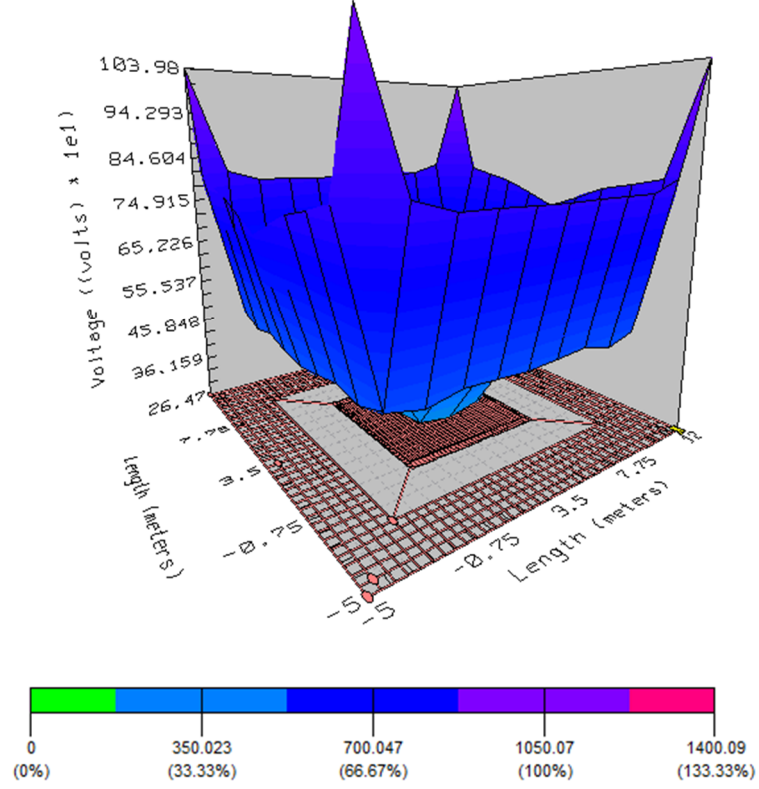
Durum	En yüksek Dokunma Gerilimi (V)	En yüksek Adım Gerilimi (V)	Topraklama Direnci R_g (Ω)	GPR (V)	Azaltma Katsayısı C_s
1	1571.5	468.94	0.929457	4398.45	0.828745
6	1039.82	363.51	0.683	3235.73	0.828745

Çizelge 6.21’deki sonuçlar incelendiğinde durum 1’e göre köşe noktalarda oluşan en yüksek dokunma geriliminde %34 ve en yüksek adım geriliminde %22 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan bu gerilimler izin verilen en yüksek dokunma gerilimi (1050.07 V) ve izin verilen en yüksek adım gerilimini (3534.17 V) geçmeyerek güvenli bir topraklama sistemi tasarlanmıştır.

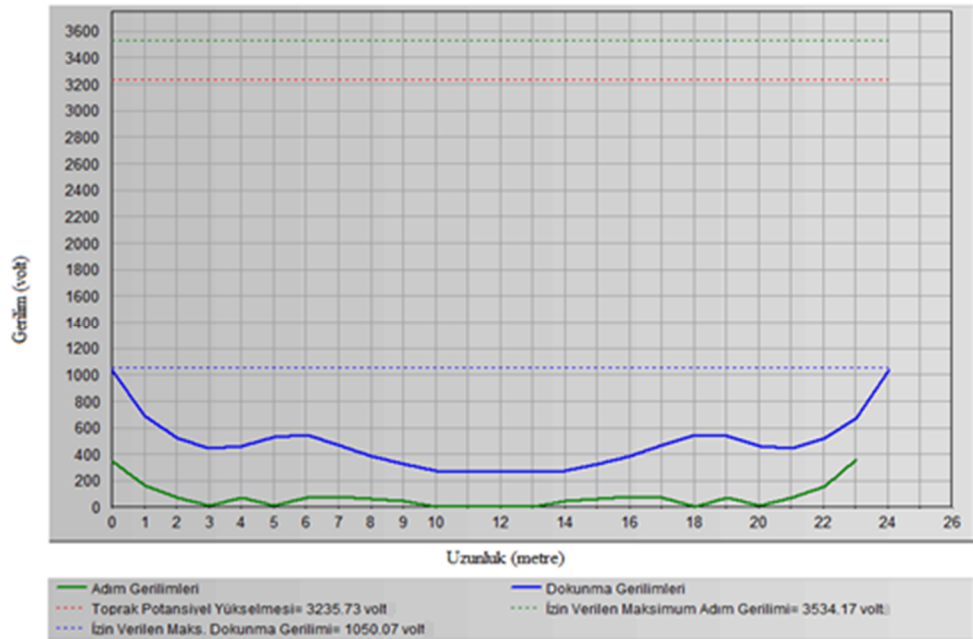


Şekil 6.20: Durum 6 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.

Durum 6 için dokunma geriliminin üç boyutlu, adım ve dokunma gerilimlerinin iki boyutlu olarak mesafeye göre değişimleri Şekil 6.21’de ve Şekil 6.22’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21: Durum 6’ya göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri.



Şekil 6.22: Durum 6’ya göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.

6.7 Durum 7

Bu durumda, yukarıdaki durumlarda hesaba kattığımız rüzgar türbininin temel betonu içerisindeki donatıları etkisini ihmal edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Çizelge 6.22’de gösterilen veriler kullanılarak topraklama sistemi Şekil 6.23’de görüldüğü gibi 4 adet elektrot yerleştirilerek yapılmıştır.

