

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİNİ-DİSK KESKİLİ BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cemalettin ERDOĞAN

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİNİ-DİSK KESKİLİ BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cemalettin ERDOĞAN
(505121015)**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ömür ACAROĞLU ERGÜN

ARALIK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505121015 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Cemalettin ERDOĞAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MİNİ-DİSK KESKİLİ BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ömür ACAROĞLU ERGÜN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hasan ERGİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa AYHAN
Dicle Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Kasım 2015
Savunma Tarihi : 21 Aralık 2015

Göksenin Gaye Dursun'a,

ÖNSÖZ

Madencilikte ve son yıllarda özellikle inşaat sektöründe tünel/galeriye olan ihtiyaç artmış ve bu doğrultuda çevresel ve verimlilik açısından avantajları olan mekanize kazıya olan talep de artmıştır. Mekanize kazı makinalarının daha yaygın kullanımlarının olması nedeniyle yeni kesme teknolojilerinin bu makinalara uygulanması söz konusu olmuştur. Ancak bu makinalar bir bütünlük teşkil ettiğinden dolayı mekanize kazı makinaları üzerinde yapılan en ufak değişiklikler makinanın dinamik özelliklerini de etkilemektedir. Bu tez çalışmasında bu denenen yeni teknolojilerin kazı makinaları üzerindeki stabilite etkisinin incelenmesini amaçlanmış ve kazı verimliliğine olan etkisi incelenmiştir.

Öncelikle çalışmam boyunca bana destek olan, bilgi ve deneyimlerinden yaralandığım, bana yol gösteren ve kazı makinalarının tasarımları üzerinde çalışmamı sağlayan danışmanım sayın Doç. Dr. Ömür Acaroğlu Ergün'e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca bana desteklerini esirgemeyen başta Mehmet Güler ve Uğur Tutar olmak üzere bütün Egenitro Patlayıcı Madde Ltd. Şti. çalışanlarına, yine yüksek lisans eğitimim boyunca bana destek olan Prof. Dr. Cengiz Kuzu'ya ve Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Orhan Kural'a teşekkür borçluyum.

Bana tez yazım zamanında desteğiyle çalışma azmimi en üst seviyede tutmamı sağlayan Tuğba Kına'ya ayrıca teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimimde tanıştığım ve bana ders dönemimde destekleri bulunan Büşra Ertuğrul, Enver Ferah, Ezgi Toka'ya teşekkür ederim

Bana eğitimi ve bilgiyi arayan bir birey olmayı öğreten, akademik kültürü aşıl原因an babama, anneme ve ablama çok teşekkür ederim.

Kasım 2015

Cemalettin Erdoğan
Maden Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. MEKANİZE KAZI SİSTEMLERİ	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Mekanize Kazı Sistemlerinin Sınıflandırılması	4
2.3 Mekanize Kazı Sistemlerinde Kullanılan Makineler	6
3. BOMLU KAZI MAKİNALARI	11
3.1 Giriş.....	11
3.2 Bomlu Kazı Makinalarının Temel Özellikleri ve Yapısı	11
3.3 Bomlu Kazı Makinalarında Kullanılan Keskiler.....	16
3.3.1 Kalem ve kama uçlu keskiler	16
3.3.2 Disk keskiler	22
3.4 Bomlu Kazı Makinelerinin Kesici Kafaları ve Sınıflandırılması.....	28
3.4.1 Giriş.....	28
3.4.2 Kesici kafalar	29
3.4.2.1 Kesici kafaların tasarım parametreleri	29
3.4.2.2 Kesici kafa tasarımlarının performansa olan etkileri	34
3.4.3 Bomlu kazı makinaları ile yapılan kesme işlemi	37
3.4.3.1 Bom eksenine paralel kafalarda kesme işlemi	38
3.4.3.2 Bom eksenine dik kesici kafalarla yapılan kesme işlemi.....	40
3.4.4 BEP tipli ve BED tipli kesici kafaya sahip BKM'lerinin karşılaştırılması.....	41
3.5 Bomlu Kazı Makinalarının Seçimine Etki Eden Faktörler	43
3.5.1 Uygulanabilir maksimum tork	44
3.5.2 Uygulanabilir maksimum bom kuvvetleri	44
3.5.3 Kesme hızı.....	45
3.5.4 Stabilite durumu	45
3.5.5 Maksimum kesme yüksekliği.....	46
3.5.6 Maksimum kesme genişliği	46
3.5.7 Maksimum zemin altı kesme yüksekliği.....	47
3.5.8 Yürüme hızı.....	47
3.5.9 Makinanın zemine uyguladığı basınç	47
3.5.10 Çalışma eğimi	47
3.5.11 Diğer faktörler	47

3.6 Bomlu kazı Makinalarındaki Son Gelişmeler	48
4. BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE ANALİZİ	53
4.1 Giriş	53
4.2 Bomlu Kazı Makinalarının Stabilite Analizi Yöntemi	54
4.2.1 BEP tipi BKM'ların stabilite analizi	57
4.2.1.1 Arına doğru grime modunda stabilite analizi	57
4.2.1.2 Üstten kesme modunda stabilite analizi	58
4.2.1.3 Yukarıya doğru kesme modunda stabilite analizi	59
4.2.1.4 Alttan kesme modunda stabilite analizi	60
4.2.1.5 Aşağı doğru kesme modunda stabilite analizi.....	61
4.2.2 BED tipi bomlu kazı makinalarının stabilite analizi	62
4.2.2.1 Arına grime modunda stabilite analizi	62
4.2.2.2 Yana doğru kesme modunda stabilite analizi.....	63
4.2.2.3 Yukarıya doğru kesme modunda stabilite analizi	64
4.2.2.4 Aşağı doğru kesme modunda stabilite analizi.....	65
4.3 Bomlu Kazı Makinalarının Stabilite Analizi İçin Geliştirilen Bilgisayar Programı	66
5. MİNİ-DİSK KESKİLİ BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE ANALİZİ.....	69
5.1 Giriş	69
5.2 EMI Tarafından Geliştirilmiş Olan Mini-Diskli Kesici Kafa Tasarımı	69
5.3 Mini-disk Keskili BED Tipli Kesici Kafanın Denenmesi	77
5.4 Mini-disk Keskili BED tipi Bomlu Kazı Makinasının Stabilite Analizi.....	79
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	101
EKLER	105
ÖZGEÇMİŞ	155

KISALTMALAR

BKM	: Bomlu kazı makinaları
TEBD	: Tek eksenli basınç dayanımı
BEP	: Kesici kafanın dönme eksenine bom eksenine paralel
BED	: Kesici kafanın dönme eksenine bom eksenine dik
RQD	: Kayaç kalite değeri
RMCI	: Kayaç kütlesi kazılabilirlik indeksi
SE	: Spesifik Enerji

SEMBOLLER

F'C	: Kesme doğrultusunda keskiye gelen en büyük kuvvetlerin ortalaması
FC	: Kesme doğrultusunda keskiye gelen tüm kuvvetlerin ortalamasıdır.
F'N	: Kesme doğrultusuna dikey gelen maksimum kuvvetlerin maksimum ortalaması
FN	: Kesme doğrultusuna dikey gelen maksimum kuvvetlerin ortalaması
α	: Kesme açısı
β	: Temizleme açısı
w	: Keski genişliği
d	: Kesme derinliği
ϕ	: Uç açısı
S	: Keskiler arası mesafe
V	: Kesme hızı
σ_t	: Kayacın çekme dayanımı
θ	: Kayacın iç sürtünme açısı
n	: Gerilme dağılım çarpanı
σ_t	: Tek eksenli çekme dayanımı
σ_c	: Tek eksenli kesme dayanımı
FR	: Kesme yönünde diskin yuvarlanmasını sağlayan kuvvetlerin ortalaması
F'R	: Kesme yönünde diskin yuvarlanmasını sağlayan maksimum kuvvetlerin ortalaması
τ	: Kayanın kesme dayanımı
r	: Keski uç yarıçapı
FN_{ts}	: Teorik normal kuvveti
FR_{ts}	: Teorik yuvarlanma kuvveti
FN_c	: Düzenlenmiş normal kuvvet
FR_c	: Düzenlenmiş yuvarlanma kuvveti
D	: Kesici kafanın bir dönüşte aldığı yol
U	: Kesici kafanın doğrusal hızı
f_d	: Kesici kafanın birim zamandaki dönme hızı
θ	: Keski konum açısı
R	: Kesici kafanın kesme yarıçapı
L	: Kesici kafanın kesilen malzeme içinde olan kesme derinliği
T	: Tork
ks	: Toplam keski sayısı
SA	: Yatay bom kuvveti
VA	: Dikey bom kuvveti
AA	: Eksenel bom kuvveti
SE	: Spesifik enerji
P_R	: Kesici kafayı döndüren güç
P_H	: Yatay itme gücü
P_L	: Güç kayıpları
V_m	: Kazılan malzemenin hacmi

φ	: Keski kesme sektörü
W	: Makina ağırlığı
e	: Makina genişliği
p	: Palet genişliği
u	: Bom uzunluğu
m	: Makina ağırlık merkezi ile bom başlangıç noktası arasındaki mesafe
a	: Makina ağırlık merkezi ile makina arka ayağı arasındaki mesafe
f	: Bom yatay konumda iken zemin ile arasındaki mesafe
h	: Makinanın ağırlık merkezi ile zemin arasındaki mesafe
s	: Bomun yatay ve dikey dönme noktası arasındaki mesafe
α_1	: Bomun yatay düzlemde yana doğru yapabildiği maksimum açı
α_2	: Bomun dikey düzlemde yukarı doğru yapabildiği maksimum açı
α_3	: Bomun dikey düzlemde aşağı doğru yapabildiği maksimum açı
SR	: Boma ilerleme yönünde etki eden kuvvet
VR	: Boma etki eden dikey kuvvet
AR	: Boma etki eden eksenel kuvvet
μ	: Makina ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı
β	: Galeri eğimi
X	: Tünel genişliği
Y	: Tünel yüksekliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 : BKM'ların ağırlıklarına göre sınıflandırılması	12
Tablo 4.1 : BKM'ların stabilite analizinde kullanılan makina ve tünel parametreleri.....	56
Tablo 5.1 : Minidiskli orjinal kesici kafanın dizayn parametreleri	71
Tablo 5.2 : Mini-diskli orjinal kesici kafanın keski konumları.....	72
Tablo 5.3 : Minidiskli modifiye kesici kafanın tasarım parametreleri.....	73
Tablo 5.4: Minidiskli modifiye kesici kafadaki keski konumları.	74
Tablo 5.5 : Mini-diskli nihai kesici kafadaki keski konumları	76
Tablo 5.6 : Kalem uçlu kesikli kesici kafadaki keski konumları	79
Tablo 5.7 : BED tipli bir BKM'nın stabilite analizinde kullanılan makina ve galeri parametreleri.....	81
Tablo 5.8 : AM 105 BKM'sına bütün kesme konumlarında etki eden kuvvetler.	82
Tablo 5.9 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan kalem uç kesici kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları.....	83
Tablo 5.10 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan orijinal tip mini-disk kesikli kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları	84
Tablo 5.11 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan modifiye tip mini-disk kesikli kesici kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları.	85
Tablo 5.12 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan nihai tip mini-disk kesikli kesici kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları.	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kazı maliyetinin tünel uzunluğuna bağlı değişimi.....	5
Şekil 2.2 : Tek kalkanlı TBM ve parçaları	7
Şekil 2.3 : Çamır basınçlı tünel açma makinasının kesit görünümü.	8
Şekil 2.4 : Çamur tipi mikrotünel makinası.....	8
Şekil 2.5 : Sürekli yeraltı kazıcıları	8
Şekil 2.6 : Hidrolik kırıcı ekskavatör.....	9
Şekil 3.1 : Bomlu kazı makinası	11
Şekil 3.2 : Kalkanlı bomlu kazı makinası.....	12
Şekil 3.3: Çift bomlu BKM	13
Şekil 3.4 : Malzeme toplama üniteleri.....	15
Şekil 3.5 : Kalem uçlu keskinin çatlatma mekanizması	17
Şekil 3.6 : Kama uçlu keskinin kesme değişkenleri	18
Şekil 3.7 : Evans çekme çatlağı modeli	19
Şekil 3.8: Kalem uçlu kesme geometrisi	21
Şekil 3.9 : İçsel basınçlar altındaki boşluk	22
Şekil 3.10 : Disk keskilde ring profili a) V-tip b) CCS tip	23
Şekil 3.11 : Disk keskilere etkiyen tasarım parametreleri.	24
Şekil 3.12 : Disk keskilere etkiyen kuvvetlerin gösterimi.	24
Şekil 3.13 : BEP ve BED tipi kesici kafalar	28
Şekil 3.14 : S/d oranının spesifik enerjiye etkisi	29
Şekil 3.15 : Kesici kafa kesme patterni	30
Şekil 3.16 : BEP tipi kesici kafalardaki keski sınıflandırması	31
Şekil 3.17 : Keskil arası çevresel uzaklıklarının kesme diyagramında gösteri	32
Şekil 3.18 : BEP tipi kesici bir kafadaki keski tasarım parametreleri	32
Şekil 3.19 : BEP tipi BKM'larda uygulamada rastlanan kesici kafa geometrileri ...	33
Şekil 3.20 : Kesici kafa şeklinin galeri kesitine olan etkisi	33
Şekil 3.21 : Kinematik açıdan kesme derinliği.....	34
Şekil 3.22 : Keski ve bom kuvvetleri.....	35
Şekil 3.23 : Tek bir keskinin kesme hareketi	37
Şekil 3.24 : BEP tipi kesiciler boma etkiyen kuvvetler.	38
Şekil 3.25 : BKM'larda kesme tipleri	38
Şekil 3.26 : BEP tipi BKM'larda verimli kesme hareketi.....	39
Şekil 3.27 : BED tipi kesicilerde boma etkiyen kuvvetler.....	40
Şekil 3.28 : BED tipi kesicide verimli kesme hareketi.....	41
Şekil 3.29 : BED tipi ve BEP tipi BKM'larının tünel profillerine etkisi	43
Şekil 3.30 : Laser reflektörlerin tüneldeki konumları.....	49
Şekil 3.31 : Su jetlerinin keskilde konumlandırılması.....	50
Şekil 3.32 : Asimetrik kafa hareketlerinin şematik gösterimi ve kafanın teknik çizimi.	51
Şekil 3.33 : Asimetrik kafanın betonda test edilmesi	52

Şekil 4.1 : BEP tipli bomlu kazı makinasının arında doğru girme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler	57
Şekil 4.2 : BEP tipli bomlu kazı makinasının üstten kesme modunda stabilite analiz için kullanılan parametreler	58
Şekil 4.3 : BEP tipli bomlu kazı makinasının yukarı doğru kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler	59
Şekil 4.4 : BEP tipli bomlu kazı makinasının alttan kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler	60
Şekil 4.5 : BEP tipli bomlu kazı makinasının aşağı doğru kesme modunda stabilite analizi.....	61
Şekil 4.6 : BED tipli bomlu kazı makinasının arına girme modunda stabilite analizinde kullanılan parametreler	62
Şekil 4.7 : BED tipli bomlu kazı makinasının yana doğru kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler	63
Şekil 4.8 : BED tipli bomlu kazı makinasının yana doğru kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler	64
Şekil 4.9 : BED tipli bomlu kazı makinasının aşağı doğru kesme modunda stabilite analiz için kullanılan parametreler	65
Şekil 4.10 : BKM stabilite analizi programının akış diyagramı	67
Şekil 5.1 : 17 inçlik disk keski (solda) ve 5 inçlik mini-disk keski	70
Şekil 5.2 : Mini-diskli orjinal kesici kafanın teknik çizimi	71
Şekil 5.3 : Minidiskli modifiye kesici kafanın teknik çizimi.....	73
Şekil 5.4 : Minidiskli nihai kesici kafanın 3 boyutlu modeli.....	75
Şekil 5.5 : Mini-diskli modifiye kesici kafa	75
Şekil 5.6 : Yatay sondaj makinasının temsili resmi.....	77
Şekil 5.7 : Mini-disk keskili BED tipli kesici kafa kesme testleri.....	78
Şekil 5.8 : AM 105 BED tipi BKM'nın genel çizimi.....	80
Şekil 5.9 : Nihai tip mini-disk keskili kesici kafanın aşağı doğru kesme modundaki moment izohipsleri a) dik eksen etrafında dönem b) devrilme durumu	87
Şekil 5.10 : Nihai tip mini-disk keskili kesici kafanın aşağı doğru kesme modundaki moment izohipsleri a) arkaya doğru devrilme b) kayma.....	88
Şekil 5.11 : Nihai tip mini disk keskili kesici kafanın arına girme modunda kayma durumundaki stabilite analizi moment eşdeğer eğrisi	89
Şekil B.1 : Kalem uç keskili kesici kafanın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme	123
Şekil B.2 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme ...	124
Şekil B.3 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme	125
Şekil B.4 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	126
Şekil B.5 : Kalem uç keskili kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme	127
Şekil B.6 : Kalem uç keskili kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	128
Şekil B.7 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme	129
Şekil B.8 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme	130

Şekil B.9 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme	131
Şekil B.10 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.....	132
Şekil B.11 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme	133
Şekil B.12 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	134
Şekil B.13 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a)arına doğru kesme b) yana doğru kesme	135
Şekil B.14 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	136
Şekil B.15 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme	137
Şekil B.16 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)yukarı doğru kesme b)aşağı doğru kesme	138
Şekil B.17 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme	139
Şekil B.18 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.....	140
Şekil B.19 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.....	141
Şekil B.20 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	142
Şekil B.21 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) aşağı doğru kesme	143
Şekil B.22 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	144
Şekil B.23 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme	145
Şekil B.24 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	146
Şekil B.25 : Nihai tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme	147
Şekil B.26 : Nihai tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.....	148
Şekil B.27 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.....	149
Şekil B.28 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme ...	150

Şekil B.29 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme	151
Şekil B.30 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme ...	152
Şekil B.31 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme	153
Şekil B.32 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın kayma kuvvet izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme	154

MİNİ-DİSK KESKİLİ BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE ANALİZİ

ÖZET

Günümüzde her yıl madencilik ve inşaat amaçlı yüzlerce kilometre galeri ve tünel açılmaktadır. Şehirleşmenin de artmasıyla altyapıya yönelik tünellere olan talep artmıştır. Bu tüneller hızlı ve güvenli şekilde açılmalıdır. Madencilikte ise çevre kısıtlamaları ve madencilik alanlarının kentsel bölgelerin içine girmesiyle yeraltı üretimine eğilim artmıştır. Yeraltı üretim faaliyetlerinin ekonomik ve hızlı olabilmesi için hazırlık işlerinin mümkün olduğunca kısa sürede tamamlanması gerekmektedir. Bu yüzden mekanize kazı yöntemleri daha fazla seçilir hale gelmiştir.

Mekanize kazı araçlarından biri olan bomlu kazı makinaları, ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması, mobilizasyon kolaylığı ve kullanım esnekliklerinden dolayı sıkça tercih edilen mekanize kazı makinalarından biridir. Ancak bu makinalar sert ve aşındırıcı kayalarda keskinin hızlı aşınması ve makinaya etkiyen kuvvetlerin büyüklüğü nedeniyle kullanılamamaktadır.

Bomlu kazı makinalarının sert ve aşındırıcı kayalarda kesebilmesi için güçleri arttırılmakta ancak bu durum makinanın boyutlarını ve ağırlığını arttırmasından dolayı mobilizasyon ve kullanım esneklikleri gibi özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu sebeple bomlu kazı makinalarının sert ve aşındırıcı kayalarda kesme verimliliklerini arttırmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar kesici kafalarda su jeti yerleştirilmesi, PDC gibi malzemelerin keskinde kullanılması ve yeni keski tiplerinin bomlu kazı makinalarının kesici kafalarında kullanılması olarak özetlenebilir.

Piyasada kullanılan bomlu kazı makinalarında genellikle kalem uçlu keskiner veya kama uçlu keskiner kullanılmaktadır. Disk keskinere çok büyük kuvvetler etki ettiği için bu tip keskiner bomlu kazı makinalarında kullanılamamaktadır. Bu nedenle bomlu kazı makinalarında mini-disk keskinerin kullanım olanakları araştırılmıştır.

Ancak makinanın yapısında veya kesici kafasında yapılan değişiklikler, makinaya etki eden kuvvetleri değiştirmekte dolayısıyla makinanın stabilitesine etkisi de söz konusu olmaktadır. Stabilitate etkisi ise makinanın kazı verimine ve çalışma güvenliğine etki eden önemli bir faktör olması nedeniyle tasarlanan kesici kafaların ve makinaların stabilite analizlerinin iyi yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen husus doğrultusunda, sert ve aşındırıcı kayac yapısında çalışması için tasarlanan mini-disk keskili kesici kafaların stabilite analizlerinin yapılması amaçlanmıştır.

Çalışmada öncelikle, mekanize kazı sistemleri tanıtılmış, sınıflandırılmış ve bu sistemlerde kullanılan makinalar açıklanmıştır. Mekanize kazı sistemlerinde kullanılan bomlu kazı makinalarının genel özellikleri, yapısı ve tiplerinden

bahsedilmiştir. Özellikle bu makinalarda kullanılan keski tipleri açıklanmış bu keski tiplerine bağlı kesme teorileri verilmiştir. Makinanın kinematik ve dinamik özelliklerine de yer verilerek makinaya etki eden kuvvetler irdelenmiştir. Bomlu kazı makinalarının kesici kafa tipine göre sınıflandırılması yapılmıştır. Buna ek olarak bomlu kazı makinalarının seçimine etki eden kriterler de incelenerek burada bu seçim kriterlerinden biri olan stabilite faktörü açıklanmıştır. Bomlu kazı makinalarında uygulanan son gelişmeler ayrı bir başlık altında belirtilmiştir.

Ardından bomlu kazı makinaları için stabilite analizi yöntemi anlatılmış. Stabilite analizleri, ilk önce kesici kafaların konumlandırılmasına göre kesici kafanın dönme eksenini bom eksenine paralel (BEP) ve kesici kafanın eksenini bom eksenine dik (BED) olmak üzere iki sınıfa ayrılmış ardından bu makinelerin kesme modlarına göre 4 ayrı stabilite analiz yöntemi belirtilmiştir. Sonra da bu analiz yöntemleri C++ bilgisayar programlama dilinde, bütün kazı arını ya da arındaki belli bir noktadaki stabilite değerini verebilen program kullanılarak uygulanmıştır..

Sonrasında mini-disk keski teknolojisinin uygulandığı Colorado School of Mines Earth Mechanics Institute (EMI) ve Voest Alpine tarafından tasarlanan kesici kafaların kaynaşmış tüfitteki kesme testleri anlatılmıştır.

Stabilite analiz program kullanılarak, tasarlanan ve üretilen üç adet mini-disk keski kesici kafanın ve AM 105 BED tipi bomlu kazı makinasında pratikte kullanılan kalem uçlu kesici kafanın stabilite analizi yapılmıştır.

Elde edilen analizler ışığında kesme konumuna ve kesici kafa tipine göre tasarlanan kesici kafalar birbirleriyle kıyaslanmış ve tasarlanan kesici kafaların stabilite açısından sorunlu olduğu bölgeler belirtilmiştir.

Çalışma sonucunda kesici kafaların sadece kesme testleri ile verimliliğinin ölçülemeyeceği, makina verimliliğinin iyi bir şekilde tespiti için makinanın boyut parametreleri dikkate alınarak stabilite analizinin de yapılması gerektiği ortaya konulmuştur.

STABILITY ANALYSIS OF A MINI-DISC EQUIPPED BOOM TYPE TUNNELING MACHINE

SUMMARY

In today's world, hundreds of kilometers of galleries/tunnels are being constructed. Since high rates of urbanization and demand of infrastructure has also increased, tunnels need to be excavated in the quickest and safest way. Moreover, the mining activities will be operated near the urban areas and because of this, the contractors tend to chose the underground mining methods to avoid causing environmental impact.

Mainly there are two methods in underground excavation: drilling and blasting method and mechanical excavation. These methods are selected depending on tunnel dimensions, tunnel geometry, length of tunnel, geological and rock mechanical condition, ground water level, vibration restrictions and allowed ground settlements. The drilling and blasting method is still the most typical method for medium to hard rock conditions. It can be applied to a wide range of rock conditions. Some of its features include versatile equipment, fast start-up and relatively low cost tied to the equipment. On the other hand, the cyclic nature of drilling and blasting excavation method cause low speed of excavation. Blast vibrations and noise also restrict the use of drilling and blasting method in urban areas.

Mechanical excavation has some advantages over the drilling and blasting method. This method is safer and more environmental friendly operations. The muck size in mechanical excavation is uniform thus haulage cost is lower than drilling and blasting methods. This method is suitable for selective mining and continuous operations. For all these advantages mechanical excavation has become a rival of drilling and blasting method in 20th and 21st century.

The machinery in mechanical excavation is mainly divided two parts, full face excavation machineries and partial face excavation machineries. The full facel excavation machines are TBMs, EPBs, micro-tunneling machines. The partial face machines are roadheaders, hydraulic hammer, continous miners.

Roadheaders has an exceptional place among those other excavation machines. It has lower initial costs than the full-face excavation machinery. They are also flexibly equipped to excavate galleries in various shapes. On the other hand, they are not suitable for hard and abrasive rock conditions and are more preferable for excavating stable rocks with low to medium hardness. This disadvantage is an obstacle to usage of roadheader widely.

The main reason why roadheaders can not be used in abrasive and hard conditions is the cutting tools of roadheaders. Drag bits and chisel bits are used in the cutter heads of roadheaders. These bits wear out very rapidly or suffer total structure failure. Moreover roadheaders can not handle the forces in hard conditions and these reaction forces are causing stability problems of roadheader. To overcome this problem, the

bigger and more powerful roadheaders are produced, however the power of machine and the size of machine is direct proportional. The bigger size of these machines eliminate the mobility and flexibility features of roadheaders.

For these reasons, the researchers are studying on new technologies for using the roadheaders in hard rock without increasing the machine size. These technologies are mainly focused on cutterheads and rock cutting tools. For example, water jets are used on the cutter heads of roadheaders for increasing the efficiency of cutting and new materials like PDC for cutting tools to reduced the wear ratio of the bits.

The researchers has considered using disc cutters on the roadheaders cutting heads. If disc cutters could be utilized on a roadheader, the application of this type of excavator could be extended into harder rocks. While disc cutters are too big, they occupy too much mounting space and require thrust levels much higher than roadheaders can handle. Because of this , reseachers have developed mini-disc cutters for using in cutter heads in boom type tunneling machines.

On the other hand, the changes in the structure of machines and the cutter heads cause changes in reaction forces that is applied on roadheader and also these changes stability of the roadheaders. Stability has got a direct effect on the efficiency of cutting and safety of excavation, because of these, stability analysis must be well performed.

The study aims to establish the stability analysis for mini-disc equipped roadheader cutterheads that are designed for using in hard and abrassive conditions.

The study first introduces the mechanical excavation systems, classification of mechanical excavation machines and places they are used and then general features, structures and types of boom type tunneling machines states. After that cutter tools types that is used on cutting heads in boom type of tunneling machines and the cutting theories of these cutters are explained. The parameters of designing cutter heads are explained and type of the cutting head are stated, dynamic and kinematical features demonstrating the machine integrity are mentioned. Selection factors of the boom type tunneling machine is explained . The stability of boom type machine which is one of the selection factor is important for the efficiency and safety in excavation operations and the method to make stability analysis of boom type tunneling machines (BKM) and obtain numerical values, is stated.

Stability analyses are divided mainly two parts, stability analyses of longitudinal cutter head (BEP) and stability analyses of transversal cutter head (BED). The stability analysis of BEP is contained 4 different stability state (turning around the vertical axis, turning to side, turning to back, sliding of the machine). These states are analysed in four cutting mode, sumping, overcutting, undercutting, lifting, lowering. The stability analysis of BED is also contained 4 different stability state but these states are analysed in 4 different cutting mode, sumping, arcing, lowering and lifting. Then based on these stability states, a computer program which is based on C++ programing language, are used for analysing the stability of boom type tunneling machine all of the face or the specific point in the face.

Then the implementation of one of the newest cutting tool type, mini-disc cutter and the laboratory testing and performance evaluation of a mini-disc equipped cutter head that is performed by Colorado School of Mines Earth Mechanics Institute (EMI), is presented. 3 mini-disc equipped cutter heads were designed for excavating highly abrasive hard welded tuff. These design are stated as original design, modified design and final design. Following extensive compute modeling and performance analysis

that was conducted by EMI, a 920 mm (36 inch) cutterhead (final design) featuring thirty six 125 mm (5 inch) cutters are fabricated for testing in the laboratory. The tests were performed by using horizontal drill rig that allow sumping and lowering modes. The cutter heads are designed for using on Voest Alpine AM 105 transverse boom type tunneling machine. Mini-disc were found to excavate the welded tuff in a high efficient manner both in the sumping and shearing (lowering) modes. No cutter wear or failure was observed. The cutter head was found to efficiently excavate welded tuff with thrust, torque and power requirements well below the capabilities of the AM 105 by EMI.

The stability analysis of these test was performed by using the methods explained above in this study. Three design mini-disc equipped cutter heads and original dragbit head that is used on AM105, were analysed. The parameters of tunnel, machine and the forces ,that effects boom of the machine, were used for analysis. The analyses were performed for all positions in face and all modes of cutting. The result of these analysis of all four cutter heads were discussed.

The comparison between these cutter heads and the cutter heads design relations to performance on the face based on stability were established in consideration of analysis results. The minimum and negative values of stability on the face was stated.

To conclude, this study states that the cutting efficiency can not estimated by only cutting tests, machine dynamics such as stability are also important. The stability analysis should be performed for estimation efficiency. Moreover the study is proved that every little changes in cutter head design directly effects the stability and the stability has also direct affect to efficiency.

1. GİRİŞ

Günümüzde inşaat sektörünün hızla gelişmesi doğrultusunda altyapı tesislerinin inşaatı için tünelcilik faaliyetlerine duyulan talep gün geçtikçe artmıştır. Oluşan bu talebi karşılamak için üretim hızı önemli bir faktör olmakla birlikte, bu üretim hızı, mühendislik açısından verimlilik, ekonomiklik ve güvenlik gibi kavramlarla örtüştürülmediği takdirde bir anlam teşkil etmemektedir. Ayrıca inşaat sektörünün ve şehirleşmenin artışıyla hammaddeye duyulan talep de artmış olup, bu talep doğrultusunda ülkemizdeki madencilik faaliyetleri de artmıştır. Madencilik yapılan alanlar ile şehirlerin içi içe girmesi ve madenlerin derinleşmesi dolayısıyla, madencilik yerüstü madenciliğinden, yeraltı madenciliğine doğru bir yönelim bulunmaktadır. Tünellerde ve yeraltı madenciliğinde, klasik delme-patlatma yöntemlerinin çevresel risk oluşturması ve bazı yerlerde ekonomik olmaması sebebiyle mekanize yöntemler daha fazla tercih edilir hale gelmiştir.

Mekanize kazı araçlarından bir olan bomlu kazı makineleri, diğer mekanize kazı araçlarına göre daha farklıdır. Bu farklılıklar, bomlu kazı makinelerinin ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması ve kullanım esnekliğidir. Ancak bu makinelerin sadece yumuşak ve orta sert kayalarda verimli çalışabilmesi bu makinelerin daha da yaygın kullanımını engellemektedir.

Bomlu kazı makinelerinin sert kayaç ortamında kullanılamamaları, bu makinelerde kullanılan kalem uçlu ve kama uçlu kesicilerinin sert ve aşındırıcı kayaçları keserken hızlı yıpranmaları ve makinelerin stabilite problemidir. Bunu aşmak için makinelerin güçleri ve buna bağlı olarak ağırlıkları arttırılmakta ancak bu durum makina boyutlarını arttırdığı için tünel veya galeri kazısında kullanılabilme imkanlarını kısıtladığı gibi mobilizasyon açısından da zorluk çıkarmaktadır.

Bu dezavantajı engellemek amacı ile bomlu kazı makinelerinin dizayn ve yapılarındaki kullanılmak üzere yeni teknolojiler aranmaktadır. Su jetlerinin kesici kafalara eklenmesi ve PDC gibi materyallerin kesici kafalarda kullanılması üzerine yapılan

Çalışmaların yanısıra yeni keski teknolojilerinin de geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Daha sert formasyonlar içim kama uçlu ve kalem uçlu keskinlerin yerine kullanılabilcek disk keskinlerin kullanılması gündeme gelmiş ancak bu keskinlere etki eden kuvvetlerin büyüklükleri sebebiyle cephele kazı makinaları bu kuvvetleri karşılayamamakta ve bu tip keskinler tam cephele kazı makinalarında kullanılmaktadır.

Disk keskinlerin, cephele kazı makinalarında uygulanması amacıyla mini-disk keskinler tasarlanmıştır. Bu keskinler normal disk keskinlerden daha küçük boyutlu keskinler olup kalem uçlu ve kama uçlu keskinlere göre daha sert kayalar kazabilme kapasitesine sahiptirler.

Mini-disklerin, en popüler cephele kazı makinasından biri olan BKM kesici kafası üzerinde denenmesi ve uygulanması kaçınılmaz olmuş, bu doğrultuda bomlu kazı makinalarında kullanılmak üzere Colorado School of Mines Earth Mechanic Institute (EMI) tarafından Voest Alpine firmasına ait AM 105 dönme eksenli bom eksenine dik tip bomlu kazı makinasında kullanılmak üzere mini-diskli kesiciler kullanılan 3 adet kesici kafa tasarlanmıştır. Bu 3 tasarlanan kafadan nihai tip mini-disk keskinli kesici kafa Voest Alpine firması tarafından üretilmiş ve yatay sondaj makinasında bu kesici kafasının kesme deneyleri yapılmıştır.

Ancak bomlu kazı makinelerinde, gerek kafa tasarımında, gerek ise yapısal tasarımında yapılan değişikler bomlu kazı makinesine etkiyen kuvvetleri değiştirmekte ve makinenin stabilitesini etkilemektedir. Bomlu kazı makinelerinin stabilitesinin olumsuz etkilenmesi durumunda kazı olmadan geçen zamanın artacağı gibi makinenin kesebileceği maksimum profil kesiti de azalarak kazı verimliliği azalacak ve buna ek olarak kazı güvenlik riski ise artacaktır.

Bu çalışmada üretilen ve deneyleri yapılan bu kesici kafaya etki eden kuvvetler hesaplanmış, hesaplanan bu kuvvetler kullanılarak AM 105 makinasının orijinal kalem uçlu keskinli kesici kafası, orijinal tip mini-diskli keskinli kesici kafa, modifiye tip mini-disk keskinli kesici kafa ve nihai tip mini-disk keskinli kesici kafanın 4 ayrı kesme modunda 4 ayrı stabilite durumunda stabilite analizi yapılmıştır. Yapılan bu stabilite analizleri kesici kafa tipleri ve kesme modları baz alınarak karşılaştırılmış ve yorumlanmış bomlu kazı makinalarının stabilite durumlarının kazı verimliliğine etkisi irdelenmiştir.

2. MEKANİZE KAZI SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

Geçmişten itibaren insan bulunduğu çevreyi yaşanabilir hale getirmek için değiştirmeye çalışmıştır. Bunu yaparken de insanoğlu kazı yapma gereği duymuştur. Basit el aletleri ile başlayan bu kazı işlemi, patlayıcıların bulunması ile seviye atlamış, insanoğlunun en sert zeminleri bile kazabilmiştir. 19. yüzyıldan itibaren ise endüstri devrimi ile paralel olarak “mekanize kazı” kavramı ortaya çıkmıştır. 20. Yüzyılda kazı mekaniğinin de bilimsel haline gelmesi sonucunda, mekanize kazı yöntemleri, delme patlatmalı kazı yöntemlerine alternatif olabilmış ve etkin bir kazı yöntemi olarak inşaat ve madencilik sektörlerinde yer bulmuştur.

Mekanize kazının patlayıcı maddeli kazıya göre avantajları şunlardır;

1. Güvenli ve daha çevreci bir kazı yöntemidir. Titreşim ve hava şoku gibi etkileri olmadığı gibi, çalışan işçi sayısını azaltması açısından iş kazalarının azalmasına olanak sağlar. Bu durumun sayesinde madencilik ve tünelcilik faaliyetleri kentsel bölgelere daha çok entegre olabilmektedir.
2. Mekanize kazıdaki havalandırma ihtiyacı, patlayıcı maddeli kazıda patlatmadan kaynaklı gazların yoğunluğu sebebiyle patlayıcı maddeli kazıdaki havalandırma ihtiyacına göre daha azdır. Mekanize kazıda aşırı sökülme ve kırıklı çatlaklı zonların kontrolü daha rahat olduğu için daha az tahkimat sistemi kullanılır. Birim tahkimat maliyeti düşüktür.
3. Mekanize kazıda homojen bir parça boyutu olduğundan pasa nakliyesi kolay hale gelir. İkincil kırmaya olan ihtiyaç daha azdır. Patlayıcı maddeli kazıda ise parçalanma homojen olarak gerçekleşmez, ikincil kırmaya ihtiyaç duyulur.
4. Mekanize kazı, sürekli çalışmaya daha çok imkan sağlar ancak patlayıcı maddeli kazıda bir delme-patlatma-havalandırma-yükleme-tahkimat döngüsü

ile kazı yapılır. Bu yüzden benzer şartlarda mekanize kazı, patlayıcı maddeli kazıya göre daha hızlıdır ve uygun yer koşullarında birim kazı miktarları yüksektir. Böylelikle kazı daha ekonomikleşir.

Mekanize kazının ise delme-patlatmaya göre dezavantajları ise şunlardır;

1. Mekanize kazıda, makina alımlarından kaynaklı ilk yatırım maliyeti yüksektir. Yüksek bütçelere ihtiyaç vardır. Sarf malzeme ve yedek parça fiyatları yüksektir.
2. Mekanize kazıda çalışma sırasında esnekliği yoktur. İyi bir ön çalışma gerektirir. Kazının başarısı kazılan formasyonun şartlarına bağlıdır. Bazı kazı araçları ancak belirli galeri kesitlerinde çalışabilir. Zemine karşı hassastır. Belirli kesit alanlarında çalışabilir. Madencilik çalışmalarına adaptasyonu zordur. Bazı mekanize kazı araçlarının mobilizasyon zorluğundan dolayı farklı madencilik ve tünelcilik faaliyetlerine adaptasyonu zordur. Yüksek eğimli sahalarda çalışmaları zordur.
3. İşçi tecrübesinin makina randımanına direk etkisi bulunduğundan dolayı kalifiye eleman gerektirir. Bakım-onarım ekibinin bulundurulması şarttır. Ön çalışmalarla birlikte faaliyete başlama süresi uzundur [1].

2.2 Mekanize Kazı Sistemlerinin Sınıflandırılması

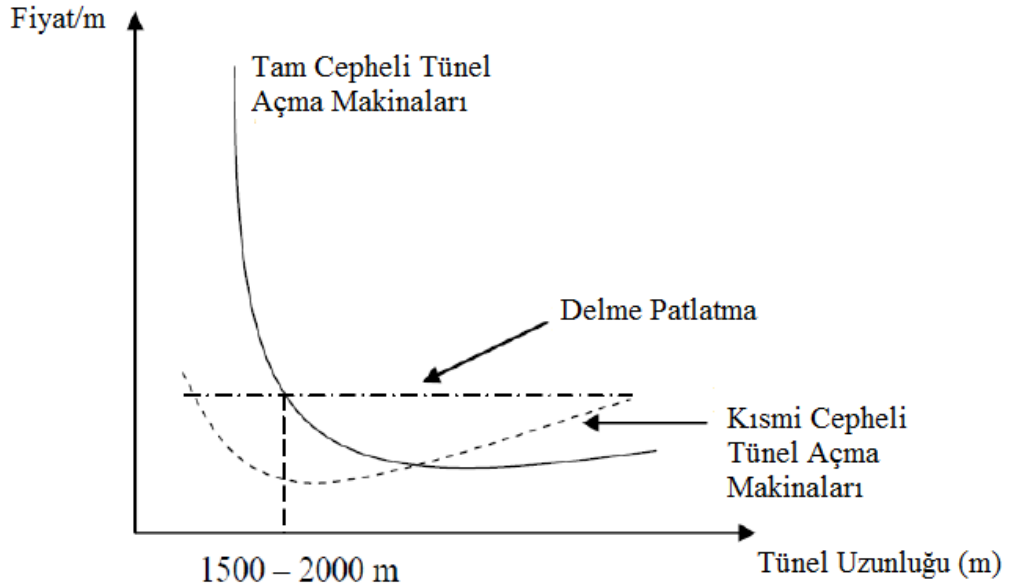
Mekanize kazı sistemleri ve buna bağlı olarak mekanize kazı sistemlerinde kullanılan makineler genel olarak “tam cepheli kazı makinaları” ve “kısmi cepheli kazı makinaları olarak” ikiye ayrılırlar. Tam cepheli tünel açma makinaları, bir seferde arının tamamı kesilerek ilerleme sağlanılmakta, kısmi cepheli kazı makinalarında ise belirli kesme derinliğinde arın kısım kısım kesilerek istenilen profil elde edilmekte ve ilerleme sağlanmaktadır. Mekanize kazı yöntemleri seçilirken dikkat edilen başlıca faktörler şunlardır;

- 1- Tünelin kesit alanı
- 2- Tünelin uzunluğu
- 3- Tünelin geometrik şekli
- 4- Jeolojik yapı ve kayacın mekanik özellikleri

Mekanize kazı methodlarının tanımlarından anlaşılacağı üzere tam cepheli kazı makinalarının kesici kafasının kesiti, tünel kesitine eşit büyüklükte olması gerekmekte iken kısmi cepheli kazı makinaları tünel kesiti açısından daha esnektir. Tam cepheli kazı makinalarında bu yüzden tünel kesit alanına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Tünelin geometrik şekli yine mekanize kazı methodlarının tanımlarından anlaşılacağı üzere, kısmi cepheli kazı makinaları için daha az önem arz ederken, tam cepheli kazı makinaları için daha önemli bir faktördür. Kısmi cepheli kazı makinalarında, makinanın yapısal sınırlarına bağlı olarak çeşitli büyüklüklerde ve şekillerde (dairesel, at nalı, dikdörtgen) galeriler açılabilir. Ayrıca kazı kısmi yapılabildiği için arının yapısına uygun olarak seçimli kazı yapılabilmekte, böylece daha verimli kazı işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

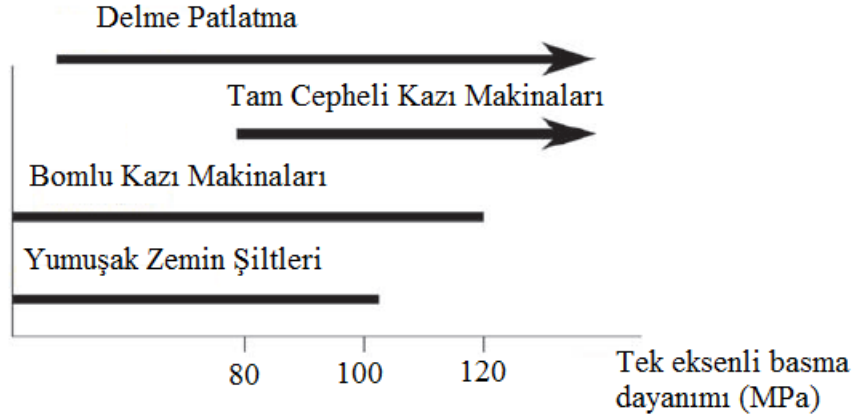
Tünelin uzunluğu arttıkça mekanize sistemler daha avantajlı olmakla birlikte, Şekil 2.1’de görüleceği üzere 1500-2000 metreden daha uzun tünellerde tam cepheli kazı makinaları, kısmi cepheli kazı makinelerine göre daha avantajlıdır [2].



Şekil 2.1: Kazı maliyetinin tünel uzunluğuna bağlı değişimi.

Kısmi cepheli kazı makinaları düşük ve orta sertlikteki kayalar için kullanılmakta, sert ve masif kayalar için mevcut teknoloji ile verimli olmamaktadır. Ancak tam cepheli kazı makinaları sert kayalarda verimli kazı yapabilmektedir. Şekil 2.2’de

tünel açma yöntemlerinin hangi kayaç dayanımı aralığında kullanıldığına dair genel bir bilgi verilmektedir [3].



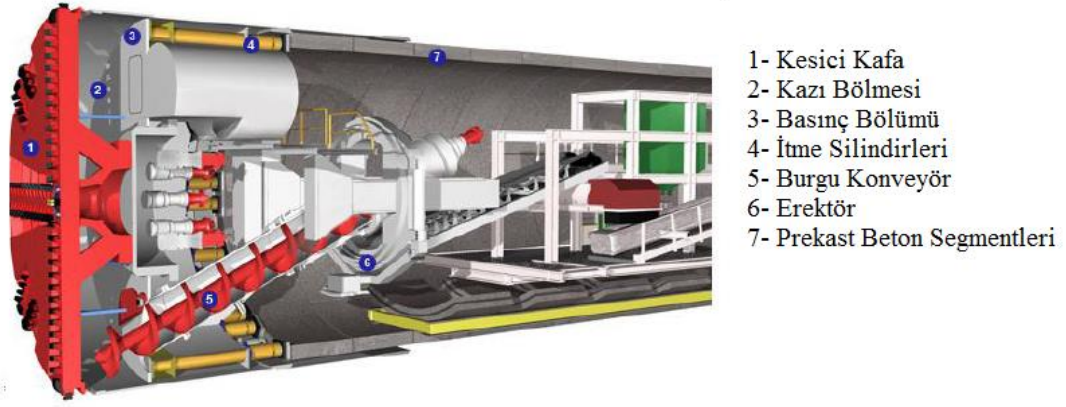
Şekil 2.2 : Kayaç dayanımına bağlı tünel açma yöntemleri.

2.3 Mekanize Kazı Sistemlerinde Kullanılan Makineler

Mekanize kazı sistemlerinde genellikle tam cepheli tünel açma makinası (TBM), pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinaları (EPB), mikro tünel açma makinaları, sürekli yüzey kazıcıları, bomlu kazı makineleri, kesici yükleyiciler, hidrolik kırıcılı ekskavatörler kullanılır. Kesici yükleyiciler, yeraltı maden üretiminde kullanılırlar. TBM, bomlu kazı makineleri ve hidrolik kırıcılı ekskavatörler ise yeraltı maden ocakları hazırlık işlerinde ve inşaat sektöründe kullanılırlar.

TBMler tam cepheli kazı makinaları sınıfına girmektedir. Geçtiğimiz 50 yılda ihtiyaç doğrultusunda sürekli gelişen TBM'ler 1.6 metre çapından 18 metre çapına kadar her boyda üretilmekte ve 300 MPa basma dayanımlı kayaçlarda bile kazı yapabilmektedir [3].

Şekil 2.3'de gösterilen TBM'lerin temel unsurları kesici kafa itme silindirleri, yönlendirme silindirleri, kesici kafayı döndüren motorlar, beton tahkimat elemanlarını yerleştiren erektörlerdir [4].

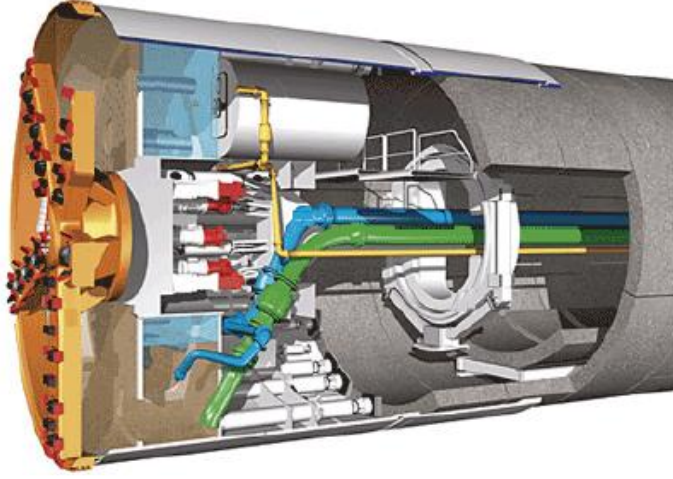


Şekil 2.2 : Tek kalkanlı TBM ve parçaları.

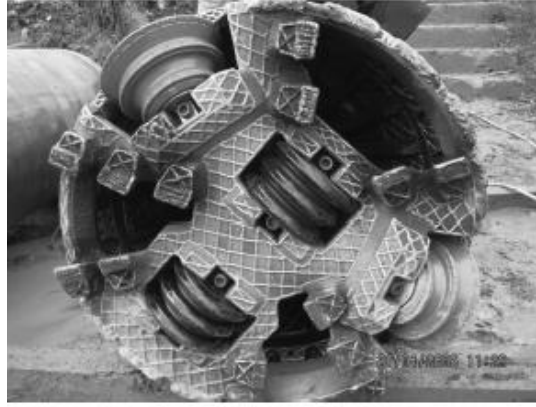
Tünel açma makinelerinde kesilecek formasyona göre kesici kafa dizaynları ve kesici kafada kullanılan keskiçiler değışmektedir. Genel olarak yumuşak formasyonlarda kama uçlu, kalem uçlu keskiçiler kullanılır. Kompleks zeminlerde ise kesici kafa hem kama uçlu hem de disk keskiçilerden oluşur. Disk keskiçiler olası sert damarlı kayaları kesmek için kesici kafa Üzerine yerleştirilmiştir. Sert zeminlerde ise kesici kafada sadece disk keskiçiler bulunmaktadır [3].

Pasa basınçlı tam cepheli tünel açma makinaları (EPB) makineler ilk olarak Japonya’da 1960-70’li yıllarda görölmeye başlamıştır. Genellikle kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılır. Temel çalışma prensibi kesilen malzeminin kesici kafada tutulması ve tüm yüzeyin desteklenmesidir. Arazinin düşük nemli olduğu ortamlarda çalışırlar [1]. Şekil.2.3’te EPB makinasının kesit görünümü verilmiştir.

Mikro tünel açma makineleri, altyapı hizmetlerinde kullanılmak üzere boru ve kablo döşeme işlerinde sıklıkla kullanılan tam cepheli kazı makinalarıdır. Diğer tam cepheli sistemelerden en büyük farkları boyutları ve otomasyonla kullanılabilmeleridir. Mikro tünel makinalarının çapları 3.5 m’den küçüktür. Tahkimatları, borular vasıtasıyla olmaktadır. Şekil 2.4’te çamur tipi mikro tünel makinasının resmi bulunmaktadır.



Şekil 2.3 : Çamur basınçlı tünel açma makinasının kesit görünümü.



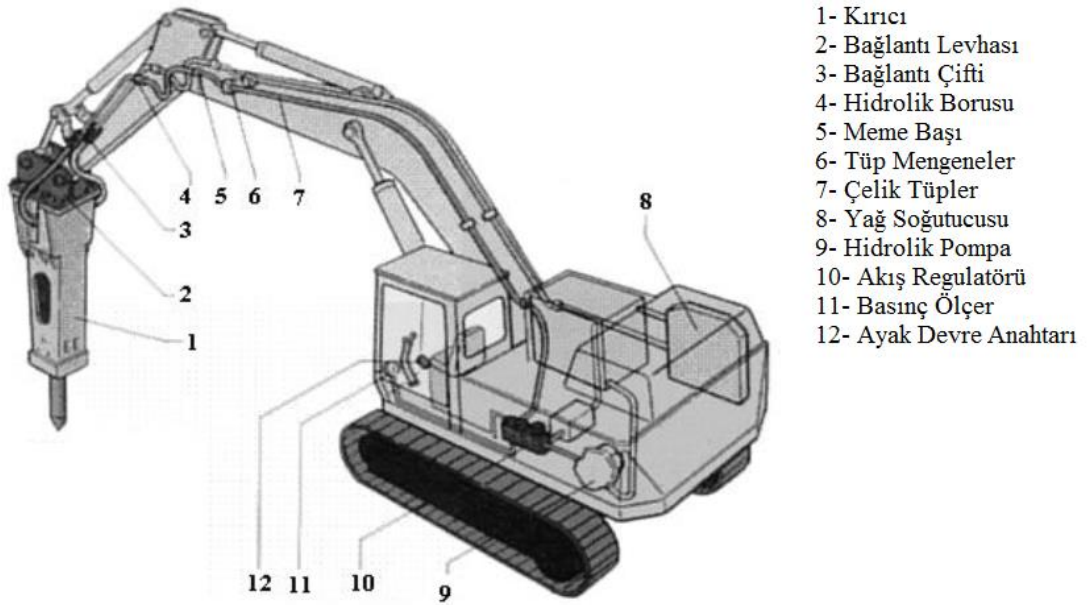
Şekil 2.4 : Çamur tipi mikrotünel makinası.

Şekil 2.5'te gösterilen sürekli yeraltı kazıcıları, özellikle kömür madenciliğinde kullanılan, toz ve gürültü problemlerini engellemek için kullanılan makinalardır. Genel çalışma prensibi bomlu kazı makinalarına benzemektedir.



Şekil 2.5 : Sürekli yeraltı kazıcıları.

Hidrolik kırıcı ekskavatörler madencilik ve inşaat sektöründe sıklıkla kullanılırlar. Tünel ve galeri işlerinde ise jeolojik süreksizliklerin fazla olduğu yerlerde verimli kullanılabilirler. Özellikle Akdeniz ve Asya ülkelerinde hidrolik kırıcı ile yapılan tünel faaliyetleri oldukça ekonomiktir. Hidrolik kırıcı ekskavatörle yapılan tünelciliğin ekonomikliğı, kaya tipi, tünel alanı, tünel uzunluğu, tünelin konumu, yedek parça temini ve operatör becerisine bağlıdır. Şekil 2.6’da gösterilen hidrolik kırıcı ekskavatörlerin diğer mekanize kazı makinalarına göre en önemli avantajı düşük yatırım maliyetidir. Dezavantajı ise kazılan pasanın nakliyatının dönüşümlü olarak yapılmasıdır.



Şekil 2.6 : Hidrolik kırıcı ekskavatör.

Diğer mekanize kazı makinelerinden olan bomlu kazı makineleri ise Bölüm 3’te detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

3. BOMLU KAZI MAKİNALARI

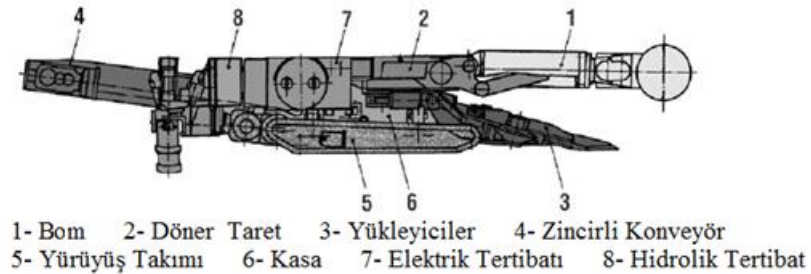
3.1 Giriş

Bomlu kazı makinaları aynı zamanda “ Bomlu Galeri Açma Makinaları (Boom Type Tunneling Machine), Galeri Açma Makinaları (Roadheader) ve Seçimli Kazı Makinaları (Selective Cutting Machine) olarak da bilinmektedir. Bu bölümde bu makinalar “Bomlu Kazı Makinaları” (BKM) olarak adlandırılacaktır. Bu makinalar ilk olarak 1950 yılında Macar kömür madenlerinde kullanılmıştır. Batı Avrupa’da ise kullanılması 1961’de olmuş ve günümüze kadar kullanım alanları hızla artmıştır [1].

