

## ANDEZİTLERDE AYRIŞMA DERECESESİNİN RÜZGAR TÜRBİNİ TEMEL SİSTEMİNE ETKİSİNİN NÜMERİK ANALİZİ

Ahmet Turan ARSLAN<sup>1</sup>, Bayram KAHRAMAN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksekokulu, İzmir, 35360, Türkiye

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35160, Türkiye

Geliş tarihi: 03.07.2019 Kabul tarihi: 29.11.2019

### ÖZET

Rüzgar enerjisi, günümüzde bütün ülkeler ve konu ile ilgili bilimsel çevreler tarafından kabul görmüş, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bilindiği gibi teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan ihtiyaçların karşılanması da büyük oranda fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fakat bu fosil yakıtların bitme tehlikesi ve aynı zamanda çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında alternatif enerji kaynaklarına yönelmek kaçınılmaz olmuştur. Eski çağlardan beri insanlar rüzgar enerjisinden çeşitli şekillerde faydalanmak istemişlerdir. İlk rüzgar türbinleri inşaatı 20. yüzyıl başlarında başlamış ve bununla birlikte rüzgar gücünden elektrik üretimi yıllara bağlı olarak gittikçe artmıştır. Bugün dünyada hemen her ülke rüzgar enerjisinden çeşitli şekillerde faydalanmaktadır. Türkiye rüzgar enerjisi bakımından çok ciddi bir potansiyele sahip olup, tahmin edilen potansiyel yaklaşık 60 GW'tır. 2023 yılına kadar ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından en az % 30 elektrik üretimi ve 20 GW rüzgar enerjisi kurulu gücü planlanmaktadır. Bu çalışmada, farklı ayrışma derecesine sahip İzmir ili ve yakın civarında geniş alanlar kaplayan pembe ve gri andezitler üzerine inşa edilen rüzgar türbinlerine ait yüzeysel temel sisteminin duraylılık ve dönmeye karşı güvenliği, Phase2 2019 V10.006 bilgisayar programı kullanılarak incelenmiştir. Statik koşullarda yapılan nümerik analizler sonucunda, andezitlerdeki ayrışma derecesinin artması ile temel sistemindeki dönmenin arttığı, kayma göçmesi ve yenilmeye karşı güvenlik faktörünün de önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar türbini, Nümerik analiz, Andezit, Kayma Göçmesi, Deformasyon, Hoek-Brown ölçütü.

## NUMERICAL ANALYSIS ON THE EFFECT OF WEATHERING GRADE OF ANDESITES ON THE WIND TURBINE FOUNDATION SYSTEM

### ABSTRACT

Wind energy is a clean and renewable energy source that is accepted by all countries and scientists dealing with this subject in today's world. As it is known, our world has faced intense energy demand with technological developments and increased population. The fulfillment of this demand is largely provided from fossil fuels. However, it is inevitable to turn to alternative energy sources given the danger of extinction of fossil fuels and also the damage it gives to the environment. Since ancient times, people have benefited from the power of the wind in various ways. At the beginning of the 20th century, the first wind turbines were established and, however, the power generation of the wind power increased gradually. Today, almost every country in the world is benefiting from wind energy in various ways. Turkey has very serious potential in terms of wind energy and the estimated potential is about 60 GW. At least 30% electricity generation and 20 GW wind power board power are planned from renewable sources until 2023 years. In this study, the wind turbines built on pink and gray andesites with different degrees of decomposition have been investigated for the safety and rotation of the foundation systems.

\* e-mail: [bayram.kahraman@deu.edu.tr](mailto:bayram.kahraman@deu.edu.tr) ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-9429-6591>

[ahmet.arslan@deu.edu.tr](mailto:ahmet.arslan@deu.edu.tr) ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-8018-1707>

In this review, Phase2 2019 V10.006 software were used. As a result of numerical analyses made in static conditions, the increase in the degree of decomposition in the andesite increases the rotation in the foundation system, and the factor of safety against shear failure and failure has been significantly decreased.

**Keywords:** *Wind turbine, Numerical analysis, Andezite, Shear Failure, Deformation, Generalized Hoek-Brown Criterion.*

## 1. Giriş

Rüzgar türbinlerinin üretildiği 1980’li yılların sonundan itibaren hem rüzgar türbini sayılarında hem de üretilen enerji miktarlarında önemli artışlar olmuştur. Rüzgar türbinleri için ekonomik olması nedeniyle genellikle yüzeysel temeller tercih edilir. Eğer temel zemini taşıma gücü veya oturma yönünden problemlili ise, çeşitli iyileştirme yöntemleri uygulanarak temel zemini iyileştirilebilir. Hangi zemin iyileştirme yönteminin uygulanacağı mevcut zemin koşullarına, proje için gerekli taşıma kapasitesine ve temel zemininden beklenen elastisite modülüne bağlıdır. Seçilen yöntem, yapıdan gelen yükleri güvenli bir şekilde taşıyarak aşırı oturmalara izin vermemelidir. Ayrıca uygulanacak yöntemin basitliği, esnekliği ve hızlı uygulanabilirliği de oldukça önemlidir [1].

Yenilenebilir enerji sektöründeki hızlı gelişmelere bağlı olarak özellikle Türkiye gibi gelişen ülkelerde rüzgar türbinlerinin inşasına son yıllarda hız verilmiştir. Ege bölgesinde de bu gelişmelere paralel olarak rüzgar türbini inşaatları hız kazanmış ve farklı jeolojik formasyonlar üzerinde rüzgar türbinleri inşaa edilmektedir.

Rüzgar türbini temelleri, üst yapı yüklerini zemine güvenle aktarması gereken özellikte yapılardır. Türbin temelleri standart bir yapı temeli olmayıp, kulenin hizmet ömrü (yaklaşık 25 yıl) boyunca dış zorlamalara ve yorulma etkilerine maruz kalacak özel temel sistemleridir. Temelin maruz kaldığı yüklerin dinamik karakteristikte olması, yüksek moment / düşey yük oranı (eksantrisite) ve yaklaşık 25 yıl boyunca temelden beklenen üst düzey yorulma dayanımının sağlanması, bu yapıyı standart temel sistemlerinden ayırmaktadır. Temel dizaynı ve uygulamasında yapılacak hatalar, işletme aşamasında giderilmesi oldukça maliyetli yapısal çatlakların gelişmesine ve dayanım yetersizliklerine neden olacak, daha ileri durumlarda göçme düzeyinde stabilite kaybı (kayma-devrilme) ile karşılaşılacaktır. En sık kullanılan karasal rüzgar türbini temel tipleri, yüzeysel plak, grup kazıklı, kaya ankrajlı ve tekil kazıklı temel sistemleridir [2].

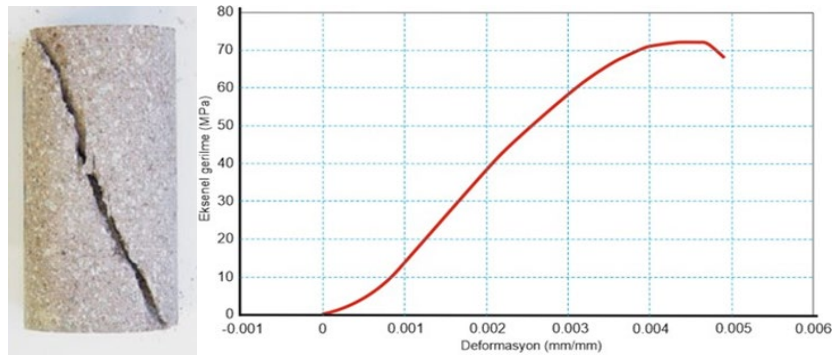
## 2. Andezitlerin Mühendislik Jeolojisi Özellikleri

Kaya kütlelerinde temel tasarımı yapmak için kaya malzemesi ve kaya kütlelerinin mekanik ve deformabilite özellikleri ile birlikte kütle içerisindeki süreksizliklerin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Çünkü temelin duraylılığı, kaya kütlelerinin mekanik özellikleri ile kütle içerisinde gelişen süreksizliklerin konumuna ve dayanım parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle andezitlerin mekanik, deformabilite özellikleri ve andezitlerde gelişen akma bantları, soğuma çatlakları ve tektonik kökenli süreksizliklerin mühendislik jeolojisi özellikleri, arazi ve laboratuvar destekli çalışmalarla belirlenmiştir. Andezitlerin tek ve üç eksenli basınç dayanımı ve kesme kutusu deneyleri TU Bergakademie Freiberg Institut für Geotechnik Gesteinsmechanik laboratuvarlarında yapılmıştır (Şekil 1).