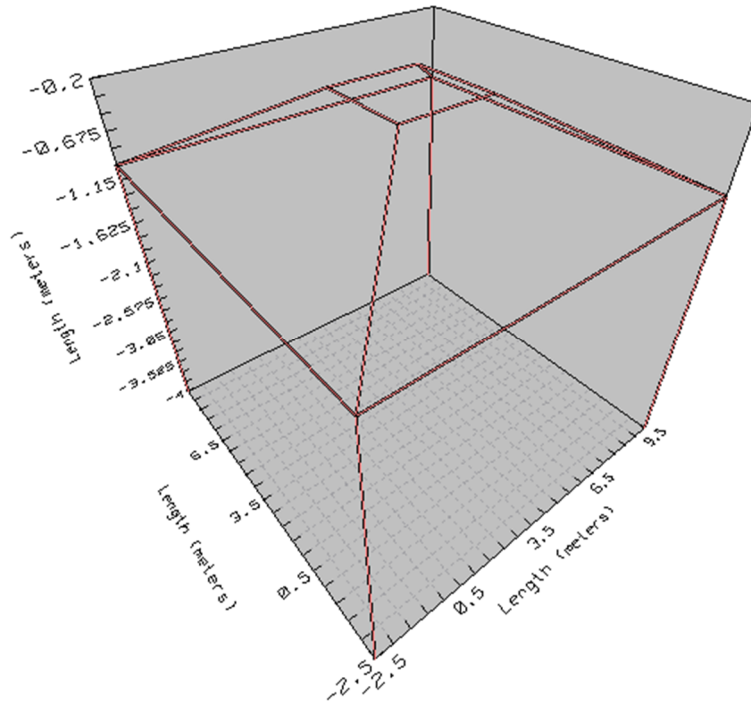
Çizelge 6.22: Durum 7 için topraklama ağı tasarımı bilgileri.

Özellik	Değer
Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci, R_B	1000 Ω
Yüzey tabakasının öz direnci	3000 $\Omega.m$
Yüzey tabakasının kalınlığı	0.2 m
Arıza açma süresi, t_s	0.5 sn
Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Toplam elektrot ve iletken uzunluğu, L_T	12 m + 85 m = 97 m
Topraklama ağı çevresi uzunluğu	48 m
Topraklama ağı alanı, A	144 m ²

Çizelge 6.23’de gösterilen sonuçlar incelendiğinde durum 1’e göre en yüksek dokunma geriliminde %146 ve en yüksek adım geriliminde %150 oranında artış gözlemlenmiştir. Buna göre temel betonu içerisindeki donatıların ihmal edilmesi durumunda topraklama sistemleri tasarımları doğru şekilde yapılamamaktadır. Donatıların etkilerini hesaba katmadan yapılan tasarımlarda güvenli bir topraklama ağı tasarımı yapmak için fazladan elektrot ve iletken kullanımı gerekecektir. Bu yüzden donatıların etkileri hesaba katılmalıdır.

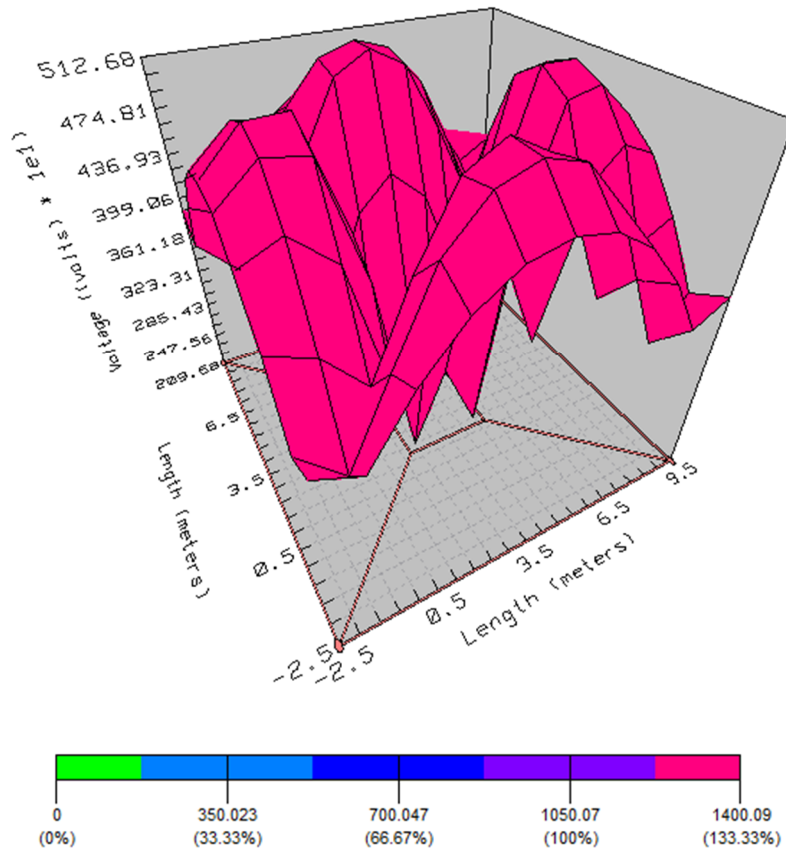
Çizelge 6.23: Durum 1 ve Durum 7’deki potansiyel ve direnç hesaplamalarının karşılaştırılması.

Durum	En yüksek Dokunma Gerilimi (V)	En yüksek Adım Gerilimi (V)	Topraklama Direnci R_g (Ω)	GPR (V)	Azaltma Katsayısı C_s
1	1571.5	468.94	0.929457	4398.45	0.828745
7	3866.35	1172.61	1.831	8665.46	0.828745