3.2 Bomlu Kazı Makinalarının Temel Özellikleri ve Yapısı

Bomlu kazı makinalarının (BKM) diğer mekanize kazı makinalarına göre en önemli avantajları mobilizasyonlarının kolaylığı, saha şartlarına kolay uyum sağlaması ve selektif kazıya uygun olmasıdır [6]. Şekil 3.1.’de gösterilen BKM’larında bulunan en temel 4 özellik aşağıda belirtilmiştir;

1. Kaya kazısı (kaya kesmesi)
2. Kesilen kayaçların biraraya getirilmesi
3. Kesilen materyallerin ikincil konveyör hatlara transferi
4. Yürüyüş [3]



Şekil 3.1 : Bomlu kazı makinası.

Belirtilen özelliklerin dışında opsiyonel olarak BKM’ları eklenebilen özellikler vardır. Örnek olarak; iksa kaldırma ve/veya tavan saplama tertibatları, makina stabilitesini

arttırmak için yan mahmuzlar, kesici kafa üzerine eklenen yüksek basınçlı su jetleri verilebilir. Şekil 3.2’de gösterildiği üzere yumuşak, zayıf ve blok düşme tehlikesi bulunan sahalarda bu problemten doğan zararları en aza indirmek için kalkanlı BKM’ları da kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 : Kalkanlı bomlu kazı makinası.

BKM, genel olarak, ağırlıkları ve kesici kafa güçlerine göre tanımlanırlar. Bir makinanın ağırlığı arttıkça, makinanın çalışma gücü ve kuvveti arttığından daha sert kayalar kazabilmektedir. Kayaç kazılabilirliği, kayacın mekanik ve kütleli bir çok özelliğine bağlı olmakla birlikte, sektörde makinaların ağırlığına bağlı kesebileceği kayanın maksimum tek eksenli basınç değerleri verilmektedir. Tablo 3.1’de bu bilgilere dayalı örnek tablo verilmiştir.

Tablo 3.1 : BKM'ların ağırlıklarına göre sınıflandırılması.

BKM	Ağırlık (ton)	Güç (kW)	Standart kesme profili		Uzatılmış kesme profili	
			Maksimum profil (m ²)	Maksimum TEBD (MPa)	Maksimum profil (m ²)	Maksimum *TEBD (MPa)
Hafif	8-40	50-170	~25	60-80	~40	20-40
Orta	40-70	160-230	~30	80-100	~60	40-60
Ağır	70-100	250-300	~40	100-120	~70	50-70
Çok Ağır	>100	350-400	~45	120-140	~80	80-110

Bomlu kazı makinelerinde bulunan bom, kaya kesme işini yapan kesici kafa ve kesikleri bulundurur. BKM'larında bom ana gövde üzerindeki platforma (turret) pistonlarla bağlanarak yatay ve dikey yönde hareket etmektedir. Bu pistonların önünde kaya kesim işlemleri için gerekli olan tahriği sağlayacak elektrik ve hidrolik motorlar bulunur.

Kogelman, bomları “yumuşak kaya bomları” ve “sert kayaç bomları” olarak ikiye gruba ayırmıştır [6]. Yumuşak kayaç bomlarında bütün elemanlar birbiri ile doğrudan temas halinde olup, kazı sırasında etkiyen kuvvetlerden dolayı diğer elemanlar gibi elektrik motorları da reaksiyon kuvvetlerinin etkisi altında kalmaktadır. Ayrıca bom uzunluğu desteklenmediği için orta sertlikteki kayaçların kazısında, titreşimlerin oluştuğu ve buna bağlı olarak keski sarfiyatının ve bakım ihtiyacının arttığı gözlemlenmiştir.

Orta sert kayaçlarda kullanılam kutu biçiminde olup alt kısımları geniştir. Böylece yatay itme kuvvetleri artırılarak, elektrik motorlarının bu kuvvetlerden etkilenme riskini minimize etmiştir [7].

BKM'nda teleskopik ve mafsallı bomlar da kullanılmaktadır. BKM' nın arına doğru bastırma(sumping) kuvveti, yürüme sistemlerinin verimsizliğinden dolayı sınırlı olduğundan, teleskopik bomlar, arına girme sırasında makinanın sabit kalmasını ve özellikle eğimli ve ıslak zemin şartlarında, bütün makina ağırlıklarının kesme kuvvetleri için kullanılabilmesini sağlamaktadır. Mafsallı bomlar ise, geniş kesitli tünellerde yumuşak kayaçların kazısı için kullanılabilir. Yumuşak kayaçlarda üretimi arttırmak için Şekil 3.3'de görülen çift bomlu kazı makinaları da kullanılmaktadır.



Şekil 3.3: Çift bomlu BKM.

BKM'larında diğerkazı makinalarında olduğu gibi kesici kafa, elektrikli olarak tahrik olunurken bomun hareketi ise hidrolik olarak sağlanır. Gücün büyük kısmı kesme işlemine harcandığından kesici kafa motor gücü en büyük olacak şekilde seçilir. Yürüme ve aktarma üniteleri hidrolik ya da elektrik tahriklidirler. Hidrolik tahrik sistemi için daha önce kullanılan yüksek basınçlı pompalar terkedilirken bunların yerine düşük basınçlı (maksimum 140 bar) dişli pompalar kullanılmaktadır. Şu ana dek elde edilen pratik deneyimler düşük basınçlı dişli pompaların kir ve tortu gibi maddelere karşı daha dayanıklı olduğunu ve daha az hidrolik sıvı filtrasyonu gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bunun yanısıra bu düşük basınçlı sistemlerde yanmaya karşı dayanıklı hidrolik akışkanların kullanımına doğru bir eğilim bulunmaktadır. Düşük basınçlı sistemlerde ekipmanlar daha güvenilir olup az bakım gerektirirler ve yüksek basınçla oranla daha uzun ömürlüdürler [7].

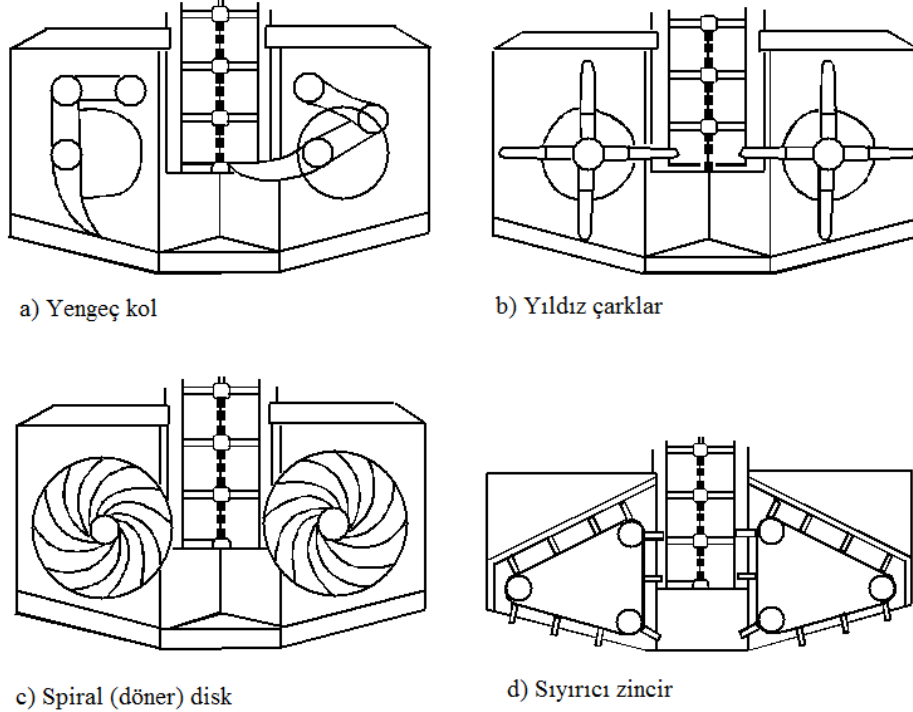
BKM'nda arından kazılan malzemenin toplanıp arından uzaklaştırması için malzeme toplama ünitesi ve malzeme aktarma ünitesi bulunmaktadır.

BKM'ında malzeme toplama ünitesi, tabla ve onun üzerinde hareketli toplayıcı bir elemandan oluşmaktadır. Besleyici tabla tek parça olabileceği gibi parça eklenerek genişletilip malzeme yükleme kapasitesi geliştirilebilir. Bazıları ise yan taraflara doğru hareket edebilen biçimde olup kenarlara akan malzemenin de toplanmasına yardım eder. Şekil 3.4 'de gösterilen hareketli toplayıcı elemanlar ise, yıldız çarklar, spiral diskler, yengeç kollar, tek veya çift sıyırıcı zincirler şeklinde tipleri vardır. Yıldız çarklar ve spiral diskler daha çok ince taneli, kuru ve yapışkan olmayan malzemelerin yüklenmesinde verimli olurken, yengeç kollar iri bloklu, ıslak ve yapışkan malzemelerde kullanılmaktadır. Sıyırıcı zincirler ise her iki tür tür malzemede de kullanılabilmektedir [8].

Bazı makinalarda besleyici tablo olmayıp, yükleme bom üzerinde bulunan bir zincir konveyörle kesici kafa tarafından direk olarak yapılmaktadır. Bu şekilde makinanın hareket kabiliyeti artmaktadır.

Malzeme yükleme ünitesinden toparlanan malzeme, makinanın altında bulunan zincirli konveyör yardımıyla makine aktarma ünitesine transfer edilerek bant yardımıyla kazı arından uzaklaştırılır. Bu kullanılan banta köprü bantı adı verilir. Bantın konumu ve mevcudiyeti kazıda kullanılan ana nakliyata göre değişir. Ana nakliyat sistemi bantlı nakliyat olan kazı alanlarında köprü konveyör ana nakliyat

kullanılan bantın üzerinde olacak şekilde konumlandırılır. LHD veya kamyon kullanılan nakliyat sistemlerinde ise köprü bantlar kullanılmaz.



Şekil 3.4 : Malzeme toplama üniteleri.

Bazı makinalarda besleyici tabla olmayıp, yükleme bom üzerinde bulunan bir zincir konveyörle kesici kafa tarafından direk olarak yapılmaktadır. Bu şekilde makinanın hareket kabiliyeti artmaktadır.

Malzeme yükleme ünitesinden toparlanan malzeme, makinanın altında bulunan zincirli konveyör yardımıyla makine aktarma ünitesine transfer edilerek bant yardımıyla kazı alanından uzaklaştırılır. Bu kullanılan banta köprü bantı adı verilir. Bantın konumu ve mevcudiyeti kazıda kullanılan ana nakliyata göre değişir. Ana nakliyat sistemi bantlı nakliyat olan kazı alanlarında köprü konveyör ana nakliyatta kullanılan bantın üzerinde olacak şekilde konumlandırılır. LHD veya kamyon kullanılan nakliyat sistemlerinde ise köprü bantlar kullanılmaz.

Malzeme yükleme ve aktarma sisteminin kapasitesi ve verimliliği çok önemlidir. Eğer kapasite ve verim düşük olursa arında malzeme birikir ve sürekli kazı sisteminde aksama meydana gelir. Bunu engellemek için aktarma hattında tıkanma olmaması

açısından kesilen malzeme parça boyutu iyi irdelenmelidir. Ayrıca zayıf formasyonlarda kesme hızının yükseleceğine de dikkat edilmelidir.

BKM’lerde yürüyüş sistemleri ya lastik tekerlekli veya paletli olabilir. Ancak pratikte eğime karşı daha az hassas olan paletli sistem kullanılmaktadır. Paletler makinanın stabilitesi ve ilerleme hızı için önemlidir. Yürüyüş üniteleri ilerlemenin dışında kesme sırasında oluşan reaksiyon kuvvetleri karşılamada, zeminle yaptığı sürtünme kuvveti sayesinde etkin bir rol oynar. Bu rol yüzünden bakım periyodları çok sık olmaktadır.

Yürüyüş ünitelerinde aranan en önemli iki özellik makinanın zemine uyguladığı basıncın düşük olması ve yürüme hızlarının yüksek olmasıdır.

Kazı yapılan zeminlerin sulu ve yumuşak olması durumunda makina zemine batma tehlikesi ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu durumun engellenmesi açısından makinanın palet boyutu geniş tutulmalıdır.

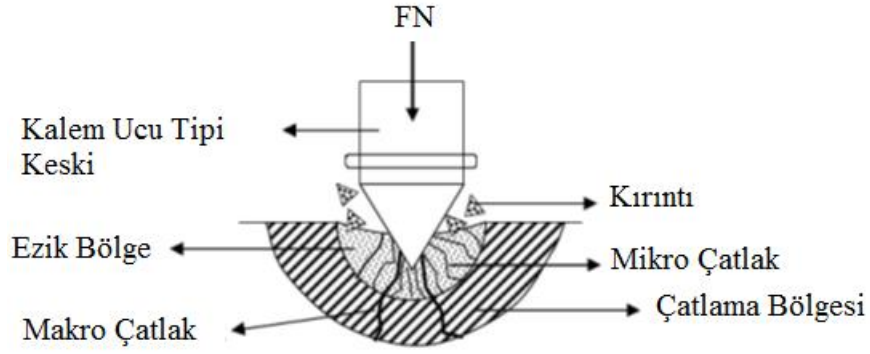
Yürüyüşün hızlı olması ise makinanın kazı sahasındaki nakliyesini hızlandıracak için kesme olmaksızın geçen süreyi arttırarak makina kapasitesini arttırır. Pratikte BKM’lerinin yürüyüş hızları 10m/dak civarındadır.

3.3 Bomlu Kazı Makinalarında Kullanılan Keskiler

Bir bomlu kazı makinasının kesici kafası ile kesme işlemi, kafaya diziler oluşturacak şekilde dizilmiş keskinlerin ortak kesme hareketleri ile gerçekleştirilir. Keskinler bir grup keskiye ani yük gelmesini engellemek amacıyla helisel diziler şeklinde yerleştirilir. Pratikte bomlu kazı makinelerinde kalem uçlu veya kama uçlu keskinler kullanılmaktadır. Disk keskinli bomlu kazı makineleri ise test aşamasındadır. Bu bölümde BKM’lerinde kullanılan keski türleri ve bu keski türlerinin kazı mekaniğine göre irdelenmesi açıklanacaktır.

3.3.1 Kalem ve Kama Uçlu Keskiler

Bir keskinin kayaca battığı noktada, keski etrafında meydana gelen yüksek gerilmelerden dolayı ezik bir bölge oluşur. Şekil 3.5’de gösterilen keskinin hareketi ile birlikte keski etrafında mikro çatlaklar ilerlemeye baslar. Bu çatlaklar birleserek makro çatlakları oluşturur ve keski etrafında bir rahatlama (çatlama) bölgesi meydana gelir. Bu rahatlama ile birlikte ana kayadan kırıntılar kopar [9].



Şekil 3.5 : Kalem uçlu keskinin çatlatma mekaniği.

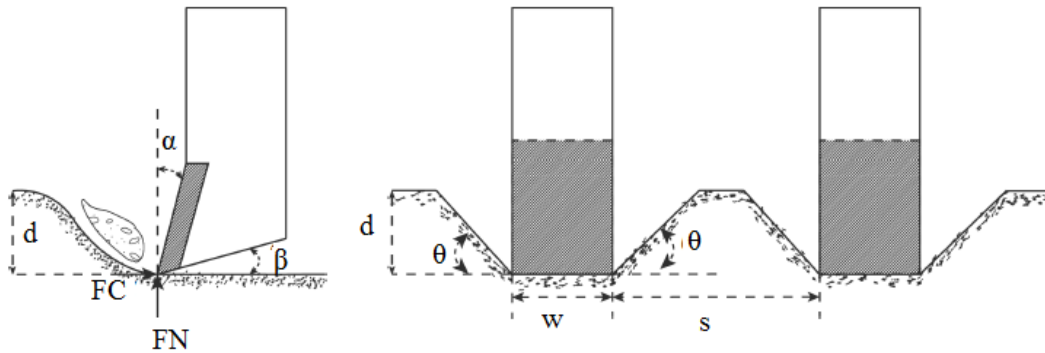
Burada kayaç kesme teorilerini de anlamak gerekmektedir. Teknolojik açıdan kayaç kesme teorileri; kayaç özellikleri, keski geometrisi ve çeşitli parametrelerin gözönüne alınarak analitik olarak keski kuvvetlerinin kestirimi için kullanılır. Bu sonucu elde etmek üzere her kuram kayacın yenilme ölçütü hakkında uygun varsayımlar ve bilgi birikimi gerektirir [10].

Kama uçlu keskinler genel olarak yumuşak kayaçlarda kullanılmaktadır. Kama tipi bir keskinin genel görünümü Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Bu tür keskinlerin temel tasarım değişkenleri ise kesme açısı (α), temizleme açısı (β), keski genişliği (w), kesme derinliği (d), uç açısı (ϕ), keskinler arası mesafe (S), kesme hızı (V)’dır.

Bu tasarım değişkenlerinin kesme mekaniğinde etkilediği değişkenler ise şunlardır;

1. Ortalama pik kesme kuvveti ($F'C$) – Kesme doğrultusunda keskiye gelen en büyük kuvvetlerin ortalamasıdır. Birimi kN’dur.
2. Ortalama kesme kuvveti (FC) – Kesme doğrultusunda keskiye gelen tüm kuvvetlerin ortalamasıdır. Birimi kN’dur.
3. Ortalama pik normal kuvveti ($F'N$) – Kesme doğrultusuna dikey gelen maksimum kuvvetlerin maksimum ortalamasıdır. Birimi kN’dur.
4. Ortalama normal kuvveti (FN) – Kesme doğrultusuna dikey gelen maksimum kuvvetlerin ortalamasıdır. Birimi kN’dur.
5. Kayaç sökölme açısı (θ) – Şekil 3.6’da gösterilmiştir.
6. Spesifik Enerji (S.E.) – Birim hacimdeki kayacı kesmek için gerekli enerjidir. Birimi MJ/m^3 ’tür. Ortalama kesme kuvvetinin (FC) birim kesme mesafesinde ortaya çıkan pasa miktarına (Q) oranından hesaplanır.

7. Pasa irilik katsayısı (P.I.K.) – Kazının verimliliğini belirten boyutsuz bir veridir. Elenen pasanın kümülatif ağırlıklarının toplamıdır [11].



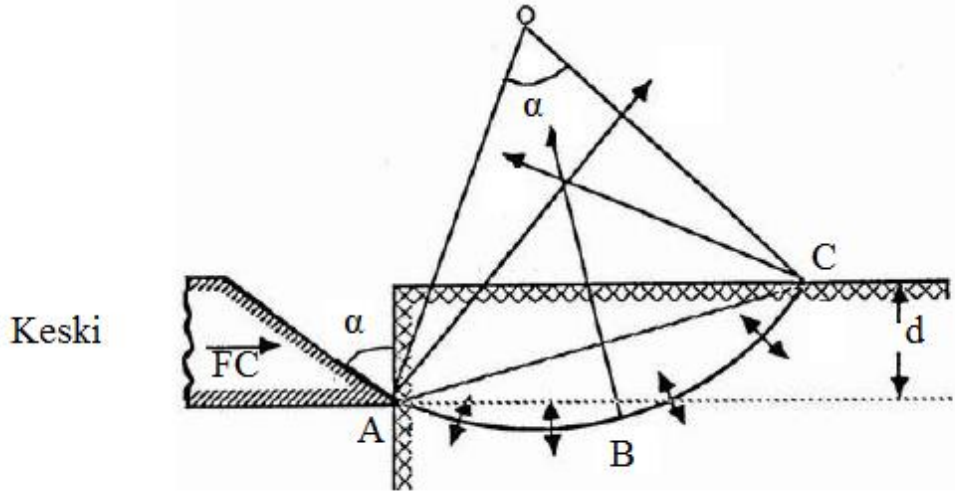
Şekil 3.6 : Kama uçlu keskinin kesme değişkenleri.

Keskileri açıklarken görüldüğü üzere keskinlerin tasarım parametreleri ile birlikte oluşturduğu kuvvetleri de açıklamak gerekir. Bunun içinde bir takım kesme teorileri gerçekleştirilmiştir. Kesme teorileri kama ve kalem uçlu keskinler için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Kama tipi kesimler için yapılan ilk araştırma Merchant tarafından negatif ve pozitif kesme açısına sahip tungsten karbit uçlarla metal kesme sırasında oluşan kırıntının geometri ve kuvvet sistemlerinin analizi için yapılmıştır. Kesme düzlemi (çatlaklar), keski ucundan başlayarak yüzeye doğru gelişir ve düzlem kesme yönü ile bir θ açısı yapar. Merchant teorisimi, malzemenin kesme dayanımına ve malzeme ile keski arasındaki sürtünme katsayısına dayanarak kurmuştur. Kesme dayanımı tek değer olarak kabul edilmiştir. Normal gerilme göz önüne alınmamıştır. Bu durum kayaçlarda geçerli değildir [12].

İlk kaya kesme teorileri, İngiliz Kömür İdareleri (NCB) merkezinde Evans tarafından ortaya atılmıştır. Evans keski tarafından harcanan kesme kuvvetlerini; kesme karakteristikleri açısından (kesme açısı, keski genişliği, kesme derinliği) ve kömürün dayanım karakteristiğinden hesaplar. Kayacın çekme dayanımı ile yenilmesine dayanan kesme teorisine göre kayaç ile keski arasındaki sürtünme katsayısı göz önüne alındığında kömür ve orta sert kayaçlarda gerçeğe yakın değerler verdiği ortaya konulmuştur[11]. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi belirli kesme derinliği (d) ve kesme açısı (α) ile kayaca batırılan keski, ABC yayı boyunca kayaçta bir çekme çatlağı

oluşturmaktadır. Daha sonra, keski üzerinde oluşan maksimum kesme kuvveti ($F'C$) hesaplanmaktadır (3.1) [13].



Şekil 3.7 : Evans çekme çatlağı modeli.

$$F'C = \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot d \cdot w \cdot \sin \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha)}{1 - \sin \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \alpha)} \quad (3.1)$$

$F'C$: maksimum kesme kuvveti, kg

d : kesme derinliği, cm

α : kesme açısı

σ_t : kayacın çekme dayanımı, kg/cm^2

w : keski genişliği

Nishimatsu, Merchant metal kesme teorisini baz alarak keskinin hareketini kayaçta tanımlayan bir teori ileri sürmüştür. Merchant sadece kesme dayanımını kullanırken Nishimatsu kayaçtaki gerilmeleri tarif etmek amacıyla Mohr zarfını kullanmıştır. Bu teori çatlak oluşumu sırasında birincil ve ikincil kırılma bölgeleri tanımlar ve kesme gerilmelerinin keski ucuyla kayaç yüzeyi arasındaki bir doğru boyunca oluştuğunu kabul eder. Bu doğru boyunca herhangi bir noktada gerilme, bir n kuvvetiyle o noktanın yüzeye olan uzaklığıyla doğru orantılıdır (3.2) [10].

$$F'C = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot d \cdot w \cdot \cos(\gamma - \alpha) \cdot \cos \emptyset}{(n+1) \cdot (1 - \sin(\gamma + \emptyset - \alpha))} \quad (3.2)$$

F'C: maksimum kesme kuvveti, kg

d: kesme derinliği, cm

α : kesme açısı

σ_s : kayacın kesme dayanımı, kg/cm²

w: keski genişliği, cm

γ : kayaç ile keski arasındaki sürtünme açısı

$\emptyset$: kayacın iç sürtünme açısı

n: gerilme dağılım çarpanı

Roxborough, Evans'ın kayaç kesme teorisi üzerinde çalışmış ve birtakım uyarlamalar yapmıştır. Kömürden farklı kayaçlar üzerinde daha geniş bir alanda aynı sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca bir keski kayacı keserken keskinin her iki yanında belirli miktarda parça koptuğunu ortaya koymuştur. Keskinin daha derinlere girdikçe, keski etrafındaki parça miktarları da artmaktadır. Kopan parçaların boyutları her ne kadar düzensiz şekillerde olsa da hacminde yola çıkarak ortalama bir sökölme açısını hesaplamak mümkün olmuştur. Roxborough, tüm kesme derinliklerinde sökölme açısının sabit kaldığı göz önüne alarak, spesifik enerjinin kazı verimi üzerindeki etkisini de araştırarak bununla ilgili denklem geliştirmiştir [14] (3.3).

$$SE = \frac{F'C}{w \cdot d + d^2 \cdot \tan \theta} \quad (3.3)$$

SE: spesifik enerji, Mj/m³

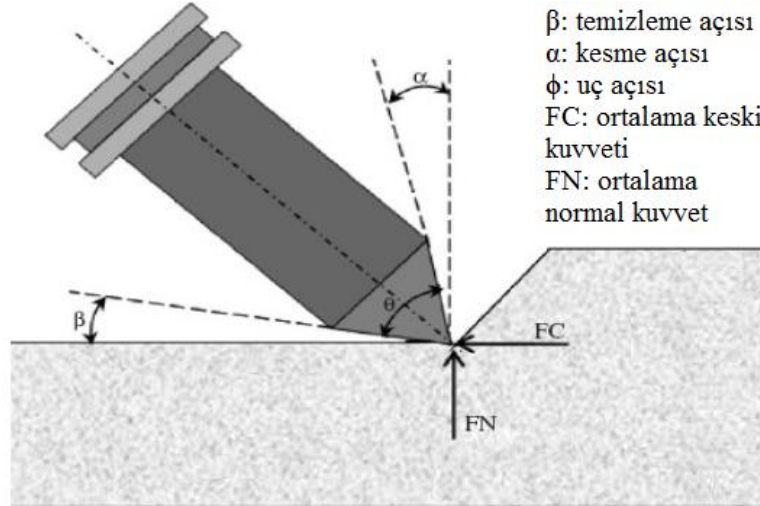
θ : sökölme açısı

w: keski genişliği

d: kesme derinliği

BKM'lerde sıklıkla kullanılan Şekil 3.8'de kesme geometrisi gösterilen tungusten karbit ve sertleştirilmiş çelikten yapılan kalem uçlu keskiler, kama uçlu keskilere

nispeten daha sert kayalarda kullanılırlar. Keski sapının silindirik olması nedeniyle keski yuvası içinde rahatça dönebilmekte, böylece keski aşınması (körlenme) simetrik olmakta yani bileme meydana gelmekte, körlenme arttıkça keski kuvvetleri fazla artmamakta ve kama tipi kesikleri göre uzun vade kullanımları bu kesikleri avantajlı kılmaktadır.



Şekil 3.8: Kalem uçlu kesme geometrisi.

Kalem uçlu keski için de birtakım kesme teorileri ortaya atılmıştır. Evans'ın kesme teorisine göre kalem uçlu keski, kayacın tek eksenli basınç dayanımının yenilmesiyle kayaca batırılmaktadır. Şekil 3.9'da gösterildiği üzere keski kayaca battıktan sonra kayacın radial doğrultuda basınç gerilmesi ve teğetsel doğrultuda çekme gerilmeleri oluşur. Bunun sonucunda kayacın çekme dayanımının yenilmesiyle keski merkezinden itibaren çekme çatlakları oluşur ve bunların gelişmesiyle parça ana malzemeden ayrılır. Ayrılan paça V şeklindedir ve keski eksenine göre simetrik [15]. Kayacı koparmak için gerekli keski kuvveti ise Eşitlik 3.4'ten hesaplanmaktadır.

$$F'C = \frac{16\pi}{\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \cdot \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \cdot \sigma_t \cdot d^2 \quad (3.4)$$

F'C: maksimum kesme kuvveti, kg

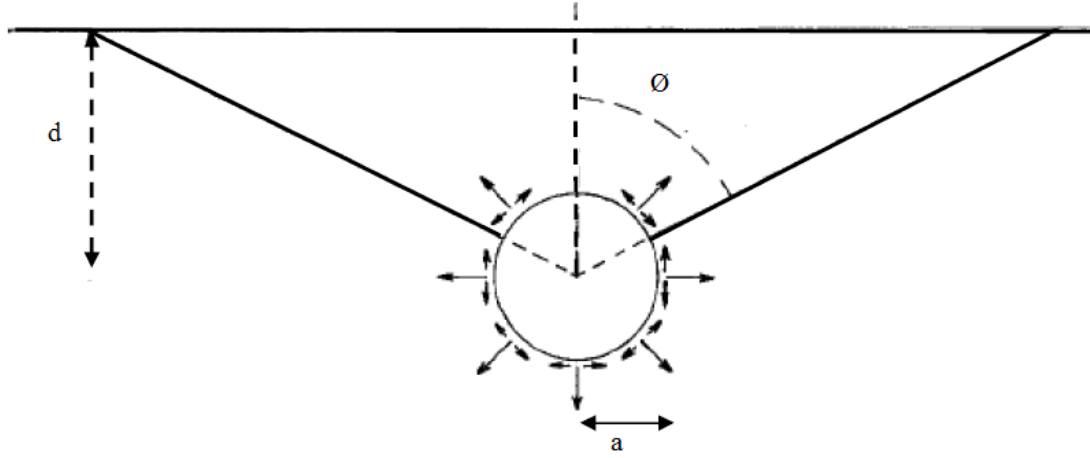
d: kesme derinliği, cm

φ: keski açısı

σ_t: tek eksenli çekme dayanımı, kg/cm²

σ_c: tek eksenli kesme dayanımı, kg/cm²

Evans, teoride elde ettiği bu eşitliği Hurt ve Evans'ın Grindlefor kumtaşları için verdiği sayısal değerlerle kıyaslamıştır[15]. Sonuç olarak, hesaplanan ve ölçülen kuvvet değerlerinin hemen hemen birbirine yakın olduğu görülmüştür.



şekil 3.9 : İçsel basınçlar altındaki boşluk [15].

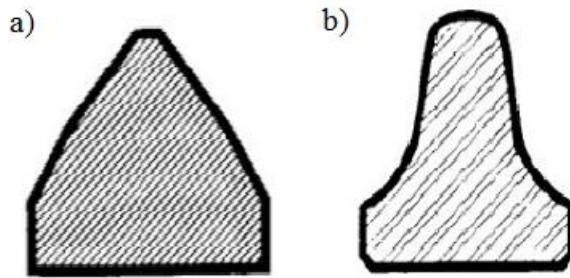
3.3.2 Disk keskiler

Disk keskiler diğer döner keskilere oranla birbirini sıralı takip eden kazı sistemleriyle yüksek kazı verimi sağlar. Tek noktadan yükü aldıkları için yüksek yatak kapasiteleri sayesinde daha derin kesme derinliklerine ulaşırlar ve bu keskiler tam cepheli kazı makinelerinin kafasının istenilen bölgesine yerleştirilebilirler. Pahalı olmalarına karşın en önemli avantajlarından birisi ise keskinin üzerinde kesmeyi gerçekleştiren halkaların aşındıktan sonra yenilenebilmesidir [16]. Günümüzde BKM'lerde kullanabilmek amacıyla da disk keskilerle ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bununla ilgili detaylı bilgiler ilerliyen bölümlerde verilecektir.

şekil 3.10'da profili görüldüğü üzere V-tip ve CCS tip olmak üzere iki tip disk keski bulunmaktadır. nceki yıllarda disk keskilerin açıları 60⁰'den 120⁰'ye kadar değişmekteydi ve bunlar V-tip keski olarak adlandırılmaktaydı ancak keskin uç açıları nedeniyle uçların çabuk aşındığı anlaşılarak yüksek kesme performanslarına ulaşabilmek ve aşınmayı azaltmak için ucu kt olan sabit keskili (CCS) tipi keskiler geliştirilmiş ve bu keskiler tam cepheli kazı makinalarında standart keski haline getirilmiştir.

Pratikte kullanıldıkları ilk andan itibaren bu yana, disk keskilerin çapları 12 in'ten 19 in'e kadar yükselmiştir. Büyük boyuttaki keskilere yüksek itme kuvvetleri

uygulandığında daha fazla ilerleme beklenmemelidir, bunun nedeni ise kaya ile temas ettikleri yüzeyin genişliğidir. Fakat bunun yanında daha yüksek yatak kapasiteleri ile daha fazla yük alabilirler, böylelikle de daha az arıza ve daha iyi performans verileri elde edilebilirler. Bunlara ilaveten büyük kesimler kesici kafanın bir dakikalık dönüşünde daha yavaş dönerler ve daha az ısı yayılımı olur. Büyük kesimlerin yüzey alanları küçük kesimlere oranla daha büyük olduğundan kesici kafanın bir turluk dönüşünde daha az aşınmaya maruz kalmaktadırlar[16]. BKM'ler için ise 125 mm'lik (5 inç) disk kesimlerin denemeleri yapılmıştır.

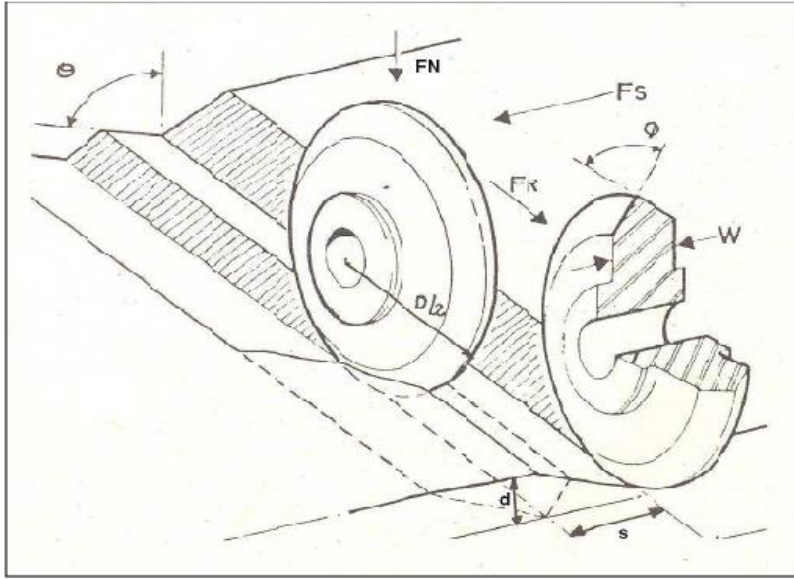


Şekil 3.10 : Disk kesimlerde ring profili a) V-tip b) CCS tip [1].

Şekil 3.11'de gösterilen disk kesimlerin temel tasarım parametreleri ise, disk çapı (D), disk açısı (θ), kesme derinliği (P), kesimler arası mesafe (S), disk kalınlığı (W)'dır. Bu tasarım parametrelerinin etkilediği değişkenler ise şunlardır;

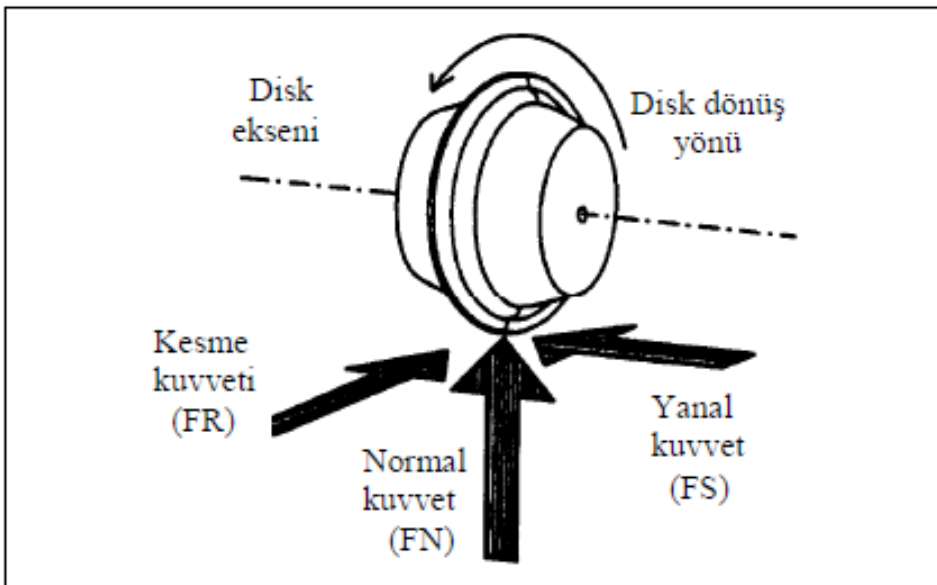
1. Ortalama pik yuvarlanma kuvveti ($F'R$) – Kesme yönünde diskin yuvarlanmasını sağlayan maksimum kuvvetlerin ortalaması, kN
2. Ortalama yuvarlanma kuvveti (FR) – Kesme yönünde diskin yuvarlanmasını sağlayan kuvvetlerin ortalaması, kN
3. Ortalama pik dikey normal kuvvet ($F'N$) – Yuvarlanma istikametinde disk keskiye dikey etkiyen maksimum kuvvetlerin ortalamasıdır, kN, makinenin belirli kesme derinliğini sağlaması için gerekli arına bastırma kuvvetidir.
4. Ortalama dikey kuvvet (FN) – Yuvarlanma istikametinde diske dikey etkiyen kuvvetlerin ortalamasıdır, kN
5. Spesifik enerji (SE) – Birim hacimdeki, kayacı kesmek için gerekli enerjidir. Dikey kuvvetin yapacağı iş ihmal edilebilir bir büyüklükte olduğu için spesifik

enerji ortalama yuvarlanma kuvvetinin, birim kesme mesafesinde açığa çıkan pasa hacmine (Q) bölünmesi ile bulunur [11].



Şekil 3.11 : Disk keskilere etkiyen tasarım parametreleri [11].

Diskli kesimler üzerinde gelen kuvvetler çeşitli araştırmacılar tarafından irdelenmiştir. Disk keskiye gelen kuvvetler şematik olarak Şekil 3.12’de gösterilmiştir. V tip disk kesimler için en çok kullanılan kesme teorisi, Roxborough ve Phillips tarafından geliştirilen normal kuvvetleri (FN) ve yuvarlanma kuvvetlerinin (FR) hesaplanmasında kullanılan teoridir[17].(3.5-3.9)



Şekil 3.12 : Disk keskilere etkiyen kuvvetlerin gösterimi [16].

$$l=2\sqrt{D.d-d^2} \quad (3.5)$$

$$A=2.d.l.\tan\frac{\phi}{2} \quad (3.6)$$

$$FN=4.\sigma_C.\tan\frac{\phi}{2}\sqrt{D.d-d^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{FN}{FR}=\sqrt{\frac{D-d}{d}} \quad (3.8)$$

$$FR=4.d^2\sigma_C.\tan\frac{\phi}{2} \quad (3.9)$$

l: kesme uzunluğu, mm

D: keski çapı, mm

d: kesme derinliği, mm

A: disk keskinin kaya temas alanı, mm

σ_C : kayanın basınç dayanımı, MPa

Roxborough ve Phillips keskiler arasındaki mesafeler (S) üzerine de çalışmalar yapmışlar ve keskiler arasında bir optimum mesafe olması gerektiğini belirlemişlerdir. Kayacın mekaniksel özelliklerine göre bir eşitlik öngörmüşlerdir [18].

$$\frac{s}{d}=\frac{\sigma_c}{\tau} \quad (3.10)$$

σ_C : kayanın basınç dayanımı, MPa

τ : kayanın kesme dayanımı, MPa

Ss: keskiler arası mesafe, mm

d: kesme derinliği, mm

Phillips, Bilgin ve Price; Roxborough ve Phillips'in modelini geliştirerek, bu kuvvetlere keski açısının etkisini irdelemişlerdir. Bununla ortalama normal kuvvetleri ve ortalama kesme kuvvetlerini düzeltmişlerdir [19] (3.11).

$$FN_C = FN_{TS} \cdot e^{Ar} \quad (3.11)$$

$$FR_C = FR_{TS} \cdot e^{Br} \quad (3.12)$$

$$A = 0.0354 + \frac{0.6554}{d} \quad (3.13)$$

$$B = 0.06 + \frac{0.383}{d} \quad (3.14)$$

FN_{ts} : teorik normal kuvveti, kN

FR_{ts} : teorik yuvarlanma kuvveti, kN

FN_c : düzenlenmiş normal kuvvet, kN

FR_c : düzenlenmiş yuvarlanma kuvveti, kN

r: keski uç yarıçapı, mm

d: kesme derinliği, mm

A,B: her bir ilerleme seviyesi için sabitler

CCS tip disk keskinler için ise farklı teoriler kullanılmıştır. Bunlardan ilki Wijk tarafından ortaya atılmıştır. Wijk bu yaklaşımında, CCS tipi disk keskinlerin yuvarlanma ve normal kuvvetlerini, keski uç kalınlığı, kayacın basma dayanımı, disk çapı ve kesme derinliğine bağlı olarak formüle etmiştir [20]. (3.16-3.17)

$$FN = 3 \cdot w \cdot \sigma_c \cdot \sqrt{Dd} \quad (3.16)$$

$$FR = 3 \cdot w \cdot \sigma_c \cdot d \quad (3.17)$$

σ_c : kayacın basınç dayanımı, MPa

w: disk uc kalınlığı, m

D: disk çapı, m

d: kesme derinliği, m

Rostami ve Özdemir ise CCS tip disk keskinlerin en uç bölgesinin kayaca temas ettiği bölgede yarattığı basınç dağılımını inceleyerek buna bağlı olarak bir model ortaya çıkartmışlardır. Bu modelde, yuvarlanma kuvveti ile normal kuvvet, disk keskinin kayaç ile temas ettiği bölgede yaptığı açıl, disk keskinin çapı, disk keskinin uç kalınlığı

, disk keskilerin arasındaki hat uzunluğu, kayacın tek eksenli basınç dayanımı, kayacın dolaylı çekme dayanımı ve kesici kafanın bir dönüşte elde ettiği kesme derinliğine bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır [21]. (3.18-3.22)

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{R-p}{R} \right) \quad (3.18)$$

$$P_O = C \cdot \sqrt[3]{\frac{s}{\varphi \cdot \sqrt{R \cdot T}} \cdot \sigma_C^2 \cdot \sigma_t} \quad (3.19)$$

$$F_T = \left(\frac{P_O \cdot \varphi \cdot R \cdot T}{1 + \varnothing} \right) \quad (3.20)$$

$$FN = F_t \cdot \cos \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.21)$$

$$FN = F_t \cdot \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.22)$$

F_t : toplam kuvvet, kgf

R : keskinin yarıçapı, cm

T : keski uç kalınlığı , cm

φ : basınç dağılım sabiti (3.19 ve 3.20’de radyan, 3.21 ve 3.22’de derece olarak alınır.)

$\varnothing$: keskinin kayaç ile yaptığı açı

p : bir devirde elde edilen kesme miktarı, cm

P_O : kesme geometrisi ve kayanın dayanımından elde edilen parçalanmış bölgenin basınç dayanımı, kg/cm²

σ_C : kayanın basınç dayanımı, kg/cm²

σ_t : kayanın dolaylı çekme dayanımı, kg/cm²

C : Sabit, 2.12

s : keskiler arası mesafe, cm

3.4 Bomlu Kazı Makinelerinin Kesici Kafaları ve Sınıflandırılması

3.4.1 Giriş

BKM'ları kesici kafalarının boma yerleştiriliş biçimine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar tek kafaya sahip olup dönme eksenini bom eksenine paralel (BEP) tipi olanlar (axial, in-line, longitudinal, milling type) ve iki kesici kafalı olup, dönme eksenini bom eksenine dik (BED) olanlardır. BEP ile BED tipi BKM'nın birbirlerine göre üstünlükleri vardır, bu üstünlükler kesici kafaların kesme şekillerindeki farklılıklardan oluşan dinamik ve kinematik farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu sebeple bu kazı makinalarının tiplerini incelenirken kesici kafalarının kesme şekillerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Bir bomlu kazı makinasının kesici kafası ile kesme işlemi, kafaya diziler oluşturacak şekilde yerleştirilmiş olan kesicilerin ortak kesme hareketi ile gerçekleştirilir. Kesiciler bir grup keskiye ani yük gelmesini engellemek amacıyla genellikle helisel diziler şeklinde yerleştirilir. Dizi sayısı genellikle 2 olup, çok büyük kafalarda 6'ya kadar çıkmaktadır. Şekil 3.13'de örnek kesici BEP tipi ve BED tipi kesici kafaların şekli verilmiştir.



a) BED tipi kesici kafa



b) BEP tipi kesici kafa

Şekil 3.13 : BEP ve BED tipi kesici kafalar [2].

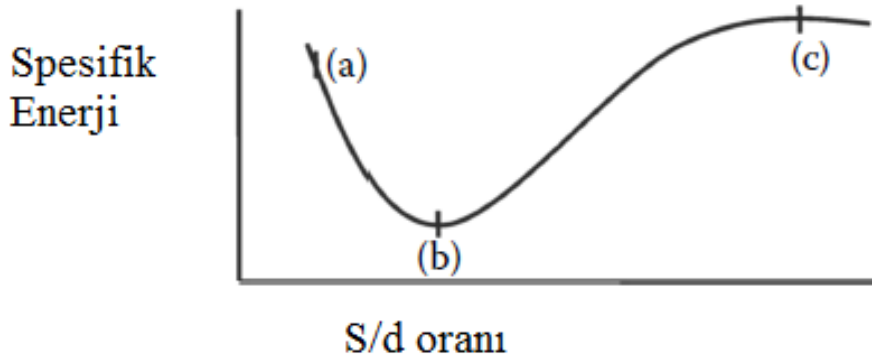
3.4.2 Kesici kafalar

3.4.2.1 Kesici kafaların tasarım parametreleri

Kesici kafaların kesme şeklini, dinamiğini ve verimliliğini, kesici kafanın geometrisi, kesimler ve bu kesimlerin yerleştiriliş sistemi etkiler.

BKM'larında kullanılan kesimler bir önceki bölümde detaylı olarak irdelenmiş olup bu bölümde bu kesimlerin kesici kafa üzerinde konumlandırılma şekilleri ile bu konumlandırma şekillerinin kesme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

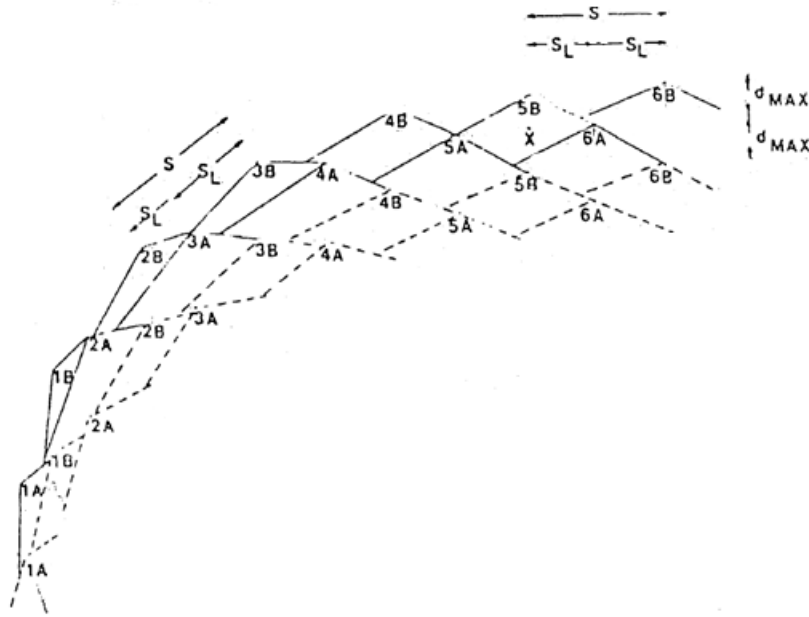
Bir keski için iki adet yanal uzaklık değişkeni bulunmaktadır. Bunlardan ilki ardarda gelen iki keskinin birbirlerinin merkezlerinden olan uzaklıktır. Bu uzaklık “S” diye tabir edilir. Spesifik enerji ve kesme kuvveti, bu S uzaklığının bir fonksiyonudur. S mesafesi arttıkça keski sayısı da azaldığı için kesme derinliğine (d) bağlı kesme kuvveti de artacak böylelikle spesifik enerjiye etkisi önce hızlı bir azalma ardından artma şeklinde olmaktadır. Şekil 3.14’de S/d oranının spesifik enerjiye olan etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : S/d oranının spesifik enerjiye etkisi.

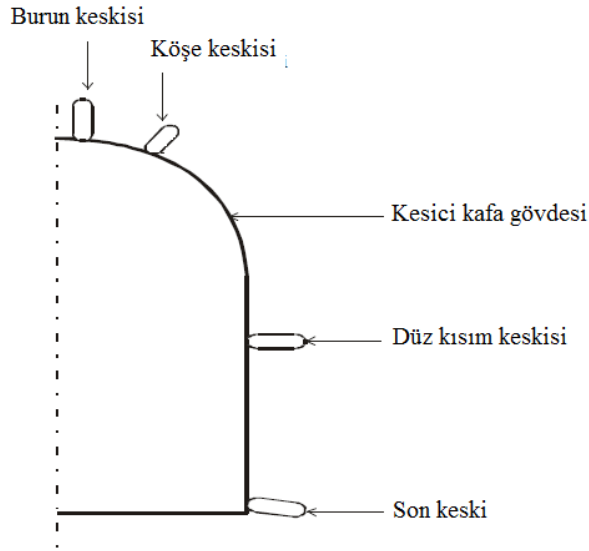
İkinci kesimler arası uzaklık kavramı ise kesici kafanın tümünün göz önüne alındığında ortaya çıkan iki komşu keski arasındaki mesafe kavramıdır. S_L şeklinde belirtilmektedir. S_L , S mesafesinden daha küçük olmalıdır. Bunun sebebi, “oluk derinleştirilmesi” denilen kavramdır. Bu kavram, bir keski dizisinin arkasından gelen keski dizisinin aynı kesim hattını takip etmesi diye tanımlanabilir. Bu durum kazı mekaniğinde istenilen bir kavram değildir. Bu Hurt ile Andrews tarafından S_L ve S kavramını birbiri ile boyutları ve geometrisi aynı olan 28 kesici ve 2 sıradan oluşan iki kesici kafanın karşılaştırması ile yapmıştır. $S_L=S$ (birinci kesici kafa) ve $2S_L=S$

(ikinci kesici kafa) olan bu iki kafadan elde edilen verilere göre 2. kesici kafanın birim ilerlemesi için gereken kuvvet birinci kafanın birim ilerlemesi için gereken kuvvetten daha düşük olarak bulunmuştur [22]. Şekil 3.15’de aynı zamanda d_{max} kavramı da gözlenmektedir. Burada d_{max} birim devir başına ilerleme miktarıdır. Bir keskinin alacağı derinlik miktarının bu d_{max} değerinin dizi sayısına bölümünden bulunmaktadır. Şekilde 6’şar keskiye sahip A ve B olmak adlandırılan iki dizili bir kafa gösterilmiştir. Burada $2S_L=S$ ’dir ve kesme sırasında hat başına bir adet keski düşmekte olup, yardımcı bir kesme söz konusudur.



Şekil 3.15 : Kesici kafa kesme patterni [22].

Kafa üzerinde herbir keskiye eşit yük dağılması kazı titreşimi ve makina verimliliği açısından önemlidir. Bu nedenle S değeri bütün kafa boyunca sabit tutulmalıdır. Ancak Şekil 3.16’da keski sınıflandırılması şeklinde gösterilen burun kısmında bulunan keskiler için bu S değeri daha küçük olacağı için bu keskiler daha fazla kuvvet etkisinde olacaktır.



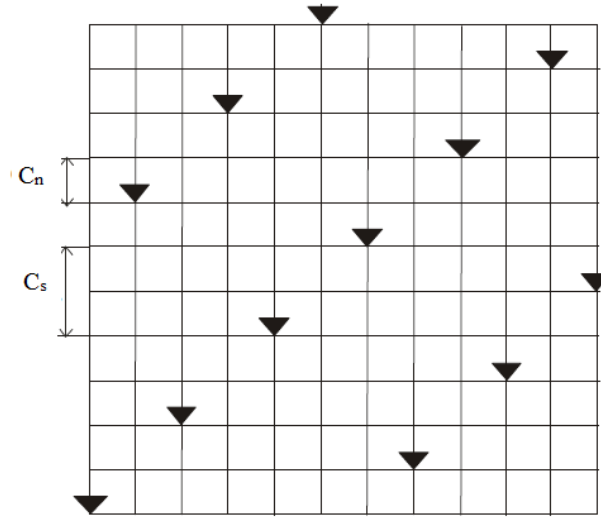
Şekil 3.16 : BEP tipi kesici kafalardaki keski sınıflandırması [23].

Bunun yanı sıra kesici uçların, kesici kafanın üzerindeki konumunu belirleyen bir diğer faktör de keski arası çevresel uzaklıktır. Bu çevresel uzaklık keski, kesme sırasında kesici uçların “zincirleme” şekilde kesime devam etmesini denetler. Hurt, Hekimoğlu ve Fowell, bu çevresel uzaklığın, her bir kesme sektöründe eşit sayıda aktif keski bulunmasının, titreşimi azaltmasından dolayı eşit olması gerektiğini belirtmişlerdir [24]. İki tip çevresel uzaklık vardır. Şekil 3.17’de gösterildiği üzere bunlar C_s ve C_n ’dir. C_s , aynı dizi içinde iki keskinin çevresel uzaklığı iken, C_n ise bütün kesici kafa göz önüne alındığında komşu iki keski arasındaki mesafedir.

Keskiler arası çevresel uzaklık ayrıca kesici kafanın sarılım açısını da etkiler. Keskiler arası çevresel uzaklık arttıkça, kesici kafanın sarılım açısı da artmaktadır. Keski sarılım açısı kafa tasarımında önemli bir parametredir, bu parametre kesme sıralarını ve kesme sektöründeki toplam keski sayısını etkilemektedir.

Kafa üzerindeki keskinin sarılım açıları 120° , 180° , 240° , 360° ve 360° daha büyük açılarda olabilmektedir. Keski sarılım açıları üzerine yapılan araştırmalarda, 360° ve 776° sarılım açılarının en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir [25].

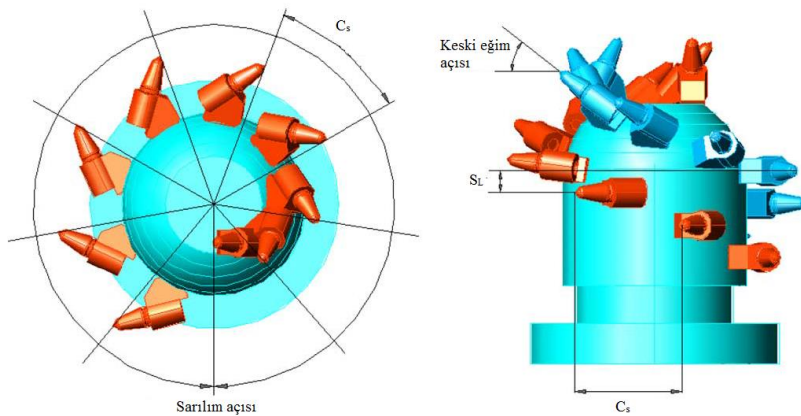
Bir diğer kesici kafadaki önemli parametre ise Şekil 3.18’de gösterilen keski eğim açısıdır. Keski eğim açısı, kafa üzerindeki keskinin ekseni ile dönme eksenine dik yaptığı açıdır. Keski eğim açısı, keskiye etki eden kuvvetlerin değişimine neden olmakta, bu da verimli kesme için önemli bir kavram olan spesifik enerjiye doğrudan etki etmektedir.



Şekil 3.17 : Keskiler arası çevresel uzaklıklarının kesme diyagramında gösterimi [23].

Ayrıca saptırma açısı denen bir özel keski açısı kavramı daha vardır. Saptırma açısı, burun keskilerinde, keskinin yan yüzeylerinin kayaç ile temas etmemesi veya kazı yapmaması için uygulanan açıdır. Saptırma açısı köşe keskilere ve sarmalın son keskesine 3^0 - 10^0 arasındaki değerlerde uygulanır. Düz kısım keskilerine saptırma açısı uygulanmaz [26].

