

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**KESİCİ DİSK TARAMA DİYAGRAMLARININ  
TÜNEL AÇMA MAKİNESİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

**HAZIRLAYAN**

**OĞUZHAN ERĐÜN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ANKARA - 2022**



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**KESİCİ DİSK TARAMA DİYAGRAMLARININ  
TÜNEL AÇMA MAKİNESİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

**HAZIRLAYAN**

**OĞUZHAN ERĐÜN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEZ DANIŐMANI**

**PROF. DR. SAMİ KARADENİZ**

**ANKARA – 2022**

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Oğuzhan ERGÜN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 28/ 06 / 2022

**Tez Adı:** Kesici Disklerin Tarama Diyagramlarının Tünel Açma Makinesi Performansına Etkisi

**Tez Jüri Üyeleri ( Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu )**

**İmza**

Prof. Dr. Sami KARADENİZ- Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ- Çankaya Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Sedat BAYSEÇ- Başkent Üniversitesi

.....

**ONAY**

Prof. Dr. Faruk ELALDI  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Tarih :** ... / ... / .....

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

Tarih: 29 /05 / 2022

Öğrencinin Adı, Soyadı : Oğuzhan ERGÜN  
Öğrencinin Numarası : 21910086  
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği  
Programı : Tezli Yüksek Lisans  
Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Sami KARADENİZ  
Tez Başlığı : Kesici Disklerin Tarama Diyagramlarının Tünel Açma Makinesi Performansına Etkisi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 64 sayfalık kısmına ilişkin, 27 / 05 / 2022 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %4'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

**ONAY**  
Tarih: ... / ... / .....  
Prof. Dr. Sami KARADENİZ

EŞİME...

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda desteklerini, zamanını ve bilgilerini esirgemeyen tez danışmanım Prof.Dr.Sami KARADENİZ'e,

Makine mühendisi olmamda ve bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme,

Kesici kafa tasarımı konusunda bilgilerini ve desteklerini esirgemeyen Özgür Savaş ÖZÜDOĞRU'ya,

Çalışmaktan gurur duyduğum E-BERK ÖMER GÜNDÜZ Ar-Ge merkezi çalışma arkadaşlarıma,

Her zaman beni destekleyen Pelinsu ERGÜN'e teşekkür ederim.

## ÖZET

**Oğuzhan ERGÜN**

### **KESİCİ DİSK TARAMA DİYAGRAMLARININ TÜNEL AÇMA MAKİNESİ PERFORMANSINA ETKİSİ**

**Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**2022**

Mekanize tünel açma sektörü geçmişten günümüze birçok yöntem, farklı zemin koşulları, insan gücü ya da makine gücünün yardımıyla gelişim göstermiştir. Günümüzde sanayileşmede görülen gelişmeler sayesinde insan güvenliğini ön planda tutan, hızlı ve ekonomik olan tünel açma makineleri (TAM) geliştirilmiştir. TAM'ların kullanım kolaylığı, zorlu zeminlerde çalışma avantajı, iş güvenliği, çalışma süresi ve çalışma maliyetlerinde kazandırdığı faydalardan dolayı projelerde tercih edilme sıklığı her geçen gün artmaktadır. Tünel açma makinelerinin tasarımındaki ana ürün zemin koşullarına göre çeşitlilik gösteren kesici kafadır. Kesici diskler, kesici kafanın zemine penetrasyon yapabilmesini sağlamaktadır. Kesici diskler üzerinde zeminin çatlatılması sırasında, yuvarlanma, normal ve eksenel kuvvetler oluşmaktadır. Zemin çatlatılması sırasında oluşan bu kuvvetler, kesici kafanın zemine penetrasyon yapabilmesini sağlayan tork ve itki kuvvetlerini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada tünel açma makinesi (TAM) sınıfları, makineyi oluşturan ana bölümler, kesici kafa çeşitleri, kesici çeşitleri ve farklı jeolojilere uygun kesici kafa tasarımının önemi hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada kazıları sırasında uygun yüklerde çalışmamış kesicilerde oluşmuş geri dönüşü olmayan hasarlar incelenmiştir. Belirlenen zemin özelliklerine göre 3025 mm kazı çapına sahip kesici kafa tarama diyagramı oluşturulmuştur. Sınır şartlarına göre kesici disklerin içerisinde bulunan rulmanların hesaplamaları yapılmış ve tarama diyagramına göre çalışma süreleri incelenmiştir.

Çalışmada gerçekleştirilen tam boyutlu kesme deneyleri sonucu yüzey kesici disklerin açılı kesici disklerden daha yüksek normal kuvvetle çalışabildiği görülmüştür. Kesici kafa tarama diyagramında açılı kesici disklerin keski mesafelerinin yüzey kesici disklere göre daha düşük olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tünel Açma Makineleri (TAM), Kesici Kafa, Kesici Disk, Kesici Kafa Tarama Diyagramı, Tork ve İtki Kuvveti



# ABSTRACT

**Oguzhan ERGUN**

## **THE EFFECT OF CUTTING DISC SCREENING DIAGRAMS ON TUNNEL BORING MACHINE PERFORMANCE**

**Baskent University, Institute Science and Engineering**

**Department of Mechanical Engineering**

**2022**

The mechanized tunneling industry has improved from past to present by means of many methods such as different ground conditions, manpower or machine power. Thanks to the developments in industrialization today, fast and economical tunnel boring machines (TBM) have been developed that prioritize human safety. The frequency of preference of TBM's in projects is increasing day by day due to the ease of use, the advantage of working on difficult soil, the benefits it provides in work safety, working time and working costs. The primary product in the design of tunnel boring machines is the cutter head, which varies according to the ground conditions. The cutter discs allow the cutter head to penetrate the ground. During the fracturing of the ground, tumbling, normal and axial forces occur on the cutting discs. The forces generated during soil fracturing create torque and thrust forces that enable the cutter head to penetrate the ground.

In this study, information is given about the tunnel boring machine (TBM) classes, main parts of the machine, cutter head types, cutter types and the importance of cutter head design suitable for different geologies. Irremediable damage to the cutters that did not operate at appropriate loads during excavations has been investigated in the study. According to the determined soil characteristics, a cutter head scanning diagram with a excavation diameter of 3025 mm has been created. According to the boundary conditions, the calculations of the bearings in the cutting discs were made and the operating time was examined according to the scanning diagram.

As a result of the full-size cutting tests carried out in the study, it has been seen that the surface cutter discs can operate with higher normal force than the angle cutter discs. It was concluded that the chisel distances of the angled cutter discs in the cutter head scan diagram should be lower than the surface cutter discs.

**Key Words:** Tunnel Boring Machines (TBM) , Cutter Head, Cutting Disc, Cutter Head Scanning Diagram, Thrust Force and Torque

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
TABLolar LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Tünel Açma Makinesi Sınıfları .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.1. Sert Zemin Tünel Açma Makineleri .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1.2. Yumuşak Zemin Tünel Açma Makineleri.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Tünel Açma Makinesi Elemanları .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3. Kesici Kafa Çeşitleri.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4. Kesici Takımlar .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.1. Kesici Diskler .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.2. Kazıyıcılar .....</b>	<b>17</b>
<b>2. TEZİN KONUSU VE LİTERATÜR TARAMASI.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1. Problemin Tanımı.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2. Tezin Konusu .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3. Literatür Taraması.....</b>	<b>26</b>
<b>3. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1. İncelenen Tünel Açma Makineleri.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2. Deneysel Çalışma .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.1. Deney Numunesi.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.2. Kesme Deney Seti .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3. Deney Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....</b>	<b>42</b>

<b>3.2.3.1. Kesici Kafa Tarama Diyagramı ve Kesicilerin Yerleşimi .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.3.2. Kesici Disk için Belirlenen Rulman .....</b>	<b>47</b>
<b>4. DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>53</b>
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>58</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>60</b>

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 1.1. Kayaç Dayanım Değerleri [2] .....	3
Tablo 2.1. Kesici Disklerin Yıllara Göre Kuvvet Değişimi [12].....	26
Tablo 3. 1. Karışık Zemin Tünel Açma Makinesinin Teknik Verileri [28] .....	34
Tablo 3. 2. Sert Zemin Tünel Açma Makinesinin Teknik Verileri [29].....	35
Tablo 3.3. Kesici Kafa Tarama Yarıçapları ve Tarama Açılımları.....	44
Tablo 3.4. Kesici Disk Sınır Şartları.....	48
Tablo 3.5. Kesici Disk Kuvvet ve Hız Değerleri.....	52
Tablo 4. 1. Kesici Disklerde Oluşan Tepki Kuvvetleri .....	57

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Tünel Açma Makinesi (TAM) [1] .....	1
Şekil 1.2. Tünel Açma Makinesi Ekipmanları.(1.Kesici Kafa, 2.Ana Sürücü, 3.İtki Silindiri 4.Konveyör Sistemi, 5.Erektör, 6.Vagonlar) .....	2
Şekil 1.3. Tünel Açma Makinesi Sınıfları .....	4
Şekil 1.4. Tek Kalkanlı Tünel Açma Makinesi [4] .....	5
Şekil 1.5. Çift Kalkanlı Tünel Açma Makinesi [6] .....	6
Şekil 1.6. Kıskaç Tip Tünel Açma Makinesi [7] .....	7
Şekil 1.7. Çamur Tip Tünel Açma Makinesi. (1.Kesici Kafa, 2.Karışım Odası, 3.Basınç Odası, 4.İletim Hatları, 5.Hava Deposu, 6.Geçiş Bölümü, 7.Segment Montajı, 8.Erektör) .....	8
Şekil 1.8. Basınç Dengeleyici (EPB) Tip Tünel Açma Makineleri. (1.Kesici Kafa, 2.İtki Silindiri, 3.Konveyör Sistemi, 4.Vagon) .....	8
Şekil 1.9. Tünel Açma Makinesi (TAM) Elemanları [8] .....	9
Şekil 1.10. Sert Zemin Kesici Kafa (1.Açıklık Bölgeleri, 2. Köşe Sıyırıcılar) .....	11
Şekil 1.11. Karışık Zemin Kesici Kafa (1.Açıklık Bölgeleri, 2. Köşe Sıyırıcılar) .....	12
Şekil 1.12. Kesici Diskler [9]. (1.İkiz Merkez Kesici, 2.Gövde Kesici, 3.Tekli Kesici, 4.İkili Kesici) .....	14
Şekil 1.13. Açılı Dörtlü Disk [9] .....	15
Şekil 1.14. Tekli Kesici Disk ve Tek Gövde Kesici Disk [9].....	16
Şekil 1.15. Kesici Disk Elemanları.....	16
Şekil 1.16. Kesici Disk Montaj Elemanları [9] .....	17
Şekil 1.17. Kazıyıcı .....	17
Şekil 1.18. Köşe Kazıyıcı .....	18

Şekil 2.1. Kesici Disk Üzerinde Oluşan Kuvvetler [10] .....	19
Şekil 2.2. Kesici Diskin Normal Kuvveti ile Oluşturulan Çatlaklar [10].....	20
Şekil 2.3. Kesici Elemanların Yerleşimleri (a. Kesici Diskler, b. Köşe Kazıyıcılar, c.Kazıyıcılar) .....	21
Şekil 2.4. Kesici Disklerin Tarama Daireleri .....	21
Şekil 2.5. Kesici Aşınma Çeşitleri.....	22
Şekil 2.6. Kesici Disk Kontrollü (a) ve Tek Yönlü Aşınanan Kesici Disk (b).....	23
Şekil 2.7. Hasarlı Rulman [11] .....	23
Şekil 2.8. Yeni (a) ve Hatalı Kullanılmış (b) Kesici Diskler.....	24
Şekil 2.9. Çevre Bölümü Aşınan Kesici Kafa .....	24
Şekil 2.10. Kesici Kafa Diyagramı [14] .....	27
Şekil 2.11. Kesici Disk Konumlandırma Çeşitleri [14]. (a,b,c: Sipiral Tasarım, d,e,f: Asimetrik Tasarım, g,h: Yıldız Tasarım).....	28
Şekil 2.12. Kesici Kafada Tork Oluşturan Kuvvetler [22].....	31
Şekil 2.13. Kesici Disk Konumları [26] .....	32
Şekil 2.14. Kesici Kafa Diyagramı [27] .....	33
Şekil 2.15. Kesici Disk Numarasına Göre Değişim Sayısı [27].....	33
Şekil 3.1. İncelenen Tünel Açma Makinesi [28] .....	36
Şekil 3 2. Kesiciler Arası Mesafe Ölçümleri (a. Yüzey Kesiciler Arası Mesafeler, b. Açılı Kesiciler Arası Mesafeler).....	36
Şekil 3.3. Test Yapılan Numune.....	37
Şekil 3.4. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları .....	38
Şekil 3.5. Kesme Deney Seti (1. Basınç Sensörü,2. Normal Kuvvet Pistonu,3. Penetrasyon Sensörü,4.Kesici Disk ve Yataklama Elemanı,5.Deney Materyeli, 6.Yuvarlanma Kuvveti Pistonu, 7. Kullanıcı Ekranı, 8. Kontrol Panosu, 9. Hidrolik Ünite).....	39

Şekil 3.6. Keskiler Arası Mesafeler [30] .....	40
Şekil 3.7. Kesme Deney Seti Kontrol Paneli.....	40
Şekil 3.8. Keskiler Arası Mesafeler.....	41
Şekil 3.9. Ø3025 mm Kesici Kafa Tarama Diyagramı.....	43
Şekil 3.10. Kesici Disk Yerleşimi .....	45
Şekil 3.11. Tekli Kesici Disk Kuvvetleri.....	47
Şekil 3.12. Hıza Bağlı Bileşke Kuvvet .....	49
Şekil 3.13. Yüzey Kesici Disklerde Oluşan Normal Kuvvetler .....	50
Şekil 3.14. Açılı Disklerde Oluşan Kuvvetler .....	51
Şekil 4.1. Test Yapılan Numuneler .....	53
Şekil 4.2. Kesici Diskler Üzerinde Oluşan Tepki Kuvvetleri.....	54
Şekil 4.3. Yuvarlanma Kuvveti - Tork Arasındaki İlişkisi.....	54
Şekil 4.4. Keski Mesafesi-Normal Kuvvet Arasındaki İlişki .....	55
Şekil 4.5. Hesaplanan ve Deneylerle Ölçülen Normal Kuvvetlerin Karşılaştırılması.....	56
Şekil 5.1. Kesici Kafa Tasarımında İzlenilecek Adımlar .....	59

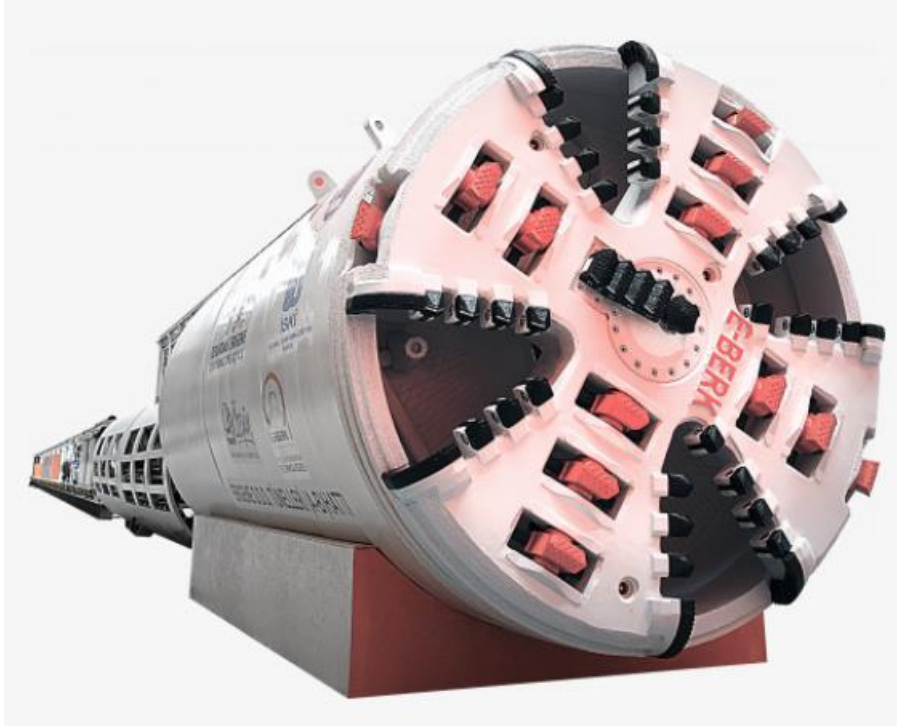
## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>TAM</b>	Tünel Açma Makinesi
<b>S</b>	Keski Mesafesi
<b>d</b>	Penetrasyon (Dalma Derinliği)
<b><math>F_n</math></b>	Normal Kuvvet
<b><math>F_a</math></b>	Eksenel Kuvvet
<b><math>F_T</math></b>	Yuvarlanma Kuvvet
<b><math>Lh</math></b>	Kullanım Ömrü
<b>V</b>	Köşe Keski Hızı
<b><math>D_{TAM}</math></b>	Tünel Açma Makinesi Çapı
<b>C</b>	Dinamik Yük Sayısı
<b>F</b>	Eşdeğer Yük
<b><math>Lh</math></b>	Kullanım Ömrü
<b>L</b>	Nominal Ömür
<b>x</b>	Radyal Faktör
<b>y</b>	Eksenel Faktör
<b><math>F_r</math></b>	Radyal Kuvvet
<b><math>F_a</math></b>	Eksenel Kuvvet
<b>p</b>	Ömür Katsayısı
<b>n</b>	Devir Hızı



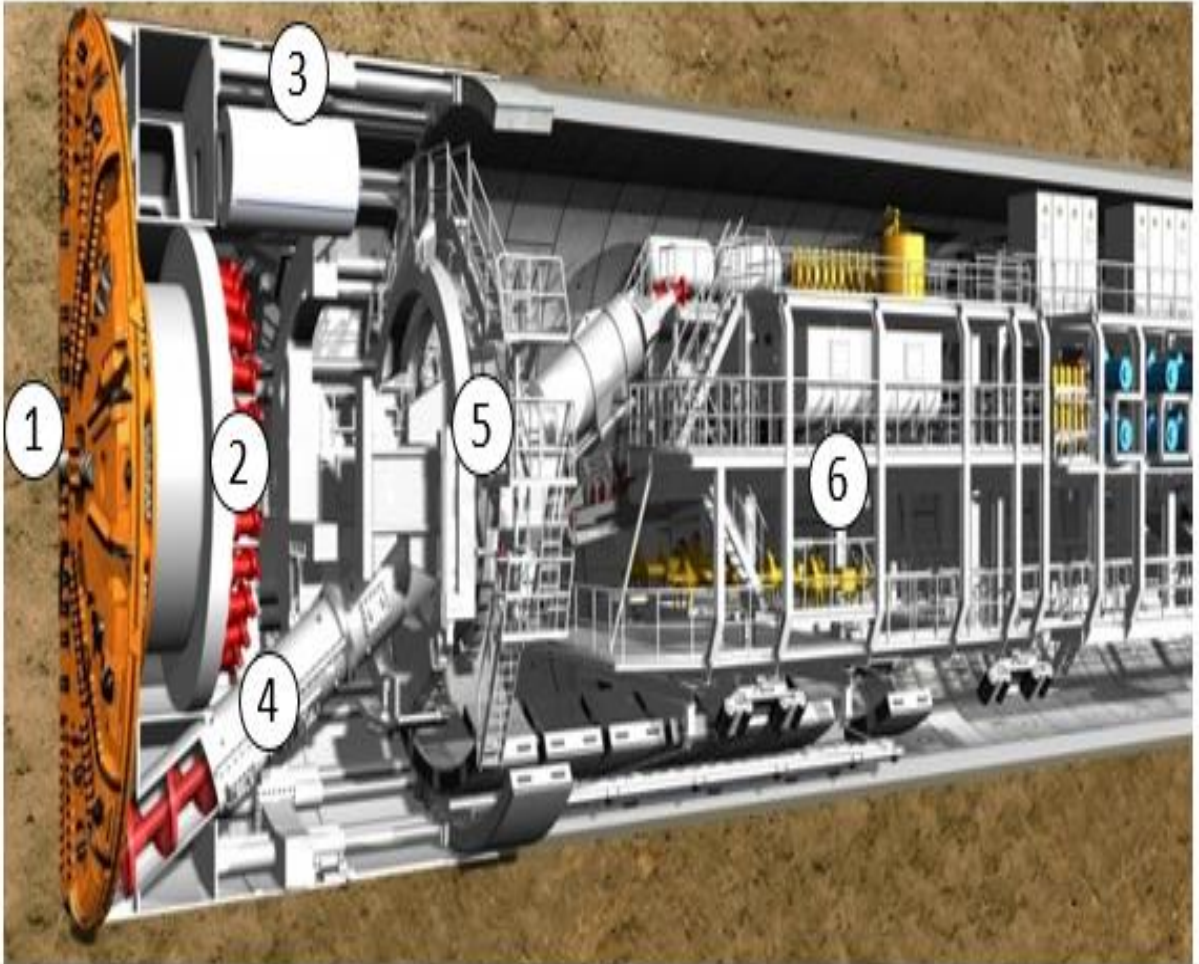
# 1. GİRİŞ

Tünel açma makineleri (TAM), farklı zemin koşullarına göre çeşitlilik gösteren ve çalıştığı zemini dairesel bir kesitle kazmaya yarayan makinelerdir. Şekil 1.1’de gösterilen TAM’nin ön kısmında yer alan kesici kafanın dönmesi ve aynı zamanda TAM’nin içerisinde bulunan itki silindirleri parçalı beton yapıdan destek olarak açılması ile makine kazı işlemini yapmakta ve ilerlemektedir. İtme silindirlerinin strok uzunluklarının tamamlanmasıyla kazı işlemi sonlanmaktadır. Kazı işlemi sırasında ortaya çıkan kazı mataryeli (pasa) bantlı konveyörler veya vidalı konveyörler ile taşıma vagonlarına aktarılmaktadır. Vagonlar raylı veya lastik tekerlekli araçlarla tünel dışarısına taşınmaktadır. Kazı işleminin tamamlanması ile kesici kafa durdurulmakta ve kazı sırasında stroğu açılan itki silindirlerinin strokları kapatılmaktadır. İtme silindirlerinin kapatılması sonucunda oluşan boş alana, erektör yardımı ile tüneli oluşturacak parçalı beton yapının kurulumu yapılmaktadır. Böylelikle bir kazı döngüsü tamamlanmaktadır. Kazı işlemi, itki silindirlerinin kurulumunun yapıldığı beton yapıdan destek olarak tekrar strok açılması ile devam etmektedir.



Şekil 1.1. Tünel Açma Makinesi (TAM) [1]

Şekil 1.2’de tünel açma makinesinin temel bileşenleri yer almaktadır. Bunlar; kesici kazı işlemi gerçekleştiren kesici kafa, kesici kafayı tahrik eden ana sürücü, kesici disklerin zemini çatlatması için gerekli itki kuvvetini ve makinenin zeminde ilerlemesini sağlayan itki silindirleri, pasanın atılmasını sağlayan konveyör sistemleri ve tünel yüzeyine parçalı beton yapının kurulumu sağlayan erektördür. TAM içerisinde elektrik, hidrolik güç gereksinimini ve sistem kontrollerini sağlayan vagonlar bulunmaktadır. Bu vagonların içerisinde pompalar, elektrik motorları, yağ tankları, trafolar, panolar, su ve basınçlı hava tankları ve operatör kabini gibi sistemler yer almaktadır. Buna ek olarak tünel açma makinelerinin segment taşlarını, dolgu harcını ve çakıl taşlarını tünelin içine taşıyan, kazı hafriyatını ise tünelin dışına taşıyan raylı veya lastik tekerlekli taşıtlara ihtiyaçları vardır.