Tek ve üç eksenli basınç deneyleri için her bir ayrışma derecesine ait üçer adet karot örneği hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil 2’ de az ayrışmış pembe andezitlerde yapılan tek eksenli deney sonrasında kaydedilmiş gerilme deformasyon grafiği ve yenilmiş karot örneği verilmiştir.

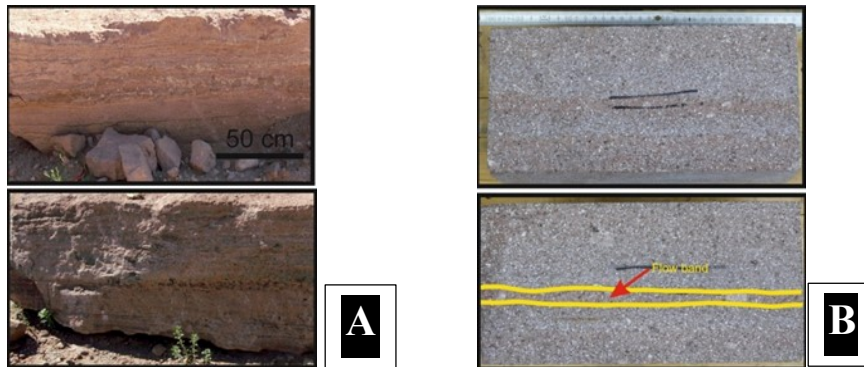


**Şekil 1.** Tek ve üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan Compression System TIRAtest 28500, servo kontrollü MTS 815 ve kesme kutusu deneyleri için kullanılan GS 1000 kesme kutusu deney sistemi



**Şekil 2.** Tek eksenli basınç deneylerinde kullanılan az ayrılmış (SW) pembe andezit karot örneğinin deney sonrası görünümü ile tek eksenli basınç deneyi sırasında kaydedilen gerilme deformasyon grafiği

Andezitik kaya kütleleri, kaya malzemesi ve süreksizlikler içermekte olup süreksizliklerin andezitik kaya kütlesi üzerindeki etkileri mühendislik uygulamaları açısından belirlenmelidir. Andezitlerde, tektonik kökenli süreksizlikler, akma bantları ve soğuma çatlakları olmak üzere üç farklı süreksizlik tipi gözlenmiştir (Şekil 3).





**Şekil 3. A:** Arazide andezit blok örneklerin görünümü, **B:** Andezitlerde gelişen akma bantlarının görünümü, **C:** Soğuma çatlaklarının görünümü, **D:** Soğuma çatlaklarının yüzey görünümü

Pembe ve gri andezitlerde gelişen akma bantları, soğuma çatlakları ve tektonik kökenli süreksizliklerin özellikleri Koca ve Kıncal [3] tarafından belirlenmiş olup, ayrıntılı özellikler Çizelge 1' de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Andezitlerde gelişen soğuma çatlakları ve akma bantlarına ait süreksizlik özellikleri [3]

Akma bantları	
Aralık	1-3 cm çok dar - dar
Açıklık	Genellikle kapalı eklemler
Devamlılık	1.5 – 3.5 m düşük - orta devamlılık
Soğuma çatlakları	
Aralık	50 cm -1 m orta - geniş Dolgu malzemesi: 1 - 4 mm kil dolgulu
Açıklık	1 mm – 5 cm açık – çok geniş
Devamlılık	3– 15 m orta devamlılık

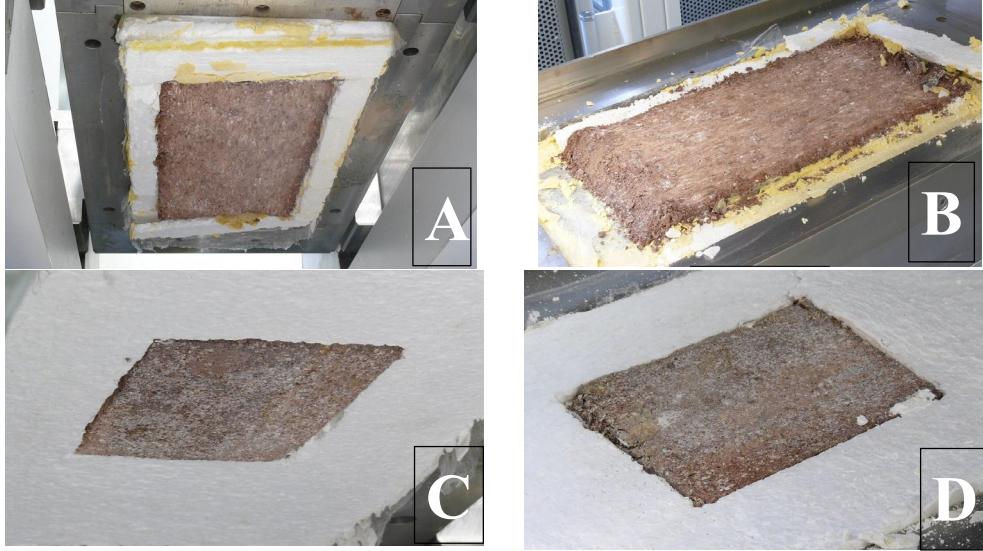
Andezitlerde gelişen akma bantları ve soğuma çatlakları üzerinde kesme kutusu deneyleri yapmak için araziden blok örnekler alınarak bu blok örnekler üzerinde kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş, pik (maksimum) ve rezidüel (kalıcı) kayma dayanımları, kohezyon (c), içsel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) ve rezidüel içsel sürtünme açısı ( $\phi_r$ ) değerleri bulunmuş ve sonuçlar yorumlanmıştır (Çizelge 2).

**Çizelge 2.** Az ayrışmış pembe andezitlerde gelişen akma bantları ve soğuma çatlakları üzerinde yapılan kesme deneylerinde bulunan görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri.

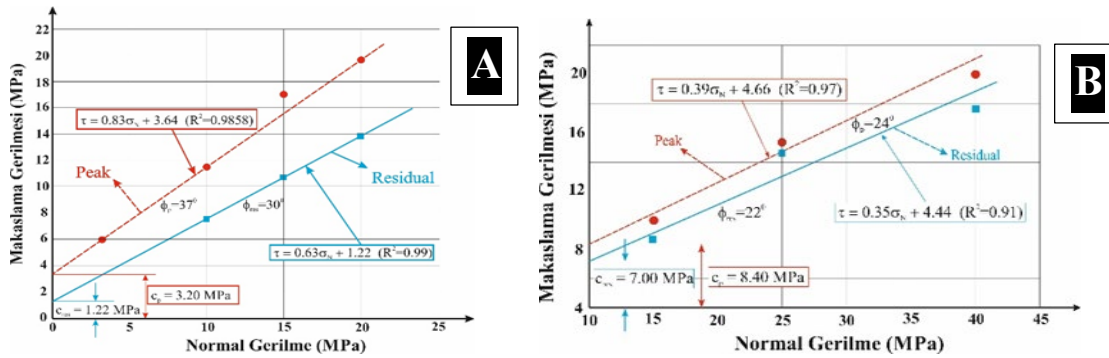
	Kohezyon (c) (MPa)		İçsel Sürtünme Açısı $\phi$ (°)		Regresyon Denklemi		$(R^2)$	
	Pik	Rezidüel	Pik	Rezidüel	Pik	Rezidüel	Pik	Rezidüel
Akma bantı	3.20	1.22	37	30	$\tau=0.83\sigma_N+3.64$	$\tau=0.63\sigma_N+1.22$	0.98	0.99
Soğuma çatlağı	8.40	7.00	24	22	$\tau=0.39\sigma_N+4.66$	$\tau=0.35\sigma_N+4.44$	0.97	0.91