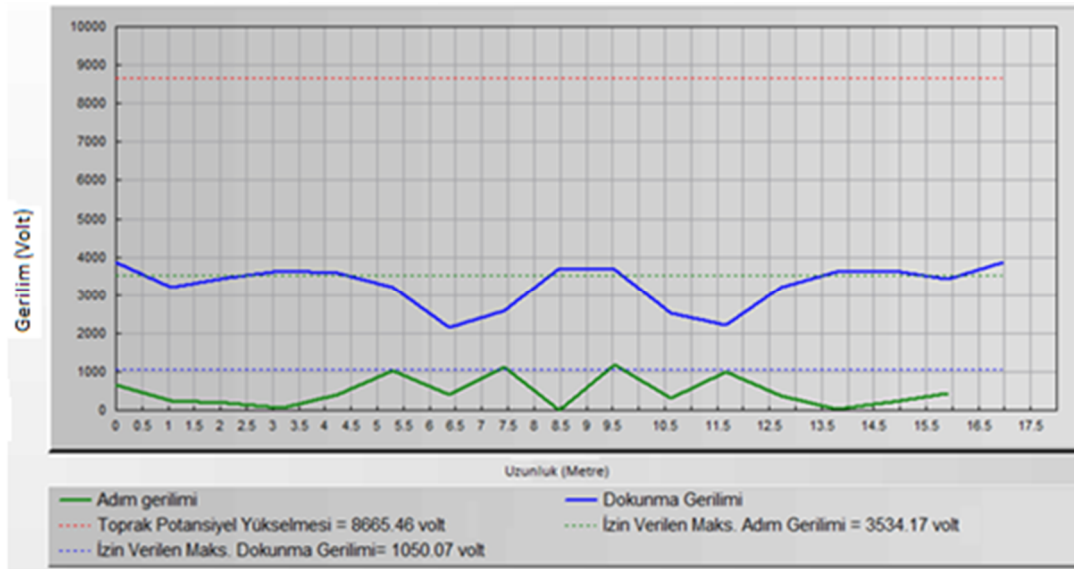


Şekil 6.23: Durum 7 için topraklama sisteminin üç boyutlu görünümü.

Aşağıda dokunma geriliminin üç boyutlu, adım ve dokunma gerilimlerinin iki boyutlu olarak mesafeye göre değişimleri Şekil 6.24’de ve Şekil 6.25’de gösterilmiştir.



Şekil 6.24: Durum 7'ye göre tasarlanan topraklama ağı için dokunma gerilimleri.



Şekil 6.25: Durum 7'ye göre tasarlanan topraklama ağı için adım ve dokunma gerilimleri.

6.8 Rüzgar Çiftliği

Yukarıda incelediğimiz rüzgar türbinlerinin dokunma ve adım gerilimlerini azaltarak canlılar için daha güvenilir hale getirmenin bir çözümü de her bir rüzgar türbini topraklama sistemini bir diğerine bağlamaktır. Rüzgar türbinleri 150 m, 2/0 awg bakır iletken ile birbirine bağlanmıştır.

Bağlantı 1 ve bağlantı 2’de, durum 1’deki rüzgar türbin topraklamasını, topraklama direnci aynı olacak (0.929457Ω) şekilde dört elektrot ile modellenerek, 16 adet rüzgar türbini birbirine bağlanmış ve incelenmiştir.

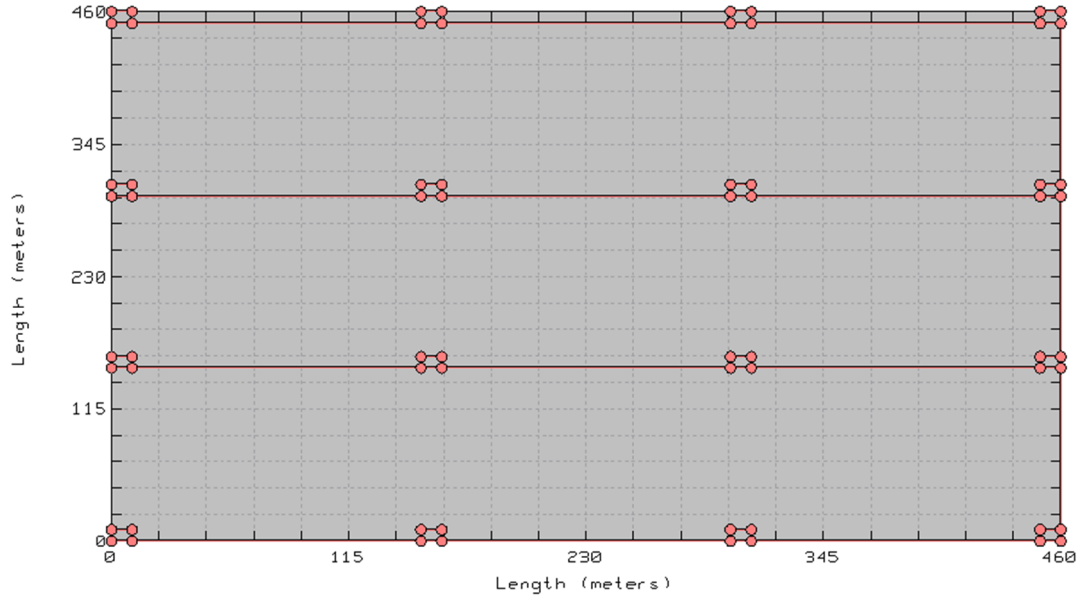
Bağlantı 3’de durum 7’deki donatıları ihmal edilen rüzgar türbin topraklaması tasarımına sahip 16 adet rüzgar türbini birbirine bağlanarak inceleme yapılmıştır.

Bağlantı 4’de her bir rüzgar türbini topraklama sistemi, topraklama direnci 10Ω ’u geçmeyecek şekilde tek bir elektrot tasarlanıp, 16 adet rüzgar türbini birbirine bağlanarak incelemeler yapılmıştır.

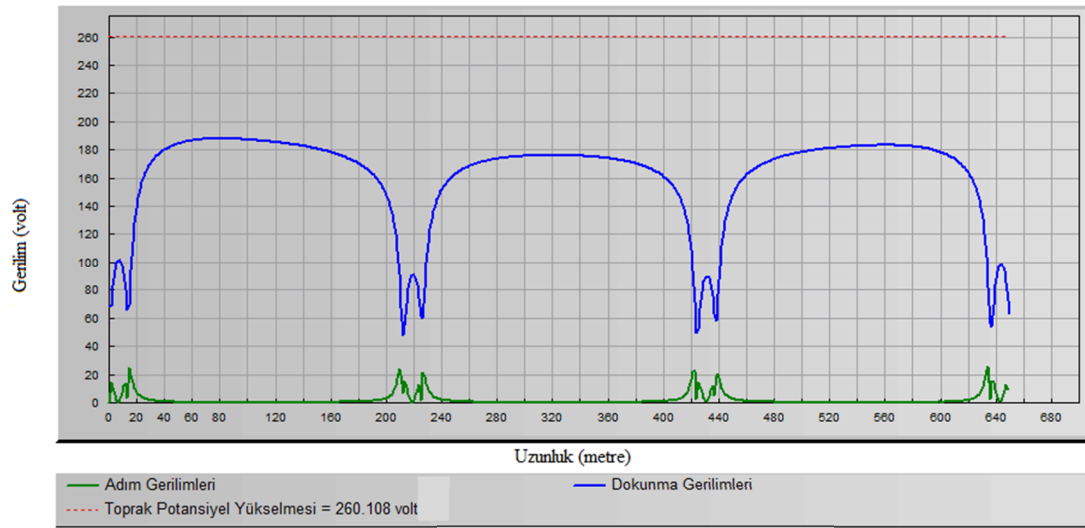
Bağlantı 5’de bağlantı 4’deki rüzgar çiftliği topraklama sisteminde rüzgar türbinlerini birbirine bağlayan hattın gömülme derinliği azaltılarak inceleme yapılmıştır.