Şekil 1.2. Tünel Açma Makinesi Ekipmanları.(1.Kesici Kafa, 2.Ana Sürücü, 3.İtki Silindiri 4.Konveyör Sistemi, 5.Erektör, 6.Vagonlar)

## 1.1.Tünel Açma Makinesi Sınıfları

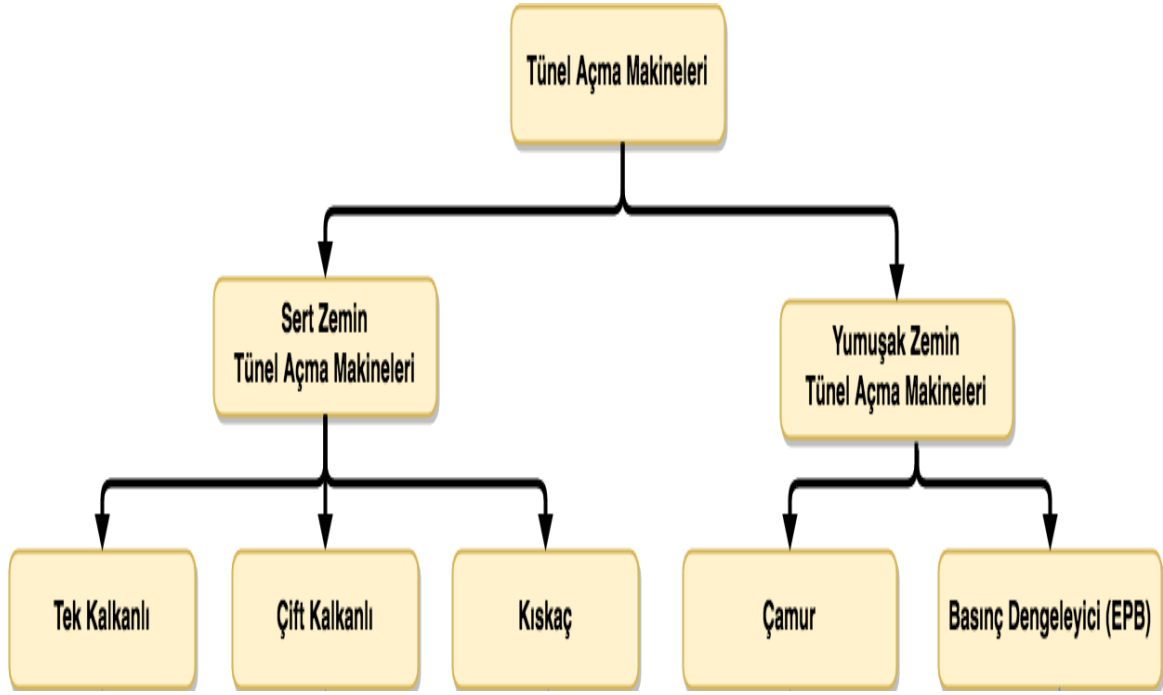
Tünel açma makineleri, kullanıldıkları zemine göre sert ve yumuşak zemin makineleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Literatürde zemin bası dayanım değeri 50 MPa ve üzerinde bulunan zeminler sağlam kaya olarak nitelendirilmektedir. Zemin bası dayanım değeri 50 MPa'ın altında bulunan zeminler ise orta sağlam kaya olarak nitelendirilmektedir. Bu sınıfların belirlenmesi için makinenin çalışacağı zeminden karot örnekleri alınıp, mekanik laboratuvarlarda tek eksenli basınç deneyi yapılarak tünel açma makinesinin çalışacağı zeminin mekanik özellikleri belirlenmektedir ve makine türü buna göre seçilmektedir. Tablo 1.1 de kayaç dayanım değerleri yer almaktadır.

Tablo 1.1. Kayaç Dayanım Değerleri [2]

<b>Kaya/zemin tanımı</b>	<b>Bası Dayanımı (MPa)</b>	<b>Arazi özellikleri</b>
Çok sağlam kaya	> 100	Sağlam çekiç darbesiyle kırılır
Sağlam kaya	50-100	Çekiçle kırılır
Orta sağlam kaya	12.5-50	Çekiç darbesiyle oyulur
Orta zayıf kaya	5.0-12.5	Elle kesilemez
Zayıf kaya	1.5-5.0	Çekiç darbesiyle dağılır
Çok zayıf kaya	0.6-1.5	Elle kırılır
Çok sert zemin	0.3-0.6	Tırnakla çizilir
Sert zemin	0.15-0.3	Parmakla yoğrulamaz
Sağlam zemin	0.08-0.15	Parmakla yoğrulur
Yumuşak zemin	0.04-0.08	Kolay yoğrulur
Çok yumuşak zemin	< 0.04	Parmaklar arasından kaçar

Şekil 1.3'te tünel açma makineleri sınıflandırılmıştır. Bunlar; sert zemin makineleri ve yumuşak zemin makineleri olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Sert zemin makineleri: Tek Kalkanlı, Çift Kalkanlı ve Kısaç olacak şekilde 3 alt gruba ayrılmaktadır. Yumuşak zemin makineleri ise Çamur ve Basınç Dengeleyici olarak 2 alt gruba ayrılmaktadır.

Tek kalkanlı tünel açma makineleri, orta sağlam kaya niteliğindeki zeminde, çift kalkanlı tünel açma makineleri sağlam kaya niteliğindeki zeminde parçalı beton yapı kurularak kullanılmaktadır. Kısaç tip tünel açma makineleri, çok sağlam kaya niteliğindeki zeminde parçalı beton yapı kurulumu yapılmadan kullanılmaktadır. Çamur tip tünel açma makineleri, çok zayıf kaya ve orta zayıf kaya zeminlerde parçalı beton yapı kurularak kullanılmaktadır. Basınç dengeleyici tünel açma makineleri ise, orta zayıf kaya ve orta sağlam kaya zeminlerde parçalı beton yapı kurularak kullanılmaktadır.



Şekil 1.3. Tünel Açma Makinesi Sınıfları

### 1.1.1. Sert Zemin Tünel Açma Makineleri

Tek kalkanlı tünel açma makinelerinde ön kalkan ve kuyruk kalkanı bulunmamaktadır. Bu makinelerde tek bir kalkan ve tek sıra itki silindirleri vardır. Şekil 1.4'te tek kalkanlı tünel açma makinesi gösterilmektedir. Operatör tarafından kesici kafaya devir verilmesi ile itki silindirleri açılmaktadır ve böylece ilerleme sağlanmaktadır. Kazılan materyal, makinenin sonuna kadar veya doğrudan tünel dışına uzanan bantlı konveyör aracılığıyla tahliye edilmektedir. Kazı işlemi tamamlandığında makine durmakta ve itki silindirlerinin kapanmasıyla açılan alana parçalı beton yapı kurulumu yapılmaktadır. Parçalı beton yapının kurulumu erektör ile yapılmaktadır. Montaj işleminin tamamlanması ile itki silindirleri montajlanan beton segmentlere destek olarak yeniden kazı işlemi gerçekleştirilmektedir.

Projenin büyük bir bölümünün jeolojik olarak orta ve zayıf dayanımlı kaya kütlelerinde geçeceği durumlarda veya tünel hattı boyunca fay zonu gibi olumsuz koşulların beklendiği durumlarda tek kalkanlı tünel açma makineleri kullanılmaktadır. Bu tür makineler, itki silindirlerinin doğrudan kurulumu yapılan parçalı beton yapıdan destek almasıyla çalışmaktadır [3].



Şekil 1.4. Tek Kalkanlı Tünel Açma Makinesi [4]

Çift kalkanlı tünel açma makineleri, ön ve arka kısmında birer adet olmak üzere iki ana kalkan oluşmaktadır. Şekil 1.5'te yer alan tünel açma makinelerinin en büyük özelliği ikinci kalkan kısmında yer alan kıskaçlardır. Kıskaçlar makinenin zemine tutunmasını sağlamaktadır. Kazı işlemi öncesinde, kıskaçlar açılıp zemine baskı yaparak makineyi sabitlemektedir. Kıskaçların zemine tutunması ile makinenin ön ve arka silindirleri birbirlerinden mekanik olarak ayrılmaktadır. Bu sayede ön kısımda yer alan itki silindirleri ile kazı işlemi gerçekleştirilmektedir. Arka bölümde yer alan montaj silindirlerinin stroklarının kapatılması ile ortaya çıkan alana parçalı beton yapı kurulumu yapılmaktadır. Kazı işlemi sırasında ortaya çıkan kazı materyali (pasa), bantlı veya vidalı konveyörler ile taşıma vagonlarına aktarılmaktadır. Çift kalkanlı makineler yüksek devir, düşük tork ve yüksek itki kuvvetleri ile çalışmaktadır.

Çift kalkanlı tünel açma makinelerinde kısıkaçların kullanılabilmesi sayesinde kazı işlemi sırasında eş zamanlı olarak parçalı beton yapı kurulumu da yapılabilmektedir. Böylelikle makine parçalı beton yapı kurulumu için beklememektedir. Böylelikle tünel açma makinesinin kazı sayılarında artış sağlanmaktadır. Makine çalışma süresindeki artış, tünel açma makinesinin kazıda daha çok kalabilmesine ve buna bağlı olarak daha çok ilerleyebilmesine olanak sağlamaktadır [5].



Şekil 1.5. Çift Kalkanlı Tünel Açma Makinesi [6]

Kısıkaç tip tünel açma makinelerinde kalkan bulunmamaktadır. Tünel açma makinesi, ihtiyacı olan itki kuvvetini üzerinde bulunan kısıkaçlardan sağlamaktadır. Kazı işlemi öncesinde kısıkaçlar açılarak zemine tutunmaktadır. Kısıkaçlar zemine sabitlendikten sonra tünel açma makinesinin itki kuvveti ihtiyacının karşılanması için tünel eksenine paralel şekilde açılmaktadır. Kısıkaçların üzerinde bulunan silindirler 2 ekseninde çalışmaktadır. Kısıkaç tip tünel açma makineleri çok sağlam zeminde kullanıldıkları için parçalı beton yapı kurulumuna ihtiyaç duyulmamaktadır. Parçalı beton yapı kurulumu yerine vagon bölümünde yer alan enjeksiyon sistemi ile kazı yapılan zemin yüzeyine beton püskürtülmektedir. Şekil 1.6'da yer alan kısıkaç tipi tünel açma makinesi granit vb. çok sağlam zeminlerde kullanıldığı için üzerinde kalkan yer almamaktadır. Kazı materyali bantlı konveyör ile tahliye edilmektedir.

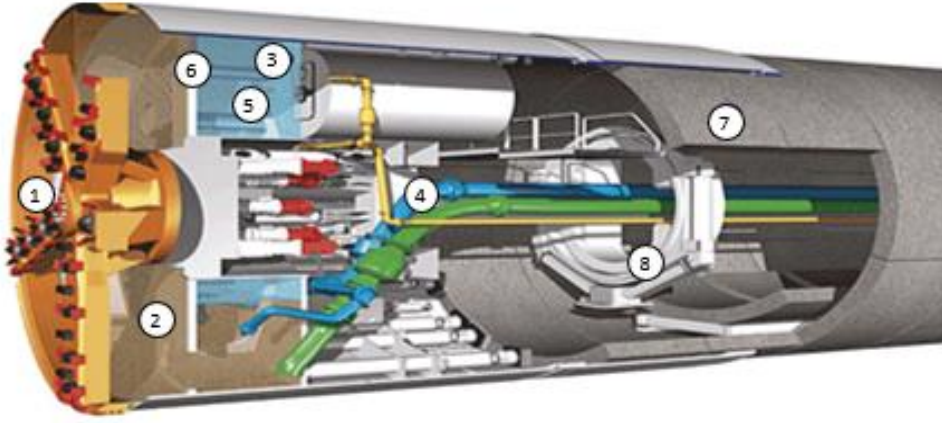
Kıskaç tip tünel açma makinelerinde, kazı işlemi sırasında zeminin çatlatılması ve ilerlemenin sağlanabilmesi için ihtiyaç duyulan itki kuvveti kıskaçlar ile sağlanmaktadır. Kazı işlemi için gerekli olan toplam itme kuvveti pistonlar yardımıyla elde edilmektedir [5].



Şekil 1.6. Kıskaç Tip Tünel Açma Makinesi [7]

### 1.1.2. Yumuşak Zemin Tünel Açma Makineleri

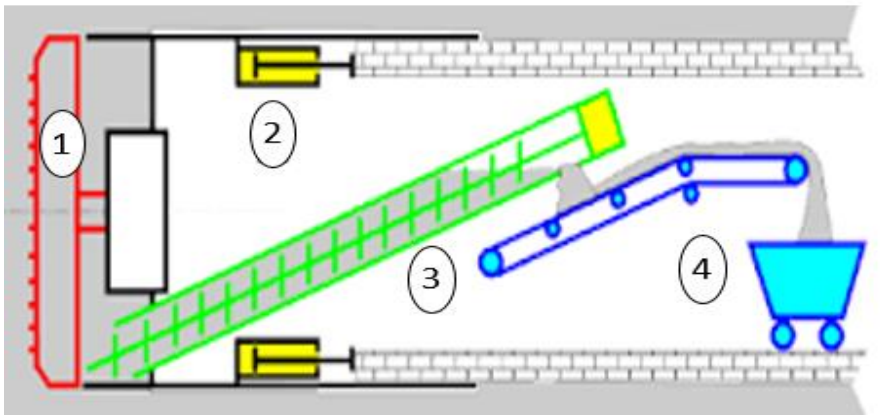
Çamur tip tünel açma makinelerinde tek kalkan ve tek sıra itki silindirleri yer almaktadır. Çamur tip makineler çamurlu ve yeraltı sularının yoğun olduğu zeminlerde kazı işlemini gerçekleştirmektedir. Şekil 1.7’de yer alan çamur tip tünel açma makinesinde, viskozitesi yüksek olan kazı materyaline yüksek oranda su ve kayganlaştırıcı kimyasal enjekte edilerek viskozitesi düşürülür ve böylelikle kazı materyalleri sistemde bulunan çamur pompaları ve taşıyıcı borular ile tünel dışına taşınır. Kazı materyalinin viskozitesini düşürmek için bentonit ve kimyasal karışımlar kullanılmaktadır. Kazı materyaline Şekil 1.7’de 4 numara ile gösterilen boru sistemi ile su ve bentonit, 5 numara ile gösterilen sistemle hava iletilmektedir. Bu sayede 1 numara ile gösterilen kesici kafanın parçalamış olduğu kazı materyalinin viskozitesi, boru hatlarından iletilebilecek kadar düşürülmektedir. Şekilde 2 numara ile gösterilen bölgede iletilecek kazı materyalinin karışımı yapılmaktadır. 4 numara ile gösterilen yeşil hat, viskozitesi düşürülmüş kazı materyalinin tünel dışına iletilmesini sağlamaktadır. Kurulan bu sistemle tünel açma makinesi içerisinde bir basınç kaybı oluşmamakta ve şehir altı geçişlerde kontrollü kazı yapılması sağlanmaktadır. Çamur tip makineler genellikle boğaz ve nehir altı geçişlerde kullanılmaktadır.



Şekil 1.7. Çamur Tip Tünel Açma Makinesi. (1.Kesici Kafa, 2.Karışım Odası, 3.Basınç Odası, 4.İletim Hatları, 5.Hava Deposu, 6.Geçiş Bölümü, 7.Segment Montajı, 8.Erektör)

Zemin basıncı dengeleyici tip tünel açma makinesi; ana kalkan ve yardımcı kalkan içerisinde tek sıra itki silindirleri bulunan tünel açma makineleridir. Şekil 1.8’de yer alan orta zayıf kaya ve orta sağlam kaya zeminlerde kullanılan bu makineler, basınç dengeleme özelliği ile şehir merkezlerinde ve yerleşim bölgelerinin altında kazı işlemini gerçekleştiren tünel açma makineleridir.

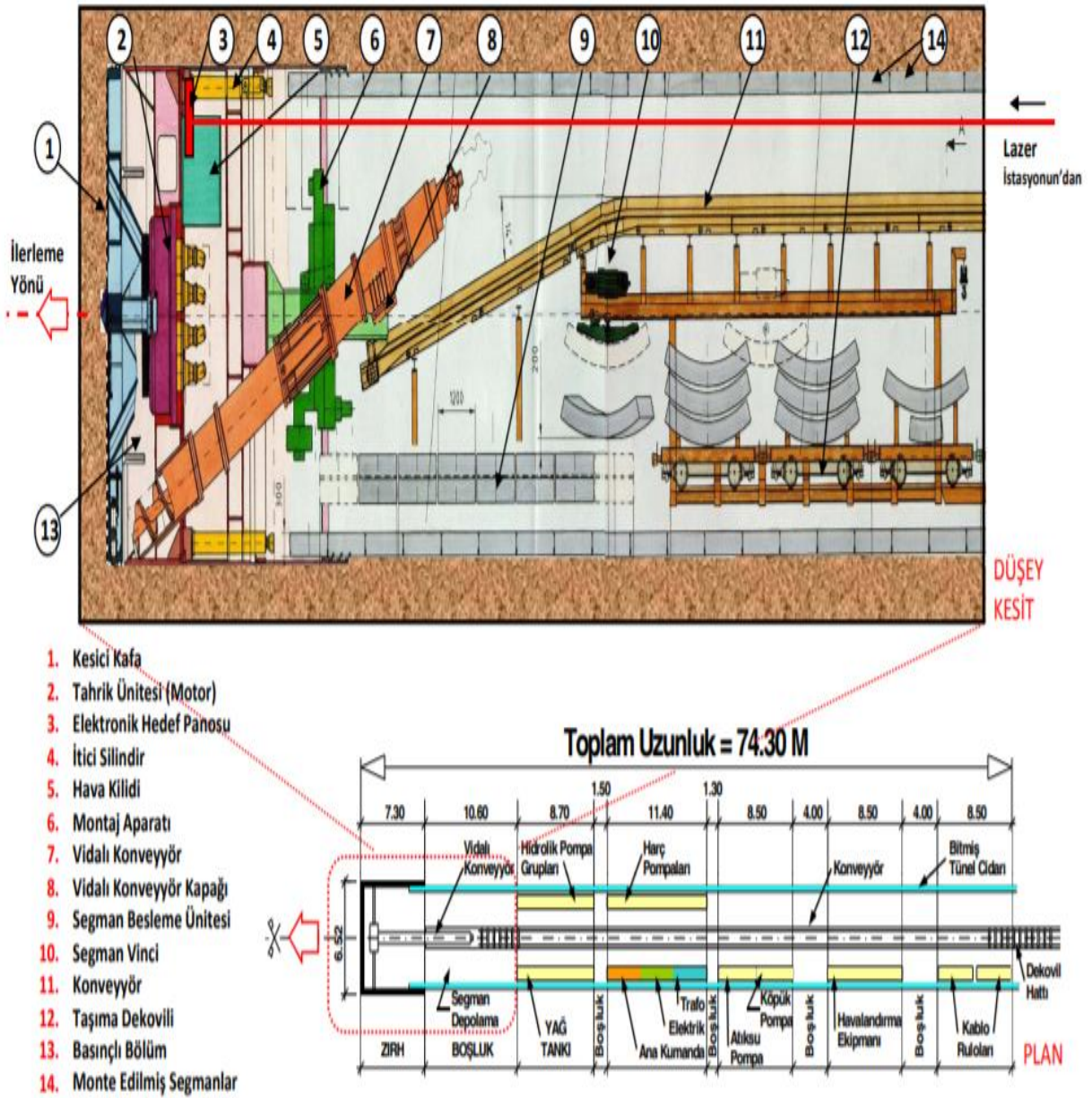
Tünel derinliğine bağlı olarak değişen zemin basıncını, dengeleme şartı ile çalışan makinelerdir. Şekil 1.8’de 1 numaralı bölgede kazı materyalinin kesici kafa arkasında yer alan kazı odasında biriktirilmesi bu bölgeye su ve bentonit gibi kayganlaştırıcı ekipmanlar ile birlikte hava gönderilerek kazı odasında zemin basıncı ile makine basıncı dengelenmektedir. Bu sayede akışkan zeminlerin, basınç etkisi ile kesici kafa boşluklarından içeri kontrolsüz olarak girmesi veya kesici kafa önüne yıkılması engellenmektedir.



Şekil 1.8. Basınç Dengeleyici (EPB) Tip Tünel Açma Makineleri. (1.Kesici Kafa, 2.İtki Silindiri, 3.Konveyör Sistemi, 4.Vagon)



## 1.2. Tünel Açma Makinesi Elemanları



Şekil 1.9. Tünel Açma Makinesi (TAM) Elemanları [8]

Bir tünel açma makinesinin ana elemanları Şekil 1.9'da verilmiştir.

**1. Kesici Kafa:** Üzerinde kesiciler ve sıyırıcılar bulunduran, dönerek kazı işlemi gerçekleştiren ekipmandır.

**2. Ana Sürücü:** Hidrolik veya elektrik enerjisinden aldığı tork ve deviri kesici kafaya redüktör ve dişli aktarımı ile ileten ekipmandır.

**3. Lazer Optikleyici (Elektronik hedef panosu):** Makine konum kontrolü için kullanılan ekipmandır.

**4. İtki Silindirleri:** Makinenin ilerlemesi için gerekli itki kuvvetini karşılayan hidrolik ekipmandır.

**5. Hava Kilidi:** Zemin dengeleyici EPB tip makinelerde bulunan ve basınçlı bölmeye geçmek için kullanılan kilitli kapaktır.

**6. Erektör:** Kazı işlemi sonrası beton segmenti tünel yüzeyine montajlayan robotik koldur.

**7. Vidalı Konveyör:** Kazı materyalini (pasa) kazı odasından alıp bantlı konveyöre ileten ekipmandır.

**8. Vidalı Konveyör Kapağı:** Zemin dengeleyici EPB tip makinelerde bulunan ve kontrollü pasa alımı sağlamak için ayarlanabilen kapaktır.

**9. Segment İletme Ünitesi:** Parçalı beton yapının erektöre iletilmesini sağlayan ekipmandır.

**10. Segment Vinci:** Parçalı beton yapıyı, taşıma arabasından alıp segment iletme ünitesine aktaran vinçtir.

**11. Bantlı Konveyör:** Vidalı konveyörden gelen pasayı tünel dışına aktaran ekipmandır.

**12. Segment Taşıma Arabası:** Parçalı beton yapının segment vinci kullanım alanına getirilmesini sağlayan ekipmandır.

**13. Kazı Odası:** Kontrollü biçimde zemin denge özellikleri bozulmadan kazı materyalinin karışımının yapıldığı bölümdür.

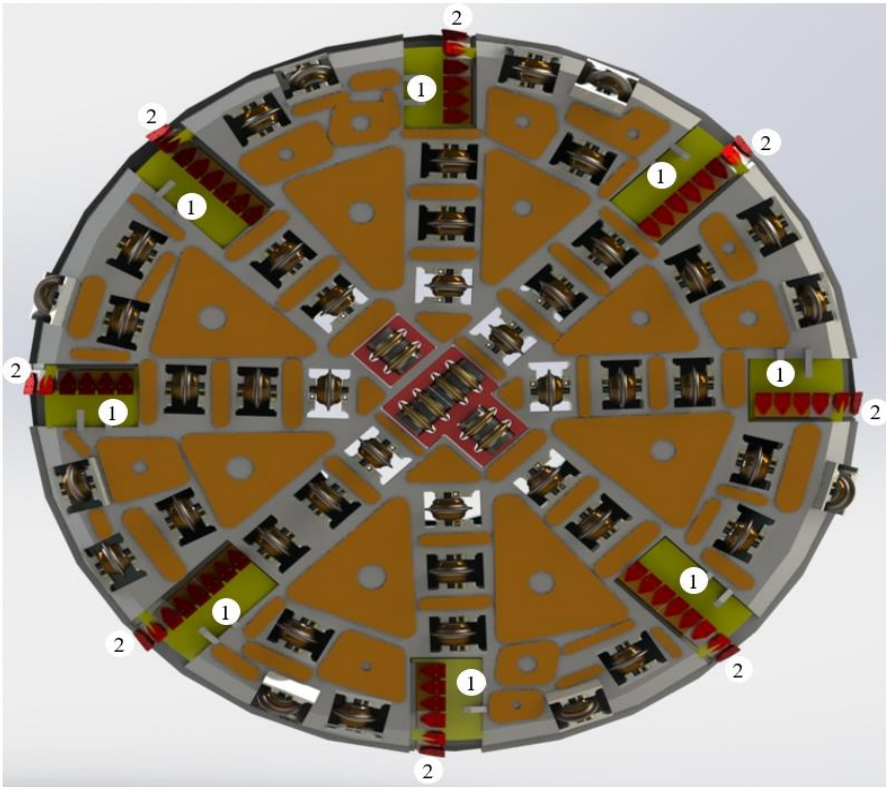
**14. Montajlanmış Beton Segment:** Tünel yüzeyine montajlanmış beton segmentler tünel açma makinesinin ilerlemesi için gereklidir.