Deneylerde normal gerilme değişim aralıkları akma bantları için 3, 10, 15, 20 MPa; soğuma çatlakları için 15, 25 ve 40 MPa seçilerek, normal yükler buna göre uygulanmıştır. Deneylerde Almanya'da TU Bergakademie Freiberg Institut für Geotechnik Gesteinsmechaniklabor'da bulunan GS

1000 kesme kutusu deney cihazı kullanılmıştır. Bu deney cihazındaki iş yükünün yoğun olması nedeni ile, kesme kutusu deneyleri az ayrılmış pembe andezitlerde gelişen akma bantları ve soğuma çatlakları üzerinde yapılabilmektedir. GS 1000 makaslama kutusu, 1000 kN' a kadar normal kuvvet, 200 kN' dan (çekme) + 800 kN' a (basınç) kadar kesme kuvveti, her iki yönde  $\pm 500$  kN büyüklükte 40 Hz' e kadar dinamik yük uygulayabilmektedir (Şekil 4, Şekil 5).



Şekil 4. Az ayrılmış pembe andezitlerde gelişen akma bantları ve soğuma çatlakları üzerinde yapılan kesme kutusu deneyleri sonrasında yenilmiş yüzeylerin görünümü (A, C: üst yüzey; B, D: alt yüzey)



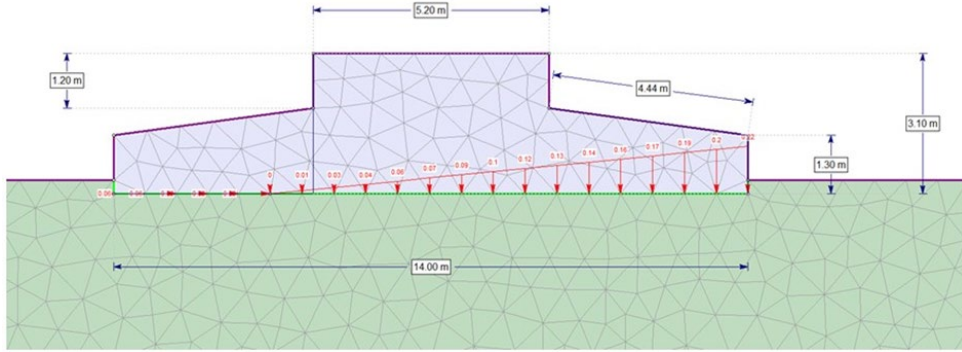
Şekil 5. A: Az ayrılmış (SW) pembe andezitte gelişen akma bantına ait pik ve rezidüel normal gerilme – kayma dayanımı ilişkisi B: Az ayrılmış (SW) pembe andezitte gelişen soğuma çatlaklarına ait pik ve rezidüel normal gerilme – kayma dayanımı ilişkisi.

Ayrıca kaya kütle parametrelerine bağlı Hoek-Brown ve Barton, Görgül yenilme kriterleri göz önüne alınarak mühendislik analizleri yapılmıştır [4, 5] (Çizelge 3).

### 3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada andezit kaya kütlesi üzerine inşa edilecek rüzgar türbini temeli, sekizgen formda 14x14m boyutlarında, temel derinliği yüzeyden yaklaşık 0.60 m, temele gelen yük dağılımları proje

detaylarına bağlı olarak (türbin ve temel geometrisi, yerel rüzgar değerleri) yatay yük 522.9 kN, düşey yük 13168.3 kN, moment 37361.1 kNm, olarak kabul edilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Nümerik analizlerde kullanılan rüzgar türbini temeli model geometrisi

Analizler Phase<sup>2</sup> 2019 V10.006 programı ile yapılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman ağ sisteminde 1726 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre yapılan değerlendirmelerde, özellikle güncel çalışmalarda ve literatürde baz alınan strength factor (güvenlik faktörü), total displacement (toplam yerdeğiştirme) ve gerilme durumu gibi parametreler üzerinde detaylı olarak durulmuştur. Phase<sup>2</sup> sayısal (nümerik) modelleme programı, sınır elemanları yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve bu iki yöntemin tekniklerini birlikte kullanan karma yöntemlerden istenilen herhangi birini kullanarak gerilme ve deformasyon analizini değerlendiren bir yazılımdır.

Sayısal modellemelerde kaya kütle özelliklerinin tanımlanmasında genelleştirilmiş Hoek Brown malzeme modeli kullanılmıştır. Genelleştirilmiş Hoek Brown malzeme modeli çatlaklı kayalar için uygun bir model olup, toplamda dokuz parametre ile tanımlanmaktadır. Sayısal modellemelerde rüzgar türbini temeli sekizgen formda ve ortadan geçen eksene göre simetrik olup bu temel altında bulunan farklı ayrışma derecelerine sahip andezitlerin malzeme ve kütle özellikleri arazi ve laboratuvar çalışmaları sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

Farklı ayrışma derecelerine sahip pembe ve gri andezitlerin kayma dayanımı parametrelerini belirlemek için ASTM [6,7] standartlarına göre laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Pembe ve gri andezitlerin fiziko-mekanik ve elastik özellikleri ise ISRM [8] tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenmiştir. Andezitlerde gelişen süreksizlik setlerinin mühendislik özellikleri, arazide ayrıntılı olarak incelenmiş, ISRM [8]'e göre sınıflandırması yapılmıştır. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerini saptamak için Hoek vd. [9] tarafından önerilen sayısal GSI (Geological Strength Index) abağı kullanılmış, pembe ve gri andezitler için GSI değerleri belirlenmiştir. 1994' e kadar RMR (Rock Mass Rating) puanıyla birlikte kullanılan bu ölçüte RMR yerine Jeolojik Dayanım indeksi (GSI) dahil edilmiştir. Bu sınıflama sisteminde kaya kütleleri, kayacın içerdiği süreksizliklerin neden olduğu bloklanma durumuna ve süreksizlik yüzey koşullarına bağlı olarak 20 farklı sınıfa ayrılmıştır.

Hoek vd. [10] tarafından önerilen eşitliklerle pembe ve gri andezitlerin tek eksenli basınç dayanımı, kaya kütle sabitleri, kohezyonu ve içsel sürtünme açıları belirlenmiştir. Ayrıca, RocData V5.009 Rocscience [11] programından yararlanılarak pembe ve gri andezitler için kaya malzemesi sabitleri ( $m_i$ ) seçilmiştir. Kazı işlemi sırasında mekanik kazı uygulanacağı varsayılmış ve örselenme faktörü (D) 0 olarak kabul edilmiştir (Çizelge 3).