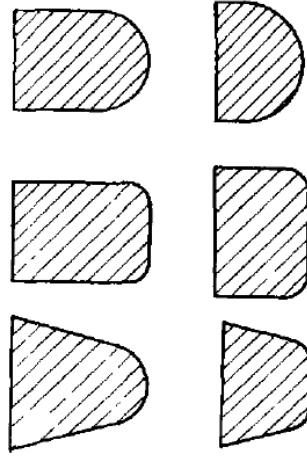
Burun keskileri kesici kafanın, en uç kısmına yerleştirildikleri için 90^0 'lik bir eğim açısı ile yerleştirilirler. Burun keskisinden sonra gelen köşe kesikleri ise kafa gövdesi ile uyum sağlayacak açılar ile yerleştirilirler. Yapılan deneysel araştırmalar sonunda ilk köşe keski için en düşük kesme kuvvetinin ve en düşük spesifik enerjinin dolayısıyla en verimli kesmenin elde edildiği açının, yaklaşık 70^0 olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada her keskinin kesici kafa üstündeki işlevinin keski eğim açısıyla önemli oranda değiştiği de kanıtlanmıştır [27].



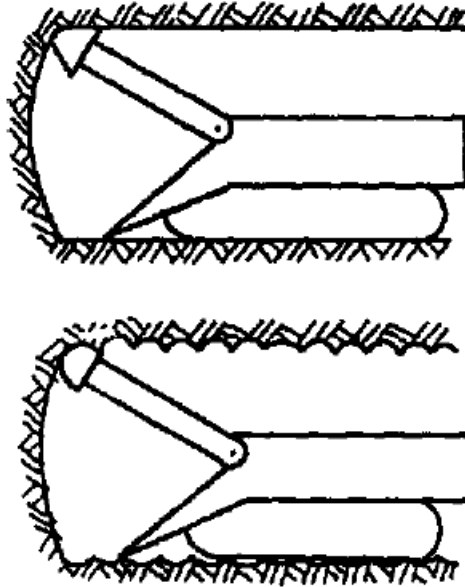
Şekil 3.18 : BEP tipi kesici bir kafadaki keski tasarım parametreleri [28].

Uygulamada kullanılan galeri açma makinalarında kafa geometrisi, Şekil 3.19’da gösterilen şekillerde olmaktadır. Bunlar silindirik, konik, küresel ve bunların kombinasyonu şeklindedir.

Kesici kafa seçiminde etken olan öğelerden biri tünel veya galeride düzgün kesit elde edilmesidir. Bu düzgün kesit kalıcı tünel ve galerilerdeki tahkimat maliyetlerini düşüreceği için önemlidir. Şekil 3.20’de kesici kafa geometrisinin tünel kesiti üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : BEP tipi BKM'larda uygulamada rastlanan kesici kafa geometrileri [29].

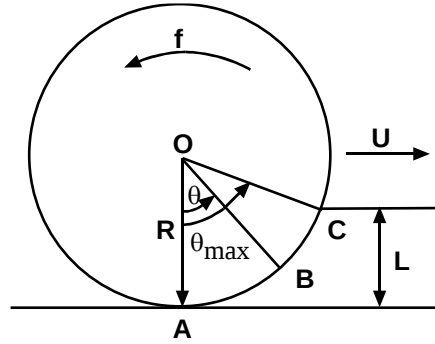


Şekil 3.20 : Kesici kafa şeklinin galeri kesitine olan etkisi [29].

3.4.2.2 Kesici kafa tasarımlarının performansa olan etkileri

Bir önceki başlıkta kesici kafaların tasarımında kullanılan parametreler verilmiştir. Bu başlıkta ise tasarlanan kesici kafanın çalışma sırasında kinetik ve dinamik açıdan incelenmesi açıklanacaktır.

Kesici kafa üzerindeki bir keskinin kesme derinliği, kafa hareketine göre, keskinin kazı arınında kesme derinliği ya kesme boyunca sabit kalıp en büyük kesme derinliği ile kesme yapmakta veya kafa döndükçe sürekli değişmektedir. En büyük kesme derinliği (d_{max}) kafanın bir dönüşte aldığı yolun dizi sayısına oranıdır(3.23). Buradan da Şekil 3.21’de görüldüğü gibi keski hareketinin, bir kesme sektöründe taradığı açığa bağlı olarak keskinin o açıda yaptığı kesme derinliği bulunabilir(3.24-3.25).



Şekil 3.21 : Kinematik açıdan kesme derinliği[29].

$$d_{max} = \frac{D}{n} \quad (3.24)$$

$$d = d_{max} \cdot \sin\theta \quad (3.25)$$

d: kesme derinliği (mm)

D: kesici kafanın bir dönüşte aldığı yol, mm

n: dizi sayısı

f_d : kesici kafanın birim zamandaki dönme hızı (devir/sn)

θ : keski konum açısı (derece)

3.3. altbaşlığında açıklandığı üzere keski derinlikleri de keskiye etkileyen kuvvetleri etkileyen bir parametredir, kesici kafaya etki eden kuvvetler ise bireysel keski kuvvetlerinin bileşkesi alınarak elde edilen kuvvetleridir. Bu kuvvetler, tork ve

BKM'nin bomuna üç birbirine dik eksen boyunca etki eden bom kuvvetleri olarak sınıflandırılabilir.

Bir keskinin tork değeri ortalama kesme kuvveti (FC) ile keski kesme yarıçapına çarpımından bulunur (3.26). Kesici kafaya etki eden tork ise her bir keskiye etki eden torkun toplamıdır.

$$T = FC \cdot r \quad (3.26)$$

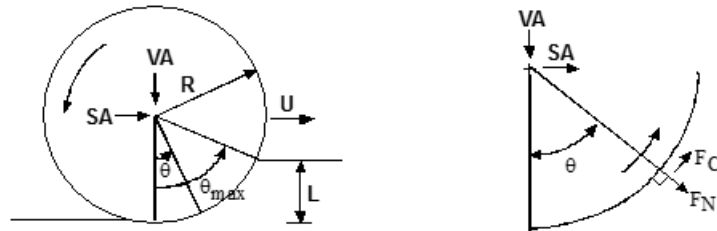
T: tork, Kn.m

FC: ortalama keski kuvveti (Kn)

r: keski kesme yarıçapı, m

Kesici kafaya etki eden bom kuvvetlerinin kafanın dönme ekseninde etkin olduğu düşünülmektedir. Bu kuvvetler, yatay, düşey ve eksenel bom kuvvetleri olup, FC ve FN kuvvetlerine bağlı olarak yukarı kesme ve aşağı kesme şekillerindeki değerleri eşitliklerden hesaplanmaktadır (3.27-3.32). Yatay bom kuvveti makinanın kazabilme kapasitesini, dikey bom kuvveti makinanın kazı arınında kalabilmesini belirlerken, eksenel bom kuvveti ise arına doğru kesme derinliğinin elde edilmesini sağlamaktadır[29].

Spesifik enerji kavramı, keski kafaları için toplam gücün kazılan malzemeye oranıdır. Burada toplam güç kavramı, kesici kafayı döndüren güç(P_r) yatay itme gücü (P_h) ve güç kayıplarının (P_l) toplamına eşittir. Ancak asıl kesmeyi sağlayan güç kafayı döndüren güç olduğundan dolayı spesifik enerji hesaplanmasında dikkate alınan güç, kesici kafayı döndüren güçtür [29]. (3.33)



Şekil 3.22 : Keski ve bom kuvvetleri.

Yukarı kesme konumunda boma etki eden kuvvetler;

$$SA = FN \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + FC \cdot \cos \theta \quad (3.27)$$

$$VA=FN.cos\theta.cos\alpha+FC.sin\theta \quad (3.28)$$

$$AA=FN.sin\alpha \quad (3.29)$$

SA: yatay bom kuvveti, kN

VA:dikey bom kuvveti,kN

AA:eksenel bom kuvveti, kN

θ : keski konum açısı, derece

α : keski eğim açısı, derece

FN: ortalama normal kuvvet, kN

FC: ortalama kesme kuvveti, kN

Aşağı kesme konumunda boma etki eden kuvvetler;

$$SA=FN.sin\theta.cos \alpha -FC.cos\theta \quad (3.29)$$

$$VA=FN.cos\theta.cos \alpha +FC.sin\theta \quad (3.30)$$

$$AA=FN.sin \alpha. \quad (3.31)$$

SA: yatay bom kuvveti, kN

VA:dikey bom kuvveti,kN

AA:eksenel bom kuvveti, kN

θ : keski konum açısı, derece

α : keski eğim açısı, derece

FN: ortalama normal kuvvet, kN

FC: ortalama kesme kuvveti, kN

Kesici kafanın spesifik enerjisi ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilmektedir;

$$SE \approx \frac{P_r}{V_m} \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot f_d \cdot T}{V_m} \quad (3.32)$$

SE: spesifik enerji (kWh/m³)

P_r: kesici kafayı döndüren güç (kWh)

F_d: kesici kafanın birim zamanında dönme hızı (devir/sn)

V_m: kazanılan malzemenin hacmi (m³)

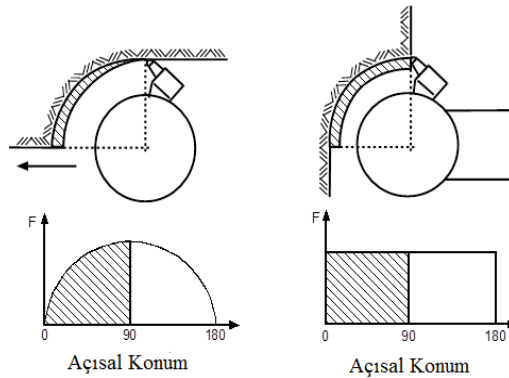
T: tork (kNm)

3.4.3 Bomlu kazı makinaları ile yapılan kesme işlemi

BKM'lerinde kesme işlemi, kesici kafanın boma yerleştirilme biçimine göre farklıdır yani BEP tipli ve BED tipli BKM'larındaki kesme işlemi farklılık gösterir. Boma etki eden kuvvetler kesme şekillerine göre değişecektir.

BKM'nda, bomun hareketine göre kesme işlemi, arına girme(sumping), yatay yönde (arcing), dikey yönde yukarı doğru kesim (lifting), dikey yönde aşağı doğru kesim (lowering) şeklinde sınıflandırılır.

Kesici kafa üzerindeki tek bir keskinin hareketi, keskinin dinamik özelliklerini etkileyerek, kesici kafanın dinamik özelliklerini de doğrudan etkiler. Bu yüzden kafa üzerindeki keskinin hareketini incelemek gerekmektedir. Kafa üzerindeki keski kiler dairesel veya helisel olarak hareket etmektedir. Şekil 3.23'de görüldüğü üzere helisel harekette keski kuvvetleri sabitken, dairesel harekette değişmektedir [30].

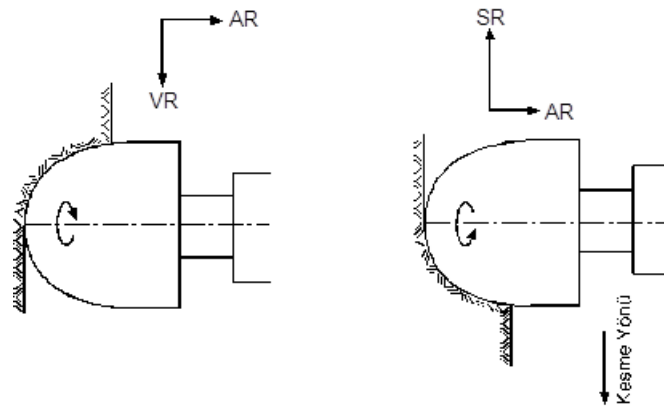


Şekil 3.23 : Tek bir keskinin kesme hareketi [30].

3.4.3.1 Bom eksenine paralel kafalarda kesme işlemi

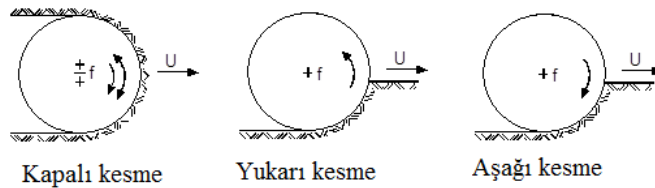
BEP tipi BKM kesme işlemi kesici kafanın ilk önce arına girme (sumping) işleminin ardından arını yatay (arcing) ve dikey (lifting) yönlerinde kesime devam etmesi ile gerçekleşmektedir. Arına girme işleminde bir seferde yeterli derinlikte kesmek amaçlanmaktadır. Ancak kazı arını bu işlemi yapmaya müsait olmadığı durumlarda arzu edilen derinlik kademeli olarak gerçekleşmektedir. Tek keskinin arına girme modunda kesme hareketi helisel, arını dikey ve yatay kesme modunda ise daireseldir.

Bir BEP tipli BKM’nda kafaya kesme sırasında etki eden kuvvetler, kesme doğrultusunda yatay olan SR, bom eksenı boyunca AR ve bu iki kuvvete dik doğrultuda olan VR’dir [30]. Şekil 3.24’te gösterilen bu kuvvetlerin büyüklükleri kafa geometrisi ve kafanın kesme yöntemine bağlıdır.



Şekil 3.24 : BEP tipi kesiciler boma etkiyen kuvvetler [30].

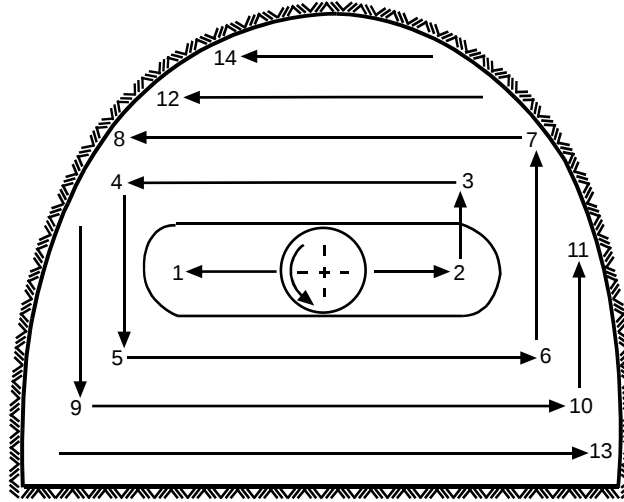
Kesici kafanın kinematik özellikleri göz önüne alınarak, kesme hareketi kapalı kesme (slot milling), yukarı kesme (up milling), aşağı kesme (climb milling) şeklinde yapılabilir [29]. Bu hareketler, kesici kafanın kesme tipi olarak adlandırılır. Şekil 3.25’de gösterilen kesme tiplerinde “U” oku kesme yönünü, “f” oku ise dönme yönünü tariflemektedir.



Şekil 3.25 : BKM'larda kesme tipleri [29].

Kapalı kesmede titreşim daha az, ancak güç çekişi daha fazla, yukarı kesme tipinde ise boma etkileyen yatay kuvvet (SR), düşey bom kuvvetinden (VR)'den daha fazladır. Yani boma yatayda daha fazla yük etki eder, aşağı kesme durumunda ise durum tam tersi olduğundan dolayı boma etkileyen kuvvetlerin bileşkesi düşey yönde olmaktadır. Bu durum kesici kafanın aşağı kesme hareketinde, kesici kafanın yatay yönde hareketi doğrultusunda düşey bileşke kuvvet hareket doğrultusunda saparak hafif ve orta kapasiteli BKM'larının yatay itme silindirlerinin bükülmesi sorununu ortaya çıkartır. Buna ek olarak aşağı kesme hareketinde keski kırılmaları oluşur. Bu sebeplerden dolayı pratikte daha çok yukarı kesme hareketi uygulanır [29].

Homojen bir kazı arınında, operatöre göre kesici kafası saat yönünün tersinde dönen BEP tipli BKM'nın, sürekli olarak, yukarı kesme hareketi yapabilmesi için Şekil 3.26'da belirtilen şekilde kesme hareketi yapması gerekmektedir [30].



Şekil 3.26 : BEP tipli BKM'larda verimli kesme hareketi [30].

Kesici kafa arına girdikten sonra ilk olarak yukarı doğru kesme yaptıktan sonra arını sola doğru kazmaktadır. Bu işlem arının altında olduğu için alttan kesme olarak adlandırılır. Daha sonra kafa aşağı doğru kesme işlemi yapar ve yatayda arını sağa doğru kesmeye başlar. Bu kesme hareketi arının üzerinde gerçekleştiği için buna üstten kesme denilmektedir. Kafanın dönüşünün saat yönünün tersi ya da saat yönünde olması durumuna göre alttan kesme ve üstten kesmenin yataydaki hareketi değişir. Kesme işlemi kafanın saat yönünün tersinde hareketinden dolayı, alttan kesme işlemi yatayda sola doğru, üstten kesme işlemi ise yatayda sağa

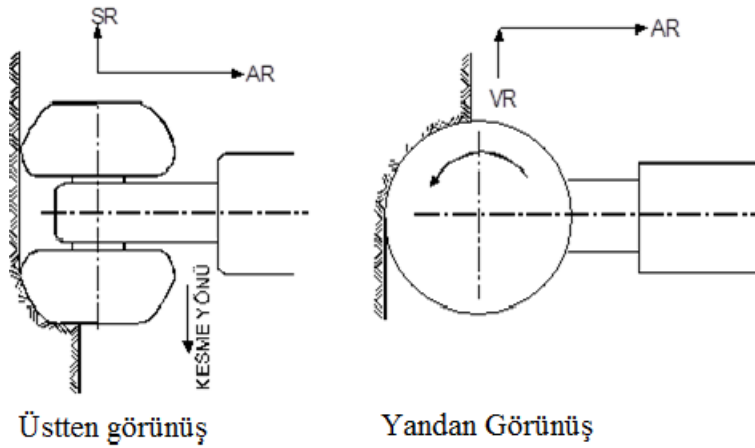
doğrudur. Bunun sebebi kafanın yukarı kesme hareketini yapabilmesidir. Kesici kafanın saat yönünde hareket etmesi durumunda bu durum tam tersi olmalıdır [30].

Arına girme modu, arını yatay ve dikey yönde kesme modlarına göre daha az kuvvet gerektirmektedir. Bunun sebebi, tarama hareketi yapılırken bomun çevresel kuvveti yenmesinden ancak arına girme durumunda ise kafanın ilerleme yönünün çevresel kuvvete dik olmasından dolayı çevresel kuvvetin yenilmesin gerek olmamasıdır [31].

3.4.3.2 Bom eksenine dik kesici kafalarla yapılan kesme işlemi

Bom eksenine dik kesici kafalara sahip bomlu kazı makinalarında arını kesme işlemi belli bir arına girme hareketinden (sumping) ardından yatay kesme (arcing) ve dikey kesme (lifting) hareketleri ile sağlanır.

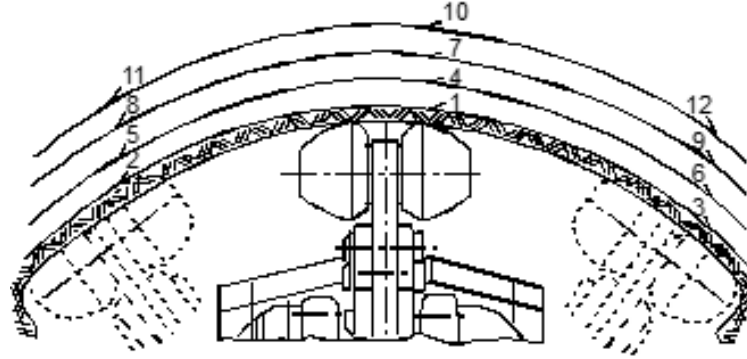
Yatay kesme hareketinde boma etkiyen kuvvet bileşenleri Şekil 3.27’de gösterilmiştir. Burada bileşke kuvvetin AR ve VR bileşenlerinin oluşturduğu düzleme yakındır.



Şekil 3.27 : BED tipi kesicilerde boma etkiyen kuvvetler [30].

BED tipli BKM’lerinde arında yapılan kesme işlemleri ise BEP tipli BKM’larına göre daha farklı bir şekildedir. Bu kesme şeklinde kafa arına belirli bir derinlikte girdikten sonra sağa ve sola hareket ederek arını kesme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemde, kafa üzerindeki tek keski, arına doğru kesmede dairesel hareket ederken, yanlara doğru kesme modunda helisel hareket edecektir. Arına girdikten sonra, yanlara doğru kesme işlemi yaparken, kafa üzerindeki bir keskinin kesme kuvveti hızı vektörü ile arını tarama hız vektörü birbirine dik olacaktır [31]. Yanlara doğru kesmedeki kesici kafa üzerindeki tek keskinin hareketinin helisel olması ve tarama kuvvetinin çevresel kuvveti yeme gerekliliği neticesinde, yanlara doğru kesme hareketi, arına doğru kesme

hareketinden daha yüksek kuvvet gerektirir. Bu yüzden, Şekil 3.28’de gösterilen kademe kesme uygulanır. Bunun nedeni arına girme işleminden, yanlara doğru kesme hareketine geçişi rahatlatmaktır.



Şekil 3.28 : BED tipi kesicide verimli kesme hareketi.

Kesme derinliği BED tipli makinalarda, dişli kutusunun yeri dolayısıyla küçük değerlerde olacağını ve kafa çapının üçte ikisinden fazla olmamalıdır, bu yüzden BED tipli makinaların kesici kafa boyutları daha büyüktür.

BED tipli BKM’lerinde aşağı doğru kesme durumunda, makinarya etki edecek reaksiyon kuvvetleri makinayı kaldırmaya yönelik olacağından dolayı, yukarı doğru kesme kuvvetinin kullanılması daha verimlidir [32].

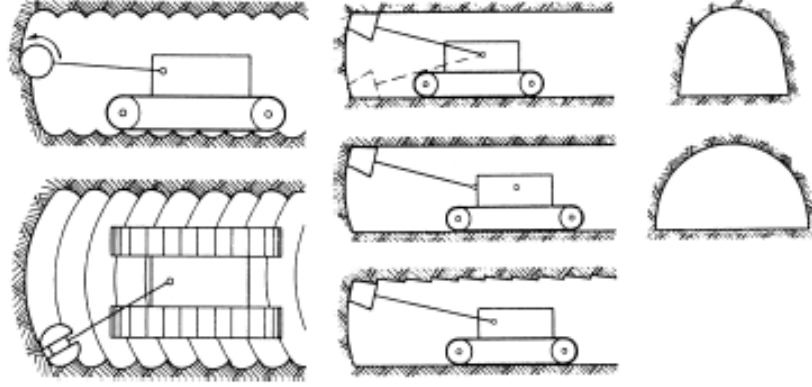
3.4.4 BEP tipli ve BED tipli kesici kafaya sahip BKM’lerinin karşılaştırılması

BED tipli kesici yükleyiciler ile BEP tipli kesici yükleyicilerin arasındaki farklar aşağıda belirtilmiştir;

1. BED tipli BKM kesici kafaları kazı arınının doğrultusunda kesim yapar. Bunun için BED tipli BKM’ları, aynı ağırlıktaki ve kesici kafa gücündeki BEP tipli BKM’larına göre daha stabildir.
2. BED tipli BKM’larında kesme sırasında ortaya çıkan reaksiyon kuvvetlerinin büyük bir çoğunluğu makinanın ana gövdesine doğrudur.
3. BEP tipli BKM’larının kesici kafa tasarımında keski dizimi daha basittir. Bunun sebebi kesme ve tarama hareketlerinin aynı yönde olmasıdır.
4. BED tipli BKM’ları kesim sırasında sert kayalardan ve arınının jeolojik olarak heterojen olmasından daha az etkilenir. Bu yüzden tabakalı sedimanter kayalarda daha iyi kesim yaparlar.

5. BEP tipli BKM'ların kesim kontrolü, bom tarama açısının tünel ekseninden daha büyük veya daha küçük olduğu durumlarda daha fazladır. Bu yüzden kalkanlı BKM'larda BEP tipli BKM'lar tercih edilir. BED tipi kesici kafalarda kesim kontrolü daha zordur.
6. Düşük kesim hızları nedeniyle, BEP tipli BKM'larda kesici tüketimi BED tipi BKM'larına göre daha düşüktür.
7. BED tipli kesici kafaların üretim miktarları, kayacın dayanım özelliklerinden daha az etkilendiğinden dolayı, BED tipli BKM uygun kesici kafa dizaynı ile daha sert kayalarda kullanılır. Böylelikle BED tipi BKM'ları kayacın dayanımına göre daha esnek kullanıma sahiptir [3]. BEP tipli BKM'ları ise tabakalı yapıda sert bir kısım ile karşılaştığında, makina yüksek kuvvetlere maruz kalmaktadır.
8. BEP tipli kesici kafalarda tünel veya galeri kesitinin düzgün kesilmesi, BED tipli kesici kafalara göre daha rahattır. BED tipli kesici kafalarda tünel veya galeri tavanının kesitinin düzeltilmesi için makinanın ileri geri hareket etmesi gerekmektedir.
9. Şekil 3.25'te gösterildiği üzere BEP tipli kesici kafalarda tünel kesitleri daha düzgün çıktığı için püskürtme beton gibi tahkimat malzemelerinin tüketimi BED tipli kesici kafalara göre daha düşüktür. Fakat BED tipi makinaların stabilitesi daha iyi olduğundan dolayı BEP tipi stabilite sorununu engellemek için bu tip makinalarda yan mahmuzlar kullanılır bu da tünel kesitinin mahmuzlara göre ayarlanma gerekliliğini ortaya çıkartır.
10. BED tipli kesici kafaların arına girme derinliğinin sığ olmasından dolayı, tahkimatın hemen ardından kazı yapıldığı kırılmalı tavan koşullarında daha avantajlıdır [34].
11. BEP tipli kesici kafaların çapları daha küçük olduğu için seçimli kazıya daha uygundur. BEP tipli kesici kafalarda arından malzeme yan tarafa doğru atılırken, BED tipli BKM'larında arından kazılan malzeme, malzeme yükleme ünitelerinin hemen önüne düşer. Bu nedenle eşit kesme kapasitelerinde BED tipli BKM'ları, BEP tipli BKM'larına oranla %30 daha fazla üretim ve ilerleme yapabilmektedir [6].

12. BED tipli BKM'lerinin daha iyi üretim sağlamasına rağmen, kesici kafaların yüksek çevresel hızlarından dolayı, daha fazla toz oluşturlar. Bunu engellemek için toz bastırma ekipmanları kullanılması gerekmektedir.



Şekil 3.29 : BED tipi ve BEP tipi BKM'lerinin tünel profillerine etkisi [33].

3.5 Bomlu Kazı Makinalarının Seçimine Etki Eden Faktörler

Herhangi bir yeraltı kazı makinesinin seçiminde, kazılacak kayacın kazılabilirliği ve kazılacak tünel veya galerinin parametreleri üzerinden karar verilmektedir. Bunun için kayacın kazılabilirliği çeşitli testler ile araştırılarak bu kayacın kullanılması planlanan kazı makinalarının performans analizleri yapılması gerekmektedir. Performans tahmin yöntemlerinde makinanın gücüne ve dolayısıyla ağırlığına bağlı olarak kayacın üzerindeki kazılabilirlik değerleri araştırılır.

Bunun yanı sıra makinanın gücü ve ağırlığına göre performans tahmini yeterli değildir. Kayacı kesebilecek güçte seçilen bir makinanın performansı, uygulamada daha düşük olabilir. Örneğin yumuşak taban taşlarında ağır makinaların batma riski vardır. Bu riskte yürüyüş kabiliyetini zayıflattığı için makinanın kazı verimliliğini azaltır. Kayacın büyük parçalar halinde kopması malzeme toplama ünitelerini tıkayarak kazıda sürekliliği engelleyebilir. Ayrıca kesim sırasında bom kuvvetlerinin yüksekliği makinada stabilite problemini ortaya çıkartarak üretim verimliliğini düşürdüğü gibi emniyetli çalışma ortamına da risk teşkil eder.

Tünelin veya galerinin parametreleri ise ayrı bir önem teşkil eder. Örneğin, BEP tipli bomlu kazı makinalarında stabiliteyi sağlayan yan mahmuzların tünel kesitinde yerleşmesi gerekmektedir. BED tipi makinalarda ise fazla kazıyı önlemek için bomun tarama açısı iyi incelenmelidir.

BKM'ları ağırlık, güç ve boyut açısından bir bütün olarak tasarlanır. Örneğin, güç arttığında makinanın ağırlığı ve buna bağlı olarak boyutları artmaktadır. Bu faktörler üzerinden sonradan değişiklik yapmak imkansızdır. Bomlu kazı makinalarının kesici kafalarının tasarımları ise rahatlıkla değiştirilebilir ancak bu değişim durumunda makinanın bomuna etki eden kuvvetler değişmekte ve makinanın stabilitesine etki etmektedir.

Aşağıda bomlu kazı makinalarının seçimini etki eden faktörler açıklanmıştır;

3.5.1 Uygulanabilir maksimum tork

Kazı jeolojisi genellikle homojen olmadığı için BKM'ları aşındırıcı ve sert kayaçlarla da karşılaşmaktadır. Bu nedenle sert kayaç kesebilen makinalar daha çok tercih edilir. Sert kayacı kesebilme özelliği ise makinanın kesici kafa gücüne bağlıdır. Güç değeri ise makinanın tork ve devrine bağlıdır. Tork ise makinanın kesme kuvveti ve kesici kafa yarıçapına bağlıdır.(3.33)

$$T=F_c.R \quad (3.33)$$

T: Tork (kN.m)

F_c: Kesme kuvveti (kN)

R: Kesici kafa yarıçapı (m)

Tork değeri, kesici kafa dizayn parametrelerine bağlıdır. Bu yüzden her makinada farklı olabilir ve bunlar kayaç şartlarına göre revize edilebilir. Ancak makinanın uygulayacağı maksimum tork, kesici kafayı döndüren motora da bağlı olduğu için revize edilmesi zordur.

3.5.2 Uygulanabilir maksimum bom kuvvetleri

Bomlu kazı makinalarına etkiyen bom kuvvetleri yatay, dikey ve ekseneldir. Bu değerler her bir keskiye etki eden keski kuvvetlerinden elde edilir. Bu yüzden kesme verimliliği ile bom kuvvetleri birbirine paraleldir.

Genellikle BEP tipli kesici kafaya sahip bir makinada yatay ve dikey bom kuvvetleri benzerdir. Ancak BED tipli kafalarda ise; dikey bom kuvvetleri, yatay bom

kuvvetlerinden daha büyüktür. Kesici kafa yapısının farklılığından dolayı, BED tipli makinalarda uygulanabilir maksimum eksenel kuvvet daha yüksektir.

Buna göre BEP tipli makinaların seçiminde uygulanabilir maksimum kuvvete bakarken eksenel ve yatay kuvvetlere bakılması yeterliyken, BED tipi makinalarda ise bütün kuvvetlere bakmak gerekmektedir.

3.5.3 Kesme hızı

En popüler performans parametrelerinden biridir ve bu parametre makinanın verimliliği hakkında veri vermektedir. Kesme hızı ile kazı maliyeti ters orantılıdır. Kesme hızı çeşitli metodlarla hesaplanabilir. Bunlardan en çok kullanılanı Bilgin ve arkadaşlarının elde ettiği metottur(3.34). Bu metotta kayacın tek eksenli basma dayanımı ve RQD değerlerinden “kayaç kütlesi kazılabilirlik indeksi” (RMCI) elde edilerek net kazı hızı elde edilebilir (3.35) [35].

$$RMCI = \sigma_c \cdot \left(\frac{RQD}{100} \right)^{2/3} \quad (3.34)$$

$$V = 0.28 \cdot P \cdot 0.974^{RMCI} \quad (3.34)$$

RMCI: Kayaç kütlesi kazılabilirlik indeksi

RQD: Kayaç kalite değeri

σ_c : Kayacın tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

V: Net kazı hızı (m3/saat)

P: Makinanın kesme gücü (HP)

Buradan elde edilen değerler BKM'lerinin önceden ve anlık performan kestirimi için yaygın olarak kullanılır.

3.5.4 Stabilite durumu

Bu faktör BKM'nın kazı sürekliliği için oldukça önemli bir faktördür. Makinaların stabilite durumu genel olarak yatay ve dikey yönlerdeki stabilitesi olarak ikiye ayrılır. BEP tipli makinalar yatay, BED tipli makinalar ise dikey yönde stabilite açısından

hassastır [30-34]. BKM'lerinde stabiliteyi arttırmak için mahmuzlar kullanılmaktadır. Ancak geniş kesitli tünellerde ve kaygan zeminlerde bu mahmuzların kullanılması sorun teşkil etmektedir. Bu yüzden BKM'ları seçiminde stabilite dengeli bir makina seçebilmek için önemli bir faktördür.

Stabilite analizi, kullanılacak makinanın kazı sırasında oluşacak bom reaksiyon kuvvetlerinin makinanın;

1. Dik eksen etrafında dönme durumu
2. Yana devrilme durumu
3. Geriye devrilme durumu
4. Kayma durumu

momentleri hesaplanarak yapılır. Hesaplamalar, elde edilen bütün kesme modları ve bom kuvvetleri için yapılarak, elde edilen en küçük değerlerin karar verme yöntemlerinde kullanılması uygundur [35].

BKM'larının stabilite analizi Bölüm 4'te detaylı olarak anlatılacaktır.

3.5.5 Maksimum kesme yüksekliği

Bu faktör, BKM'larının istenilen tünel yüksekliğini elde edebilme kapasitesini belirtmektedir. Tünel veya galeri yüksekliği makinanın kesme yüksekliğinden fazla olduğu durumlarda, kazılan malzeme "sehpa" olarak kullanılır ve makina bu yükseltinin üstüne çıkarak tünel veya galeri tavanını keser. Bazı projelerde kademeli kazı da uygulanır. Fakat her iki durum da kazı hızını olumsuz yönde etkileyerek, mekanize kazı verimini düşürür. Bu yüzden yapılacak projenin boyut parametreleri iyi incelenerek buna göre seçilecek olan BKM'larının maksimum kesme yüksekliği belirlenmelidir.

3.5.6 Maksimum kesme genişliği

Kazılacak tünel kesitinin genişliği, en az makinanın minimum kesme genişliği kadar olmalıdır. Burada amaçlanan olgu makinanın tünel genişliği boyunca sağa sola fazladan giderek zaman harcamasının engellemek ve kazı hızını arttırmaktır. Bu yüzden yüksek maksimum kesme genişliğine sahip makinalar daha çok tercih edilirler.

3.5.7 Maksimum zemin altı kesme yüksekliği

Bu faktör makinanın durduğu zemininin daha altından kesme yapabilmesi kabiliyetidir. Bu özellik BKM makinaların tünel kesitinin düzgün çıkartabilmesi açısından önemli bir faktördür. Özellikle dairesel kesitli tünellerin kesitlerini çıkartmak için bu kritere bağlı kazı geometrisi tasarlanır.

3.5.8 Yürüme hızı

Yürüme hızı, makinanın galeri veya tüneldeki hareketleri sırasında harcanan süreyi etkiler. Bu sürede kazı olmadığı için çalışma süresi içinde kayıp olarak adlandırılır. Bu yüzden yürüme hızı yüksek olan makinalar tercih edilir.

3.5.9 Makinanın zemine uyguladığı basınç

BKM'ların çalıştığı ortamların ıslak ve yumuşak olduğu durumlarda makinaların batma riski ortaya çıkmaktadır. Batma riski, makinanın hareket kabiliyetini ve verimliliğini düşüreceği için önlenmesi gereken bir risktir. Bu yüzden makinanın zemine uyguladığı basıncın düşük olması tercih edilir.

BKM'larının zemine uyguladığı basınç, makinanın ağırlığı ile doğru, makinanın uzunluğu ve paleti ile ters orantılıdır. Makinanın gücü arttıkça ağırlığının da arttığı için makinanın zemine uyguladığı basınç, makina seçiminde incelenmelidir.

3.5.10 Çalışma eğimi

BKM seçim faktörlerinden biri de çalışma eğimidir. Tünel ve yeraltı maden ocaklarındaki galerilerde eğimler çeşitlilik gösterir. Bu yapıların bazı bölgelerinde eğimler yüksek olabilir ve bu kazı makinalarının bu bölgelerde de çalışması gerekmektedir. Ayrıca eğim faktörü makinanın stabilitesini de etkiler. Bu yüzden yüksek eğimde çalışma yeteneği olan makinalar tercih edilir.

3.5.11 Diğer faktörler

Yukarıda belirtilen faktörlere ek olarak birkaç faktör daha belirtilebilir. Örneğin malzeme yükleme ünitesinin ağız genişliği bu faktörlerden biridir. Kesilen malzemenin parça boyutu malzeme toplama ünitesinin genişliğinden büyük olduğu durumlarda malzeme toplama ünitesi tıkanarak kazı hızını düşürür. Ayrıca malzeme aktarma ünitesinin hızı da kesilen malzemenin kazı arınından çıkartılması için önemli bir faktördür.

3.6 Bomlu Kazı Makinalarındaki Son Gelişmeler

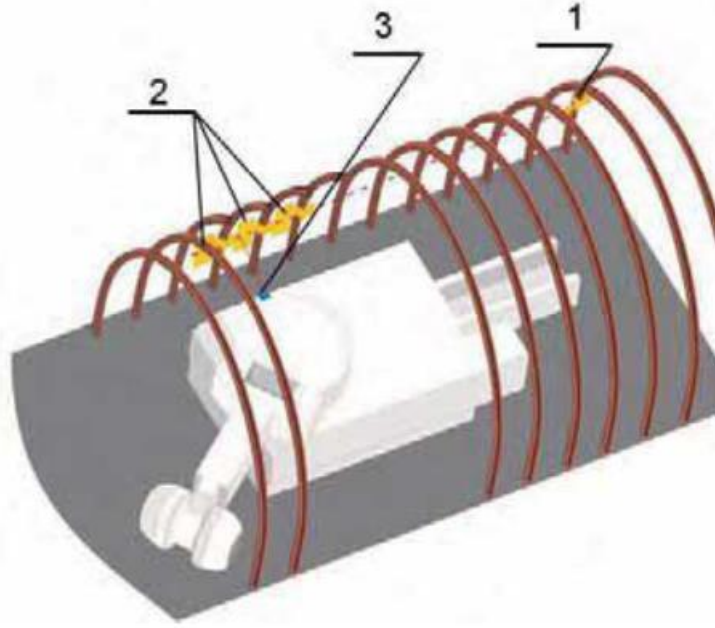
Günümüzde mekanize kazının tünelcilik ve yeraltı madencilikteki payı gün geçtikçe artmaktadır. Bununla birlikte mekanize kazı sistemlerinin daha verimli olması için mekanize kazı sistemlerinde kullanılan makinaların üstünde yeni teknolojiler denenmektedir.

BKM'ları da sürekli gelişme halindedir. Bu gelişmeler BKM'larının kesici kafalarının güçlerinin artırılması ve buna bağlı olarak bomlu kazı makinalarının boyutlarının artırılması olduğu gibi kesici kafalarda yeni keski tiplerinin denenmesi, kesici kafalara su jetlerinin eklenmesi, köpük ile toz bastırma ve BKM'larının otomasyonu gibi çalışmalar da olmaktadır.

BKM'larının seçim kriterlerinin içinde yer almayan ancak BKM'larının kazı verimliliğine direk etki eden bir faktör de operatör ve insan faktörüdür. Operatör tecrübesine göre kazı verimliliği artabilir veya düşebilir. Bu etkiyi mümkün olduğunca minimize etmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunun için uzaktan algılama sistemleri BKM'larının bünyesinde bulunmaya başlamıştır.

Uzaktan algılama sistemleri kazı verimini arttırdığı gibi kazı güvenliğini de arttırmaktadır. Üretici firmalar bu yüzden ürettiği BKM'larında uzaktan algılama sistemlerini standart hale getirmişlerdir. Örneğin, Alman üretici firma olan DH Mining Systems'in 75 tonluk BKM'inde bu sistemler 35 metreye kadar bu makinanın uzaktan kontrolüne olanak sağlar. Ayrıca bu BKM'larına sensörler konularak yeraltındaki metan yayılımları da kontrol edilmesi sağlanır[36]. Ancak uzaktan kontrol yöntemleri çeşitli sorunlar ortaya çıkartmaktadır. Bunlardan en önemlisi makinanın ve kesici kafanın konumunu gerçek zamanlı olarak elde edilmemesidir. Bununla alakalı çeşitli çalışmalar yapılmıştır [37].

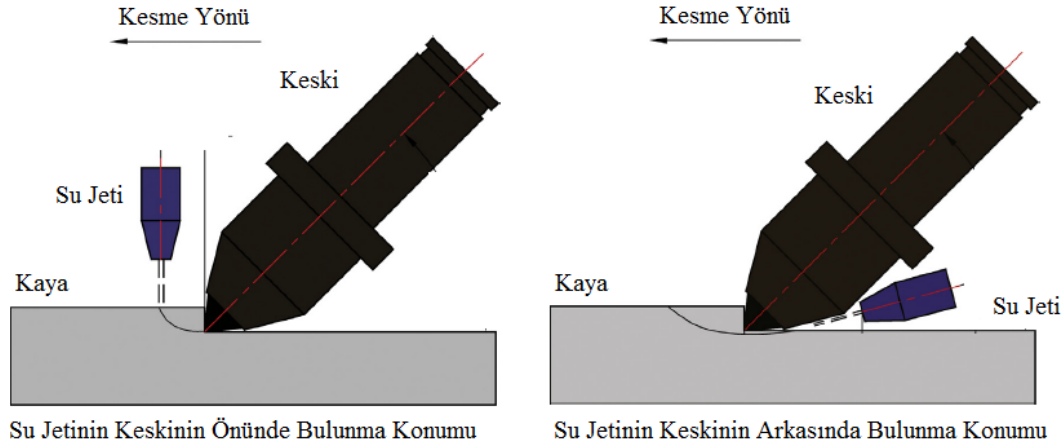
Ayrıca uzaktan kontrollü BKM'larında kesim yapıldıktan sonra çalışma ortamında kazılan malzemelerin uzaktan kontrollü engellediği bilinen bir sorundur. Bu yüzden BKM'ları çalışması sırasında 3 düzlemin de izlenmesi gerekmektedir. Ayrıca bu şekilde uzaktan kontrollü BKM'larının tünel veya galeri kesitini düzgün kesim yapması da denetlenebilir. Bu sistemler kullanılmaktadır ancak bu sistemlerin güvenilirliği hala istenilen seviyede değildir. Şekil 3.30'da gösterilen bu sistemlerde BKM'larında bulunan bir laser işaretçi ile yansıtıcı bulunan laser sensörler kullanılmaktadır[38].



Şekil 3.30 : Laser reflektörlerin tüneldeki konumları[38].

Uzaktan kontrole ek olarak su jeti sistemi de BKM'larında kullanılan bir başka gelişmedir. Kesici kafada kullanılan bu su jetleri, kesme sırasında yardımcı olarak kesim sırasında oluşan kesme kuvvetlerini %20 ila %50 arasında azaltarak, “kuru” kesmeye göre kesici kafada kesme sırasında oluşan ısıyı %50 azaltarak kesici aşınmalarını azaltmaktadır [39]. Bu su jetlerin Şekil 3.31’de gösterilen konumları ile alakalı çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda su jetlerinin keskiye göre konumlarının kesme verimliliği üzerinde büyük bir etkisi olduğu bulunmuştur. Su jeti olmayan keskilere oranla, su jetinin keskinin önünde bulunma konumunda maksimum kesme kuvveti %14 ile %30 oranında daha azdır ve bu oran kesme derinliğine göre azalmaktadır. Su jetinin keskinin arkasında bulunma konumunda ise, bu oran keski derinliğine bağlı olmaksızın %28 ile %40 oranlarında değişmektedir. Su jetinin keskinin arkasında bulunma konumu, su jetinin keskinin önünde bulunma konumuna göre kesme verimliliği açısından daha verimlidir. Ayrıca su jetinin keskinin arkasında bulunma konumunda, su jetinin keski ile açısı kesme verimliliği açısından ters orantılıdır [40].



Şekil 3.31 : Su jetlerinin keskinde konumlandırılması.

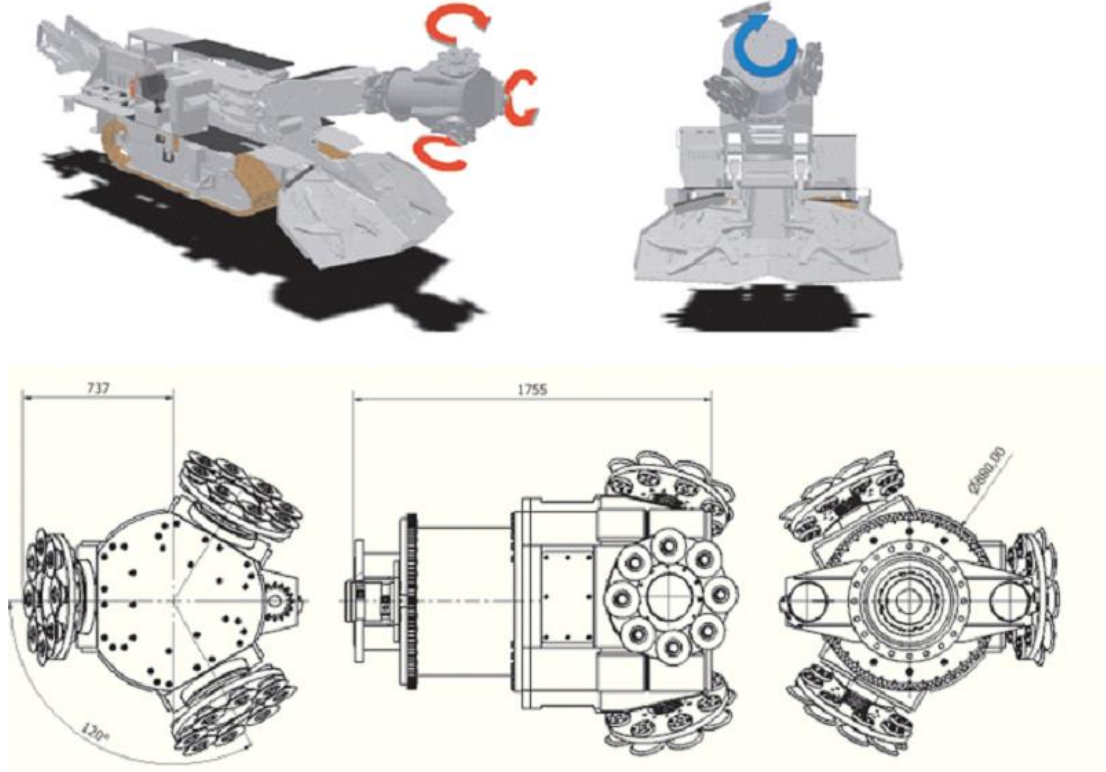
Su jetinin basıncına göre oluşan kraterin hacmi de incelenmiştir. Aynı kesme derinliğinde, su jetinin basıncı arttıkça oluşan kraterin hacmi de artmıştır. Su jetinin keskinin arkasında bulunma konumunda tek keski için basınç karşılaştırılması yapılmış, sırasıyla 20 MPa, 40 MPa, 60 MPa, 80 MPa su basınçları ile yapılan araştırmalar sonucunda %31, %39, %43 ve %45 oranında maksimum kesme kuvvetinde azalma belirlenmiştir [40].

Keski teknolojileri üzerine de BKM'larında bir takım gelişmeler ortaya çıkmıştır. Sert kazı için daha sert çalışma koşullarında uzun süre çalışabilen sentetik keski materyalleri denenmektedir. Polikristalen elmas keskiler (PDC), kullanılan tungsten karbit uçlara göre 5-6 kat daha serttir [39]. Ancak PDC materyali, tungsten karbid uçlara göre daha kırılgandır. Bu malzemelerle alakalı çalışmalar devam etmektedir.

Ayrıca kesici kafalar için farklı keski tipleri de denenmektedir. BKM'ları çok sert kayalarda keski tiplerinden ve kesici kafa tasarımlarından dolayı zorlanmaktadır. Bundan dolayı disk tipli keskinin BKM'larına uygulanması üzerine çalışmalar yapılmıştır.

AGH Üniversitesi tarafından disk keskinin ve disk keskinin bulunduğu kesici kafanın bağımsız olarak döndüğü Şekil 3.32'de gösterilen yeni bir kesici kafa tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımla kesici kafanın, kesim sırasında oluşturduğu keski izlerini daha efektif kullanarak sert kayaları kesebilmesi amaçlanmıştır.

Tasarlanan kesici kafa, REMAG S.A. firması tarafından yapılan KR 150 kodlu orta boyutlu 45 tonluk BKM üstüne takılmıştır. Bu makinarya Şekil 3.32’de boyutları gösterilen kesici kafa takılmıştır. Bu kafayı da 150 kW’lık makinaryanın bomuna takılacak elektrik motorunun döndürmesi kararlaştırılmıştır. Kullanılan disklerin i,se çapı 160 mm’dir.



Şekil 3.32 : Asimetrik kafa hareketlerinin şematik gösterimi ve kafanın teknik çizimi [41].

Tasarlanan kesici, kafa Şekil 3.33’da tek eksenli basma dayanımı 40 MPa olan betonda denenmiştir.

Bu kesici kafaya ek olarak BKM’larda kullanılmak üzere mini-disk kesikli kesici kafa çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar Bölüm 5’te detaylı olarak anlatılacaktır.

BKM’larının çalışması esnasında toz çıkma sorunu ortaya çıkmaktadır. Bunu engellemek için su spreyleri kullanılmaktadır. Ancak geniş kesitli tünellerde, suyun tozu tutabilme özellikleri zayıflamaktadır. Bu durum çalışma şartlarının zorlaştırmakta ve havalandırma için ek bir maliyet ortaya çıkartmaktadır. Bunu engellemek için köpük spray sistemi kullanılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. BKM’na eklenen

köpük makinası ile kesici kafa üstünde bulunan kanalların yardımıyla tozun bastırılması hedeflenmiştir. Uygulamalarda elde edilen sonuçlara göre klasik su spreyine oranla köpük yönteminin 3 ile 5 kat arasında daha yüksek bir toz bastırma oranına sahip olduğu belirtilmiştir [42].



Şekil 3.33 : Asimetrik kafanın betonda test edilmesi [41].

4. BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE ANALİZİ

4.1 Giriş

Bir BKM'sinin mekanize kazı işlemlerini yaptığı sırada, kesici kafalara etki eden reaksiyon kuvvetleri makinanın çeşitli yönlerde dönmesi, devrilmesi veya kaymasına neden olabilir. Makinanın stabil olması makina ağırlığı, palet genişliği, makinanın zemin ile yaptığı sürtünme, galeri eğimi gibi çeşitli makine ve galeri parametrelerine bağlıdır. Benzer makinaların birbirinden stabilite olarak farklı olması durumu, daha stabil makinanın daha sert formasyonlarda kazı yeteneğinin daha fazla olması olarak kazı verimliliğine direkt olarak etkide bulunur. Bu yüzden BKM'lerinin stabilite analizi kazı verimliliği açısından önem teşkil eder.

BKM'lerinin stabilite analizi ile kazı sırasında BKM'lerine etki eden kuvvetlerin tespiti ve bu kuvvetlerin stabiliteye olan etkisinin sayısal olarak belirlenmesi amaçlanır [35].

Literatürde stabilitenin kazı verimliliğine etkisi bahsedilmiştir [31-43]. Ancak detaylı çalışmalar bu konuda azdır. Çalışmalarda belirtilen husus, bir BKM yatay yönde uygulayacağı kuvvetleri sınırlayan faktör, makinanın paletleri ile zemin arasındaki sürtünme momentidir. Bu moment boyutları belli bir makinada, ağırlığı ile orantılıdır, ancak makinanın ağırlığı arttıkça, makinanın uygulayacağı kesme kuvvetinin artacağı için bir yaklaşımdan bahsedilmemiştir. Ancak BEP tipli makinalarda kesme kuvvetlerinin ani artışlarından dolayı makinaların kayabileceği için bunu engellemek için hafif makinaların mahmuzlar ile tünel yanal düzlemlere sabitlenmesi gerekmektedir. BEP tipli makinalarda boma etkiyen reaksiyon kuvvetlerinin yatay eğilimde olması bu kaymaları gerçekleştirmektedir. BED tipli makinalarda ise bileşke kuvvet dikey eğilimde olduğu ayrıca BEP'e göre yatay kuvvetler ihmal edebilecek kadar küçüktür. Bu da BED tipi makinaların aynı boyuttaki BEP tipi makinalara göre daha stabildir ve BED tipi makinaların kesici kafa gücünü arttırarak daha sert kayaları kesebileceği belirtilmiştir [31].

Çalışmalarda makinaların maksimum uygulayabileceği kuvvet ($F_{\max}$) ile efektif olarak uygulayabileceği kesme kuvvetine oranı (F_{eff}), bomlu kazı makinasının stabilitesi olarak belirtilmiştir. $F_{\max}$ değeri sürtünme momentinden hesaplanırken, F_{eff} değeri ise kesici kafa gücü ve kesme hızından elde edilir. Bu yaklaşımdan elde edilen değerlere göre de BED tipli makinanın BEP tipli makinaya göre daha stabil olduğu belirtilmiştir [31].

BKM'larının stabilitesine etki eden ağırlık faktörü üzerine de çeşitli çalışmalar yapılmıştır [33]. Oluşan yatay kuvvetleri açısından BEP tipli makinaların stabil olarak çalışması açısından %20 daha ağır üretilmesi teorik olarak belirtilmiştir. Ancak pratikte makinanın ağırlığının artırılması yerine tünelin cidarlarına tutunacak ekipmanlar kullanılmaktadır. BEP tipi makinalarda dikey yönde stabiliteye yükleme tablası ve makina arkasına monte edilebilen hidrolik ayaklar ile etkide bulunmaktadır. BED tipli makinalarda ise yatay kuvvetlerin göz ardı edilebildiği için mahmuzlara gerek olmamaktadır.

BEP tipi kesici makinaların kesme sırasında yatay kuvvetlerin fazla olduğu durumlarda yan mahmuzların kullanılması gerekmektedir. Bunlar zaman kaybına yol açacağı gibi geniş kesitli tünellerde tünel cidarına ulaşamayacağı için kullanılması zordur. Bu yüzden makina seçimi yapılırken tünel kesitinin stabilite açısından da dikkate alınması gerekmektedir.

4.2 Bomlu Kazı Makinalarının Stabilite Analizi Yöntemi

Bomlu kazı makinalarında stabilite analizi, BEP ve BED tipli makinalarda herbir kesme modu için makinanın yapacağı düşünülen dört hareket incelenmektedir [35]. Bunlar;

1. Makinanın kendi etrafında dönmesi durumu ve bunu yaratan makinanın merkezinden geçtiği varsayılan dikey düzlemdeki y eksenini üzerindeki C noktasına göre momenti
2. Makinanın yana devrilmesi durumu ve bunu yaratan makinanın tabanından geçtiği varsayılan yatay düzlemdeki x eksenini üzerindeki B noktasına göre momenti

3. Makinanın geriye devrilmesi durumu ve bunu yaratan makinanın tabanından geçtiği varsayılan yatay düzlemdeki z ekseninde bulunan A noktasına göre momenti
4. Makinanın kayması durumudur.

BEP ve BED tipli makinalarda boma etki eden kuvvetler, bom eksenine boyunca etki eden AR kuvveti, kesme yönünde etki eden AR kuvvetine dik SR kuvveti ve bu iki kuvvetin bulunduğu düzleme dik etki eden VR kuvvetidir. Bu kuvvetlerin yönleri kesici kafa şekline, kesme tipine ve kesme modlarına bağlıdır.

Uygulamalar gözönüne alınarak, yapılan hesaplamalarda BEP tipli kafanın dönme yönü saate ters yönde, BED tipi kafa dönme yönü sol taraftan görüşe göre saate ters yönde alınmıştır. BEP tipli kafalarda bütün kesme modunda yukarı kesme uygulanırken, BED tipli kafalarda kesici kafanın hareketinden dolayı yukarı kesme modundan aşağı kesme tipi, aşağı doğru kesme ve yanlara doğru kesme modunda, ise yukarı kesme tipi uygulanmıştır.

