

MADENCİLİK

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI DERGİSİ

THE JOURNAL OF THE CHAMBER OF MINING ENGINEERS OF TURKEY

EYLÜL-ARALIK

CİLT

SAYI

SEPTEMBER-DECEMBER

VOLUME

NUMBER

2015

54

3-4

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- | | | |
|--|----|--|
| Ertuğrul KARAKAPLAN,
Hakan BAŞARIR | 3 | SAYISAL MODELLEME YÖNEMİYLE
RMR SİSTEMİNCE ÖNERİLEN TAHKİMAT
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ
<i>The Analysis of the Support Systems Proposed
by the RMR System Using Numerical Modeling</i> |
| Ümit ÖZER,
Abdulkadir KARADOĞAN,
Meriç Can ÖZYURT,
Ülkü KALAYCI,
Uğur TUTAR,
Bahattin DEMİR
Fazlı TOPRAK | 11 | TÜM EMEK İŞ SİTESİ BİNALARININ PATLAYICI
KULLANILARAK YIKIMI
<i>Demolition of the Tüm Emek İş Buildings by
Using Explosives</i> |
| Tuğba DOĞAN,
Bülent ERDEM,
Zekeriya DURAN | 25 | TÜM VÜCUT TİTREŞİMİNİN OPERATÖR
ve SÜRÜCÜLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ:
ÖLÇÜMÜ ve DEĞERLENDİRİLMESİ
<i>Effect of Whole-Body Vibration on Operators and
Drivers: Measurement and Evaluation</i> |
| Eren KÖMÜRLÜ,
Ayhan KESİMAL | 41 | PLASTİK GÖVDELİ SÜRTÜNMELİ KAYA
SAPLAMALARININ KULLANILABİLİRLİĞİ
<i>The Usability of Frictional Rock bolts with Plastic
Body</i> |

MADENCİLİK dergisi yazı dizin ve özetlerinin yer aldığı veri tabanları / INDEXED in
*IMM Abstracts, GeoRef, Aluminium Industry Abstracts, Cambridge Scientific Abstracts,
PASCAL, Chemical Abstracts, ENCOMPLIT, ENCOMPLIT2, ENERGY, Compendex*

Abone Koşulları:

Yıllık abone bedeli 100,00 TL'dir.

Subscription

Annual subscription rate is 100,00 TL. All
subscription inquiries should be made to the
correspondence address.

Banka Hesap No:

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Şubesi:
IBAN: TR43 0006 4000 0014 2130 008120

T.C. Ziraat Bankası Kızılay Şubesi:
IBAN: TR19 0001 0006 8539 0090 315001

Posta Çeki Hesap No: 86665

By bank transfer to (USD account)

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Branch,
Kızılay - Ankara
Swift Code : ISBKTRISXXX
IBAN- TR860006400000242130774805

By bank transfer to (EURO account)

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Branch,
Kızılay - Ankara
Swift Code : ISBKTRISXXX
IBAN- TR190006400000242130784644

ISSN: 0024-9416

MADENCİLİK DERGİSİ 2015 HAKEM LİSTESİ

LIST OF REVIEWERS FOR THE JOURNAL OF MADENCİLİK IN 2015

Prof. Dr. Ata AKÇİL	Süleyman Demirel Üniversitesi
Prof. Dr. Hürriyet AKDAŞ	Osmangazi Üniversitesi
Prof. Dr. Vedat ARSLAN	Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Hakan BAŞARIR	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Fatih Bayram	Aksaray Üniversitesi
Prof. Dr. Atilla CEYLANOĞLU	Cumhuriyet Üniversitesi
Doç. Dr. Tayfun ÇİÇEK	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet DAĞ	Çukurova Üniversitesi
Prof. Dr. Vedat DİDARİ	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
Prof. Dr. Murat ERDEMOĞLU	İnönü Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Alper GÖNEN	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Tefvik GÜYAGÜLER	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Osman Zeki HEKİMOĞLU	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Prof. Dr. Çetin HOŞTEN	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Sair KAHRAMAN	Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Erol KAYA	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Turgay ONARGAN	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR	Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Ümit ÖZER	İstanbul Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet Kemal ÖZFIRAT	Dokuz Eylül Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Çelik TATAR	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Suphi URAL	Çukurova Üniversitesi
Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER	Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Ercüment YALÇIN	Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Hayati YENİCE	Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Abdullah SEYRANKAYA	Dokuz Eylül Üniversitesi

SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİYLE RMR SİSTEMİNCE ÖNERİLEN TAHKİMAT SİSTEMLERİNİN ANALİZİ

THE ANALYSIS OF THE SUPPORT SYSTEMS PROPOSED BY THE RMR SYSTEM USING NUMERICAL MODELING

Ertuğrul KARAKAPLAN*

Hakan BAŞARIR**

ÖZET

RMR sınıflama sistemi yeraltı açıklıklarının tahkimat tasarımında yaygınlıkla kullanılmaktadır. Sistem aynı kalite kaya kütlelerinde farklı derinliklerde oluşturulacak açıklıklar için herhangi bir fark gözetmeksizin aynı tahkimat sistemi önerisinde bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı varsayılan farklı gerilme koşulları altında aynı kalitede kaya kütlesi için RMR sistemince önerilen tahkimat sistemlerinin performanslarının sayısal modelleme tekniği kullanılarak değerlendirilmesidir.

Literatürde yer alan farklı araştırmacılar tarafından yapılmış olan proje sonuçları incelenerek orta ve zayıf kalitede kaya kütlesi örnekleri saha verisi olarak seçilmiştir. Derlenen bilgiler kullanılarak örneklerin sayısal modelleri oluşturulmuş ve araştırmacıların elde ettiklerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonraki aşamada farklı derinlik değerleri varsayılarak gerilme koşulları değiştirilmiştir. Sayısal olarak modellenen açıklıklara RMR sistemince önerilen tahkimat sistemleri iç basınç cinsinden uygulanmış ve varsayılan farklı gerilme koşullarında açıklıklar etrafındaki gözlemlenen deformasyonlar kaydedilmiştir. Yaygınlıkla kullanılan limit birim deformasyon değerlerinden biri performans ölçütü olarak kullanılmış ve önerilen tahkimat sistemlerinin performanslarına ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: RMR sistemi, görgül tasarım, sayısal modelleme, tahkimat sistemi performans değerlendirmesi.

ABSTRACT

RMR rock mass classification system is widely used to design support systems for underground openings. For the underground opening excavated in the same quality rock mass at different depths the system proposes same support system. The purpose of this study is to evaluate the performances of the support systems proposed by RMR system for the openings excavated in the same quality rock mass but under different stress conditions.

By using current literature and the results of projects conducted by different researchers fair and poor quality rock masses were selected as case studies. Using the collected information the numerical models of selected cases were constructed and similar results with the researchers were obtained. As a next step the in situ stress conditions were simulated by assuming different depths. The pressure of the support system proposed by RMR was applied to modelled openings in terms of internal support pressure and corresponding deformations were recorded. One of the most widely used critical strain values was used as performance criteria for the support systems and the performance of the proposed support systems were evaluated.

KEYWORDS: The RMR system, empirical design, numerical modelling, support system performance evaluation.

* Öğr.Gör., Pamukkale Üniv., Kale M.Y.O., Madencilik ve Maden Çık. Böl., DENİZLİ, ekarakaplan@pau.edu.tr
** Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., ANKARA

GİRİŞ

Madencilik amaçlı yeraltında açılan galeriler, kuyular gibi geniş yeraltı açıklıklarının tasarımları karmaşık jeolojik ve jeoteknik özelliklerden dolayı oldukça güçtür. Yeraltı madencilik açıklıkları için kullanılan mühendislik tasarım yaklaşımları üç ana gruba ayrılabilir. Bunlar; görgül, sayısal ve analitik yaklaşımlardır.

Günümüzde kullanım kolaylığı nedeniyle görgül yöntemlerin uygulamacılar tarafından yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

Bu yöntemlerden birisi kaya kütle puanlama sistemidir (RMR). RMR sınıflama sistemi, Bieniawski (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem Bieniawski'nin sedimanter kayalarda açılmış tünellerde yaptığı gözlem ve deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. Bieniawski (1989) tarafından 1973'ten 1989'a kadar tüneller, büyük yeraltı açıklıkları, maden işletmeleri ile ilgili toplam 351 farklı uygulamadan derlenen veriler ve kazanılan deneyimler çerçevesinde sisteme son şekli verilmiştir.

Sistemin girdi parametreleri kaya malzemesi dayanımı, kaya kalite belirteci (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizlik yüzey durumu ve yeraltı suyu koşullarıdır. Her bir parametreye verilen puanların toplamı sonucunda temel RMR değeri elde edilir. Süreksizlik yönelimi düzeltmesi gibi gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra düzeltilmiş RMR değeri elde edilir. Bu elde edilen değere göre ise oluşturulacak olan galeri veya açıklık için tahkimat sistemi önerilir.

Sistemin orijinal hali yaygınlıkla kullanılmasına rağmen bazı araştırmacılar tarafından farklı düzeltme gereklilikleri belirtilmiştir. Bu düzeltmeler uygulamalarda yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, gerilme düzeltmesi, patlatma düzeltmesi ve başlıca zayıflık düzlemleri düzeltmesidir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Açıklık geometrisi, kaya özellikleri ve gerilmeler duraylılığı etkileyen en önemli parametrelerdendir. Ancak RMR sistemi aynı kaya kütlelerinde farklı derinliklerde dolayısıyla farklı gerilme koşullarında oluşturulacak açıklıklar için aynı tahkimat sistemi önermektedir. Bu çalışmanın amacı varsayılan koşullar altında RMR tarafından önerilen tahkimat sisteminin performansını artıran derinlikle veya değişen gerilme koşulları altında değerlendirilmesidir.

Belirlenen amaçlar doğrultusunda açıklık duraylılığı ve tahkimat performansı hakkında miktarsal

bilgiler verebilen ve yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi esaslı Phase² bilgisayar programı (Rocscience, 2009) ile varsayılan gerilme koşulları altında derlenen saha verileri kullanılarak çok sayıda hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışmalar neticesinde RMR sisteminin önerdiği tahkimat elemanlarının performanslarının aynı kalitede kaya kütlelerinde farklı derinlik dolayısıyla gerilme koşulları için aynı olmadıkları belirlenmiştir.

1. KAYAÇ ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, daha gerçekçi yaklaşımda bulunabilmek amacı ile literatürden derlenen saha verileri kullanılmıştır. Çalışmaların ortak noktaları, kaya sınıflandırmasında ve tahkimat tasarımında RMR sisteminin kullanılmış olması, çoğu durum için kaya dayanım özelliklerinin belirlenmesinde GSI (Hoek ve ark., 1995) sisteminin kullanılmış olması ve sonlu elemanlar yöntemi esaslı yazılımlardan yararlanmış olmalarıdır.

Üç farklı karayolu tüneli projesinden (Ghafoori ve ark., 2006; Sarı ve ark, 2008; Satıcı, 2007) elde edilmiş veriler saha verisi olarak kullanılmıştır. Bu verilere bağlı olarak hesaplanan dayanım ve deformasyon değerleri Phase² yazılımı için girdi olarak kullanılmıştır. GSI değerine ulaşamadığı durumlarda Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen $GSI=RMR_{95}-5$ ilişkisinden faydalanılmıştır. RMR ve GSI sistemleri arasındaki ilişkilere dair kapsamlı bir derleme çalışması Osgoui ve Ünal (2005) tarafından sunulmuştur.

1.1. Bilecik – İstanbul Karayolu (Osmangazi) Tüneli

Türkiye'nin Bilecik ilinde bulunan Osmangazi tüneli 12,5 m genişliğinde, 9,6 m yüksekliğinde olup yaklaşık 2,5 km uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca yedi farklı kaya biriminden geçilmektedir (Sarı ve ark, 2008). Araştırmacılar tarafından sunulan farklı kaya birimlerine ait RMR, GSI, tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}), deformasyon modülü (E_r), Hoek sabiti (m_r), Poisson oranı (ν) değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Osmangazi Tüneli Kayaç Özellikleri (Sarı ve ark, 2008).

Birim	RMR	GSI	σ_{ci} , MPa	E_p , MPa	m_i	ν
1	37	27	3	3976	4	0,25
2	50	45	72	6905	12,79	0,28
3	55	50	90	8715	18,04	0,31
4	63	58	63	6698	22,68	0,30
5	66	61	81	7873	23,38	0,29
6	63	58	75	7675	20,83	0,32
7	65	60	85	7703	18,27	0,31

1.2. Mashhad – Kallat Karayolu (Kallat) Tüneli

İran'ın Mashhad ilinde bulunan Kallat tüneli 8 m genişliğe, 8,4 m yüksekliğe ve 725 m uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca 3 farklı kaya kütesinden geçilmektedir (Ghafoori ve ark., 2006). Araştırmacılar tarafından sunulan tünel boyunca geçilen üç kaya birimine ait kaya özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kallat Tüneli Kayaç Özellikleri (Ghafoori ve ark., 2006).

Birim	RMR	GSI	σ_{ci} , MPa	E_p , MPa	m_i	ν
1	53	48	55	18000	28,78	0,30
2	46	41	45	19000	19,23	0,31
3	40	35	35,1	12000	10,48	0,32

1.3. Kavak – Merzifon Karayolu (Şehzadeler) Tüneli

Amasya ilinde bulunan Şehzadeler tüneli 12 m genişliğe, 9 m yüksekliğe ve 345 m uzunluğa sahiptir. Tünel boyunca dört farklı kaya biriminden geçilmektedir. Bu dört kaya birimine ait özellikler Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Şehzadeler Tüneli Kayaç Özellikleri (Satici, 2007).

Birim	RMR	GSI	σ_{ci} , MPa	E_p , MPa	m_i	ν
1	58	53	65	19000	17	0,3
2	43	38	45	10000	11	0,3
3	51	46	55	13000	9	0,3
4	34	29	10	10000	12	0,3

2. KAYA KÜTLE ÖZELLİKLERİ VE GERİLMELER

Sayısal modellemede kaya malzemesine ait gir-di değerleri Hoek ve ark. (2002) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Açıklık geometrileri birbirlerine göre farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada sistematik analiz yapılabilmesi için, farklı şekilde açıklıkların dairesel olarak modellenebilmesine imkan veren eşdeğer çap yaklaşımı (Curran ve ark., 2003) kullanılmıştır. Benzer şekilde farklı türde tahkimat elemanlarının modellenebilmesi için eşdeğer tahkimat basınçları Carranza-Torres ve Fairhurst (2000) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve sayısal modele uygulanmıştır.

Osmangazi, Kallat ve Şehzadeler tünellerinde karşılaşılan kaya kütlelerine ait hesaplanan dayanım ve deformabilite özellikleri Çizelgeler 4, 5 ve 6'da verilmiştir.