6.8.1 Bağlantı 1

Şekil 6.26’da, durum 1’de yer alan rüzgar türbin topraklama ağları birbirine bağlanmıştır. Yazılım ile yapılan analiz sonucu en yüksek dokunma ve adım gerilimleri, Şekil 6.27’de gösterildiği gibi 188.01 V ve 25.51 V olarak belirlenmiştir. Bu değerler, rüzgar türbini topraklama ağı durum 1’de tek başına kullanıldığında oluşan en yüksek adım geriliminden (468.94 V) %95 oranında ve en yüksek dokunma geriliminden (1571.5 V) %88 oranında düşüktür ve izin verilen en yüksek dokunma (1050.07 V) ve adım gerilimlerinin (3534.17 V) altında değerler almıştır. Bu yüzden bu topraklama sisteminin kullanılması canlıların güvenliği açısından uygundur.



Şekil 6.26: Bağlantı 1 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı.

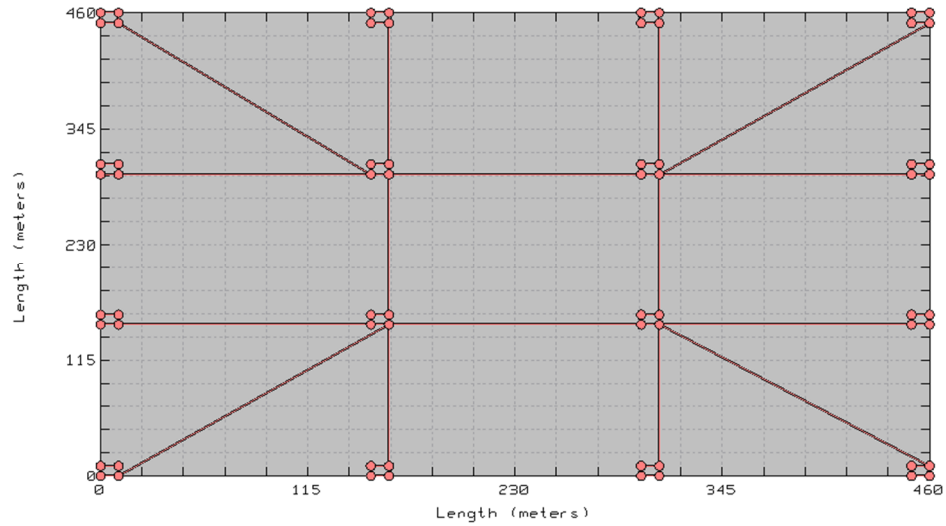


Şekil 6.27: Bağlantı 1'e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri.

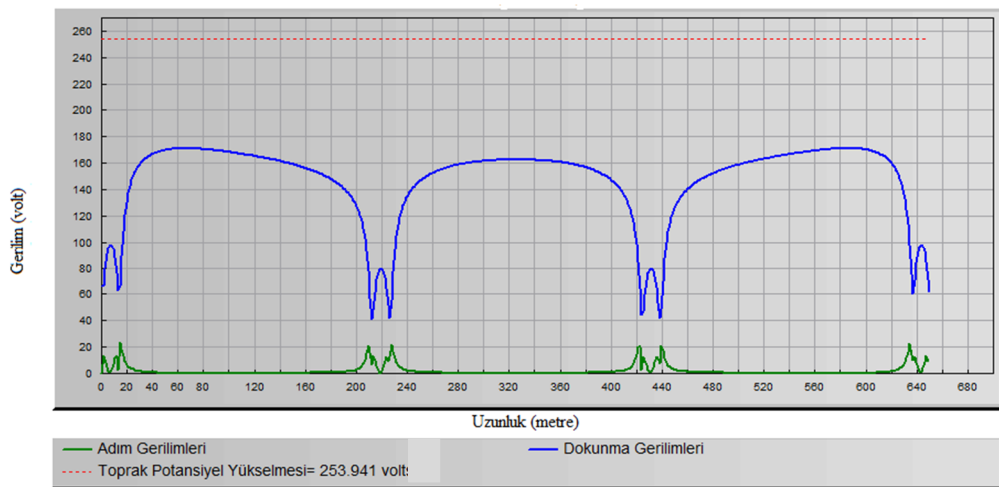
Bağlantı 2'de bu rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinlerinin birbirine bağlantı şekli değiştirilerek incelenmiştir.

6.8.2 Bağlantı 2

Şekil 6.28’de bağlantı 1’e göre rüzgar türbinlerinin birbirine bağlantı şekilleri değiştirilerek topraklama ağı oluşturulmuştur. Bunun sonucunda oluşan en yüksek dokunma ve adım gerilimleri Şekil 6.29’da görüldüğü gibi 171.26 V ve 23.19 V olarak belirlenmiştir. Şekil 6.28’de görüldüğü üzere bu bağlantıda rüzgar türbini topraklama ağlarını birbirine bağlayan iletkenlerin uzunluğu bağlantı 1’e göre %15 attığı için en yüksek dokunma ve adım geriliminde %9 oranında azalma olmuştur. Bu topraklama sistemi her bir türbinin topraklama ağının birbirine bağlanması sayesinde izin verilen en yüksek dokunma (1050.07 V) ve adım gerilimleri (3534.17 V) aşılmadığı için canlıların güvenliği açısından uygundur.