Yukarıda belirtilen 4 stabilite durumunu ifade eden eşitlikler BEP ve BED tipi kafalar için bütün kesme modlarında kurulmuştur. Bu eşitliklerde Çizelge 4.1’de belirtilen makina ve tünel parametreleri kullanılmıştır. Tünel parametreleri olarak makina ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı ve tünelin eğimi kullanılmıştır. BKM’larının kesme sırasında oluşturacağı makina stabilitesini olumsuz yönde etkileyecek ondülasyonlar, yükleme tablalarına eklenecek bıçaklar ile kolayca giderebileceğinden dolayı dikkate alınmamıştır. BEP tipi kafalar için, arına girme, üstten kesme, yukarı doğru kesme, alttan kesme ve aşağı doğru kesme modunda eşitlikler kurulmuştur (4.1-4.17). BED tipli kafalar için ise, arına girme, yana doğru kesme, aşağı doğru kesme ve yukarıya doğru kesme modlarında eşitlikler kurulmuştur (4.18-4.33).

BEP tipi kesici kafa için bütün kesme modlarında stabilite analizi için kullanılan parametrelerin gösterimi Şekil 4.1-4.5’de verilmiştir.

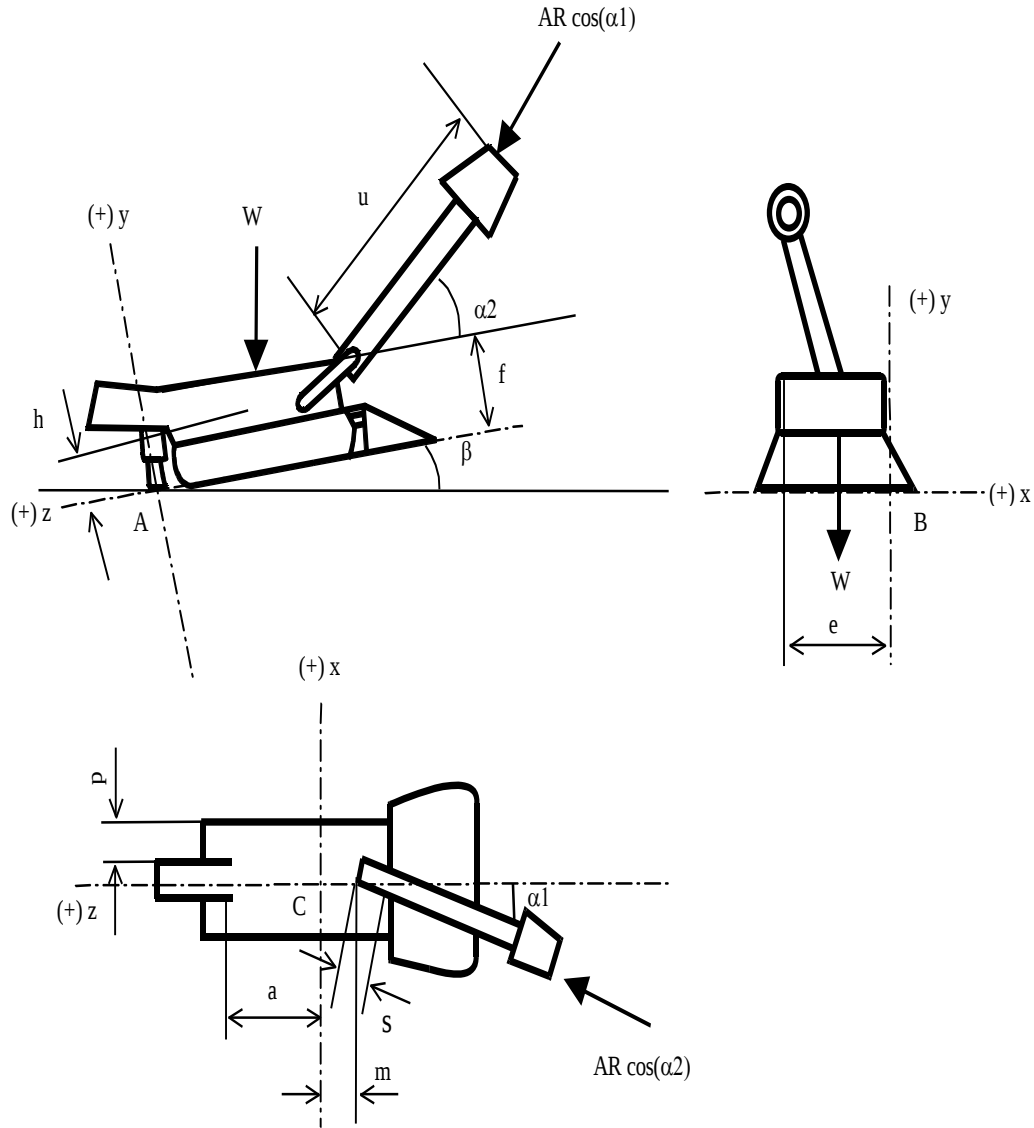
BED tipi kesici kafa için ise bütün kesme modlarında stabilite analizi için kullanılan parametrelerin gösterimi Şekil 4.6-4.9’da verilmiştir [35].

Tablo 4.1 : BKM’ların stabilite analizinde kullanılan makina ve tünel parametreleri [35].

Makina ve Tünel Parametreleri	Semboller
Makina Ağırlığı (kN)	W
Makina Genişliği(m)	e
Palet Genişliği(m)	p
Bom Uzunluğu(m)	u
Makinanın ağırlık merkezi ile bomun başlangıç noktası arasındaki mesafe (m)	m
Makinanın ağırlık merkezi ile arka ayağı arasındaki mesafe (m)	a
Bom yatay konumda iken zemin ile arasındaki mesafe (m)	f
Makinanın ağırlık merkezi ile zemin arasındaki mesafe (m)	h
Bomun yatay dönme noktası ile dikey dönme noktası arasındaki mesafe (m)	S
Bomun yatay düzlemde yana doğru yapabildiği maksimum açı (derece)	α_1
Bomun dikey düzlemde yukarı doğru yapabildiği maksimum açı (derece)	α_2
Bomun dikey düzlemde aşağı doğru yapabildiği maksimum açı (derece)	α_3
Boma ilerleme yönünde etki eden kuvvet (kN)	SR
Boma etki eden eksenel kuvvet (kN)	AR
Boma etki eden dikey kuvvet (kN)	VR
Makina ile zemin arasında sürtünme katsayısı	μ
Tünel veya galerinin eğimi (derece)	β

4.2.1 BEP tipi BKM'ların stabilite analizi

4.2.1.1 Arına doğru grime modunda stabilite analizi

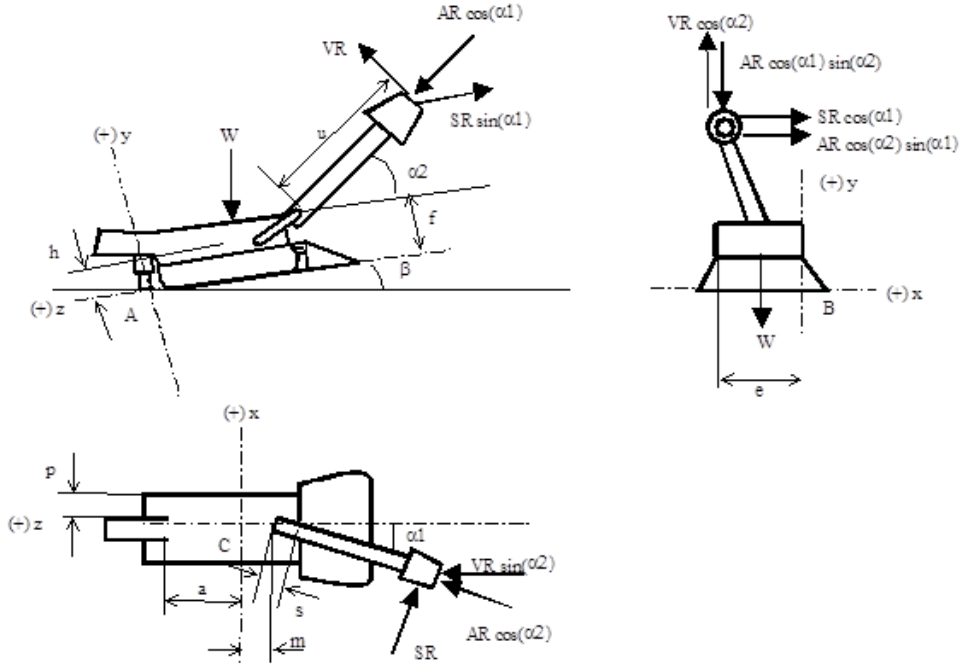


Şekil 4.1 : BEP tipli bomlu kazı makinasının arında doğru girme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler [35].

Makinanın kayma durumu (z eksenı boyunca)

$$A4 = W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) \quad (5.1)$$

4.2.1.2 Üstten kesme modunda stabilite analizi



Şekil 4.2 : BEP tipli bomlu kazı makinasının üstten kesme modunda stabilite analiz için kullanılan parametreler [35].

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$B1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((SR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot ((u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + s \cdot \cos(\alpha1) + m)) + ((-VR) \cdot \sin(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + SR \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1))) \quad (5.2)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$B2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((SR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2) + f) + (VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1) + e/2)) \quad (5.3)$$

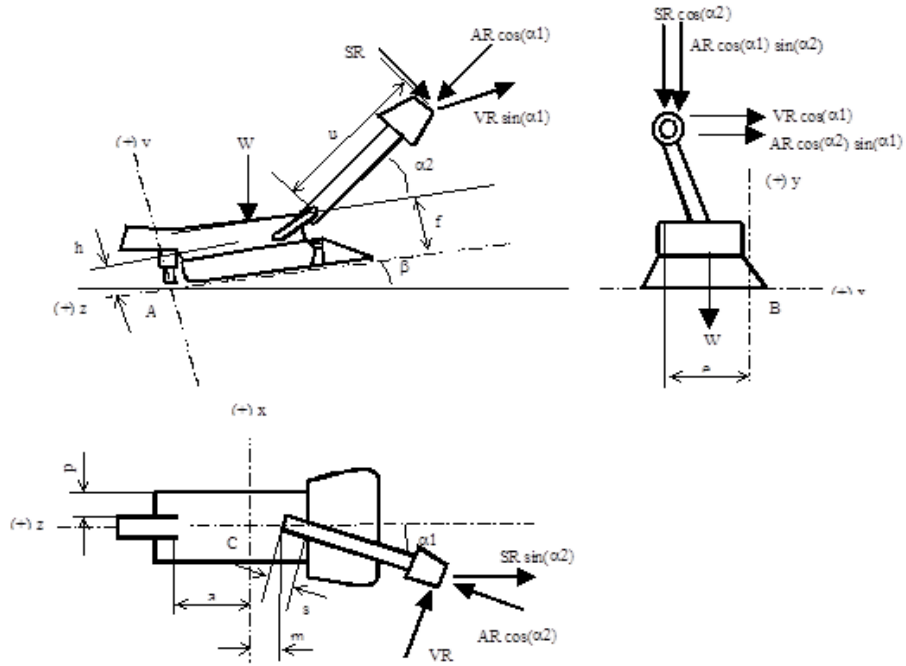
Makinanın geriye devrilme durumu (A noktasına göre momenti)

$$B3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + VR \cdot \sin(\alpha2) - SR \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) + (VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + s \cdot \cos(\alpha1) + m + a)) \quad (5.4)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenı boyunca)

$$B4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (VR \cdot \sin(\alpha2) + AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) - SR \cdot \sin(\alpha1)) \quad (5.5)$$

4.2.1.3 Yukarıya doğru kesme modunda stabilite analizi



Şekil 4.3 : BEP tipli bomlu kazı makinasının yukarı doğru kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler [35]

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$C1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((VR \cdot \cos(\alpha 1) + AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot ((u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 1) + s \cdot \cos(\alpha 1) + m)) + (SR \cdot \sin(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 1) + VR \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1) + s \cdot \sin(\alpha 1))) \quad (5.6)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$C2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((VR \cdot \cos(\alpha 1) + AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2) + f) + (-SR \cdot \cos(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1) + s \cdot \sin(\alpha 1) + e/2)) \quad (5.7)$$

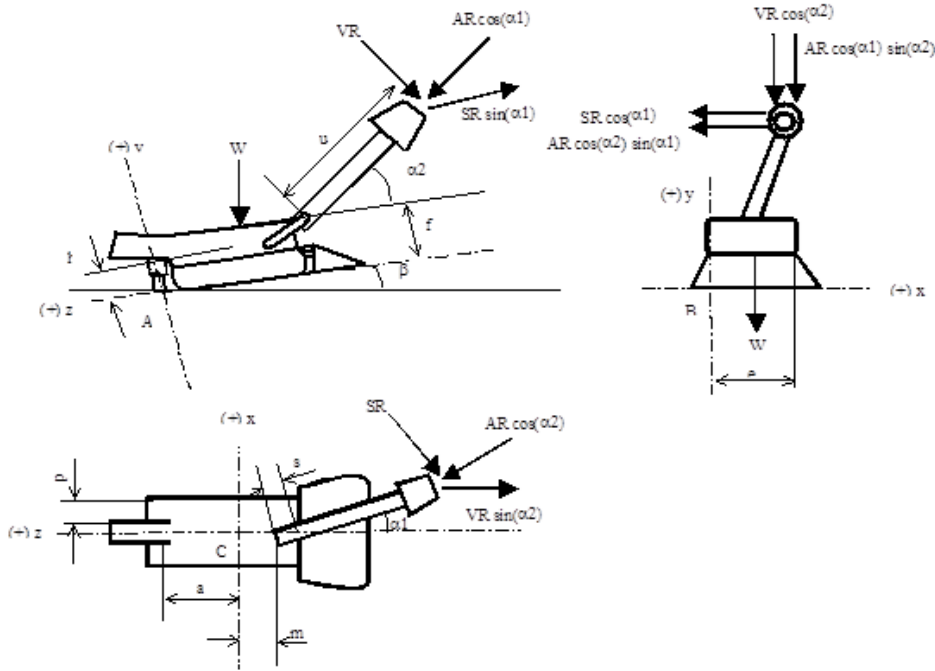
Makinanın geriye devrilme durumu (A noktasına göre momenti)

$$C3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2) - SR \cdot \sin(\alpha 2) - VR \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) + (-SR \cdot \cos(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2) + s \cdot \cos(\alpha 1) + m + a)) \quad (5.8)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenine boyunca)

$$C4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (-SR \cdot \sin(\alpha 2) + AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2) - VR \cdot \sin(\alpha 1)) \quad (5.9)$$

4.2.1.4 Alttan kesme modunda stabilite analizi



Şekil 4.4 : BEP tipli bomlu kazı makinasının alttan kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler [35].

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$D1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((SR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot ((u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + s \cdot \cos(\alpha1) + m)) + (VR \cdot \sin(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + SR \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1))) \quad (5.10)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$D2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((SR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2) + f) + (-VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1) + e/2)) \quad (5.11)$$

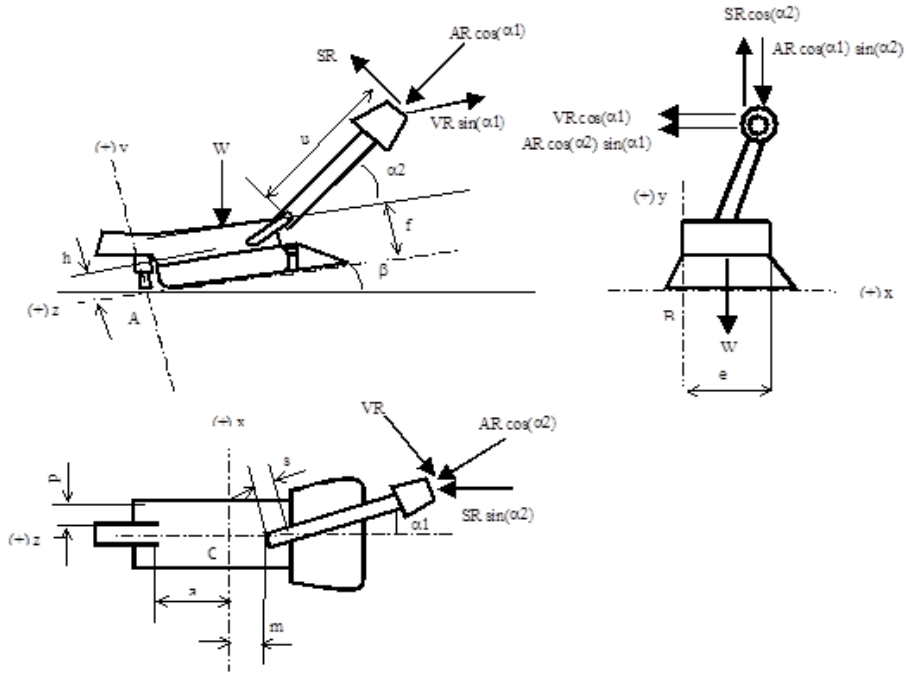
Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$D3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((-SR \cdot \sin(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) - VR \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) + (-VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + s \cdot \cos(\alpha1) + m + a)) \quad (5.12)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenine boyunca)

$$D4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (-VR \cdot \sin(\alpha2) + AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) - SR \cdot \sin(\alpha1)) \quad (5.13)$$

4.2.1.5 Aşağı doğru kesme modunda stabilite analizi



Şekil 4.5 : BEP tipli bomlu kazı makinasının aşağı doğru kesme modunda stabilite analizi [35].

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$E1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((VR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + s \cdot \cos(\alpha1) + m)) + (-SR \cdot \sin(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + VR \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1))) \quad (5.14)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$E2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((VR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2) + f) + (SR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1) + e/2)) \quad (5.15)$$

Makinanın geriye devrilme durumu (A noktasına göre momenti)

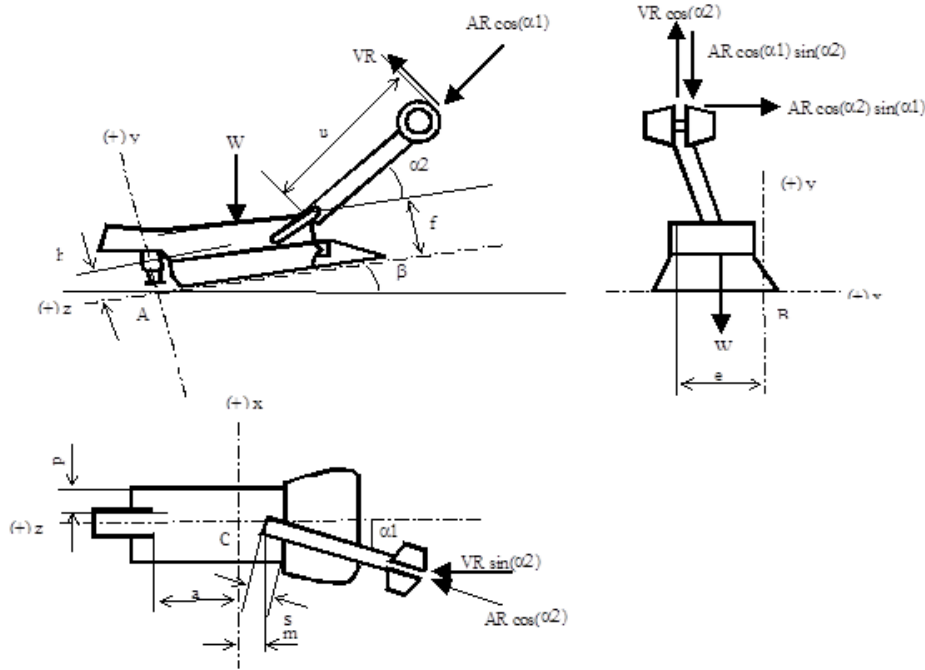
$$E3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((-VR \cdot \sin(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + SR \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) + (SR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + s \cdot \cos(\alpha1) + m + a)) \quad (5.16)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenine boyunca)

$$E4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (SR \cdot \sin(\alpha2) + AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) - VR \cdot \sin(\alpha1)) \quad (5.17)$$

4.2.2 BED tipi bomlu kazı makinalarının stabilite analizi

4.2.2.1 Arına girme modunda stabilite analizi



Şekil 4.6 : BED tipli bomlu kazı makinasının arına girme modunda stabilite analizinde kullanılan parametreler [35].

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$A1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot ((u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + s \cdot \cos(\alpha1) + m)) + ((-VR) \cdot \sin(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1))) \quad (5.18)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$A2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2) + f) + (VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1) + e/2)) \quad (5.19)$$

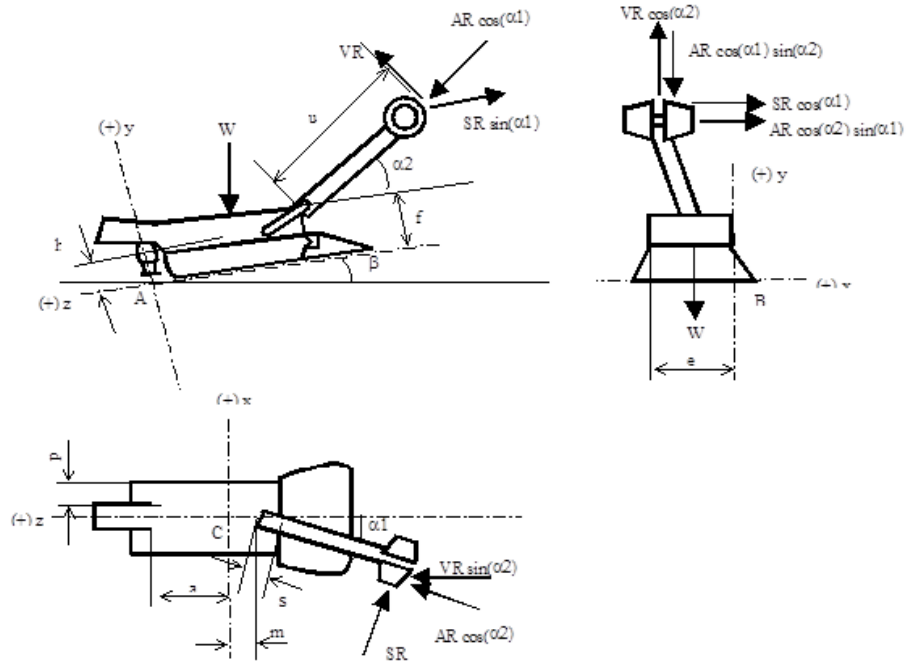
Makinanın geriye devrilme durumu (A noktasına göre momenti)

$$A3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + VR \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) + (VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + s \cdot \cos(\alpha1) + m + a)) \quad (5.20)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenini boyunca)

$$A4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (VR \cdot \sin(\alpha2) + AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2)) \quad (5.21)$$

4.2.2.2 Yana doğru kesme modunda stabilite analizi



Şekil 4.7 : BED tipli bomlu kazı makinasının yana doğru kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler [35].

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$B1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((SR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot ((u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + s \cdot \cos(\alpha1) + m)) + ((-VR) \cdot \sin(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \cos(\alpha1) + SR \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1))) \quad (5.22)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$B2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((SR \cdot \cos(\alpha1) + AR \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2) + f) + (VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha2) \cdot \sin(\alpha1) + s \cdot \sin(\alpha1) + e/2)) \quad (5.23)$$

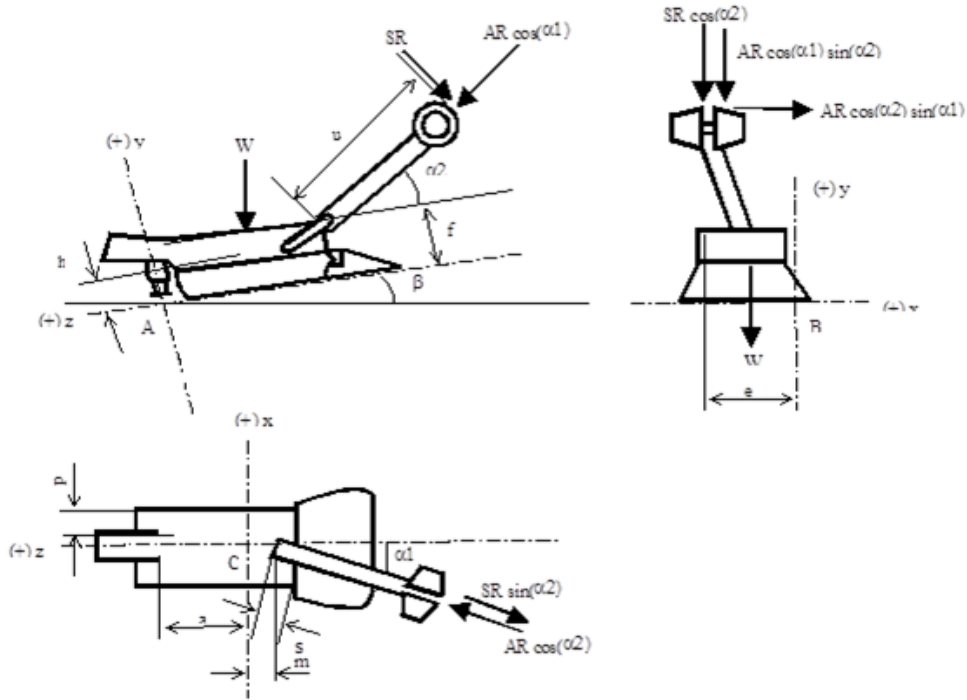
Makinanın geriye devrilme durumu (A noktasına göre momenti)

$$B3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + VR \cdot \sin(\alpha2) - SR \cdot \sin(\alpha1)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) + (VR \cdot \cos(\alpha2) - AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \sin(\alpha2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) + s \cdot \cos(\alpha1) + m + a)) \quad (5.24)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenini boyunca)

$$B4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (VR \cdot \sin(\alpha2) + AR \cdot \cos(\alpha1) \cdot \cos(\alpha2) - SR \cdot \sin(\alpha1)) \quad (5.25)$$

4.2.2.3 Yukarıya doğru kesme modunda stabilite analizi



Şekil 4.8 : BED tipli bomlu kazı makinasının yana doğru kesme modunda stabilite analizi için kullanılan parametreler [35].

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$C1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot ((u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 1) + s \cdot \cos(\alpha 1) + m)) + (SR \cdot \sin(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1) + s \cdot \sin(\alpha 1))) \quad (5.26)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$C2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2) + f) + (-SR \cdot \cos(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1) + s \cdot \sin(\alpha 1) + e/2)) \quad (5.27)$$

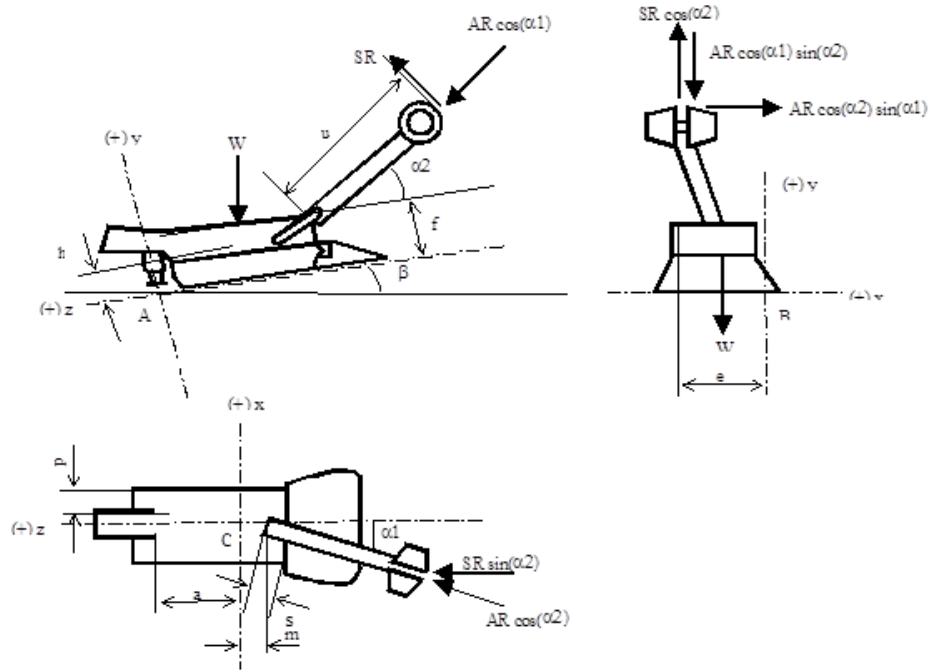
Makinanın geriye devrilme durumu (A noktasına göre momenti)

$$C3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2) - SR \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) + (-SR \cdot \cos(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2) + s \cdot \cos(\alpha 1) + m + a)) \quad (5.28)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenini boyunca)

$$C4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (-SR \cdot \sin(\alpha 2) + AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2)) \quad (5.29)$$

4.2.2.4 Aşağı doğru kesme modunda stabilite analizi



Şekil 4.9 : BED tipli bomlu kazı makinasının aşağı doğru kesme modunda stabilite analiz için kullanılan parametreler [35].

Makinanın dik eksen etrafında dönme durumu (C noktasına göre momenti)

$$D1 = (W \cdot \mu \cdot \cos(\beta) \cdot p) - ((AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot ((u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 1) + s \cdot \cos(\alpha 1) + m)) + (-SR \cdot \sin(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \cos(\alpha 1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1) + s \cdot \sin(\alpha 1))) \quad (5.30)$$

Makinanın yana devrilme durumu (B noktasına göre momenti)

$$D2 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot e/2) - ((AR \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2) + f) + (SR \cdot \cos(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 2) \cdot \sin(\alpha 1) + s \cdot \sin(\alpha 1) + e/2)) \quad (5.31)$$

Makinanın geriye devrilme durumu (A noktasına göre momenti)

$$D3 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot a - W \cdot \sin(\beta) \cdot h) - ((AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2) + SR \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (f + u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) + (SR \cdot \cos(\alpha 2) - AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \sin(\alpha 2)) \cdot (u \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2) + s \cdot \cos(\alpha 1) + m + a)) \quad (5.32)$$

Makinanın kayma durumu (z eksenine boyunca)

$$D4 = (W \cdot \cos(\beta) \cdot \mu) - (SR \cdot \sin(\alpha 2) + AR \cdot \cos(\alpha 1) \cdot \cos(\alpha 2)) \quad (5.33)$$

4.3 Bomlu Kazı Makinalarının Stabilite Analizi İçin Geliştirilen Bilgisayar Programı

Bir bomlu kazı makinasının stabilite analizi, bomlu kazı makinasının kazı arınındaki herhangi bir konumda makinaya etki eden bom kuvvetlerinin moment değerlerini hesaplayarak yapılmaktadır. Bunu etkin bir şekilde yapabilmek amacıyla, BEP ve BED tipli kesici kafanın arın üzerindeki herhangi bir konumda stabilite analizini yapmak için C++ programı kullanılarak bir stabilite analiz programı yazılmıştır [35].

Geliştirilen bu programda, BEP tipli makinanın arına girme, üstten kesme, alttan kesme, yukarıya ve aşağıya doğru kesme modlarında stabilite analizi yapılabilirken, BED tipli makinada ise arına girme, yanlara doğru kesme, aşağıya doğru ve yukarıya doğru kesme modlarında analizi yapılabilmektedir.

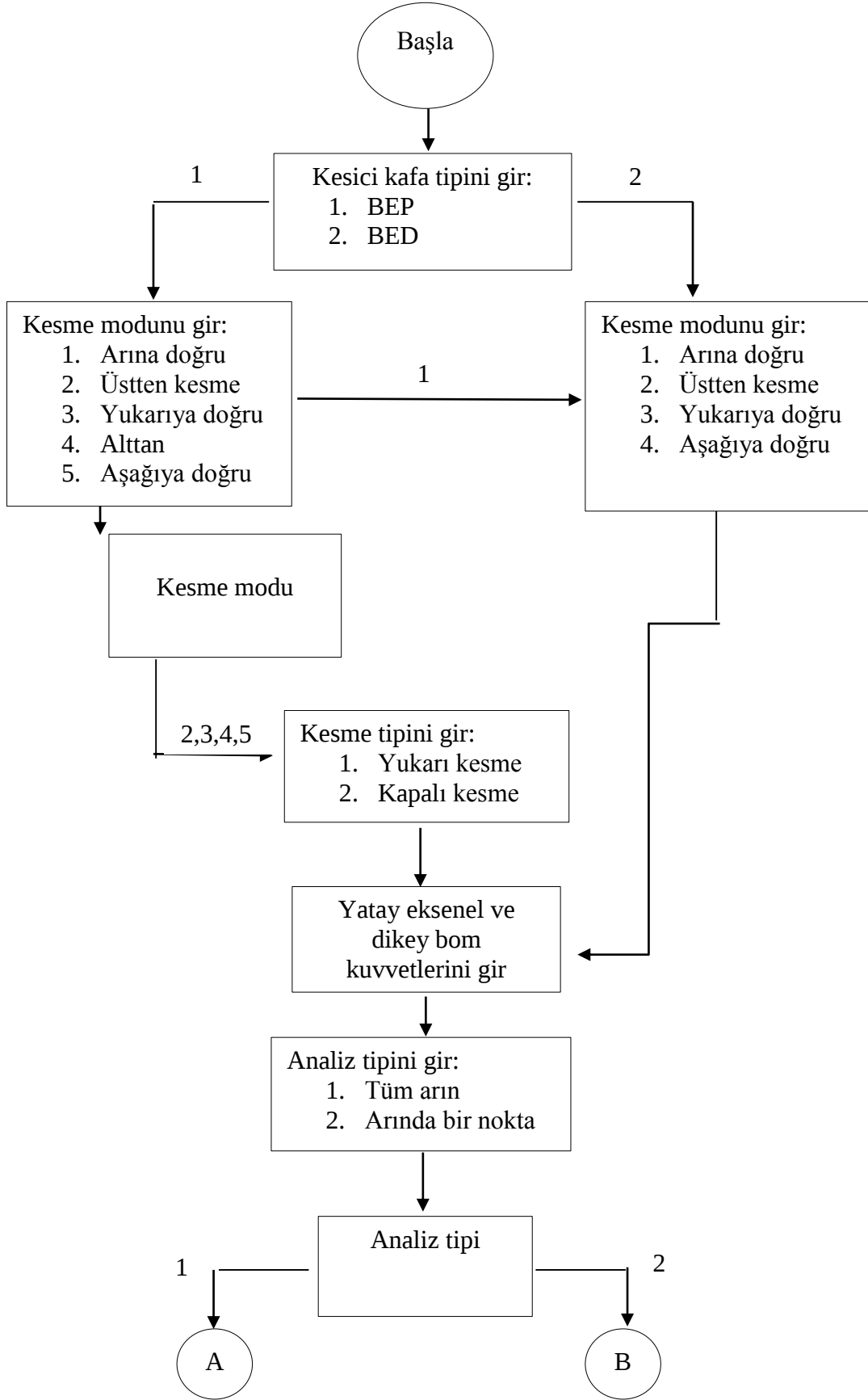
Program, dik eksen etrafında dönme, yana devrilme, geriye devrilme durumları için moment değerleri, kayma durumu için de kuvvet değerlerini, arının herhangi bir konumunda veya bütün arın üzerinde ayrı ayrı vermektedir.

Program akış şeması Şekil 4.10'da gösterildiği gibidir. Programa ilk önce hangi kesici kafa tipindeki bomlu kazı makinasının stabilite analizi yapılacağı girilir. Ardından seçilen makinaya göre kesme modu seçilir. Analizin bütün arında ya da arının sadece bir noktasında yapılması seçeneği bulunmaktadır. Analizin bütün arında yapılmasının istendiği durumlarda bomun zemine paralel olduğu konuma göre bomun maksimum yapabildiği α_1 , α_2 , α_3 açıları girilir, program 5 derecelik aralıklarla arının tamamını analiz eder, diğer durum da ise arında istenilen noktanın yatay ve dikey düzlemde yaptığı açılar girilir.

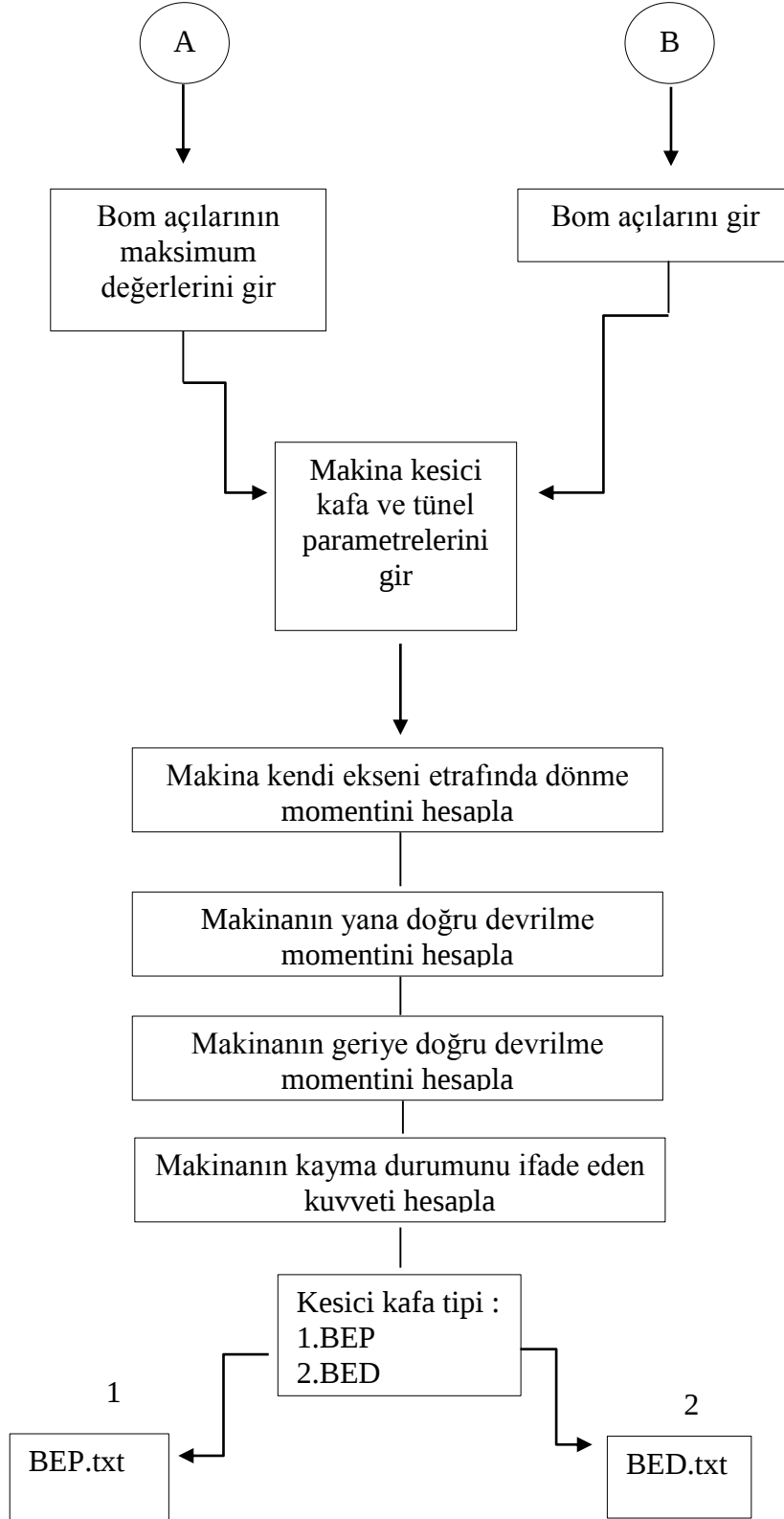
Makina, kesici kafa ve tünel parametreleri girilerek, programdan stabilite analizi çıktısı alınır. Program ayrıca makinanın bom uzunluğu ve α_1 , α_2 , α_3 açılarını kullanarak, kesebileceği maksimum tünel kesitini de verir.

BKM'nın kesebileceği maksimum tünel kesiti simetrik olduğu için tünelin sol yarısı içindir. Programın çıkış dosyasında bulunan profil verileri Surfer programı ile çizilebilir ayrıca analiz sonuçları da bu programda eş değer eğrileri olarak gösterilebilir.

Bu program kullanılarak yapılan stabilite analiz Bölüm 5'te detaylı olarak anlatılacaktır.



Şekil 4.10 : BKM stabilite analizi programının akış diyagramı.



Şekil 4.10'un devam : BKM stabilite analizi programının akış diyagramı.

5. MİNİ-DİSK KESKİLİ BOMLU KAZI MAKİNALARININ STABİLİTE ANALİZİ

5.1 Giriş

Bomlu kazı makinaları, mobilizasyonların kolaylığı, saha şartlarına kolay uyum sağlaması ve selektif kazıya uygun olması sebebiyle mekanize kazı uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak sert ve aşındırıcı kayalarda tam cepheli mekanize kazı sistemlerine göre keskinin hızlı aşınması ve boma etkiyen kuvvetlerin artması sebebiyle kesme verimliliği açısından düşük olmaktadır. Boma etkiyen kuvvetlere karşı daha duraylı olabilmesi ve sert kayaları kesebilmesi için daha ağır ve güçlü BKM'ları üretilse de bu durum makina boyutlarının arttırdığı için mobilizasyonu zorlaştırmakta ve dar kesitli tünel veya galerilerde çalışabilmelerini engelleyerek esnek çalışma özelliklerini kaybettirmektedir.

Bu dezavantajı engellemek için araştırmacılar kesici kafa tasarımları ve yeni kesici kafa teknolojileri üzerine yoğunlaşmıştır. Su jeti ve PDC kullanılan keskinin bu teknolojilere örnek gösterilebilir.

Buna ek olarak BKM'larının kesici kafalarında kullanılan kama uçlu ve kalem uçlu keskinin yerine yeni keskinin kullanılması üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi Bölüm 3'te anlatılmıştır.

Bu bölümde mekanize kazı sistemlerinde kullanılması adına geliştirilen yeni bir keski tipi olan mini-disk tipi keskinin, BED tipli bomlu kazı makinası üzerinde kullanılması adına Colorado School of Mines Earth Mechanics Institute (EMI) tarafından tasarlanan ve kesme deneyleri yapılan mini diskli BED tipi kesici kafaya sahip BKM'sının stabilite analizi yapılmıştır.

5.2 EMI Tarafından Geliştirilmiş Olan Mini-Diskli Kesici Kafa Tasarımı

BKM'larının sert ve aşındırıcı kayalarda verimli çalışabilmesi için yeni tip keski ve kesici kafa tasarımları üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi de

Yucca Mountain Experimental Studies Facility (ESF) kapsamında EMI tarafından yürütülen mini-disk kesikli kesici kafa tasarımıdır [44].

BKM'ların değişik formasyonlara, tünel kesitlerine uyumluluğu, mobilizasyon kolaylığı ve kazı arınına hızlı erişimi özellikleri sebebiyle ESF kapsamındaki projelerde BKM'larının kullanılması kararlaştırılmıştır. Ancak bu proje kapsamında kullanılacak BKM'larının %40 oranında kuvars içeriğine sahip kaynaşmış tüfit olan yüksek aşındırıcı kayacı yenmesi gerekmektedir. Kalem uçlu kesiklerin bu tip kayacıkta hızlı yıpranmaları ve yapısal olarak bu kayaca uygun olmamaları nedeniyle piyasada bulunan en güçlü makinalar bile kesemeyecektir.

Bu durum üzerine disk kesiklerin BKM'larında kullanılması üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak üretilen disk kesiklerin boyutlarının büyüklüğü sebebiyle kesici kafalara montajının zorluğu ve kesici kafaya etki edecek kuvvetlerin BKM'larının tolere edebileceği limitlerin üzerinde olması üzerine 1992 yılında EMI tarafından Şekil 5.1'de gösterilen 125 mm. (5 inç) çapında mini-disk kesikler geliştirilmiştir.



Şekil 5.1 : 17 inçlik disk keski (solda) ve 5 inçlik mini-disk keski [45].

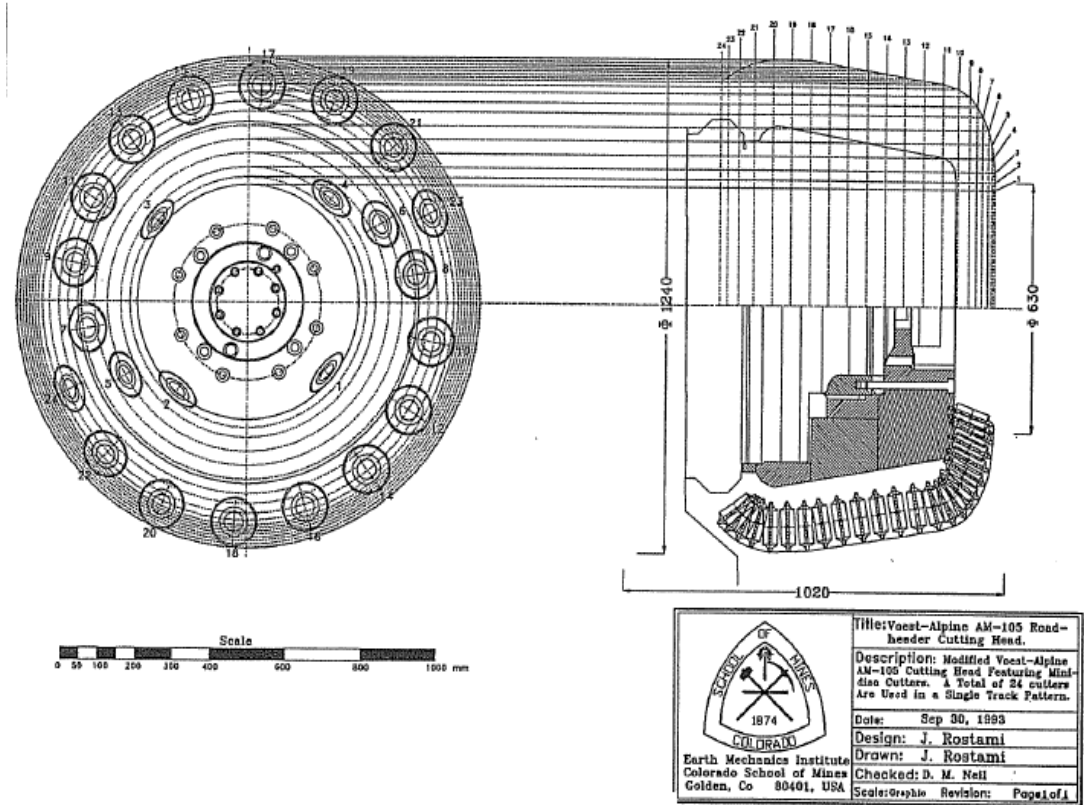
Geliştirilen bu keski tipi ile, yüksek kesme derinliğine, düşük enerji tüketimi ile ulaşılmıştır. Küçük boyutundan dolayı da BKM'larının kesici kafalarında kullanılabilme şansı doğmuştur.

EMI tarafından 98 ton ağırlığında Voest-Alpine (VA) AM-105 BED tipi BKM'ına yerleştirilmek üzere kesici kafa tasarımları yapılmıştır. Bu tasarımlar sırasında EMI ve VA ortak olarak çalışmışlardır. Bu tasarımda 125 mm çapında ve 7 mm uç genişliğinde mini-diskler kullanılmıştır.

İlk olarak kalem uçlu keskiye sahip olan orjinal kafa üstüne mini-diskli keskilerin monte edilerek bir kafa dizaynı yapılmıştır. Bu dizaynın parametreleri Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1 : Minidiskli orjinal kesici kafanın dizayn parametreleri [44].

Kesici kafa çapı	1240 mm
Kesici kafa uzunluğu	785 mm
Maksimum keski aralığı	50 mm
Keski sayısı	24 adet
Dizi sayısı	2
Hat başına düşen keski sayısı	1



Şekil 5.2 : Mini-diskli orjinal kesici kafanın teknik çizimi [44].

Bu kesici kafada bulunan keskilerin kafadaki konumları ise Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 : Mini-diskli orjinal kesici kafanın keski konumları [44].

Keski No	Dizi No	Eğim Açısı	Konum Açısı
1	1	70	320
2	1	65	230
3	1	65	140
4	1	60	50
5	1	55	209.5
6	1	45	29.5
7	1	35	189
8	1	25	9
9	1	15	168.5
10	1	10	348.5
11	1	10	148
12	1	10	328
13	1	10	127.5
14	1	10	307.5
15	1	10	107
16	1	10	287
17	1	10	86.5
18	1	8	266.5
19	1	4	66
20	1	-1	246
21	1	-15	45.5
22	1	-30	225.5
23	1	-45	25
24	1	-55	205

Mini-disk keskili BKM’larında yanal kuvvetler, BKM’larının performansı için sınırlandırıcı bir limit oluşturmaktadır. BKM’nın maksimum tolere edebileceği yanal kuvvet, makinanın ağırlığına ve makinanın paletleri ile yerin sürtünme açısına bağlıdır. Test edilen AM-105 makinası için bu değer 150 kN ile sınırlandırılmıştır. Bunun üstündeki yanal kuvvetlerden makinanın kazı verimi düşeceği gibi stabilite sorunları da ortaya çıkacaktır.

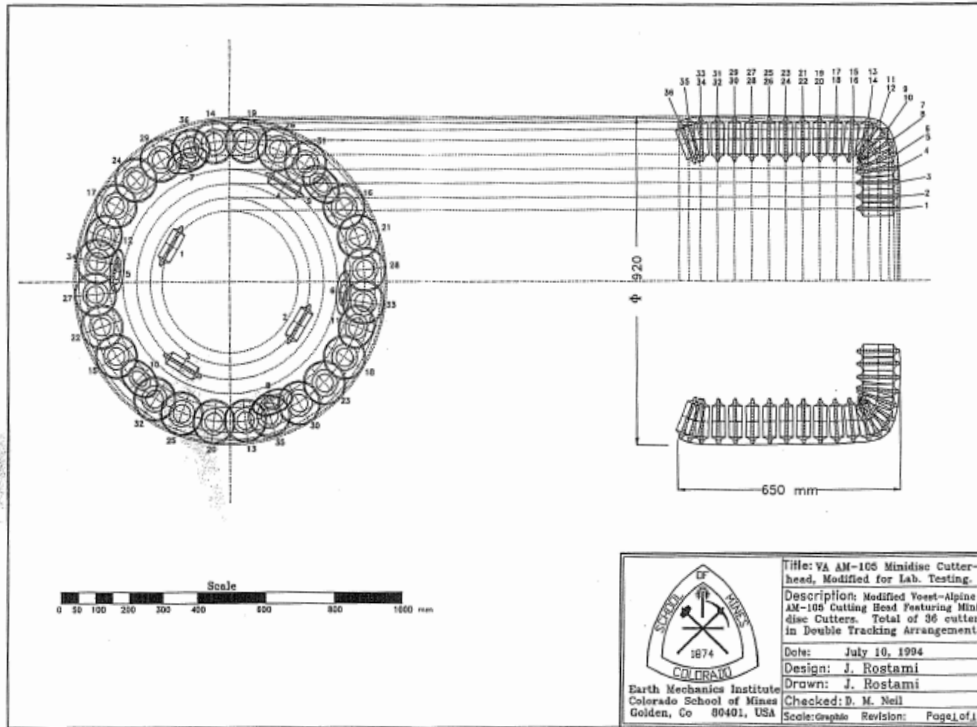
Yanal kuvvetler için oluşan 150 kN’luk sınıra ek olarak kaynaşmış tüfün verimli derinlikte kesilebilmesi için normal kuvvette 40 ile 50 kN arasında bir sınırlandırılmaya da gidilmiştir. Bunun sonucunda test sırasında kesici kafada sadece 3 ile 4 keski kayaç ile temas edebilmiştir. Bu durum etkin mekanize kazı için oldukça

yetersizdir. Buna ek olarak temas eden keski sayısının azlığı makinaya etki eden titreşimi arttıracak ve makinanın zarar görmesine neden olacaktır.

Bu durumun aşılması için kesici kafa tasarımı yeniden gözden geçirilmiş ve Tablo 5.3’de verilen kesici kafa parametrelerine sahip Şekil 5.3’de teknik çizimi olan kafa tasarlanmıştır.

Tablo 5.3 : Minidiskli modifiye kesici kafanın tasarım parametreleri [44].

Kesici kafa çapı	910 mm
Kesici kafa uzunluğu	785 mm
Maksimum keski aralığı	50 mm
Keski sayısı	36 adet
Dizi sayısı	4
Hatbaşına düşen keski sayısı	2



Şekil 5.3 : Minidiskli modifiye kesici kafanın teknik çizimi [44].

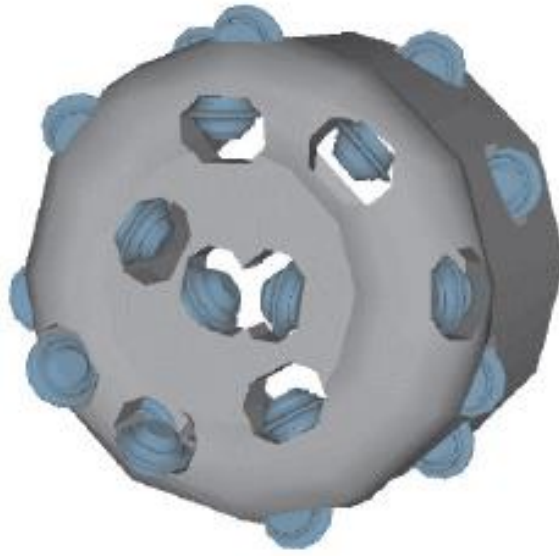
Yapılan değişikliklerden biri, keski dizi sayısının 4’e çıkartılması ve hat başına düşen keski sayısının 2 olması ile keskinin şerbeş şeklinde kesmesidir. Bu durum da bom hızını arttırdığından dolayı üretim miktarını arttırmaktadır. Bu tasarımda kullanılan burun kesikleri, yana doğru kesme durumunda makinanın bu işlemi yapabilme kabiliyetini arttıracaktır. Helisel yerleştirilen keskinin kesilen malzemenin malzeme

yükleme ünitesine yakın düşmesini sağlayacaktır. Tablo 5.4'te bu kesici kafada kullanılan keskilerin konumları verilmektedir.

Tablo 5.4: Minidiskli modifiye kesici kafadaki keski konumları[44].

Keski No	Dizi No	Eğim Açısı	Konum Açısı
1	1	90	149
2	1	90	329
3	1	89	239
4	1	85	59
5	2	70	174.5
6	2	70	354.5
7	2	58	110
8	2	58	290
9	2	45	45.5
10	2	45	225.5
11	2	32	341
12	2	32	161
13	2	12	276.5
14	2	12	96.5
15	2	6	212
16	2	6	32
17	2	0	147.5
18	2	0	327.5
19	2	0	83
20	2	0	263
21	2	0	18.5
22	2	0	198.5
23	2	0	314
24	2	0	134
25	2	0	249.5
26	2	0	69.5
27	2	0	185
28	2	0	5
29	2	0	120.5
30	2	0	300.5
31	2	0	56
32	2	0	236
33	2	0	351.5
34	2	-2	171.5
35	2	-15	287
36	2	-22	107

Bu tasarımın ardından, Voest Alpine of Austria şirketi tarafından son bir modifikasyon daha yapılmıştır. Bu tasarımda ise burun kesikleri, köşe keski bölgesine taşınmıştır. Ayrıca kesikler zikzak deseniyle kafaya yerleştirilmiştir. Böylece kazı, kesici kafanın ortasından başlayarak, kazılan malzeme kesici kafanın köşe kesiklerinin bulunduğu yerden çıkacaktır. Bu tasarımda kesikler 10° 'lik açılar ile yerleştirilmiş olup böylece her keskiye eşit dağılım sağlanmıştır. Tasarlanan bu keskinin 3 boyutlu modeli ve üretilmiş hali Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Diğer tasarım parametreleri aynı tutulmuştur.