Yatay gerilmelerin tahmini oldukça farklı ve zor bir işlemdir. Bu amaçla Hoek ve Brown (1980) dünya genelinde toplanan verileri analiz etmişlerdir. Bu analiz sonucunda yatay gerilmelerin sığ derinliklerde değişken olduğu daha derinlere inildikçe hidrostatik gerilme halini alma eğiliminde olduklarını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada literatürde yer alan farklı çalışmalara benzer şekilde (Asef ve ark., 2000; Sari, 2007; Basarir, 2008; Basarir ve ark., 2010) Hoek ve ark. (1995) tarafından önerildiği gibi ilksel yaklaşım olarak yatay ve düşey gerilmelerin eşit olduğu varsayılmıştır. Bu yaklaşım geniş topografik gevşemelerin, büyük tektonik kuvvetlerin gözlemlendiği yerlerde değiştirilmelidir. Hidrostatik gerilme durumu varsayımı ile kayaç özelliklerinin ve tahkimat performanslarının sayısal modellemedeki etkileri daha açık olarak gözlenebilir. Düşey gerilmeler ise varsayılan derinliğin örtü tabakası birim hacim ağırlığı ile çarpımı ile elde edilmektedir (Hoek and Brown, 1980).

$$\sigma_v = \gamma * z \quad (1)$$

σ_v : Düşey gerilme, MPa

γ : Malzemenin birim hacim ağırlığı, MN/m³

z : Derinlik, m

Çizelge 4. Osmangazi Tüneli Kaya Kütle Özellikleri

Kayaç Özelliği	Kaya birimi						
	1	2	3	4	5	6	7
Kaya kütleinin deformasyon modülü [MPa] (E_m)	121	878	1648	2389	3564	2738	3221
Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (m_b)	0,15	0,89	1,51	2,53	2,90	2,32	2,19
Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (s_m)	0,0002	0,0011	0,0019	0,0047	0,0065	0,0047	0,0058
Birim ağırlık - MN/m ³ (γ)	0,0263	0,0267	0,0268	0,0269	0,0269	0,0265	0,0263
Derinlik, H, [m]	30	50	215	275	280	300	280

Çizelge 5. Kallat Tüneli Kaya Kütle Özellikleri.

Kayaç Özelliği	Kaya birimi		
	1	2	3
Kaya kütleinin deformasyon modülü [MPa] (E_m)	3965	2397	1496
Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (m_b)	0,4	0,15	0,05
Kaya kütleinin Hoek-Brown sabiti (s_m)	0,0002	0,00006	0,00005
Birim ağırlık [MN/m ³] (γ)	0,0241 - 0,0262	0,021 - 0,034	0,022 - 0,036
Derinlik, H, [m]	80-160	100-150	40-145

Çizelge 6. Şehzadeler Tüneli Kaya Kütle Özellikleri.

Kayaç Özelliği	Kaya birimi			
	1	2	3	4
Kaya kütleinin deformasyon modülü [MPa] (E_m)	4280	1212	2210	790
Hoek-Brown sabiti (m_b)	1,28	0,316	0,38	0,135
Hoek-Brown sabiti (s_m)	0,0019	0,0002	0,0005	0,00002
Birim ağırlık [MN/m ³] (γ)	0,025	0,022	0,023	0,024
Derinlik, H, [m]	30-100	30-100	30-100	30

3. SAYISAL MODELLEME

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi esaslı yazılımlarından Phase² yazılımı (Rocscience, 2009) kullanılmıştır. Hazırlanan bir yama yazılım sayesinde sonlu elemanlar ile hesaplama yapan yazılımda kaya kütle özellikleri, gerilme değerleri gibi girdi değerlerinin değiştirilmesi ve istenilen noktalara ait okumaların alınması kolaylıkla yapılabilir.

Bu çalışmada üç farklı bölgedeki toplam 14 farklı kaya birimi özelliği kullanılmıştır. Her birim için farklı derinlik değerlerinde, tahkimatsız, eşdeğer tahkimatlı ve gerekli tahkimat basıncı analizi olmak üzere toplamda 462 farklı analiz yapılmıştır.

Galerilere uygulanacak tahkimat için RMR sisteminin önerdiği "Ön tahkimat seçimi kılavuzu" baz alınmıştır. RMR tarafından önerilen tahkimat elemanları sayısal modelde iç basınç olarak

uygulanmıştır. Kaya kalitesine göre değişen bu tahkimat elemanlarının iç basınç cinsinden uygulanabilmesi için söz konusu elemanlar tarafından üretilecek olan tahkimat basınçları Carranza-Torres ve Fairhurst (2000) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan eşitlikler aşağıda verilmektedir, yaygın kullanılan farklı türde tahkimat elemanlarının mekanik özellikleri gibi daha detaylı bilgi ve açıklamalar Carranza-Torres ve Fairhurst (2000) tarafından gösterilmektedir.

$$P_{sh}^{max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(R-t_c)^2}{R^2} \right] \quad (2)$$

P_{sh}^{max} : Püskürtme beton maksimum tahkimat basıncı (MPa)

σ_{cc} : Püskürtme betonun tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

t_c : Püskürtme beton kalınlığı (m)

R : Tahkimatin dış yarıçapı (m)

$$P_b^{max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_l} \quad (3)$$

P_b^{max} : Kaya saplaması maksimum basıncı (MPa)

T_{bf} : Kaya saplaması maksimum taşıma kapasitesi (MPa)

s_c : Tünel kesitinde saplamalar arası çevresel uzaklık (m)

s_l : Tünel eksenli boyunca saplamalar arası uzaklık (m)

$$P_{st}^{max} = \frac{3 \sigma_{ys}}{2 SR \theta} \frac{A_s I_s}{3 I_s + D A_s [R - (t_B + 0.5D)] (1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

P_{st}^{max} : Çelik bağ maksimum basıncı (MPa)

D : Çelik kesit derinliği (m²)

A_s : Kesit alanı (m²)

I_s : Kesit atalet momenti (m⁴)

σ_{ys} : Çelik akma dayanımı (MPa)

S : Tünel eksenli boyunca çelik bağ aralığı (m)

R : Açıklık eşdeğer çapı (m)

θ : Bloklama noktaları arası yarı açı (radyan)

t_B : Blok kalınlığı (m)

Varsayılan derinliklerin her biri için hesaplanan iç tahkimat basıncı uygulanmış ve gözlenen deformasyonlar kaydedilmiştir.

Sakurai (1983) tünel duraylılığının tünel birim deformasyonu ile kestirilebileceğini önermiştir. Açıklık ya da tünel birim deformasyonu, oluşan/oluşacak olan deformasyonun tünel ya da açıklık

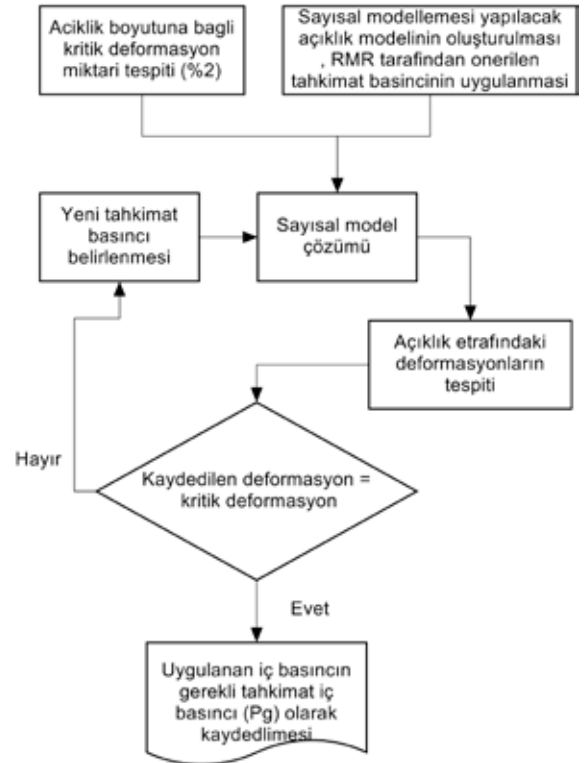
çapına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Hoek'a (2000) göre bir galerideki deformasyon miktarı, galeri çapının %2'sini geçerse önlenemez duraylılık problemleri ile karşılaşılacağı düşünülmektedir. Bu öneri dikkate alınarak yapılan bu çalışmada maksimum deformasyonun galeri çapının %2'si sınırını geçmesine izin vermeyecek tahkimat basıncı modelleme sonuçları izlenerek bulunmuş ve gerekli tahkimat basıncı (P_g) olarak isimlendirilmiştir. Gerekli tahkimat basıncının elde edilmesi için izlenen yolu gösteren akım şeması Şekil 1'de verilmektedir.

Modellenen açıklıkların boyutları, eşdeğer çapları ve sınır deformasyon (K_s) değerleri Çizelge 7'de verilmektedir.

Çizelge 7. Tünel ve Deformasyon Sınırları

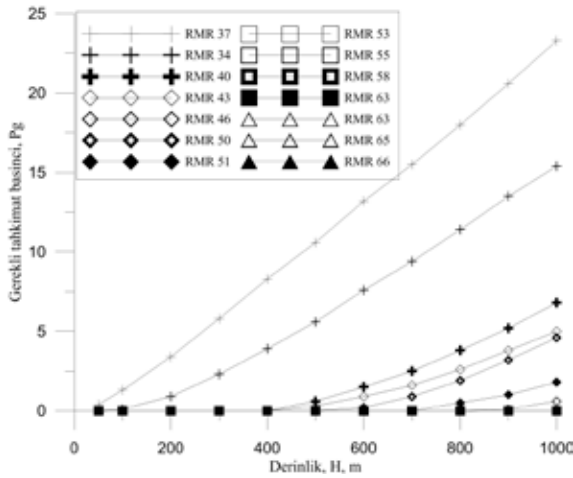
Tünel İsmi	Eşdeğer Tünel Çapı, m	Sınır deformasyon, K_s , m
Osmangazi	11,44	0,23
Kallat	9,03	0,18
Şehzadeler	10,20	0,20



Şekil 1. Galeri Tahkimat Basıncı Hesaplanırken İzlenen Yol

4. MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Derinliğe göre, deformasyon miktarını galeri çapının %2'sini geçmeyecek sınırdaki (Ks) tutmak için gereken tahkimat basınçları (Pg) 14 farklı birim için Şekil 2'de verilmiştir. RMR puanı arttıkça gerekli tahkimat basıncı düşmektedir. Herhangi kalitede bir kaya kütlesi için derinlik arttıkça deformasyonu sınır değerinde tutmak için uygulanması gerekli tahkimat basıncının da arttığı görülmektedir. Ancak bu artış oranı kaya kalitesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



Şekil 2. RMR Puanlarının Derinliğe Bağlı Olarak Değişen Gerekli Tahkimat Basınçları

Çalışma kapsamında içerilmeyen kalitede kaya kütleleri ile RMR sisteminde önerilen tahkimat sistemlerinin etkileşiminin kestirilebilmesi için çoklu regresyon modellemesi yapılması düşünülmüştür. Modeldeki bağımlı değişken gerekli tahkimat basıncının, RMR sisteminin önerdiği tahkimat basıncına oranı (Pg/Prmr) olarak seçilirken bağımsız değişkenler ise RMR puanı ve derinlik değerleri olarak seçilmiştir.

Oluşturulan regresyon modeline ait bilgiler aşağıdaki eşitlikte verilmiştir. Çoklu belirleme sabiti değerleri (R²) %88,27 olarak elde edilmiştir. Bu yüksek değerlerden de anlaşılacağı üzere, önerilen modelin seçilen değişkenler arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde kurduğu görülmektedir.

$$P_g/P_{rnr} = a * b^{RMR} * H^c \quad (5)$$

Regresyon eşitlik sabitleri

$$a = 0,065928$$

$$b = 0,889308$$

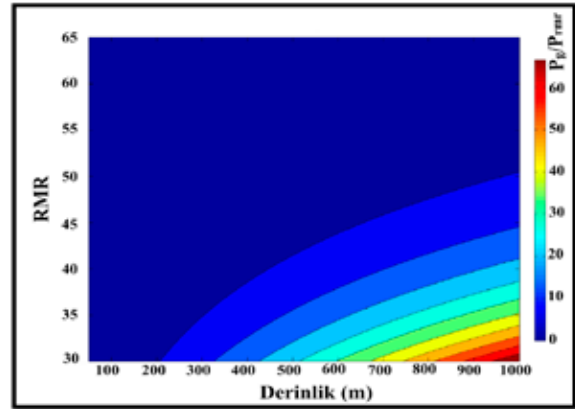
$$c = 1,524772$$

Şekil 3'te regresyon modellemesi sonucu elde edilen, gerekli tahkimat basınçları ile RMR sisteminin önerdiği tahkimat basınçları oranının (Pg/Prmr), derinlik ve RMR puanlarına bağlı olarak değişimini gösterir üç boyutlu grafik gösterilmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, tahkimat tasarımında yaygın olarak kullanılan kaya kütle sınıflama sistemlerinden birisi olan RMR tarafından önerilen tahkimat sistemlerinin performansları sayısal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Performans göstergesi olarak Hoek (2000) tarafından önerilen kritik birim deformasyon değeri kullanılmıştır.

Analizler için sonlu elemanlar tabanlı hesaplama yapan Phase² yazılımı kullanılmıştır. Sayısal model sonucunda elde edilen veriler kullanılarak saha verileri arasında yer almayan RMR değerlerinin durumunun tespiti için çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur. Model Pg/Prmr, RMR ve derinlik arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 3. Regresyon Sonucunda Elde Edilen Pg/Prmr ile RMR ve Derinlik Arasındaki İlişki

Hazırlanan grafik incelendiğinde takip eden çıkarımlara ulaşılmıştır.

Açıklık deformasyonunu belirli bir kritik değer altında tutabilmek için RMR tarafından önerilen tahkimat sistemleri sığ derinlik ve yüksek kalitede kaya kütleleri için yeterli sayılabilmektedir. Ancak kaya kalitesi düştükçe ve derinlik arttıkça sistemce önerilen tahkimat yetersiz kalabilmektedir.

Varsayılan saha verileri ve gerilme koşulları altında RMR sınıflama sisteminde önerilen tahkimat sistemlerinin kaya kütle kalitesine ve derinliğe bağlı olarak değerlendirilmesi gerektiği gözlenmiştir. Bu nedenle, önemli projelerde sa-

dece sınıflama sistemlerince önerilen tahkimat tasarımına bağlı kalınmayarak yapılan önerilerin sayısal modelleme yöntemleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde bu çalışma sonucunda da gösterildiği üzere beklenmedik deformasyon ve duraysızlık sorunları ile karşılaşılabilir.