Yukarıda belirtilen ana elemanlara ek olarak tünel açma makinelerinde su hatları, köpük hatları, enjeksiyon hatları, probe drill ve aşınma sensörleri bulunmaktadır. Su hatları, kesici kafanın kazı sırasında zemin ile sürtünmesi sonucu oluşan ısının kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Köpük hatları, kazı yapılan toprak yapısını yumuşatmak ve kazı sırasında oluşan pasanın viskozitesinin aktarma bölümünden geçecek şekilde düşürülmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Enjeksiyon hatları, çeşitli karstik boşlukların veya çalışılan projede yeraltı sularının çıkması vb. durumlarda kesici kafanın ön tarafına dolgu maddesini aktaran sistemdir. Probe drill, makinenin kazacağı zemin hakkında bilgi sağlamak için kullanılan karot (numune) delgi makinesidir. Aşınma sensörü, kesici kafanın hasar görmesi durumunda sinyal göndererek operatörü uyarılmaktadır. Aşınma sensörü ile kesici kafada meydana gelen aşınma önceden tespit edilmektedir.

### 1.3. Kesici Kafa Çeşitleri

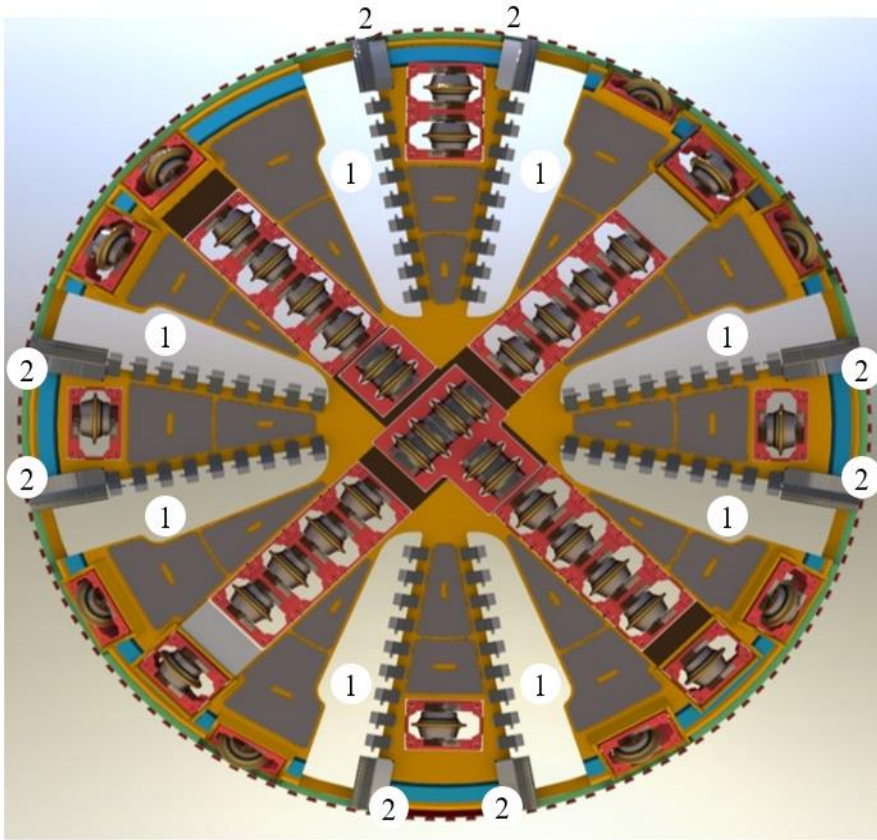
Farklı jeolojilere uygun olarak tasarlanan kesici kafalar kendi içlerinde yapısal ve teknik özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitlilikler tünel açma makinesinin gücünü etkilemektedir. Jeolojilere bağlı olarak tasarlanan kesici kafalar 4 ana gruptan oluşmaktadır. Bunlar, sert zemin kesici kafa, yumuşak zemin kesici kafa, çamur tip kesici kafa ve karışık tip kesici kafa olarak isimlendirilmektedir.

Sert zemin kesici kafaların tasarımı yapılırken yüksek mukavemetli kayaç yapılar da çalışması hedeflenmektedir. Kayaçların yüksek mukavemet göstermesi sebebiyle zemin çatlatma işleminde zorluklar yaşanabilmektedir. Zemin kazı performansını korumak için kesici diskler arası keski mesafeleri azaltılmaktadır. Kesici disk sayısındaki artış kesici kafa yüzeyinde kazı materyalinin toplanmasını sağlayan açıklıkların azalmasına sebep olmaktadır. Açıklık oranındaki düşüş kesici disklerin, kesici kafa yüzeyinde kapladıkları alanla orantılıdır. Sert zemin kesici kafalarda, diğer tip kesici kafalara göre açıklık oranının düşük olması sebebiyle kesici kafa devir hızı daha yüksektir. Bu özelliğiyle sert zemin kesici kafalar kazı süresinin uzamamasını sağlamaktadır. Şekil 1.10'da sert zemin kesici kafa tasarımı görülmektedir. Şekilde 1 numaralı bölgeler kesici kafa açıklıklarını belirtmektedir. 2 numaralı ekipman köşe sıyırıcıları belirtmektedir.



Şekil 1.10. Sert Zemin Kesici Kafa (1.Açıklık Bölgeleri, 2. Köşe Sıyırıcılar)

Zemin çeşitliliğinin fazla olduğu projelerde karışık zemin kesici kafa tasarımı yapılmaktadır. Karışık zemin kesici kafalar, yumuşak ve sert zeminlerde çalışma sağlayabilen karma yapılu bir kesici kafa çeşididir. Kesici kafa üzerinde konumlanan kesici ekipmanlar farklılık göstermektedir. Her iki zeminde de kazabilmesinden dolayı açıklık oranı sert zemin kesici kafalara göre yüksektir. Kesici kafa, karışık zeminde çalışması sebebiyle sert zemin kesici kafa yapısına göre daha yüksek tork ve daha düşük devirde çalışabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Şekil 1.11’de karışık zemin kesici kafa tasarımı görülmektedir. Şekilde 1 numaralı bölgeler kesici kafa açıklıklarını belirtmektedir. 2 numaralı ekipman köşe sıyırıcıları belirtmektedir.



Şekil 1.11. Karışık Zemin Kesici Kafa (1.Açıklık Bölgeleri, 2. Köşe Sıyırıcılar)

Şekil 1.10 ve Şekil 1.11’deki kesici kafalarda açıklık oranlarında farklılıklar olduğu görülmektedir. Sert zemin kesici kafalar köşe sıyırıcıların konumu sebebiyle sadece saat yönünde dönerek kazı yapmaktadır. Karışık zemin kesici kafalar köşe sıyırıcıların konumu sebebiyle her 2 yönde dönerek kazı yapabilmektedir.

Yumuşak zemin kesici kafalarda, sert zemin ve karışık zemin kesici kafalara göre açıklık oranı daha fazladır. Sert zemin kesici kafalar, yumuşak zemin makinelere göre zemin sürtünme katsayısı nedeniyle daha yüksek devir ve daha düşük tork ile çalışmaktadır.

Çamur tip zemin kesici kafalar en yüksek açıklık oranına sahip kesici kafa çeşididir. Genellikle kazı yaptığı zeminlerde tutunamamaktadır veya kazı yapılan zeminin çok zayıf zemin olması nedeniyle zemin baskı kuvveti diğer kesici kafa çeşitlerine göre daha yüksektir. Bu çeşit kafaların yüksek itki kuvveti, yüksek tork ve düşük devir ile çalışması beklenmektedir.

Çamur tipi kesici kafalar yüksek oranda yeraltı suyunun bulunduğu zeminlerde, deniz, boğaz altı gibi geçişlerde kullanılmaktadır.

## 1.4. Kesici Takımlar

Tünel açma makinesinin zemini çatlatmasını ve makinenin ilerlemeyebilmesini sağlayan kesici kafa üzerinde konumlanan ekipmanlara kesici takım denilmektedir. Kesici takımlar dövme teknolojisi ile üretilen özel alaşımlı çeliklerden imal edilmektedir. Kesici takımlar farklı jeolojilere göre seçilmektedir. Bunlar; kesici diskler, kesici bıçaklar ve kazıma elemanlarıdır.

### 1.4.1. Kesici Diskler

Kesici diskler jeolojik zemin koşullarına göre tasarımsal farklılıklar göstermektedir. Bu durum imalat aşamasındaki malzeme kalitesinde, işlem proseslerinde ve ısıl işlem süreçlerinde değişkenliklere sebep olmaktadır. Kesici diskler tasarımsal farklılıklarına göre isimlendirilmektedir. Diskler; tekli kesici, ikili kesici, ikiz merkez kesici, gövde kesici ve açılı dörtlü diskler olarak çeşitlendirilmektedir. Şekil 1.12’de kesici kafa tasarımına göre üretilen kesici diskler yer almaktadır.



Şekil 1.12. Kesici Diskler [9]. (1.İkiz Merkez Kesici, 2.Gövde Kesici, 3.Tekli Kesici, . 4.İkili Kesici)

▪ **İkiz Merkez Kesici:** Aynı gövde üzerinden birbirinden bağımsız 2 adet kesici bulunan disklerdir. Kesici kafa merkezinde konumlandırılmaktadır. Gövde elemanı ve kesici disk ayrı olarak üretilmektedir.

▪ **Gövde Kesici:** Aynı gövde üzerinde birbirine bağımlı 2 adet kesici bulunan disklerdir. Kesici disklerde hasar oluşması durumunda gövde elemanının değişmesi gerekmektedir.

▪ **Tekli Kesici:** Gövde üzerinde 1 adet kesici bulunan disklerdir. Gövde elemanı ve kesici disk ayrı olarak üretilmektedir.

▪ **İkili Kesici:** Aynı gövde üzerinde birbirine bağımlı 2 adet kesici bulunan disklerdir. Gövde elemanı ve kesici disk ayrı olarak üretilmektedir.



Şekil 1.13. Açılı Dörtlü Disk [9]

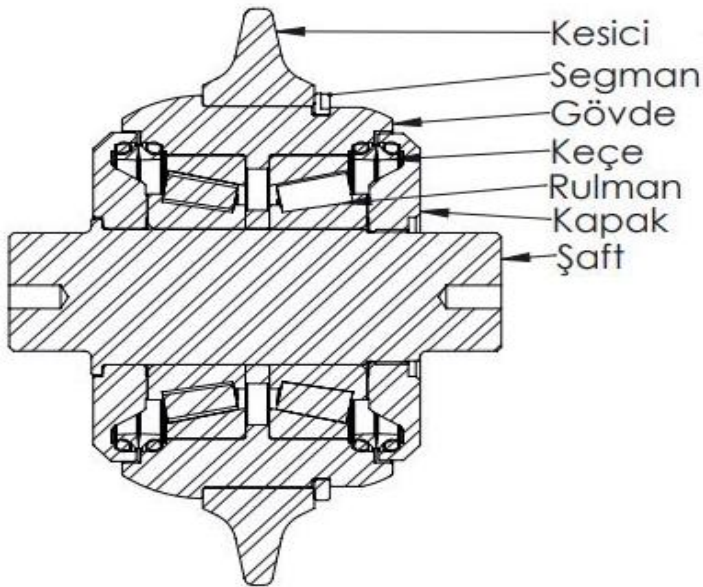
▪ **Açılı Dörtlü Disk:** Kesici disk gövdesine farklı çaplarda kesici şekilleri verilen disklerdir. Bu kesici kafanın en dış çevresine yerleştirerek birden fazla disk konularak sağlanabilecek tüm açıların ortaya çıkarılmasını sağlar. Açılı dörtlü diskler makinenin dönüş kabiliyetini artırmak ve kalkan bölümü üzerinde oluşan sürtünme kuvvetini azaltmak için kullanılmaktadır. Şekil 1.13'te açılı dörtlü disk gösterilmektedir.

Kesici diskler, içerisinde bulunan rulmanlar sayesinde üzerinde oluşan aksenal kuvvet, radyal kuvvet, normal kuvvet, sıcaklık ve titreşime karşı mukavemet sağlamaktadır. Kesici diskler zemine penetre olarak temas ettikleri jeolojik zeminde yorulmalar ve çatlaklar meydana getirmektedir. Bu işlem ile kesme işlemini gerçekleştirmektedirler. Şekil 1.14'te tekli kesici disk ve tek gövdeli kesici disklerin içerisinde bulunan elemanlar yer almaktadır.



Şekil 1.14. Tekli Kesici Disk ve Tek Gövde Kesici Disk [9]

Kesici diskler, şaft, kapak, rulman, keçe, gövde, segman ve kesiciden oluşmaktadır. Şaft üzerine konumlanan rulmanların dönme kabiliyeti kazandırdığı kesiciler ile zemin çatlatılmaktadır. Rulmanların zeminden korunabilmesi ve kesici disk içerisinde bulunan yağın muhafaza edilebilmesi için kapakların üzerinde keçeler bulunmaktadır. Şekil 1.15'te kesici disk elemanları gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Kesici Disk Elemanları



Kesici diskler, kesici kafa üzerinde farklı konumlarda ve açılarda bulunmaktadır. Kesici disklerin kesici kafaya takılabilmesi için montaj elemanları kullanılmaktadır. Şekil 1.16'da montaj esnasında disklerin disk yuvasına sabitlenmesi ve çalışma esnasında titreşim kaynaklı hasarları önlemek için kullanılan montaj elemanları yer almaktadır.



Şekil 1.16. Kesici Disk Montaj Elemanları [9]

#### 1.4.2. Kazıyıcılar

Kazıyıcılar, yüzey kesici disklerin çatlatmış olduğu kayaçların kırılmasında, çatlakların genişletilmesinde ve kazı materyalinin kazı odasına geçişinde görev almaktadır. Kesici kafa üzerinde farklı tarama çaplarında konumlandırılmaktadır. Şekil 1.17'de bir kazıyıcı yer almaktadır.



Şekil 1.17. Kazıyıcı

Köşe kazıyıcılar, tünel çapını belirlemektedir. Açılı kesici disklerin çatlatmış olduğu kayaların kırılmasında, çatlakların genişletilmesinde ve kazı materyalinin kazı odasına geçişinde görev almaktadır. Kesici kafa üzerinde konumlanan kazıyıcı ekipmanlarda tarama diyagramları bulunmaktadır. Oluşturulan diyagramlara göre köşe kazıyıcıların, tünel açma makinesinin kazı çapına göre konumlandırılması beklenmektedir. Şekil 1.18’de bir köşe kazıyıcı yer almaktadır.

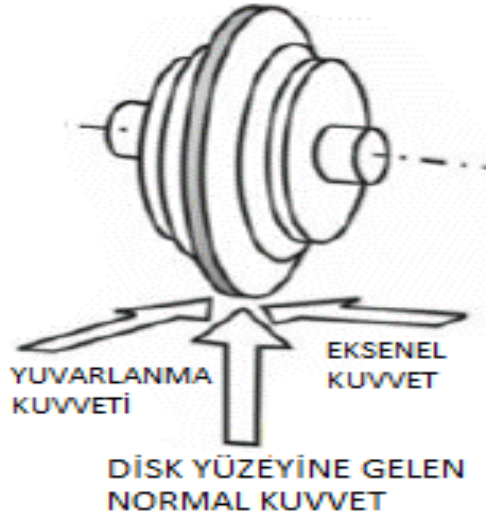


Şekil 1.18. Köşe Kazıyıcı

## 2. TEZİN KONUSU VE LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Problemin Tanımı

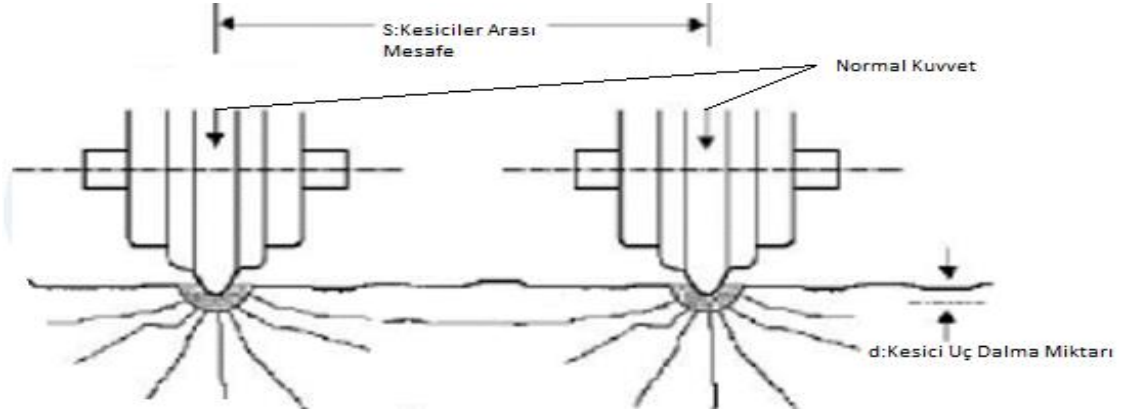
Tünel açma makinelerinin üretimi değişken zemin koşullarına göre yapılmaktadır. Üretimi yapılacak makinelerin çalışacağı zemin hakkında zemin mekaniği değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Zemin mekaniği değerlerine göre kesici kafa üzerinde konumlanacak olan disk ölçüleri, kesici disklerde kullanılacak rulmanların seçilmesi ve kesici diskin kuvvet değerlerine göre kesici kafa diyagramı belirlenmesi gerekmektedir. Kesici disklerde meydana gelen kuvvetler Şekil 2.1’de görüldüğü üzere yuvarlanma, normal ve aksenal kuvvetler şeklinde bileşenlere ayrılabilir. Disk üzerinde oluşan aksenal kuvvetin rulman ile sönmülmesi beklenmektedir. Disk üzerinde oluşan normal kuvvetlerin toplamı kesici kafanın zemini çatlatması için gerekli olan itki kuvvetini oluşturmaktadır. Yuvarlanma kuvvetlerinin kesici kafa üzerindeki konumlarına göre kuvvet toplamları makinenin tork değerini oluşturmaktadır.



Şekil 2.1. Kesici Disk Üzerinde Oluşan Kuvvetler [10]

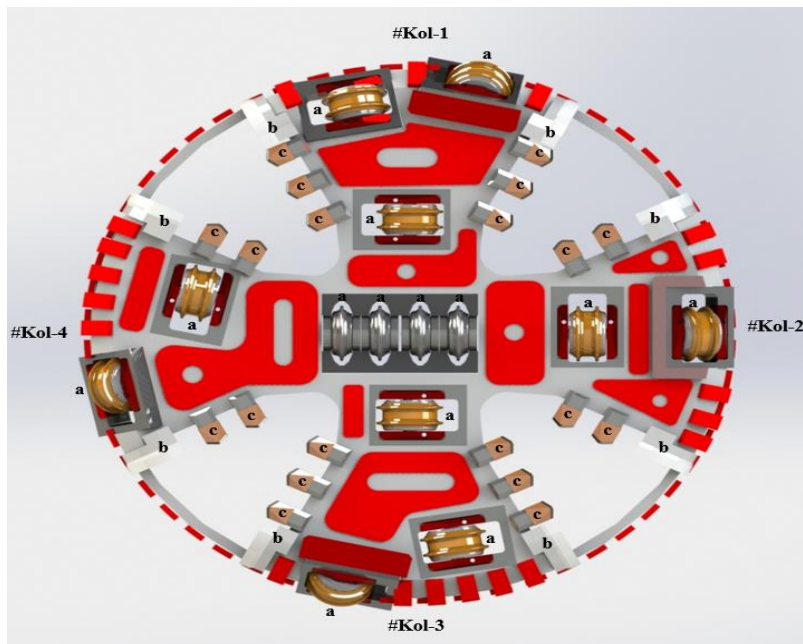
Tünel açılacak zeminin kesici diskler ile çatlatılması hedeflenmektedir. Kesici disklerin penetrasyon miktarına göre makine performansı belirlenmektedir. Bu penetrasyonlar dairesel bir kesit ile tünel cidarını oluşturmakta ve ilerleme sağlanmaktadır. Şekil 2.2’de kesici diskin şematik olarak zemini çatlatma görünümü yer almaktadır. Şekilde

kesici diskler arası mesafe  $S$ , çatlatma için gerekli olan itki kuvveti normal kuvvet ve kesici uç dalma miktarı (penetrasyon)  $d$  ile gösterilmiştir.



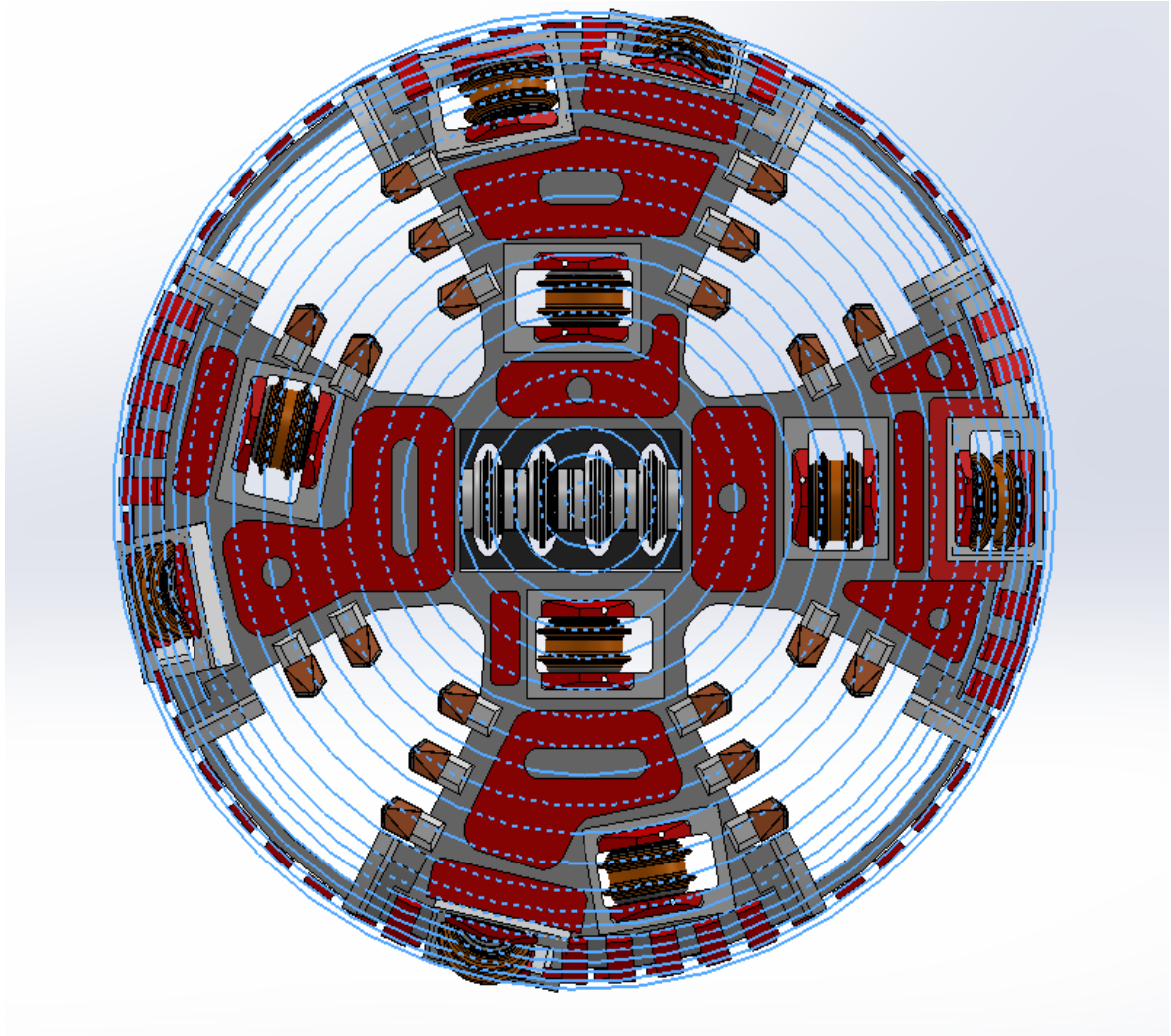
Şekil 2.2. Kesici Diskin Normal Kuvveti ile Oluşturulan Çatlaklar [10]

Kesici kafalar üzerinde kesici diskler, kazıyıcılar ve köşe kazıyıcılar konumlandırılmaktadır. Kesici kafa üzerinde, bu elemanların yerleşim konumlarını belirleyen tarama diyagramları bulunmaktadır. Bu diyagramların makinenin çalışma performansına, çalışma süresine ve yedek parça kullanımına doğrudan etkisi olduğu bilinmektedir. Hatalı olduğu veya diskler arası yeterli mesafenin olmadığı tarama diyagramlarında proje işletme maliyetleri ve kazı sürelerini uzamaktadır. Şekil 2.3'te kesici disk, kazıyıcı ve köşe kazıyıcının kesici kafa üzerindeki yerleşimi gösterilmektedir. Penetrasyonu oluşturmak için gerekli olan tork ve itki kuvveti ana aktarımı kesici kafanın çelik yapısını oluşturan kollarla sağlanmaktadır. Kollarda oluşan kuvvetler toplamı tünel açma makinesinin ana parametrelerini oluşturmaktadır.