Şekil 5.4 : Minidiskli nihai kesici kafanın 3 boyutlu modeli [41].



Şekil 5.5 : Mini-diskli modifiye kesici kafa [41].

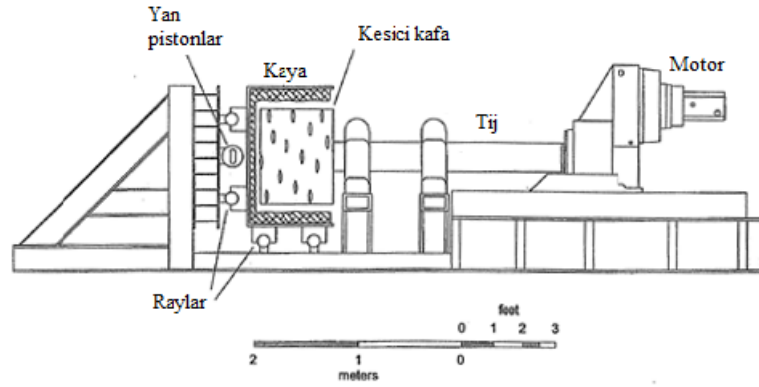
Üretilen nihai kesici kafanın üzerindeki keskilerin konumları ise Tablo 5.6’da gösterilmiştir.

Tablo 5.5 : Mini-diskli nihai kesici kafadaki keski konumları [44].

Keski No	Dizi No	Eğim Açısı	Konum Açısı
1	2	46	137
2	2	46	317
3	2	26	100
4	2	26	280
5	2	0	58.5
6	2	0	238.5
7	2	0	20
8	2	0	200
9	2	0	339
10	2	0	159
11	2	0	300
12	2	0	120
13	2	0	259
14	2	0	79
15	2	0	217.5
16	2	0	37.5
17	2	0	178.5
18	2	0	358.5
19	2	0	249
20	2	0	69
21	2	0	290
22	2	0	110
23	2	0	328
24	2	0	148
25	2	0	9.5
26	2	0	189.5
27	2	0	48
28	2	0	228
29	2	0	90
30	2	0	270
31	2	0	130
32	2	0	310
33	2	-26	168
34	2	-26	348
35	2	-46	207
36	2	-46	27

5.3 Mini-disk Keskili BED Tipli Kesici Kafanın Denenmesi

Mini-disk keskili BED tipli kesici kafa, EMI Kazı Laboratuvarında bulunan Şekil 5.6.'da gösterilen yatay sondaj makinası ile test edilmiştir. Orjinalinde, rotari tipli sondaj bitlerinin tasarımılanması ve incelenmesi faaliyetlerine kullanılan bu makina 1 mt. çapına kadar kesici kafaları da test etmeye olanak sağlar.



Şekil 5.6 : Yatay sondaj makinasının temsili resmi [44].

Kullanılan yatay sondaj makinası 60 devir/dakika dönüş hızına kadar hızla kullanılabilir. Yatay sondaj makinasında BED tipi kafaların kesmesini temsillemek için hidrolik pistonlar kullanılmıştır.

Bu deneyde ortalama 83 MPa ile 135 MPa tek eksenli basınç dayanımına sahip ignimbrit tuf örnekleri kullanılmıştır. Bu örnekler çelik bir kutu içine çimento ile sabitlenmiştir. Böylelikle test sırasında numunelerin sabit kalması sağlanır.

Deney 30 ile 60 saniye arasında sürmektedir. Her deney sonunda kaya, kesici kafadan uzaklaştırılır ve kesilmiş malzeme temizlenir. Sahada olan çalışmalarda kazılan malzeme yer çekimi etkisi ile düşeceği ancak test sırasında numunenin kutusundan düşmemesi sebebi ile bu işlem yapılmaktadır..

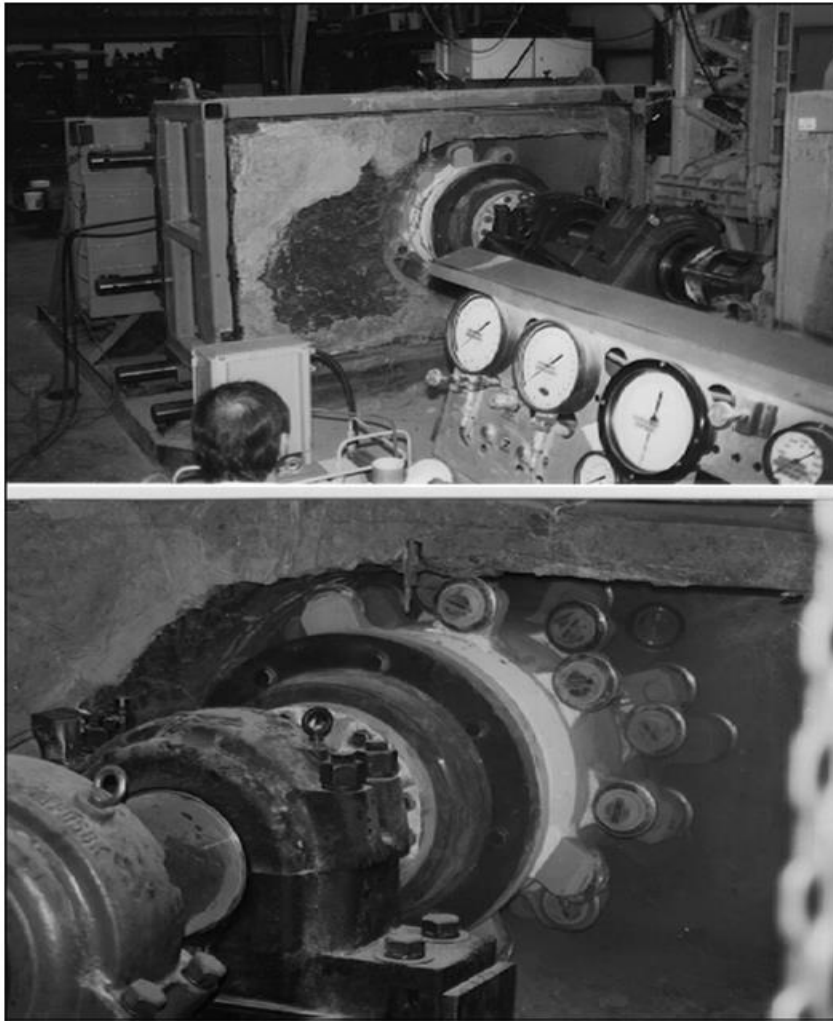
Test sonucunda, kesme kuvvet, tork, ilerleme, dönüş hızı ve açısal konum izlenebilmektedir.

Deneyde, arına girme modu ve aşağıya doğru kesme modu olmak üzere iki konumda kesim yapılmıştır. Bunun sebebi yatay sondaj makinasının yana doğru kesme moduna uygun tasarıma sahip olmaması, ve yana doğru kesme modundaki reaksiyon kuvvetlerinin yüksek olmasıdır.

Arına girme modunda 83 MPa tek eksenli basma dayanımına ve 8 MPa çekme dayanımına sahip numune kullanılmıştır.

Aşağı doğru kesme modunda ise örneğin üst kısmı traşlanarak kesici kafanın aşağıya doğru kesme hareketini yapabileceği hareket alanı sağlanır. Aşağı doğru kesme konumunda kullanılan numune ise 135 MPa tek eksenli basma dayanımına ve 12 MPa çekme sahiptir. Aşağı doğru kesme modundaki kesme derinliği 400 mm olarak seçilmiştir.

Şekil 5.7’de gösterilen arına doğru girme modundaki testlerinin sonucunda kesici kafa beklenen performansı vermiştir. Ölçülen değerlere göre 25 ile 34 kW-saat/m³ ‘lük spesifik enerji elde edilmiştir. Aşağıya doğru kesme modunda ise 16 kW-saat/m³ spesifik enerji hesaplanmıştır. Keskilerde herhangi bir aşınma veya yapısal sorun oluşmamış olup, titreşim değerlerinden kaynaklı bir sorun ortaya çıkmamıştır.



Şekil 5.7 : Mini-disk keskili BED tipli kesici kafa kesme testleri [44].

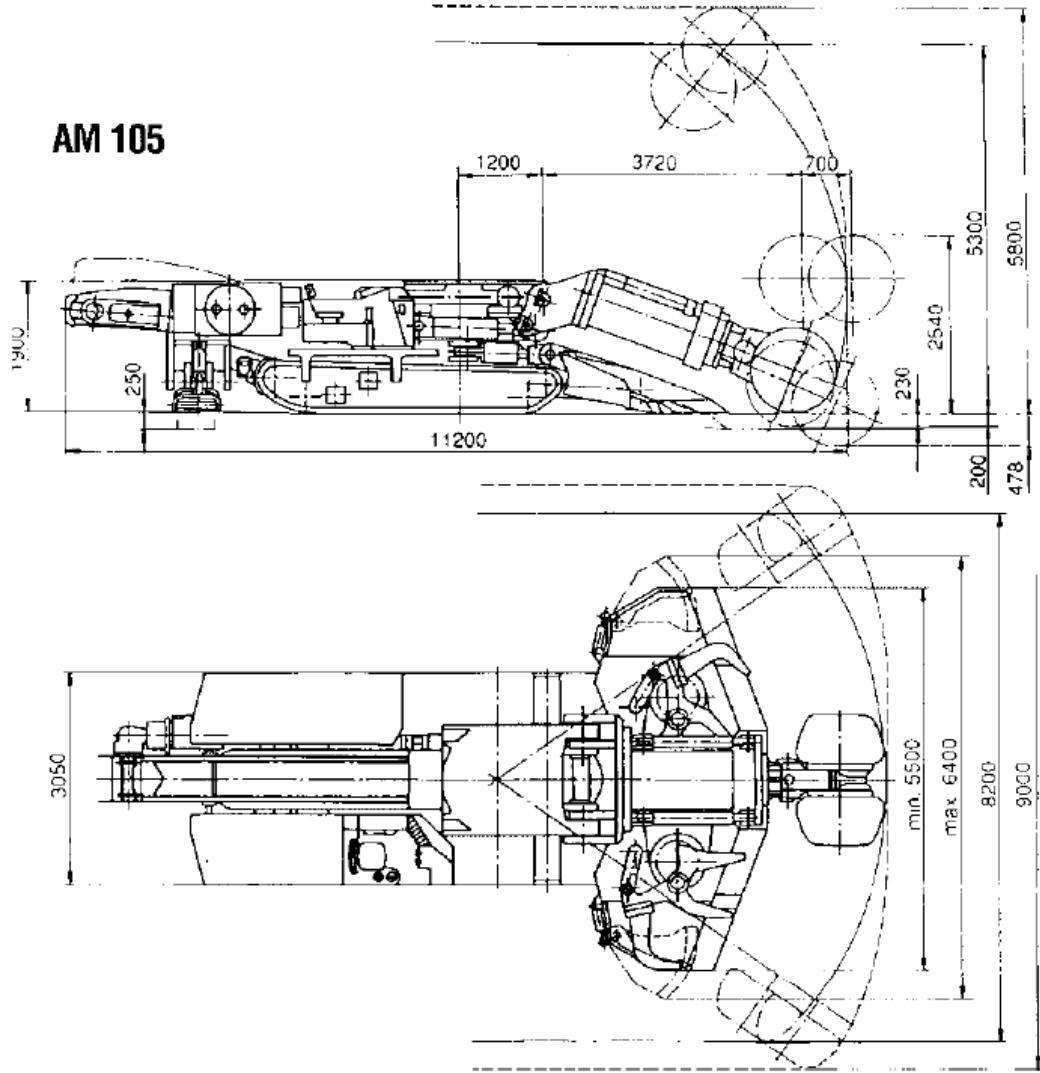
5.4 Mini-disk Keskili BED tipi Bomlu Kazı Makinasının Stabilit  Analizi

Bu çalışmada mini-disk keskili BED tipi BKM'lerinin EMI tarafından tasarlanan bütün kesici kafalarının stabilite analizi yapılmıştır. Bütün kafalar için kesici kafanın arına saplanma derinliği 400 mm, arına girme modunda bir keski için maksimum kesme derinliği 5 mm, diğer kesme modları için ise bir keski için maksimum kesme derinliği 10 mm alınmıştır. Buna ek olarak Tablo 5.6'da keski konumları belirtilen kalem uçlu keskiye sahip BED tipi kesici kafalı modelinin de stabilite analizi yapılmıştır.

Tablo 5.6 : Kalem uçlu keskili kesici kafadaki keski konumları

Keski No	Dizi No	Eğim Açısı	Konum Açısı	Keski No	Dizi No	Eğim Açısı	Konum Açısı
1	1	70	300	32	2	16	270
2	1	65	211	33	2	14	15
3	1	65	130	34	2	14	195
4	1	65	40	35	2	12	120
5	1	65	343	36	2	12	300
6	1	65	260	37	2	10	45
7	1	60	166	38	2	10	225
8	1	55	85	39	2	8	150
9	2	50	115	40	2	8	330
10	2	50	195	41	2	6	75
11	2	45	120	42	2	6	255
12	2	45	300	43	2	4	180
13	2	40	45	44	2	4	360
14	2	40	225	45	2	2	105
15	2	35	149	46	2	2	285
16	2	35	329	47	2	2	30
17	2	30	75	48	2	2	210
18	2	30	255	49	2	1	135
19	2	25	0	50	2	1	315
20	2	25	180	51	2	1	68
21	2	20	105	52	2	1	248
22	2	20	285	53	2	1	160
23	2	20	30	54	2	1	340
24	2	20	210	55	2	15	88
25	2	20	135	56	2	15	268
26	2	20	315	57	2	30	189
27	2	20	60	58	2	30	9
28	2	20	240	59	2	40	114
29	2	18	165	60	2	40	294
30	2	18	345	61	2	50	229
31	2	16	90	62	2	50	50

Kesici kafaların kullanıldığı makina ise Voest Alpine firmasına ait Şekil 5.9’da genel çizimi verilen AM 105 model BED tipi bir BKM’dır. Bu makinanın stabilite analizi için kullanılan parametreleri ile tünel parametreleri Tablo 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.8 : AM 105 BED tipi BKM'nın genel çizimi [44].

EMI tarafından tasarlanan kesici kafaların makinaya transverse (2 adet) olarak yerleştirileceği dikkate alınarak stabilite analizi yapılmıştır.

Bu durumda BED tipli kafanın herbir kesme modu için bom kuvvetlerinin hesaplanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeble keskinin profile girme değerleri ve keski konumları kullanılarak boma ilerleme yönünde etki eden kuvvet, eksenel kuvvet

ve dikey kuvvetlerin bütün kesme modlarında bir bilgisayar programı ile hesaplanmıştır [46].

Tablo 5.7 : BED tipli bir BKM'nın stabilite analizinde kullanılan makina ve galeri parametreleri.

Makina ve Tünel Parametreleri	Semboller	Değerler
Makina Ağırlığı (kN)	W	980
Makina Genişliği(m)	e	3.05
Palet Genişliği(m)	p	0.87
Bom Uzunluğu(m)	u	4.42
Makinanın ağırlık merkezi ile bomun başlangıç noktası arasındaki mesafe (m)	m	0
Makinanın ağırlık merkezi ile arka ayağı arasındaki mesafe (m)	a	3.78
Bom yatay konumda iken zemin ile arasındaki mesafe (m)	f	1.94
Makinanın ağırlık merkezi ile zemin arasındaki mesafe (m)	h	1.62
Bomun yatay dönme noktası ile dikey dönme noktası arasındaki mesafe (m)	S	1.20
Bomun yatay düzlemde yana doğru yapabildiği maksimum açı (derece)	α_1	45
Bomun dikey düzlemde yukarı doğru yapabildiği maksimum açı (derece)	α_2	50
Bomun dikey düzlemde aşağı doğru yapabildiği maksimum açı (derece)	α_3	30
Makina ile zemin arasında sürtünme katsayısı	μ	0.8
Tünel veya galerinin eğimi (derece)	β	0 ⁰

İki kafanın söz konusu olması ve kesme tiplerinin farklı olmasından dolayı bütün kesme modlarında farklı bom kuvvetleri elde edilmiştir. Yana doğru kesme hareketinde bir kafa, aşağıya ve yukarıya doğru kesme modlarında ise her iki kafa da kayaç ile kontak halindedir. Yukarı doğru kesme hareketi ile aşağıya doğru kesme hareketi aynı büyüklükte olup birbirinin ters yönüsü olduğundan dolayı yukarı doğru kesme hareketindeki değerler negative olarak kabul edilmiştir. Bütün kesici kafa ve kesme modlarında elde edilen kuvvet değerleri Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 : AM 105 BKM'sına bütün kesme konumlarında etki eden kuvvetler.

Kalem Uçlu Keski Kesici Kafa								
Arına girme konumu		Yana doğru kesme			Aşağı Doğru kesme		Yukarı Doğru Kesme	
AR	VR	AR	VR	SR	AR	SR	AR	SR
233.45	-110.99	103.35	-	114.62	65.9	-153.67	65.9	153.67
Minidiskli Orijinal Kesici Kafa								
Arına girme konumu		Yana doğru kesme			Aşağı Doğru kesme		Yukarı Doğru Kesme	
AR	VR	AR	VR	SR	AR	SR	AR	SR
463.9	-66.32	159.28	-	140.32	200.79	-218.44	200.73	218.46
Minidiskli Modifiye Kesici Kafa								
Arına girme konumu		Yana doğru kesme			Aşağı Doğru kesme		Yukarı Doğru Kesme	
AR	VR	AR	VR	SR	AR	SR	AR	SR
600.69	-89.47	85.87	-	255.29	225.51	-388.35	225.32	388.72
Minidiskli Nihai Kafa								
Arına girme konumu		Yana doğru kesme			Aşağıya Doğru Kesme		Yukarı Doğru Kesme	
AR	VR	AR	VR	SR	AR	SR	AR	SR
746.38	-113.84	33.19	-8.43	53.57	309.17	-469.68	309.17	469.68
AR : Boma etki eden eksenel kuvvet								
SR : Boma ilerleme yönünde etki eden kuvvet								
VR : Boma etki eden dikey kuvvet								

Programdan elde edilen analiz sonuçlarının, en düşük moment değerleri ve geriye doğru kayma durumundaki en küçük kuvvet değerlerinin elde edildiği bom açıları Tablo 5.9-5.12’de verilmiştir.

Stabilite durumlarına ait değerler ve programdan elde edilen kesme profil verileri kullanılarak, Surfer programında eş değer eğrileri çizilmiştir. Şekillerde 0 noktası bomun zemine paralel ve makina ekseninde olduğu konumda kabul edilmiştir. Bu eğriler Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11’de ve EK-B’de verilmiştir.

Tablo 5.9 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan kalem uç kesici kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları.

Kesici kafa tipi	Stabilite Durumu	Kesme Modları	Moment (kNm)*	X (m)	Y (m)	$\alpha 1$ (derece)	$\alpha 2$ (derece)
Kalem uçlu kesikli kesici kafa	Dik eksen etrafında dönme	Arına doğru girme	682.08	0	-0.27	0	-30
		Yana doğru kesme	37.92	0	1.94	0	0
		Yukarı doğru kesme	682.08	0	-0.27	0-50	-30
		Aşağıya doğru kesme	345.83	2.86	5.32	45	50
	Yana Devrilme	Arına doğru girme	564.23	3.97	1.94	45	0
		Yana doğru kesme	873.03	3.96	1.55	45	-5
		Yukarıya doğru kesme	1722.17	0	5.32	0	50
		Aşağıya doğru kesme	921.51	3.97	1.94	45	0
	Geriye Devrilme	Arına doğru girme	2208.2	0	1.94	0	0
		Yana doğru kesme	2960.3	0	1.94	0	0
		Yukarıya doğru kesme	4805.75	3.97	1.94	45	0
		Aşağıya doğru kesme	2786.82	0	1.94	0	0
	Kayma(*)	Arına doğru girme	525.52	0	0.07 ve 3.81	0	-25 ve 25
		Yana doğru kesme	665.58	0	-0.27 ve 4.15	0	-30 ve 30
		Yukarıya doğru kesme	718.1	0	1.94	0	0
		Aşağıya doğru kesme	616.88	0	0.07 ve 3.81	0	-25 ve 25
*Kayma değerleri kN 'dur.							

Tablo 5.10 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan orijinal tip mini-disk keskili kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları.

Kesici kafa tipi	Stabilite Durumu	Kesme Modları	Moment (kNm)*	X (m)	Y (m)	$\alpha 1$ (derece)	$\alpha 2$ (derece)
Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafa	Dik eksen etrafında dönme	Arına doğru girme	682.08	0	-0.27	0	-30
		Yana doğru kesme	-106.52	0-3.97	1.94	0-45	0
		Yukarıya doğru kesme	204.07	2.86	5.32	45	50
		Aşağıya doğru kesme	682.08	0	-0.27-5.32	0	-30-50
	Yana Devrilme	Arına doğru girme	493.8	3.97	1.94	45	0
		Yana doğru kesme	1000.96	0	-0.27	0	-30
		Yukarıya doğru kesme	1827.65	0	1.94	0	0
		Aşağıya doğru kesme	18.33	3.97	1.94	45	0
	Geriye Devrilme	Arına doğru girme	2181.03	0	1.94	0	0
		Yana doğru kesme	3162.37	0	1.94	0	0
		Yukarıya doğru kesme	5123.2	3.97	1.94	45	0
		Aşağıya doğru kesme	1261.53	0	1.94	0	0
	Kayma(*)	Arına doğru girme	315.63	0	1.17 ve 2.71	0	-10 ve 10
		Yana doğru kesme	622.83	0	1.17 ve 2.71	0	-10 ve 10
		Yukarıya doğru kesme	583.27	0	1.94	0	0
		Aşağıya doğru kesme	487.59	0	5.32	0	50

*Kayma değerleri kN 'dur.

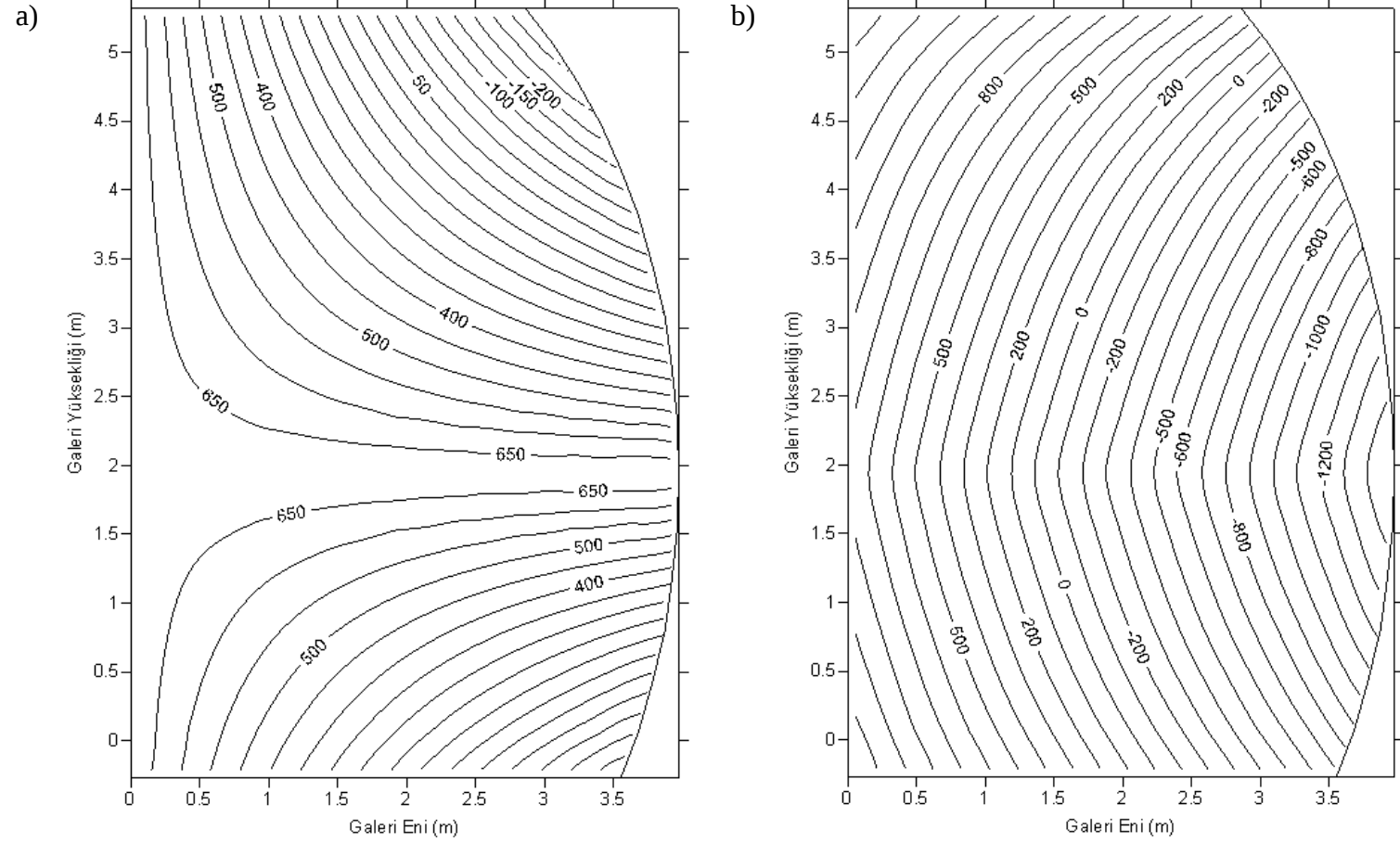
Tablo 5.11 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan modifiye tip mini-disk keskili kesici kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları.

Kesici kafa tipi	Stabilite Durumu	Kesme Modları	Moment (kNm)*	X (m)	Y (m)	$\alpha 1$ (derece)	$\alpha 2$ (derece)
Modfiye tip mini-disk keskili kesici kafa	Dik eksen etrafında dönme	Arına doğru girme	682.08	0	-0.27	0	-30
		Yana doğru kesme	-752.65	0-3.97	1.94	0-45	0
		Yukarıya doğru kesme	682.08	0	-0.27	0	-30
		Aşağıya doğru kesme	-168.48	2.86	5.32	45	50
	Yana Devrilme	Arına doğru girme	178.96	3.97	1.94	45	0
		Yana doğru kesme	194.99	0.35	5.32	5	50
		Yukarıya doğru kesme	2087.3	0	1.94	0	0
		Aşağıya doğru kesme	-949.63	3.97	1.94	45	0
	Geriye Devrilme	Arına doğru girme	1698.04	0	1.94	0	0
		Yana doğru kesme	3179.39	0	1.94	0	0
		Yukarıya doğru kesme	6409.91	3.97	1.94	45	0
		Aşağıya doğru kesme	-383.58	0	1.94	0	0
	Kayma(*)	Arına doğru girme	176.9	0	1.17 ve 2.71	0	-10 ve 10
		Yana doğru kesme	690.06	0	0.07 ve 3.81	0	-25 ve 25
		Yukarıya doğru kesme	558.68	0	1.94	0	0
		Aşağıya doğru kesme	341.59	0	5.32	0	50
*Kayma değerleri kN 'dur.							

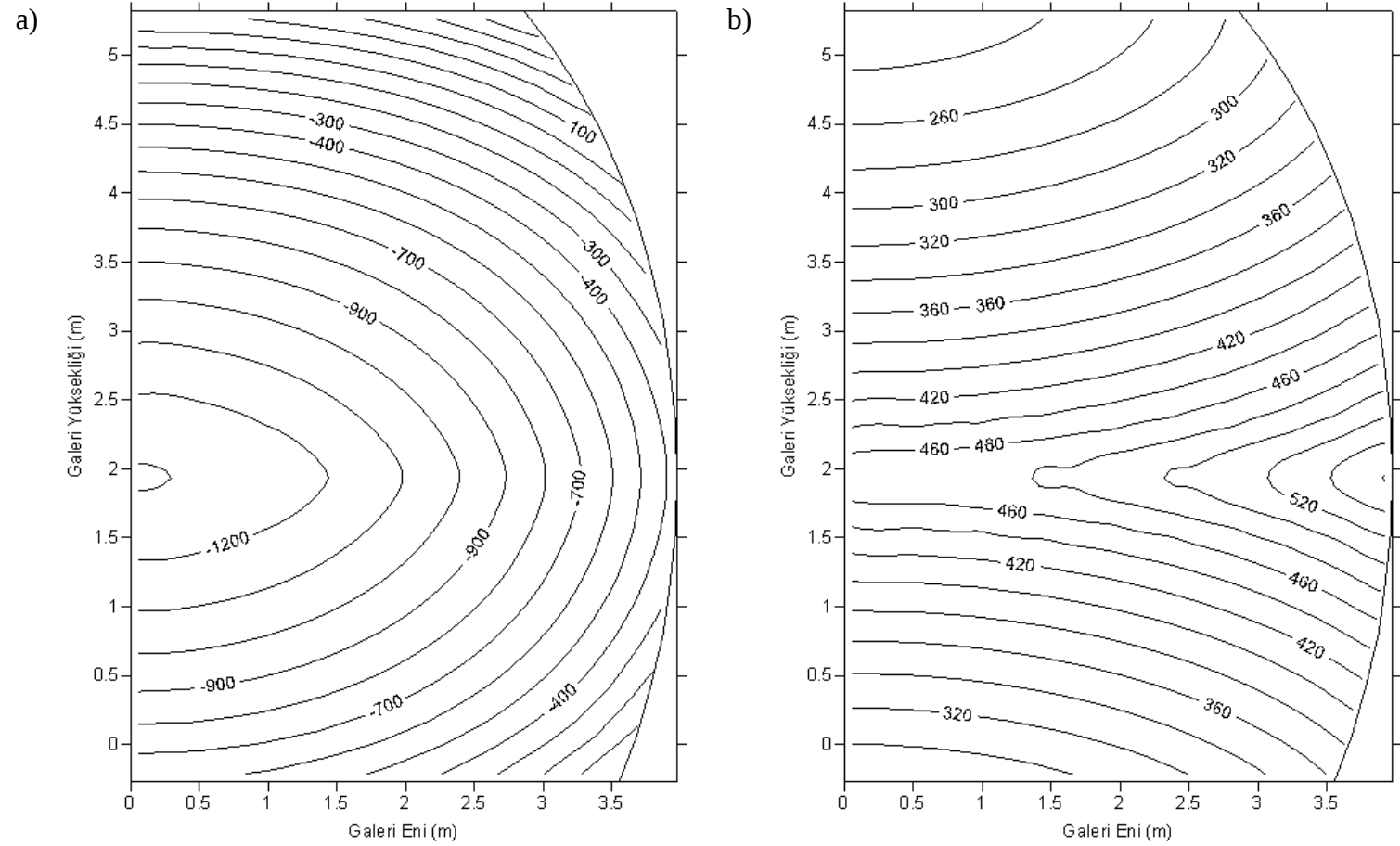
Tablo 5.12 : AM 105 BED tipli BKM'da kullanılan nihai tip mini-disk keskili kesici kafaların stabilite analizi sonucu elde edilen en düşük moment değerleri ve konumları.

Kesici kafa tipi	Stabilite Durumu	Kesme Modları	Moment (kNm)*	X (m)	Y (m)	$\alpha 1$ (derece)	$\alpha 2$ (derece)
Nihai mini-disk keskili kesici kafa	Dik eksen etrafında dönme	Arına doğru girme	682.08	0	-0.27	0	-30
		Yana doğru kesme	381.02	0-3.97	1.94	0-45	0
		Yukarıya doğru kesme	682.08	0	-0.27	0	-30
		Aşağıya doğru kesme	-345.63	2.86	5.32	45	50
	Yana Devrilme	Arına doğru girme	-154.79	3.97	1.94	45	0
		Yana doğru kesme	1238.5	0.35	5.32	5	50
		Yukarıya doğru kesme	2210.76	0	1.94	0	0
		Aşağıya doğru kesme	-1511.45	3.97	1.94	45	0
	Geriye Devrilme	Arına doğru girme	1186.33	0	1.94	0	0
		Yana doğru kesme	3560.77	0	1.94	0	0
		Yukarıya doğru kesme	6922.73	3.97	1.94	45	0
		Aşağıya doğru kesme	-1310.38	0	1.94	0	0
	Kayma(*)	Arına doğru girme	29.9	0	1.17 ve 2.71	0	-10 ve 10
		Yana doğru kesme	749.76	0	0.8	0	-15 ve 15
		Yukarıya doğru kesme	474.83	0	1.94	0	0
		Aşağıya doğru kesme	225.5	0	5.32	0	50

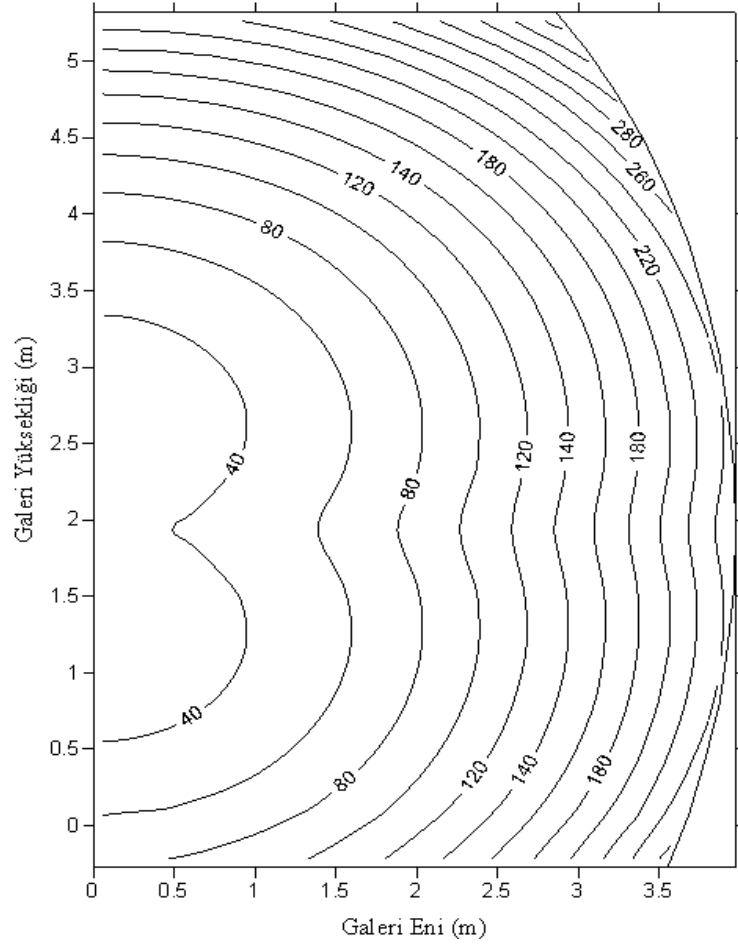
*Kayma değerleri kN 'dur.



Şekil 5.9 : Nihai tip mini-disk kesikli kesici kafanın aşağı doğru kesme modundaki moment izohipsleri a) dik eksen etrafında dönem b) devrilme durumu.



Şekil 5.10 : Nihai tip mini-disk keskili kesici kafanın aşağı doğru kesme modundaki moment izohipsleri a) arkaya doğru devrilme b) kayma.



Şekil 5.11 : Nihai tip mini disk kesikli kesici kafanın arına girme modunda kayma durumundaki stabilite analizi moment eşdeğer eğrisi.

Yapılan stabilite analizleri ile her bir kesici kafanın arına girme, yana doğru kesme, aşağıya doğru kesme ve yukarıya doğru kesme olmak üzere 4 ayrı kesme modunda dik eksen etrafında dönme, yana devrilme, geriye devrilme ve kayma olmak üzere 4 ayrı stabilite durumunda moment ve kuvvet değerleri elde edilmiştir. Bu momentlerin küçük olduğu değerler ve o değerlerin elde edildiği konumlar, BKM'nın stabilite açısından sorunlu olduğu durumlardır. Negatif çıkan durumda ise stabilite açısından makinanın kullanımı olanaksızdır.

AM 105 makinasının kalem uçlu orjinal kesici kafasında dik eksen etrafında dönme durumu incelendiğinde, yana doğru kesme modunda stabilite açısından en küçük değer söz konusu olmuştur. . Bu değer bomun zemine paralel olduğu konumda tünel kenarlarında elde edilmiştir . Arına doğru girme modu ve aşağıya doğru kesme modunda dik eksen etrafında dönme durumuna ait en düşük moment değerleri bomun zemine paralel olduğu kısmın alt tarafında söz konusu olmuştur. Yukarıya doğru

kesme modunda ise bomun yapabildiği maksimum açılarda moment açısından en düşük değer elde edilmiştir. Bu stabilite analizi sonucunda piyasada kullanılan BED tipli makinalarının dik eksen etrafında dönme moment değerlerinin en riskli olduğu kısım bomun tünel zeminine paralel olduğu konumda yana doğru kesme modunda olduğu görülmüştür. Bu analizin moment izohips eğrileri Şekil B.1 ve Şekil B.2’de verilmiştir.

Kalem uçlu keskiye sahip kesici kafaya sahip BED tipi BKM’nın yana devrilme stabilite durumuna göre yapılan stabilite analizi sonucunda en düşük elde edilen moment değeri makinanın arına girme modundadır. Burada elde edilen sonuçlara göre AM 105 makinası arına girme modunda bomun zemine paralel ancak maksimum en kesitine yakın olduğu konumda stabilite açısından zayıf durumdadır. Bu stabilite değerleri tünel kesit profilinin merkezine doğru gidildikçe artmaktadır. Buna rağmen makinanın yana devrilme riski bulunmamaktadır. Bu stabilite analizinin izohips eğrileri Şekil B.3 ve Şekil B.4’te verilmiştir.

Geriye doğru devrilme konumunda kalem uçlu keskiye sahip makinanın stabilite açısından risk bulunmamaktadır. Ancak bomun zemine paralel olduğu durumda Şekil B.5 ve B.6’da görüldüğü üzere stabilite açısından en düşük değerler elde edilmiştir.

Kalem uçlu keskiye sahip AM-105 kesici makinasının geriye doğru kayma durumunda en düşük kuvvet arına doğru girme modunda elde edilmiştir. Arına girme modunda bomun dikeyde yapabildiği maksimum ve minimum açılarda bu değer elde edilmiştir. Bu durumun en önemli sebebi arına girme modunda reaksiyon kuvvetlerinin makinaı geriye doğru itme eğiliminde olmasıdır. Varsayılan tünel parametreleri doğrultusunda bu makinanın kayma riski bulunmamaktadır. Şekil B.7 ve Şekil B.8’de makinanın geriye kayma stabilite durumunun moment izohipsleri verilmiştir.

Kalem uçlu keskiye kullanılan orjinal kafaya monte edilmiş mini-disk kesikli kesici kafanın bulunduğu BED tipi BKM’larında yapılan dik eksen etrafında dönme durumundaki stabilite analizinde en düşük değer yana doğru kesme hareketinde olmuştur. Bu durum kalem uçlu keskiye sahip orijinal kafa ile paralellik göstermekte ve BED tiplerinin yana doğru kesim de stabilite açısından zorlandığını kanıtlamaktadır. Mini-diskli keskiye boma etkileyen kuvvetlerin büyük olması sebebiyle bomun zemine paralel olduğu durumda en düşük negatif değerleri almaktadır. Ayrıca bu durumda makina ancak arınının Şekil B.9’de görüldüğü üzere yüksekliğinin 4.2

metreden yüksek olduğu konumlarda pozitif değer elde edebilmektedir. Bu tasarımda kesici kafanın yana doğru kesimi stabil şekilde yapması imkansızdır.

Yana devrilme durumunda ise en düşük değeri aşağıya doğru kesme modunda kesim yapılırken makinanın maksimum en kesitini kesmeye çalıştığı sırada elde edilmiştir. Bunun sebebi reaksiyon kuvvetlerinin aşağıya doğru kesme modunda makinayı kaldırma eğilimi ve maksimum en kesitinin kesmeye çalışıldığında mesafenin artması sebebiyle makinanın stabil açısından daha duraysız olmasıdır. Şekil B.11’de görüldüğü üzere tünel profilinin merkezine doğru kesim yapıldıkça stabilite artmaktadır. Makinanın bu kesici kafa tasarımında belirtilen yatay düzlemde yaptığı maksimum açılarının, uygulama sırasında elde edilememesi ve kesitlerin daha dar açılmasına ya da kafanın bu çalışma koşullarında kullanılamamasına yol açacaktır.

Geriye doğru devrilmede makinada stabilite açısından mevcut tünel parametrelerinde bir sorun teşkil edilmemektedir. Kalem uçlu kesici kafadaki sonuçlar ile paralel göstermektedir. Geriye doğru devrilme modunda makinanın en düşük değere sahip olduğu kesim modu aşağıya doğru kesme modudur. Burada bomun zemine paralel olduğu konumda en düşük değer elde edilmiştir. Şekil B.13-14’de bu stabilite durumunun moment izohip haritası verilmiştir.

Orijinal tip mini-diskli kesici kafanın kayma durumunda ise en düşük değer arına doğru girme modunda elde edilmiştir. Kalem uçlu kesikler kıyasla bu kesici kafanın kayma riski daha yüksektir. Bunu en önemli sebebi mini-diskli kesikli bu kesici kafanın arına girme modundaki AR ve VR kuvvetleri kalem uçlu kesikli kesici kafaya oranla daha yüksektir. Bu kesici kafada Şekil B.15’de de görüleceği üzere arına girme modunda makina merkezden uzaklaştıkça kuvvetlerin makinaya etkisi azalacağından makina kayma açısından daha stabil hale gelmektedir.

Kesme veriminin düşüklüğü sebebiyle orijinal kesici kafa modifiye edilmiştir. Bu modifiye kafada keski sayıları arttırılmış ve bir takım yapısal değişiklikler yapılmıştır. Bu kafanın dik eksen etrafında dönme durumunda stabilite açısından değerlendirildiğinde Şekil B.17’de de anlaşılabileceği üzere yana doğru kesme modunda bütün kazı arınında negatif değerlidir. Bunun sebebi orijinal tipde olduğu gibi boma etkileyen kuvvetlerin büyük olmasının yanı sıra bu tasarımda bulunan burun kesiklerinin yana doğru kesim sırasında yüksek kuvvetlere maruz kalmasıdır. Bu makinanın bu tasarımda yana doğru kesim yapabilmesi için stabilite açısından ek önlemler alınması

gerekmektedir. Buna ek olarak aşağıya doğru kesme modunda da negatif değerler elde edilmiştir. Bu durum yine burun keskilerinin konumu ile sebeblendirilebilir. Şekil B.18’de görüldüğü üzere kesimin $X > 2.75$ metre ve $Y > 4.7$ metre konumunda olduğu durumlarda negatif değerler ortaya çıkmaktadır. Bu durum yine makinanın yapabileceği maksimum profil kesitinin elde edilememesine ya da bu çalışma şartlarının uygulanamamasına neden olmakta dolayısıyla bu kesici kafa tasarımı makinanın kesim verimliliği düşmektedir.

Yana devrilme durumunda makinanın stabilite açısından değerlendirildiğin aşağıya doğru kesme modunda negatif değerler elde edilmiştir. Aşağıya doğru kesme modunda bomun zemine yatay olduğu ve tünel kenarlarına doğru makinanın stabilitesi zayıftır. Bu durumda BED tipi makinalarının verimli kesme prensipi göz önüne alındığında bu makinanın 6.4 metreden geniş kesitli tünel kazabilme durumu bulunmamaktadır. Şekil B.19-20’de arına girme ve yana doğru kesme modunda makinanın arındaki stabilite dağılımı verilmiştir.

Geriye devrilme durumunda ise aşağıya doğru kesme modunda negatif değerler elde edilmiştir. Burada aşağıya doğru kesme hareketinde makinaya etki eden kuvvetlerin makinayı kaldırma yönünde etki etmesi etkilidir. Keski tipi nedeniyle makinaya etki eden bu kuvvetlerin yüksek olması sebebiyle bu durum ortaya çıkmaktadır. Ancak burada dikkat çeken bir diğer husus keskilerin yerleştiriliş biçiminden kaynaklı olarak makinanın, kesim konumu Şekil B.22’de görüldüğü üzere $X > 4$ metre ve $Y > 4$ metre olduğu konumlarda daha stabil olmasıdır. Burada yukarı doğru kesme modunda ise makina geriye devrilme açısından çok stabildir. Bunun sebebi ise makinaya etki eden kuvvetlerin, makinayı zemine doğru itme eğiliminde olmasıdır.

Kayma açısından ise bu kesici kafada arına doğru girme modunda en küçük kuvvet değerleri elde edilmiştir. Tünel profil kesitinin merkezde bulunduğu kesimlerde arına doğru girme hareketi makinada kayma riski söz konusu olabilir Bunun en önemli nedeni keski tipi olarak mini-diskli keskilerin kullanılması dolayısıyla kuvvetlerin büyük olmasıdır. Şekil B.23-24’de stabilite analizi izohips eğrileri verilmiştir.

EMI tarafından geliştirilen modifiye kafada Voest Alpine firması bir takım değişiklikler yaparak nihai kafayı oluşturmuştur. Nihai kafa üretilerek yatay sondaj makinasında testlere sokulmuştur. Bu kesici kafanın dik eksen etrafında dönme durumu için elde edilen en küçük stabilite değerleri aşağıya doğru kesme hareketinde

elde etmiştir. Yana doğru kesme modunda stabilite modifiye kafaya göre bakıldığında daha stabildir. Bunun en önemli nedeni burun keskilerinin kaldırılıp gövdeye taşınması ve keski açısının arttırılmasıdır. Ancak Voest Alpine firması ve EMI bu makinanın yana doğru kesim yapmayacağı şeklinde kesici kafanın tasarlandığı belirtilmiştir[44]. Buradan anlaşılacağı üzere keski açılarının dikleştirilmesi ve burun keskilerinin kaldırılması yana doğru kesme modunda makinanın kesme yapmasını zorlaştırmakta hatta imkansızlaştırmaktadır.

Aşağıya kesme modunda dik eksen etrafında dönme durumunda Şekil 5.9 da görüldüğü gibi makinanın stabilite değerleri bomun yatay ve dikey maksimum açı yaptığı bölgelerde negatiftir.

Yana devrilme durumuna ait makinanın stabilitesi incelenirse Şekil 5.9’da görüldüğü üzere arına doğru girme ve aşağıya doğru kesme modunda makinanın stabilitesi zayıftır. Arına doğru girme modunda makinanın bomunun yatay olduğu konum ve $X > 2.5$ metre arasındaki olan konumlarda makinanın yana devrilme modundaki stabilite değerleri negatiftir. En küçük değer x ’in maksimum olduğu konumda elde edilmiştir. Aşağıya doğru kesme modunda ise makinanın arındaki stabilite dağılımı bomun zeminle yatay olduğu konum ve $X > 1.36$ m olduğu konumdan itibaren negatiftir. Bu iki durum göz önüne alınarak makinanın boyutuna göre kesebileceği maksimum tünel kesiti oldukça küçülmüştür. Bu da makinanın verimliliği için oldukça negatif bir özelliktir.

Geriye devrilme modunda ise önceki tasarımlarda olduğu gibi aşağıya doğru kesme modunda stabilite sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu durumdaki stabilite dağılımı bütün kazı arınında negatiftir (Şekil 5.10). Bu negatiflik kazının arınının merkezinden uzaklaştıkça azalma eğilimindedir. Bu değer modifiye kafaya göre yüksek olmasının sebebi ise kesici kafadaki keskinin kesici kafa yapısından dolayı gövdede bulunmasıdır.

Son olarak nihai kafanın kayma durumunu da incelersek, Şekil 5.11 de görüldüğü gibi arına girme modunda makinanın kayma riski taşıdığı gözükmemektedir. Kazı arının merkezinden, kazı arının cidarına doğru hareket edildikçe değerler büyümektedir. Bu durum BED tipi makinanın kazıya başlaması için ilk kazı arının merkezine girmesi gerektiği için kazı makinasının kazı verimliliği için oldukça olumsuzdur.

Nihai kafanın yukarıya doğru kesme modunda bütün stabilite durumları için moment ve kuvvet değerleri pozitif çıkmıştır. Fakat bu modda çalıştırılması durumunda kesici kafa yukarı kesme tipinde kesme işlemi yapacak ve arına keskiler maksimum kesme derinliğinde girecektir, bu da makinanın sarsılmasına neden olacaktır. Bunu engelle,,mek için kafanın dönme yönünü değiştirirsek bu seferde kazılan malzeme kafanın üzerinden tablaya boşalma eğilimde olacaktır. Bu nedenlerden dolayı yukarı doğru kesme modu tercih edilmez.

Yapılan stabilite analizinin bütün kesme modları ve stabilite durumları için oluşturulan bütün izohips eğrileri EK.B’de verilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde inşaat sektörünün hızla gelişmesi doğrultusunda altyapı tesislerinin inşaatı için tünelcilik faaliyetlerine duyulan talep gün geçtikçe artmıştır. Oluşan bu talebi karşılamak için üretim hızı önemli bir faktör olmakla birlikte, bu üretim hızı, mühendislik açısından verimlilik, ekonomiklik ve güvenlik gibi kavramlarla örtüştürülmediği takdirde bir anlam teşkil etmemektedir. Ayrıca inşaat sektörünün ve şehirleşmenin artışıyla hammaddeye duyulan talep de artmış olup, bu talep doğrultusunda ülkemizdeki madencilik faaliyetleri de artmıştır. Madencilik yapılan alanlar ile şehirlerin içi içe girmesi ve madenlerin derinleşmesi dolayısıyla, madencilik yerüstü madenciliğinden, yeraltı madenciliğine doğru bir yönelim bulunmaktadır. Tünellerde ve yeraltı madenciliğinde, klasik delme-patlatma yöntemlerinin çevresel risk oluşturması ve bazı yerlerde ekonomik olmaması sebebiyle mekanize yöntemler daha fazla tercih edilir hale gelmiştir.

Mekanize kazı araçlarından bir olan bomlu kazı makineleri, diğer mekanize kazı araçlarına göre daha farklıdır. Bu farklılıklar, bomlu kazı makinelerinin ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması ve kullanım esnekliğidir. Ancak bu makinelerin sadece yumuşak ve orta sert kayalarda verimli çalışabilmesi bu makinelerin daha da yaygın kullanımını engellemektedir.

Bomlu kazı makinelerinin sert kayaç ortamında kullanılamamaları, bu makinelerde kullanılan kalem uçlu ve kama uçlu kesicilerinin sert ve aşındırıcı kayaçları kesmek için yeterli olmamasıdır.

BKM'lerinin sert ve aşındırıcı kayaçlarda verimli kesme yapabilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Su jeti, polikristalen elmas keski gibi sistemlerle BKM'lerinin sert ve aşındırıcı kayaçlardaki zaafı giderilmeye çalışılmak ile beraber yeni keski tiplerinin de BKM kesici kafalarında kullanılması için de çalışılmaktadır. Bu çalışmalardan bir tanesi de yeni bir keski teknolojisi olan mini-diskli kesici kafalardır. Mini-disk keski, diskli keskinin yüksek kesme kuvvetleri

yaratmasından ve kısmi cepheli kazı makinalarının bu kuvvetleri karşılayamamasından dolayı geliştirilmiştir.

Geliştirilen bu keskinin BKM'ına uygulanması EMI tarafından test edilmiştir. Test aşamasında orijinal, modifiye ve nihai olmak üzere 3 adet kesici kafa Voest Alpine firmasının AM 105 BED tipi BKM'nda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu kesici kafalardan nihai tip kesici kafanın üretimi yapılarak kaynaşmış tüfite yatay sondaj makinasında kesme testine tabii tutulmuştur.

Kesici kafa testleri, arına girme modu ve aşağıya kesme modu olmak üzere sadece iki modda yapılmıştır. Çünkü EMI ve Voest Alpine disk keskili bomlu kazı makinalarının stabilite probleminden dolayı yana doğru kesmeyi verimli yapamayacağına karar vermiştir.

Yapılan testlerin sonucunda kesici kafanın numune üzerinde denendiği arına girme modunda ölçülen değerlere göre 25 ile 34 kW-saat/m³ 'lük spesifik enerji elde edilmiştir. Aşağıya doğru kesme modunda ise 16 kW-saat/m³ spesifik enerji hesaplanmıştır. Bu test sırasında keskilerde herhangi bir yıpranma veya kırılma gözlemlenmemiştir. EMI tarafından bu test başarı olarak belirtilmiştir.

Bu tasarlanan mini-disk keskili 3 kafa ve AM 105 BED tipi BKM'nın orijinal kalem uçlu kafasının 4 ayrı kesme modunda ve 4 ayrı stabilite durumunda stabilite analizi yapılmıştır.

AM 105 BED tipi BKM'nın orijinal kalem uçlu kafasının stabilite analizi yapılmış, yapılan stabilite analizi sonucunda makinanın yatay kesme modunda en düşük moment değeri elde edilmiş ve stabilitesinin bu kesme modunda stabilitenin zayıf olduğu bulunmuştur. Yana doğru kesme modun kalem uçlu orijinal kafa, dikey eksen etrafında dönme stabilite durumunda bomun, makinanın durduğu zemin ile paralel konumda en düşük değerleri vermiştir. Bomun zeminle yaptığı açı değişikçe moment değerleri artmaktadır. Makinanın kesebildiği maksimum galeri yüksekliği değerinde ise stabilite maksimum değerini elde etmiştir.

Bu stabilite çalışmasının ardından orijinal kalem uçlu kesici kafanın gövde boyutu ve geometrisi aynı tutularak mini-disk keskili kesici kafa tasarımı yapılmıştır. Bu kesici kafa orijinal tip mini-diskli kesici kafa olarak adlandırılmıştır. Bu kesici kafanın stabilite analizi sonucunda yana doğru kesme moduna ve aşağıya doğru kesme modunda stabilite açısından riskli olduğu görülmüştür. Yana doğru kesme modunda,

dik eksen etrafında dönme durumunda bu kesici kafaya sahip BKM kazı arını kesme yüksekliğinin (Y) 4 metreden küçük olduğu bütün konumlarda stabilite değerleri negatiftir. Bu negatiflik BKM'nin kullanılan kesme derinliğinde stabil olarak kesim yapamayacağını belirtmektedir. Bu negatifliğin en önemli nedeni kullanılan mini-diskli kesicilere etki eden kuvvetlerin kalem uçlu keskilere etki eden kuvvetler göre daha büyük olmasıdır. Aşağı doğru kesme modu da stabilite açısından incelendiği takdirde bomun zemine paralel ve kazı arının yatayda maksimum kestiği ($X=3.97$ metre) konumda yana devrilme durumunda en küçük değer elde edilmiştir.

Orijinal kafanın kesim sırasında sadece 3-4 keski ile kayaca temas etmesi üzerine modifiye tip mini-diskli kesici kafa EMI tarafından tasarlanmıştır. Bu kesici kafanın stabilite analizinde aşağı doğru kesme ve yana doğru kesme modunda stabilite açısından sorunlar tespit edilmiştir.

Aşağıya doğru kesme modunda, makina dik eksen etrafında dönme, yana devrilme ve geriye devrilme stabilite durumlarında negatif değerler elde edilmiştir. Aşağıya doğru kesme modunda $Y > 4.5$ metre ve $X > 2.9$ metre olduğu kesme konumlarında makina dik eksen etrafında dönme durumunda negatif değer vermiştir.

Geriye devrilme durumunda makina kazı arınının merkezinde negatif değerliyken, yana devrilme durumunda ise $Y=1.94$ metre ve $X > 2.5$ metre konumlarında negatif değerlidir. Bu kesici kafaya sahip makinanın mevcut kesme derinliğinde makinanın stabil şekilde kesme yapabilmesi imkansızdır.

Yana doğru kesme modunda ise dik eksen etrafında dönme durumunda makina kazı arınındaki bütün konumlarda stabilite açısından negatif değerlidir. Bu moddaki ve aşağıya doğru kesme modundaki dik eksen etrafında dönme stabilite sorununun en büyük sebebi kesici kafada bulunan burun ve köşe keskilерidir.