**Çizelge 3.** Farklı ayırışma derecelerine sahip pembe ve gri andezitlerin malzeme ve kütle özellikleri

Parametre	Gri Andezit n=6		Pembe Andezit n=6		Gri – Pembe Andezit n=6
	SW	MW	SW	MW	HW
Sağlam Kaya Dayanımı $\sigma_{ci}$ (MPa)	75	38	46	27.50	12.58
Elastisite Modülü $E_i$ (MPa)	20000	15000	7500	4010	1000
Poisson oranı ( $\nu$ )	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	50	35	45	27	15
Örselenme Faktörü (D)	0	0	0	0	0
Hoek–Brown sabiti $m_i$	25	12	20	10	8
Hoek–Brown sabiti $m_b$	4.192	1.178	2.805	0.737	0.384
Hoek–Brown sabiti s	0.0039	0.0007	0.0022	0.0003	0.0001
Hoek–Brown sabiti a	0.506	0.516	0.508	0.527	0.561
Dilatans açısı ( $^{\circ}$ )	0	0	0	0	0
Kohezyon, c (MPa)	4.922	1.569	2.631	0.908	0.270
İçsel Sürtünme Açısı, $\phi$ ( $^{\circ}$ )	38.45	27.59	34.99	23.69	18.14
Çekme Dayanımı, $\sigma_t$ (MPa)	-0.069	-0.024	-0.036	-0.011	-0.003
Kaya Kütle Basınç Dayanımı, $\sigma_{cm}$ (MPa)	4.517	0.915	2.062	0.382	0.063
Global dayanım, $\sigma_{cm}$ (MPa)	20.387	5.180	10.105	2.778	0.745
Elastisite Modülü, $E_{rm}$ (MPa)	6143.7 2	1701.1	1677.3	270.38	36.45

Yer bilimileri mühendisliğinde bilgisayar kullanımının yaygınlaşması ile birlikte şev stabilite analizlerinde sonlu elemanlar yöntemi günden güne artan bir şekilde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık şev geometrisi, farklı zemin ve yükleme koşullarında iki veya üç boyutlu olarak tüm yenilme mekanizması tiplerinde uygulanmaktadır. Şev modellemelerinde çeşitli malzeme modelleri kullanılarak gerçek durumdaki gibi malzeme davranışı elde edilebilmekte, oluşan gerilme ve yer değiştirme parametreleri doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Rüzgar türbinlerine ait yüzeysel temel sisteminin kayma dayanımı ve dönmeye karşı güvenliği Phase<sup>2</sup> 2019 V10.006 [12] bilgisayar programı kullanılarak incelenmiştir. FEM analizlerinde öncelikle genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılmış, belirli parametrelerin değerlerindeki değişikliğin rüzgar türbini temel sisteminin stabilitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Andezit kaya kütleleri üzerine inşa edilecek rüzgar türbini temeli, sekizgen formda, simetrik, 14x14 m boyutlarında, temel derinliği yüzeysel olarak yaklaşık 0.60 m olarak kabul edilmiştir. Genelleştirilmiş Hoek - Brown Ölçütü ile yapılan duraylılık analizlerinde, GSI değerleri az ayrılmış (SW) gri ve pembe andezitler için 50 – 45; orta derecede ayrılmış (MW) gri ve pembe andezitler için 35 – 27; oldukça ayrılmış (HW) gri ve pembe andezitler için 15 değeri nümerik analizlerde girdi parametresi olarak kullanılmış ve farklı ayırışma derecelerinde duraylılık incelemeleri yapılmıştır. RocData V 5.009 yapılan analizlerde az ayrılmış (SW) gri andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 4.92 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ ) 39°; az ayrılmış (SW) pembe andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 2.63 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ ) 35°; orta derecede ayrılmış (MW) gri andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 1.57 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ ) 28°; orta derecede ayrılmış (MW) pembe andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 0.91 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ ) 24°; oldukça ayrılmış (HW) gri ve pembe andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 0.27 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ ) 18° değerleri, girdi parametresi olarak kullanılmıştır.

### 3.1. Genelleştirilmiş Hoek-Brown Ölçütü Kullanılarak Yapılan Analizler

Laboratuvar deneylerinden elde edilen kaya malzemesine ait dayanım parametreleri, tabaka, eklem ve fay gibi süreksizlikler içeren kaya kütlelerinin dayanımını tam olarak yansıtamamaktadır. Bu

tür süreksizlikler, yenilme düzlemleri olduğundan, kaya kütlesi dayanımını azaltmaktadır. Kaya kütlesi dayanımını, kaya malzemesi özelliklerinden doğru bir yaklaşımla tahmin edebilmek için Hoek vd. [13] tarafından geliştirilmiş Hoek-Brown ölçütü önerilmiş olup çatlaklı kaya kütleleri için geliştirilmiş Hoek-Brown ampirik bağıntısı Eşitlik 1’de verilmiştir:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[ m_b \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right) + s \right]^a \quad (1)$$

Bu denklemden,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  yenilme anındaki maksimum ve minimum asal gerilmeler;  $m_i$  ve  $s$  kaya malzemesine,  $m_b$  ise kaya kütlesine ait Hoek-Brown sabitleri;  $\sigma_{ci}$  kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı,  $a$  ise kaya kütle özelliklerine göre önerilen üstel bir ifadedir. Hoek-Brown sabitleri, GSI ve D değeri kullanılarak aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmaktadır:

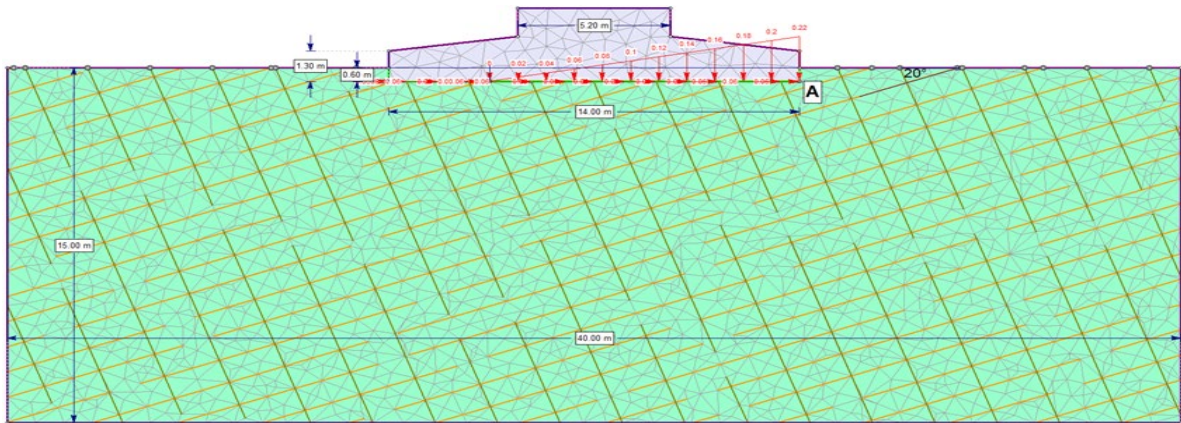
$$\frac{m_b}{m_i} = e^{\left( \frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (2)$$

$$S = e^{\left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (4)$$

GSI parametresi, blok boyutu ve yüzey koşulları gibi süreksizlik özelliklerinin kaya kütlesi dayanımındaki azaltıcı etkisini dikkate alarak Marinou ve Hoek [14] tarafından oluşturulan tablolardan belirlenebilen, arazi verilerine dayanan bir değerdir. GSI değeri 10 (çok zayıf kaya) ve 100 (sağlam kaya) arasında değişir. D ise, patlatma şeklinin kaya kütlesi üzerinde oluşturduğu deformasyon dikkate alınarak Hoek [15]’de verilen tablodan faydalanılarak belirlenebilir. D değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, sırasıyla örselenmemiş kaya kütlesi ve çok örselenmiş kaya kütlesini temsil etmektedir. Kaya materyalini tanımlayan  $m_i$ , 4 ile 33 arasında değer alır ve tablodan veya kaya materyali üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyinde uygulanan asal gerilmelerden faydalanılarak bulunabilir [16].

Pembe ve gri andezitlere ait kaya malzemesi parametreleri laboratuvarında yapılan tek eksenli basınç, tek eksenli deformasyon, üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen parametreler RocData V 5.009 programında değerlendirilerek, kaya kütlesine ait parametreler farklı ayrışma derecesine sahip pembe ve gri andezitler için Çizelge 3’de toplu olarak sunulmuş, Phase<sup>2</sup> 2019 V10.006 programında yapılan analizlerde de bu parametreler kullanılmıştır. Phase<sup>2</sup> 2019 V10.006 programında yapılan modellemelerde (Şekil 7), farklı ayrışma derecelerine sahip gri ve pembe andezitler için kabul edilen GSI parametreleri, farklı süreksizlik açılarındaki değişimlere göre değerlendirilerek her bir süreksizlik açısı değişimine karşılık gelen güvenlik faktörü (FS) parametresi hesaplanmış ve Çizelge 4’de sunulmuştur.