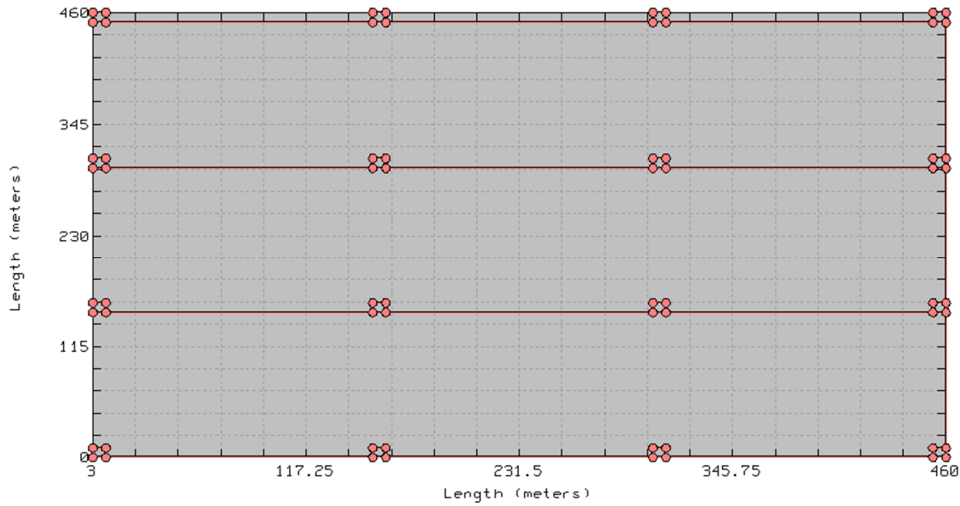
Şekil 6.28: Bağlantı 2 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı.



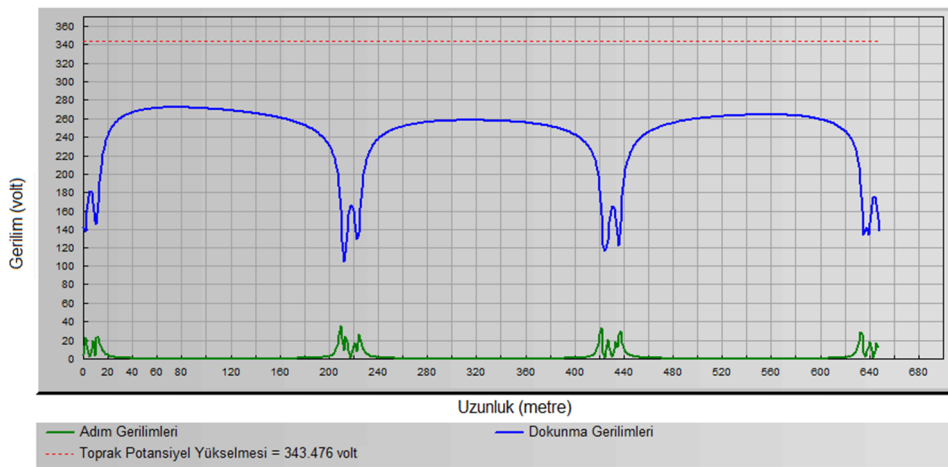
Şekil 6.29: Bağlantı 2’ye göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri.

6.8.3 Bağlantı 3

Durum 7’de yer alan temel içerisindeki donatıların ihmal edildiği topraklama ağı ile topraklaması yapılan 16 adet rüzgar türbini Şekil 6.30’daki gibi birbirine bağlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda Şekil 6.31’de en yüksek dokunma gerilimi %93 oranında azalarak 272.056 V ve en yüksek adım gerilimi %97 oranında azalarak 35.52 V olarak elde edilmiştir. Durum 7’de bir rüzgar türbini topraklama ağı için en yüksek adım gerilimi 1172.61 V, en yüksek dokunma gerilimi 3866.35 V olarak izin verilen değerleri aşarken, 16 adet türbin birbirine bağlanınca izin verilen en yüksek dokunma (1050.07 V) ve adım gerilimlerini (3534.17 V) aşmamıştır. Canlıların güvenliği açısından uygun bir topraklama sistemi oluşturulmuştur.



Şekil 6.30: Bağlantı 3 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı.



Şekil 6.31: Bağlantı 3’e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri.

6.8.4 Bağlantı 4

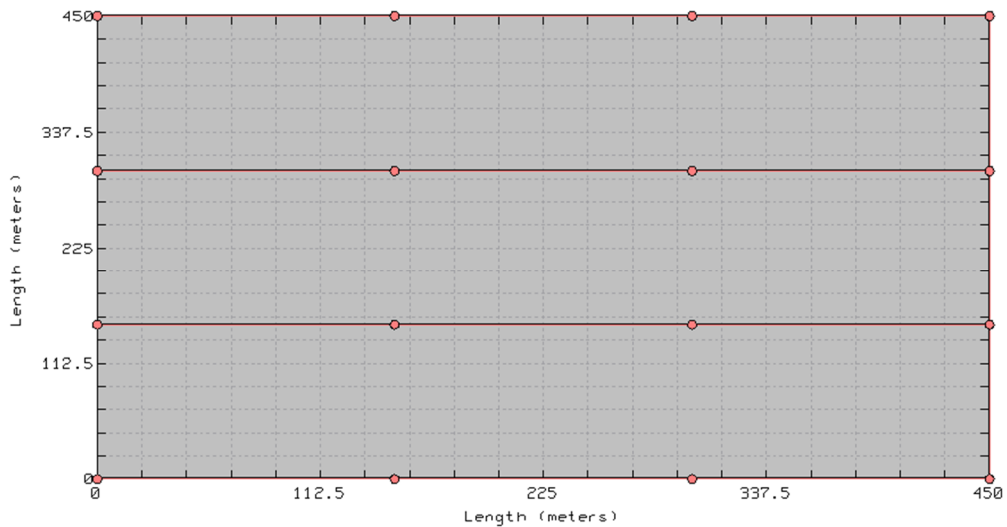
Yukarıdaki durumlarda bir rüzgar türbini için incelediğimiz topraklama ağları tek başlarına güvenlik ölçütlerini sağlamasalar da diğer türbinler ile bağlandığında uygun gerilim seviyelerini sağlamaktadır. Bu durumda eğer rüzgar türbinleri birbirine bağlanacak ise rüzgar türbin topraklaması, daha ekonomik olmasını için basitleştirilebilir. Bu bağlantı şeklinde her bir rüzgar türbinini topraklamasını, topraklama direnci $10\ \Omega$ geçmeyecek şekilde tek bir elektrot ile gerçekleştirerek, rüzgar çiftliğini oluşturup inceleme yapılmıştır.