Bu çalışmada, sistematik analiz yapılabilmesi amacı literatürde ulaşılan çalışmalara benzer şekilde hidrostatik gerilme varsayımında bulunulmuştur. Söz konusu yaklaşım sistematik ve ilksel çalışmalar için yeterli görülmeyle beraber önemli detay projelerde gerilme koşullarına yerinde deneyler kullanılarak ulaşılmaması gerekmektedir. Bu çalışmada dairesel açıklık ve eşdeğer çap yaklaşımları kullanılmıştır. Hidrostatik gerilme koşullarında dairesel açıklıklar etrafında tahkimat elemanlarının simetrik yüklendiği ve bükülme momenti uygulanmadığı varsayılmıştır. Ancak gerçekte püskürtme beton ve çelik bağ gibi tahkimat elemanları yüzey pürüzlülüğü nedeni ile asimetrik yüklenebilir ve bükülme momenti etkisi altında kalabilirler. Dolayısıyla pratikte burada önerilenden daha yüksek tahkimat basıncı uygulanması gerekebilir. Çalışmada Hoek Brown yenilme kriteri kullanılmıştır. Dolayısıyla kullanılan yenilme kriteri gereği açıklığın oluşturulacağı kaya kütlelerinde anizotropik davranışa neden olabilecek hakim süreksizlik içermediği varsayılmaktadır.

Çalışmada kullanılan tüm saha verileri ve projeler için önerilen eşitliğe bağlı olarak bulunan gerekli tahkimat basıncının RMR tarafından önerilen tahkimat sistemi basıncına oranı (P_g/P_{rmr}) 1'e yakın ve 1'in altındadır. Diğer bir deyişle seçilen saha örnekleri için RMR tarafından önerilen tahkimat sisteminde uygulanan basınç değeri (P_{rmr}) gerekli tahkimat basıncına (P_g) yakın veya daha yüksektir. Yazarın bilgisi dâhilinde saha verisi olarak kullanılan projeler kapsamında tasarlanan tünellerde çalışma sonuçları ile uyumlu olarak herhangi bir duraysızlık rapor edilmemiştir. Bu durum çalışma kapsamında yapılan değerlendirme ve varsayımların en azından saha verisi olarak kullanılan projeler için kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Asef, M.R., Reddish, D.J., Lloyd, P.W. (2000). Rock-Support interaction analysis based on numerical methods. *Geotechnical and Geological Engineering*, 18, 23-27.

Basarir, H. (2008). Analysis of rock-support interaction

using numerical and multiple regression modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 45, 1-13.

Basarir, H., Genis, M., Ozarslan, A. (2010). The analysis of radial displacements occurring near the face of a circular opening in weak rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (5), 771-83.

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.

Bieniawski, Z.T. (1974). Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. *Proceedings of the third international congress on rock mechanics*. (s. 27-32). Denver: International Society of Rock Mechanics.

Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the convergence confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunneling and Underground Space Technology*, 15(2), 187-213.

Curran, J., Hammah, R., & Yacoub, T. (2003). A Two-Dimensional Approach for Designing Tunnel Support in Weak Rock. November 2013 tarihinde Rocscience research papers: <http://www.rocscience.com/assets/files/uploads/7689.pdf> adresinden alındı.

Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., Sadeghi, H., & Tarigh Azali, S. (2006). Comparison of predicted and actual behavior and engineering geological characterization of Kallat tunnel. *IAEG Symposium* (s. 1-8). The Geological Society of London.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition, *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada, Vol. 1, p. 267 – 273.

Hoek, E. (2000). Big tunnels in bad rock. *ASCE journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 726-740.

Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1165-1186.

Hoek, E., Kaiser, P., & WF, B. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: AA Balkema.

Hoek, E., & Brown, E. (1980). *Underground excavations in rock*. London: Instn Min. Metall.

Osgoui, R., & Ünal, R. (2005). Rock reinforcement design for unstable tunnels originally excavated in very poor rock mass. *Underground space use: Analysis of the past and lessons for the future*, (s. 291-296).

Rocscience-Phase². (2009). *Finite element analysis of excavations and slopes*. Toronto: Rocscience Inc.

Sakurai, S. (1983). Displacement measurements associated with the design of underground openings.,

1163-1178, s. Field measurements in geomechanics. Zurich.

Sari, D. (2007). Rock mass response model for circular openings. Canadian Geotechnical Journal, 44, 891-904.

Sarı, Y.D., Paşamehmetoğlu, A.G., Çetiner, E., & Dönmez, S. (2008). Numerical analysis of a tunnel support design inconjunction with empirical methods. International journal of geomechanics, 74-81.

Satıcı, Ö. (2007). Kavak Merzifon yolu T4 (Küçükbelvar) tünel duraylılık analizi. Hacettepe Üniversitesi Y. Lisans tezi.

Ulusay, R., & Sonmez, H. (2007). Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. Ankara: TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları.

*Bu Makale 14 – 17 Nisan 2015 tarihinde düzenlenen **IMCET 2015-Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi'nde** bildiri olarak sunulmuştur.*

TÜM EMEK İŞ SİTESİ BİNALARININ PATLAYICI KULLANILARAK YIKIMI DEMOLITION OF THE TÜM EMEK İŞ BUILDINGS BY USING EXPLOSIVES

Ümit Özer*
Abdulkadir Karadoğan**
Meriç Can Özyurt***
Ülkü Kalaycı****
Uğur Tutar*****
Bahattin Demir*****
Fazlı Toprak*****

ÖZET

Bu çalışmada, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Kentsel Dönüşüm ve Altyapı Hizmetleri Genel Müdürlüğü tarafından kentsel dönüşüm çalışmaları kapsamında, İstanbul ili Kartal ilçesinde bulunan Tüm Emek İş Sitesi'ne ait 4 adet binanın kontrollü patlatma tekniği ile yıkımı açıklanmıştır.

Çalışma kapsamında binaların planı, konumu ve durumu, betonarme malzeme özellikleri ile komşu yapılar dikkate alınarak, yıkım tasarımı belirlenmiştir. Nihai patlatma tasarımları, bir inşaat mühendisliği yazılımında oluşturulan model üzerinde test edilerek bina davranışı ve yıkılma şekli simüle edilmiştir. Ateşleme süresi boyunca kolonlara tesir eden yüklerin kolonların taşıma kapasitelerinin üzerine çıktığı görülmüştür. Bu simülasyon modelinden yola çıkarak binaların planlanan şekilde yıkılacağı ve beklenen ölçüde parçalanmanın oluşacağı öngörülmüştür. Yıkım tamamlandığında, sonucun planlama aşamasında öngörülen şekilde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Patlayıcı, Betonarme Yapı, Yıkım, Simülasyon

ABSTRACT

In this study, the demolition study of of buildings of Tüm Emek İş Buildings in Kartal-Istanbul by controlled blasting technique, within the scope of urban renewal works by Republic of Turkey, Ministry of Environment and Urbanisation, Directorate General of Infrastructure and Urban Transformation Services, was explained.

The applicable demolition designs for Tüm Emek İş Buildings were determined, according to the buildings geometry, statics, material properties of reinforced concrete and vicinity structures. Ultimate demolition designs were tested on a model developed by using a construction engineering software, to simulate buildings response during the demolition. As a result of these simulations, it was anticipated that the buildings would be demolished as planned and the fragmentation degree would be desired level. When the demolition was completed, the outcomes of field application validated to the anticipated results in the planning phase.

Keywords: Explosive, Reinforced Concrete Structure, Demolition, Simulation

* İstanbul Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Avcılar/İSTANBUL, uozer@istanbul.edu.tr
** İstanbul Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Avcılar/İSTANBUL
*** İstanbul Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Avcılar/İSTANBUL
**** İstanbul Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., Avcılar/İSTANBUL
***** Egenitro Patlayıcı Madde Tic. Ltd. Şti, İZMİR
***** T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, ANKARA
***** T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, ANKARA

GİRİŞ

Ülkemizde, kentsel dönüşüm kapsamında yıkılması söz konusu olan milyonlarca bina bulunmaktadır. Bu binaların klasik yöntemlerle yıkımının uzun sürede gerçekleşmesi sonucu çevreye verilen rahatsızlık, yüksek maliyet ve emniyetsiz çalışma şartlarını beraberinde getirmektedir. Bu yüzden daha pratik yöntemlerin arayışına gidilmiştir. Bunun sonucunda, ülkemizde henüz uygulanmaya başlayan ve Ekim 2014'te yürürlüğe giren "Yapıların Tam ve Kısmi Yıkımı İçin Uygulama Kuralları" TS13633 standardında belirtilen kontrollü patlatma ile yapı yıkımı gündeme gelmiştir.

Patlatma ile yıkım metodu, alt katlarda mevcut olan taşıyıcı elemanların patlayıcı kullanılarak parçalanması ile geri kalan taşıyıcı elemanların artan basınç ve/veya moment yükü karşısında yenilmesi sonucu yapının yıkılmaya başlaması prensibine dayanır (Özyurt, 2013).

Binaların kontrollü patlatma ile yıkılmasında, genel bir tasarım önerisi sunulamaz. Çünkü çevresel faktörler (komşu yapılar) ile bina özellikleri (konumu, planı, malzeme özellikleri vs.) her bir bina için farklılık göstermektedir. Bina özellikleri ile çevresel faktörler dikkate alınarak, amaca uygun yıkım tasarımı önerilmelidir (Dowding, 1996; Özyurt, 2013).

Binaların, patlatma ile kontrollü yıkımı için iki yöntem uygulanmaktadır. İlki; yapının ağırlık merkezinin değiştirilmesi sonucu yana devrilmesidir. İkincisi ise; yapının taşıyıcı elemanlarından bir kısmının taşıyıcı özelliğini yitirmesi ile diğer yapı elemanlarının artan yük karşısında deforme olması sonucu yapının bulunduğu sınırlar içerisinde çökmesidir. Bu iki metodun birlikte kullanıldığı uygulamalar da görülmektedir. Şekil 1'de bu iki yöntemin model üzerinde uygulanması ile bina davranış modeli sırasıyla sunulmuştur (Özyurt, 2013).

Stevenston (1972), Olofsson (1980), Gustafsson (1981), Jimeno vd. (1995), Dowding (1996), gibi araştırmacılar patlayıcı kullanılarak yapı yıkımına değinmişlerdir. Gustafsson yapı elemanlarının patlayıcı kullanılarak yıkılmasına dair patlatma tasarımı önerilerinde bulunmuştur. Hauser, Werner ve Thomas ise şarj miktarının belirlenmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Yapı elemanlarının patlama sırasının belirlenmesi kontrollü patlatma tekniğinin en önemli aşaması olup düzgün belirlenemediği takdirde yıkım istenildiği gibi sonuçlanmayabilir (Şimşir ve Köse, 1996; Koca,

2006; Özer ve Karadoğan, 2012; Özyurt, 2013).

Kontrollü patlatma tekniğinin bir diğer önemli aşaması gecikme aralığının belirlenmesidir. Uygulanan gecikme aralığı, betonarme malzemenin tepki ve yenilme süresini karşılayabilecek düzeyde olmalıdır. Aksi takdirde öngörülen parçalanma sağlanmayabilir. Literatürde gecikme aralığının belirlenebilmesine dair bir yaklaşım bulunmamakta olup proje ekibinin tecrübesi ile belirlenmektedir (Özyurt vd., 2013).

Yapı yıkımında genel olarak yüksek hassasiyetli dinamitler, T.N.T. v RDX ile PETN içerikli plastik patlayıcılar kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyetli dinamitler genellikle beton veya betonarme malzemedede kullanılırken, lineer şekilli plastik patlayıcılar çelik malzemelerin yıkımında kullanılırlar. Beton veya betonarme malzemedede patlayıcılar yapı elemanında delinen deliklere yerleştirilirken, çelik yapılarda patlayıcı yapı elemanının yüzeyine yerleştirilir (Koca, 2006; Extreme Explosions, 2010).

Sıkılama için kâğıt, kum, balçık, toprak ve sıva kullanılabilir. Yüzeysel patlayıcıları sıkılanmak için kum torbaları veya kontrplak ve dayanıklı kumaşlar birlikte kullanılır (Oloffson, 1980; Özer ve Karadoğan, 2012).

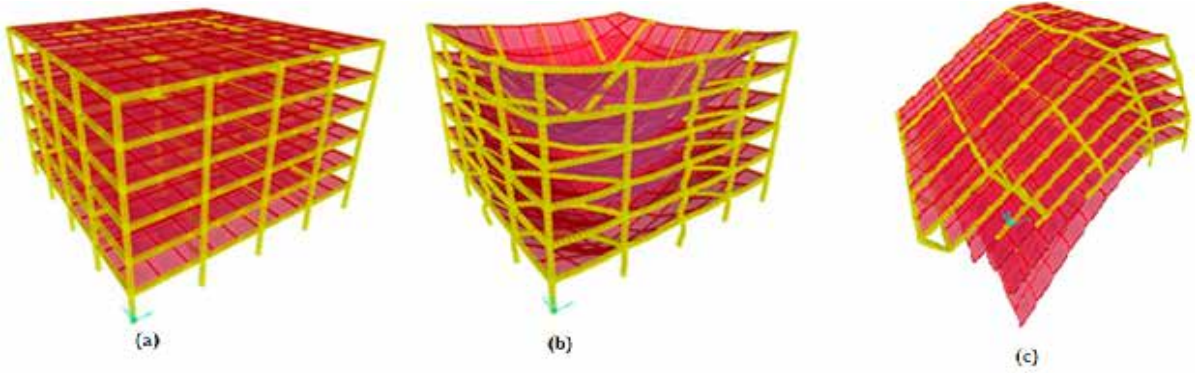
Patlatma kaynaklı çevresel etkiler; parça savrulması, yer sarsıntısı, gürültü ve toz oluşumudur.

Parça savrulmasından oluşabilecek hasarın önüne geçmek adına patlayıcı yerleştirilen yapı elemanları jeotekstil malzeme ve tel örgü ile sarılmalıdır. Bununla birlikte, binanın yıkım esnasında enkaz alanı dışına parça savrulmasına imkan veren açık kısımları da jeotekstil malzeme ve tel örgüler ile çevrelenmelidir.

Gürültüden oluşabilecek rahatsızlıkların önüne geçmek için çevre sakinleri ve ilgili personel kişisel koruyucu kulaklık kullanabilir ve gürültü oluşumunu minimize etmek üzere patlayıcı yerleştirilen yapı elemanı cam yünü ile sarılabilir (Özyurt, 2013; Özyurt vd., 2013).

Patlamanın gerçekleşmesi ve yapının yıkılıp yere çarpması sonucu oluşacak yer sarsıntısını azaltmak için darbe emici özellikte olan koruyucu malzemeler veya inşaat molozları yapının devrileceği alana serilebilir (Özyurt, 2013).