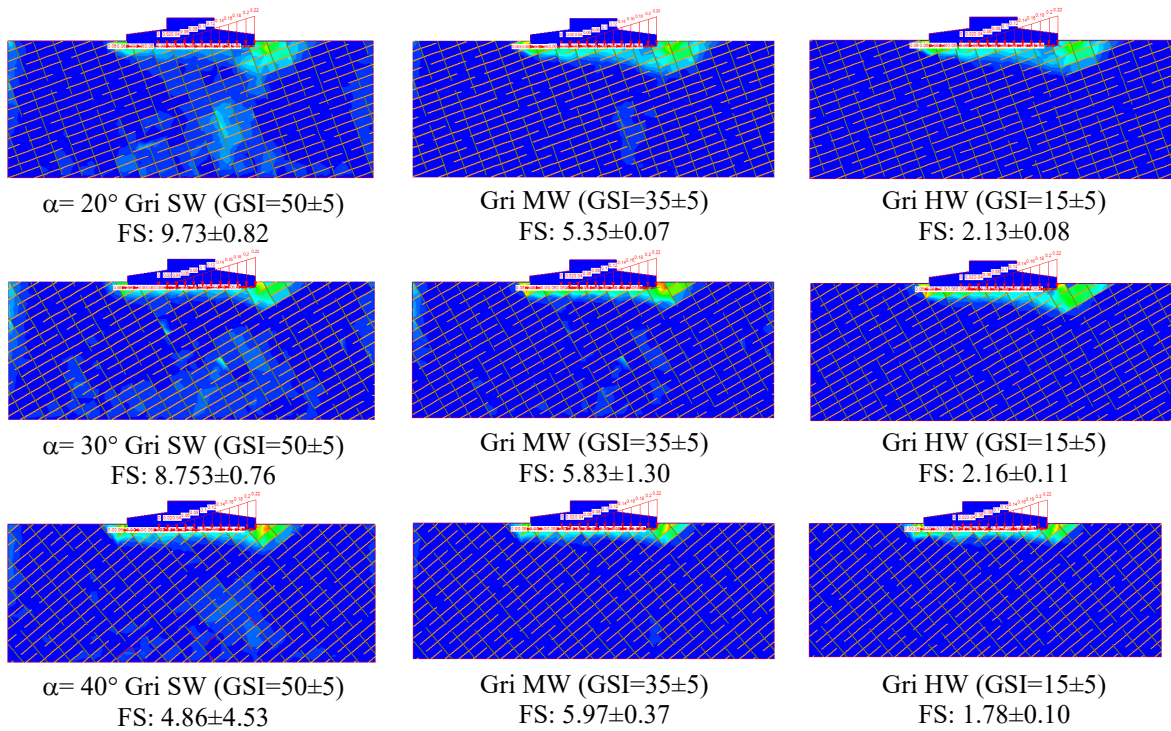
Şekil 7. Phase<sup>2</sup> 2019 V10.006 programında kullanılan model

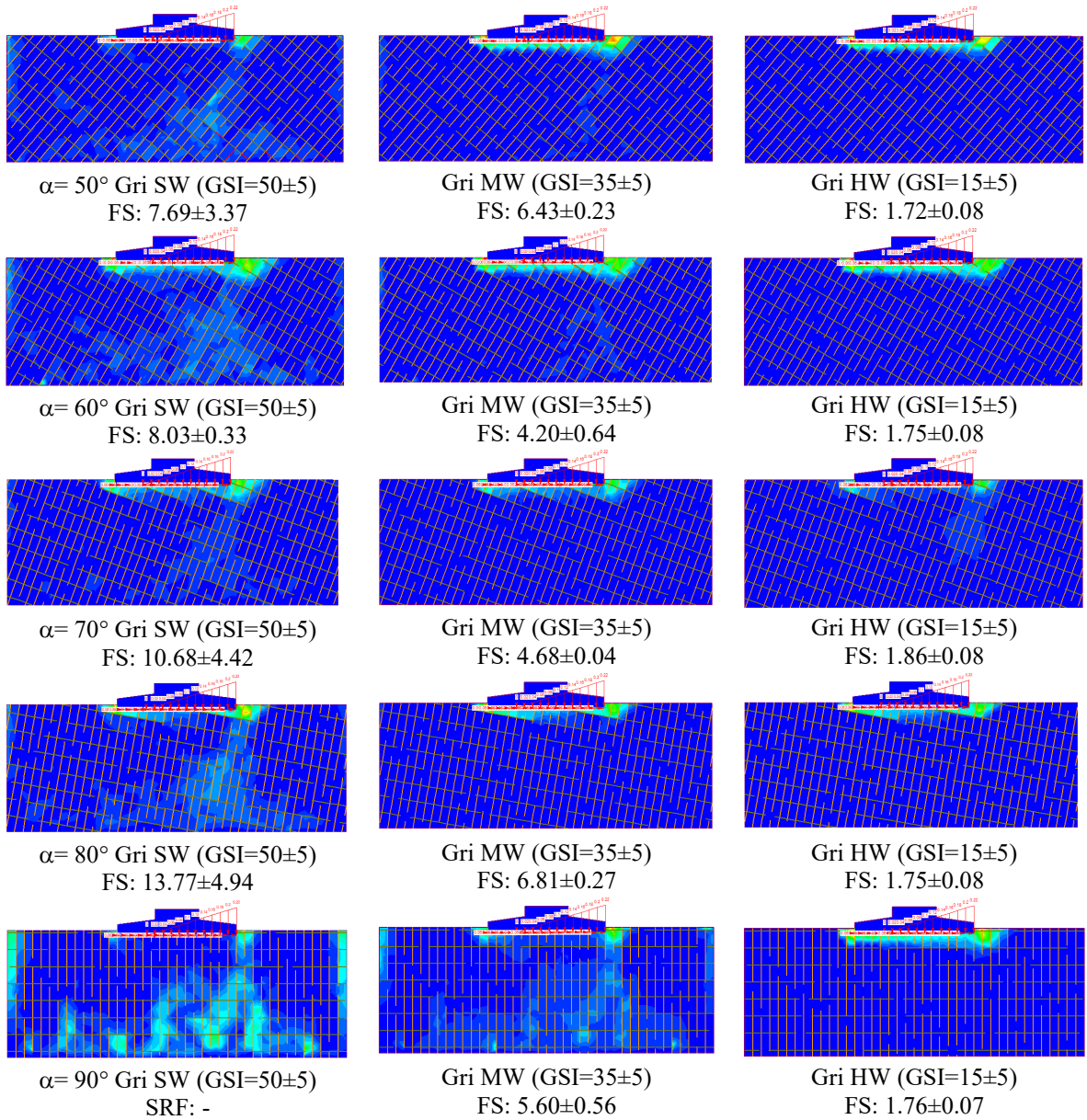


**Çizelge 4.** Genelleştirilmiş Hoek-Brown Ölçütü kullanılarak (GSI  $\pm$  5) değerleri için hesaplanan güvenlik faktörü (FS) değerleri