Rüzgar türbinleri topraklaması yapılırken herhangi bir sisteme bağlanmadan önce topraklama direnci $10\ \Omega$ ve altında olması gerekmektedir [3]. Topraklama, uzunluğu 3 m, çapı 22 mm olan $9.8\ \Omega$ topraklama direncine sahip tek bir elektrot ile yapılmıştır.

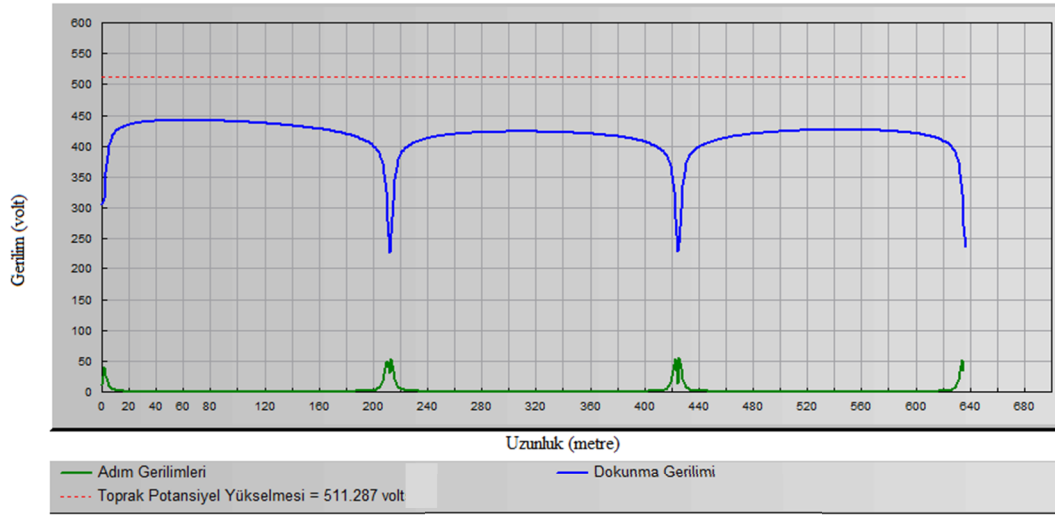
Bu elektrot bir rüzgar türbininde kullanıldığı zaman en yüksek dokunma ve adım gerilimleri 39438 V ve 1866.61 V olarak güvenlik ölçütlerine uygun olmayan değerler elde edilmiştir.

Bu elektrotla, Şekil 6.32’de görüldüğü gibi rüzgar çiftliği içerisindeki 16 adet türbinin topraklanması sonucunda en yüksek dokunma ve adım gerilimi 441.8 V ve 54.8 V olarak belirlenmiştir. Şekil 6.33’de bu gerilim değerleri görülmektedir.

Sonuç olarak bu değerler izin verilen en yüksek dokunma gerilimi 1050.07 V ve adım gerilimi 3534.17 V değerlerinden küçük oldukları için uygulanabilir topraklama sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 6.32: Bağlantı 4 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı.



Şekil 6.33: Bağlantı 4'e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri.

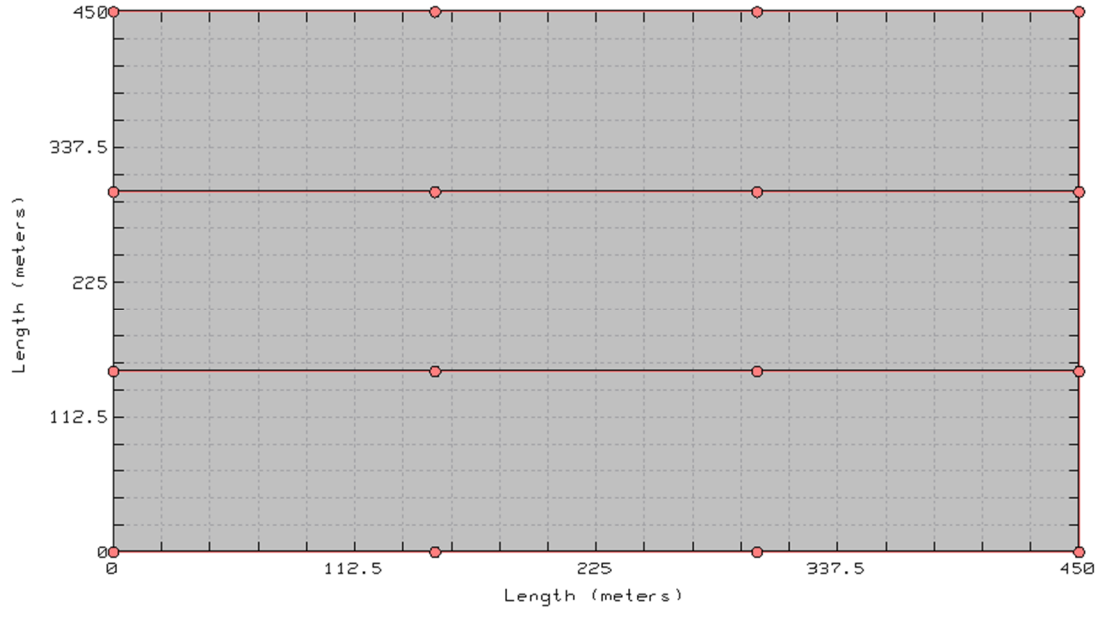
6.8.5 Bağlantı 5

Bu bağlantıda bağlantı 4'de olduğu gibi her bir rüzgar türbini topraklamasını, topraklama direnci 9.8Ω , uzunluğu 3 m, çapı 22 mm olan tek bir elektrot ile yaparak Şekil 6.34'deki rüzgar çiftliği topraklama sistemi oluşturulmuştur.