Voest Alpine firması ve EMI tasarlanan modifiye kesici kafa üzerinde birtakım değişiklikler yaparak nihai tip mini-disk kesikli kesici kafayı tasarlamış ve bu kafa üretilmiştir. Üretilen kafadaki en önemli değişiklik burun keskilерinin kaldırılması, gövde keskilерinin dik konumda yerleştirilmesi ve köşe keskilere ise daha düşük eğim açıları verilmesidir. Bu yüzden makinaya etki eden bom kuvvetlerinin yüksek olması dolayısıyla stabilite sorununun ortaya çıkması nedeniyle yana doğru kesme modunda kesici kafa yatay sondaj makinasında test edilmemiştir. Buna rağmen bu çalışmada

yapılan stabilite analizi sonucunda bu kafanın arına doğru girme ve aşağıya doğru kesme modlarında da negatif değerler verdiği görülmektedir.

Arına doğru girme modunda makinanın bomunun yatay olduğu konum ve $X > 2.5$ metre arasındaki olan konumlarda makinanın yana devrilme modundaki stabilite değerleri negatiftir. Ayrıca nihai tip mini-diskli kesici kafaya sahip BKM'nın arına girme modunda kayma riski de bulunmaktadır. Kesici kafa arınının merkezindeki konumlara arına girme hareketi yaptığında stabilite açısından minimum değerler elde edilmektedir.

Aşağıya doğru kesme modunda yana devrilme ve geriye devrilme stabilite durumunda negatif değerler elde edilmiştir. Yana devrilme durumunda, kesici kafanın $X > 1.5$ metre'den büyük olduğu konumlarında negatif stabilite değeri elde edilmiştir. Bu makinanın mevcut kesme derinliklerinde stabil şekilde aşağıya doğru kesme modunda çalışamayacağını göstermektedir. Geriye doğru devrilme durumu ise bomun yapabileceği maksimum açılarda sadece pozitif değerler elde edilmiştir ve bu makinanın aşağıya doğru kesme hareketinde geriye devrilme açısından stabilitede sorunu olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca dik eksen etrafında dönme durumunda makinanın stabilite değerleri bomun yatay ve dikey maksimum açı yaptığı bölgelerde negatiftir.

Yukarıda belirtilen stabilite analizi sonuçları doğrultusunda, aşağı doğru kesme modunda ve arına girme modunda bu kesici kafanın mevcut AM 105 BKM'sında ve kesme derinliğinde uygulanması stabilite açısından imkansızdır. Bunun en büyük sebebi kesici kafada kullanılan mini-diskli keskilere etki eden kuvvetlerin büyük olmasıdır. Bu stabilite sorununun önlenmesi için makinanın ağırlığı ve boyutları arttırılmalı ya da kesme verimliliğinden ödün verilerek arına girme derinliği ve kesme derinliği düşürülmelidir.

Bir kesici kafanın ve keskinin verimliliğinin sadece kesme verimliliğine bağlı olarak düşünülmemelidir. Öyle ki AM 105 BKM'nın tasarımında belirtilen maksimum dikey ve yatay bom açıları, üretilen nihai mini-disk keskili kesici kafa ile stabilite dikkate alındığında elde edilememektedir. Bu da kazılan kesitin daralmasına ve makina boyutları da göz önüne alındığında makinanın kullanımını oldukça zorlaştırmaktadır. Kesici kafa tasarımı ile BKM'nın kayaç üzerindeki verimliliği artırılabilir ancak bu verimlilik hesaplanırken makinanın boyut parametreleri ve çalışacağı tünellin parametreleri de dikkate alınmalıdır. Yapılan bu çalışma sonucunda AM 105

BKM’ında kullanılması planlanan testler sonucunda aşağı doğru kesme modunda ve arına girme modunda verimli kestiği açıklanmış mini-disk keskili kesici kafanın mevcut kesme koşulları, makina parametreleri ve tünel parametreleri göz önüne alındığında verimsiz olduğu kesme verimliliği kavramının sadece kesici kafa ile nitelendirilemeyeceği kesme verimliliği dolayısıyla üretim verimliliği kavramının, kesici kafa, makina ve tünel ile bir bütün şeklinde nitelendirilmesi gerektiği görülmüştür.

Buna ek olarak makina seçme kriterlerinde stabilite analizlerinin de uygulanması gerekliliği bu çalışmada görülmüştür. Uygulamada makinalar sadece güçlerine göre seçilmekte fakat teoride makinanın güçlerine bağlı belirtilen üretim verimliliğine, makinalar pratikte ulaşamamaktadır. Bunun sebeplerinden bir tanesi de yapılan analiz sonucunda da görüldüğü gibi verilen kesme koşullarında makina bomunun yapabileceği maksimum açılara ulaşamaması ve istenilen profil kesitlerini elde edebilmek için makinanın hareket etme zorunluğudur. Bu durum kesme verimliliği açısından oldukça negatiftir. Ayrıca bu stabilite sorunları, kazı esnasında iş güvenliği açısından olumsuz sonuçlar doğurabilecektir.

Genel sonuç olarak, BKM’nın ve kesici kafanın verimliliği nitelendirilirken sıklıkla başvurulan kayaç ve makinanın g özelliklerinin yanı sıra makinanın boyutu ve tünel parametrelerine bağlı olarak stabilitesi de irdelenmelidir. Ancak bu şekilde teoride hesaplanan kesme verimliliği kavramı ile pratikte oluşan kesme verimliliği örtüşebilir böylelikle uygun ekipman seçimi ile kazı maliyetleri optimum seviyelere ulaşabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bilgin, N., Copur, H. & Balci, C. (2014). *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*, CRC Press, 378.
- [2] Pakes, G. (1991). Selection of methods, *World Tunneling*, 9, 399-403.
- [3] Matti, H. (1999). *Sandvik Rock Excavation Handbook*, 363.
- [4] Caner, E. (2010). *Sıkışan zeminlerde tam cepheli tünel açma makinelerinin performans analizi ve uluabat kuvvet tüneli örneği*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Tunçdemir, H. (2007). Hidrolik kırıcıların performans tahmini ve seçim kriterleri, *Ulaşımında Yeraltı Kazıları 2.Sempozyumu*, (pp. 215-226). İstanbul.
- [6] Kogelman, W. J. (1982). Increased productivity through boom-type continuous miners, *S. A. Min. World*, August, 63-80.
- [7] Hekimoğlu, O. Z. & Fowell, R. J. (1988). Bomlu kazı makinalarının temel özellikleri ve seçimleri, *6. Kömür Kongresi*, (pp. 29-52). Zonguldak.
- [8] Breeds, C. D. & Corvay, J. J. (1992). Rapid Excavation. In H.L. Hartman (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook* (2nd ed., pp. 1871-1907). Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc..
- [9] Su, O. (2010). *Kalem Uçlu Keskilerle Kayaç Kesme Mekanizmasının Üç Boyutlu Sayısal Modellenmesi*. (Doktora tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [10] Nishimatsu, Y. (1993). Theories of rock cutting. In T. B. Edwin (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering Principles, Practice & Projects*, (1st ed, pp. 647-662). Pergamon Press.
- [11] Bilgin, N. (1989). *İnsaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği*, (pp. 192-193). İstanbul: Birsan Yayınevi.
- [12] Hekimoğlu, O. Z. (1984). *Studies in the Excavation of Selected Rock Materials with Mechanical Tools*, (Doktora tezi). University of Newcastle Upon Thyne, Newcastle, UK.
- [13] Whittaker, B. N., Singh, R. N. & Sun, G. (1992). *Rock Fracture Mechanics, Principles, Design and Applications, Developments in Geotechnical Engineering* (pp. 570-571). Elsevier.
- [14] Roxborough, F. F. (1973). Cutting rock with picks. *The Mining Engineer*, 133, 445-455.
- [15] Evans, I. (1984). A theory of the cutting force for point-attack picks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2 (1), 63-71.

- [16] Tumaç, D. (2010). *Değişik kayaç ve disk keskilerde kayaç kazılabilirliği üzerine etkisinin araştırılması*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] Roxborough, F. F. (1978). Fundamental studies on the mechanics of cutting rock with disc., *Third Australian Tunnelling Conference*, (pp. 43–47). Sydney.
- [18] Roxborough, F. F. & Phillips, H. R. (1975). Rock excavation by disc cutter, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 12, 361-366.
- [19] Bilgin, N. (1977). *Investigation into mechanical cutting characteristics of some medium and high strength rocks*. (Doktora tezi). University of Newcastle Upon Thyne, Newcastle, UK.
- [20] Wijk, G. A. (1992). Model of tunnel boring machine performance, *Geotechnical and Geological Engineering*, 10, 19–40.
- [21] Rostami, J., Ozdemir, L. & Nilsen, B. (1996). Comparison between CSM and NTH hardrock TBM performance prediction models, *Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling and Technology (ISDT)*, (pp. 11-12). Las Vegas, NV.
- [22] Hurt, K. G. & MacAndrew, K. M., (1981). Designing roadheader cutting heads, *The Mining Engineer*, 167-170.
- [23] Eyyuboğlu, E. M. (2003). Kollu tip galeri açma makinaları kesici kafa tasarımı, *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yer Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 43-50.
- [24] Hekimoğlu, O. Z. & Fowell, R. J. (1991). Theoretical and practical aspects of circumferential pick spacing on boom tunnelling machine cutting heads, *Mining Science and Technology*, 13, 257-270.
- [25] Eyyuboğlu, E. M. (2000). *Effect of Cutting Head Design on Roadheading Machine Performance at Çayirhan Lignite Mine*. (Doktora tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [26] Rostami, J., Neil, M. D. & Özdemir, L. (1993). Roadheader Application for the Yucca Mountain Experimental Study Facility, *Final Report for Raytheon Services*, Nevada Yucca Mountain Project Las Vegas, Nevada, USA: October.
- [27] Hekimoglu, O. Z. & Fowell, R. J. (1990). From research into practice: In-situ studies for design of boom tunnelling machine cutting heads, *Rock Mechanics Contributions and Challenges, Proceedings of the 31st U.S. Symposium*, (pp. 481-488). Colorado School of Mines, Golden, USA: June 18-20.
- [28] Eyyuboğlu, E. M. & Bolukbası N. (2005). Effects of circumferential pick spacing on boom type roadheader cutting head performance, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 418–425.
- [29] Hekimoğlu, O. Z. (1986). Galerî açma makinalarının kesici kafa geometrisinin makina performansına olan etkileri, *Türkiye 5. Kömür Kongresi*, (pp. 111-140).

- [30] **Hekimoğlu, O. Z.** (1991). Comparison of longitudinal and transverse cutting heads on a dynamic and kinematic basis, *Mining Science and Technology*, 13, 243-255.
- [31] **Gehring, K. H.** (1989). A cutting comparison, *Tunnels and Tunneling*, 21, 27-30.
- [32] **McDermott, J.** (1988). Roadheaders characteristics and capabilities, *Proc. 6th Coal Congress of Turkey*, (pp. 119-139). Zonguldak.
- [33] **Menzel, W. & Frenyo, P.** (1981). Teilschnitt-Vortriebsmaschinen mit Langs—und mit Querschneidkopf (Partial-face excavation machines with longitudinal and transverse cutting head), *Glückauf*, 117 (5), 284–287.
- [34] **Frenyo, P. & Lange, W.** (1994). Design of cutting heads for optimal cutting performance, *Glückauf Mining Reporter I*, 4-7.
- [35] **Bilgin, N., Yazıcı, S. & Eskikaya, Ş.** (1996). A model to predict the performance of roadheaders and impact hammer in tunnel drivages, *Proc. Eurock 96*, (pp. 715-720). Balkema, Torino, Italy.
- [35] **Acaroğlu, Ö.** (2004). *Bomlu Kazı Makinalarının Stabilite Analizi ve Optimum Seçimi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Markvardt, R., Breido, J. & Drijd, N.** (2015). *Development of Position System of a Roadheader on a Base of Active IR-sensor* (Vol. 100, pp. 617-621). Procedia Engineering.
- [37] **Ouyang, P. R., Pano, V. & Acob, J.** (2013). Position domain contour control for multi-DOF robotic system, *Mechatronics*, 23, 1061-1071.
- [38] **Jasiulek, D. & Swider, J.** (2013). Mechatronic systems in mining roadheaders – examples of solutions, *Measurement Automation Robotics*, 1, 121-127.
- [39] **Gillani, S. T. A. & Butt, N.** (2009). *Excavation Technology for Hard Rock - Problems and Prospects* (Vol. 4, pp. 24-33). Pak. J. Engg. & Appl. Sci.
- [40] **Songyong, L., Zenghui, L., Xinxia, C. & Hongxiang, J.** (2014). Rock breaking of conical cutter with assistance of front and rear water jet, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 78–86.
- [41] **Kotwica, K., Gospodarczyk, P., Stopka, G. & Kalukiewicz, A.** (2010). *The designing process and stand tests of a new solution of a mining head with disc tools of complex motion trajectory for compact rocks mining* (Vol. 29, 29th ed., pp. 119-127). Mechanics and Control.
- [42] **Wang, H., Wang, D., Ren, W., Lu, X., Han, F. & Zhang, Y.** (2013). Application of foam to suppress rock dust in a large cross-section rock roadway driven with roadheader, *Advanced Powder Technology*, 24, 257–262.
- [43] **Thuro, K. & Plinninger, R.J.** (1999). Roadheader excavation performance-geological and geotechnical influences, *9th ISRM Congress Paris, Theme 3: Rock dynamics and techtonophysics/Rock cutting and drilling*, (pp. 1241-1244). Paris, France.
- [44] **Rostami, J., Asbury, B., Gertsch, L. & Ozdemir, L.** (1995). Laboratory testing and performance evaluation of a mini-disc equipped roadheader

cutterhead for yucca mountain welded tuff, Las Vegas, Nevada, USA: Department of Energy Yucca Mountain Project Office, 48.

- [45] **Asbury, B., Rostami, J. & Ozdemir, L.** (1995). A new concept for selective mechanical mining of hard rock, Colorado, USA: Colorado School of Mines, Earth Mechanics Institute Mining Engineering Department.
- [46] **Acaroğlu, Ö.** (2002) Bomlu kazı makinaları kesici kafalarının performans ve dinamik analizlerinde kullanılan bir bilgisayar programı, *6. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, (pp. 371-378). Konya.

EKLER

EK A: Stabilite Analiz Program Örneği

EK B: Stabilite Analizi Moment Eşdeğer Eğrileri

EK A STABİLİTE ANALİZ PROGRAM ÖRNEĞİ

Tablo A.1 Stabilité Analizi Programının BED tipli mini diskli orjinal kafanın yana doğru kesme modunda sonuç dosyası örneği

Head Type of Machine: Transverse

Cutting Mode: Arcing

Boom Force Reactions:

Slewing Force Reaction (kN):140.32

Axial Force Reaction (kN):159.28

Vertical Force Reaction (kN):24.79

Maximum Boom Position Angles:

in horizontal plane (degree):45

in vertical plane direct to the up(degree):50

in vertical plane direct to the down(degree):-30

Machine parameters:

Machine weight (kN):980.00

Machine floor width (m):3.05

One palet width (m):0.87

Boom length (from vertical rotation point of the boom)(m):4.42

Spacing between vertical rotation point and
horizontal rotation point of the boom (m):1.20

Spacing between end of boom and center of gravity (m):0.00

Spacing between back leg of machine and center of gravity (m):3.78

Spacing between floor and the boom where is paralell to floor (m):1.94

Spacing between floor and center of gravity(m):1.62

Cutting head diameter(m):1.00

Cutting head length(m):1.50

Tunnel Parameters

Inclination of the tunnel(degree):0.00

Friction coefficient between
machine and tunnel floor:0.80

Cutting Area from above track level:38.53

Cutting Area from below track level:-11.58

Data for Cutting Profile of the Machine

X	Y	alfa1	alfa2
---	---	-------	-------

0.00	5.32	0	50
------	------	---	----

0.35	5.32	5	50
------	------	---	----

0.70	5.32	10	50
------	------	----	----

1.05	5.32	15	50
------	------	----	----

1.38	5.32	20	50
------	------	----	----

1.71	5.32	25	50
2.02	5.32	30	50
2.32	5.32	35	50
2.60	5.32	40	50
2.86	5.32	45	50
2.86	5.32	45	50
3.06	5.06	45	45
3.24	4.78	45	40
3.41	4.47	45	35
3.55	4.15	45	30
3.68	3.81	45	25
3.78	3.45	45	20
3.87	3.08	45	15
3.92	2.71	45	10
3.96	2.33	45	5
3.97	1.94	45	0
3.97	1.94	45	0
3.96	1.55	45	0
3.92	1.17	45	0
3.87	0.80	45	0
3.78	0.43	45	0
3.68	0.07	45	0
3.55	-0.27	45	0
3.55	-0.27	45	-30
3.23	-0.27	40	-30
2.88	-0.27	35	-30
2.51	-0.27	30	-30
2.12	-0.27	25	-30
1.72	-0.27	20	-30
1.30	-0.27	15	-30
0.87	-0.27	10	-30
0.44	-0.27	5	-30
0.00	-0.27	0	-30

data for surfer load map file (bln)

line number type

38 0

Moment and Equation Values in Arcing
According to Boom Position Angles

Turning around vertical axis

Moment X Y alfa1 alfa2

-23.51 0.00 -0.27 0 -30

-18.08 0.44 -0.27 5 -30

-12.70 0.87 -0.27 10 -30

-7.39	1.30	-0.27	15	-30
-2.21	1.72	-0.27	20	-30
2.81	2.12	-0.27	25	-30
7.63	2.51	-0.27	30	-30
12.21	2.88	-0.27	35	-30
16.52	3.23	-0.27	40	-30
20.53	3.55	-0.27	45	-30
-48.47	0.00	0.07	0	-25
-43.72	0.45	0.07	5	-25
-39.00	0.90	0.07	10	-25
-34.36	1.35	0.07	15	-25
-29.83	1.78	0.07	20	-25
-25.44	2.20	0.07	25	-25
-21.22	2.60	0.07	30	-25
-17.21	2.98	0.07	35	-25
-13.44	3.35	0.07	40	-25
-9.93	3.68	0.07	45	-25
-69.15	0.00	0.43	0	-20
-65.20	0.47	0.43	5	-20
-61.28	0.93	0.43	10	-20
-57.42	1.38	0.43	15	-20
-53.64	1.83	0.43	20	-20
-49.99	2.26	0.43	25	-20
-46.48	2.68	0.43	30	-20
-43.14	3.07	0.43	35	-20
-40.00	3.44	0.43	40	-20
-37.08	3.78	0.43	45	-20
-85.41	0.00	0.80	0	-15
-82.35	0.48	0.80	5	-15
-79.32	0.95	0.80	10	-15
-76.33	1.41	0.80	15	-15
-73.42	1.87	0.80	20	-15
-70.59	2.31	0.80	25	-15
-67.88	2.73	0.80	30	-15
-65.30	3.14	0.80	35	-15
-62.87	3.51	0.80	40	-15
-60.61	3.87	0.80	45	-15
-97.11	0.00	1.17	0	-10
-95.02	0.48	1.17	5	-10
-92.96	0.96	1.17	10	-10
-90.92	1.44	1.17	15	-10
-88.94	1.90	1.17	20	-10
-87.01	2.35	1.17	25	-10
-85.17	2.78	1.17	30	-10
-83.41	3.18	1.17	35	-10
-81.75	3.57	1.17	40	-10
-80.22	3.92	1.17	45	-10
-104.16		0.00	1.55	0
-103.11		0.49	1.55	5
-102.06		0.97	1.55	10

-101.03	1.45	1.55	15	
-100.02	1.92	1.55	20	-
-99.05 2.37	1.55	25	-5	
-98.11 2.80	1.55	30	-5	
-97.22 3.21	1.55	35	-5	
-96.39 3.60	1.55	40	-5	
-95.61 3.96	1.55	45	-5	
-106.52	0.00	1.94	0	
-106.52	0.49	1.94	5	
-106.52	0.98	1.94	10	
-106.52	1.45	1.94	15	
-106.52	1.92	1.94	20	
-106.52	2.37	1.94	25	
-106.52	2.81	1.94	30	
-106.52	3.22	1.94	35	
-106.52	3.61	1.94	40	
-106.52	3.97	1.94	45	
-104.16	0.00	2.33	0	
-103.11	0.49	2.33	5	
-102.06	0.97	2.33	10	
-101.03	1.45	2.33	15	
-100.02	1.92	2.33	20	
-99.05 2.37	2.33	25	5	
-98.11 2.80	2.33	30	5	
-97.22 3.21	2.33	35	5	
-96.39 3.60	2.33	40	5	
-95.61 3.96	2.33	45	5	
-97.11 0.00	2.71	0	10	
-95.02 0.48	2.71	5	10	
-92.96 0.96	2.71	10	10	
-90.92 1.44	2.71	15	10	
-88.94 1.90	2.71	20	10	
-87.01 2.35	2.71	25	10	
-85.17 2.78	2.71	30	10	
-83.41 3.18	2.71	35	10	
-81.75 3.57	2.71	40	10	
-80.22 3.92	2.71	45	10	
-85.41 0.00	3.08	0	15	
-82.35 0.48	3.08	5	15	
-79.32 0.95	3.08	10	15	
-76.33 1.41	3.08	15	15	
-73.42 1.87	3.08	20	15	
-70.59 2.31	3.08	25	15	
-67.88 2.73	3.08	30	15	
-65.30 3.14	3.08	35	15	
-62.87 3.51	3.08	40	15	
-60.61 3.87	3.08	45	15	
-69.15 0.00	3.45	0	20	
-65.20 0.47	3.45	5	20	
-61.28 0.93	3.45	10	20	

-57.42	1.38	3.45	15	20
-53.64	1.83	3.45	20	20
-49.99	2.26	3.45	25	20
-46.48	2.68	3.45	30	20
-43.14	3.07	3.45	35	20
-40.00	3.44	3.45	40	20
-37.08	3.78	3.45	45	20
-48.47	0.00	3.81	0	25
-43.72	0.45	3.81	5	25
-39.00	0.90	3.81	10	25
-34.36	1.35	3.81	15	25
-29.83	1.78	3.81	20	25
-25.44	2.20	3.81	25	25
-21.22	2.60	3.81	30	25
-17.21	2.98	3.81	35	25
-13.44	3.35	3.81	40	25
-9.93	3.68	3.81	45	25
-23.51	0.00	4.15	0	30
-18.08	0.44	4.15	5	30
-12.70	0.87	4.15	10	30
-7.39	1.30	4.15	15	30
-2.21	1.72	4.15	20	30
2.81	2.12	4.15	25	30
7.63	2.51	4.15	30	30
12.21	2.88	4.15	35	30
16.52	3.23	4.15	40	30
20.53	3.55	4.15	45	30
5.54	0.00	4.47	0	35
11.51	0.42	4.47	5	35
17.43	0.84	4.47	10	35
23.26	1.25	4.47	15	35
28.96	1.65	4.47	20	35
34.48	2.04	4.47	25	35
39.78	2.41	4.47	30	35
44.82	2.76	4.47	35	35
49.56	3.10	4.47	40	35
53.97	3.41	4.47	45	35
38.44	0.00	4.78	0	40
44.81	0.40	4.78	5	40
51.12	0.80	4.78	10	40
57.34	1.19	4.78	15	40
63.42	1.57	4.78	20	40
69.31	1.94	4.78	25	40
74.96	2.29	4.78	30	40
80.33	2.63	4.78	35	40
85.39	2.95	4.78	40	40
90.08	3.24	4.78	45	40
74.96	0.00	5.06	0	45
81.57	0.38	5.06	5	45
88.12	0.75	5.06	10	45

94.58	1.12	5.06	15	45
100.88	1.48	5.06	20	45
106.99	1.83	5.06	25	45
112.85	2.16	5.06	30	45
118.43	2.48	5.06	35	45
123.67	2.78	5.06	40	45
128.55	3.06	5.06	45	45
114.82	0.00	5.32	0	50
121.50	0.35	5.32	5	50
128.14	0.70	5.32	10	50
134.67	1.05	5.32	15	50
141.05	1.38	5.32	20	50
147.24	1.71	5.32	25	50
153.17	2.02	5.32	30	50
158.82	2.32	5.32	35	50
164.13	2.60	5.32	40	50
169.06	2.86	5.32	45	50

Turning to the side

Moment	X	Y	alfa1	alfa2
1000.96	0.00	-0.27	0	-30
979.46	0.44	-0.27	5	-30
963.73	0.87	-0.27	10	-30
953.54	1.30	-0.27	15	-30
948.56	1.72	-0.27	20	-30
948.30	2.12	-0.27	25	-30
952.20	2.51	-0.27	30	-30
959.62	2.88	-0.27	35	-30
969.87	3.23	-0.27	40	-30
982.22	3.55	-0.27	45	-30
1028.63	0.00	0.07	0	-25
1003.68	0.45	0.07	5	-25
983.98	0.90	0.07	10	-25
969.39	1.35	0.07	15	-25
959.67	1.78	0.07	20	-25
954.44	2.20	0.07	25	-25
953.28	2.60	0.07	30	-25
955.67	2.98	0.07	35	-25
961.06	3.35	0.07	40	-25
968.87	3.68	0.07	45	-25
1057.77	0.00	0.43	0	-20
1029.60	0.47	0.43	5	-20
1006.15	0.93	0.43	10	-20
987.34	1.38	0.43	15	-20
973.03	1.83	0.43	20	-20
962.97	2.26	0.43	25	-20
956.87	2.68	0.43	30	-20
954.34	3.07	0.43	35	-20

954.97	3.44	0.43	40	-20	
958.31	3.78	0.43	45	-20	
1088.15		0.00	0.80	0	-15
1057.05		0.48	0.80	5	-15
1030.08		0.95	0.80	10	-15
1007.28		1.41	0.80	15	-15
988.59	1.87	0.80	20	-15	
973.90	2.31	0.80	25	-15	
963.03	2.73	0.80	30	-15	
955.73	3.14	0.80	35	-15	
951.74	3.51	0.80	40	-15	
950.75	3.87	0.80	45	-15	
1119.56		0.00	1.17	0	-10
1085.81		0.48	1.17	5	-10
1055.62		0.96	1.17	10	-10
1029.09		1.44	1.17	15	-10
1006.28		1.90	1.17	20	-10
987.19	2.35	1.17	25	-10	
971.76	2.78	1.17	30	-10	
959.90	3.18	1.17	35	-10	
951.47	3.57	1.17	40	-10	
946.33	3.92	1.17	45	-10	
1151.75		0.00	1.55	0	-5
1115.69		0.49	1.55	5	-5
1082.59		0.97	1.55	10	-5
1052.64		1.45	1.55	15	-5
1026.00		1.92	1.55	20	-5
1002.78		2.37	1.55	25	-5
983.06	2.80	1.55	30	-5	
966.87	3.21	1.55	35	-5	
954.24	3.60	1.55	40	-5	
945.14	3.96	1.55	45	-5	
1184.47		0.00	1.94	0	0
1146.46		0.49	1.94	5	0
1110.79		0.98	1.94	10	0
1077.76		1.45	1.94	15	0
1047.61		1.92	1.94	20	0
1020.57		2.37	1.94	25	0
996.85	2.81	1.94	30	0	
976.62	3.22	1.94	35	0	
960.05	3.61	1.94	40	0	
947.24	3.97	1.94	45	0	
1151.75		0.00	2.33	0	5
1115.69		0.49	2.33	5	5
1082.59		0.97	2.33	10	5
1052.64		1.45	2.33	15	5
1026.00		1.92	2.33	20	5
1002.78		2.37	2.33	25	5
983.06	2.80	2.33	30	5	
966.87	3.21	2.33	35	5	

954.24	3.60	2.33	40	5	
945.14	3.96	2.33	45	5	
1119.56		0.00	2.71	0	10
1085.81		0.48	2.71	5	10
1055.62		0.96	2.71	10	10
1029.09		1.44	2.71	15	10
1006.28		1.90	2.71	20	10
987.19	2.35	2.71	25	10	
971.76	2.78	2.71	30	10	
959.90	3.18	2.71	35	10	
951.47	3.57	2.71	40	10	
946.33	3.92	2.71	45	10	
1088.15		0.00	3.08	0	15
1057.05		0.48	3.08	5	15
1030.08		0.95	3.08	10	15
1007.28		1.41	3.08	15	15
988.59	1.87	3.08	20	15	
973.90	2.31	3.08	25	15	
963.03	2.73	3.08	30	15	
955.73	3.14	3.08	35	15	
951.74	3.51	3.08	40	15	
950.75	3.87	3.08	45	15	
1057.77		0.00	3.45	0	20
1029.60		0.47	3.45	5	20
1006.15		0.93	3.45	10	20
987.34	1.38	3.45	15	20	
973.03	1.83	3.45	20	20	
962.97	2.26	3.45	25	20	
956.87	2.68	3.45	30	20	
954.34	3.07	3.45	35	20	
954.97	3.44	3.45	40	20	
958.31	3.78	3.45	45	20	
1028.63		0.00	3.81	0	25
1003.68		0.45	3.81	5	25
983.98	0.90	3.81	10	25	
969.39	1.35	3.81	15	25	
959.67	1.78	3.81	20	25	
954.44	2.20	3.81	25	25	
953.28	2.60	3.81	30	25	
955.67	2.98	3.81	35	25	
961.06	3.35	3.81	40	25	
968.87	3.68	3.81	45	25	
1000.96		0.00	4.15	0	30
979.46	0.44	4.15	5	30	
963.73	0.87	4.15	10	30	
953.54	1.30	4.15	15	30	
948.56	1.72	4.15	20	30	
948.30	2.12	4.15	25	30	
952.20	2.51	4.15	30	30	
959.62	2.88	4.15	35	30	

969.87	3.23	4.15	40	30
982.22	3.55	4.15	45	30
974.98	0.00	4.47	0	35
957.11	0.42	4.47	5	35
945.50	0.84	4.47	10	35
939.86	1.25	4.47	15	35
939.73	1.65	4.47	20	35
944.52	2.04	4.47	25	35
953.56	2.41	4.47	30	35
966.06	2.76	4.47	35	35
981.22	3.10	4.47	40	35
998.16	3.41	4.47	45	35
950.88	0.00	4.78	0	40
936.79	0.40	4.78	5	40
929.42	0.80	4.78	10	40
928.40	1.19	4.78	15	40
933.17	1.57	4.78	20	40
943.05	1.94	4.78	25	40
957.24	2.29	4.78	30	40
974.83	2.63	4.78	35	40
994.88	2.95	4.78	40	40
1016.41		3.24	4.78	45
928.84	0.00	5.06	0	45
918.62	0.38	5.06	5	45
915.56	0.75	5.06	10	45
919.19	1.12	5.06	15	45
928.87	1.48	5.06	20	45
943.82	1.83	5.06	25	45
963.11	2.16	5.06	30	45
985.74	2.48	5.06	35	45
1010.64		2.78	5.06	40
1036.70		3.06	5.06	45
909.04	0.00	5.32	0	50
902.74	0.35	5.32	5	50
903.99	0.70	5.32	10	50
912.25	1.05	5.32	15	50
926.78	1.38	5.32	20	50
946.72	1.71	5.32	25	50
971.03	2.02	5.32	30	50
998.59	2.32	5.32	35	50
1028.22		2.60	5.32	40
1058.70		2.86	5.32	45

Turning to the back

Moment	X	Y	alfa1	alfa2
3592.64	0.00	-0.27	0	-30
3642.92	0.44	-0.27	5	-30
3691.54	0.87	-0.27	10	-30

3737.60	1.30	-0.27	15	-30
3780.27	1.72	-0.27	20	-30
3818.82	2.12	-0.27	25	-30
3852.67	2.51	-0.27	30	-30
3881.36	2.88	-0.27	35	-30
3904.58	3.23	-0.27	40	-30
3922.18	3.55	-0.27	45	-30
3517.60	0.00	0.07	0	-25
3564.05	0.45	0.07	5	-25
3609.66	0.90	0.07	10	-25
3653.61	1.35	0.07	15	-25
3695.17	1.78	0.07	20	-25
3733.69	2.20	0.07	25	-25
3768.61	2.60	0.07	30	-25
3799.52	2.98	0.07	35	-25
3826.10	3.35	0.07	40	-25
3848.16	3.68	0.07	45	-25
3443.15	0.00	0.43	0	-20
3485.61	0.47	0.43	5	-20
3528.04	0.93	0.43	10	-20
3569.74	1.38	0.43	15	-20
3610.07	1.83	0.43	20	-20
3648.45	2.26	0.43	25	-20
3684.38	2.68	0.43	30	-20
3717.46	3.07	0.43	35	-20
3747.38	3.44	0.43	40	-20
3773.91	3.78	0.43	45	-20
3369.85	0.00	0.80	0	-15
3408.18	0.48	0.80	5	-15
3447.29	0.95	0.80	10	-15
3486.62	1.41	0.80	15	-15
3525.60	1.87	0.80	20	-15
3563.75	2.31	0.80	25	-15
3600.61	2.73	0.80	30	-15
3635.81	3.14	0.80	35	-15
3669.02	3.51	0.80	40	-15
3700.01	3.87	0.80	45	-15
3298.26	0.00	1.17	0	-10
3332.35	0.48	1.17	5	-10
3368.05	0.96	1.17	10	-10
3404.89	1.44	1.17	15	-10
3442.43	1.90	1.17	20	-10
3480.25	2.35	1.17	25	-10
3517.95	2.78	1.17	30	-10
3555.18	3.18	1.17	35	-10
3591.63	3.57	1.17	40	-10
3627.02	3.92	1.17	45	-10
3228.92	0.00	1.55	0	-5
3258.70	0.49	1.55	5	-5
3290.89	0.97	1.55	10	-5

3325.16	1.45	1.55	15	-5
3361.17	1.92	1.55	20	-5
3398.56	2.37	1.55	25	-5
3437.01	2.80	1.55	30	-5
3476.19	3.21	1.55	35	-5
3515.78	3.60	1.55	40	-5
3555.49	3.96	1.55	45	-5
3162.37	0.00	1.94	0	0
3187.79	0.49	1.94	5	0
3216.42	0.98	1.94	10	0
3248.05	1.45	1.94	15	0
3282.44	1.92	1.94	20	0
3319.32	2.37	1.94	25	0
3358.42	2.81	1.94	30	0
3399.44	3.22	1.94	35	0
3442.06	3.61	1.94	40	0
3485.97	3.97	1.94	45	0
3228.92	0.00	2.33	0	5
3258.70	0.49	2.33	5	5
3290.89	0.97	2.33	10	5
3325.16	1.45	2.33	15	5
3361.17	1.92	2.33	20	5
3398.56	2.37	2.33	25	5
3437.01	2.80	2.33	30	5
3476.19	3.21	2.33	35	5
3515.78	3.60	2.33	40	5
3555.49	3.96	2.33	45	5
3298.26	0.00	2.71	0	10
3332.35	0.48	2.71	5	10
3368.05	0.96	2.71	10	10
3404.89	1.44	2.71	15	10
3442.43	1.90	2.71	20	10
3480.25	2.35	2.71	25	10
3517.95	2.78	2.71	30	10
3555.18	3.18	2.71	35	10
3591.63	3.57	2.71	40	10
3627.02	3.92	2.71	45	10
3369.85	0.00	3.08	0	15
3408.18	0.48	3.08	5	15
3447.29	0.95	3.08	10	15
3486.62	1.41	3.08	15	15
3525.60	1.87	3.08	20	15
3563.75	2.31	3.08	25	15
3600.61	2.73	3.08	30	15
3635.81	3.14	3.08	35	15
3669.02	3.51	3.08	40	15
3700.01	3.87	3.08	45	15
3443.15	0.00	3.45	0	20
3485.61	0.47	3.45	5	20
3528.04	0.93	3.45	10	20

3569.74	1.38	3.45	15	20
3610.07	1.83	3.45	20	20
3648.45	2.26	3.45	25	20
3684.38	2.68	3.45	30	20
3717.46	3.07	3.45	35	20
3747.38	3.44	3.45	40	20
3773.91	3.78	3.45	45	20
3517.60	0.00	3.81	0	25
3564.05	0.45	3.81	5	25
3609.66	0.90	3.81	10	25
3653.61	1.35	3.81	15	25
3695.17	1.78	3.81	20	25
3733.69	2.20	3.81	25	25
3768.61	2.60	3.81	30	25
3799.52	2.98	3.81	35	25
3826.10	3.35	3.81	40	25
3848.16	3.68	3.81	45	25
3592.64	0.00	4.15	0	30
3642.92	0.44	4.15	5	30
3691.54	0.87	4.15	10	30
3737.60	1.30	4.15	15	30
3780.27	1.72	4.15	20	30
3818.82	2.12	4.15	25	30
3852.67	2.51	4.15	30	30
3881.36	2.88	4.15	35	30
3904.58	3.23	4.15	40	30
3922.18	3.55	4.15	45	30
3667.70	0.00	4.47	0	35
3721.60	0.42	4.47	5	35
3773.06	0.84	4.47	10	35
3821.07	1.25	4.47	15	35
3864.71	1.65	4.47	20	35
3903.21	2.04	4.47	25	35
3935.91	2.41	4.47	30	35
3962.36	2.76	4.47	35	35
3982.24	3.10	4.47	40	35
3995.43	3.41	4.47	45	35
3742.20	0.00	4.78	0	40
3799.50	0.40	4.78	5	40
3853.59	0.80	4.78	10	40
3903.38	1.19	4.78	15	40
3947.86	1.57	4.78	20	40
3986.20	1.94	4.78	25	40
4017.71	2.29	4.78	30	40
4041.90	2.63	4.78	35	40
4058.47	2.95	4.78	40	40
4067.33	3.24	4.78	45	40
3815.58	0.00	5.06	0	45
3876.02	0.38	5.06	5	45
3932.53	0.75	5.06	10	45

3983.91	1.12	5.06	15	45
4029.09	1.48	5.06	20	45
4067.17	1.83	5.06	25	45
4097.43	2.16	5.06	30	45
4119.38	2.48	5.06	35	45
4132.70	2.78	5.06	40	45
4137.35	3.06	5.06	45	45
3887.29	0.00	5.32	0	50
3950.60	0.35	5.32	5	50
4009.28	0.70	5.32	10	50
4062.04	1.05	5.32	15	50
4107.77	1.38	5.32	20	50
4145.50	1.71	5.32	25	50
4174.48	2.02	5.32	30	50
4194.20	2.32	5.32	35	50
4204.37	2.60	5.32	40	50
4204.95	2.86	5.32	45	50

Sliding of the machine
Value X Y

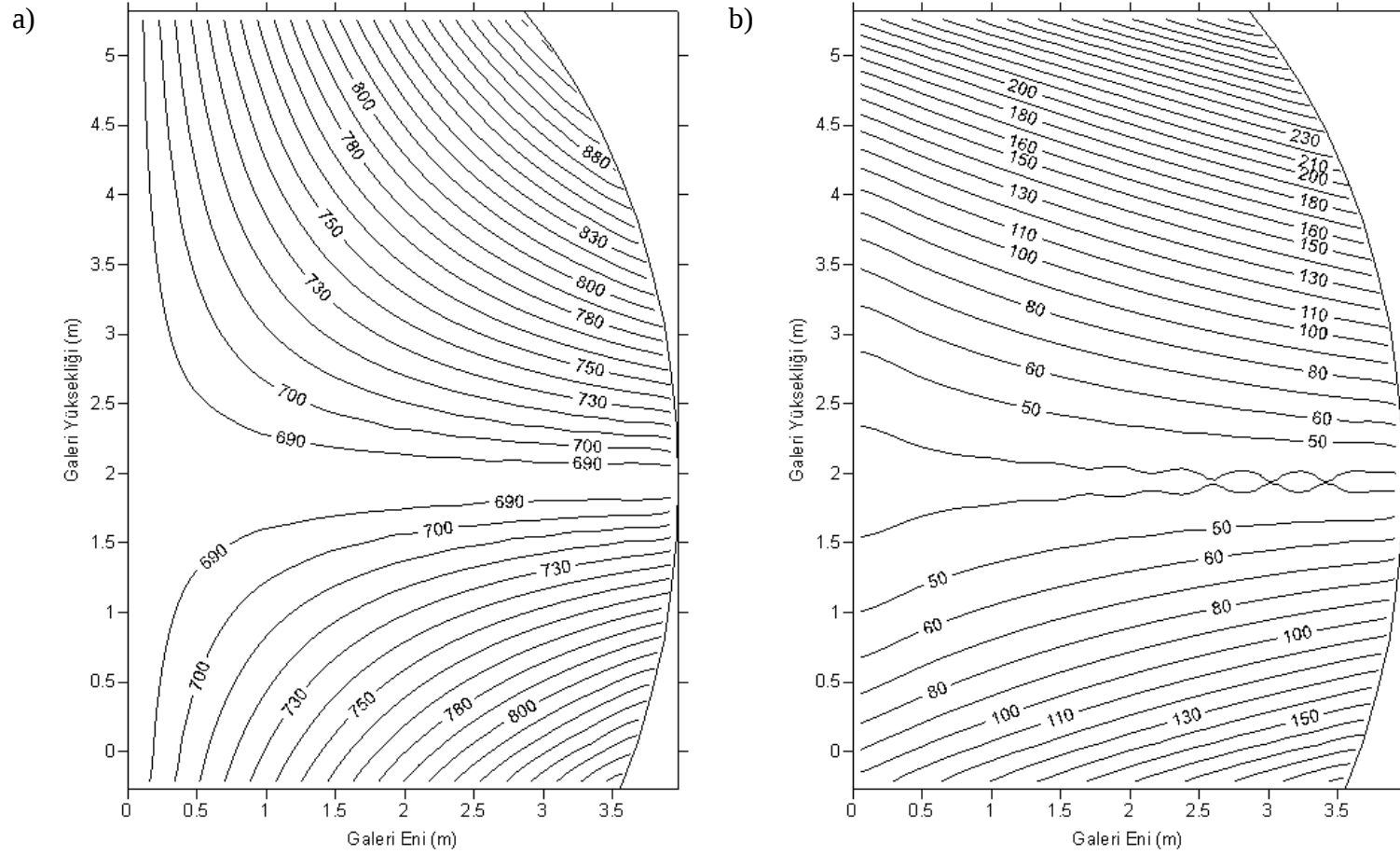
633.65	0.00	-0.27	0	-30
646.40	0.44	-0.27	5	-30
660.10	0.87	-0.27	10	-30
674.64	1.30	-0.27	15	-30
689.93	1.72	-0.27	20	-30
705.84	2.12	-0.27	25	-30
722.24	2.51	-0.27	30	-30
739.02	2.88	-0.27	35	-30
756.05	3.23	-0.27	40	-30
773.20	3.55	-0.27	45	-30
629.16	0.00	0.07	0	-25
641.93	0.45	0.07	5	-25
655.70	0.90	0.07	10	-25
670.37	1.35	0.07	15	-25
685.82	1.78	0.07	20	-25
701.94	2.20	0.07	25	-25
718.61	2.60	0.07	30	-25
735.69	2.98	0.07	35	-25
753.06	3.35	0.07	40	-25
770.58	3.68	0.07	45	-25
625.84	0.00	0.43	0	-20
638.63	0.47	0.43	5	-20
652.47	0.93	0.43	10	-20
667.24	1.38	0.43	15	-20
682.83	1.83	0.43	20	-20
699.13	2.26	0.43	25	-20
716.00	2.68	0.43	30	-20
733.33	3.07	0.43	35	-20

750.98	3.44	0.43	40	-20
768.82	3.78	0.43	45	-20
623.73	0.00	0.80	0	-15
636.54	0.48	0.80	5	-15
650.42	0.95	0.80	10	-15
665.27	1.41	0.80	15	-15
680.97	1.87	0.80	20	-15
697.40	2.31	0.80	25	-15
714.45	2.73	0.80	30	-15
731.98	3.14	0.80	35	-15
749.85	3.51	0.80	40	-15
767.93	3.87	0.80	45	-15
622.83	0.00	1.17	0	-10
635.65	0.48	1.17	5	-10
649.57	0.96	1.17	10	-10
664.47	1.44	1.17	15	-10
680.25	1.90	1.17	20	-10
696.79	2.35	1.17	25	-10
713.96	2.78	1.17	30	-10
731.62	3.18	1.17	35	-10
749.66	3.57	1.17	40	-10
767.92	3.92	1.17	45	-10
623.17	0.00	1.55	0	-5
635.99	0.49	1.55	5	-5
649.93	0.97	1.55	10	-5
664.87	1.45	1.55	15	-5
680.69	1.92	1.55	20	-5
697.29	2.37	1.55	25	-5
714.53	2.80	1.55	30	-5
732.28	3.21	1.55	35	-5
750.41	3.60	1.55	40	-5
768.78	3.96	1.55	45	-5
624.72	0.00	1.94	0	0
637.55	0.49	1.94	5	0
651.49	0.98	1.94	10	0
666.44	1.45	1.94	15	0
682.29	1.92	1.94	20	0
698.90	2.37	1.94	25	0
716.17	2.81	1.94	30	0
733.95	3.22	1.94	35	0
752.11	3.61	1.94	40	0
770.51	3.97	1.94	45	0
623.17	0.00	2.33	0	5
635.99	0.49	2.33	5	5
649.93	0.97	2.33	10	5
664.87	1.45	2.33	15	5
680.69	1.92	2.33	20	5
697.29	2.37	2.33	25	5
714.53	2.80	2.33	30	5
732.28	3.21	2.33	35	5

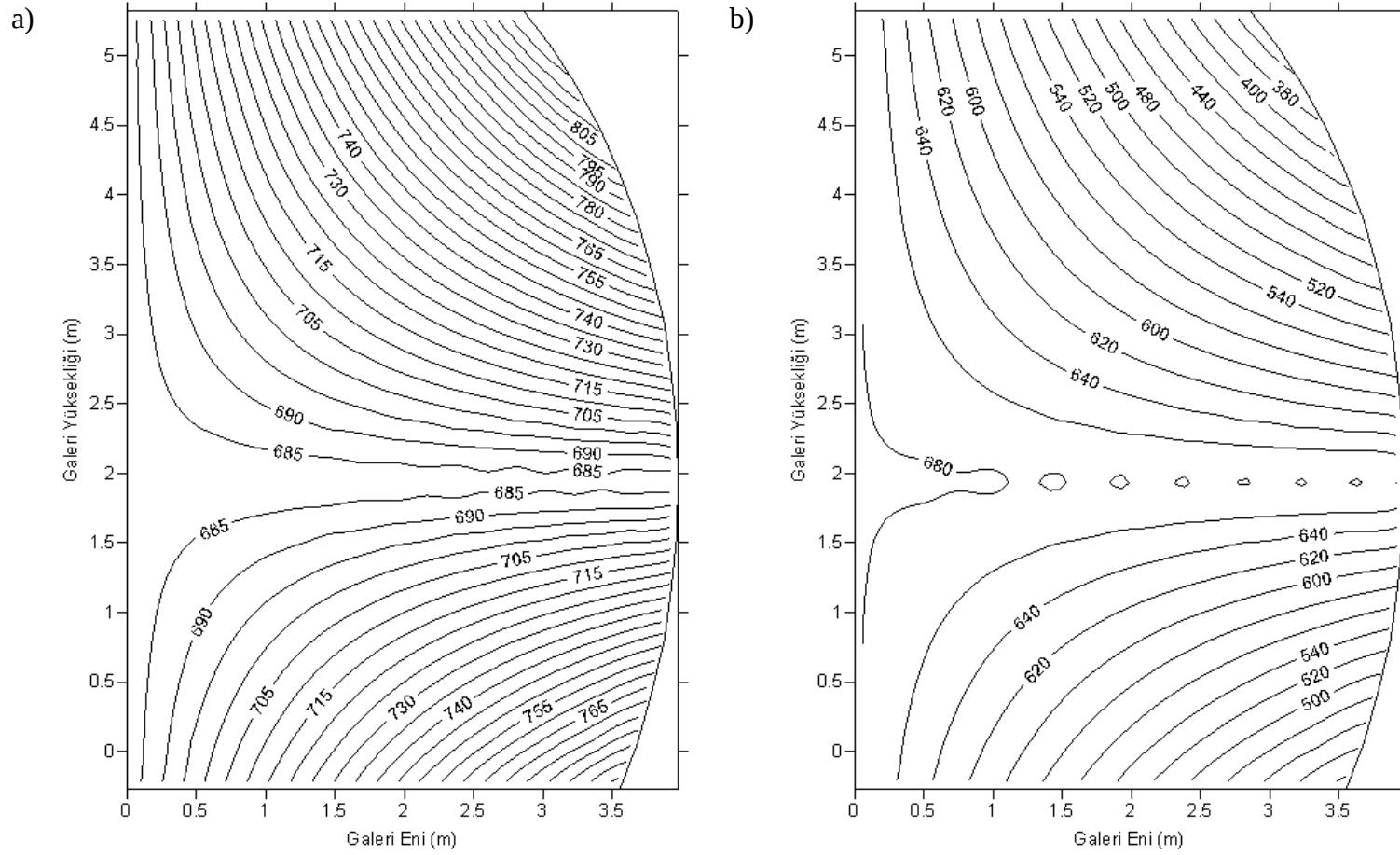
750.41	3.60	2.33	40	5
768.78	3.96	2.33	45	5
622.83	0.00	2.71	0	10
635.65	0.48	2.71	5	10
649.57	0.96	2.71	10	10
664.47	1.44	2.71	15	10
680.25	1.90	2.71	20	10
696.79	2.35	2.71	25	10
713.96	2.78	2.71	30	10
731.62	3.18	2.71	35	10
749.66	3.57	2.71	40	10
767.92	3.92	2.71	45	10
623.73	0.00	3.08	0	15
636.54	0.48	3.08	5	15
650.42	0.95	3.08	10	15
665.27	1.41	3.08	15	15
680.97	1.87	3.08	20	15
697.40	2.31	3.08	25	15
714.45	2.73	3.08	30	15
731.98	3.14	3.08	35	15
749.85	3.51	3.08	40	15
767.93	3.87	3.08	45	15
625.84	0.00	3.45	0	20
638.63	0.47	3.45	5	20
652.47	0.93	3.45	10	20
667.24	1.38	3.45	15	20
682.83	1.83	3.45	20	20
699.13	2.26	3.45	25	20
716.00	2.68	3.45	30	20
733.33	3.07	3.45	35	20
750.98	3.44	3.45	40	20
768.82	3.78	3.45	45	20
629.16	0.00	3.81	0	25
641.93	0.45	3.81	5	25
655.70	0.90	3.81	10	25
670.37	1.35	3.81	15	25
685.82	1.78	3.81	20	25
701.94	2.20	3.81	25	25
718.61	2.60	3.81	30	25
735.69	2.98	3.81	35	25
753.06	3.35	3.81	40	25
770.58	3.68	3.81	45	25
633.65	0.00	4.15	0	30
646.40	0.44	4.15	5	30
660.10	0.87	4.15	10	30
674.64	1.30	4.15	15	30
689.93	1.72	4.15	20	30
705.84	2.12	4.15	25	30
722.24	2.51	4.15	30	30
739.02	2.88	4.15	35	30

756.05	3.23	4.15	40	30
773.20	3.55	4.15	45	30
639.28	0.00	4.47	0	35
652.00	0.42	4.47	5	35
665.62	0.84	4.47	10	35
680.03	1.25	4.47	15	35
695.12	1.65	4.47	20	35
710.77	2.04	4.47	25	35
726.88	2.41	4.47	30	35
743.31	2.76	4.47	35	35
759.94	3.10	4.47	40	35
776.65	3.41	4.47	45	35
646.02	0.00	4.78	0	40
658.71	0.40	4.78	5	40
672.23	0.80	4.78	10	40
686.47	1.19	4.78	15	40
701.34	1.57	4.78	20	40
716.72	1.94	4.78	25	40
732.48	2.29	4.78	30	40
748.52	2.63	4.78	35	40
764.71	2.95	4.78	40	40
780.92	3.24	4.78	45	40
653.80	0.00	5.06	0	45
666.46	0.38	5.06	5	45
679.87	0.75	5.06	10	45
693.94	1.12	5.06	15	45
708.56	1.48	5.06	20	45
723.62	1.83	5.06	25	45
739.01	2.16	5.06	30	45
754.61	2.48	5.06	35	45
770.30	2.78	5.06	40	45
785.96	3.06	5.06	45	45
662.58	0.00	5.32	0	50
675.19	0.35	5.32	5	50
688.49	0.70	5.32	10	50
702.37	1.05	5.32	15	50
716.72	1.38	5.32	20	50
731.44	1.71	5.32	25	50
746.42	2.02	5.32	30	50
761.54	2.32	5.32	35	50
776.68	2.60	5.32	40	50
791.74	2.86	5.32	45	50

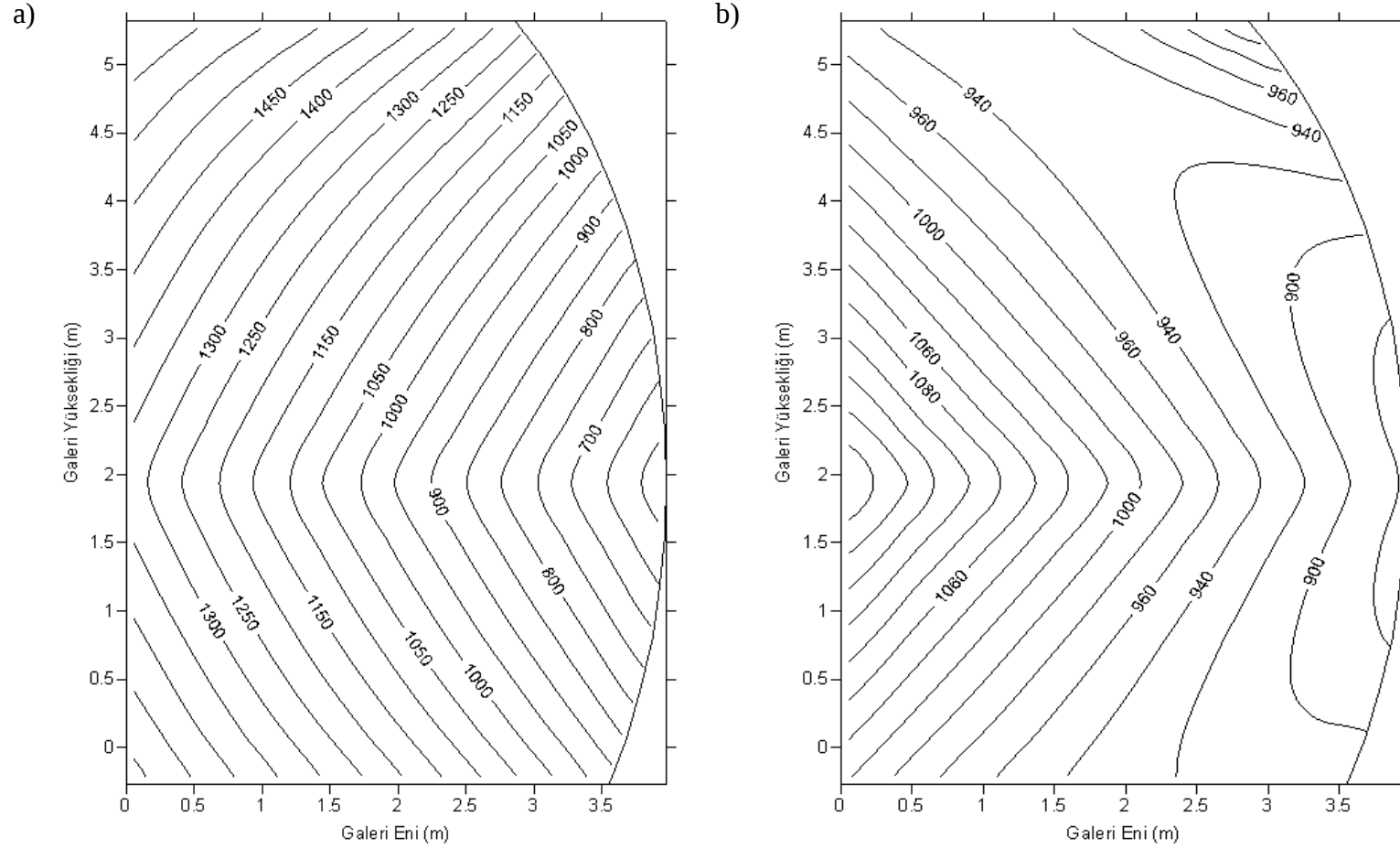
EK B STABİLİTE ANALİZİ MOMENT EŞDEĞER EĞRİLERİ



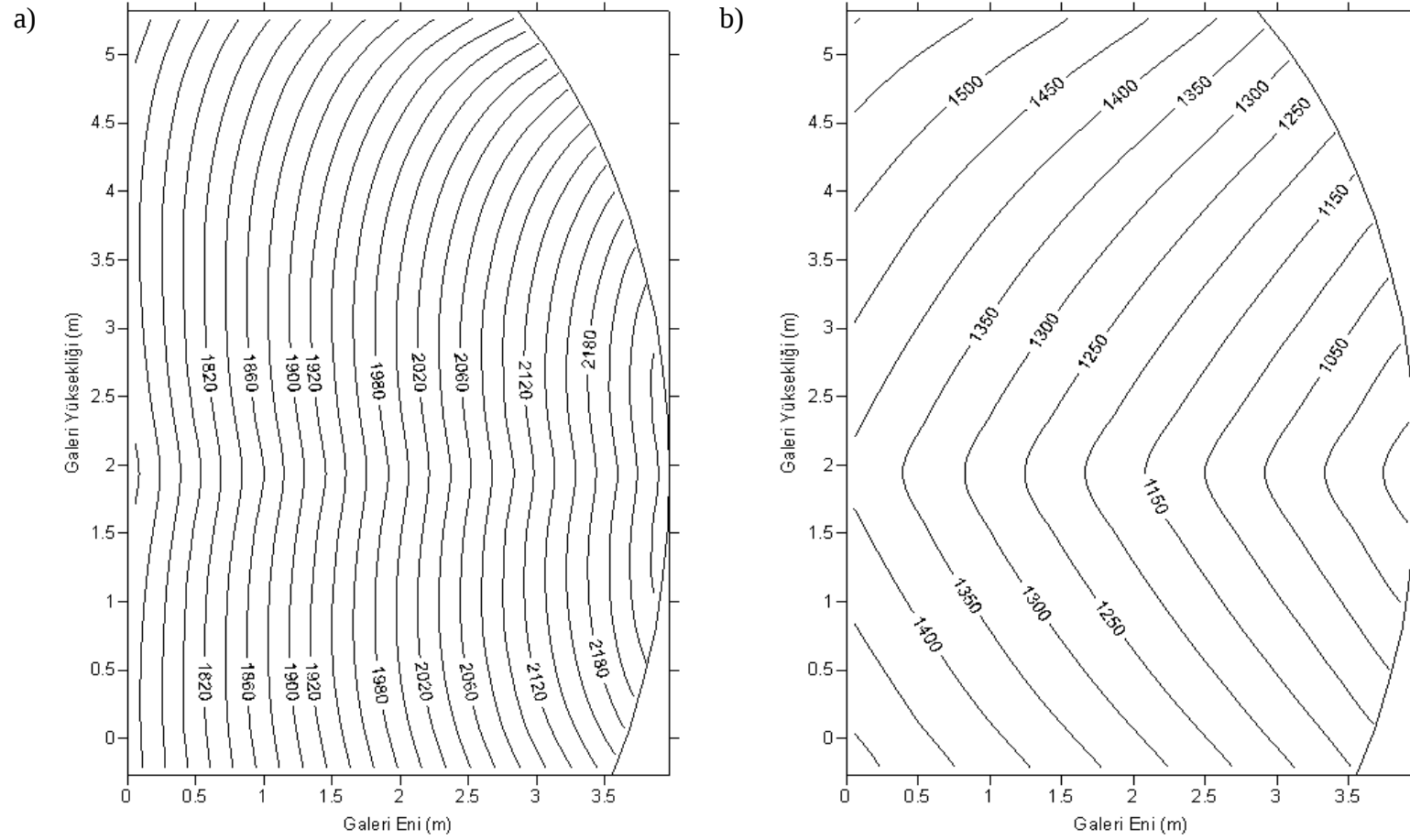
Şekil B.1 Kalem uç kesikli kesici kafanın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.