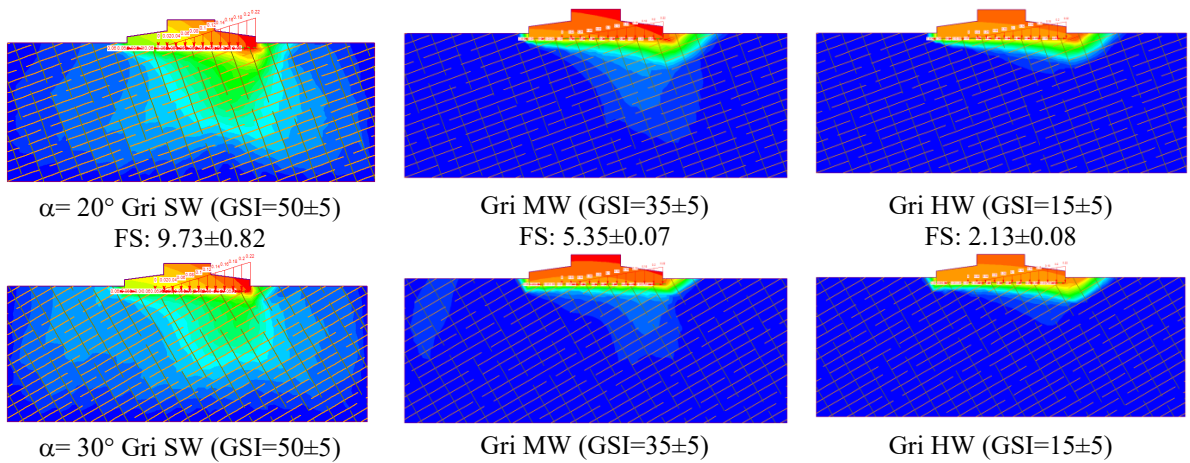
Süreksizlik açısı $\alpha$ (°)	Gri Andezit (SW)	Pembe Andezit (SW)	Gri Andezit (MW)	Pembe Andezit (MW)	Gri-Pembe Andezit (HW)
	GSI = 50 $\pm$ 5	GSI = 45 $\pm$ 5	GSI = 35 $\pm$ 5	GSI = 27 $\pm$ 5	GSI = 15 $\pm$ 5
SRF					
20	9.73 $\pm$ 0.82	5.51 $\pm$ 1.61	5.35 $\pm$ 0.07	4.00 $\pm$ 0.12	2.13 $\pm$ 0.08
30	8.53 $\pm$ 0.76	5.71 $\pm$ 1.78	5.83 $\pm$ 1.30	3.13 $\pm$ 0.37	2.16 $\pm$ 0.11
40	4.86 $\pm$ 4.53	5.80 $\pm$ 0.37	5.97 $\pm$ 0.37	3.48 $\pm$ 0.03	1.78 $\pm$ 0.10
50	7.69 $\pm$ 3.37	6.17 $\pm$ 0.18	6.43 $\pm$ 0.23	3.49 $\pm$ 0.02	1.72 $\pm$ 0.08
60	8.03 $\pm$ 0.33	6.50 $\pm$ 0.23	4.20 $\pm$ 0.64	3.50 $\pm$ 0.02	1.75 $\pm$ 0.08
70	9.30 $\pm$ 0.13	4.95 $\pm$ 1.29	4.68 $\pm$ 0.04	3.63 $\pm$ 0.06	1.86 $\pm$ 0.08
80	13.77 $\pm$ 4.94	7.12 $\pm$ 0.47	6.81 $\pm$ 0.27	3.58 $\pm$ 0.06	1.75 $\pm$ 0.007
90	-	6.40 $\pm$ 0.73	5.60 $\pm$ 0.56	3.34 $\pm$ 0.19	1.76 $\pm$ 0.07

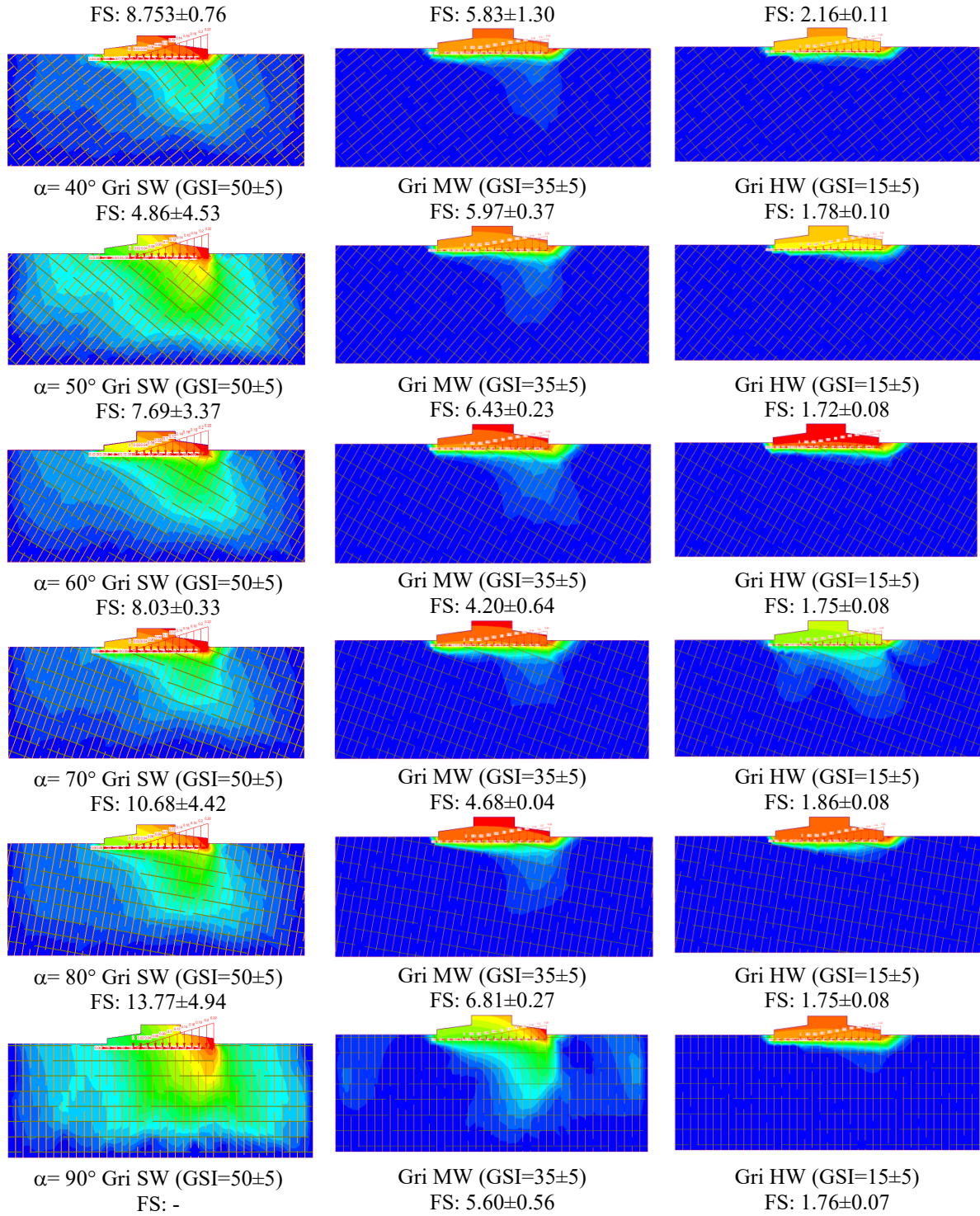
Rüzgar türbini temeli altında bulunan farklı ayrışma derecelerine sahip andezitler ile ilgili yapılan sayısal modellemelerde her bir durum için güvenlik faktörü (FS) değerleri hesaplanarak, temel tabanı altında oluşan gerilme ve deformasyonlar ile, buna bağlı olarak gelişen düşey ve yatay yöndeki yer değiştirmeler hesaplanmış, Şekil 8 ve Şekil 9'da toplu olarak sunulmuştur. Phase<sup>2</sup> ile yapılan çözümlere göre temel tabanı köşesinde alınan A noktasındaki (Şekil 7) kayma deformasyonlarının dağılımları incelendiğinde, az ayrışmış (SW) gri andezitlerde min.  $7.50 \times 10^{-5}$ , maks.  $1.16 \times 10^{-3}$ , ort.  $5.34 \times 10^{-4}$ , orta derecede ayrışmış (MW) gri andezitlerde min.  $6.50 \times 10^{-4}$ , maks.  $1.02 \times 10^{-3}$ , ort.  $1.19 \times 10^{-3}$ , az ayrışmış (SW) pembe andezitlerde min.  $1.20 \times 10^{-4}$ , maks.  $1.85 \times 10^{-3}$ , ort.  $1.09 \times 10^{-3}$ ; orta derecede ayrışmış (MW) pembe andezitlerde min.  $8.75 \times 10^{-4}$ , maks.  $4.75 \times 10^{-3}$ , ort.  $2.95 \times 10^{-3}$ , oldukça ayrışmış (HW) pembe ve gri andezitlerde min.  $5.40 \times 10^{-3}$ , maks.  $3.92 \times 10^{-2}$ , ort.  $2.25 \times 10^{-2}$  olarak hesaplanmıştır.