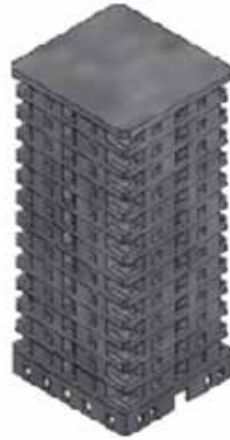
Yıkım süresince toz oluşumunun tamamen önüne geçmek oldukça güçtür. Bu hususta, yapı ıslatılabilir veya yıkım anında yapı, su püskürtme makineleri ile sulanabilir (Özyurt, 2013).



Şekil 1. (a) Betonarme Bina Modeli (b) Betonarme Binanın Kendi İçine Doğru Çökertilmesi, (c) Betonarme Binanın Yana Devrilmesi (Özyurt, 2013)



(a)

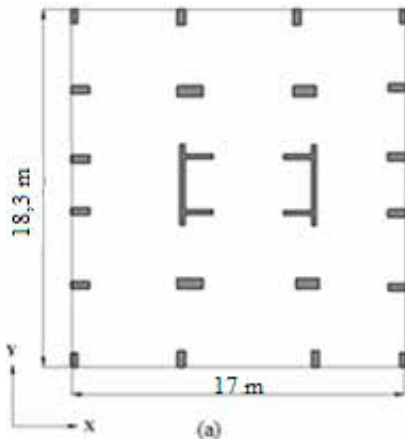


(b)

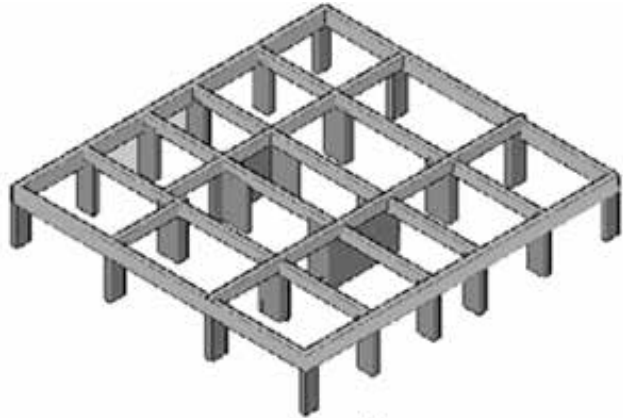


(c)

Şekil 2. (a) Tüm Emek İş Sitesi Binalarının Fotoğrafları, (b) 1, 2 ve 3 Numaralı Binaların Modeli, (c) 4 Numaralı Binanın Modeli



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Binaların Planı, (b) Binaların Taşıyıcı Sistem Geometrisi

1. TÜM EMEK İŞ SİTESİ

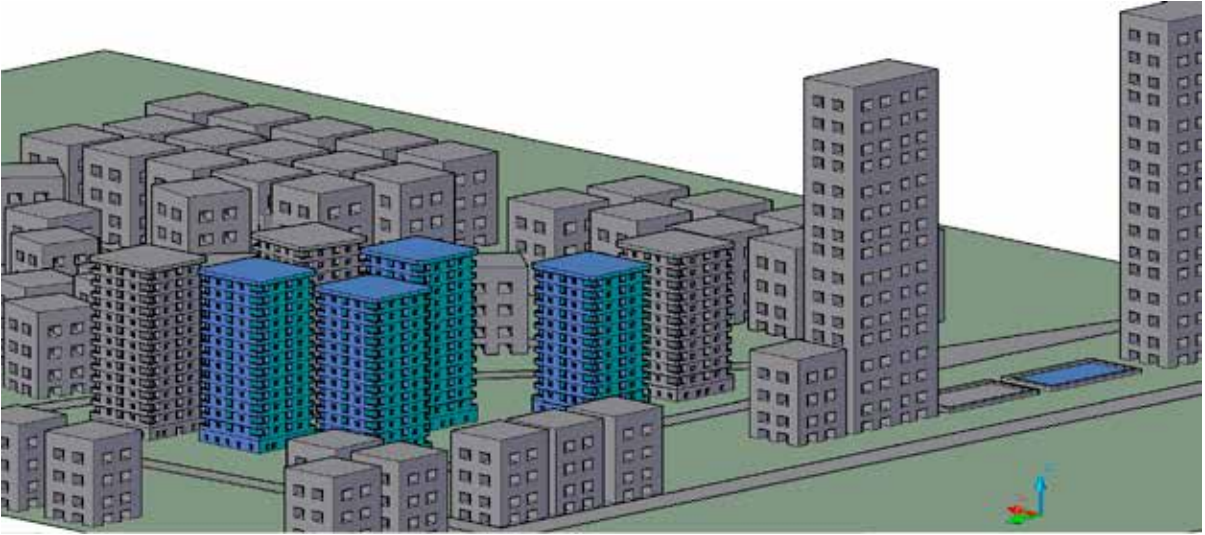
Tüm Emek İş Sitesi, İstanbul ili Kartal ilçesindedir. Sitede 7 adet bina mevcuttur. Binaların kat planı aynı olup net alanı 254 m^2 'dir. Yıkımına karar verilen 4 adet binanın üç tanesi 14 katlı, bir tanesi 12 katlıdır. Her katta 20 adet kolon, 6 adet betonarme duvar mevcuttur.

Binaların fotoğrafları ve üç boyutlu modelleri Şekil 2'de, binaların planı ile taşıyıcı sistem geometrisi ise Şekil 3'te sunulmaktadır.

Tüm Emek İş Sitesi, çevre yerleşim birimleri ve risk arz eden yapılara olan mesafeler Şekil 4 ve 5'te sunulmuştur.



Şekil 4. Tüm Emek İş Sitesi ve Çevre Yapıların Uydu Görüntüsü



Şekil 5. Tüm Emek İş Sitesi ve Çevre Yapıların Üç Boyutlu Modeli

Yıkım tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulması gereken ilk husus; binanın statik durumunun tespit edilmesidir.

Söz konusu binalarda bulunan betonun TS500 (2000) standardının çok altında kalan C10 sınıfı betona eşdeğer olduğu, donatı çeliğinin ise TS708 (2010) standardında ifade edilen en düşük dayanımlı çelik olan ise S220a çeliği olduğu bilgisi bina projesinden edinilmiştir.

Binalarda bulunan her bir kolonun taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Taşıma kapasitesi, kolona tesir eden çekme kuvvetinin minimum olduğu noktada basınca karşı gösterdiği direnç ile basınç yükünün minimum olduğu noktada çekme kuvvetine karşı gösterdiği direnç olarak ifade

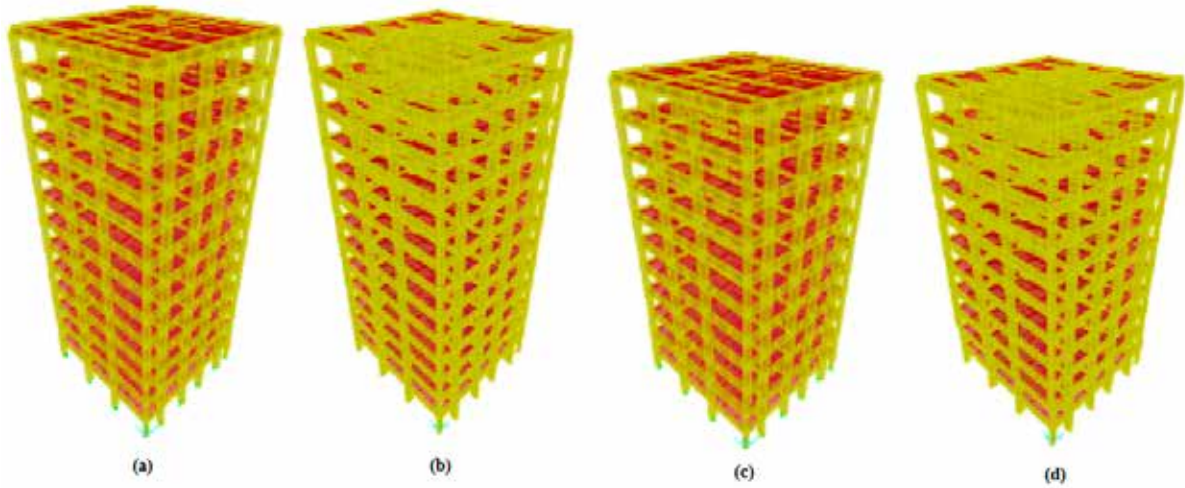
edilir. Taşıma kapasiteleri hesaplanırken "Simetrik Donatılı Kolonların Karşılıklı Etki Diyagramı" kullanılmıştır (Zorbozan ve Aydemir, 2013). Bu diyagram yardımıyla belirli bir basınç yükünün etkisi altında olan yapı elemanının taşıyabileceği maksimum moment değerinin belirlenmesi sağlanmaktadır. Taşıma kapasiteleri, kolonların gevrek(basınç) kırılma durumu göz önüne alınarak momentin sıfır olduğu noktada maksimum normal kuvvet ve normal kuvvetin sıfır olduğu noktada maksimum moment değerleri arasında lineer bağlantı kurularak her iki eksen doğrultusunda tespit edilmiştir.

Binalar, sonlu elemanlar yöntemini baz alarak hesaplama yapan bir simulasyon yazılımında modellenmiştir. Modeller üzerinde yapılan sta-

Çizelge 1. Binaların Zemin Katında Bulunan Kolonların Bir Kısmının Taşıma Kapasitesi ve Tesiri Altında Kaldığı Yükler

Kat	Kolon No	Max. Taşıma Kapasitesi (kN)			1, 2 ve 3 Numaralı Bina			4 Numaralı Bina		
		f_{ck}	Mx	My	Başlangıç Anında Kolonlara Tesir Eden Yükler (kN)			Başlangıç Anında Kolonlara Tesir Eden Yükler (kN)		
					P	Mx	My	P	Mx	My
Zemin	2	2304	276	124	1774	4	47	1533	4	43
	7	4000	300	600	1539	37	5	1312	32	4
	9	2520	132	340	2359	0	0	2153	0	0
	13	2520	132	340	1986	73	0	1673	67	0
	20	1680	176	76	1579	38	6	1393	35	6

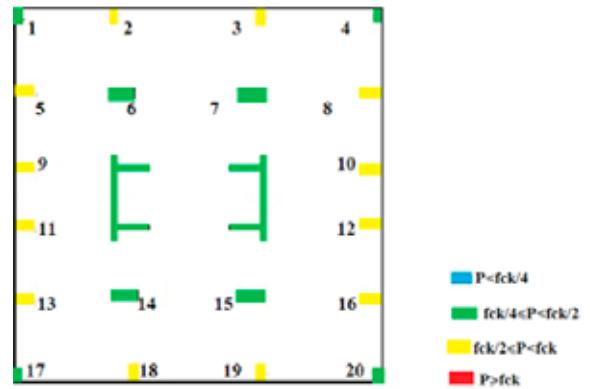
f_{ck} : Betonarme malzemenin basınç yüküne karşı gösterdiği direnç, P: Yapı elemanına tesir eden basınç yükü, Mx: Yapı elemanına x doğrultusunda tesir eden moment yükü veya moment yüküne karşı gösterdiği direnç, My: Yapı elemanına y doğrultusunda tesir eden moment yükü veya moment yüküne karşı gösterdiği direnç.



Şekil 6. (a) 1, 2 ve 3 Numaralı Binaların Modeli, (b) 1, 2 ve 3 Numaralı Binaların Ölü Yükler Altındaki Davranışını, (c) 4 Numaralı Binanın Modeli, (d) 4 Numaralı Binanın Ölü Yükler Altındaki Davranışı

tik analizde taşıyıcı sisteme tesir eden yükler belirlenmiştir. Taşıyıcı sisteme tesir eden yükler kolonların taşıma kapasitesi ile karşılaştırılmış, bunun sonucunda binaların TS500 ve Deprem Yönetmeliği (1998)'ne göre çürük sınıfına girdiği anlaşılmıştır. Çizelge 1'de binaların zemin katındaki kolonlardan bazılarının taşıma kapasiteleri ile başlangıç anında (t=0 sn) tesiri altında kaldığı yükler sunulmuştur.

Binaların modeli ve ölü yükler altındaki davranışına ait görüntüleri Şekil Şekil 6'da, zemin katta bulunan kolonların risk durumu ise Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Binaların zemin katında bulunan kolonların risk durumu

Bina döşemelerinin iç kısımlarında deplasmanlar görülmektedir. 2 numaralı binada, kat sayısının az olması sebebiyle binada oluşan ölü yükler daha düşüktür, bu nedenle gözlenen eğilme miktarı diğer binalara nazaran daha düşüktür.

Şekil 7'de görüldüğü üzere, binaların kenar kısımlarında kalan kolonların yenilme olasılığı merkez kolonlara göre daha fazladır. Bunun sebebi; merkez kolonların yüzey alanının çevre kolonların yüzey alanından büyük olması ve bina merkezinde oluşan ölü yükün büyük bir kısmının perdeler tarafından taşınmasıdır.

2. YIKIM TASARIMI

Binaların statik durumu ve geometrisi, betonarme malzeme özellikleri ile çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda, literatürde "içine çökertme" olarak adlandırılan yıkım tekniğinin uygulanmasına karar verilmiştir. "İçine çökertme"

yöntemi uygulanırken çevresel riskleri minimize etmek amacıyla çok düşük bir açıyla yıkımın bir yöne yönlendirilmesine karar verilmiştir (Şekil 8). Binaların statik durumu göz önünde bulundurulduğunda, sadece kolon ve perdelerle patlayıcı yerleştirilmesine karar verilmiştir.

Her bir elemanın taşıyıcı özelliğini yitirmesine neden olacak patlayıcı madde miktarını hesaplamak için Thomas'ın geliştirdiği hacme bağlı şarj miktarı hesabı (Eşitlik 1) kullanılmıştır.