Şekil 2.3. Kesici Elemanların Yerleşimleri (a. Kesici Diskler, b. Köşe Kazıyıcılar, c.Kazıyıcılar)

Kesici kafa üzerinde bulunan kesici disk, kazıyıcı ve köşe kazıyıcının taramış olduğu daireler bulunmaktadır. Şekil 2.4'te gösterilen kesici kafa üzerindeki her daire bir adet kesici diski ifade etmektedir. Bu dairelerde bulunan kesici diskler tünel çapına, zemine ve makine performansına göre değişmektedir. Kesici diskler kesici kafa üzerinde geometrik açıdan açılı ve yüzey diskleri olarak iki farklı yerleşimle konumlanmaktadır. Açılı diskler kesici kafanın dış çapı üzerine konumlandırılarak tünel cidarını oluşturmaktadır. Yüzey diskler kesici kafa üzerinde yüzey bölgesindeki kayaç yapıların çatlatılmasını sağlamaktadır. Kesici kafa tasarımında açılı disklerin, üzerinde oluşan aksel kuvveti taşıyabilmesi için tarama daireleri arasındaki mesafe azaltılarak disk üzerine gelen aksel kuvvetin azaltılması hedeflenmektedir.



Şekil 2.4. Kesici Disklerin Tarama Daireleri

Hasar almış kesici kafalarda çevre disklerin yüksek miktarda aşınmış, rulmanlarının ve kesicilerinin kırıldığı ve kesici kafada geri dönüşü olmayan hasarlara neden olduğu belirtilmektedir [27]. Bu durum, yanlış makine seçimi sonucunda ya da kesici kafa diyagramının uygun olmayan tasarımıyla sonuçlanmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada farklı zemin koşullarına göre kesici kafa diyagramlarının oluşturulması ve kesici kafada meydana gelebilecek hasarların azaltılması amaçlanmıştır. Kesici diskler için uygun rulman seçimi yapılarak, makinenin çalışacağı zemin formasyonları için tam boyutlu kesme deneyleriyle makine gücünün belirlenmesi ve literatürde rastlanan problemlerin azaltılması hedeflenmektedir.



Şekil 2.5. Kesici Aşınma Çeşitleri

Şekil 2.5'te kazı sırasında uygun olmayan yük değerlerinde çalışmış disklerde meydana gelen mantarlaşma ve tek taraflı sivrilme hasar yapıları görülmektedir. Şekilde yeni olarak üretimden çıkmış olan bir kesici diskin kesiti de verilmiştir. Aşınmış kalın kesit tipleri, düzenli olarak kullanım saatini tamamlamış ve düzenli olarak az aşınma yaşanan disklerdir. Aşınmış kalın kesit tipleri, TAM üzerinde istenilen tipte aşınma olduğunu ve kesici diskin çalışma ömrünü tamamlamış olduğunu göstermektedir. Tek taraflı sivrilme tipi ise kesiciler, kesici kafa üzerinde bulunan açılı disklerin doğru konumda olmadığını ve çalışma ömrünü istenilen düzeyde tamamlayamadığını göstermektedir. Mantarlaşmış aşınma tipi kesicilerde kesici kafaya çalışma değerinden daha yüksek bir itme kuvveti verilmiştir, bu nedenle kesici diskin çalışabileceği akma mukavemetinin üstüne çıkmış mantarlaşma adını verilen şekil değişimi oluşmuştur. Kesici disklerde meydana gelen

aşınmalar sonucunda, kesici disklerin zemini çatlatma işlemini yerine getirememesi ve böylelikle tünel açma makinesinin yüksek tork ve itki kuvvetinde çalışmasına sebep olması beklenmektedir. Yüksek kuvvet değerleri nedeniyle zemin ile makine arasındaki sürtünme kuvvetinde artış olmakta ve buna bağlı olarak aşınmalar meydana gelmektedir. Aşınma miktarındaki artış yüksek miktarda yedek parça kullanımını da beraberinde gerektirmektedir.

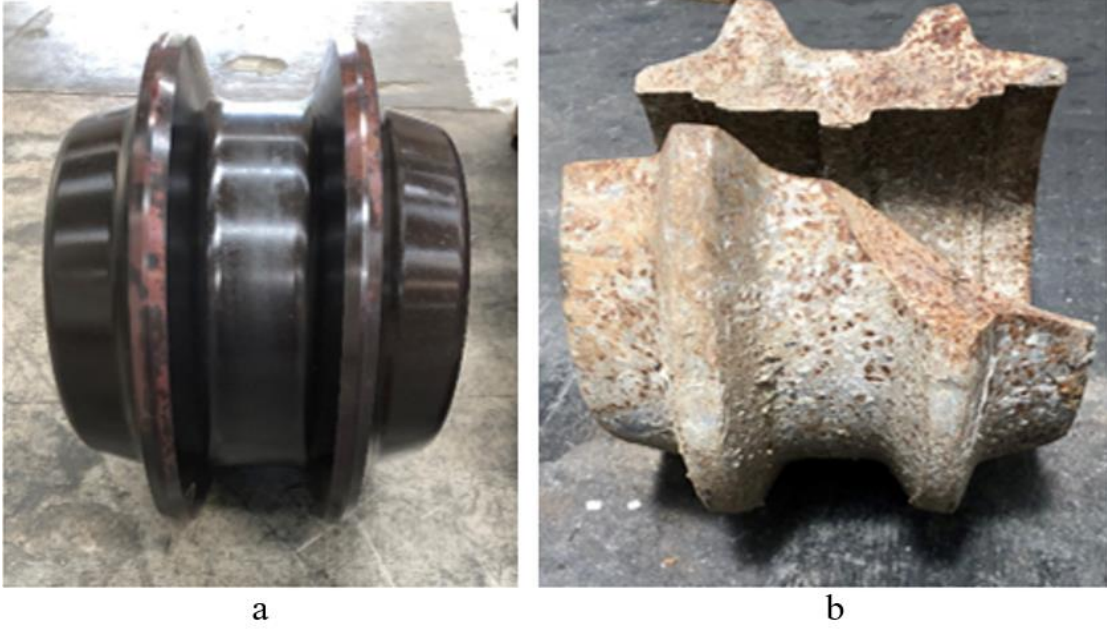


Şekil 2.6. Kesici Disk Kontrollü (a) ve Tek Yönlü Aşınan Kesici Disk (b)

Şekil 2.6 a’da kesici disklerin master ile kontrolleri yapılmaktadır. Kontroller sırasında bazı kesici disklerin Şekil 2.6 b’de görüldüğü şekilde tek yönlü aşındığı görülmüştür. Kesici disklerin zemin ile rotasyon hareketine devam edemediği ve tek yönlü aşınmanın meydana geldiği görülmüştür. Yapılan kontroller sonrasında kesici disk demontajı yapılmış ve içerisinde bulunan rulmanlarda kırılma olduğu belirlenmiştir. Böylelikle uygun rulman seçiminin makine yedek parça sarfiyatı üzerinde direkt olarak etkili olduğu görülmüştür. Şekil 2.7’de hasar oluşmuş kesici disk rulmanı görülmektedir.



Şekil 2.7. Hasarlı Rulman [11]



Şekil 2.8. Yeni (a) ve Hatalı Kullanılmış (b) Kesici Diskler

Şekil 2.8 a’da yeni üretilmiş kesici disk görülmektedir. Şekil 2.8 b’de uygun olmayan yüklerde çalışan ve üzerine gelen kuvvetlere mukavemet gösteremeyerek kırılan bir kesici disk görülmektedir. Hatalı kullanılan kesici diskler, kesici kafada geri dönüşü olmayan hasarlara sebebiyet vermektedir. Hasarın fark edilmemesi durumunda ise ve kazı işlemlerine devam edilirse Şekil 2.5’te görüldüğü gibi çeşitli hasar sorunları ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.9. Çevre Bölümü Aşınan Kesici Kafa



Şekil 2.9'da kesici kafanın çevre bölümünün tamamen aşınmış olduğu görülmektedir. Bu durum tünel açma makinesinin performansının etkilenmesine hatta kazı yapılmasına engel olmaktadır. Ayrıca kesici disk problemlerinde sorun yaratan temel eleman kesici disk üzerinde konumlanan rulmanlardır. Çalışma ömrü tamamlanmış kesici disklerin değiştirilmemesi veya belirlenen yük değerlerinin dışında çalıştırılması sonucu rulmanların rotasyonel hareketi kısıtlanmaktadır. Bu tip aşınmalar geri dönüşü olmayan aşınmalardır. Ayrıca tünel işletme şartlarını da ağırlaştırmaktadır.

## **2.2. Tezin Konusu**

Tünel açma makinelerinin ilerlemesi, zemini çatlatmaya yardımcı olan kesici kafa sayesinde yapılmaktadır. Kesici kafa üzerinde bulunan kesici disklerin imal edilme yöntemlerine göre, farklı baskı kuvvetlerinde ve farklı jeolojilerde kazı yapılabilmektedir. Kesici diskler, içerisinde bulunan rulmanlar sayesinde kendi eksenleri etrafında dönebilmektedir. Ayrıca kesici disk içerisinde bulunan shaft ekipmanı, kesici kafa üzerinde bulunan yataklara sabitlenerek kesici kafanın dönüşü sırasında diskin dönüşünü de sağlamaktadır. Bu çalışmada kesici diskler üzerinde oluşan yuvarlanma ve normal kuvvetlerin kesici kafa üzerindeki etkilerinin ve kesici kafa diyagramına göre kesici disklerin yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. İlave olarak, tezde açılı kesici disklerde kesikler arası mesafenin makine performansına etkileri de incelenecektir.

Merkezden konumlandırılmaya başlanan kesici disklerin 1 turda kat ettikleri mesafeler çalışma saatlerinde farklılıklar meydana getirmektedir. Tarama diyagramına göre farklı devir hızında çalışan kesici disklerin, içerisinde bulunan rulmanların çalışma saatine olan etkisi incelenecektir. Kesici diskler üzerinde oluşan eksenel kuvvet ve baskı kuvveti arasında ters orantı vardır, eksenel kuvvet değeri arttıkça kesici diskin çalışabileceği baskı kuvveti değeri azalmaktadır. Buna bağlı olarak kesikler arası mesafenin değişimi incelenecektir.

Bu çalışma 12 inç (304.8 mm) çapında kesici disklerle yapılmıştır. Tam boyutlu kesme deney setinde kullanılan beton bloklar 52-56 MPa basma dayanımına sahip ve 400x400x1000mm boyutlarında imal edilmiştir. Tam boyutlu kesme deney seti ile kesici disklerin kesme işlemi sırasında oluşan tepki kuvvetlerinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Ölçümü yapılan tepki kuvvetleri normal ve yuvarlanma kuvvetleridir. Tasarımı yapılan kesici kafa diyagramına göre tünel açma makinesinin ihtiyacı olan kuvvetlerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu deney seti ile kesici disklerin oluşturduğu yüksek tork ve itki kuvvetinin önüne geçilmesi, enerji sarfiyatının azaltılması, oluşabilecek hasarların minimum

seviyeye indirilmesi, kesici disklerde rulman sorunu yaşanmaması ve kesici disk diyagramlarının yapılan deneyler ile makine gücüne etkisinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

### 2.3. Literatür Taraması

Literatür çalışması kapsamında çevre sınır şartlarının belirlenmesi için gerekli yöntemler, karşılaşılan sorunlar, uygulanan deney yöntemleri ve sonuçları araştırılmıştır. İncelenen makaleler neticesinde kesici kafa tarama diyagramlarında konumlanan yüzey ve çevre diskler arasındaki çalışma şartları irdelenmiştir.

Roby vd. [12], araştırmalarında kesici disklerin 50 yıllık süreçteki gelişimi incelemişlerdir. Bu çalışmada kesici disklerin zemin ile temas ettiği kesicilerin, rulmanların ve keçe sistemlerinin gelişimini incelemişlerdir. Kazı işlemlerini sonlandırmış kesici diskleri inceleyerek farklı jeolojilerde çeşitli kesici ringlerin kullanılmasını ve etkilerini incelemişlerdir. Kesici disk üzerinde gelişen teknolojinin toplam proje maliyetlerinin düşürülmesine etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada kesici disklerin farklı çaplara göre yükleme kapasiteleri hakkında bilgi verilmiştir. Tablo 2.1’de yıllara göre kesici disk ölçüsü ve çalışma yüklerinde artış olduğu belirtilmiştir.

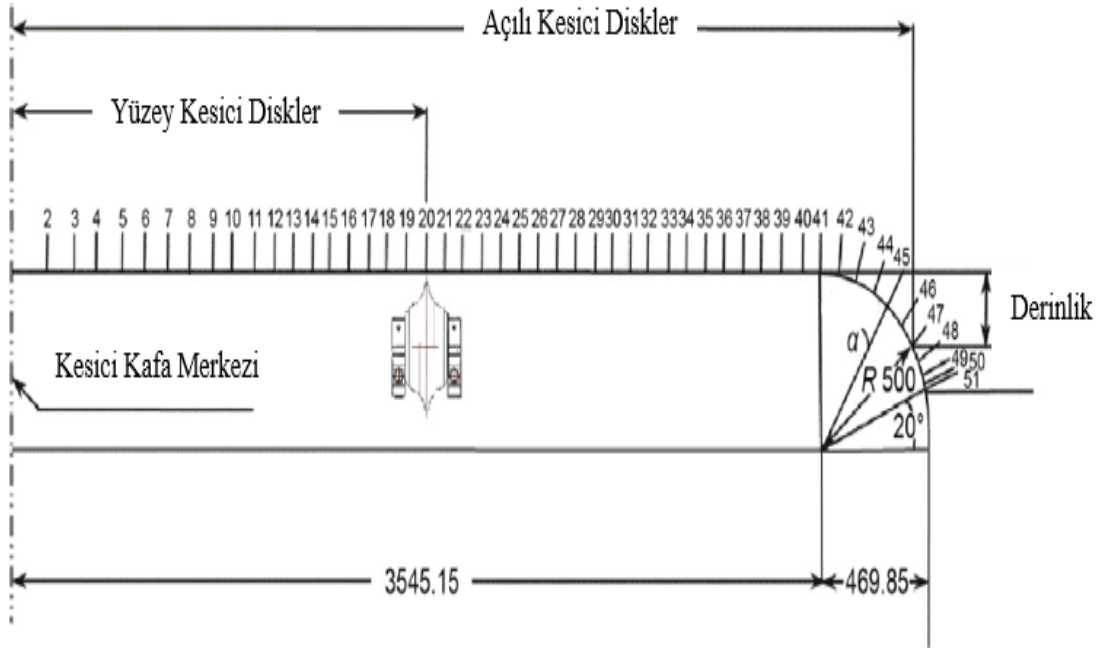
Tablo 2.1. Kesici Disklerin Yıllara Göre Kuvvet Değişimi [12]

Kesici Disk Çapları (inç)	Yük Taşıma Kapasitesi (kN)	Yıl
11	85	1961
12	125	1969
13	145	1980
14	165	1976
15.5	200	1973
16.25	200	1987
17	215	1983
19	312	1989
20	312	2006

Medel-Morales vd. [13], araştırmalarında kesme deney seti ile DEMPACK kod sistemi arasındaki ilişki irdelenmiştir. Kaya parçacıklarının ve kesici disklerin birbirleriyle lineer ve çeşitli açılarda etkileşimi incelenmiş ve bu değerler ile simülasyonu yapılmıştır. Çalışmada disk üzerinde oluşan normal kuvvet, yuvarlanma kuvveti ve yanal kuvvetlerin hesaplanıp tünel açma makineleri için DEMPACK simülasyon yöntemi ile test ve

analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Çalışmada ayrıca kesici disklerin kesme mesafesi oranı artırılıp azaltılarak ve penetrasyon değerlerine farklı dalma değerleri ile çözümler yaptırılarak kesici disklerin üzerinde meydana gelen kuvvetler irdelenmiş ve tünel açma makinesinin kesici kafa için gerekli olan kurulu güç hesaplaması yapılmasını amaçlamışlardır. Çalışmada kurulu gücün dalma oranları ile ilişkili olduğu görülmüş ve kuvvet değerlerindeki değişim belirtilmiştir.

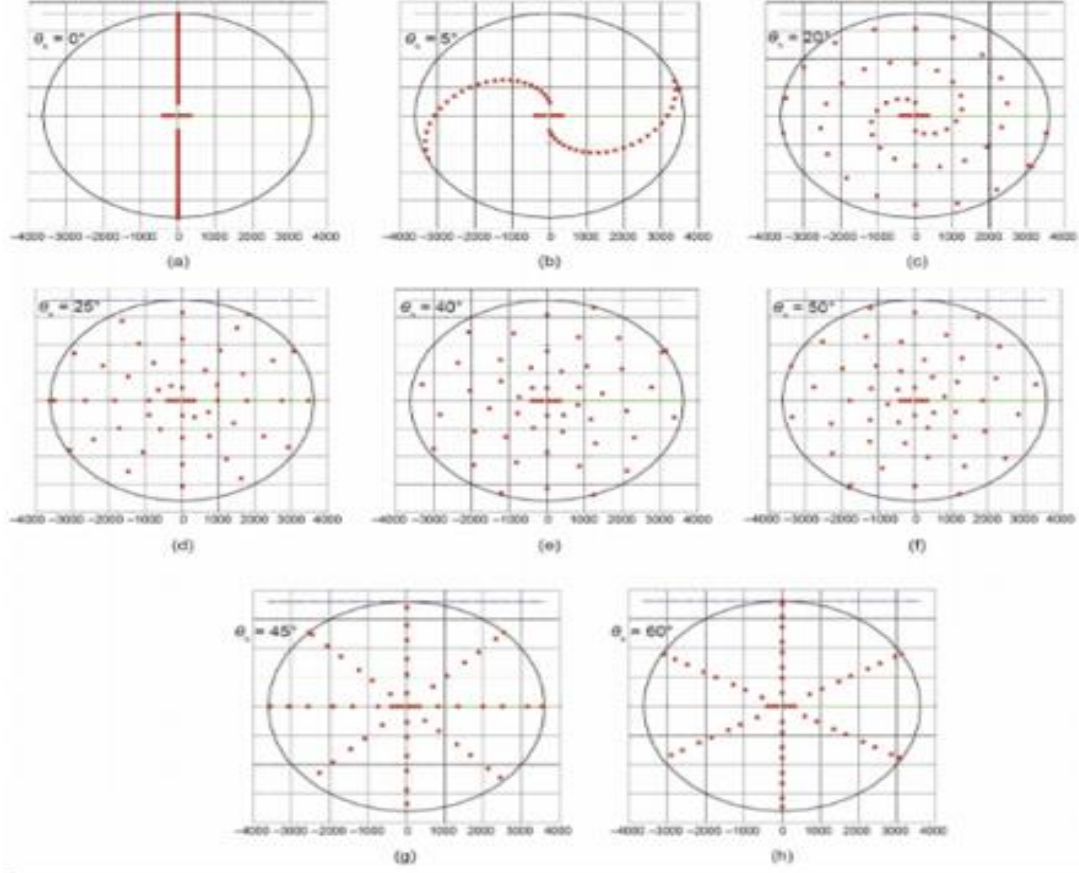
Jamal Rostami ve Soo-HoChang [14], araştırmalarında sert zemin kesici kafa tasarımını modelleri incelenmişlerdir. Çalışmada kesici kafanın, tünel açma makinelerinin en önemli parçası olduğu ve kesici kafaların tünel açma makinelerinin performansını belirleyen ekipman olduğu savunulmuştur. İlave olarak, kesici disklerin kesici kafa üzerindeki konumları ve konumlanma çeşitleri incelenmiştir. Çalışmada kesici disklerin kesici kafa üzerinde dik ve açılı olarak konumlandığı ve bu konumlara göre kesici disk diyagramı oluşturulduğu belirtilmiştir. Ayrıca aksenal kuvvetin açılı kesici disklerde yüzey kesici disklere göre daha fazla oluştuğu belirtilmiştir.



Şekil 2.10. Kesici Kafa Diyagramı [14]

Rostami ve Chang tünel açma makinelerinin performansının belirlenmesinde, Şekil 2.10'da görüldüğü gibi bir kesici kafa diyagramının oluşturulması gerektiğini, zira bu diyagramın tork ve itki kuvvetine etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Kesici kafa tarama diyagramına göre tünel açma makinesinin itki ve tork kuvvetlerinin hesaplanabileceğini

belirtmişlerdir. Kesici kafa üzerindeki disklerin konumlarını 3 farklı tasarımda incelemiştir. Şekil 2.11’de bu 3 tasarım spiral tasarım, asimetrik tasarım ve yıldız tasarım olarak yer almaktadır.



Şekil 2.11. Kesici Disk Konumlandırma Çeşitleri [14]. (a,b,c: Spiral Tasarım, d,e,f: Asimetrik Tasarım, g,h: Yıldız Tasarım)

Song vd. [15], araştırmalarında sert zemin tünel açma makinelerini incelemiştir. Kesici disklerin farklı penetrasyon ve keski mesafeleri değerleri ile deneyler yapmışlardır. Çalışmada enerjinin korunumu yasasını kullanmışlardır. Farklı çaplardaki kesici disklerin ve v tip kesici üzerinde oluşan enerji etkilerini incelemiştir. Çalışmada zemin mekanik özelliklerinin iyileşmesi ile penetrasyonun artacağını belirtmişlerdir.

Balcı vd. [16], araştırmalarında Kartal formasyonu üzerinde çalışmışlardır ve ilgili formasyon üzerinden tünel açma makinesi performansının belirlenmesini hedeflemiştir. Ayrıca çalışmada tünel açma makinelerinin tarihçesi, gelişim süreçleri ve sınıfları hakkında bilgi vermişlerdir. Kesici kafa kazı işlemine etkisi olan kayaç formasyonları, makine tipi, kütlesi, kurulu toplam gücü, kazı çapı, kesici disk yerleşimi, kesici disk sayısı, kesici disk tipi gibi parametreleri performansa etkisi olan parametreler olarak sınıflandırılmıştır. Bu

çalışmada Kartal formasyonu (kireçtaşı) numunesine göre tam boyutlu deneyler yapılarak kesici kafa torkunun 614 kN.m ve kesici kafa itki kuvvetinin 343 kN olduğunu ve bu değerlere göre günlük ortalama 21.7 m kazı yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Rostami vd. [17], araştırmalarında sert zemin tünel açma makinelerini incelemişlerdir. Zemin koşullarına göre kesici kafa geometrisi referans alınarak makine penetrasyon değerini belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada açılı çevre diskler üzerinde oluşacak bileşke kuvvet dağılımını incelemişlerdir. 3450 mm kazı çapına sahip bir kesici kafa için kazı parametrelerini belirlemişlerdir. Kesici kafa üzerinde 28 adet kesici disk ile çalışacağını planlamışlardır. Yapılan deneylerde normal kuvvetin 121 kN ve yuvarlanma kuvvetinin 13.3 kN olduğunu ölçmüşlerdir. Makine itki kuvvetini 5.3 MN, makine torkunu 478 kN.m ve kesici kafa hareket gücünü 540 kW olarak hesaplamışlardır.