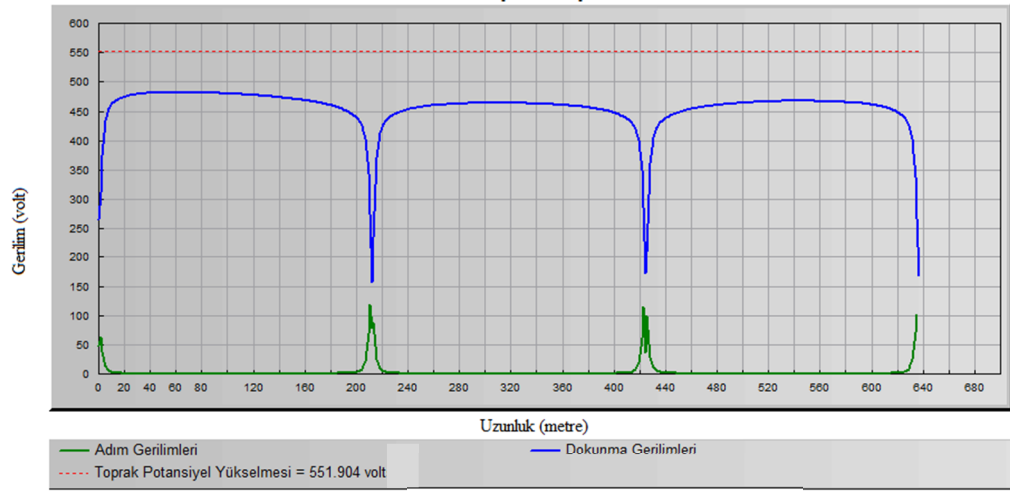
Bağlantı 5'de, bağlantı 4'deki türbin topraklamalarını birbirine bağlayan hattın gömülme derinliğini 1 m'den 0.5 m'ye azaltılarak incelenmiştir.

En yüksek dokunma ve adım gerilimi değerleri Şekil 6.35'de görüldüğü gibi 482.34 V ve 119.25 V hesaplanmıştır.

Sonuç olarak bağlantı 5'e göre en yüksek dokunma gerilimi %9 oranında ve en yüksek adım gerilimi %117 artmasına rağmen, izin verilen en yüksek dokunma gerilimi için 1050.07 V ve adım gerilimi için 3534.17 V değerlerinden küçük oldukları için uygulanabilir ve kazı maliyeti açısından bağlantı 5'e göre daha ekonomik bir topraklama sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 6.34: Bağlantı 5 için rüzgar çiftliği topraklama ağının üstten yerleşim planı.



Şekil 6.35: Bağlantı 5'e göre tasarlanan topraklama sistemi için adım ve dokunma gerilimleri.

7. SONUÇLAR

Rüzgar türbinlerinde ve rüzgar çiftliklerinde tehlikeli gerilimlere karşı canlıları ve türbin bileşenlerini korumak için Bölüm 6’da topraklama sistemleri tasarımı yapılır.

Bu çalışmada, ilk olarak durum 1’de donatılar dikkate alınarak bir rüzgar türbini topraklama ağı, yazılım ve formüller kullanılarak tasarlanmıştır. Sonrasında elektrot boyları, iletken ve donatı aralıkları değiştirilerek farklı durumlar oluşturulmuştur. Devamında rüzgar çiftliği topraklama sistemi, rüzgar türbinleri birbirine çeşitli şekillerde bağlanarak tasarlanmıştır. Oluşturulan farklı durumların, topraklama direnci, toprak potansiyel yükselmesi (GPR), yüzey tabakası azaltma katsayısı (Cs), adım ve dokunma gerilimleri birbirleri ile karşılaştırılıp güvenli topraklama ağı elde edilmiştir. Bu çalışmada iki tabaka toprak modeli kullanılmıştır. Bu sayede birçok homojen olmayan tabakadan oluşan toprak için gerçeğe yakın bir model oluşturulmaya çalışılmıştır.

Topraklama analizi için kullanılan CYMGRD programı, asimetrik yerleşime sahip elektrot ve iletkenler içeren, farklı gömülme derinliklerine sahip topraklama ağlarında, çok tabakalı topraklar için deneysel formüllere göre zaman ve doğruluk açısından avantaj sağlamaktadır.

Topraklama ağları incelenirken güvenlik kriteri olarak, IEEE Std. 80-2000’e göre adım ve dokunma gerilimlerinin limit değerleri alınmıştır. Tasarımlarda bu limit değerlerinin aşmayacak adım ve dokunma gerilimlerine sahip topraklama ağları oluşturulmaya çalışılmıştır. Buna göre çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Rüzgar türbini topraklama ağında donatılar topraklama sistemine bağlanınca topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimlerinde azalmalar olmuştur.
- Topraklama ağı köşelerinde yer alan elektrotların uzunlukları %17 oranında azaltılınca en yüksek adım ve dokunma gerilimi %5 oranında artmıştır.
- Topraklama ağı köşelerinde yer alan elektrotların uzunlukları %17 oranında arttırılınca en yüksek adım ve dokunma gerilimi %5 oranında azalmıştır

- Donatıların aralığı %100 oranında arttırılınca en yüksek adım ve dokunma gerilimlerinde %1 oranında bir artış olmuştur. Aralıkları arttırmak kullanılan donatıların azalması yönünden ekonomik olarak uygun olsa da temelin mekanik mukavemeti açısından uygun değildir.
- Tek olarak kullanılacak rüzgar türbinlerinin topraklama ağını güvenli hale getirebilmek için topraklama elektrotlarını temel donatılarına bağlamanın yanı sıra ek elektrot ve iletkenler ile iyileştirilme gereği duyulmuştur.
- Topraklama sisteminde temel donatıları ihmal ettiğimiz zaman, adım ve dokunma gerilimlerinde donatıların ihmal edilmediği duruma göre %150 oranında artışlar olmuştur.
- Rüzgar çiftliği oluştururken, tek türbin için kullanıldığında dokunma gerilimleri güvenlik ölçütlerini aşan topraklama ağları birbirine bağlanınca adım ve dokunma gerilimlerinde, tek kullanıldığı duruma göre azalmalar meydana gelmiştir.
- Donatıları ihmal edilen topraklama sistemlerinde büyük adım ve dokunma gerilimleri oluşmasına rağmen bu sistemler ile uygun sayıda rüzgar türbini topraklamaları birleştirilince adım ve dokunma gerilimleri güvenlik ölçütlerini sağlamıştır.
- Topraklama direnci 10Ω 'dan az olacak şekilde tasarlanan tek elektrotlu topraklama sistemi, tek başına kullanıldığında adım ve dokunma gerilimleri izin verilen değerleri aşmasına rağmen, uygun sayıda rüzgar türbini ile rüzgar çiftliği oluşturunca adım ve dokunma gerilimleri güvenlik ölçütlerini sağlamıştır.
- Topraklama direnci 10Ω 'dan az olacak şekilde tek elektrotla yapılan topraklamada rüzgar türbinlerini birbirine bağlayan hattın gömülme derinliği %50 oranında azaltılarak rüzgar çiftliği oluşturulunca güvenlik ölçütlerini sağlayan, kazı maliyeti açısından daha ekonomik bir sistem oluşmuştur.