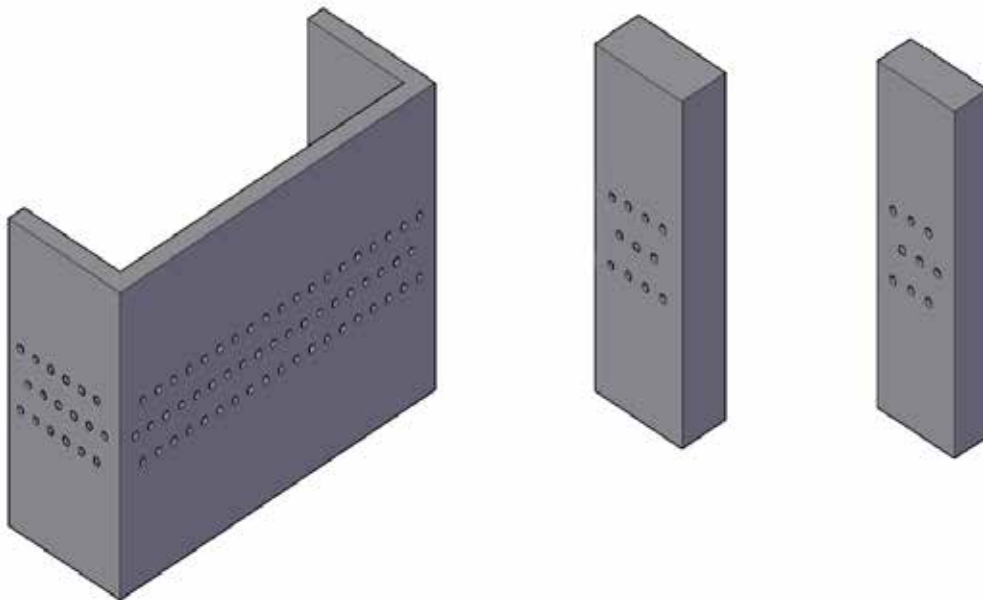
$$L = V \cdot q \quad (1)$$

Burada; L: Şarj miktarı (kg) , V: Taşıyıcı elemanın hacmi (m³), q: Tecrübe katsayısıdır. Tecrübe katsayısı (q), literatür araştırması sonucu elde edilmiştir.

Delikler, taşıyıcı elemanların uzun kenarına dik, kısa kenar uzunluğunun 2/3'si kadar delinmiştir.



Şekil 8. Yıkım Sonucu Oluşması Planlanan Yiğın Yönleri



Şekil 9. Yapı Elemanlarında Uygulanan Delik Geometrisi Örnekleri



Ateşleme Grupları	Kat	Yapı Elemanı	Kat	Yapı Elemanı
1	Bodrum ve Zemin	Perdeler		
2	1	Perdeler		
3	2	Perdeler		
4	3	Perdeler		
5	4	Perdeler		
6	5	Perdeler	Bodrum ve Zemin	Merkez Kolonlar
7	6	Perdeler	1	Merkez Kolonlar
8	7	Perdeler	2	Merkez Kolonlar
9	8	Perdeler	3	Merkez Kolonlar
10	4	Merkez Kolonlar		
11	5	Merkez Kolonlar		
12	6	Merkez Kolonlar	Zemin	Çevre Kolonlar
13	7	Merkez Kolonlar	1	Çevre Kolonlar
14	8	Merkez Kolonlar	2	Çevre Kolonlar
15	9	Merkez Kolonlar	3	Çevre Kolonlar

Şekil 10. Yapı Elemanlarının Ateşleme Sırası

Çizelge 2. Her Bir Bina İçin Tasarım Parametreleri

Tasarım Parametreleri	Birim	Bina No.				Toplam
		1.Blok	2.Blok	3.Blok	4.Blok	
Kat sayısı (bodrum+zemin+katlar)	Adet	14	14	14	12	
Patlayıcı konulacak kat sayısı	Adet	9	9	9	9	
Bir kattaki kolon sayısı	Adet	20	20	20	20	
Toplam kolon sayısı	Adet	280	280	280	240	
Patlayıcı konulmayacak kolon sayısı	Adet	214	206	206	172	
Patlayıcı konulacak toplam kolon sayısı	Adet	66	74	74	68	
Delik düzeni	-	Şeşbeş	Şeşbeş	Şeşbeş	Şeşbeş	
Bir kolondaki delik sayısı	Adet	9-11	9-11	9-11	9-11	
Kolonlardaki toplam delik sayısı	Adet	626	707	707	645	
Bir kattaki betonarme duvar sayısı	Adet	6	6	6	6	
Patlayıcı konulacak toplam betonarme duvar sayısı	Adet	54	54	54	54	
Birinci betonarme duvardaki delik sayısı	Adet	31-45	31-45	31-45	31-45	
İkinci betonarme duvardaki delik sayısı	Adet	10-15	10-15	10-15	10-15	
Üçüncü betonarme duvardaki delik sayısı	Adet	9-16	9-16	9-16	9-16	
Dördüncü betonarme duvardaki delik sayısı	Adet	30-43	30-43	30-43	30-43	
Beşinci betonarme duvardaki delik sayısı	Adet	9-17	9-17	9-17	9-17	
Altıncı betonarme duvardaki delik sayısı	Adet	10-15	10-15	10-15	10-15	
Duvarlardaki toplam delik sayısı	Adet	1,091	1,091	1,091	1,091	
Toplam delik sayısı	Adet	1,717	1,798	1,798	1,736	
Bir delikteki patlayıcı miktarı	Kg	0.050-0.100	0.050-0.100	0.050-0.100	0.050-0.100	
Patlayıcı madde	-	(Dinamit (Nobelex-TG				
Ateşleme Sistemi	-	(Elektriksiz Kapsüller (NONEL				
Toplam patlayıcı miktarı	Kg	109.375	112.350	115.450	110.800	447.975
Toplam kapsül miktarı	Adet	1,717	1,798	1,798	1,736	7,049
Kablo	Metre	750	750	750	750	3,000

Delikler, delik boyuna bağılı olarak 50 gr, 75 gr veya 100 gr dinamit ve sıkılama malzemesi (toprak ve alçı) ile doldurulmuştur. Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmış şarj miktarı, bir delikteki dinamit miktarına bölünerek delik adedi belirlenmiştir.

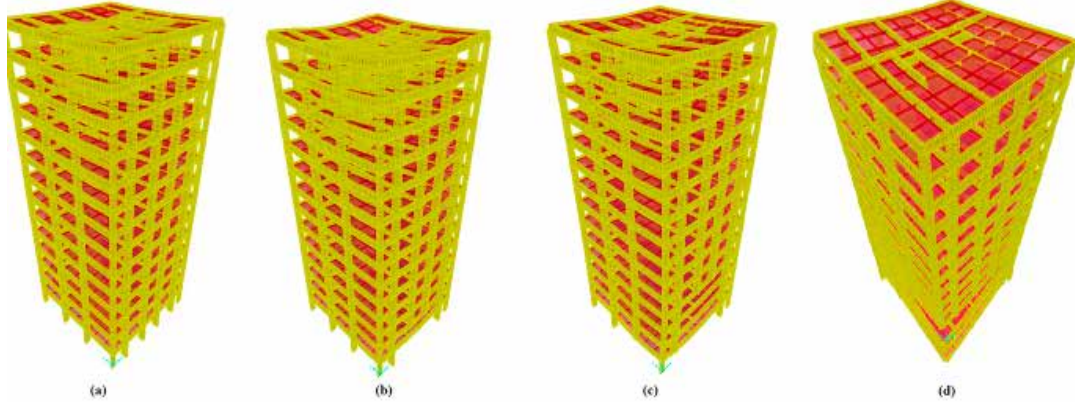
Binaların “içe çökertme” tekniği ile yıkılması için yapı elemanları ateşleme sırasına göre gruplandırılmıştır. Her bir ateşleme grubu içerisinde bulunan yapı elemanları, yıkımın çok düşük bir açıyla bir yöne yönlendirilebilmesi için sırası-

la patlatılacaktır. Bu sıra, her bir bina için yıkım eğim yönüne bağılı olarak değişmektedir.

Yapı elemanlarında uygulanan delik geometrisi Şekil 9’da, ateşleme grupları Şekil 10’da, tasarımlara ait detaylı bilgiler ise Çizelge 2’de sunulmuştur.

2.1. Yıkım Simülasyonu

Şekil 6’da sunulan bina modelleri, nihai tasarıma uygun olarak simülasyon programı ile test edil-



Şekil 11. 1 Numaralı Binanın Yıkım Simülasyonu (a) 1. Sn, (b) 2. Sn, (c) 3. Sn, (d) 4. Sn

Çizelge 3. Ateşleme Süresince 1 Numaralı Binadaki Kolonlara Etkiyen Basınç ve Moment Yükleri

Kat	Kolon No	t = 1 sn			t = 2 sn			t = 3 sn			t = 4 sn		
		P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN
1	2	1929	8	53	3661	14	136	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	7	3169	1	67	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	2368	132	7	2722	210	6	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	13	1769	45	15	2233	89	17	3259	45	45	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	20	997	15	20	1295	23	20	28	11	7	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
4	2	1444	13	48	2436	14	213	608	307	82	212	590	183
	7	2422	7	95	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	1744	122	16	2022	168	13	1046	146	369	103	6	172
	13	1372	49	32	1718	111	29	2794	189	52	2631	428	922
	20	818	22	33	1079	44	33	191	26	22	2499	155	309
7	2	989	17	46	1419	29	127	687	227	106	362	428	125
	7	1651	8	75	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	1174	129	21	1388	162	18	1049	171	269	111	132	279
	13	962	51	41	1198	103	36	2018	188	14	3498	425	665
	20	587	25	40	786	53	39	204	9	3	1477	132	196
10	2	549	19	45	723	46	92	421	162	94	263	312	11
	7	923	8	64	51	48	150	70	194	295	27	585	246
	9	651	122	24	791	169	20	670	158	240	50	99	386
	13	545	53	46	680	108	40	1129	222	71	2279	511	605
	20	328	27	45	447	57	43	139	11	13	757	88	233
13	2	114	22	68	148	56	119	89	159	126	20	317	24
	7	219	10	81	42	83	164	76	319	300	42	956	279
	9	150	214	28	183	294	24	171	287	248	46	206	443
	13	132	96	53	161	183	47	251	371	90	604	827	611
	20	48	33	62	72	69	60	33	19	10	59	87	278

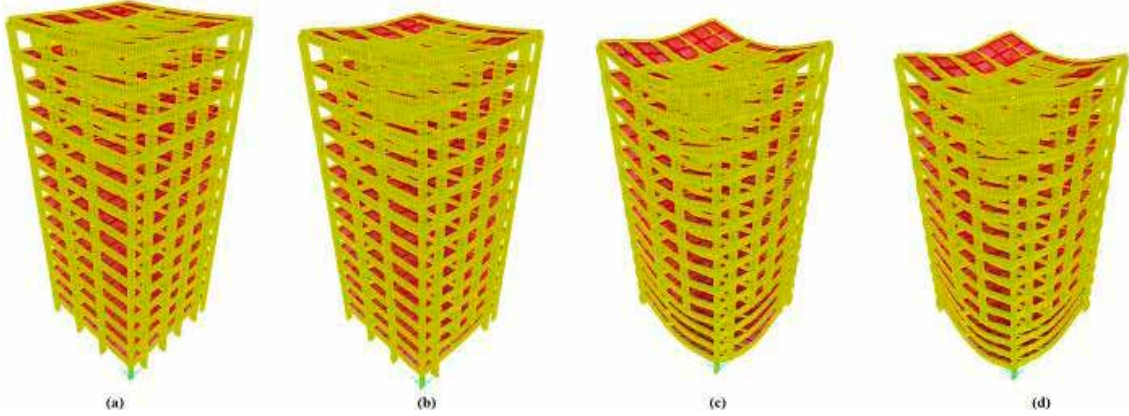
miştir. Ateşleme süresince oluşacak yüklerin kolonların taşıma kapasitelerinin üzerine çıkacağı tespit edilmiştir (Çizelge 3, 4, 5 ve 6).

Betonun en büyük gerilmeye maruz kaldığında değil, belirli bir deformasyona ulaştığında kırılması (Türk, 2011) ve farklı yükleme hızları altında basınç dayanımı ile elastisite modülünün değiştiği (Felekoğlu ve Türkel, 2004) göz önünde bulun-

durulduğunda, uygun gecikme aralığı ile tüm kolonların yenileceği öngörülmüştür. Nihai tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulan yıkım simülasyonları Şekil 11, 12, 13 ve 14'te gösterilmiştir.

2. 2. Güvenlik Önlemleri

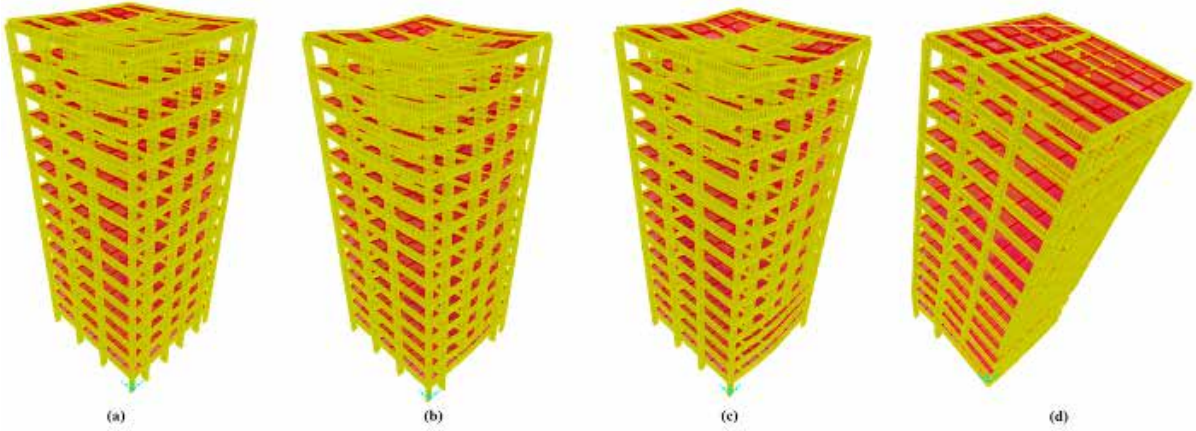
Yıkım esnasında oluşması muhtemel çevresel etkilerin önlenmesi veya en aza indirilmesi amacıyla



Şekil 12. 2 Numaralı Bina'nın Yıkım Simülasyonu (a) 1. Sn, (b) 2. Sn, (c) 3. Sn, (d) 4. Sn

Çizelge 4. Ateşleme Süresince 2 Numaralı Binadaki Kolonlara Etkiyen Basınç ve Moment Yükleri