Copur vd. [18], araştırmalarında çeşitli kayaç numuneleri üzerinden tam boyutlu kesme deneyi ile kesme kuvveti, normal kuvvet ve spesifik enerjilerin farklı kesme aralıkları ve penetrasyon değerleri ile kuvvet bileşenlerini hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada 11 farklı formasyon incelemiş ve kazı materyaline göre hangi makine seçiminin uygun olacağı hipotezini sunmuşlardır.

Bilgin vd. [19], araştırmalarında Kadıköy-Kartal metro tünellerinde kullanılacak tünel açma makinelerini incelemişlerdir. Çalışmada, tam boyutlu kesme deney seti kullanılarak tünel açma makinesinin tasarım parametreleri irdelenmiştir. Makinenin, çalışacağı hat üzerinde 4 farklı formasyondan geçeceğini belirlemişlerdir. Tam boyutlu kesme deneyinde 13 inç (330.2 mm) ve 1.2 mm uç genişliği olan disk kullanılmıştır.

Deneyler için 1000 x 500 x 700 mm boyutlarında blok numuneler oluşturulmuştur. Farklı keski mesafeleri ve penetrasyon değerleri kullanılarak yuvarlanma kuvveti, normal kuvvet ve spesifik enerjiler ölçülmüş ve makine performansı belirlemişlerdir.

Makalede, kullanılan tam boyutlu kesme deney seti modeli incelenmiştir. Strain gauge kullanılarak özel olarak yapılan alüminyum dinamometre ile 490.3 kN keski kuvvetleri ölçülmüştür. Keski arası mesafeler hidrolik silindirler ile sağlanmaktadır.

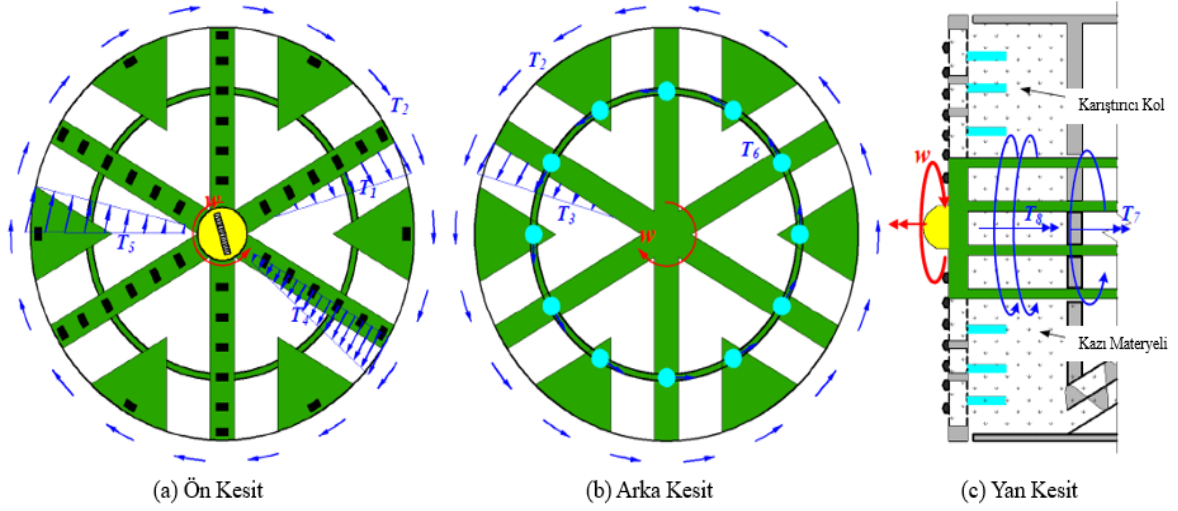
Kartal formasyonuna göre kesme deneyi sonuçları irdelenmiştir. 6570 mm çapında tünel açma makinesinde kesici disk sayısı 44 olarak belirlenmiştir. Kesme deneyleri 13 inç (330.2 mm) çapında kesici diskler ile yapılmıştır. 13 inç (330.2 mm) çapında kesici disk için köşe keski hızı 120 m/dk olarak verilmiştir. Keski arası mesafe (S) 80 mm ve penetrasyon

8 mm olacak şekilde yapılan deneylerde 63.7 kN baskı kuvveti bulunmuştur. Kesici disk çapındaki 1 inç (25.4 mm)'lik ölçü değişiminin, kesici disk üzerinde oluşacak baskı kuvvetinde %5'lik kuvvet değişimi meydana getireceğini belirtmişlerdir. Makalede incelenen makine 17 inç (431.8 mm) çapında kesici diskler ile çalışmaktadır. Bu nedenle 17 inç (431.8 mm) çapında kesici disk için baskı kuvveti 76.5 kN olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak bu ölçülerdeki bir kesici kafaya sahip tünel açma makinesi için 4040.3 kN itme kuvveti, 737 kN.m tork, 463 kW kesme gücü gereksinimi ve 25 m/gün ilerleme hızı bulunmuşlardır.

Wei vd. [20], çalışmalarında kesici kafa üzerinde konumlanan kesici disklerin yerleşimlerinin çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada kesiciler merkez, normal ve köşe olarak sınıflara ayrılmıştır. Çalışmada ayrıca sert zemin tünel açma makinesi kesici kafa diyagramı açıklanarak çeşitli örnekler verilmiştir. Çalışmada kesici kafa üzerinde bulunan kesici disk konumlarının makinenin çalışacağı zemin koşullarına göre düzenlenmesi ve kesici kafa disk diyagramının oluşturulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Chang vd. [21], çalışmalarında Hwandeung Granit zemin numunesi ile farklı kesiciler arası mesafe ve penetrasyon değerleri uygulayarak tam boyutlu kesme deneyleri yapmışlardır. Kesici disk üzerinde meydana gelen 3 farklı kuvvetin (yuvarlanma kuvveti, normal kuvvet ve eksenel kuvvet) tasarımı direkt etkilediği ve kesici kafa üzerindeki yerlerini belirlediği belirtilmiştir. Kesme deney sonuçları fotogrametrik teknikle ölçülmüştür. Optimum kesme oranının kesiciler arası mesafe (S) / penetrasyon (d) oranının 10-12 arasında olması gerektiği belirtilmiştir.

Godinez vd. [22], çalışmalarında 6440 mm çapında zemin denge basınçlı tip makineyi incelemişlerdir. Kesici kafa tasarımı sırasında kesme torkuna etki edecek ekipmanları irdelemişlerdir. Kesici kafanın ihtiyacı olan toplam tork kuvvetleri hakkında çalışmışlardır. Şekil 2.12 a'da kesici kafa kolları üzerinde bulunan kesici disklerin üçgen yayılı yük oluşturduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.12 b'de karışım kollarının torka etki ettiğini belirtmişlerdir. Şekil 2.12 c'de kesici kafanın yüzey ile oluşan sürtünmeden kaynaklı torka etki ettiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.12. Kesici Kafada Tork Oluşturan Kuvvetler [22]

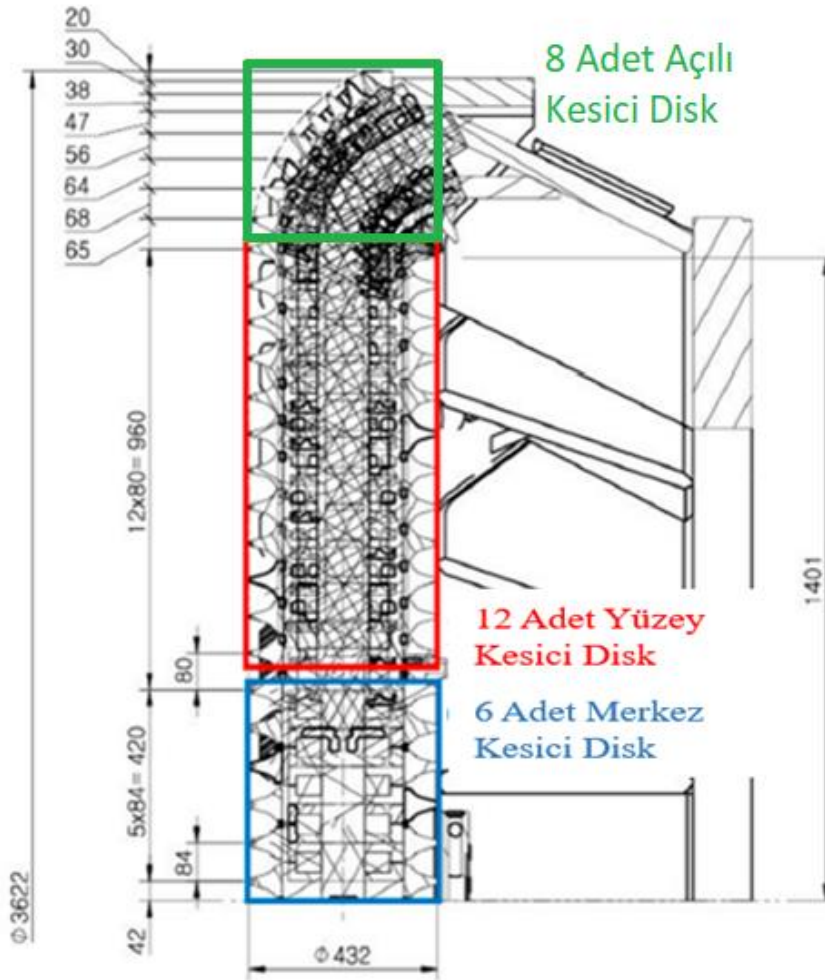
Cheng vd. [23], araştırmalarında tam boyutlu kesme deney seti ve ayırık eleman modeli (EDEM) yöntemi ile çalışmışlardır. Hertz-Mindlin temas yaklaşımı ile parçacık teması modellenen yapılmamasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Kesici disk üzerinde 3 farklı kuvvet oluştuğunu belirtmişlerdir. Bunlar yuvarlanma, normal ve aksenal kuvvetlerdir. Tam boyutlu kesme deneylerinin yapılabilmesi için kesici disklerin devir sayısının, kesici çapının ve keski mesafelerinin önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Chen vd. [24], araştırmalarında kesici kafada konumlanan kesici diskler için spiral tasarım yöntemi ile çalışmışlardır. Bu sayede kesici kafa üzerinde yayılı yük oluşturmayı hedeflemişlerdir. Spiral tasarım sayesinde kesici kafa üzerinde oluşabilecek şok kuvvetlerinin önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Simülasyon ve deneysel yöntemlerle spiral tasarımın kesici kafalar için uygun yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Geng vd. [25], çalışmalarında yüzey ve açılı diskler ile çalışmışlardır.  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $30^\circ$  ile kesici diskler tam boyutlu kesme deney setine konumlandırılmıştır. 2, 4, 6 ve 8 mm penetrasyon değerlerinde ve 15-30 mm arasında değişen keski mesafeleri ile çalışma yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre açılı disklerin çalışma kuvvetlerinin yüzey disklere göre düşük olduğu ve bu sorunun çözümü için açılı disklerin kademeli olarak keski mesafelerinin azaltılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Kyoungyul vd. [26], araştırmalarında kesici kafada oluşan kuvvetlerin, ana sürücü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 3560 mm çapında kesici kafa ve 17 inç (432mm) kesici diskler ile deneyler yapmışlardır. Şekil 2.13'te kesici disklerin, kesici kafa üzerinde

konumlandıkları bölgeler hakkında bilgi verilmiştir. Kesici kafada 6 adet merkez, 12 adet yüzey ve 8 adet açılı kesici disk kullanılmışlardır. Şekil 2.13'te bulunan kesici kafa diyagramında, kesici diskler arası mesafeler merkez kesici disklerde 84 mm, yüzey kesici disklerde 80 mm ve açılı kesici disklerde 20-65 mm arasında değişmektedir. Açılı kesici diskler için disk başına düşen kuvvetin azlatılması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle kesici disk mesafeleri açılı kesicilerde azaltılmıştır. Farklı kesici kafa devir hızlarında kesici elemanlarda oluşan tork kuvvetini incelemiştir. Yapılan deneylerde kazı süresi sabit tutularak farklı devir hızlarında kesici kafanın oluşturduğu tork kuvvetini incelemiştir. 1.5 dev/dk ile yapılan deneylerde, 4.5 dev/dk ile yapılan deneylere göre daha yüksek tork gerektiğini belirtmişlerdir.

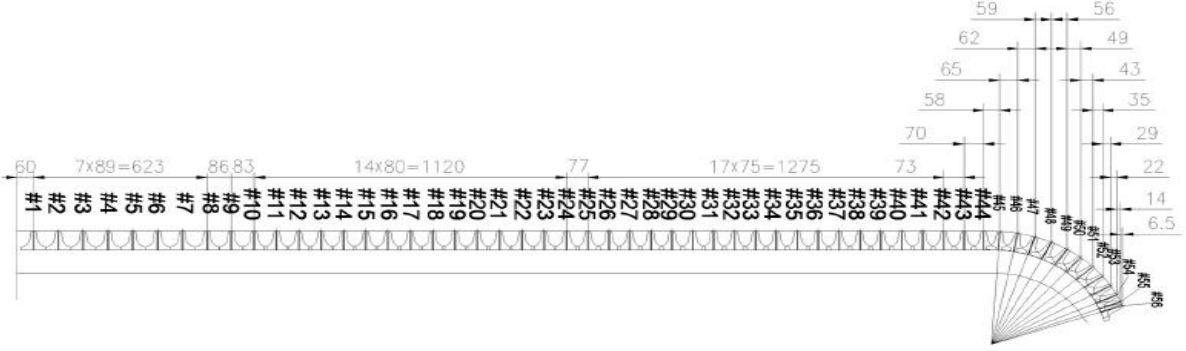


Şekil 2.13. Kesici Disk Konumları [26]

Yang vd. [27], çalışmalarında kesici disklerin değişimleri hakkında incelemelerde bulunmuşlardır. Kesici disklerin kontrol edilmesinden dolayı yaşanan zaman kayıpları hakkında incelemeler yapmışlardır. Kesici disk numaralarına göre değişim sayılarını

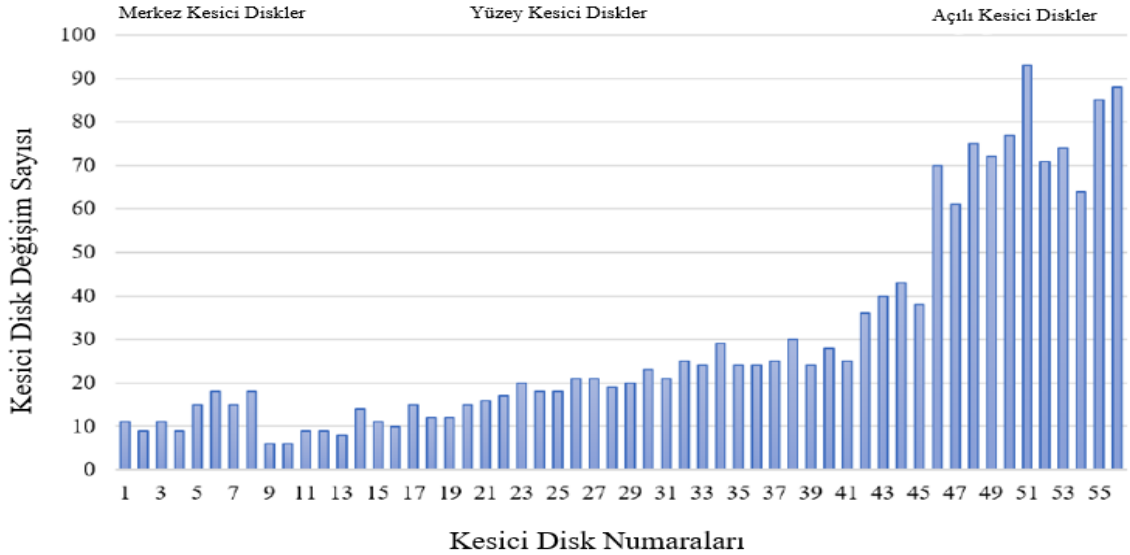


belirtmişlerdir. Kesici disklerin konumlara göre değişme sıklıklarının farklılık gösterdiğini ifade etmişlerdir. Açılı kesici disklerin yüzey ve merkez kesici disklere göre değişiminin fazla olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.14'te çalışmada incelenen kesici kafa diyagramı görülmektedir. Farklı keski mesafeleri ile tasarlanan kesici diyagramında 52 adet 17 inç (432 mm) kesici disk bulunmaktadır.



Şekil 2.14. Kesici Kafa Diyagramı [27]

Şekil 2.15'te kesici kafada bulunan kesici disklerin değişim sayıları verilmiştir. Açılı kesici disklerin değişim miktarının merkez ve yüzey kesici disklere göre 2-3 kat fazla olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.15. Kesici Disk Numarasına Göre Değişim Sayısı [27]

### 3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 3.1. İncelenen Tünel Açma Makineleri

Tez çalışması kapsamında incelenecek makineler iki farklı tipte seçilmiştir. Seçilen makineler karışık zemin ve sert zemin kesici kafa özelliklerine sahiptir. Bu seçimle iki ayrı kesici kafa özelliğine sahip tünel açma makinesinin keski mesafeleri arasındaki farklılıklar, kazı süreleri hakkında bilgi ve makine parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilen parametrelere göre keski mesafesi düşük olan sert zemin kesici kafanın, karışık zemin kesici kafaya göre yüksek devire, düşük torca ve yüksek itki kuvvetine ihtiyacı vardır.

Tablo 3. 1. Karışık Zemin Tünel Açma Makinesinin Teknik Verileri [28]

<b>Kesici Kafa</b>	
Kesici Kafa Çapı	3250 mm
Disk Sayısı	10 adet Gövde Kesici 12 inç (304.8 mm)
Köşe Kazıyıcı Sayısı	8 Adet
Kazıyıcı Sayısı	28 Adet
<b>Ana Sürücü</b>	
Tip	Hidrolik
Toplam Güç	400 kW
Kesici Kafa Dönüş Yönü	Sağ- Sol
Kesici Kafa Devir Hızı	0-5.1 dev/dk
Maksimum Kesici Kafa Torqu	904 kN.m
<b>İtki Kuvveti</b>	
Toplam İtki Kuvveti	10.7 MN
İtki Silindiri Sayısı	12 Adet
<b>Elektrik Sistemi</b>	
Kontrol Voltajı	24 V
Trafolar	800 kVA
Birincil Voltaj	15 kV
İkincil Voltaj	380 V
Aydınlatma	24 V
Valf Voltajı	24 V
Frekans	50 Hz
Elektrik Motoru	380 V

Tablo 3. 2. Sert Zemin Tünel Açma Makinesinin Teknik Verileri [29]

<b>Kesici Kafa</b>	
Kazı Çapı	3175 mm
Disk Kesiklerinin Sayısı	356 mm
Keski Sayısı	23 Adet Tekli Kesici 14 inç (355.6 mm)
<b>Ana Sürücü</b>	
Tip	Hidrolik
Kesici Kafa Devir Hızı	0-12 dev/dk
Toplam Güç	400 kW (2x200kW)
Tork	254 kN.m - 8.5 dev/dk
<b>İtke Kuvveti</b>	
Maksimum İtme Kuvveti	9.8 MN
İtke Silindiri Sayısı	12 Adet
<b>Elektrik</b>	
Toplam Elektrik Gücü	400 kW
Kesici Kafa Gücü	250 kW
Bant Konveyör/Vidalı Konveyör	50 kW
Destek Birimleri	50 kW
Pompa Gücü	15 kW
Kayıplar ve Diğerleri	75 kW
Birincil Voltaj	6000 V 50 Hz
Trafo lar	700 kVA

Yukarıdaki tablolarda iki makinenin farklı zemin özelliklerine göre kurulu güçlerinde farklılıklar görülmektedir. Örneğin, yukarıda seçilen iki tip makine kurulu gücü arasında 100 kVA'lık bir fark görülmektedir. Seçilen karışık zemin makinesi 5.1 dev/dk devir hızı ile çalışacağı varsayımına göre tasarlanmıştır. Sert zemin makinesi 8.5 dev/dk devir hızına göre tasarlanmıştır. Sert zemin makinelerinin çalıştıkları zeminin çok sağlam kaya olması sebebiyle penetrasyon miktarları karışık zemin makinelerine göre düşüktür. Belirlenen kazı süresinin değişmemesi için sert zemin kesici kafalar yüksek devir hızında çalıştırılarak makineden beklenen birim zamandaki penetrasyon değeri sağlanabilmektedir. Uygulamada karışık zemin kesici kafaya sahip bir TAM'nin kesici kafa torkunun yüksek ve kesici kafa devir hızının düşük olarak tasarlandığı bilinmektedir. Karışık zemin kesici kafa üzerinde 20 adet kesici bulunmaktadır. Sert zemin kesici kafa üzerinde ise 23 adet kesici bulunmaktadır. Tezde seçilen karışık zemin tünel açma makinesinde 12 inçlik (304.8mm) kesici disk kullanılmıştır. Sert zemin tünel açma makinesinde 14 inçlik (355.6 mm) kesici disk bulunmaktadır. Büyük çaplı kesici disklerin kullanılması ile makinenin daha yüksek itki kuvvetlerinde çalıştırılması sağlamaktadır.

Şekil 3.1.'de E-BERK tarafından üretilen LALE tünel açma makinesi görülmektedir. 3250 mm kazı çapına sahip karışık zemin tünel açma makinesinde kazı sırasında, ilerleme ve penetrasyon hızına göre kesici kafa üzerinde oluşan tork ve itki kuvvetleri incelenmiştir. Tünel içerisinde diskler arasındaki mesafeler ölçülmüştür. Makine performans değerleri raporlanmıştır. Şekil 1 de tünel açma makinesi görülmektedir.