Rüzgar türbinleri topraklama sistemleri tasarlanırken temel donatıları ihmal edilmeden hesaplamalar yapılmalıdır. Farklı tabakalardan oluşan topraklarda asimetrik yapıya sahip topraklama ağları tasarlanırken, deneysel formüller yerine sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan yazılımların kullanılması zaman ve doğruluk açısından daha avantajlıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **IEEE Std. 80-2000** (2000). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, *IEEE Standard Board*, New York, USA.
- [2] **ETTY** (2001). Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, Ankara.
- [3] **Lorentzou, M., Hatziargyriou, N. ve Papadias, B.** (2000). Analysis of Wind Turbine Grounding Systems, *Electrotechnical Conference, Melecon*, Athens, Greece, 29-31 Mayıs.
- [4] **Cotton, I.** (1999). Windfarm Earthing, *Proc. International Symposium on High Voltage Engineering*, Vol. 2, pp. 288-291, London, UK.
- [5] **Hatziargyriou, N., Lorentzou, M., Cotton, I. ve Jenkins, N.** (1998). Transferred Overvoltages by Windfarm Grounding Systems, *Proceedings of ICHQP conference*, Athens, Greece.
- [6] **Bayram, M.** (2000). Elektrik Tesislerinde Topraklama, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- [7] **EDSA** (2008). Advanced Substation Grounding Grid Design, *Edsa Micro Corporation*, San Diego, U.S.A.
- [8] **Özkaya, M.** (1979). Yüksek Gerilim Tekniğinde Deşarj Olayları, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi; sayı: 1152, İstanbul.
- [9] **Khalifa, M.** (1990). High-Voltage Engineering, Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc., New York, U.S.A.
- [10] **Elbirler, C.** (2007). Elektriksel Boşalma Yolunun Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **Emre, Ş.** (1992). Yıldırım Boşalmaları ve Etkinlik Bölgelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] **Gönenç, İ.** (1964). Yıldırımdan Koruma (yıldırımlık), *Yıldırımlık Tesisatı Yapımı Komitesi (AAB)*, İstanbul Teknik Üniversitesi. Teknik Okulu yayımları; sayı: 39, 39/1, İstanbul.
- [13] **Yaman, Y.** (2009). Paratonerler Parafudrlar ve Topraklama Uygulamaları, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- [14] **Van Brunt, R.J., Nelson, T.L. ve Stricklett, K.L.** (2000) Early streamer emission lightning protection systems: An overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol 16, No. 1, pp. 5 – 24.
- [15] **IEC 61400-24** (2010). Wind Turbines, Part 24: Lightning Protection, *International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland.

- [16] **TS EN 62305-1** (2012). Yıldırımdan Korunma - Bölüm 1: Genel Kurallar, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- [17] **Enercon E-70** (2006). E-70 Technical Data Sheet, Enercon GmbH, Germany.
- [18] **IEC 61400-1** (2005). Wind turbines – Part 1: Design requirements, *International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland.
- [19] **TS EN 62305-3** (2012). Yıldırımdan Korunma - Bölüm 3: Yapılarda Fiziksel Hasar ve Hayati Tehlike, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.
- [20] **Url 1** <<http://www.emo.org.tr>>, Özcan Kalenderli, Yıldırımdan Korunma Sunumu, İstanbul, alındığı tarih: 18.03.2013
- [21] **Dodd C. W., McCalla T. Jr. ve Smith J. G.** (1983). How to Protect a Wind Turbine From Lightning Final Report, NASA CR, U.S.A.
- [22] **Url 2** <<http://www.siemens.com>>, alındığı tarih: 07.03.2013
- [23] **DEFU** (1999). Lightning Protection of Wind Turbines, Recommendation No.25, Edition 1, Denmark.
- [24] **Leutron** (2011). Lightning and Surge Protection of Wind Turbin, Yellow Protects Catalog, Leinfelden-Echterdingen, Germany.
- [25] **CYMGRD** (2000). User Guide and Reference Manual, Canada.
- [26] **Uzunlar F.** (2009). Three Dimensional Grounding Grid Design ,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] **Lee C. H., Meliopoulos A. P. S.** (1999). Comparison of touch and step voltages between IEEE Std. 80 and IEC 479-1, Generation. Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 146, No. 5, pp. 593–601.
- [28] **Esmailian A., Akmal S. A.A. ve Naderi S. M.** (2012). Wind Farm Grounding Systems Design Regarding the Maximum Permissible Touch & Step Voltage, Environment and Electrical Engineering International Conference (EEEIC), Tehran, Iran, 18-25 Mayıs.
- [29] **İlisu İ.** (2010). Topraklama Direnci Hesapları, Elektrik Mühendisliği Dergisi 438. Sayı, İstanbul.
- [30] **Thapar, B., Gerez, V. ve Kejriwal, H.** (1994). Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards. *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol 9. pp. 360-368
- [31] **Afet İşleri Genel Müdürlüğü** (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Çağrı KÖKSAL

Doğum Yeri ve Tarihi: Kadirli, 19.01.1987

Adres : İstanbul

E-Posta : cagrikoksal@live.com

Eğitim Bilgileri

Lise : Düziçi Anadolu Öğretmen Lisesi, 2005

Lisans : İstanbul Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 2010

Yüksek Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği, 2013