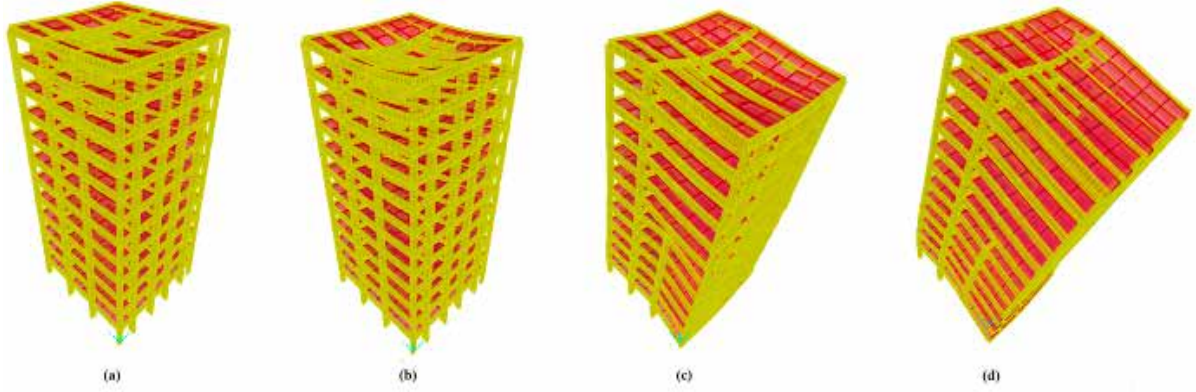
Kat	Kolon No	t = 1 sn			t = 2 sn			t = 3 sn			t = 4 sn		
		P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN
1	2	1929	8	53	3661	14	136	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	7	3169	1	67	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	2368	132	7	2722	210	6	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	13	1769	45	15	2233	89	17	6138	338	201	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	20	997	15	20	1295	23	20	3058	235	40	9102	368	516
4	2	1444	13	48	2436	14	213	257	222	69	98	325	131
	7	2422	7	95	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	1744	122	16	2022	168	13	546	207	164	167	209	174
	13	1372	49	32	1718	111	29	3838	269	198	854	267	592
	20	818	22	33	1079	44	33	2516	215	93	6364	298	717
7	2	989	17	46	1419	29	127	339	184	79	309	218	109
	7	1651	8	75	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	1174	129	21	1388	162	18	629	218	111	77	198	166
	13	962	51	41	1198	103	36	4210	233	154	1668	236	342
	20	587	25	40	786	53	39	1732	182	97	3206	220	349
10	2	549	19	45	723	46	92	227	153	80	234	172	101
	7	923	8	64	51	48	150	9	153	98	7	154	127
	9	651	122	24	791	169	20	438	207	84	20	179	143
	13	545	53	46	680	108	40	1294	240	127	1156	243	246
	20	328	27	45	447	57	43	937	166	93	1489	185	218
13	2	114	22	68	148	56	119	56	170	111	55	187	138
	7	219	10	81	42	83	164	16	250	112	21	252	148
	9	150	214	28	183	294	24	114	381	84	27	336	147
	13	132	96	53	161	183	47	304	405	128	314	412	235
	20	48	33	62	72	69	60	147	181	119	222	198	237



Şekil 13. 3 Numaralı Binanın Yıkım Simülasyonu (a) 1. Sn, (b) 2. Sn, (c) 3. Sn, (d) 4. Sn

Çizelge 5. Ateşleme Süresince 3 Numaralı Binadaki Kolonlara Etkiyen Basınç ve Moment Yükleri

Kat	Kolon No	t = 1 sn			t = 2 sn			t = 3 sn			t = 4 sn		
		P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN
1	2	1929	8	53	3661	14	136	4544	230	248	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	7	3169	1	67	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	2368	132	7	2722	210	6	1823	433	17	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	13	1769	45	15	2233	89	17	691	234	34	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	20	997	15	20	1295	23	20	0	0	0	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
4	2	1444	13	48	2436	14	213	3955	332	282	21253	295	866
	7	2422	7	95	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	1744	122	16	2022	168	13	1290	106	35	125	954	120
	13	1372	49	32	1718	111	29	550	89	70	769	326	80
	20	818	22	33	1079	44	33	400	251	208	820	403	153
7	2	989	17	46	1419	29	127	3050	223	268	12941	32	709
	7	1651	8	75	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	1174	129	21	1388	162	18	790	124	46	229	117	97
	13	962	51	41	1198	103	36	404	50	87	1033	310	130
	20	587	25	40	786	53	39	397	166	182	469	143	129
10	2	549	19	45	723	46	92	1857	150	232	6725	83	568
	7	923	8	64	51	48	150	122	64	414	3	324	285
	9	651	122	24	791	169	20	360	57	49	299	71	101
	13	545	53	46	680	108	40	220	51	90	676	324	170
	20	328	27	45	447	57	43	246	118	165	204	115	112
13	2	114	22	68	148	56	119	337	147	327	1245	107	696
	7	219	10	81	42	83	164	123	108	433	39	503	341
	9	150	214	28	183	294	24	88	93	55	56	189	115
	13	132	96	53	161	183	47	72	88	98	115	572	194
	20	48	33	62	72	69	60	5	111	204	21	121	136



Şekil 14. 4 Numaralı Binanın Yıkım Simülasyonu (a) 1. Sn, (b) 2. Sn, (c) 3. Sn, (d) 4. Sn

Çizelge 6. Ateşleme Süresince 4 Numaralı Binadaki Kolonlara Etkiyen Basınç ve Moment Yükleri

Kat	Kolon No	t = 1 sn			t = 2 sn			t = 3 sn			t = 4 sn		
		P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN	P kN	M2 kN	M3 kN
1	2	1479	12	42	2758	18	163	267	3	210	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	7	2355	5	57	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	2122	112	5	2238	176	5	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	13	1641	35	12	1718	84	17	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
4	20	887	18	17	956	21	20	1087	14	55	7229	4128	854
	2	1289	35	139	1989	35	155	712	10	156	1745	661	294
	7	486	54	134	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
	9	1500	149	10	1590	179	13	12	132	151	26	217	82
7	13	1227	106	27	1276	98	31	1129	124	318	33	336	153
	20	749	40	33	766	36	34	1121	28	111	2869	556	90
	2	942	42	106	1283	46	145	683	32	154	1705	461	290
	7	401	45	103	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı	Patlatıldı
10	9	935	139	15	976	183	18	28	137	126	68	15	78
	13	472	47	37	815	106	39	987	123	227	59	138	142
	20	749	40	33	499	47	40	752	42	119	1160	367	91
	2	942	42	106	484	46	140	293	48	147	710	318	300
10	7	501	45	103	33	70	148	52	79	205	182	159	552
	9	935	139	15	376	158	20	31	120	114	39	45	78
	13	758	100	33	320	112	42	436	130	191	19	171	135
	20	472	47	37	179	53	45	260	47	120	374	306	133

yapılacak çalışmaların başında patlatma öncesi ve sonrasında patlatma alanını da içine alan "Güvenli (yasak) Bölge"nin oluşturulması gerekmektedir.

Güvenli bölgenin oluşturulmasının temel amacı patlatma sırasında yıkım olayını izlemesi muhtemel seyirci kitlesinin ve civarda ikamet eden insanların ve yapıların güvenliğini sağlamak ve patlatma kaynaklı muhtemel etkilerden izole et-

mektir. Güvenli (yasak) bölgenin kapsadığı alanlar dört ana grupta toplanırlar. Bunlar; plan alanı, tasarlanan devrilme alanı, tahmin edilen enkaz alanı ve tampon bölgedir (Özer vd., 2013).

Güvenli bölge üzerinde, binaların durumu, patlayıcı çeşidi ve miktarı, çevre yapıların varlığı ve konumu direk olarak etkilidir. Bunlara ilaveten çalışmayı izlemek için bölgede bulunan halkın güvenliği de göz



Şekil 15. Yıkımda Oluşturulan Güvenli Bölge (Özer vd., 2013)

önünde bulundurulur, oluşturulan güvenli bölgenin kısımları ve sınırı Şekil 15'te gösterilmiştir.

Güvenli bölge içerisinde kalan alanın elektrik ve doğalgaz bağlantısı kesilmiş ve yapılar doğabilecek hasarlara karşı sigortalatılmıştır. Ayrıca, güvenli bölgenin dışında kalan havuzun üzeri branda ile kapatılmıştır.

Yıkımı planlanan binalar yerleşim yerinde bulunduğu için, parça savrulması önemli bir risk olarak görülmüştür. Bu nedenle, patlayıcı yerleştirilen yapı elemanlarına uygun kalınlıkta ve sağlamlıkta tel örgü sarılmıştır. Ayrıca, ilk 4 katın çevresi bina dışarısından uygun kalınlıkta ve sağlamlıkta tel örgü ve branda ile sarılmıştır.

3. DEĞERLENDİRME

Yıkım sahasında yapılan kontrollerde binaların tahmin edilen enkaz alanı içerisinde yıkıldığı görülmüştür (Şekil 16).

Yapı elemanlarının, yıkım simülasyonlarında öngörüldüğü gibi yenildiği, yıkım sonrası yerinde yapılan incelemelerle tespit edilmiştir. Parçalanma seviyesi, oluşan yığının ikincil kırma işlemine tabi tutulmadan yüklenip taşınabileceği düzeyde gerçekleşmiştir.

Yıkım sonunda, ilgili yerleşim birimlerinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir.

3.1. Titreşim Kaydı

Yıkım kaynaklı titreşim ve hava şokunu belirlemek amacıyla 5 adet titreşim ölçer cihazı yasak bölge içerisinde bulunan risk noktalarına yerleştirilmiştir. Şekil 17'de binaların ve cihaz istasyon noktalarının uydu görüntüsü, Çizelge 7'de ise titreşim ölçer cihazların kaydettiği maksimum parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri sunulmuştur.

Cihaz kayıtlarından anlaşılacağı üzere, kayde-



Şekil 16. Yıkım Öncesinde ve Yıkım Anında Binaların Görüntüsü



Şekil 17. Binaların ve Cihaz İstasyon Noktalarının Uydu Görüntüsü

Çizelge 7. Titreşim Ölçer Cihaz Kayıtları

Cihaz no	Titreşim Kaydı			Yatay uzaklık (m)
	Maksimum parçacık hızı (mm/sn)	Frekans (Hz)	Hava şoku (dB)	
İstantel BE10687	4,44	85,3	146,9	39,05
İstantel BE10688	4,06	100	147,5	102,07
İstantel BE10771	*	*	*	99,92
İstantel BE10772	*	*	*	95,80
İstantel BE10773	*	*	*	95,27
T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Limitleri	19			

* Yeterli genlikte sismik dalga oluşmadığından kayıt alınamamıştır

dilen olaylarda ortaya çıkan maksimum parçacık hızlarına karşılık gelen frekans değerlerinin dağılımları incelendiğinde, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın önerdiği limitlerin altında kaldığı görülmüştür.

SONUÇLAR

İstanbul ili, Kartal İlçesi'nde bulunan Tüm Emek İş Sitesine ait 4 adet binanın planları incelenmiş, yapı elemanlarının boyutları, çevredeki yapıların durumu ve mesafeleri göz önünde bulundurularak patlatma tasarımları yapılmıştır. Yıkım öncesinde, sırasında ve sonrasında oluşabilecek çevresel etkilerin neler olduğu ve bu etkilerin azaltılabilmesi için yapılması gerekenler belirlenmiştir.

Belirlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilen yıkım, planlandığı gibi başarılı bir şekilde ve herhangi bir çevresel hasara sebebiyet vermeden tamamlanmıştır. Kolonlara yerleştirilen patlayıcı madde, kolonların sahip olduğu taşıyıcı özelliğini yitirmesine yol açarak, binaların yıkılmasını sağlamıştır.

Uygun gecikme aralığının belirlenebilmesi; yapıların tepki ve yenilme süresinin uygun yöntemlerle belirlenmesine bağlıdır.

Mevcut tasarımda, ateşleme süresince kolonlara etkiyen yüklerin, kolonları deforme edecek boyutta olduğu, oluşturulan simülasyon modelinde tespit edilmiştir. Binalarda meydana gelen parçalanma seviyesi gözlemlendiğinde gecikme aralığı ve ateşleme sırasının uygun olarak belirlendiği anlaşılmıştır.

Ülkemizde kentsel dönüşüm kapsamında yıkılması planlanan binaların birçoğu yerleşim yeri içerisinde veya yakınında bulunmaktadır. Bu durum; ülkemizde kontrollü patlatma tekniğinin uygulanabilirliğine dair ön yargı oluşturmaktadır. Bu çalışma ile beraber ön yargıların önüne geçerek, kontrollü patlatma tekniğinin ülkemizde uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

Teşekkür

Yazarlar, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Alt-yapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü'ne, İstanbul Üniversitesi Rektörlüğü'ne, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na ve Egenitro Patlayıcı Madde Tic. Ltd. Şti. çalışanlarına ve yetkililerine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Deprem Yönetmeliği, 1998, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik

Dowding, H.C., 1996, Construction Vibration, pp. 265-283, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, U.K.

Extreme Explosions, 2010, Discovery Channel Belgesel Seti.

Felekoğlu, B., Türkel, S., 2004, Yükleme Hızının Beton Basınç Dayanımına ve Elastisite Modülüne Etkisi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 6 Sayı: 1 sh.65-75, Ocak 2004.

Gustaffson, R., 1981, Blasting Technique, Dynamit Noben Wien, Vienna, 327 s.

Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Curceda R.J.A, 1995, "Drilling and Blasting of Rocks", A.A. Balkemo, Rotherdam, pp. 312-322.

Koca, O., 2006, "Patlayıcı Maddelerle Kontrollü Yapı Yıkımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Oloffson, S.O., 1980, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, pp. 268-277.

Özer, Ü.; Karadoğan, A., 2012, "Patlatmalı Yapı Yıkım Tekniği, Binalarda Patlayıcı Kullanılarak Yıkım Tekniği", İleri Yıkım Teknikleri Eğitimi, TMMOB.

Özer, Ü., Karadoğan, A., Kalaycı, Ü., Özyurt, M.C., "İstanbul-Kartal Emek Sitesi Kontrollü Patlatma İle Yıkımı Ön Tasarımı Ve Risk Analizi", Döner Sermaye Projesi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İstanbul, 2013.

Özyurt, M.C., 2013, "Patlayıcı Madde Kullanılarak Yapıların Kontrollü Yıkılması ve Verimliliğinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü.

Özyurt M.C., Özer Ü., Karadoğan A., «Edirne Kapıkule Gümrük Lojman Binalarının Kontrollü Patlatma İle Yıkımı», 2013, VII. Delme-Patlatma Sempozyumu, ESKİŞEHİR, TÜRKİYE, 07-08 Kasım 2013, ss.21-33

Stevenston, A., 1972, Blasting Practice, Nobel's Explosives Company Limited, Scotland, 284 p.

Şimşir, F. Ve Köse, H., 1996, Yapı Yıkımında Patlatma Uygulamaları, T.M.M.O.B. Madencilik Dergisi, İstanbul, 3, 39-56.

TS500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, İstanbul

TS708, 2010, Çelik – Betonarme İçin – Donatı Çeliği, Türk Standartları Enstitüsü, İstanbul

TS13633, 2014, Yapıların Tam ve Kısmi Yıkımı İçin Uygulama Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, İstanbul

Türk, K., 2011, Betonarme I Ders Notları, Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Zorbozan ve Aydemir, 2013, Bileşik eğilme etkisindeki dikdörtgen kesitli betonarme kolonların karşılıklı etkileşim diyagramları (Ara donatısız S220)

Zorbozan Ve Aydemir, 2013, Bileşik eğilme etkisindeki dikdörtgen kesitli betonarme kolonların karşılıklı etkileşim diyagramları (Ara donatısız S220), <http://www.yildiz.edu.tr/~caydemir/bet1/abak1.pdf>

Bu Makale 19-20 Kasım 2015 tarihinde düzenlenen VIII. Delme-Patlatma Sempozyumu'nda bildiri olarak sunulmuştur.