Şekil 3.1. İncelenen Tünel Açma Makinesi [28]

Şekil 3.2'de kesici disklerin zeminde oluşturduğu daireler ve kesikler arası mesafeler görülmektedir. Şekil 2.10'da görülen her bir daire bir adet diski ifade etmektedir. İncelemelerde açılı kesici diskleri keski mesafelerinin (S) yüzey kesici disklerden düşük olduğu ölçülmüştür. Tünel açma makinesinin 1000 mm'lik ilerlemeyi ortalama 30 dakika sürede tamamladığı tespit edilmiştir. İncelenen tünel açma makinesinin parçalı beton yapısının 1 metre uzunluğunda olduğu görülmüştür.



a



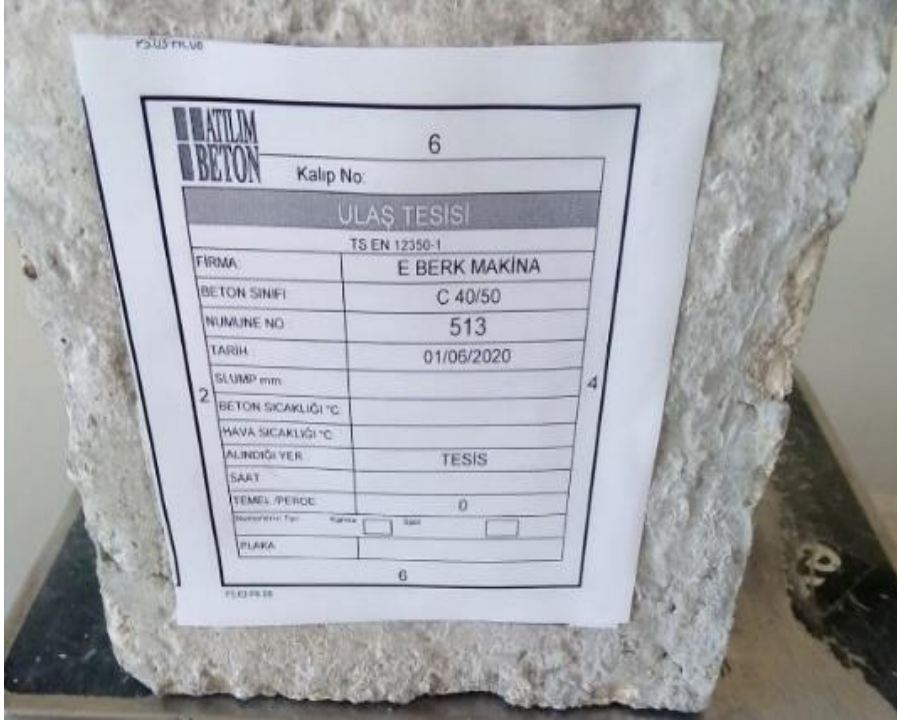
b

Şekil 3 2. Kesiciler Arası Mesafe Ölçümleri (a. Yüzey Kesiciler Arası Mesafeler, b. Açılı Kesiciler Arası Mesafeler)

## 3.2. Deneysel Çalışma

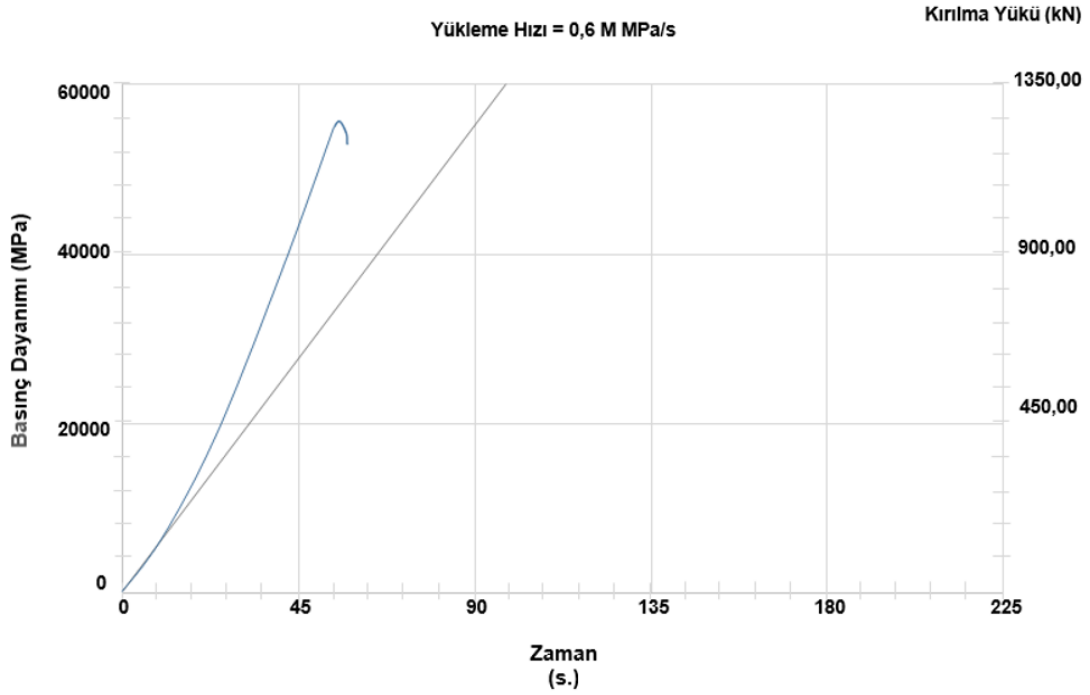
### 3.2.1. Deney Numunesi

Tam boyutlu kesme (penetrasyon) deney setinde C40/50 sınıfı (350 x400 x250) mm ve (400 x 400 x 1000) mm ebatlarında beton blok numuneler kullanılmıştır. Penetrasyon deneyi öncesi beton numunelere tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.3. Test Yapılan Numune

Şekil 3.3'te görülen numune ile yapılan tek eksenli basma deneyinde numune üzerine 0.6 MPa/s yükleme hızında yük uygulanarak penetrasyon deneylerinde kullanılacak beton numunenin 52-56 MPa bası mukavemetine ve 1200-1250 kN değerinde kırılma yüküne karşı dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Tek eksenli basınç deney sonuçlarına göre ön tasarıma başlanmıştır. Literatür taramalarında mevcut zemin özelliklerinde kesici kafa parametreleri incelenerek kazı süreleri belirlenmiştir. Kazı parametreleri açısından karışık zeminde çalışacak bir TAM için kesici kafa tasarımı yapılmıştır. Penetrasyon testlerinde kullanılacak olan beton numuneler düz yüzey ve açılı yüzey olarak 2 farklı tipte imal edilmiştir. Açılı diskler için kesilen numune üzerinde açılı oluşturulmuştur.



Şekil 3.4. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

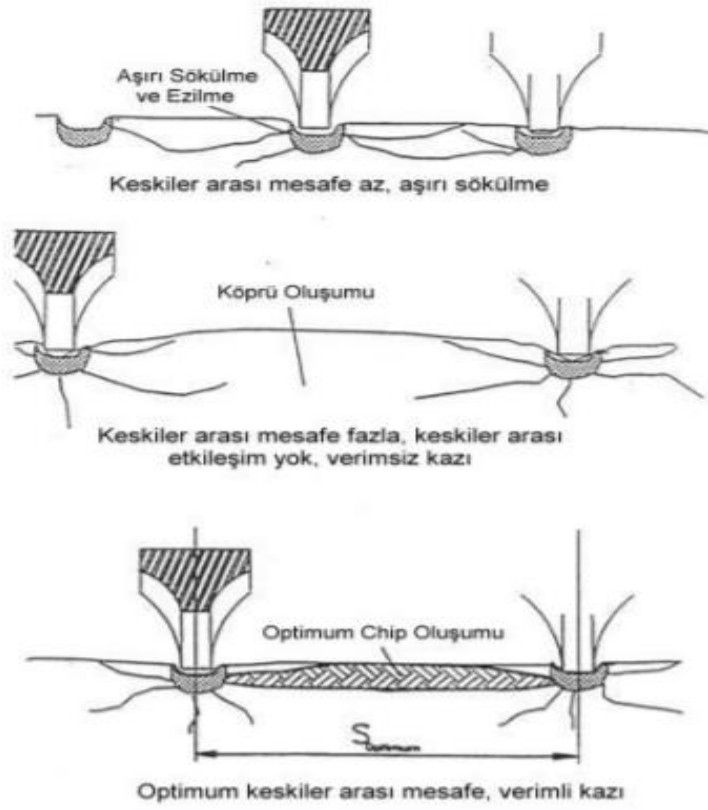
### 3.2.2. Kesme Deney Seti

Bu çalışma için E-Berk Tünel ve Zemin Teknolojileri firması tarafından tasarımı ve üretimi yapılan Şekil 3.5'te yer alan tam boyutlu kesme deney seti kullanılmıştır. Bu deney setinde kesici diskler üzerinde oluşan normal ve yuvarlanma kuvvetlerinin ölçümü, test cihazında konumlanan hidrolik pistonlar ile yapılabilmektedir. Tam boyutlu kesme deney seti üzerinde konumlanan hidrolik sistem, 300 kN'luk normal kuvvet ve 250 kN'luk yuvarlanma kuvveti ile çalıştırılabilmektedir. Farklı açısız hızlar için hidrolik debi kontrolü yapabilen potansiyometre sisteme entegre edilmiştir. Beton numunenin eksenel hareketi için freze tablası ile Şekil 3.6'te görülen kesici diskler arası kesme mesafeleri oluşturulmaktadır. Kesici diskler arası keski mesafesinin belirlenen değerlerde olmaması durumunda kazı performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Veri toplama sistemi yardımı ile hidrolik basınç ve debi anlık olarak bilgisayar ekranına aktarılması ile sağlanmaktadır. Şekil 3.5'te 1 numara ile gösterilen ekipman basınç sensörüdür. Sistem üzerinde oluşan kuvvetlerin ölçüm değerlerinin kullanıcı kabine aktarımını sağlamaktadır. 2 numara ile gösterilen normal kuvvet pistonu, kesici diskin numune üzerine penetrasyon yapabilmesini sağlamaktadır. 3 numara ile gösterilen ekipman normal kuvvet pistonunun konum bilgisini kullanıcı kabine aktarmaktadır. 4 numara ile gösterilen ekipman kesici diskin yataklama elemanıdır. Farklı

çaplarda kesici diskler montajlanabilmektedir. 5 numara ile blok numune gösterilmektedir. Tam boyutlu kesme deney setinde 400mm-400mm-1000 mm boyutundaki blok numunelere kadar test yapılabilmektedir. Üzerinde bulunan freze tablası ile farklı keski ara mesafeleri oluşturulabilmektedir. 6 numaralı ekipman yuvarlanma kuvvetini sağlayan hidrolik ekipmandır. Sistem lineer kızaklar ile yataklanmış ve sürtünme kayıplarına göre kalibre edilmiştir. 7 numarada deney sırasında ölçülen değerlerin yansıtıldığı kullanıcı ekranı gösterilmektedir. 8 numara ile gösterilen ekipman kontrol panosudur. Kontrol panosu ile kesici disk hızı, penetrasyon miktarı ve keski arası mesafeler otomatik ve manuel olarak kontrol edilmektedir. 9 numaralı ekipman ile tam boyutlu kesme deney setinin ihtiyacı olan hidrolik debi ve basınç değerleri karşılanmaktadır.



Şekil 3.5. Kesme Deney Seti (1. Basınç Sensörü,2. Normal Kuvvet Pistonu,3. Penetrasyon Sensörü,4.Kesici Disk ve Yataklama Elemanı,5.Deney Materyeli, 6.Yuvarlanma Kuvveti Pistonu, 7. Kullanıcı Ekranı, 8. Kontrol Panosu, 9. Hidrolik Ünite)



Şekil 3.6. Keskiler Arası Mesafeler [30]

Şekil 3.7’da deney setinin kontrol paneli gösterilmektedir. Sistemde bulunan hidrolik pistonlarda oluşan basınç, basınç sensörleri ile ölçülmekte ve kuvvet değerleri kullanıcı ekranına anlık olarak yansıtılmakta ve kaydedilmektedir. Farklı hızlarda ve penetrasyonlarda deneyler yapılabilmesi için kullanıcı klavyesine potansiyometreler entegre edilmiştir.



Şekil 3.7. Kesme Deney Seti Kontrol Paneli



Şekil 3.8’de numune ve numune üzerinde oluşan keski izleri gösterilmiştir. 1 numara ile gösterilen numunenin sabitlenmesi ve numunenin keski darbeleri sonucunda dağılmaması için çelik kalıp içerisinde yerleşim yapılmıştır. 2 numara ile gösterilen numune üzerine yüzey kesici disklerin farklı keski aralıklarına göre penetrasyon yapılmış ve kesici diskte oluşan kuvvetler ölçülmüştür. 3 numara ile gösterilen numune açılı olarak üretilmiştir ve kesici diskin açılı penetrasyonda oluşan kuvvetleri incelenmiştir. 4 numara ile gösterilen numune kesici diskin numuneye penetrasyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Keski Arası Mesafeler

Tam boyutlu kesme deney setinde disklere farklı değerlerde keski mesafesi ( $s$ ) ve penetrasyon ( $d$ ) değerleri uygulanarak deney yapılan numunelerden gelen tepki kuvvetleri ölçülmektedir.

Sabit kesit alanlı disklerle yapılan çalışmalarda optimum spesifik enerji değerleri Eşitlik (3.1)’deki gibi olmalıdır. Optimum keski aralığında çalıştırılmayan kesici disklerde Şekil 3.6’te görüldüğü gibi keski arası mesafenin az olması nedeniyle aşırı sökülme oluşturmaktadır. Keski arası mesafenin fazla olması verimsiz kazıya sebep olmakta ve kesici disk performansını düşürmektedir. Keski arası mesafenin azalması, çatlatılan zeminde aşırı sökülme ve ezilmeye sebep olmakta ve kesici kafa tasarımında fazla kesici disk kullanılmasına neden olmaktadır. Keski arası mesafenin fazla olduğu durumlarda

kesici disk ve zemin arasında bulunan bölgede köprü oluşmakta ve sıyırıcı elemanlara zarar vermekte ve bu sebeple böylece makine performansını düşürmektedir.

Uygulamada optimum kesme oranının (keskiler arası mesafe (S) / penetrasyon (d)) 10-12 arasında olması gerektiği belirtilmiştir [21].

$$\frac{s}{d} = 10 - 12 \quad (3.1)$$

Kesici disk üzerinde 3 farklı tepki kuvveti oluşmaktadır. Bunlar normal ( $F_n$ ), aksenal ( $F_a$ ) ve yuvarlanma ( $F_T$ ) tepki kuvvetleridir. Bu kuvvetlerden normal ve yuvarlanma kuvvetleri tünel açma makinesinin tork ve itki kuvvetlerini belirlemektedir.

### 3.2.3. Deney Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada tam boyutlu kesme deneyi için 12 inç (304.8 mm) çapında kesici disk kullanılmıştır. Kesici diske uygulanabilecek maksimum kuvvetin belirlenmesi, oluşturulan kesici kafa diyagramına göre sınır şartlarının belirlenmesi ve belirlenen değerlere göre tam boyutlu kesme deney seti ile ölçümler yapılması hedeflenmektedir.

Yapılacak deneylerde incelenmiş olan tünel açma makinelerinin segment uzunluklarına göre kazı yapılması hedeflenmiştir. İncelenen 2 makinenin de segment uzunluğu 1000 mmdir.

Günümüz teknolojisinde 17 inç (431.8 mm) kesici disk için yük taşıma kapasitesi 267 kN olarak belirtilmektedir. Genel olarak 1 inç (25.4 mm) çap değişiminin yük taşıma kapasitesi kuvvetini %5 oranında değiştirdiği belirlenmiştir [31]. Bu bilgilere göre 12 inç (304.8 mm) çapında kesici disk için yaklaşık 200 kN'luk yük taşıma kapasitesi belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır.

13 inç (330.2 mm) çapında kesici disk için köşe keski hızı ( $V_d$ ) 120 m/dk referans alınmıştır [32].

12 inç (304.8 mm) çapında kesici disklerin içinde kullanılan rulman için Eşitlik 3.2'de kullanım saati belirlenmiştir.

$$L_n = 10000 \text{ saat} \quad (3.2)$$

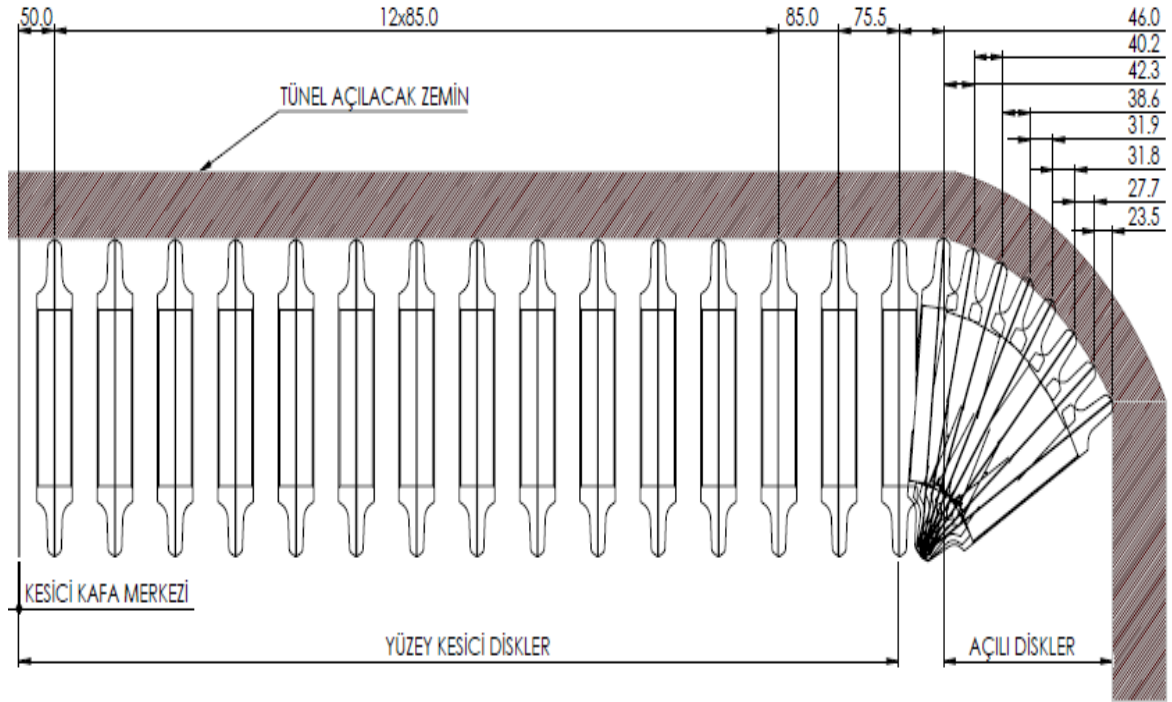
#### 3.2.3.1. Kesici Kafa Tarama Diyagramı ve Kesicilerin Yerleşimi

Farklı jeolojilere göre kesici diskler arası kesme mesafesi (S) ve penetrasyon (d) değerleri değişiklik göstermektedir.

Belirlenen performanslarda çalışacak kesici kafa tarama diyagramını için kesici disk üzerinde oluşan yuvarlanma, normal ve aksel kuvvetler önemlidir. Disk üzerinde oluşan bu kuvvetler makineden beklenen performansla birlikte irdelenerek kesici kafa tarama diyagramı oluşturulmalıdır. Oluşturulan ön tasarıma göre tam boyutlu kesme deney seti ile ölçümler yapılmalıdır.

Tasarımı yapılan 3025 mm kazı çapına sahip kesici kafa tarama diyagramında, yüzey kesici disklerin keski mesafesi 85 mm ve açılı kesici disklerin keski mesafesi 23.5-46 mm arasında değişmektedir. Kesici kafa devir hızı 5.1 dev/dk olarak belirlenmiştir. S/d oranına göre 7 mm/dev penetrasyon değeri belirlenmiştir. Bu değere göre TAM'nin 1000 mm kazı işleminin 28 dakikada tamamlanması gerekmektedir.

Açılı diskler, dış çapa yakın olarak konumlandırılmaktadır. Tünel açma makineleri dairesel bir kesitle tünel açma işlemini gerçekleştirmektedir. Açılı kesici diskler yüzey kesici disklerle göre zemini daha sık keski aralıkları ile çatlatmakta ve daha yüksek performans göstermektedir. Açılı kesici disk sayısı 5-10 adet olmalıdır [31]. Kesici kafanın kazı çapını belirleyen kesici diskin maksimum 65°-70°'lik açıyla konumlanması gerektiği literatür araştırmaları neticesinde belirlenmiştir. Bu koşulları sağlayacak şekilde Şekil 3.9'de görülen kesici kafa diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 3.9. Ø3025 mm Kesici Kafa Tarama Diyagramı

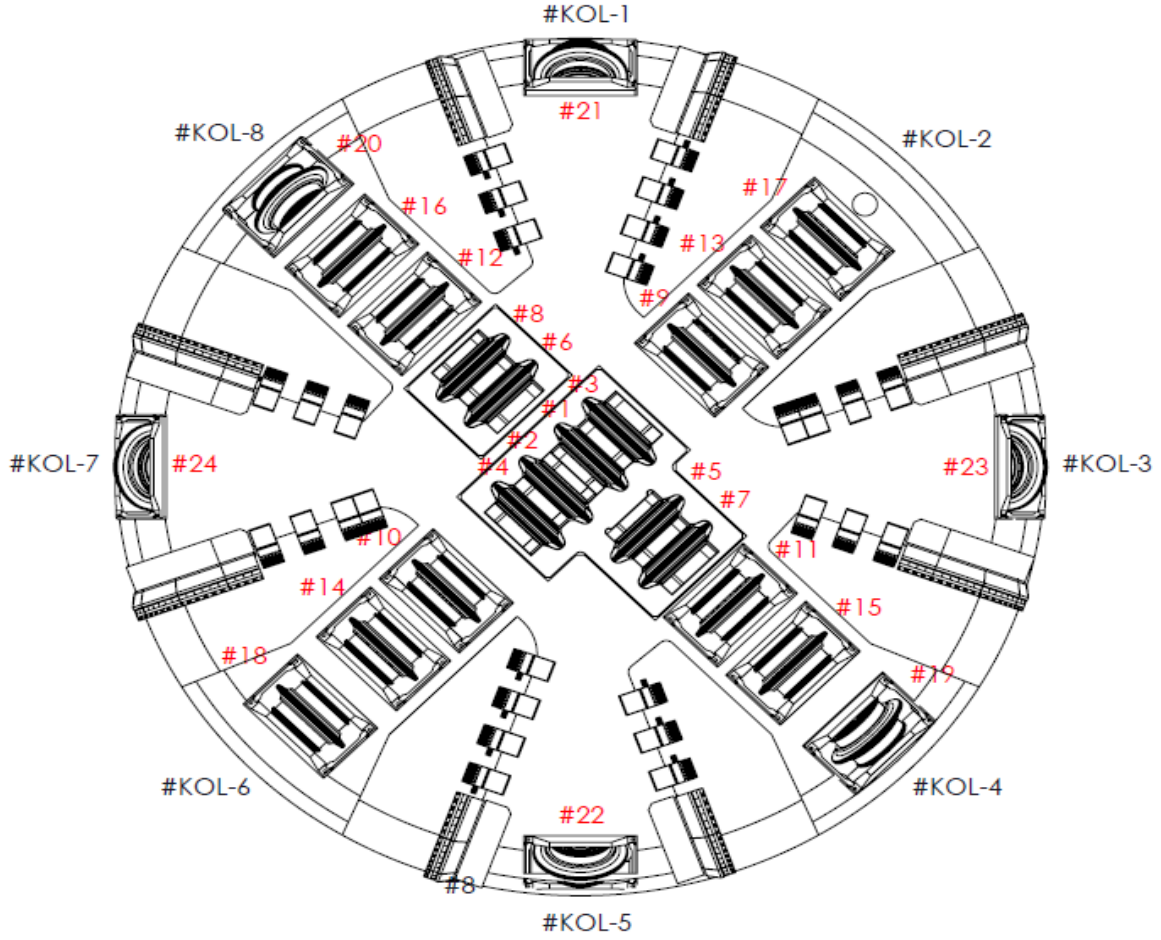
Şekil 3.9’de görülen kesici kafa tarama diyagramına göre Tablo 3.3 oluşturulmuştur. Tablo 3.3’te kesici disk numaralarına göre kesici disk tarama yarıçapları, kesici disk devir hızları ve kesici disk açıları yer almaktadır. Kesici disk devir hızları 5.1 dev/dk çalışma hızı ile hesaplanmıştır.

Tablo 3.3. Kesici Kafa Tarama Yarıçapları ve Tarama Açılıarı

<b>Kesici Disk Numarası</b>	<b>Kesici Disk Tarama Yarıçapı (mm)</b>	<b>Kesici Disk Devir Hızı (dev/dk)</b>	<b>Kesici Disk Açılıarı</b>
1	50	1.7	0
2	135	4.5	0
3	220	7.4	0
4	305	10.2	0
5	390	13	0
6	475	15.9	0
7	560	18.8	0
8	645	21.5	0
9	730	24.4	0
10	815	27.3	0
11	900	30.1	0
12	985	33	0
13	1070	35.1	0
14	1155	38.7	0
15	1230	41.2	0
16	1276	42.7	6
17	1318.3	44.1	14
18	1358.5	45.5	22
19	1397.1	46.8	30
20	1429	47.8	37
21	1461.4	48.9	45
22	1489.1	49.8	53
23-24	1512.5	50.2	61

Tablo 3.3’te bulunan tarama değerleri esas alınarak kesici disklerin çalışma yükleri ve açısal hızlarına bağlı olarak tarama diyagramına göre kesici disk yerleşimi Şekil 3.10’da görüldüğü şekilde yapılmıştır. Kesici disklerin belirlenen yükleme değerlerinde çalıştırılmaması ve açılı kesici disklerin yüzey kesici disklere göre devir hızının yüksek olması çalışma ömrünü azaltmaktadır. Yapılan yerleşime göre kesici kafa modeli oluşturulmaktadır. Belirlenen modelde kesici disk yerleşimi farklı şok kuvvetlerinin oluşmaması için simetrik olarak konumlandırılmıştır. Simetrik olarak konumlanmadığı durumlarda, kesici kafa üzerinde meydana gelen yayılı yükler şok yüklerine dönüşecek ve kesici kafayı tahrik eden ana sürücü rulmanında hasara sebep olacaktır. Kesici disklerin

yerleşimi sonucu kesici kafa üzerinde 8 adet moment kolu oluşmuştur. Toplam tork, kollarda konumlanan kesici disklerin yuvarlanma kuvvetlerinin kesici disklerin kesici kafa merkezine olan uzaklığı ile çarpımıdır.