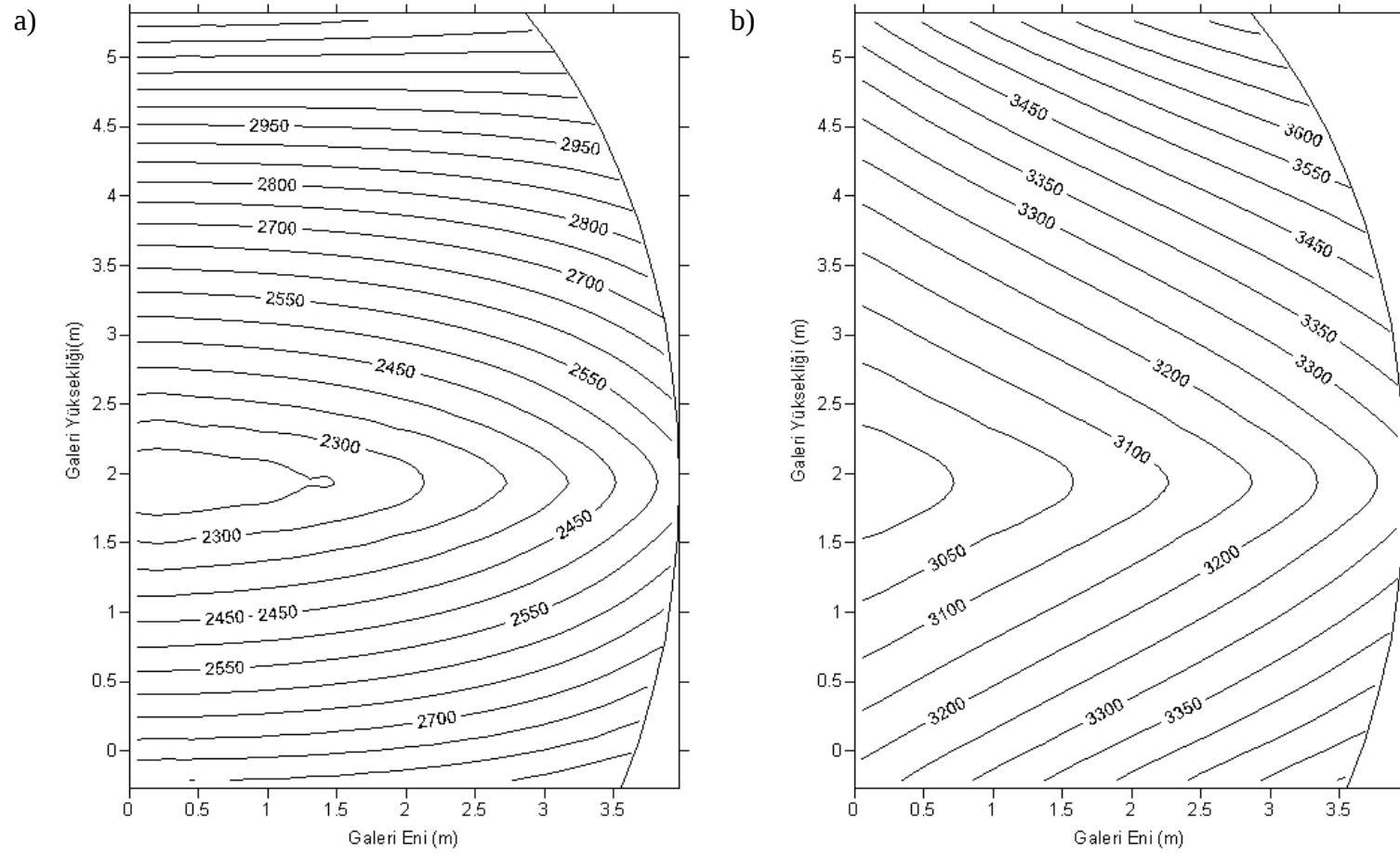
Şekil B.2 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



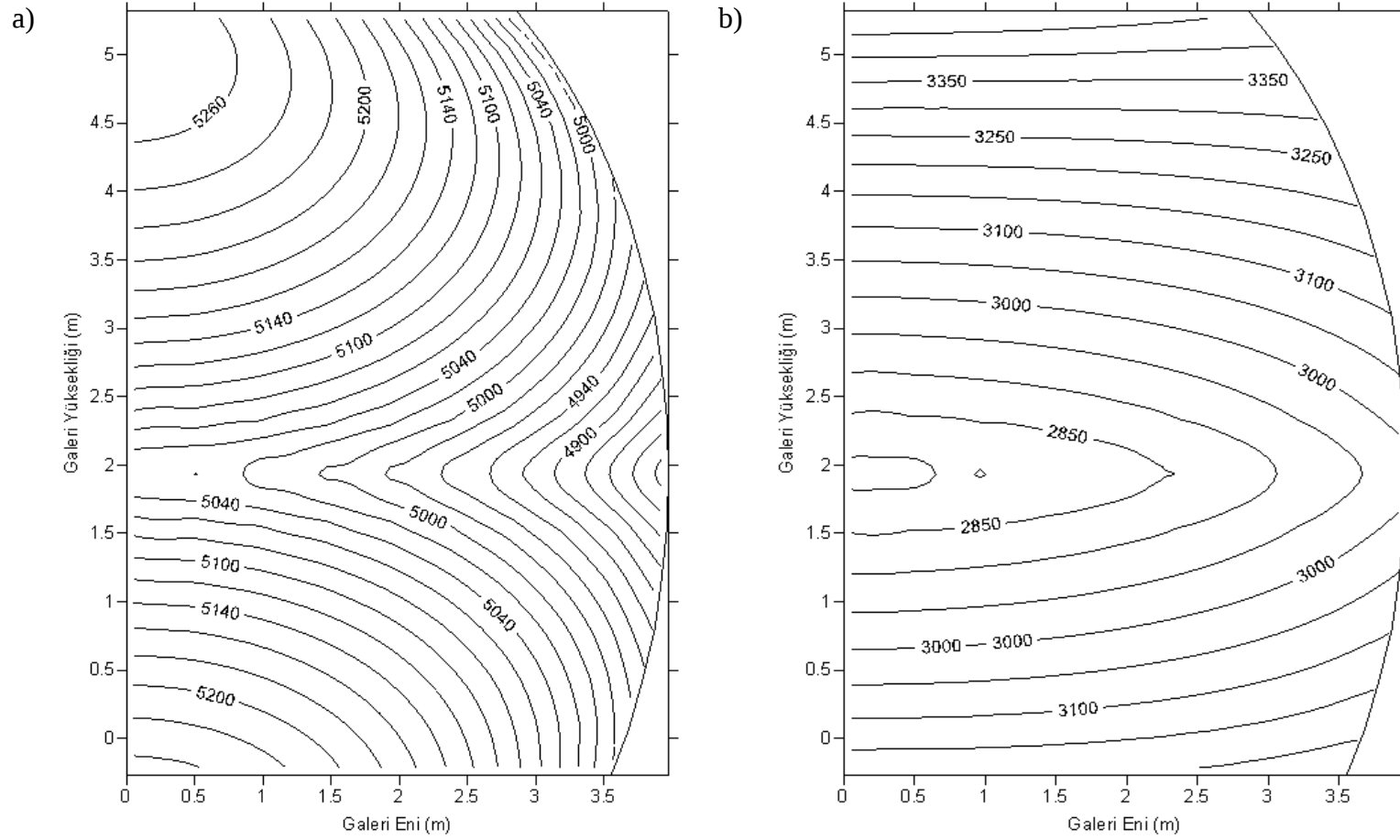
Şekil B.3 Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.



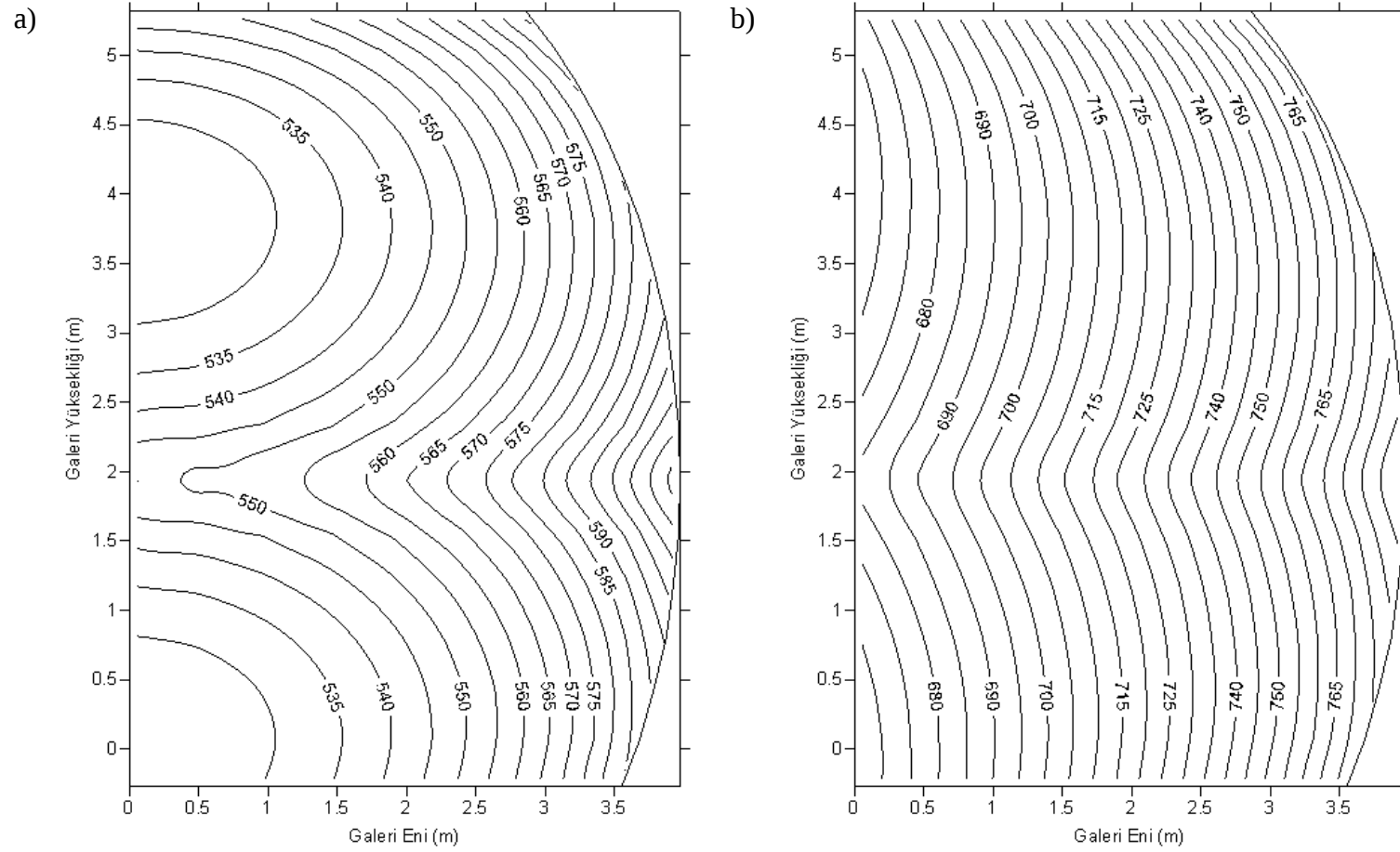
Şekil B.4 : Kalem uç kesikli kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



Şekil B.5 : Kalem uç kesikli kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.

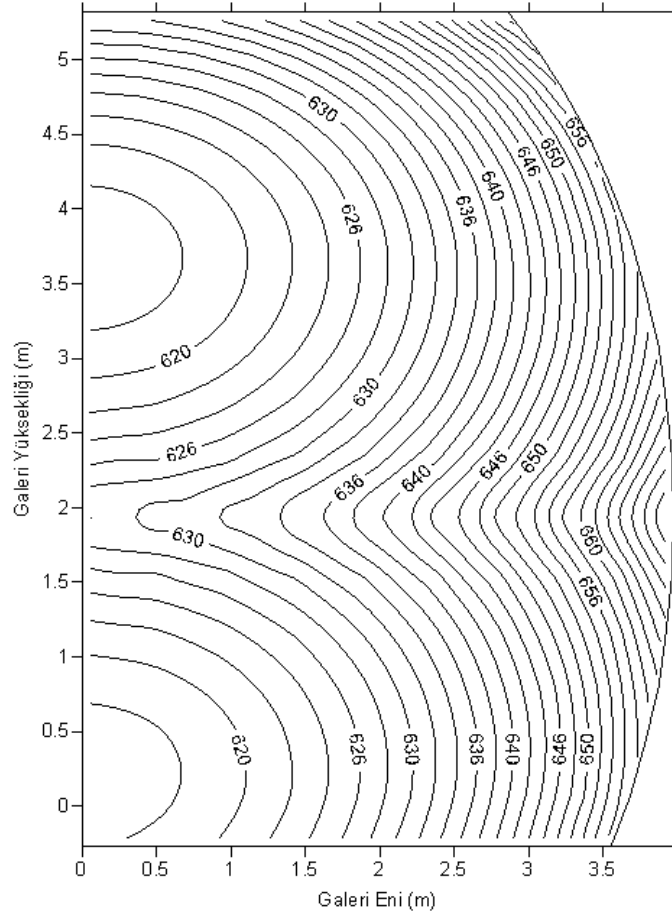


Şekil B.6 : Kalem uç keskilli kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.

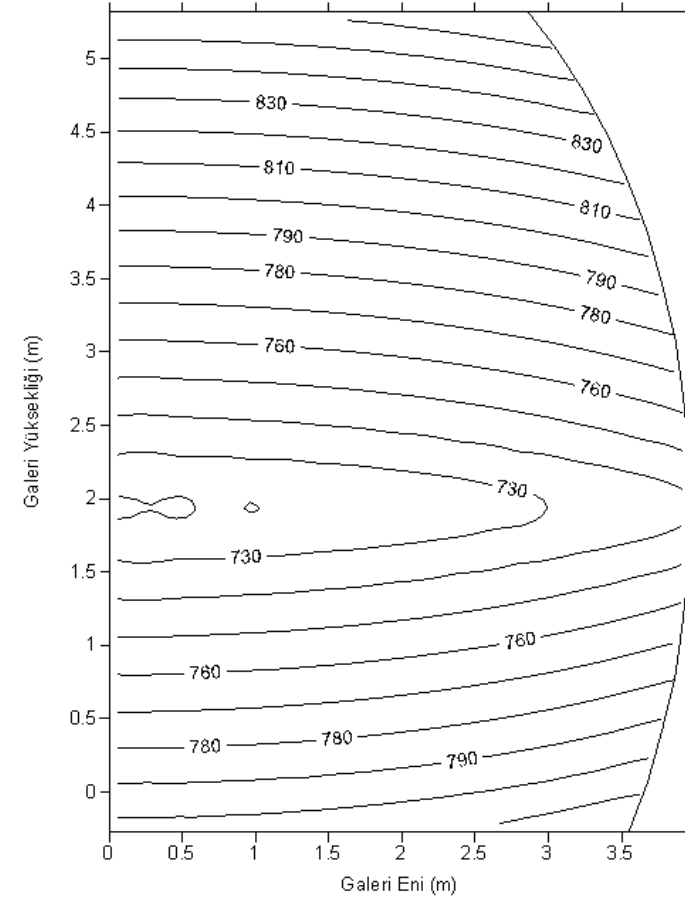


Şekil B.7 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.

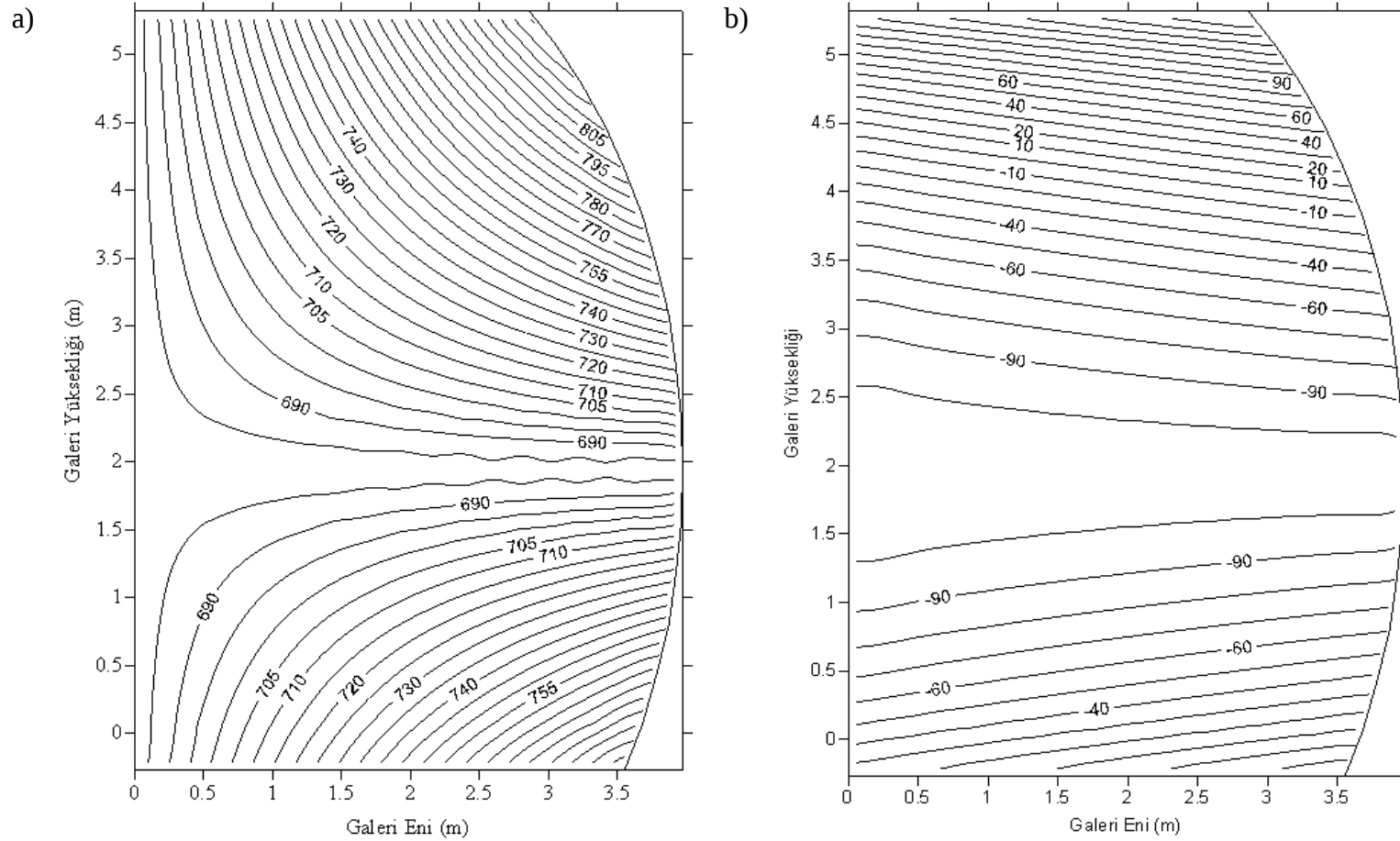
a)



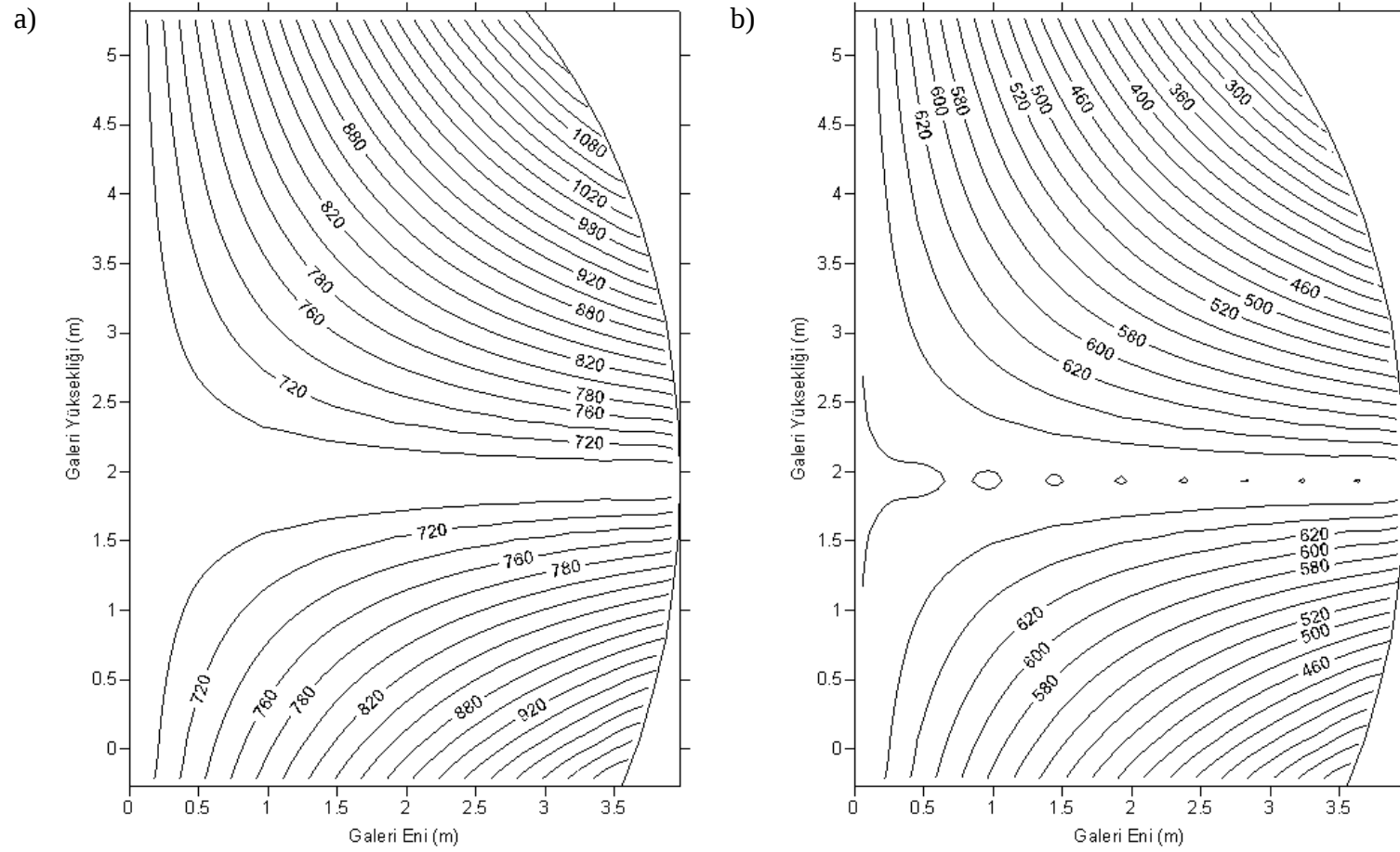
b)



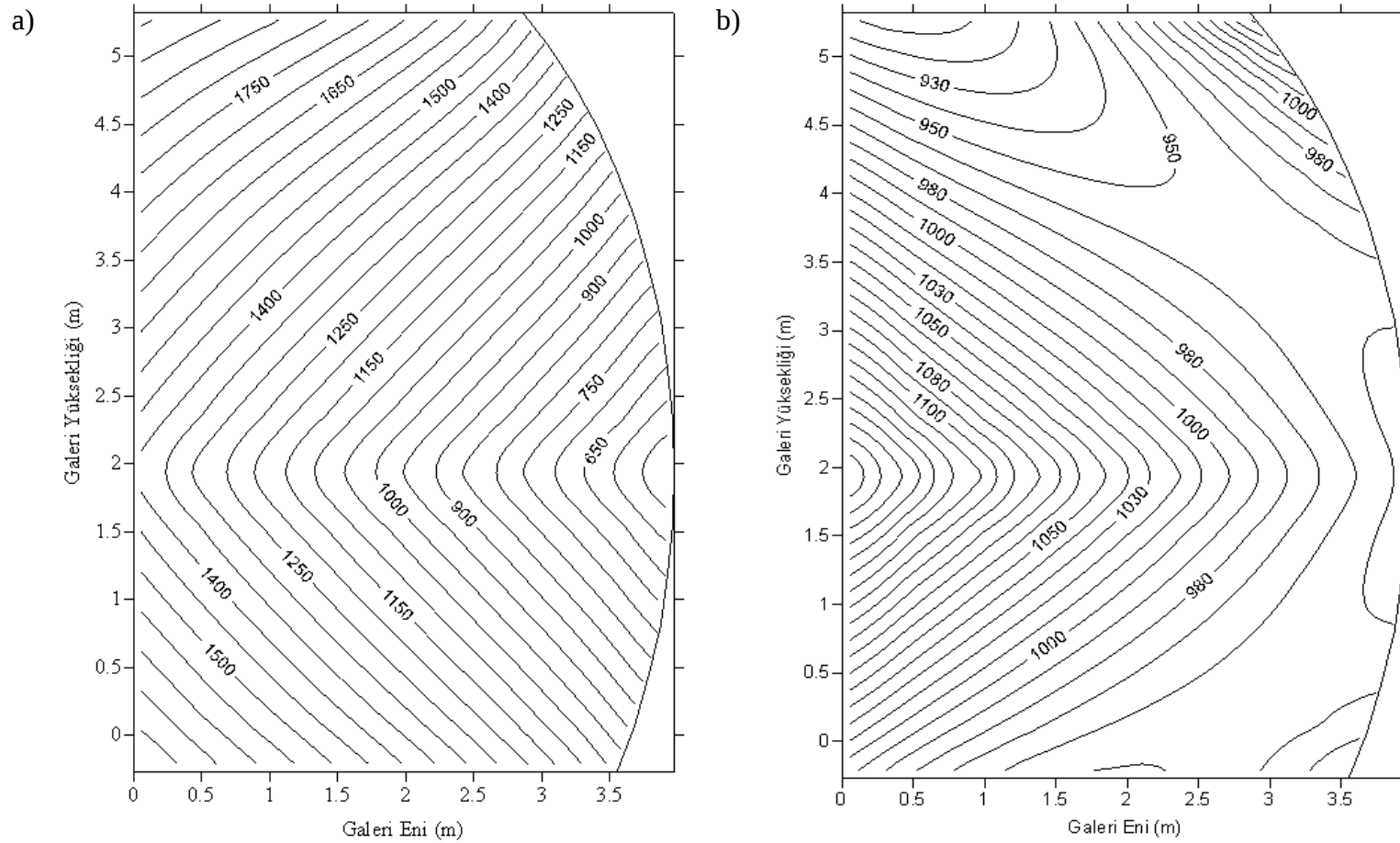
Şekil B.8 : Kalem uç keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.



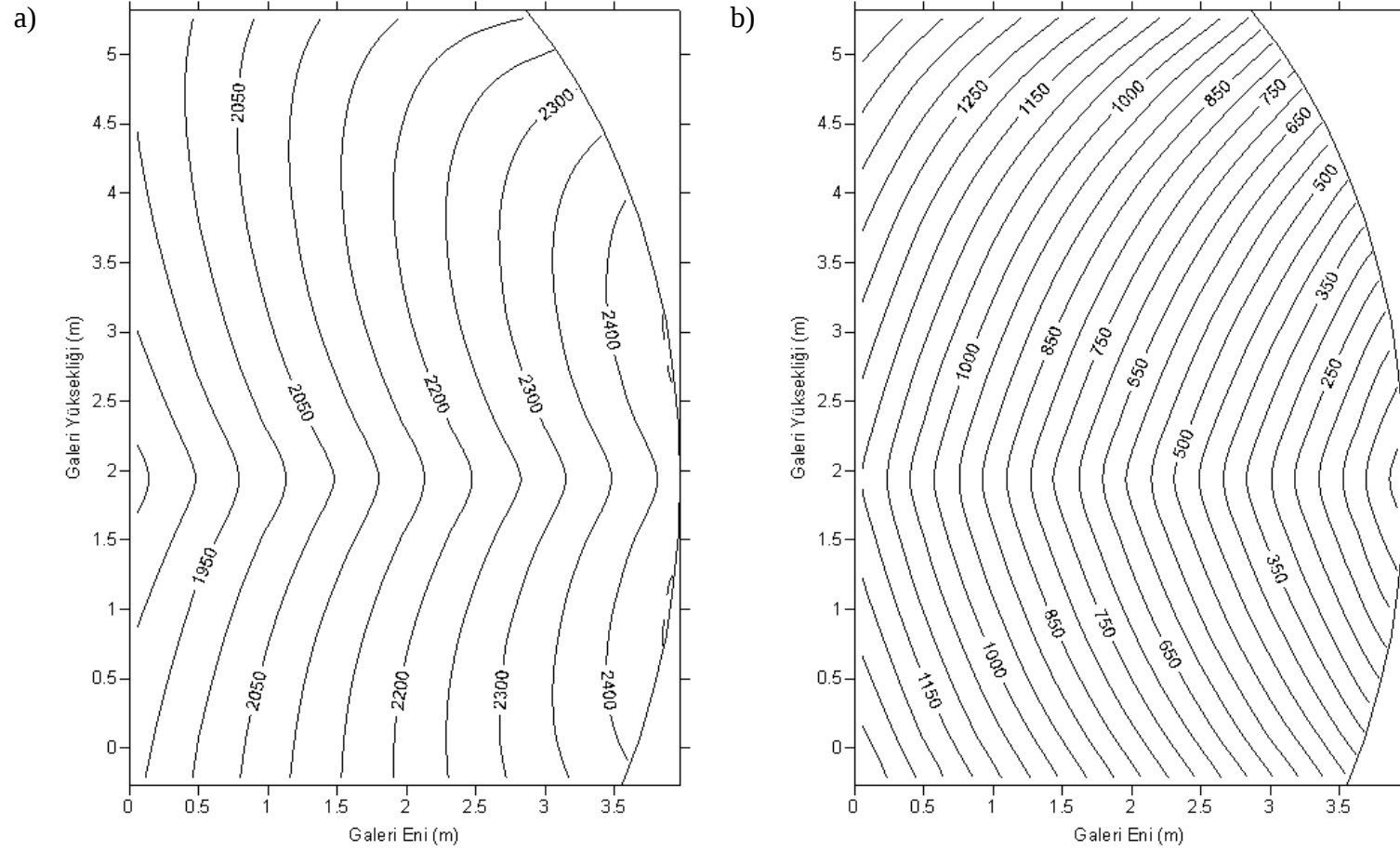
Şekil B.9 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.



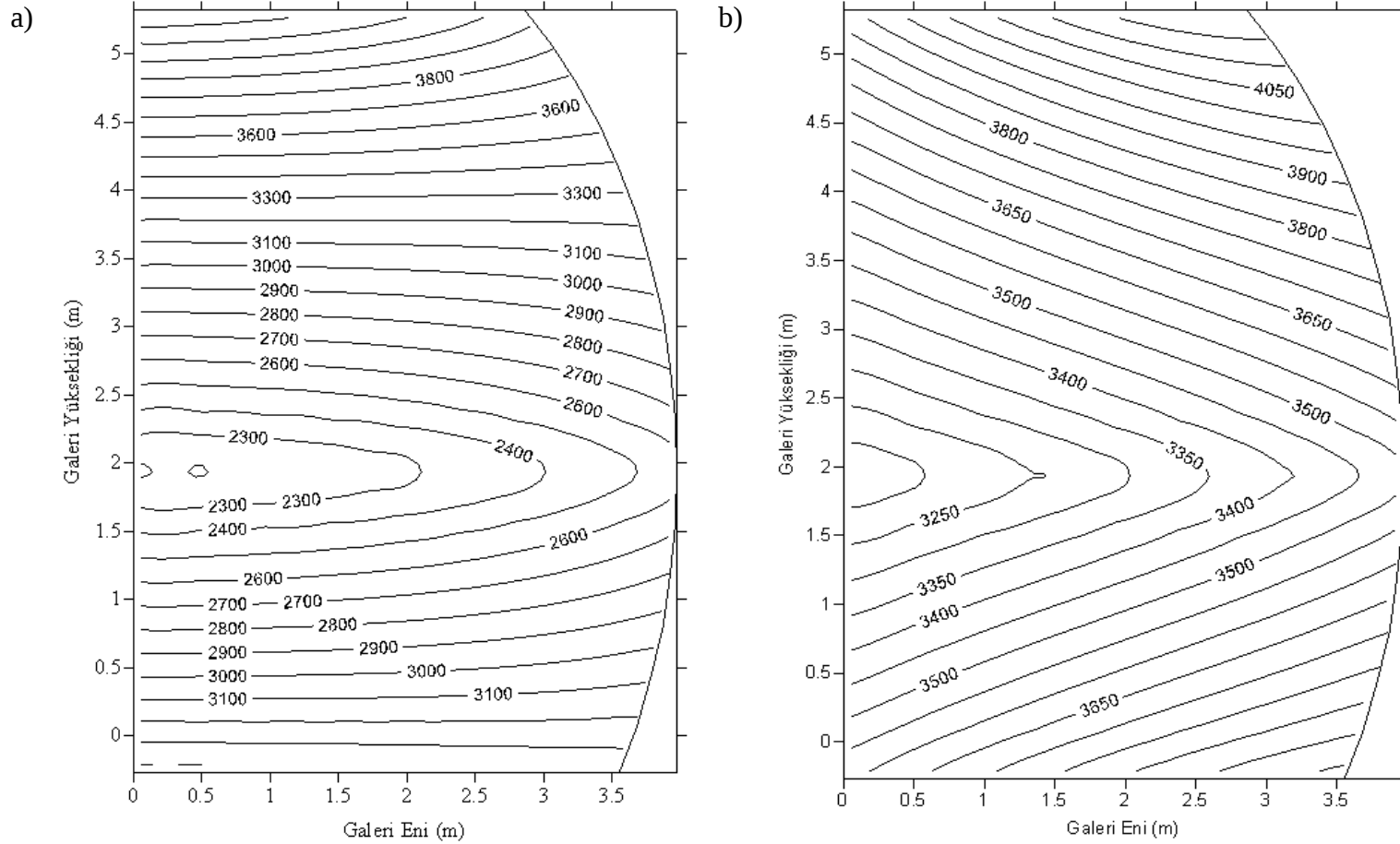
Şekil B.10 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



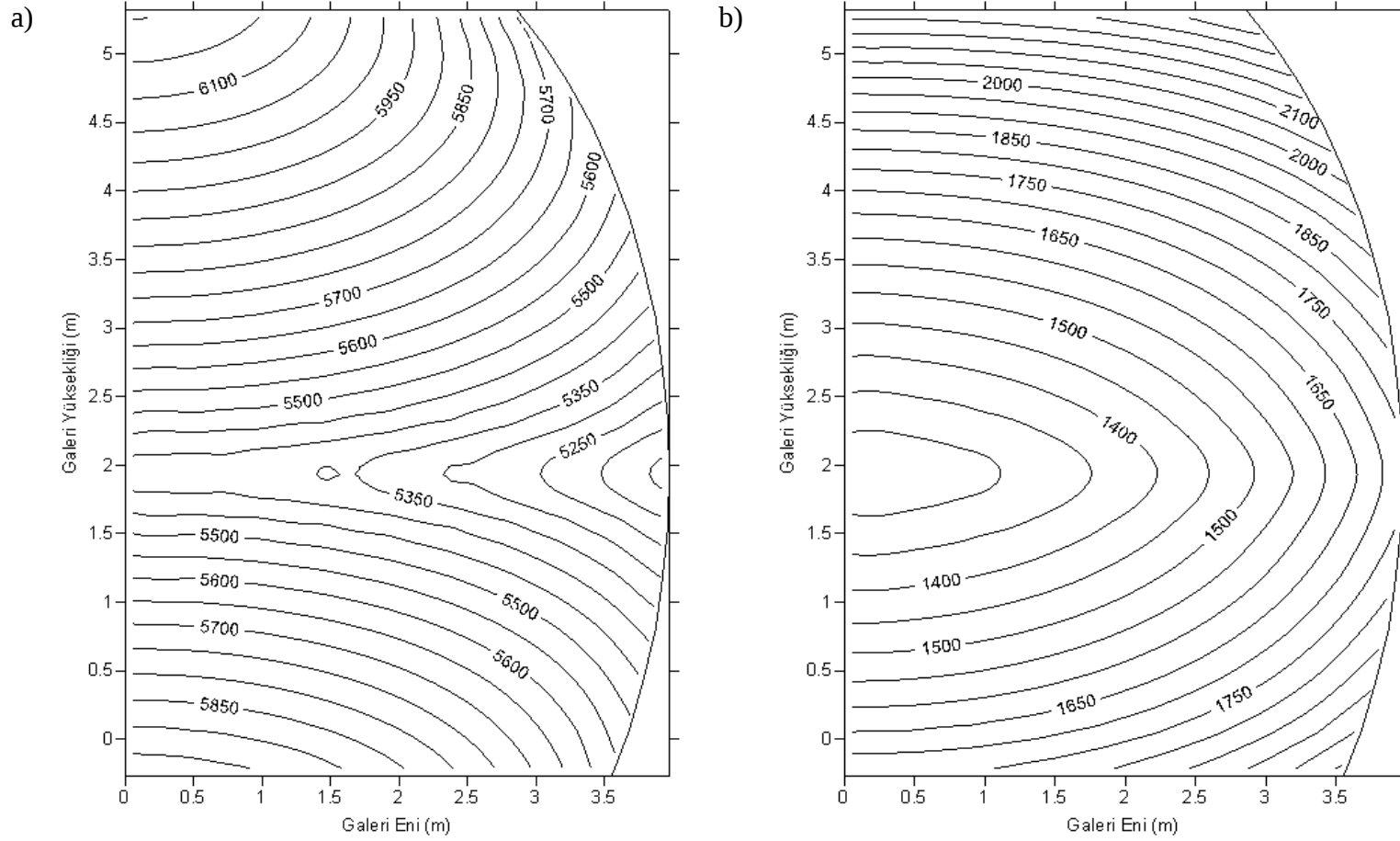
Şekil B.11 : Orijinal tip mini-disk kesikli kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.



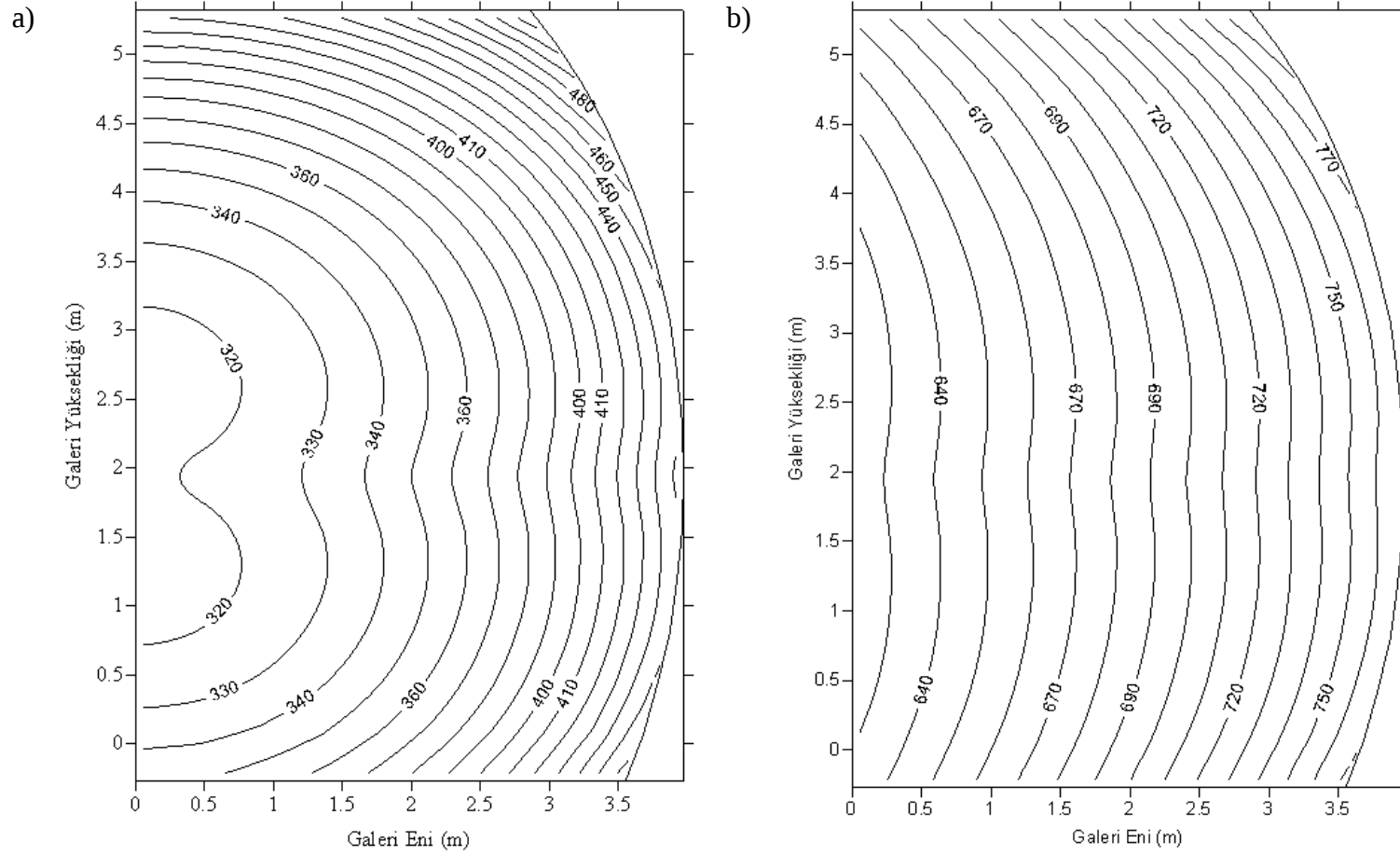
Şekil B.12 : Orijinal tip mini-disk kesikli kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



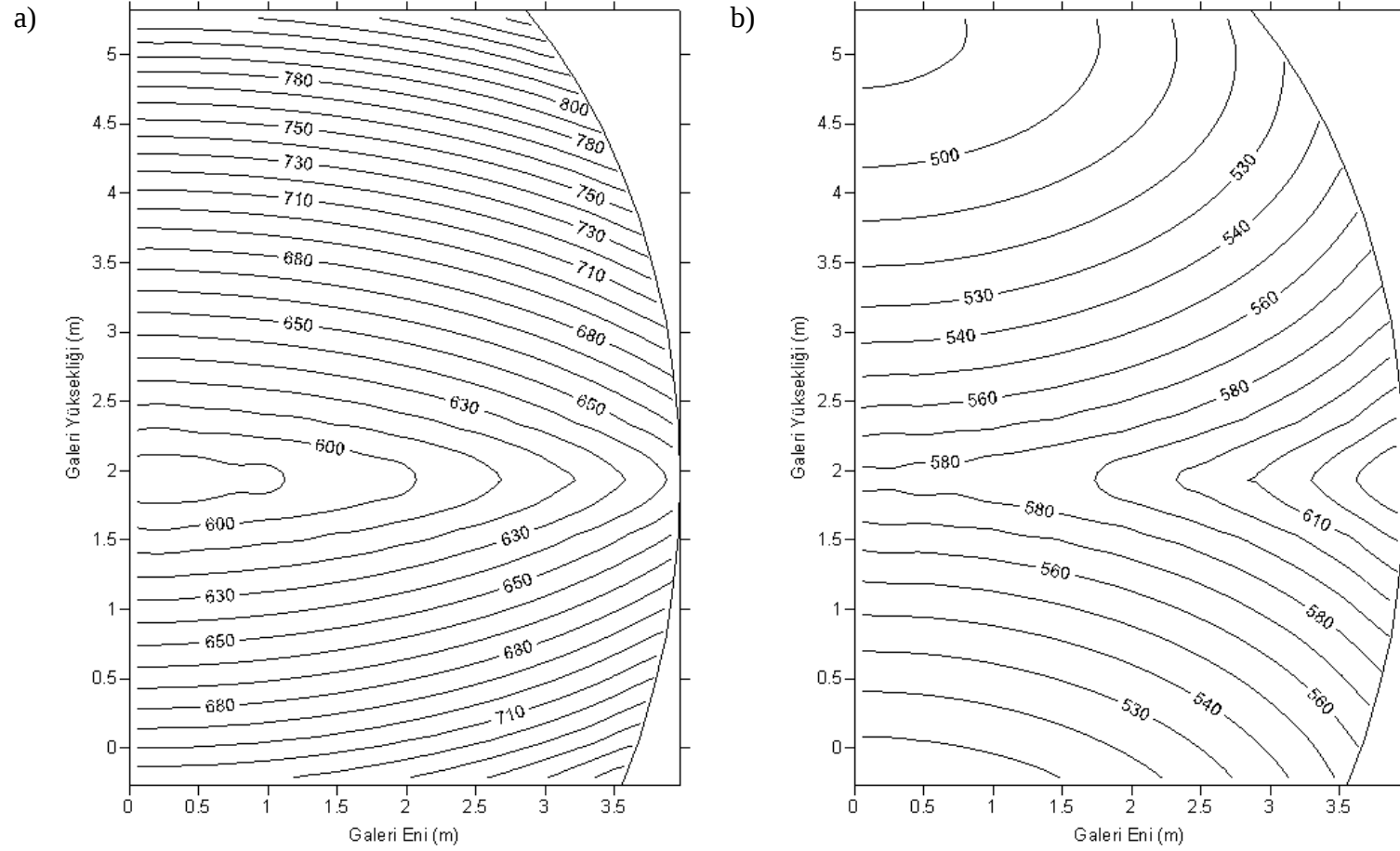
Şekil B.13 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a)arına doğru kesme b) yana doğru kesme



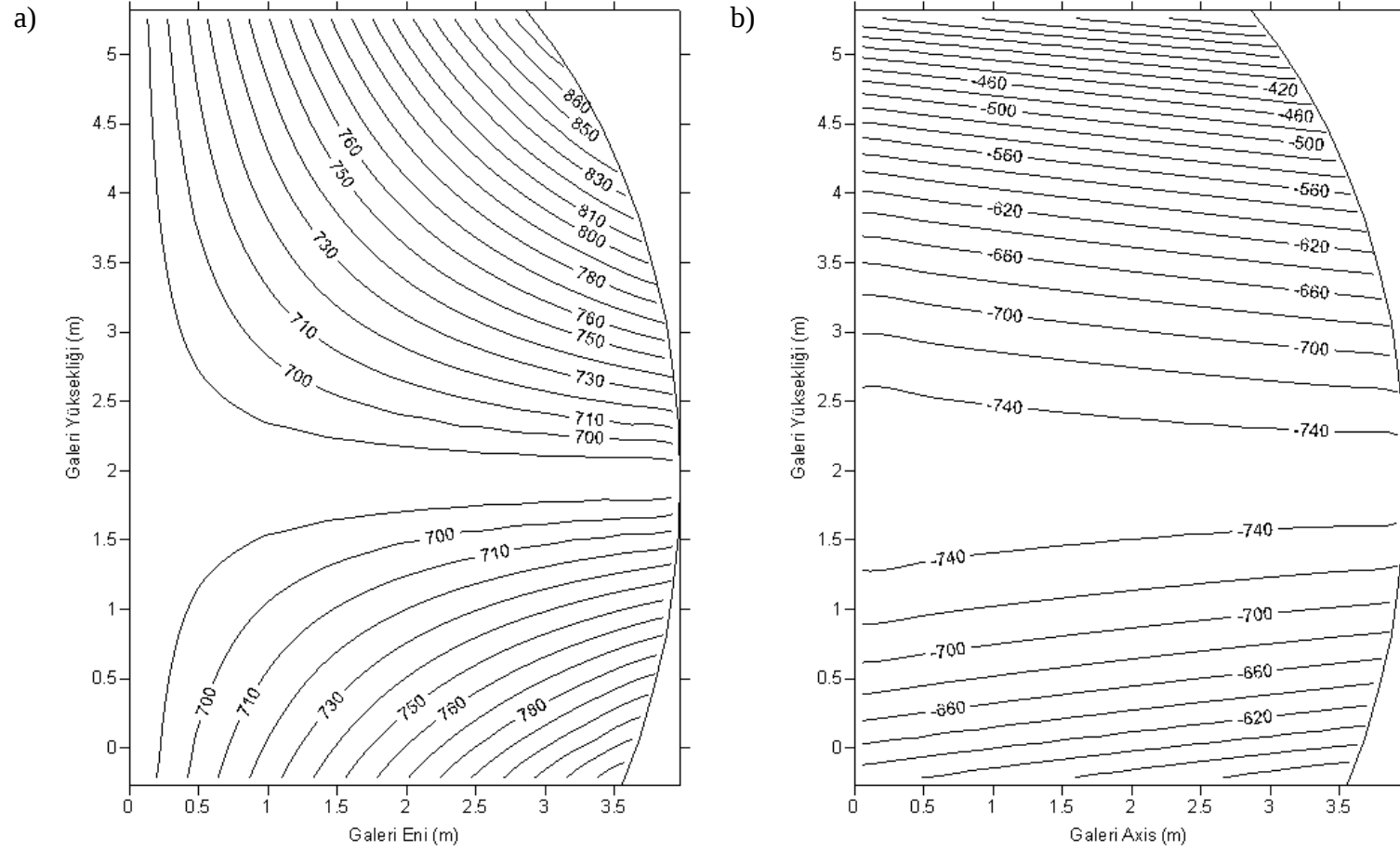
Şekil B.14 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın arkaya devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



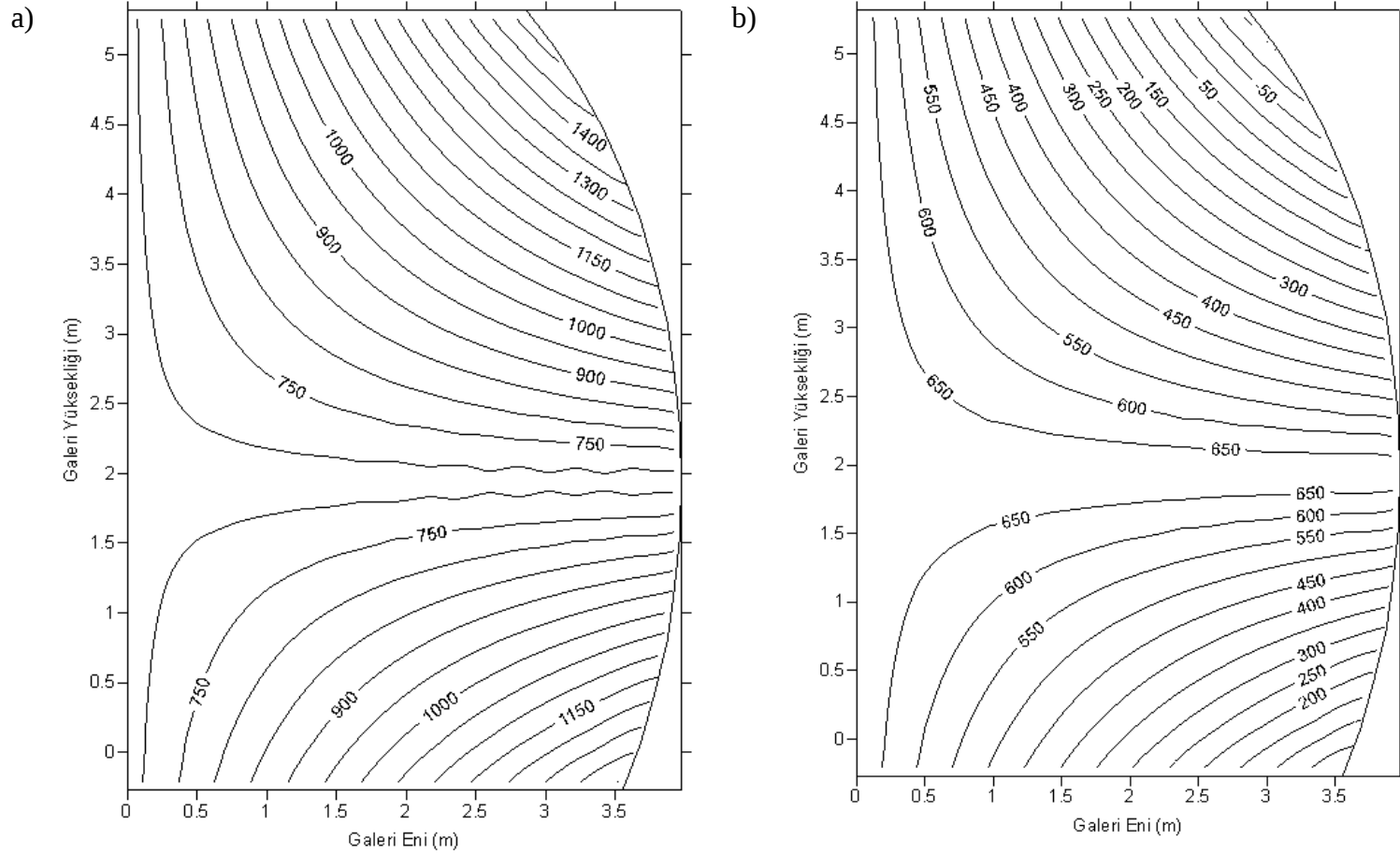
Şekil B.15 : Orijinal tip mini-disk kesikli kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.