TÜM VÜCUT TİTREŞİMİNİN OPERATÖR ve SÜRÜCÜLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ: ÖLÇÜMÜ ve DEĞERLENDİRİLMESİ

EFFECT OF WHOLE-BODY VIBRATION on OPERATORS and DRIVERS: MEASUREMENT and EVALUATION

Tuğba DOĞAN*
Bülent ERDEM**
Zekeriya DURAN***

ÖZET

Endüstrinin hemen tüm çalışma kollarında titreşim oluşturan makine ve teçhizat kullanılmaktadır. Bazı titreşim kaynakları çalışanların el ve kollarına ulaşan titreşimlere neden olurken diğer bir kısmı ise tüm vücudu titreşimin olumsuz etkisi altında bırakmaktadır. Madencilik faaliyetleri sırasında sürekli değişen ortam koşulları, farklı jeolojik ve iklim şartları, çalışanları olumsuz etkileyen fiziksel durumlar arasında sayılmaktadır. Madenlerde çalışan işçi ve operatörler de kullandıkları iş makinelerinden kaynaklanan mekanik titreşime maruz kalmaktadır. Titreşim, çalışanları; fiziksel ve psikolojik yönlerden etkileyebilmekte, meslek hastalıklarının oluşmasına neden olabilmekte, çalışma performanslarını etkileyerek iş güvenliğini tehlikeye sokabilmektedir.

Bu çalışmada Sivas ili sınırları içerisinde faaliyet gösteren çeşitli maden işletmelerinde çalışan sürücü ve operatörlerin tüm vücut titreşimi maruziyeti ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ulusal ve uluslararası standartlar uyarınca değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: A(8), AB direktifi 2002/44/EC, ISO 2631-1, maruziyet etkin değeri, maruziyet sınır değeri, SEAT, VDV.

ABSTRACT

Vibrating forming machines and equipment are used in almost all parts of industry. While some vibration sources cause vibration that reaches the hands and arms of employees, some others leave the body under the negative influence of whole body vibration. Constantly changing environmental conditions, various geological and climatic conditions during mining activities are considered among adverse effects against the physical condition of workers. Mine workers and operators are exposed to mechanical vibration arising from their use of equipment and machinery. Vibration can affect the employees from the physical and psychological aspects, lead to the formation of occupational diseases and can endanger the occupational safety by affecting work performance.

In this study, whole-body vibration exposure measurements of drivers and operators employed in various mining companies in the province of Sivas is made. The results are evaluated in accordance with national and international standards.

Keywords: A(8), EU directive 2002/44/EC, exposure action value, exposure limit value, ISO 2631-1, SEAT, VDV.

* Arş. Grv. Cumhuriyet Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., SİVAS, tcamuzcu@cumhuriyet.edu.tr
** Prof. Dr., Cumhuriyet Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., SİVAS
*** Öğr. Gör., Cumhuriyet Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., SİVAS

GİRİŞ

Enerji ve endüstriyel hammaddelerin yerkabuğundan çıkarılıp teknolojinin kullanımına sunulması ancak madencilik ile mümkün olmaktadır. Madencilik dünya genelinde ve ülkemizde de iş kazası ve meslek hastalığı oranının yüksek olduğu iş kollarından biri olup inşaat ve metal ile birlikte en riskli sektörler arasında yer almaktadır. Madencilik faaliyetleri sırasında sürekli değişen ortam koşulları, farklı jeolojik ve iklim şartları çalışanları olumsuz etkileyen fiziksel durumlar arasında sayılmaktadır. Ayrıca titreşim kaynağı oluşturan araç-gereç, makine ve cihazlar kullanılmakta olup çalışan işçi ve operatörler kullandıkları iş makinelerinin oluşturdukları titreşimden etkilenerek mekanik titreşime maruz kalmaktadırlar. Bazı titreşim kaynakları el ve kollara ulaşan titreşimlere neden olurken diğer bir kısmı ise tüm vücudu titreşimin olumsuz etkisi altında bırakmaktadır. Bu titreşim (vibrasyon) çalışanları fiziksel, psikolojik etkileyerek çalışma hayatlarında kronik hastalıkların oluşmasına sebep olmakta, çalışma performanslarını etkileyerek iş güvenliğini tehlikeye sokmaktadır.

Ülkemizde çalışma hayatı ile ilgili yasal düzenlemelerde meslek hastalıkları, Sosyal Güvenlik Sağlık İşlemleri Tüzüğü uyarınca beş grup halinde ele alınmakta olup; E grubu 'Fiziksel etkenlerle olan meslek hastalıkları'dır. Titreşimli araç kullananlarda görülen el-parmak ve dirsek rahatsızlıkları ile titreşimli zeminde çalışanlardaki bel ve sırt sorunları, 'Titreşim sonucu kemik – eklem zararları ve anjiyonörotik bozukluklar' (E-5) grubunda değerlendirilmektedir.

Meslek hastalıkları listesinde kas ve iskelet sistemi hastalıklarına oldukça geniş şekilde yer verilmiş olmakla birlikte, çeşitli yıllardaki meslek hastalıkları incelendiğinde bu grupta yer alan hastalıklara sık olarak rastlanmadığı dikkat çekmektedir (Bilir, 2007). T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından yayınlanan 2012 yılı iş kazası ve meslek hastalığı istatistiklerine göre, titreşim sonucu kemik-eklem zararları ve anjiyo-nörotik bozuklukları kaynaklı meslek hastalığı olgusu ancak 3 erkek işçide izlenmiştir (Anon(a)).

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından 22.08.2013 tarih ve 28743 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan "Çalışanların titreşim ile ilgili risklerden korunmalarına dair yönetmelik" uyarınca tüm vücut titreşimi (TVT), vücudun tümüne aktarıldığında, çalışanın sağlık ve güvenliği için risk oluşturan, özellikle de, bel bölgesinde rahat-

sızlık ve omurgada travmaya yol açan mekanik titreşimi ifade eder (ÇSGB, 2013a).

İşverenler, 29.12.2012 tarih ve 28512 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği uyarınca çalışanların maruz kaldığı mekanik titreşim düzeyini, işyerinde gerçekleştirilen risk değerlendirmesinde ele almak, gerektiğinde de ölçümler yaptırarak mekanik titreşime maruziyeti belirlemek durumundadır (ÇSGB, 2012). Bu ölçümler, İş Hijyeni Ölçüm, Test ve Analiz Laboratuvarları Yeterlilik Yönetmeliğine göre yapılır (ÇSGB, 2013b).

1. TÜM VÜCUT TİTREŞİMİ ÜZERİNE ÖNCEL ÇALIŞMALAR

Bovenzi (1996) otobüs ve traktör şoförleri üzerine yapılan iki epidemiyolojik çalışmada yaş, sırt kazaları, toplam tüm vücut titreşimi oranı ve postural aşırı yüklenme faktörlerinin kalça ağrısı üzerindeki etkisini incelemiştir. 1996 yılı itibarıyla TVT ve kalça sakatlanmaları arasında etki-tepki ilişkisi tam olarak açıklığa kavuşturulmamış olup kadın işçiler için TVT kaynaklı sağlık riskleri üzerine bilgi eksikliği olduğu ifade edilmiştir. İş yerlerinde bir kaç bin kadının yoğun şekilde tüm vücut titreşimine maruz kaldıkları tahmin edilmekte olduğundan, TVT'nin dışı üreme organları ve sırt omurları üzerindeki sağlık etkilerinin detaylı araştırılması önerilmiştir. Yapılan iş kaynaklı TVT'ne maruziyet ve bir sürüş işi olan ortamda postural gerilimin kalça ağrısı riskini artırabileceği ifade edilmiştir.

Lundström *et al.* (1998), dikey TVT maruziyeti sırasında enerjinin soğurulması üzerine yaptıkları çalışmada oturma pozisyonunda dikey TVT'ne maruziyet sırasında soğurulan gücü 15 erkek ve 15 kadın denek üzerinde ölçmüşlerdir. Titreşim seviyesi, frekans, vücut kütlesi, rahat ve kasılma oturma pozisyonları gibi farklı deney koşulları uygulanmıştır. Sonuçlar, iletilen enerji ile titreşimin frekansı arasında güçlü ilişki olduğunu göstermiştir. Enerji düzeyi, ivme seviyesi ve vücut kütlesi ile artmıştır. Kritik frekans değerinde enerji değerinde yaklaşık 10 kat artış gözlenmiştir.

Kumar (2004) açık ocaklarda kullanılan kamyonların operatörlerinin TVT bakımından takip edildiği çalışmada X, Y ve Z eksenlerinde titreşim ölçümleri kaydetmişler ve bulguların değerlendirilmesi sonucunda operatörlerin üçüncü bel ve yedinci boyun omurlarında titreşim kaynaklı

etkileri ölçmüşlerdir. Farklı marka ve değişik taşıma kapasitelerindeki yeni ve eski kamyonlardan alınan veriden, ISO 2631-1 standardında öngörülen maruziyet eşiğinin aşıldığı tespit edilmiştir.

Shervin *et al.* (2004), lastik hava basıncının tomruk kesim makinesi operatörü üzerindeki TVT etkisini incelemişlerdir. Titreşim ölçümleri, 138 kPa, 345 kPa ve 414 kPa lastik basıncı ile üç ortogonal eksenden (X, Y ve Z) alınmıştır. 3,2 Hz frekansta operatör koltuğuna etki eden en yüksek titreşim ivmesi, Z ekseninde 0,281 m/s² değerinde iken 4 Hz frekansta operatör kabine etki eden en yüksek ivme ise 0,425 m/s² idi. 414 kPa lastik basıncında operatörün 8 saat üzeri çalışması durumunda potansiyel risk olduğu belirlenmiş, maksimum lastik hava basıncında operatör koltuğundan kaydedilen toplam titreşim değeri ISO 2631-1 standardı uyarınca "oldukça rahatsızlık verici" olarak sınıflandırılmıştır. Kaydedilen TVT değerlerinde lastik hava basıncının düşmesi ile beraber kayda değer azalma meydana geldiği ve bu ilişkinin tekerlekli tomruk işleme makinelerinde operatörlerin maruz kaldığı TVT düzeyini ayarlama kullanılabileceği gösterilmiştir.

Son yıllarda tanımlanan ve doğrudan gürültü ve titreşimle ilişkilendirilmiş olan vibro-akustik hastalık (VAH) dikkate alındığında, helikopter pilotlarının maruz kaldığı titreşim düzeylerinin azaltılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. UH-1H helikopterlerinde normal uçuş koşullarında pilot koltuklarında $a_z = 0,920 \text{ m/s}^2$ ve $a_y = 0,868 \text{ m/s}^2$ kare ortalamalarının karekökü (RMS) değerleri tespit edilmiş olup bu düzeyler oldukça yüksek titreşim düzeylerini ifade etmektedir. Bunun sonucu olarak da pilotlarda, özellikle omurgada, uzun dönemlerde meydana gelen dejeneratif değişikliklerin sebebinin bu titreşimler olduğu kanısına varılmıştır (Sezgin ve Birlik, 2004).

Okunribidoa *et al.* (2006), tüm vücut titreşiminin, duruşun ve elle kullanılan malzemelerin bel ağrısı için birer risk faktörü olarak görelilik etkisini belirlemek amacıyla kesitsel bir çalışma yapmışlardır. İşlerinin bir kısmında araç kullanan 394 ve araç kullanmayan 59 çalışan üzerinde sağlık geçmişlerini, duruş ve elle kullanılan malzemeler hakkında bilgi toplamak üzere yenilenmiş bir anket uygulamışlardır. Anket cevaplarına ve titreşim maruziyeti ölçümlerine dayanarak toplam titreşim dozu, duruş skoru ve elle kullanma skoru gibi kişisel maruziyet değerleri bilgisayarda hesaplanmıştır. Lojistik regresyon modeli ve logli-neer eliminasyon analizi kullanılarak sırt ağrısı

için oranlar elde edilmiştir. Bulgular; duruş, tek başına titreşim veya elle kullanılan malzeme ile titreşimin birleştirilmiş etkisinin, tek başına titreşim, duruş ve elle kullanılan malzeme faktörlerine göre bel ağrısı yaygınlığında daha önemli katkısının olduğunu göstermiştir.

Eger *et al.* (2008a) yükle-taşı-boşalt (YTB) operatörleri üzerinde yaptıkları çalışmada ISO 2631-1 kriterlerine göre öngörülen sağlık risklerine ilave olarak, değerlendirilmemiş ISO 2631-5 kriterlerini de çalışarak iki standartta verilen TVT maruziyet ölçütlerini karşılaştırmıştır. Çalışmanın devamı niteliğinde yaptıkları başka bir çalışmada da (Eger *et al.*, 2008b) aynı çalışma grubu ile bir paket program kullanarak boyun ve eklem dönüşleri üzerindeki baskı ve yükleri ölçmüşler ve YTB operatörlerinin titreşime maruz kaldıkları çalışma şartlarında çalışma duruşlarının, kas-iskelet sistemi yaralanma riskini artırdığını tespit etmişlerdir. Eger (2007) doktora tez çalışmasında 19 YTB operatörünün TVT maruziyetlerini ölçerek, bel bölgesindeki omurga rahatsızlıklarını ISO 2631-1 ile ISO 2631-5 standartları doğrultusunda karşılaştırmıştır. ISO2631-1 standardı doğrultusunda A(8), RMS ve VDV değerleri değerlendirilirken; ISO 2631-5 standardı ile Sed değerleri yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda ISO 2631-1 standardı uyarınca 9 operatör etkilenirken, ISO2631-5 uyarınca 2 operatörde bel bölgesi omurga rahatsızlığı tespit edilmiştir.

Mandal and Srivastava (2010) Hindistan'da bir kömür madeninde damperli kamyon gibi taşıma aracı operatörlerinin tüm vücut titreşimine maruziyet durumunu değerlendirdikleri çalışmada, baskın Z eksen boyunca RMS ivme değeri bakımından titreşim değerlerinin 0,644 m/s² ile 1,82 m/s² arasında değiştiğini bulmuşlardır. Günlük ortalama 5 saatlik maruziyet ile birlikte değerlendirildiğinde, tüm damperli araçların ISO 2631-1:1997 standardında öngörülen yüksek sağlık risklerine neden olduğu ortaya çıkmıştır. 7 t ile 350 t arasında taşıma kapasiteli kamyonların 40 sürücüsü üzerinde 20 kez tekrarlanarak yapılan çalışmada, %85 anlamlılık düzeyi ile bel ağrısı sorunu, %30 omuz ve %37,5 de de boyun ağrısı şikâyeti tespit edilmiştir.