Şekil 3.10. Kesici Disk Yerleşimi

Kollarda konumlanan kesici disklerin toplam tork ve itki kuvveti;

- Kol 1 Tork Hesabı Eşitlik 3.3'teki gibidir;

KOL-1= 21 numaralı disk

$$T_{kol1} = r_{21} \times F_{T21} \quad (3.3)$$

- Kol 2 Tork Hesabı Eşitlik 3.4'teki gibidir;

KOL-2= 1,3,9 ,13 ve 17 numaralı diskler

$$T_{kol2} = r_1 \times F_{T1} + r_3 \times F_{T3} + r_9 \times F_{T9} + r_{13} \times F_{T13} + r_{17} \times F_{T17} \quad (3.4)$$

- Kol 3 Tork Hesabı Eşitlik 3.5'teki gibidir;

KOL-3= 23 numaralı disk

$$T_{kol3} = r_{23} \chi F_{T23} \quad (3.5)$$

- Kol 4 Tork Hesabı Eşitlik 3.6'daki gibidir;

KOL-4= 5,7,11,15 ve 19 numaralı diskler

$$T_{kol4} = r_5 \chi F_{T5} + r_7 \chi F_{T7} + r_{11} \chi F_{T11} + r_{15} \chi F_{T15} + r_{19} \chi F_{T19} \quad (3.6)$$

- Kol 5 Tork Hesabı Eşitlik 3.7'deki gibidir;

KOL-5= 22 numaralı disk

$$T_{kol5} = r_{22} \chi F_{T22} \quad (3.7)$$

- Kol 6 Tork Hesabı Eşitlik 3.8'deki gibidir;

KOL-6= 2,4,10,14 ve 18 numaralı diskler

$$T_{kol6} = r_2 \chi F_{T2} + r_4 \chi F_{T4} + r_{10} \chi F_{T10} + r_{14} \chi F_{T14} + r_{18} \chi F_{T18} \quad (3.8)$$

- Kol 7 Tork Hesabı Eşitlik 3.9'daki gibidir;

KOL-7= 24 numaralı disk

$$T_{kol7} = r_{24} \chi F_{T24} \quad (3.9)$$

- Kol 8 Tork Hesabı Eşitlik 3.10'daki gibidir;

KOL-8= 6,8,12,16 ve 20 numaralı diskler Eşitlik 3.10'daki gibidir;

$$T_{kol8} = r_6 \chi F_{T6} + r_8 \chi F_{T8} + r_{12} \chi F_{T12} + r_{16} \chi F_{T16} + r_{20} \chi F_{T20} \quad (3.10)$$

- Toplam Tork;

$$\sum T = T_{kol1} + T_{kol2} + T_{kol3} + T_{kol4} + T_{kol5} + T_{kol6} + T_{kol7} + T_{kol8} \quad (3.11)$$

bağıntısından elde edilir.

- Toplam Normal Kuvvet;

$$\begin{aligned} \sum F_n = & F_{n1} + F_{n2} + F_{n3} + F_{n4} + F_{n5} + F_{n6} + F_{n7} + F_{n8} + F_{n9} + F_{n10} + F_{n11} + F_{n12} + \\ & F_{n13} + F_{n14} + F_{n15} + F_{n16} + F_{n17} + F_{n18} + F_{n19} + F_{n20} + F_{n21} + F_{n22} + F_{n23} + F_{n24} \end{aligned} \quad (3.12)$$

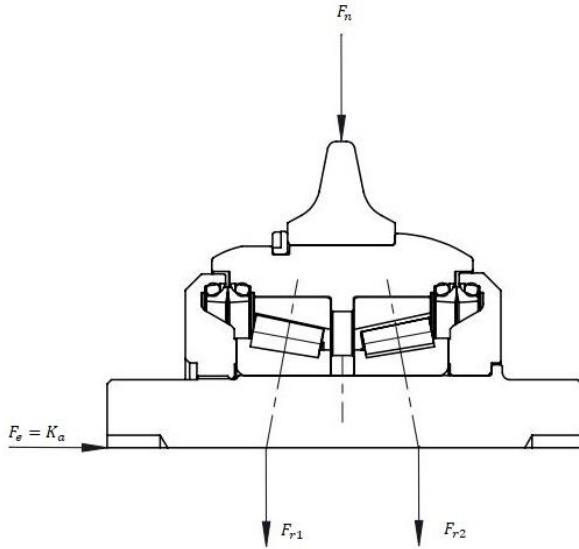
bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır.

Yukarıdaki bağıntılarda T: Torku,  $F_n$ : Normal Kuvveti,  $F_T$ : Yuvarlanma Kuvvetini, r: disklerin merkeze göre yarı çaplarını ifade etmektedir.

### 3.2.3.2. Kesici Disk için Belirlenen Rulman

Bu aşamada tasarımı yapılan kesici kafa diyagramında konumlanan diskler üzerine uygulanabilecek maksimum kuvvetler hesaplanmıştır. Deneyler sırasında belirlenen kuvvetlerden daha yüksek tepki kuvvetleri oluşması durumunda kesiciler arası mesafe (S) ve penetrasyon (d) değerleri değiştirilerek deneyler tekrarlanacaktır. Kesici diskler tarama diyagramlarına göre aldıkları yolun değişmesiyle farklı devirlerde çalışmaktadır. Bu durumun kullanım saatine etkisi incelencektir.

Şekil 3.11 kesici diskin zemini çatlatması sırasında rulman üzerinde oluşan kuvvetler gösterilmiştir. Hesaplamalarda kesici disk için hazırlanan tarama diyagramına göre belirlenen devir hızı, kesici açısı ve tepki yükleri kesici disk için kullanım saatini belirlemektedir. Tablo 3.4'te kesici disk çalışma sınır şartları belirtilmiştir. Sınır şartlarına göre 32315 numaralı konik masura tip rulman seçimi yapılmıştır.



Şekil 3.11. Tekli Kesici Disk Kuvvetleri

Köşe keski hızı;

$$V = 120 \frac{m}{dk} \quad (3.13)$$

'dır.

Çevre disk keski hızına göre kesici kafanın ulaşabileceği maksimum devir hızının belirlenmesi eşitlik 3.14 ile mümkündür. Belirlenen keski hızının yeterli olmadığı durumlarda kesici disk ölçüsü veya rulman değiştirilebilmektedir.  $D_{TAM}$  tünel açma makinesinin kazı çapı olmak üzere

$$RPM = \frac{V}{\pi \times D_{TAM}} \quad (3.14)$$

Eşitlik (3.14)'e göre 3025 mm kazı çapına sahip bir kesici kafanın, üzerinde konumlanan 12 inç (304.8 mm) çapındaki kesici diskler ile 12.7 dev/dk hızında çalışabileceği hesaplanmıştır. Kesici diskler, kesici kafanın belirlenen 5.1 dev/dk'lık hızda çalışmasını sağlayabilmektedir.

Tablo 3.4. Kesici Disk Sınır Şartları

Yük Taşıma Kapasitesi	200 kN
Kesici Disk Kullanım Ömrü	10000 Saat
Köşe Keski Hızı	120 m/dk =2m/s
Kesici Kafa Devir Sayısı	5.1 dev/dk
Penetrasyon Hızı	7 mm/devir

32315 numaralı masuralı rulmanın özellikleri  $e = 0.35$ ,  $y = 1.7$ ,  $y_0 = 0.9$ ,  $C_{tablo} = 416 \text{ kN}$  ve  $C_{otablo} = 440 \text{ kN}$  şeklinde verilmektedir [33].

Kesici disk üzerine konumlandırılan rulman hesabı aşağıda verilen Eşitlik (3.15)-(3.18)'den yapılır.

$$\frac{F_{r1}}{y_1} \geq \frac{F_{r2}}{y_2} \quad (3.15)$$

$$K_a \geq 0 \quad (3.16)$$

$$F_{a1} = \frac{0.5F_{r1}}{y_1} \quad (3.17)$$

$$F_{a2} = F_{a1} + K_a \quad (3.18)$$

Hesaplama faktörü e değerine göre 2 farklı yöntem ile çözüm yapılabilmektedir.

1)  $\frac{F_a}{F_r} \leq e = 0.35$   $x = 1$   $y = 0$  ise Eşitlik 3.19 kabul edilmektedir.

$$F = xF_r + yF_a$$

$$L_h = \frac{10^6}{60x\eta} x \left( \frac{C_{tablo}}{F} \right)^p \quad (3.19)$$

2)  $\frac{F_a}{F_r} > e = 0.35$   $x = 0.35$   $y = 1.7$  ise Eşitlik 3.20 kabul edilmektedir.

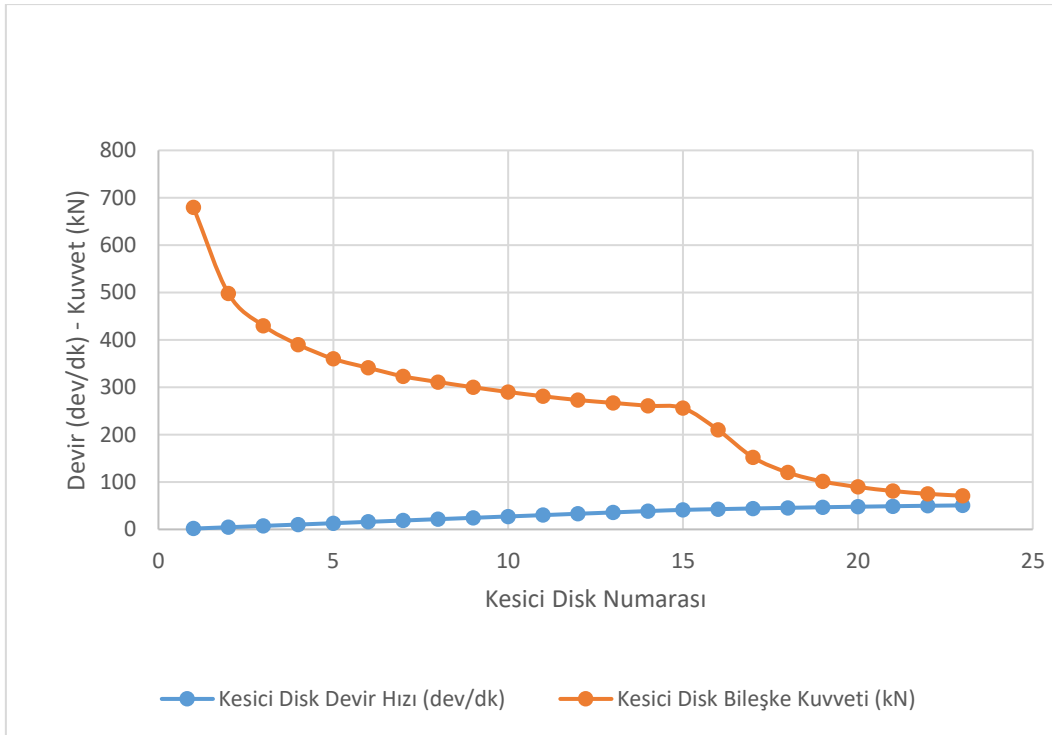
$$F = xF_r + yF_a$$

$$L_h = \frac{10^6}{60x\eta} x \left( \frac{C_{tablo}}{F} \right)^p \quad (3.20)$$

Yukarıdaki eşitliklerde C: Dinamik Yük Sayısını, F: Eşdeğer Kuvveti, L: Nominal Ömür, x: Radyal Faktör, y: Eksenel Faktör,  $F_r$ : Radyal Kuvvet,  $F_a$ : Eksenel Kuvvet,  $L_h$ : Çalışma Saati, p: Ömür Katsayısı, n: dev/dk cinsinden dönme hızını ifade etmektedir.

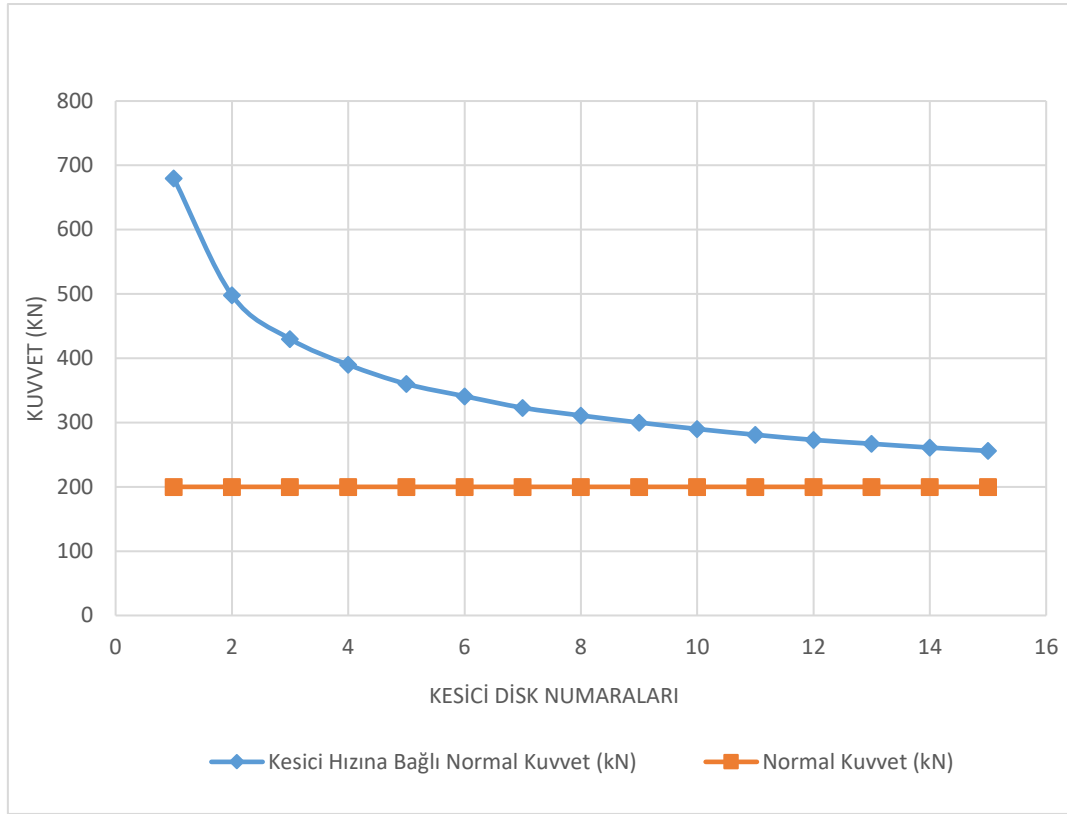


Kesici diskler tarama diyagramındaki konumlarına göre farklı devir hızlarında çalışmaktadır. Bu durum rulman kullanım saatini etkileyen faktörlerdendir. Şekil 3.12 verilerine göre kesici kafanın merkezinden çevre diskler doğru kesici disklerin yük taşıma kabiliyetleri düşmektedir. Bu bulguya göre kesici kafa tarama diyagramında merkezden çevreye doğru kesici diskler arası mesafenin azaltılması gerekmektedir. Çevre disklerin devir hızındaki artış kesici diskin dayanabileceği toplam kuvvetin azalmasına sebep olmakta ve bu durum sonucunda çevreye yakın konumlanan kesici diskler arası keski mesafesinin azaltılması gerektiği Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



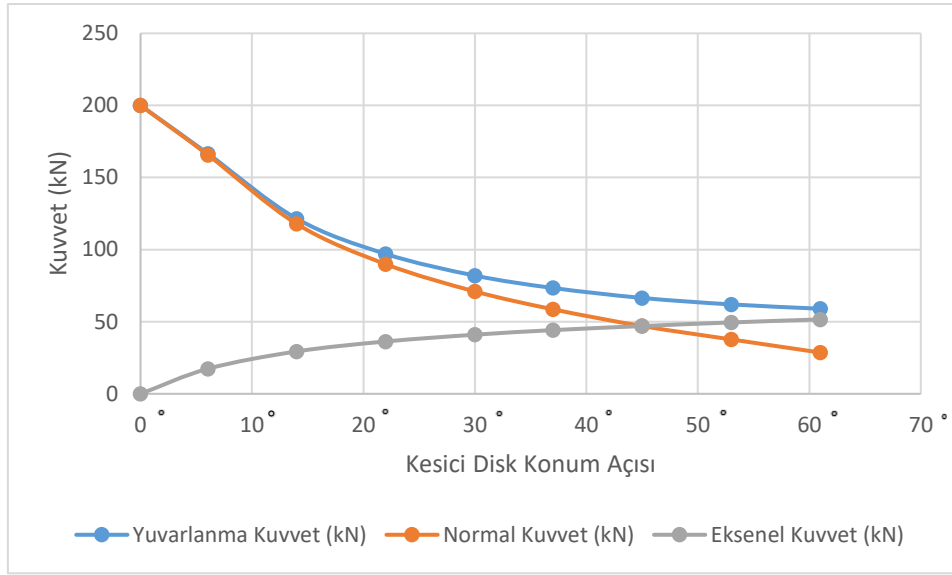
Şekil 3.12. Hıza Bağlı Bileşke Kuvvet

Şekil 3.13’de kesici disk üzerinde oluşan normal kuvvetler gösterilmiştir. Kesici kafada konumlanan 1 numaralı kesici disk 680 kN’luk normal kuvvet ile çalışmaktadır. Ancak son yüzey kesici diskin yük taşıma kapasitesi 200 kN olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre yüzey kesici diskler 200 kN üzerinde kuvvet uygulanması durumunda 15 numaralı ve 15 numaradan sonraki kesici diskler belirlenen kullanım saatini tamamlayamayacak ve Bölüm 2’de belirtilen hasar sorunlarıyla karşılaşılacaktır. Bu sorunların oluşmaması için yüzey kesici diskler üzerine uygulanacak kuvvetlerin tamamının 15 numaralı yüzey kesici diskten fazla olmaması gerekmektedir. Dolayısı ile tüm yüzey diskleri maksimum 200 kN normal kuvvette çalıştırılmalıdır.



Şekil 3.13. Yüzey Kesici Disklerde Oluşan Normal Kuvvetler

Açılı diskler için Şekil 3.14’te verilen grafik elde edilmiştir. Açılı disklerin aksel kuvvetleri ve devir hızları, yüzey disklerden fazladır. Bu sebeple çalışabilecekleri toplam kuvvet değerleri yüzey disklerden daha düşüktür. Tarama diyagramına göre 24 numaralı kesici disk son kesici disklerdir ve  $61^\circ$  ile konumlandırılmıştır. 24 numaralı kesici disk üzerinde oluşabilecek maksimum normal kuvvet  $28.6 \text{ kN}$ ’dur. 15 numaralı kesici diskte bu değer  $200 \text{ kN}$  olarak görülmektedir. 15 ve 24 numaralı kesici diskler arasında oluşan bu fark, 24 numaralı diskin açılı olmasından kaynaklanmaktadır. Açılı kesici disklerde açı değeri arttıkça disk üzerinde oluşan aksel kuvvet artmakta ve normal kuvvet azalmaktadır. Kesici disklerin zemini çatlatabilmesi için normal kuvvete ihtiyacı vardır. Açılı kesici disklerde normal kuvvet açı ile ters orantılıdır. Bu nedenle açı değeri arttıkça kesici diskler arası keski mesafesinin azaltılması gerekmektedir. Açılı kesici disklerde açı değeri arttıkça aksel ( $F_e$ ) kuvvet artmakta, normal kuvvet ( $F_n$ ) ve yuvarlanma ( $F_b$ ) kuvveti azalmaktadır.



Şekil 3.14. Açılı Disklerde Oluşan Kuvvetler

Kesici kafanın zemine penetrasyon yapabilmesi için  $F_n$  normal kuvvetine ihtiyacı vardır. Yapılan hesaplamalarda, yüzey kesici disklerin 200 kN'luk kuvvet taşıma kapasitesine 24 numaralı kesici diskin ise 28.6 kN'luk kuvvet taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle açılı kesici disklerin derecelerindeki artış, disklerin keski mesafesinin azaltılması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Yapılan deneylerde 60°'lik beton blokta 28.6 kN normal kuvvetin üzerine çıkılmaması hedeflenmiştir.

Tablo 3.5'te kesici disk numaraları, disk üzerinde oluşan eksenel ve normal kuvvetler ve kesici disk devir hızları verilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre 3616.3 kN'luk normal kuvvet ile belirlenen sınır şartlarında kesici diskler çalışma saatini tamamlayacaktır.

Tablo 3.5. Kesici Disk Kuvvet ve Hız Değerleri

Kesici Disk Numarası	$F_n$ (kN)	$F_e$ (kN)	Kesici Disk Devir Hızları (dev/dk)
1	200	0	1.7
2	200	0	4.5
3	200	0	7.4
4	200	0	10.2
5	200	0	13.0
6	200	0	15.9
7	200	0	18.7
8	200	0	21.6
9	200	0	24.4
10	200	0	27.3
11	200	0	30.1
12	200	0	33.0
13	200	0	35.8
14	200	0	38.7
15	200	0	41.2
16	165.6	17.4	42.7
17	117.9	29.4	44.1
18	89.9	36.3	45.5
19	71	41	46.7
20	58.6	44.2	47.8
21	47	47	48.9
22	37.7	49.5	49.8
23-24	28.6	51.6	50.6
<b>Toplam</b>	<b>3616.3</b>	<b>316.4</b>	

#### 4. DENEY SONUÇLARI

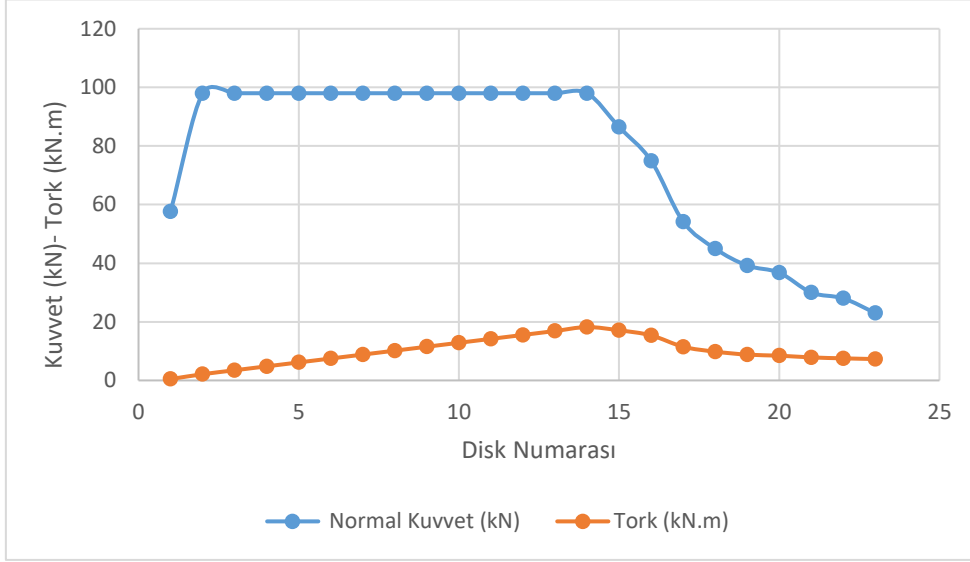
Tam boyutlu kesme deney seti kullanılarak belirlenen keski aralıkları ve penetrasyon değeri ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada 52-56 MPa basma dayanım özelliğinde beton blok numuneler üzerinde yapılan deneylerde kesici diskte oluşan tepki kuvvetleri ölçülmüştür. Makine sınır şartlarında belirlenen hız değerine göre deneyler yapılmıştır. Farklı penetrasyon değerine göre kesici disklerin verdiği tepki kuvvetlerinde farklılıklar oluşacaktır. Bu deney setinde kesici kafanın 1 dev/dk hareketi için kesici disklerin 7 mm penetrasyon yapması gerekmektedir.