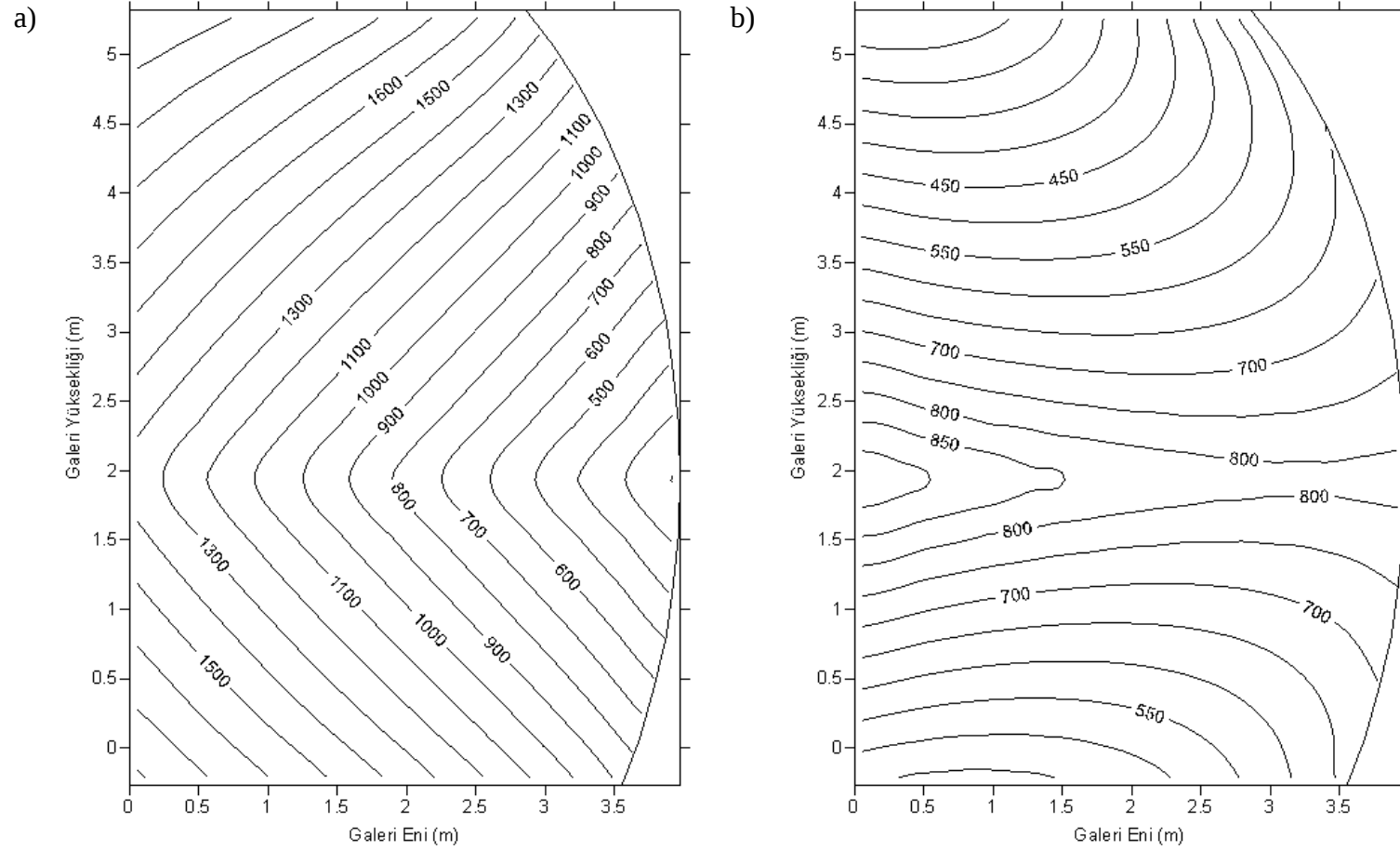
Şekil B.16 : Orijinal tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)yukarı doğru kesme b)aşağı doğru kesme.



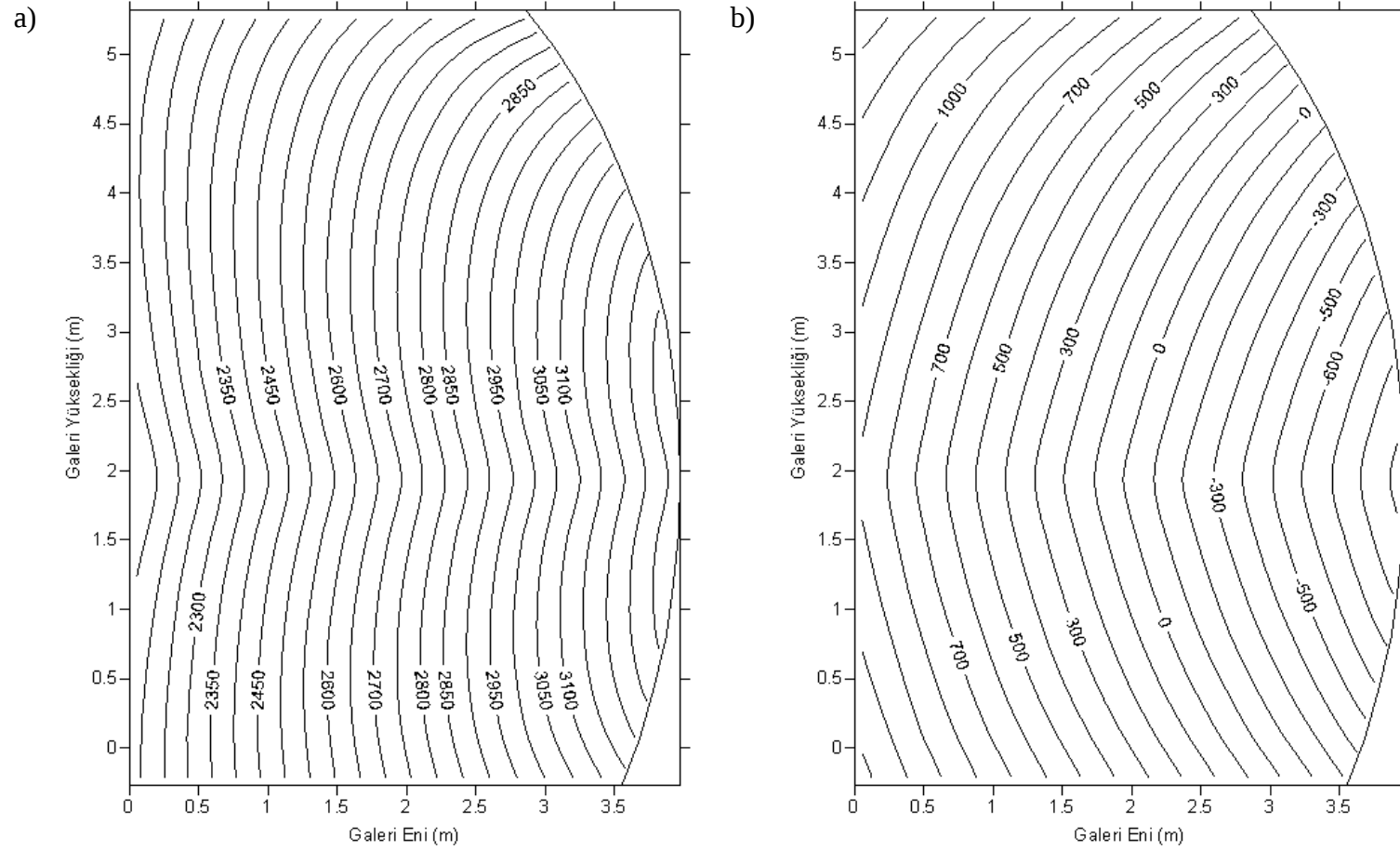
Şekil B.17 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.



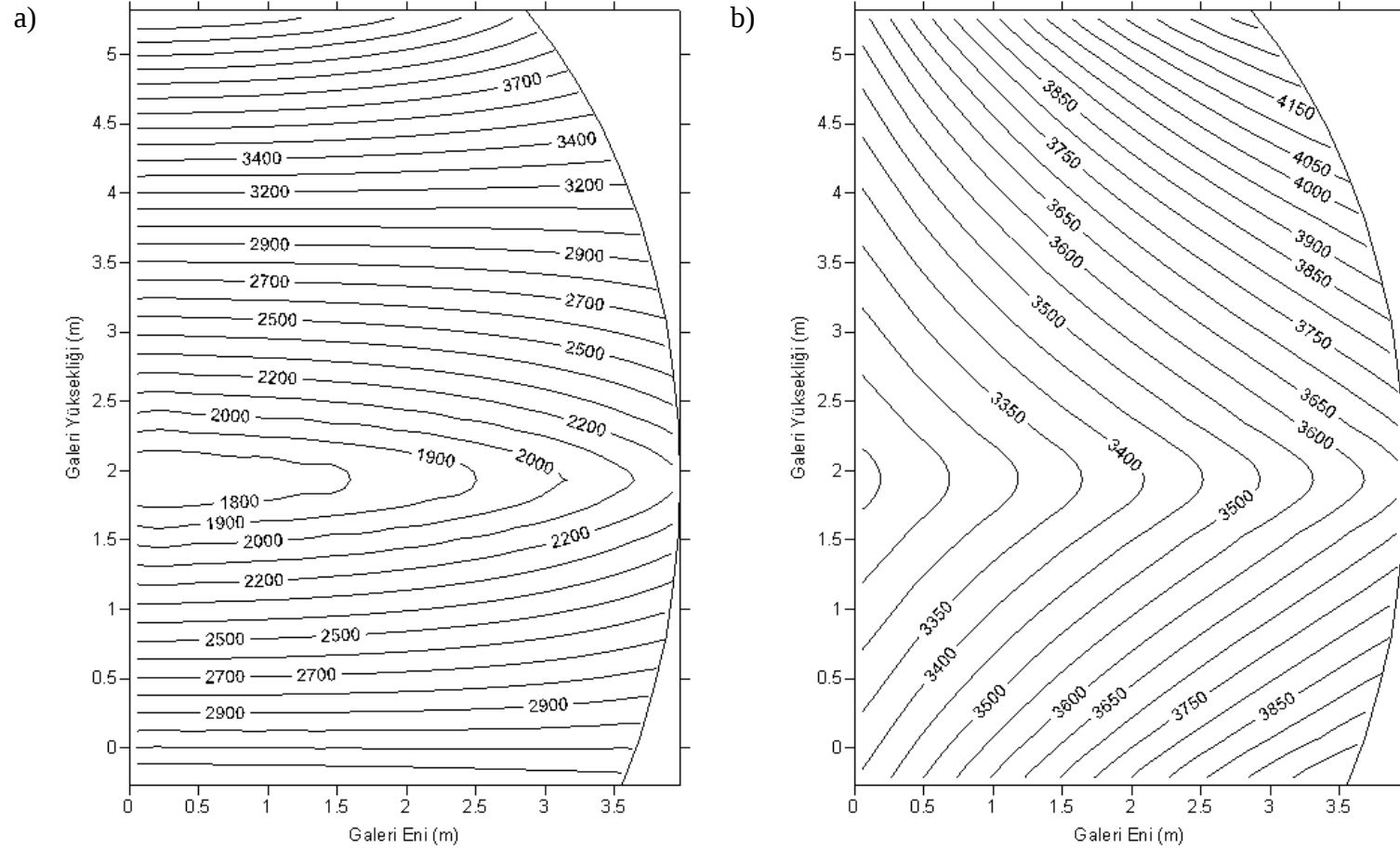
Şekil B.18 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme
b) aşağı doğru kesme.



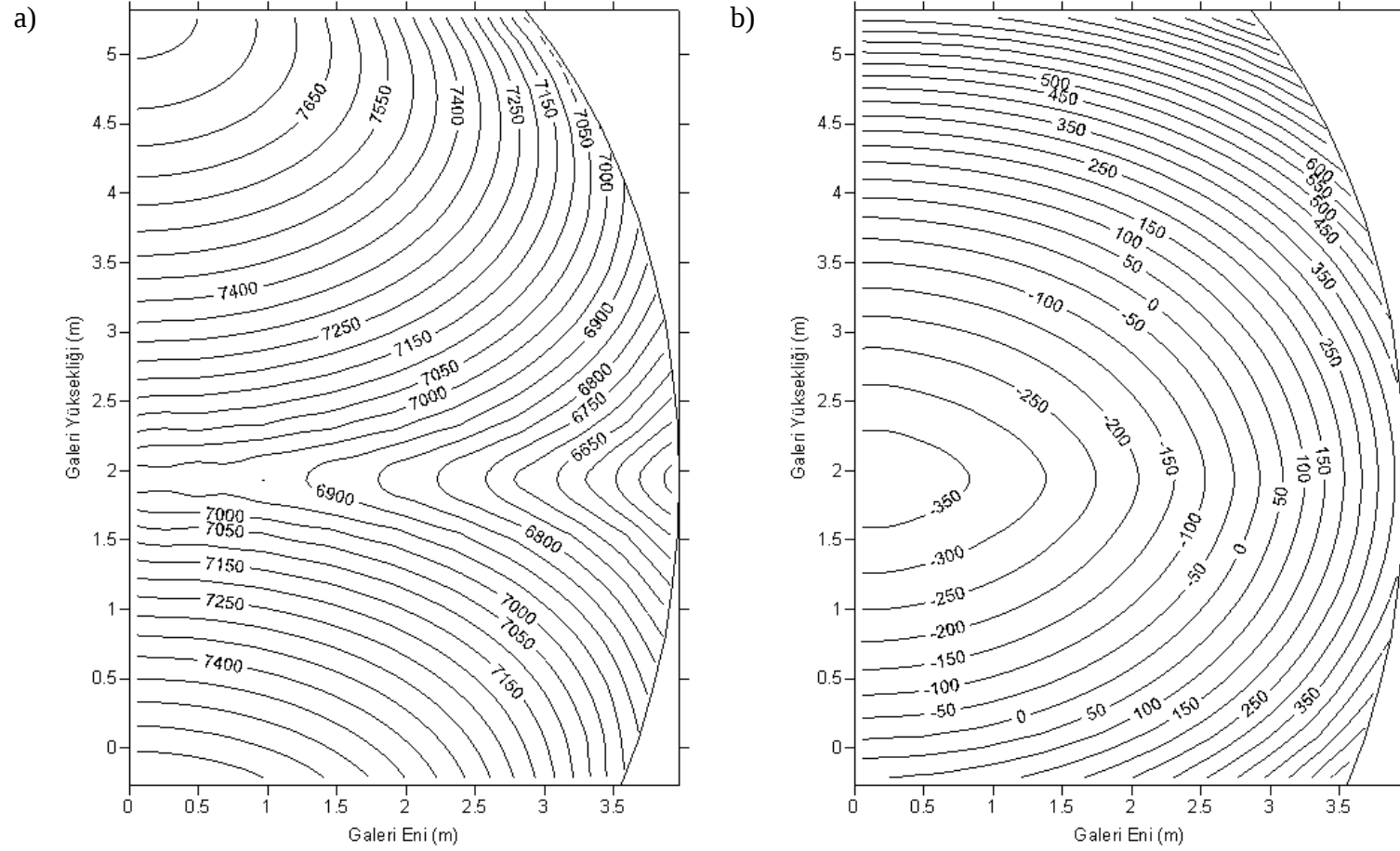
Şekil B.19 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.



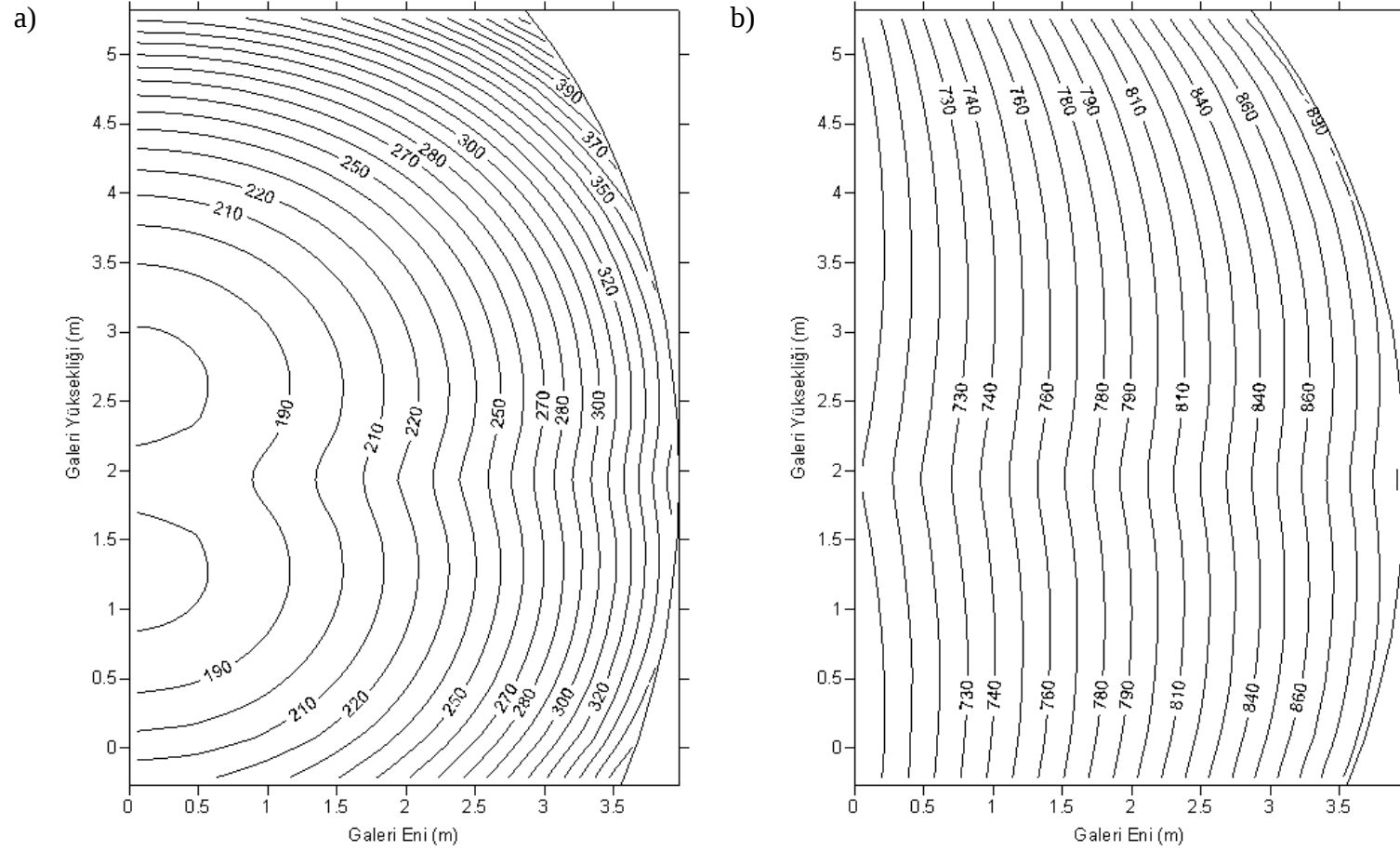
Şekil B.20 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



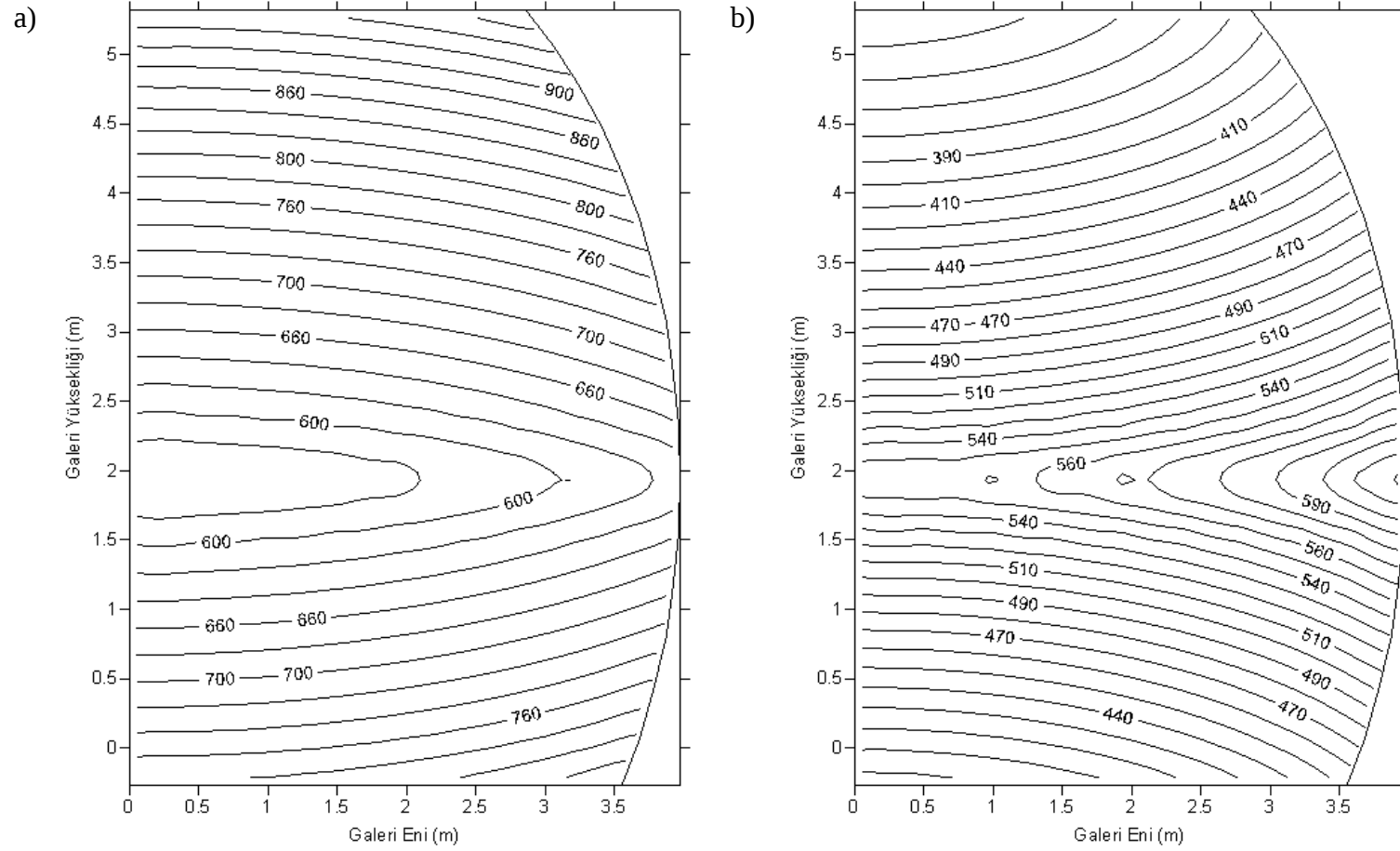
Şekil B.21 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) aşağı doğru kesme.



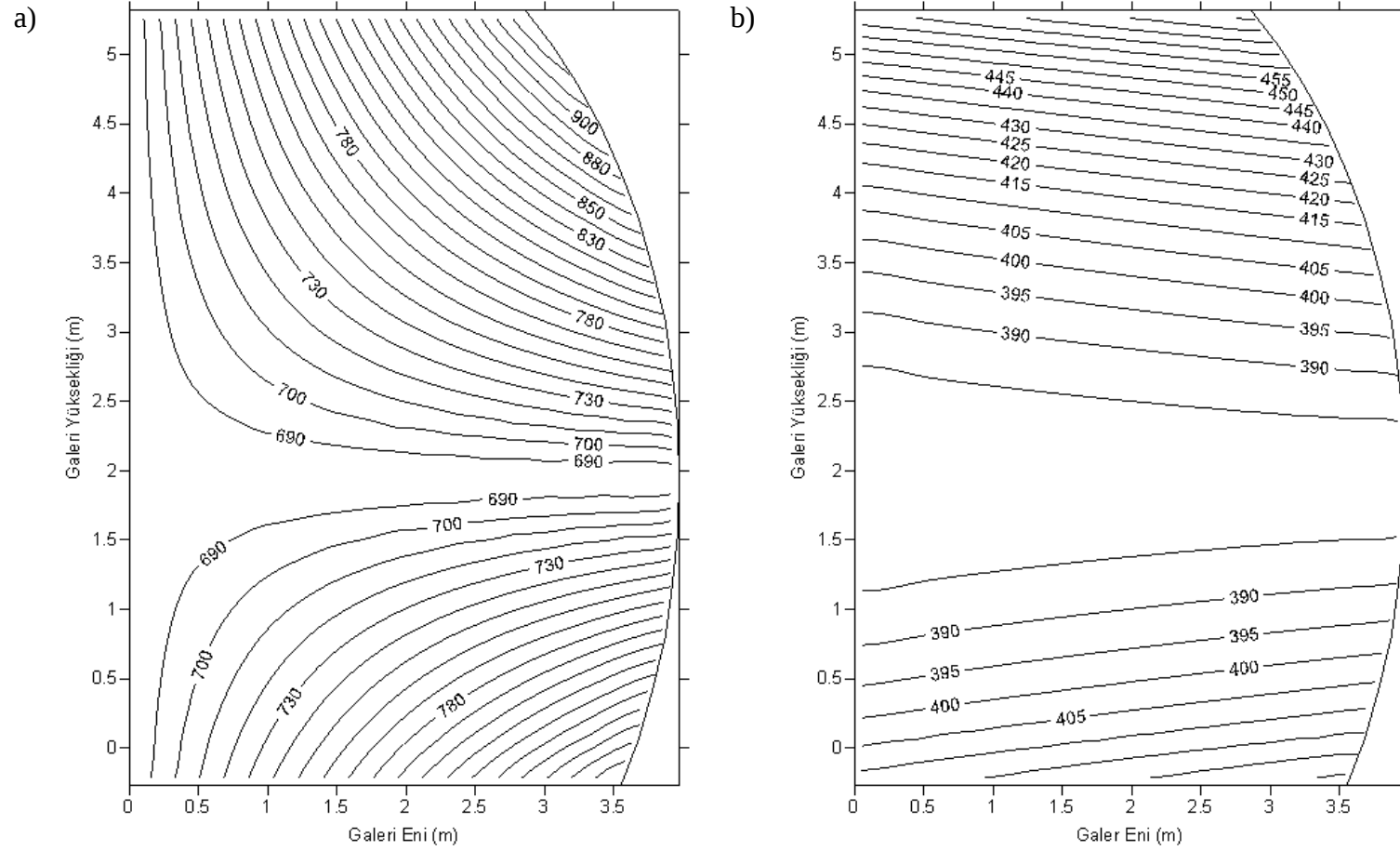
Şekil B.22 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



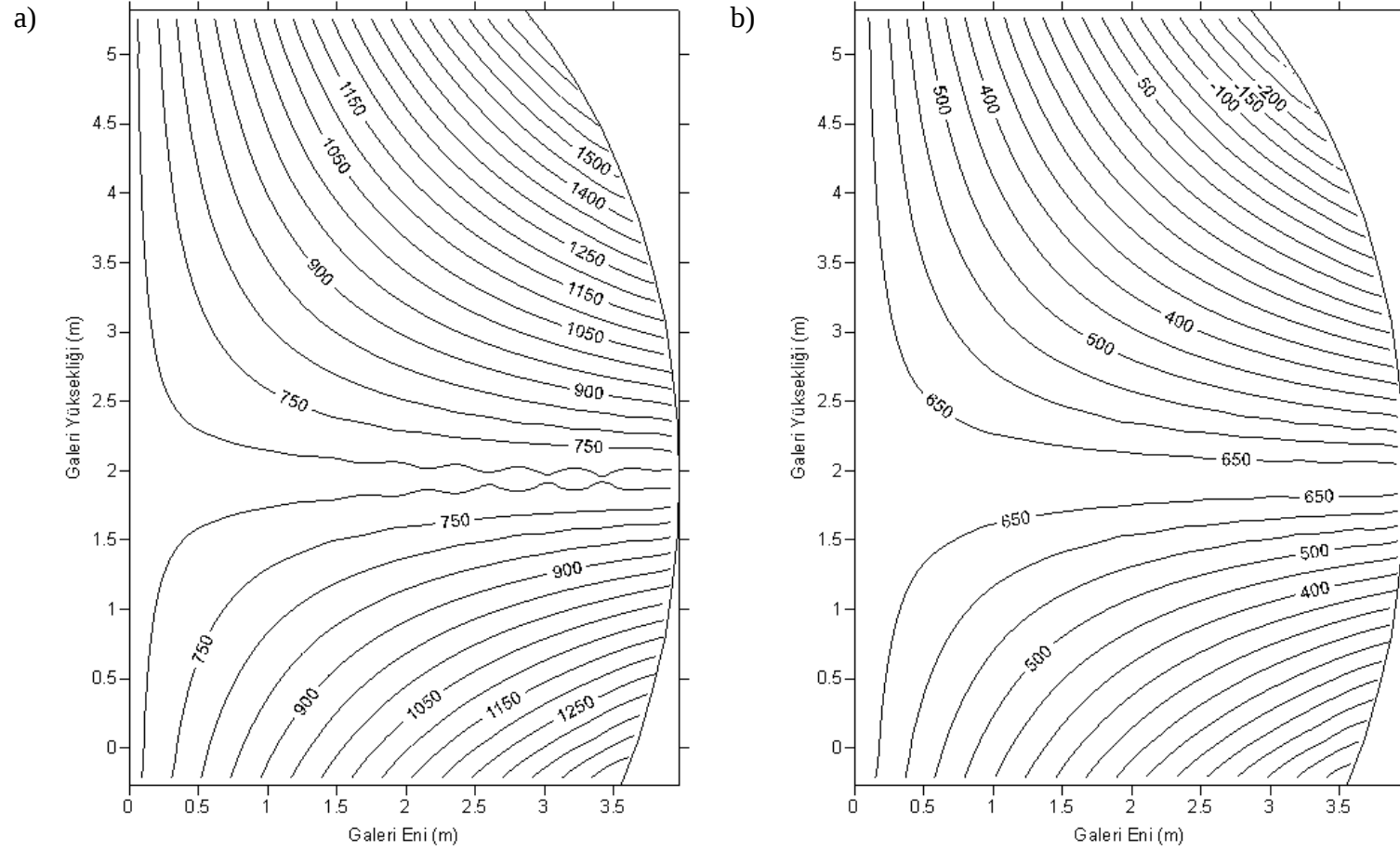
Şekil B.23 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.



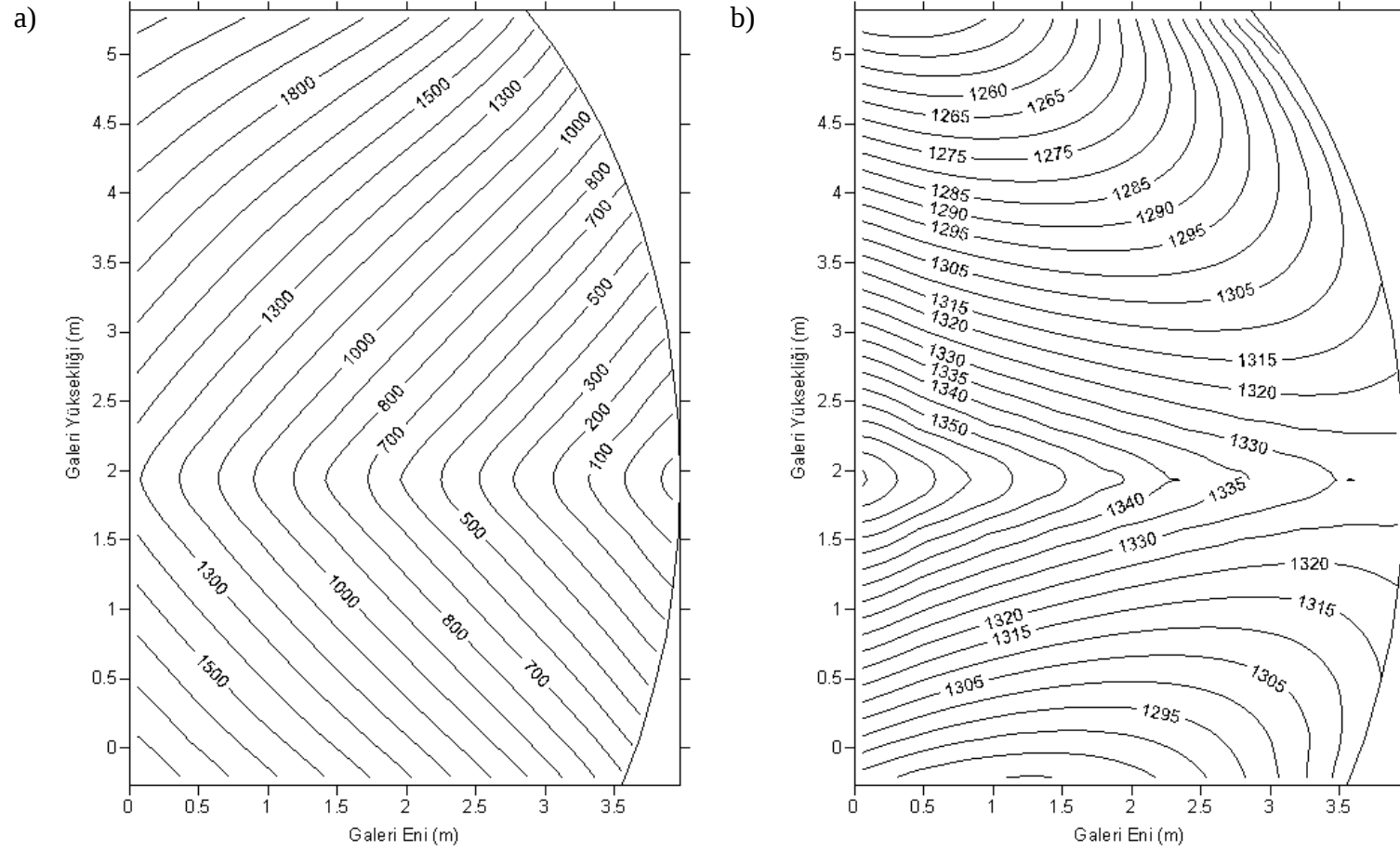
Şekil B.24 : Modifiye tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



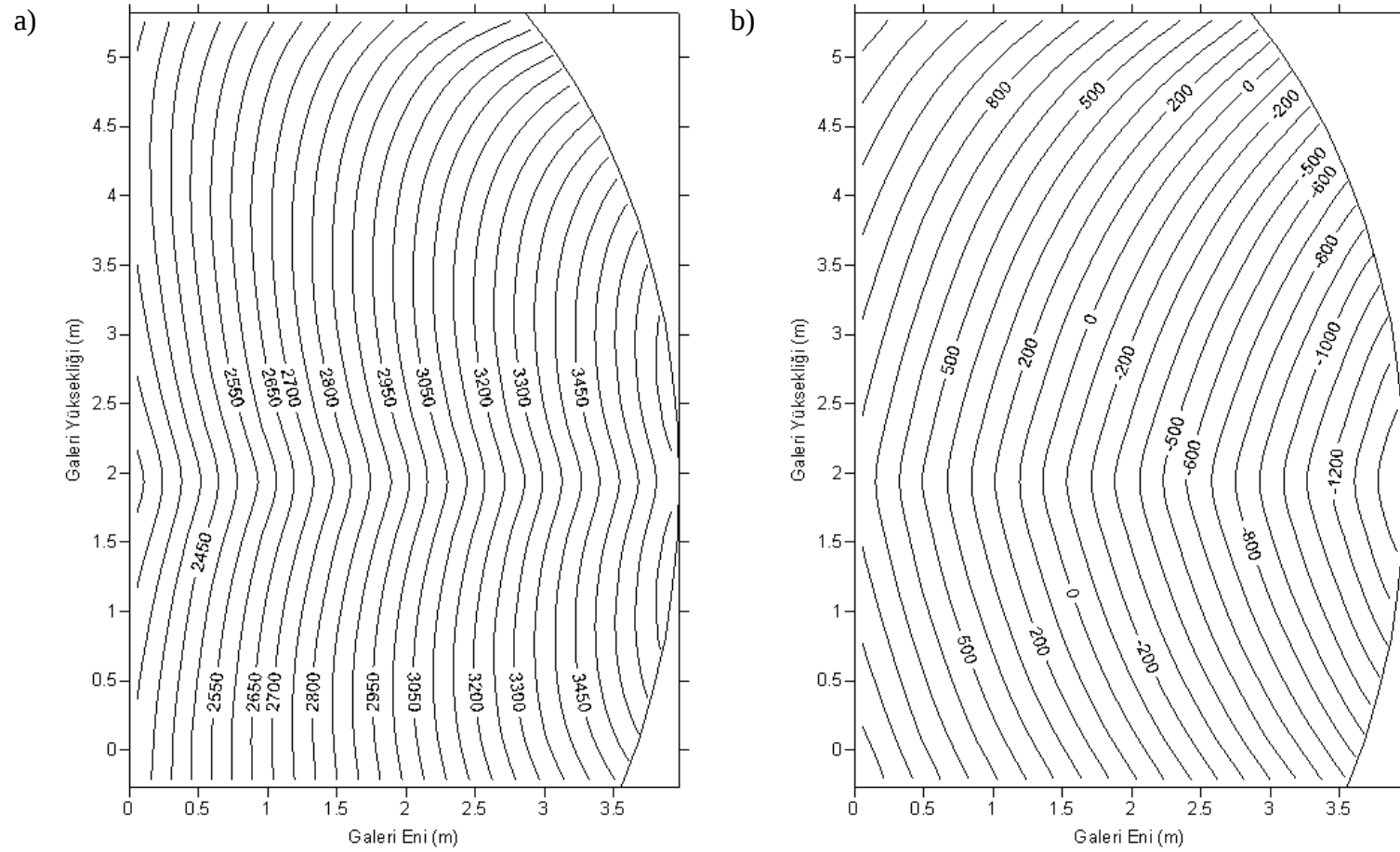
Şekil B.25 : Nihai tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)arına girme b) yana doğru kesme.



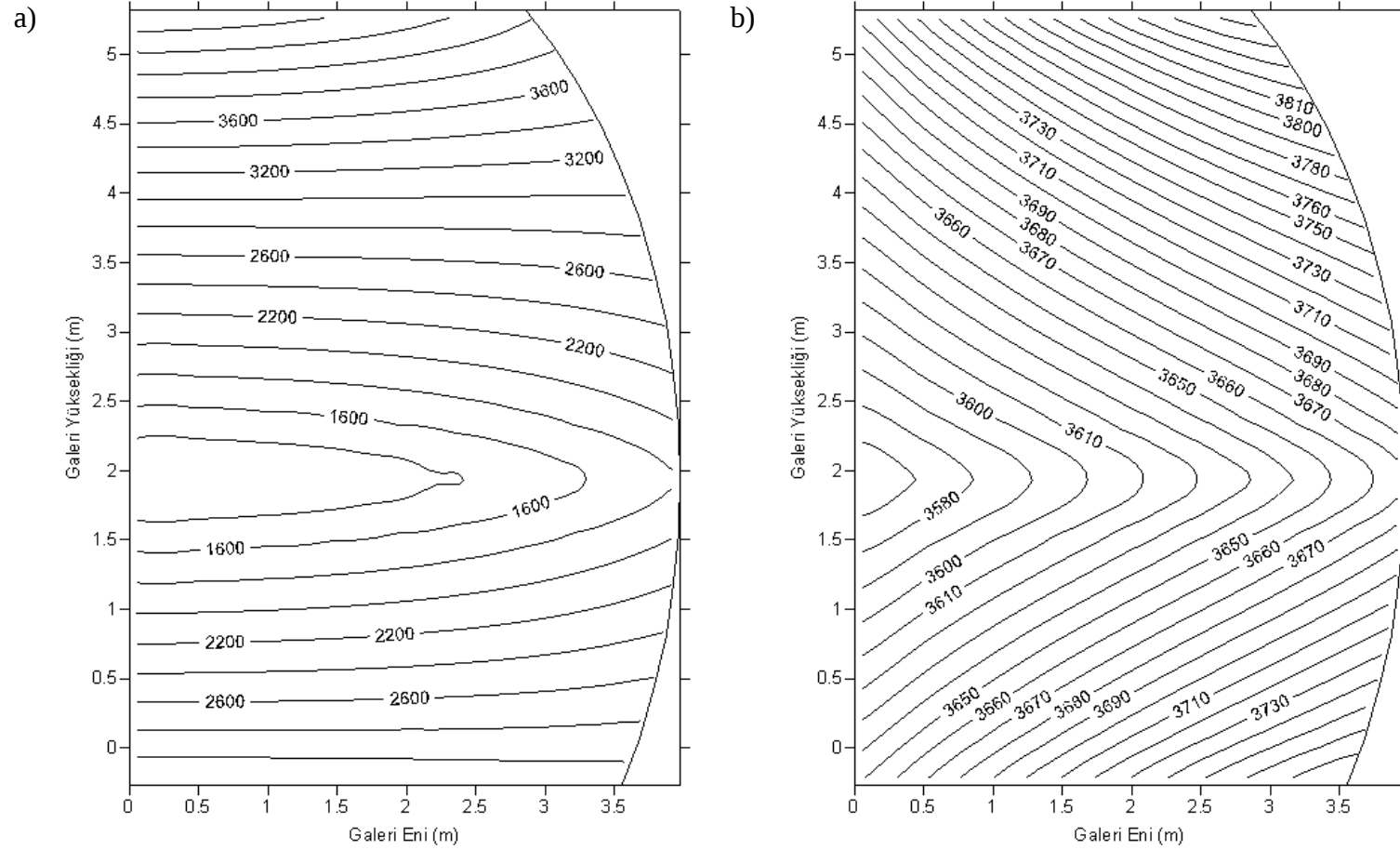
Şekil B.26 : Nihai tip mini-disk keskili kesici kafalı BKM'nın dik eksen etrafında dönme durumu moment izohipsleri a)yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



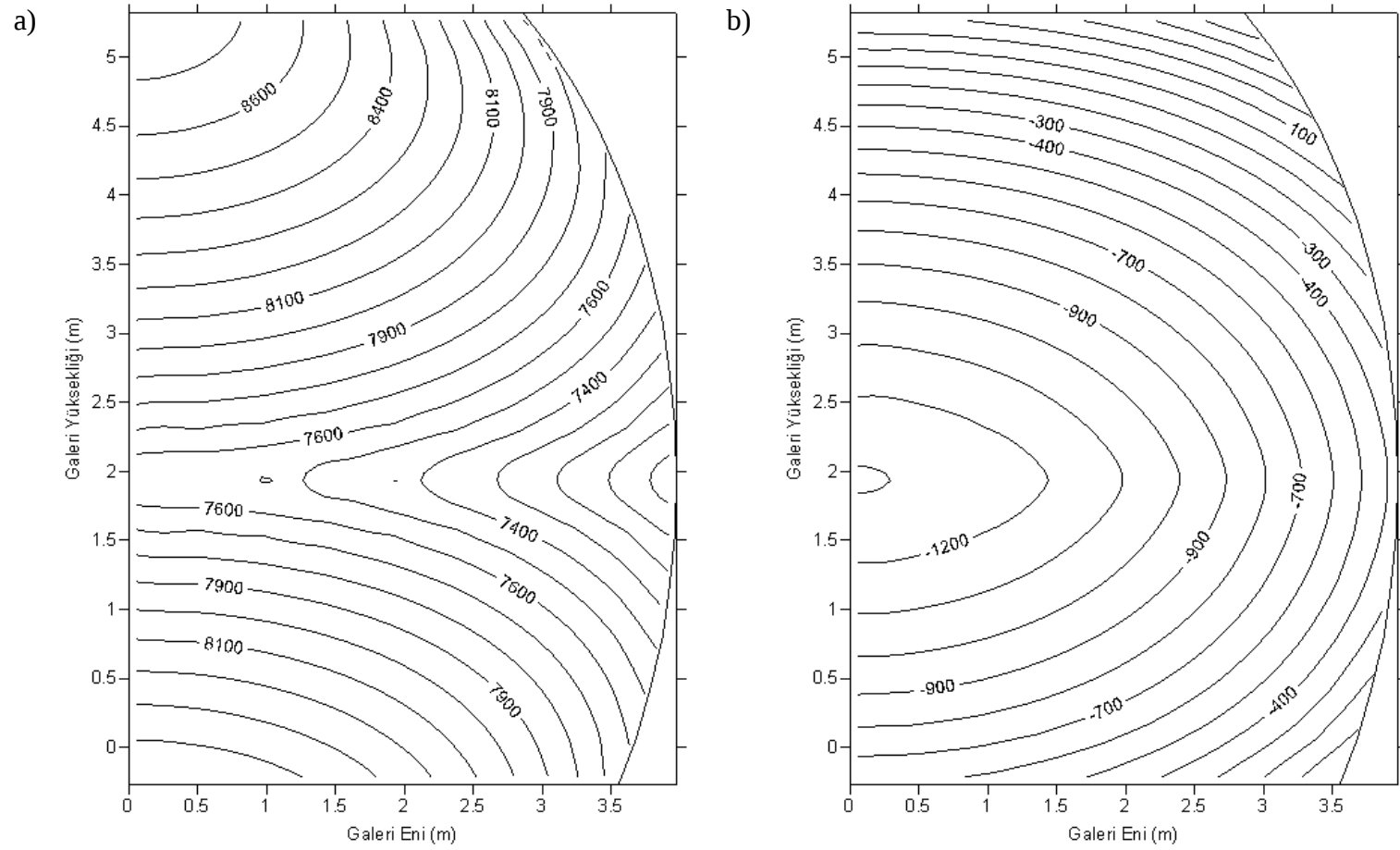
Şekil B.27 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğu kesme.



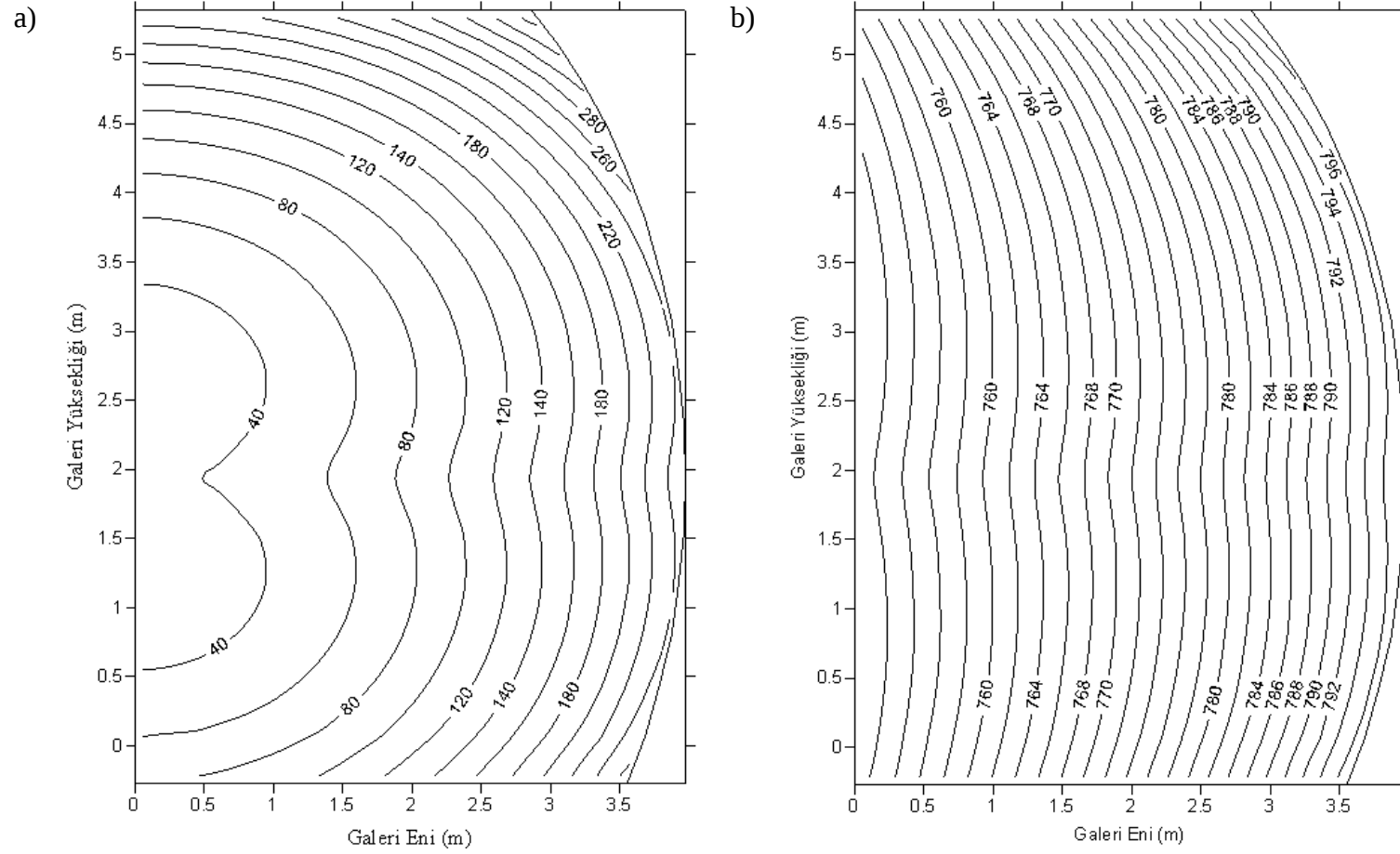
Şekil B.28 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın yana devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



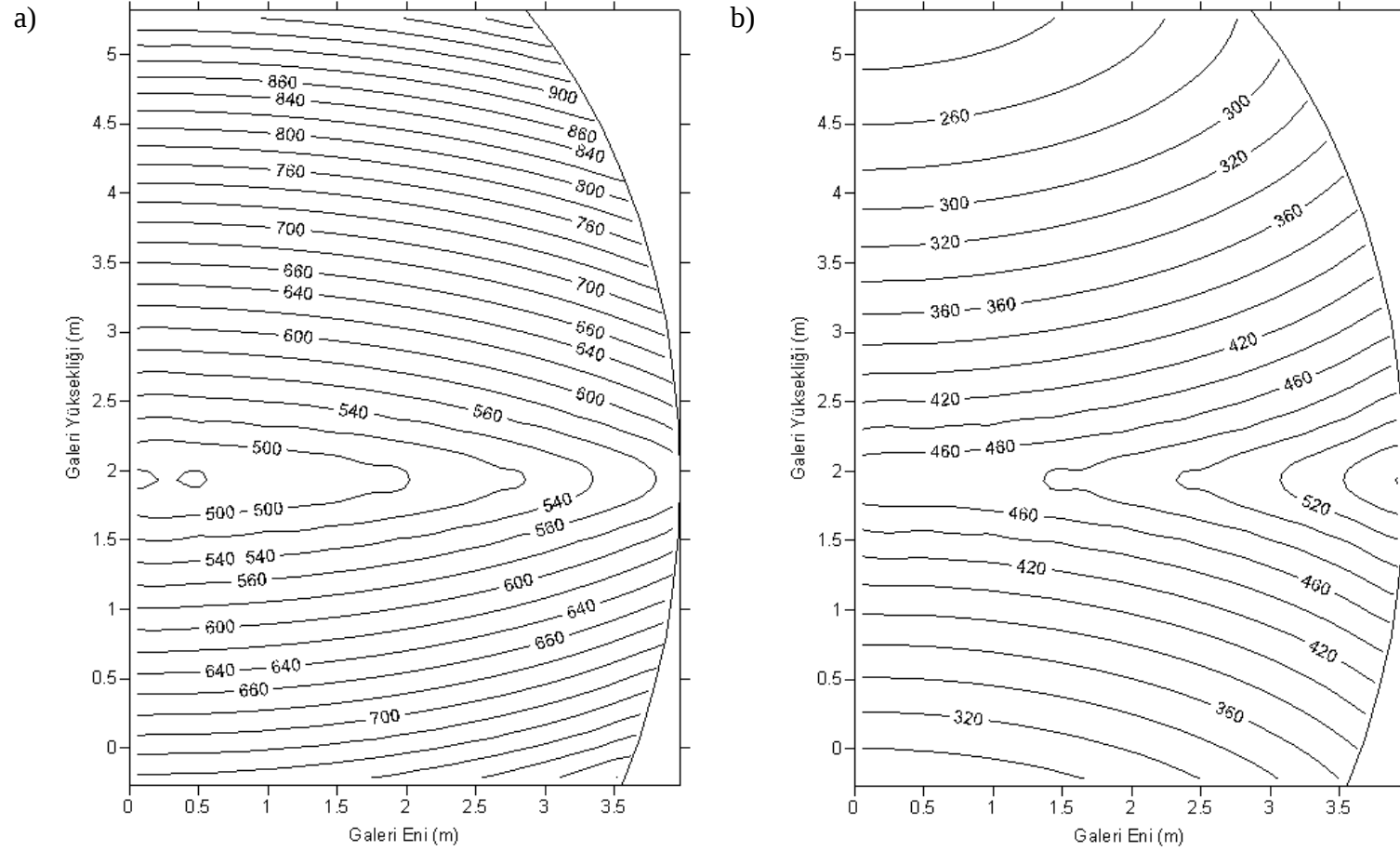
Şekil B.29 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.



Şekil B.30 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın geriye devrilme durumu moment izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.



Şekil B.31 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın kayma durumu kuvvet izohipsleri a) arına girme b) yana doğru kesme.



Şekil B.32 : Nihai tip mini-diskli kesici kafalı BKM'nın kayma kuvvet izohipsleri a) yukarı doğru kesme b) aşağı doğru kesme.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Cemalettin Erdoğan
Doğum Tarihi ve Yeri : 25.08.1988 Ankara
E-posta : erdogance@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2013-2015 yılları arasında Egenitro Patlayıcı Madde Ltd. Şti. Firmasında maden mühendisi olarak çalıştı.

DİĞER YAYINLAR:

- Özyurt M.C., Özer Ü., Karadoğan A., Kalaycı Ü., Tutar U., Erdoğan C. 2015. Betonarme Köprülerin Patlayıcı Kullanılarak Yıkımı.8. *Delme Patlatma Sempozyumu*,19-20 Kasım,2015 İstanbul, Türkiye