**Şekil 8.** Phase<sup>2</sup> ile yapılan çözümlere göre statik koşullarda kayma deformasyonlarının kesit üzerindeki dağılımları





**Şekil 9.** Phase<sup>2</sup> ile yapılan çözümlere göre statik koşullarda toplam yer değiştirme konturlarının kesit üzerindeki dağılımları

A noktasındaki toplam yer değiştirme dağılımları incelendiğinde, az ayrılmış (SW) gri andezitlerde min. 0.09 cm, max. 0.47 cm, ort. 0.32 cm; orta derecede ayrılmış (MW) gri andezitlerde min. 0.09 cm, max. 0.86 cm, ort. 0.53 cm; az ayrılmış (SW) pembe andezitlerde min. 0.05 cm, max. 0.99 cm, ort. 0.57 cm; orta derecede ayrılmış (MW) pembe andezitlerde min. 0.07 cm, max. 1.80 cm, ort. 0.87 cm; oldukça ayrılmış (HW) pembe ve gri andezitlerde min. 1.12 cm, max. 14.40 cm, ort. 8.64 cm olarak hesaplanmıştır.

Güvenlik faktörü (FS) dağılımları andezitlerdeki ayrışma derecesine bağlı olarak değişmekte olup, az ayrılmış (SW) gri andezitlerde ortalama FS: 8.0, orta derecede ayrılmış (MW) gri andezitlerde FS: 5.6; az ayrılmış (SW) pembe andezitlerde FS: 6.0, orta derecede ayrılmış (MW) pembe andezitlerde FS: 3.5, oldukça ayrılmış (HW) gri ve pembe andezitlerde FS: 1.84 olarak hesaplanmıştır.

#### 4. Bulgular

Bu çalışmada, farklı ayrışma derecesine sahip pembe ve gri andezitler üzerine inşa edilen rüzgar türbinlerine ait yüzeysel temel sisteminin stabilitesi ve dönmeye karşı güvenliği Phase<sup>2</sup> 2019 V10.006 bilgisayar programı kullanılarak incelenmiştir. Andezitlerin mekanik ve deformabilite özellikleri, andezitlerde gelişen akma bantları, soğuma çatlakları ve tektonik kökenli süreksizliklerin mühendislik jeolojisi özellikleri arazi ve laboratuvar destekli çalışmalarla belirlenmiştir. Akma bantları, tektonik kökenli süreksizlikler ve soğuma çatlakları üzerinde kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiş, pik ve rezidüel kayma dayanımları, görünür kohezyon ( $c$ ), görünür içsel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) ve rezidüel sürtünme açısı ( $\phi_r$ ) değerleri bulunmuştur. Deneylerde normal gerilme değişim aralıkları akma bantları için 3, 10, 15, 20 MPa; soğuma çatlakları için 15, 25 ve 40 MPa seçilerek normal yükler buna göre uygulanmıştır.

Az ayrılmış pembe andezitlerde gelişen akma bantları üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde pik kohezyon 3.20 MPa, rezidüel kohezyon 1.22 MPa; soğuma çatlakları üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinde ise pik kohezyon 8.40 MPa, rezidüel kohezyon 7.00 MPa; akma bantlarında pik içsel sürtünme açısı  $37^\circ$ , rezidüel içsel sürtünme açısı  $30^\circ$ , soğuma çatlaklarında pik içsel sürtünme açısı  $24^\circ$ , rezidüel içsel sürtünme açısı  $22^\circ$  olarak belirlenmiştir.

Andezit kaya kütlesi üzerine inşa edilecek rüzgar türbini temeli, simetrik, sekizgen formda  $14 \times 14$  m boyutlarında, temel derinliği yüzeyden yaklaşık 0.60 m olarak kabul edilmiş ve hesaplamalar bu temel tipine göre yapılmıştır. Sayısal modellemelerde kaya kütle özelliklerinin tanımlanmasında genelleştirilmiş Hoek Brown malzeme modeli kullanılmıştır. Sayısal modellemelerde rüzgar türbini temeli altında bulunan farklı ayrışma derecelerine sahip andezitlerin malzeme ve kütle özellikleri arazi ve laboratuvar çalışmaları sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Genelleştirilmiş Hoek - Brown ölçütü ile yapılan stabilite analizlerinde GSI değerleri az ayrılmış (SW) gri ve pembe andezitler için 50 – 45; orta derecede ayrılmış (MW) gri ve pembe andezitler için 35 – 27; oldukça ayrılmış (HW) gri ve pembe andezitler için 15 değeri nümerik analizlerde girdi parametresi olarak kullanılmış, farklı ayrışma derecelerinde stabilite incelemeleri yapılmıştır. RocData V 5.009 yapılan analizlerde az ayrılmış (SW) gri andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 4.92 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ )  $39^\circ$ ; az ayrılmış (SW) pembe andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 2.63 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ )  $35^\circ$ ; orta derecede ayrılmış (MW) gri andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 1.57 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ )  $28^\circ$ ; orta derecede ayrılmış (MW) pembe andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 0.91 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ )  $24^\circ$ ; oldukça ayrılmış (HW) gri ve pembe andezitler için kohezyon ( $c_m$ ) 0.27 MPa, içsel sürtünme açısı ( $\phi_m$ )  $18^\circ$  girdi parametresi olarak kullanılmıştır.

Phase<sup>2</sup> programında yapılan modellemelerde, farklı ayrışma derecelerine sahip gri ve pembe andezitler için kabul edilen GSI parametreleri, farklı süreksizlik açılarındaki değişimlere göre değerlendirilerek her bir süreksizlik açısı değişimine karşılık gelen güvenlik faktörü (FS) parametresi hesaplanmıştır. Güvenlik faktörlerinin (FS) dağılımları andezitlerdeki ayrışma derecesine bağlı olarak değişmekte olup, az ayrılmış (SW) gri andezitlerde ortalama FS: 8.0, orta derecede ayrılmış (MW) gri andezitlerde FS: 5.6, az ayrılmış (SW) pembe andezitlerde FS: 6.0, orta derecede ayrılmış (MW) pembe andezitlerde FS: 3.5, oldukça ayrılmış (HW) gri ve pembe andezitlerde FS: 1.8 olarak belirlenmiştir. Temelin köşesinde yer alan A noktasındaki toplam yer değiştirmeler incelendiğinde, az ayrılmış (SW) gri andezitlerde min. 0.09 cm, maks. 0.47 cm, ort. 0.32 cm; orta derecede ayrılmış (MW) gri andezitlerde min. 0.09 cm, maks. 0.86 cm, ort. 0.53 cm; az ayrılmış (SW) pembe andezitlerde min. 0.05 cm, maks. 0.99 cm, ort. 0.57 cm; orta derecede ayrılmış (MW) pembe andezitlerde min. 0.07 cm, maks. 1.80 cm,

ort. 0.87 cm; oldukça ayrıışmış (HW) pembe ve gri andezitlerde min. 1.12 cm, maks. 14.40 cm, ort. 8.64 cm olarak hesaplanmıştır. Toplam yer değiştirme miktarı göz önüne alındığında, az–orta derecede ayrıışmış andezitlerde çok düşük seviyelerde yer değiştirmeler gözlemlenirken, oldukça ayrıışmış andezitlerde bu yer değiştirme miktarı 14.40 cm düzeylerine kadar çıkabilmektedir. Bu yer değiştirme miktarı kabul edilebilir sınır değerleri aşmakta ve temelin güvenliğini sağlamamaktadır.