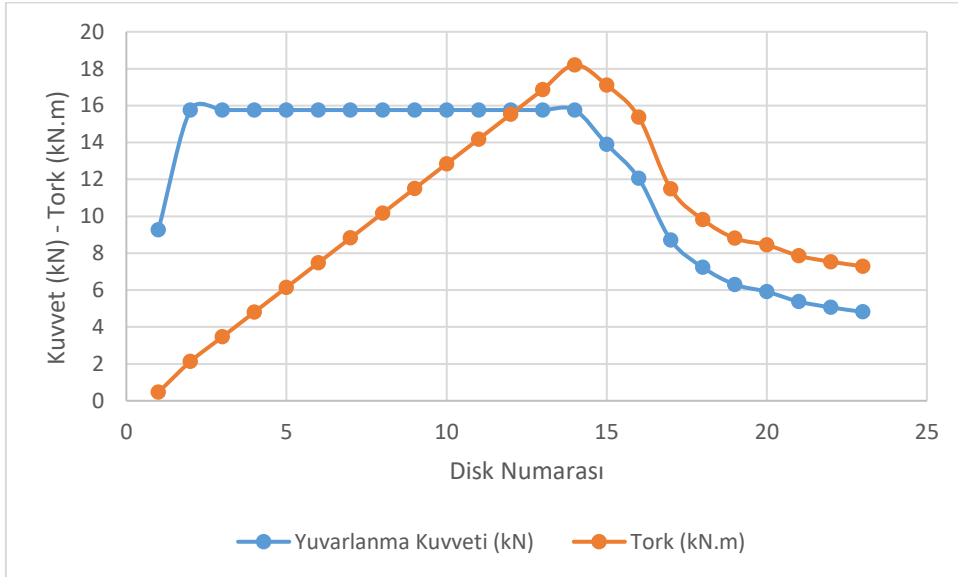
Şekil 4.1. Test Yapılan Numuneler

Tam boyutlu kesme deneylerinde yuvarlanma kuvvetleri ve normal kuvvetler ölçülmüştür. Bu çalışmada keski mesafesi (S) ve penetrasyon (d) oranı  $S/d = 3.71-12.14$  değerleri arasında değişmektedir. Yüzey kesici diskler ile açılı kesici disklerde ölçülen tepki kuvvetleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görülmektedir. C50 sınıfı beton numunenin deneyler sırasında disk üzerinde oluşturduğu tepki kuvvetleri, maksimum yuvarlanma kuvveti ( $F_r$ ) 15 kN ve maksimum normal kuvvet ( $F_n$ ) ise 98 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.2'e göre 24 numaralı kesici disk için yuvarlanma kuvveti ( $F_r$ ) 4.82 kN ve normal kuvvet ( $F_n$ ) 23 kN olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.2’de kesici disklerde oluşan yuvarlanma kuvveti ve normal kuvvetler ile toplam tork 283.5 kN.m ve toplam itki kuvveti 1749.2 kN olarak ölçülmüştür. 15 ile 24 numaralı kesici diskler açılı kesici disklerdir. Açılı kesici disklerde tork ve itki kuvvetleri değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Keski mesafeleri arasında (S) azalma olması, kuvvet değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.

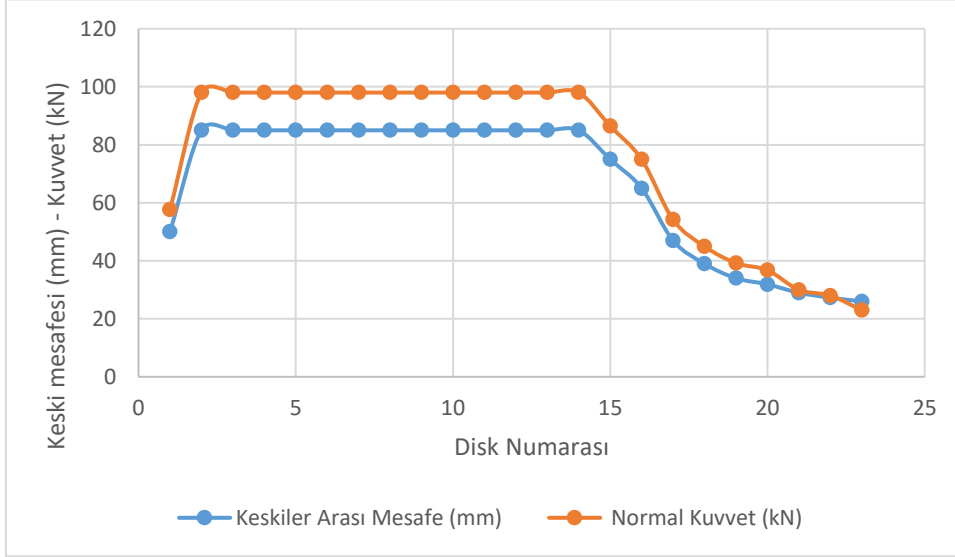


Şekil 4.2. Kesici Diskler Üzerinde Oluşan Tepki Kuvvetleri



Şekil 4.3. Yuvarlanma Kuvveti - Tork Arasındaki İlişkisi

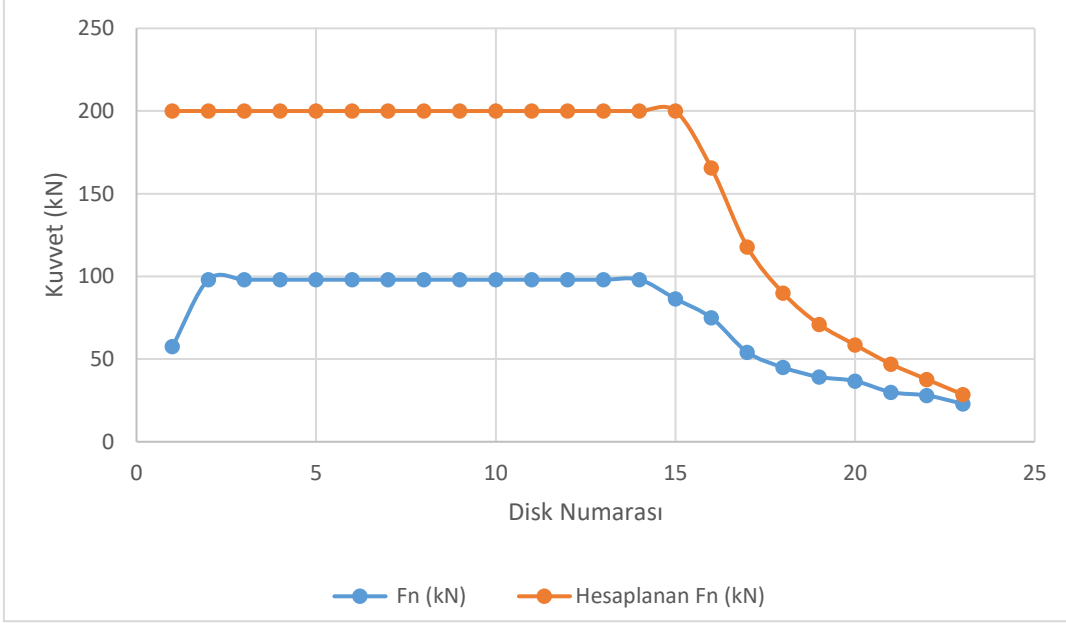
Şekil 4.3'te kesici diskin deney numunesine uyguladığı yuvarlanma kuvvetinin torkla ilişkisi görülmektedir. Şekil 4.3'teki değerlere göre merkez kesici disklerin tork üzerindeki etkisi 1-15 numaralı kesici diskler arasında lineer olarak artmaktadır. Bu katkı 15 numaralı disk ile 24 numaralı disk arasında parabolik olarak azalmaktadır. Deneyleerde kesici disklerin oluşturduğu maksimum tork 18.2 kN.m olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Keski Mesafesi-Normal Kuvvet Arasındaki İlişki

Deney sonuçlarına göre normal kuvvet ( $F_n$ ) yüzey disklerde 100 kN olarak belirlenmiştir. Normal kuvvet değeri açılı çevre disklerde 23 kN'a kadar düşmektedir. Aynı penetrasyon değerlerinde olmasına rağmen keski mesafesi oluşan kuvvete etkisi Şekil 4.4'te görülmektedir. Yüzey kesici disklerde keski mesafesi değişmediği için normal kuvvette değişim görülmemiştir ve açılı kesici disklerde keski mesafesi azaldığı için normal kuvvette azalma görülmektedir. Deney sonucuna göre keski mesafeleri ile normal kuvvet değerleri arasında doğru orantı olduğu görülmektedir.

Şekil 4.5'te, belirlenen sınır şartlarına göre kesici disk üzerinde oluşan ve tam boyutlu kesme deneyler ile hesaplanan normal kuvvetlerin karşılaştırılması verilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre 200 kN olarak hesaplanan yüzey kesici disk normal kuvvetinin, deney yapılan zemin numunesine göre 98 kN değerinde sınır şartları sağladığı görülmüştür. Kesici başına düşen normal kuvvet 98 kN değerindedir. İkili kesici kullanımı ile kesici diskte 196 kN'luk normal kuvvet oluşacaktır. Normal kuvvetin ikili kesici disk kullanılmasına rağmen hesaplanan kuvvetten düşük olması, tekli kesici disklerle tasarımı yapılan kesici kafanın ikili kesicilerle de tasarımının yapılabilmesini sağlayabilmektedir.



Şekil 4.5. Hesaplanan ve Deneyle Ölçülen Normal Kuvvetlerin Karşılaştırılması

Tablo 4.1’de kesici kafa ile yüzey arasında dik ve açılı şekilde konumlanmış disklerin kesici kafa için belirlenen sınır şartlarına göre oluşan tepki kuvvetleri verilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre açılı kesici diskler üzerinde oluşan normal kuvvetlerin yüzey kesici disklere göre düşük olduğu görülmüştür. 52-56 MPa ve 1200-1250 kN değerinde kırılma yüküne sahip deney numunesi ile yapılan deneyler sonucunda kesici diskler üzerinde toplam 1749.2 kN itki kuvveti ve 283.5 kN.m tork oluşmuştur.



Tablo 4. 1. Kesici Disklerde Oluşan Tepki Kuvvetleri

<b>Disk Numarası</b>	<b><i>Fn(kN)</i></b>	<b><i>Fr(kN. m)</i></b>
1	57.7	9.3
2	98.0	15.8
3	98.0	15.8
4	98.0	15.8
5	98.0	15.8
6	98.0	15.8
7	98.0	15.8
8	98.0	15.8
9	98.0	15.8
10	98.0	15.8
11	98.0	15.8
12	98.0	15.8
13	98.0	15.8
14	98.0	15.8
15	86.5	13.9
16	74.9	12.1
17	54.2	8.7
18	44.9	7.2
19	39.2	6.3
20	36.8	5.9
21	30.0	5.4
22	28.0	5.1
23-24	23.0	4.8
<b>Toplam</b>	<b>1749.2</b>	<b>283.5</b>

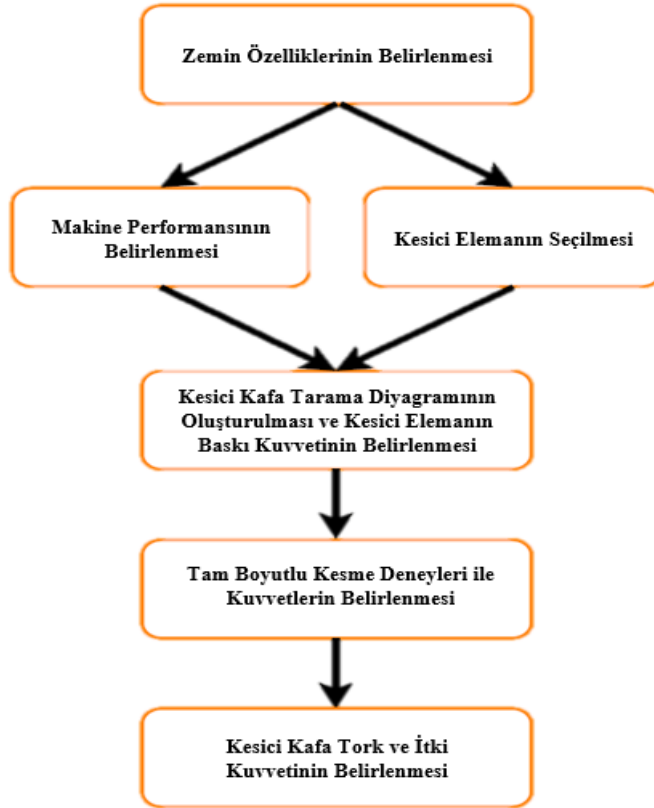
## 5. SONUÇLAR

Ülkemizde son yıllarda tünel sektörü için yapılan yatırımlar artış göstermektedir. Kullanım kolaylığı ve çalışma süresi olarak tünel açma makineleri diğer tünel açma yöntemlerine göre avantaj sağlamaktadır. Karayolu, hızlı tren, sulama tüneli, metro ve atık su hatlarının artması ile ülkemizin tünel açma makinelerine olan ihtiyacı artmıştır. Son yıllarda sıkça kullanılmaları sebebiyle tünel açma makinelerinin tasarımının ve imalatının ülkemizde yapılması önemlidir.

Bu tez çalışmasının sonuçları aşağıda verilmiştir:

- 1) Tünel açma makinesinin kullanılacağı jeoloji bilgisinin karot analizleri ile zemin mekaniği değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Bu analizlerin sonuçlarına göre zemin koşulları sınıflara ayrılmaktadır. Tünel açma makinelerinin performansları makinenin çalışacağı zemin koşullarına göre belirlenmektedir. Bu performansa göre tasarıma kesici elemanın seçilmesi ve keski mesafelerinin belirlenmesi ile devam edilmektedir.
- 2) Bu tez çalışmasında kesici kafa diyagramlarının tünel açma makinesi performansı üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Makinenin kazı yapacağı zemin özelliklerine göre keski mesafeleri ve penetrasyon değerleri değişmektedir. Bu durum makinenin kurulu gücüne doğrudan etki etmektedir. Ayrıca zemine göre uygun olmayan kesici kafa diyagramları kazı performansını düşürecek ve işletim maliyetlerini artıracaktır.
- 3) Çalışmada 12 inç (304.8 mm) çapında kesici diskler ve 52-56 MPa tek eksenli basma kuvvetine sahip numunelerle yapılan deneylerde kesici disk üzerinde oluşan tepki kuvvetleri ölçülmüştür. Kesici disk üzerinde oluşan farklı devir hızlarına göre kesici disklerin çalışabileceği normal kuvvetler belirlenmiştir. Merkez kesici disklerin çevre kesici disklerle göre kullanım ömrünün daha uzun olduğu tespit edilmiştir.
- 4) Açılı disklerin kesici kafa tasarımına doğrudan etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Açılı kesici disklerde açıda meydana gelen artış, eksenel kuvveti arttırmaktadır. Eksenel kuvvetteki artış nedeniyle yuvarlanma kuvveti ve normal kuvvetlerde azalma beklenmektedir. Bu azalma, keski mesafelerinin azaltılmadığı durumunda açılı kesici disklerin kullanım ömrünü kısaltacağı tespit edilmiştir.

- 5) Tam boyutlu kesme deneyleri sonucunda kesici diskler üzerinde 1749.3 kN'luk normal kuvvet oluşmaktadır. Yapılan hesaplama göre bu değer 3616.3 kN kadar çıkabilmektedir. Tasarımı yapılan kesici disk diyagramının normal kuvvetlere göre 2.1 emniyet katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. 3025 mm çapına sahip kesici kafa tasarımında 24 adet tekli kesici disk kullanılmıştır. Kesici disk başına düşen maksimum normal kuvvet 98 kN olarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan kesici disk 200 kN'luk normal kuvvet ile belirlenen sınır şartlarını sağlamaktadır. Bu sayede kesici kafada tekli kesici veya ikili kesicilerle tasarımının yapılabilmesini mümkün olduğu tespit edilmiştir.
- 6) Tam boyutlu kesme deney seti ile seçilen kesici ekipmanın, kesilen numune üzerinde oluşturmuş olduğu tepki kuvvetleri belirlenmektedir. Tepki kuvvetlerine göre kesici kafa üzerinde konumlanan kesici diskler, tünel açma makinesinin itki, tork ve kurulu gücünün belirlenmesini sağlamaktadır. Yapılan çalışma sonucuna göre tünel açma makinesi tasarımı sırasında Şekil 5.1'de gösterilen adımların izlenmesi önemlidir. Uygun olmayan makine seçimi sonucu makinenin kazı performansı düşecek ve işletme, maliyet avantajını dezavantaja çevirecektir.



Şekil 5.1. Kesici Kafa Tasarımında İzlenilecek Adımlar

## KAYNAKLAR

- [1] E-BERK Tünel ve Zemin Teknolojileri , “e-berk.com/tr/tunel-acma-makinesi/”,2020.
- [2] Ankara Üniversitesi Açık Ders Notları,  
“acikders.ankara.edu.tr/pluginfile./48698/mod\_resource/content/0/Konu4.pdf”, 2020.
- [3] B. Maidl, L. Schmid and W. Ritz, M. Herrenknecht, ”Hard Rock Tunnel Boring Machines”, Ernst & Sohn, Berlin,2008.
- [4] ROBBINS, “therobbinscompany.com/about/advancements/tbms-in mining/”, 2020.
- [5] E.Arıoğlu, “ Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Performansına Etki Eden Etkenler Ve Kadıköy Kartal Tünelinde Kullanılan Tbm’in Performansının Arazi Penetrasyon İndisi İle Kestirilmesi.” Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [6] Tunnelling Journal, “https:tunnellingjournal.com/855/”, 2020.
- [7] Tunnel,  
“tunnelonline.info/en/artikel/tunnel\_Ulriken\_Tunnel\_The\_first\_TBM\_Drive\_for\_a\_Railway\_Tunnel\_in\_Norway\_2584845.htm”, 2020.
- [8] Yapı Merkezi, “yapimerkezi.com.tr/PdfDosyalari/27c70ed5-680f-48f2-bd99-4f76f9490fda-0a5dc889-8989-41c3-941f-13541e610270.pdf” ,2020.
- [9] Global Business Group, “gbgtr.com/tr/e-berk/”, 2020.

- [10] C. R. Medel-Morales and S. Botello-Rionda, "Design and Optimization of Tunnel Boring Machines by Simulating the Cutting Rock Process using the Discrete Element Method." *Comp. y Sist.*, vol.17, n.3, pp.329-339, 2013.
- [11] D. Willis, A. Shanahan, Z. Box, "Remote Disc Cutter Monitoring in Tunnelling", *Mining Engineer*, The Robbins Company, Kent, WA/USA, Tunnel 8/,2011.
- [12] J. Roby, T. Sandell, J. Kocab and L. Lindbergh, "The current state of disc cutter design and development Directions." *Proceedings of 2008 North American Tunnelling Conference (NAT2008)*, Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2008.
- [13] C. R. Medel-Morales and S. Botello-Rionda, "Design and Optimization of Tunnel Boring Machines by Simulating the Cutting Rock Process using the Discrete Element Method." *Comp. y Sist.*, vol.17, n.3, pp.329-339, 2013.
- [14] J. Rostami and S. Chang, "A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring Machines", *Engineering*, vol.3, n.6, Pages 892-904, 2017.
- [15] L. Song, W. Guo and D. Zhu, "Establishment of tunnel-boring machine disk cutter rock-breaking model from energy perspective." *Advances in Mechanical Engineering*, vol.7(12), 2017.
- [16] C. Balcı, N. Bilgin, H. Çopur, D. Tumaç and M. Akgül, "Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Tam Boyutlu Kesme Deneyi ile Performans Tahmini." *Birinci Maden Makineleri Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniv., Kütahya, Editör: C. Şensöğüt. ISBN 978-9944-89-277-3,10-12, ss. 61-70, 2007.
- [17] J. Rostami and L. Ozdemir, "A new model for performance prediction of hard rock TBMS." *Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute Colorado School of Mines Golden, Colorado, PROCEEDINGS/1993 RAPID EXCAVATION AND TUNNELING CONFERENCE*, 1993.

- [18] H. Çopur, H. Tunçdemir, N. Bilgin and T. Dinçer, "Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines", *Mining Technology, Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*, vol.110:3, pp 149-157, 2001.
- [19] N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı, D. Tumaç, M. Akgül, A. Yüksel and A. Kahriman, "Kadıköy-Kartal Metro Tünellerinde Kullanılacak Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Bazı Tasarım Parametrelerinin Kesme Deneyleri ile Belirlenmesi ve Performans Tahmini". *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Yayın No: 138. İTÜ Ayazağa Kampüsü, SDKM, İstanbul, Editörler: N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı, A.E. Yüce. ISBN 978-9944-89- 400-5.ss. 63-71, 2007.
- [20] W. Sun, J. Huo, J. Chen and X. Zhang, "Disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on different layout patterns" , *Computers & Industrial Engineering*, vol.61, no 4, pp 1209-1225, 2011.
- [21] S. Chang, S. Choi, G. Bae and S. Jeon, " Performance Prediction of TBM Disc Cutting on Granitic Rockby the Linear Cutting Test" *Korea Institute of Construction Technology*, Goyang-Si, Korea, 411-712, 2006.
- [22] R. Godinez, H. Yu, M. Mooney, E. A. Gharahbagh and G. Frank, "Earth Pressure Balance Machine Cutterhead Torque Modeling: Learning from Machine Data", *Colorado School of Mines, Jay Dee Contractors, Inc*, 2015.
- [23] J. Ling, L. Cheng, X. Tong and Z. Wu, "Research on rock breaking mechanism and load characteristics of TBM cutter based on discrete element method", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13(2), 1–15, 2021.
- [24] Y. Chen, T. Wei and T. Gong, "Research on optimal layout of cutter-head system of rock tunnel-boring machine based on Archimedes spiral theory", *Advances in Mechanical Engineering*, vol.10(2), 1-10, 2018.

- [25] G. Qi, W. Zhengying and M. Hao, “An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM)”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.52, February 2016, Pages 182-191, 2020.
- [26] K. Kim, J. Kim, H. Ryu, H. Rehman, H. Jafri, H. Yoo and S. Ha, “Estimation Method for TBM Cutterhead Drive Design Based on Full Scale Tunneling Tests for Application in Utility Tunnels”, NUST Institute of Civil Engineering, National University of Science and Technology (NUST), Islamabad 44000, Pakistan, 2020.
- [27] Y. Liu, S. Huang, D. Wang, G. Zhu and D. Zhang, “Prediction Model of Tunnel Boring Machine Disc Cutter Replacement Using Kernel Support Vector Machine”, State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China, 2022.
- [28] E-BERK Tünel ve Zemin Teknolojileri, “e-berk.com/tr/e3302-lale/”, 2020.
- [29] A. Ünsal, “Beykoz-Pasabahçe Atıksu Tünel İnsaatı Sırasında Meydana Gelen Yeryüzü Oturmalarının Jeo İstatiksel Yöntemle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [30] H.Tuncdemir, N. Bilgin, H.Copur and C.Balcı, “Control of rock cutting efficiency by muck size”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45(2):278-288, 2008.
- [31] N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı, D. Tumaç, M. Akgül, A. Yüksel and A. Kahrıman, "Kadıköy-Kartal Metro Tünellerinde Kullanılacak Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Bazı Tasarım Parametrelerinin Kesme Deneyleri ile Belirlenmesi ve Performans Tahmini". Ulaşımında Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Yayın No: 138. İTÜ Ayazağa Kampüsü, SDKM, İstanbul, Editörler: N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı, A.E. Yüce. ISBN 978-9944-89- 400-5.ss. 63-71, 2007.

[32] C. Balcı, N. Bilgin, H. Çopur, D. Tumaç, M. Akgül, "Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Tam Boyutlu Kesme Deneyi ile Performans Tahmini." Birinci Maden Makineleri Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniv., Kütahya, Editör: C. Şensöğüt. ISBN 978-9944-89-277-3,10-12, ss. 61-70, 2007.

[33] SKF , “skf.com.tr/productinfo/productid-32315” , 2020.