Phase<sup>2</sup> ile yapılan çözümlenelerde temelin taban köşesinde alınan A noktasındaki kayma deformasyonlarının değerleri; az ayrıışmış (SW) gri andezitlerde min.  $7.50 \times 10^{-5}$ , maks.  $1.16 \times 10^{-3}$  ort.  $5.34 \times 10^{-4}$ ; orta derecede ayrıışmış (MW) gri andezitlerde min.  $6.50 \times 10^{-4}$ , maks.  $1.02 \times 10^{-3}$ , ort.  $1.19 \times 10^{-3}$ , az ayrıışmış (SW) pembe andezitlerde min.  $1.20 \times 10^{-4}$ , maks.  $1,85 \times 10^{-3}$  ort.  $1,09 \times 10^{-3}$ , orta derecede ayrıışmış (MW) pembe andezitlerde min.  $8.75 \times 10^{-4}$ , maks.  $4.75 \times 10^{-3}$ , ort.  $2.95 \times 10^{-3}$ ; oldukça ayrıışmış (HW) pembe ve gri andezitlerde min.  $5.40 \times 10^{-3}$ , maks.  $3.92 \times 10^{-2}$ , ort.  $2.25 \times 10^{-2}$  olarak hesaplanmıştır. Şekil değiştirmelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını ifade edebilmek için, teorik olarak yaklaşık  $10^{-5}$ 'den küçük mertebede olması gerektiği kabul edilmektedir. Şekil değiştirme seviyesinin yaklaşık olarak  $10^{-3}$  civarında olması durumunda, malzeme davranışı elasto-plastik olacaktır. Kayma Şekil değiştirmelerinin  $10^{-2}$ 'den büyük olması durumunda, kalıcı Şekil değiştirmeler oluşmaya başlar. Dolayısıyla, az ayrıışmış (SW) ve orta derecede ayrıışmış (MW) gri ve pembe andezitlerde elasto-plastik davranış beklenirken, oldukça ayrıışmış (HW) pembe ve gri andezitlerde kalıcı Şekil değiştirmeler oluşacaktır. Bu nedenle andezitlerin oldukça ayrıışmış seviyelerinde rüzgar türbini inşasından kaçınılmalıdır.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı ayrışma derecesine sahip pembe ve gri andezitler üzerinde inşa edilecek yüzeysel rüzgar türbini temelinin stabilitesi, dönmeye karşı güvenliği ve temele gelen yüklerden dolayı oluşacak deformasyon dağılımları, temel tabanı köşesinde alınan bir noktanın yer değiştirme miktarı, Phase<sup>2</sup> 2019 V10.006 programı ile analiz edilerek araştırılmıştır. Statik koşullarda yapılan bu hesaplamalarda, rüzgar türbini temeli altında gelişen kayma deformasyonu konturlarının gelen yüke bağlı olarak temel tabanı altında yoğunlaştığı, temele aktarılan yük dağılımına bağlı olarak dağılım gösterdiği, kayma deformasyonlarının tüm koşullarda süreksizlik yüzeylelerinin makaslama dayanımını aşamadığını için süreksizlik yüzeylelerinde herhangi bir yenilmenin oluşmayacağı, ayrışma derecesinin güvenlik faktörü üzerinde azaltıcı bir etki yaptığını ve projelendirme yapılırken ayrışma derecesinin de göz önünde bulundurulmasının taşıyıcı sistemin güvenliği açısından önemli olduğu, yapılan hesaplamalar sonucunda anlaşılmıştır. Burada sunulan bulgular, sadece bu çalışmada kullanılan parametreler için geçerlidir. Elde edilen sonuçlar gerçek projelere doğrudan uygulanmadan önce, orada mevcut kaya formasyonu için geçerli kayma dayanımı parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi ile, ayrıntılı bir Şekilde araştırılması gereklidir. Dinamik koşullarda kaya kütesinde temel tasarımı yapmak için kaya malzemesi ve kaya kütesinin mekanik ve deformabilite özellikleri ile birlikte kütle içerisindeki süreksizliklerin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin de bilinmesi gereklidir. Bu amaçla farklı ayrışma derecelerine sahip pembe ve gri andezitlerde dinamik koşullarda tek ve üç eksenli basınç dayanımı deneyleri ile birlikte andezitlerde gelişen akma bantları, soğuma çatlakları ve tektonik kökenli süreksizlikler üzerinde dinamik durumda kesme kutusu deneyleri TU Bergakademie Freiberg Institut für Geotechnik Gesteinsmechanik laboratuvarlarında devam etmektedir. Deneyler tamamlandığında elde edilen sonuçlar kullanılarak analizler yapılıp irdelenecek ve sonuçlar tartışılacaktır.

Bu nümerik çalışma, bu konu ile ilgili gelecekte yapılacak araştırmalar için faydalı bir kaynak olarak değerlendirilebilir.

**Kaynaklar**

- [1] Aydoğmuş, T., Yıldız, A.A., Arslan, A.T., Örnek, M., Yüzeysel Temeller Altında Geosentetik Donatı Etkisinin Nümerik analizi. İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, Boğaziçi Üniversitesi, 16-17 Kasım 2006,
- [2] <https://www.linkedin.com/pulse/rüzgar-türbinlerinde-temel-tasarımının-önemi-mert-geç>.
- [3] Koca, M.Y., Kıncal, C., Abandoned Stone Quarries in and Around the Izmir City Centre and their Geo-environmental Impacts –Turkey, Engineering Geology, vol.75, 49-67, 2004.
- [4] Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., Support of Underground Excavations in Hard Rock, Balkema, Rotterdam, 1995.
- [5] Barton N., “Physical and Discrete Element Models of Excavation and Failure in Jointed Rock”, Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, (Ed.) Pasamehmetoğlu, A.G., Turkish National Society for Rock Mechanics, Istanbul, Balkema, Rotterdam, pp. 35-46, 1993.
- [6] ASTM, Standard test methods for laboratory determination of density (unit weight) of soil specimens, ASTM D7263-09, West Conshohocken, PA, 2009.
- [7] ASTM, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM D2487-11, West Conshohocken, PA, 2011
- [8] ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974 – 2006, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, 2007.
- [9] Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., Quantification of the Geological Strength Index chart, 47th US Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, San Francisco, USA, 2013.
- [10] Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proceedings of NARMS-TAC2002, Mining Innovation and Technology, Toronto, Canada, s. 267-273, 2002.
- [11] RocData V 5.009, Two-dimensional finite element analysis program. Rocscience Inc, 2018.
- [12] Phase<sup>2</sup> 2019 V 10.006, Two-Dimensional Finite Element Analysis Program. Rocscience Inc, 2018.
- [13] Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., Hoek-Brown Criterion-2002 Edition. In Proceedings of North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 1, 267-273, 2002.
- [14] Marinos, P., Hoek, E., “Estimating the Geotechnical Properties of Heterogeneous Rock Masses Such as Flysch”. Bulletin of the Engineering Geology and the Environment, 60, 85-92, 2001.
- [15] Hoek, E., Rock Mass Properties, In Practical Rock Engineering. Canada: The University of Toronto Press, 2006.
- [16] Kadağcı, K. T., Koca, M. Y., “Açık Ocak Albit İşletmesindeki Kaya Şevlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Duraylılık Değerlendirmesi”, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 38, 1, 1-19, 2014.