Salmoni *et al.* (2010) 33 skreyper operatörünün TVT maruziyetlerini tam dolu yükle taşıma, serme, boş dönüş, çalışır durumda bekleme ve dolma gibi beş farklı konumda en az üç skreyper döngüsünü içerecek şekilde yirmişer dakikalık devir boyunca üç eksenle ölçümler alarak tespit etmişlerdir. Titreşimin koltuk boyunca en baskın

olduğu Z-ekseni (oturakta yerçekimi eksenini yönünde) boyunca ortalama RMS 1,21 m/s², vektör toplam değerleri 2,08 m/s² idi. Ulaşılan TVT değerleri, skreyper operatörleri için büyük bir sağlık tehlikesinin mevcut olduğunu göstermiştir. Skreyper çalışma döngüsünün zaman bakımından bölünmesi sonucunda %23'lük kısmın taşıma, %20'lik kısmın serme, %22'lik kısmın boş dönüş, %15'lik kısmın bekleme ve %20'lik kısmın doldurma için harcadığı tespit edilmiştir. Taşıma için 2,46 m/s², bekleme için 2,31 m/s², boş dönüşte 0,55 m/s² ve doldurma sırasında 1,46 m/s² RMS vektör toplam ivme değerleri kaydedilmiştir.

Smets *et al.* (2010) 35 ston, 50 ston ve 150 ston kapasiteli ağır iş kamyonu sürücülerinin titreşim maruziyetini ISO 2631-1 ve ISO 2631-5 standartları göre bir saat boyunca operatör koltuğundan değerler kaydederek, ölçmüşlerdir. En yüksek günlük maruziyet eşdeğer ivme değeri Z-ekseninden 0,44 m/s² - 0,82 m/s² aralığında ölçülmüştür. ISO 2631-1 değerine göre sürücüler günlük maruziyet değerinin üzerinde titreşime maruz kalırken, ISO 2631-5 uyarınca sağlık etkisi olasılıklarının düşük olduğu sonucuna vararak, iki standart arasında uyumsuzluk olduğu yorumunu yapmışlardır.

Aye and Heyns (2011) Güney Afrika Cumhuriyeti'nde bulunan açık ocaklarda kullanılan çok sayıda iş makinesi tipi üzerinde yaptıkları çalışmada operatörlerin maruz kaldığı TVT düzeyini belirlemeye yönelik ölçümler yapmışlardır. ISO 2631-1 standardında verilen yöntem takip edilerek, A(8) ve VDV parametreleri kullanılmış ve tüm vücut titreşim değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ölçüm alınan araçların %95 kadarının maruziyet sınır değerlerinin altında titreşim düzeyleri ile ilişkili olduğu bulunmuştur. İş makinelerinin %50 kadarının maruziyet etkin değerlerini aşan titreşime neden olduğu, dolayısıyla titreşim ilintili risklerin değerlendirilmesi ve bunlarla madencilik uygulamalarında mücadele edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, taşıma yollarına düzenli aralıklarla bakım yapılması ve operatörlere araçları daha verimli kullanma eğitiminin verilmesi gibi titreşim azaltıcı önlemler önermişlerdir.

Blood *et al.* (2012) yükleyici operatörlerinin TVT maruziyetlerini normal kauçuk lastik, merdiven-tipi koruma zinciri kaplı lastik ve kova-tipi zincir kaplı lastik olmak üzere üç farklı lastik türü ile farklı zeminler üzerinde ISO 2631-1 standardına uygun şekilde ölçümler alarak belirlemişlerdir.

Alınan veriler, küresel konumlama sistemi (GPS) alıcıları ile de ilişkilendirilmiştir. Zincir kaplı lastik tiplerinden merdiven-tipi zincir, diğerine göre oldukça yüksek TVT maruziyetine yol açmakla birlikte, her iki tip de, kauçuk lastiklere kıyasla kayda değer oranda yüksek TVT maruziyetine yol açmışlardır. İlave olarak, TVT maruziyetlerinde işleme bağımlı farklılıklar da meydana gelmiştir. Sürüş sırasında baskın maruziyet Z-ekseninde meydana gelmiştir. Zeminin kürenmesi sırasında tüm eksenlerde orantılı titreşim maruziyeti kaydedilirken küreme ve boşaltma sırasında en yüksek titreşim maruziyeti X-ekseni boyunca meydana gelmiştir. GPS verisi görevler arasında ciddi hız farklarına işaret etmekle birlikte kova ve merdiven-tipi zincirle kaplı lastikler arasında farklılık göstermemiştir.

Langer *et al.* (2012) altı deneyimli terskepçe operatörü üzerindeki TVT etkilerini çalışmışlardır. Titreşim ölçümleri ile çalışanlar üzerindeki etkileri incelemek yerine farklı bir yöntem denemiş ve her operatörü üç farklı konumda çalıştırarak, oluşan titreşim ve iş makinelerinin yakıt tüketim performansını ölçmüşlerdir. Daha sonra operatörler kısa bir eğitime alınarak ekonomik sürüş ve titreşimi önleme konusunda eğitilerek tekrar aynı sürüş yöntemlerinde ikincil ölçümler alınmıştır. Kısa eğitim sonucu TVT değerinde ortalama %22,5 azalma olduğu ve tamamlanan tüm iş görevlerinde %38'e kadar yakıt tasarrufuna ulaşıldığı bildirilmiştir. Bu çalışmanın bulguları yapı sektörü için büyük önem taşımaktadır. Zararlı titreşim azaltılmakta ve aynı zamanda yakıt tüketiminde büyük bir potansiyel indirime erişilebilmektedir.

Yerüstü madencilik faaliyetlerinde kullanılan ağır iş makinelerinin operatörlerinin etkilendiği el-kol ve tüm vücut titreşimi, iş sağlığı ve güvenliği açısından önemli bir konudur. 1 Hz ve 20 Hz arasındaki frekanslar özellikle vücutta sırt ağrısı, omurga dejenerasyonu, mide sorunları, baş ağrısı, uyku sorunları gibi hasarlara sebep olabilmektedir (Thalheimer, 1996; Eger, 2007; Eger *et al.* 2008a, 2008b). Günlük rutin çalışma koşullarında maden ocaklarında çalışan işçiler mekanik titreşime maruz kalmakta, sağlıkları olumsuz etkilenmekte, bu rahatsızlıklarını da çalışma performanslarına yansıtarak verim düşüklüğü ve iş kazalarına sebep olabilmektedirler. Avustralya, Kanada, Güney Afrika Cumhuriyeti gibi endüstrileşmiş ülkelerde sanayiden sayılan iş kolları ile pek çok maden ocağında kullanılan çok çeşitli türdeki ağır iş makinesi operatörlerinin TVT ma-

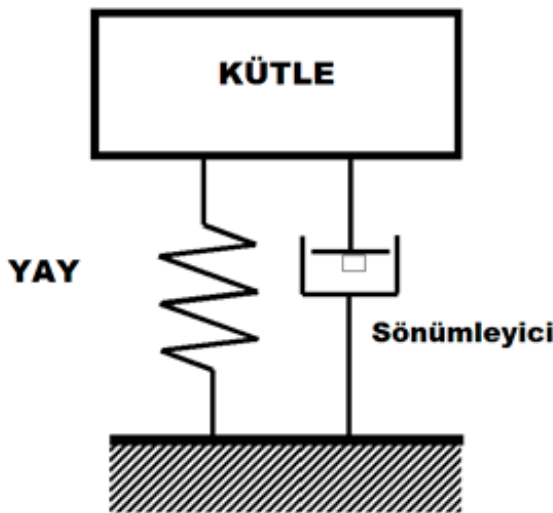
ruziyeti dökümü, yukarıda özetlenen çalışmalar ile kapsamlı olarak çıkarılmıştır. Ancak Ülkemizdeki maden ocaklarında bu konuda henüz bir araştırma yapılmamış olup çalışan işçilerin ve özellikle ağır iş makinesi operatörlerinin ne gibi titreşim etkilerine maruz kaldıkları bilinmemektedir.

2. TÜM VÜCUT TİTREŞİMİ

2.1. Titreşim

Titreşim, ses dalgaları gibi belirli aralıklarla tekrarlayan mekanik bir enerjidir. Genellikle katı ortamlarda yayılan ve dokunma duygusu ile hissedilen alçak frekanslı ve yüksek genlikli mekanik salınımlar olarak da tanımlanabilir. Bir başka ifade ile potansiyel enerjinin kinetik enerjiye, kinetik enerjinin potansiyel enerjiye dönüşmesi olayına titreşim (vibrasyon) denir (Anon(a), Anon(b)). Bir kütlenin belirli bir merkez etrafında çevrimsel hareketi olarak da ifade edilebilen titreşim, bir kütlenin elastik bir eleman üzerinde salınım hareketi yapmasıyla oluşur (Çay, 2006). Kütle ve elastik elemandan oluşan bu sistem, titreşim sistemi olarak adlandırılır.

Şekil 1'de görülen basit titreşim sisteminde kütle kinetik enerjiyi, yay ise potansiyel enerjiyi depo eder. Titreşim, potansiyel enerji ve kinetik enerji arasında enerji dönüşümü ile oluşur. Salınım sırasında sistemden enerji alarak, hareketi yavaşlatan ve sonunda durduran elemana sönümleyici denir (Anon(a)).



Şekil 1. Titreşim Sistemi (Çay, 2006)

2.2. Tüm Vücut Titreşimi: Tanımı ve Etkileri

İnsan vücudu mekanik bir sistem olarak ele alındığında, düşük frekanslarda ve düşük titreşim seviyelerinde, Şekil 2'de görüldüğü gibi bir doğrusal parametreler sistemi olarak düşünülebilir (Rasmussen, 1983; Sağlam, 2011). İnsan vücudunun mekanik modellenmesi, oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan insan vücudunun kütle, yay ve sönüm elemanlarından oluştuğunu kabul ederek daha basit bir model haline getirmektedir. Şekil 2'de bulunan Hz biriminden frekans değerleri, farklı vücut kısımlarının tınlama (rezonans) frekanslarını göstermektedir. Tınlama frekansının anlamı, o kısmın salınım hareketi yaptığı frekans değeridir. Mekanik modellemeye göre, titreşim ve şokların etkisi bakımından vücudun en önemli kısımlarından birisi göğüs-karın sistemidir. Farklı titreşim işaretlerinin vücut üzerine etkisini tahmin etmek için, titreşimin vücuda giriş noktasından herhangi bir vücut bölümüne geçiriminin bilinmesi gerekir.

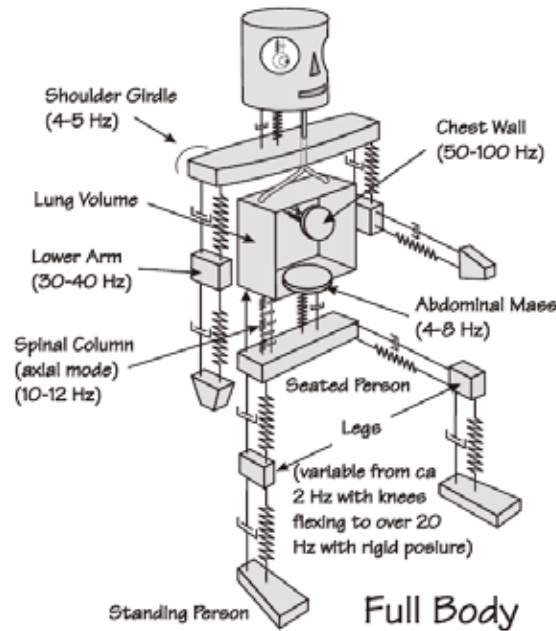
Titreşimin insan üzerindeki etkileri uzun yıllardır bilinmekte ve tedavi amacıyla kullanılmaktadır. Geçmişte böbrek taşlarının dökülmesi gibi sağlığa faydalı işlerde bozuk yolda araba kullanılması gibi seyahat tedavilerinin uygulandığı bilinmektedir. Ayrıca spastik ve paretik kasların tedavisi gibi daha birçok olumlu etkisi yanında akciğer hastalarında titreşimin ciğerleri temizleyici özelliği, sporcularda hareket kabiliyetlerini ve kas faaliyetlerini artırıcı etkisi, reumatoid arthritisi hastalığında, bacak ağrılarının tedavisinde, kemik erimesi görülen hastalarda tedavi edici olarak kullanıldığı da bilinmektedir (Şahin ve Işık, 2007).

İnsan, titreşimin düşük frekanslarında sarsıntı hissetmekte, yüksek frekanslarında ise karıncalanma hatta yanma hissi duymaktadır. Dikkat edilmemesi durumunda biyolojik yapılarda; kas, sinir sistemi bozuklukları, kan damarları ve eklemlerde tahribatlar ve ayrıca kardiyovasküler, solunum, sinir ve metabolik sistemlerde rahatsızlıklar gibi olumsuz etkiler göstermektedir. Bunlar arasında insan vücudunda yorgunluk, dikkat ve refleks azalması, görme bozuklukları, bel ağrısı, omurgadaki olumsuz etkiler, sindirim ve üreme sistemi bozuklukları gibi rahatsızlıklar sayılabilir. İşsever (1999), Sezgin ve Birlik (2004) ile Şahin ve Işık (2007) titreşimin, fiziksel ve mekanik etkileri nedeniyle iş sağlığı ve iş güvenliğini etkilediğini bildirmiştir. Titreşim sebebiyle meydana gelen rahatsızlıklara kas-iskelet sistemi (muskülokeletal) rahatsızlıkları denilmektedir. Kas-iskelet

sistemi rahatsızlıkları, endüstrileşmiş ülkelerin birçoğunda görülen bir rahatsızlık tipidir (Rehn, 2004; İşsever, 1999). 2000'li yıllarda Avrupa'nın toplam çalışan nüfusunun %30'undan fazlasına tekabül edecek şekilde kırk milyonun üzerinde çalışan, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarından etkilenmiştir (Şahin ve Işık, 2007).

Tüm vücut titreşiminin etkisi, 0,5 Hz – 100 Hz aralığının sonlarında daha büyüktür. İnsanın titreşime verdiği tepki, titreşimin frekansı ile değiştiği için ölçülen titreşimin meydana geldiği frekanslara göre ağırlıklandırılması gerekir. Böylece titreşimin frekansa bağlı olarak neden olduğu olumsuz sağlık koşulları yansıtılabilir (Ver and Beranek, 2006; Sağlam, 2011).

Tüm vücut titreşimi ile ilgili literatür incelendiğinde, titreşim ölçümlerinde standartlarda yer alan farklı ölçüm yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. ISO 2631-1 ve ISO 2631-5 uluslararası standartları, tüm vücut titreşimini incelemekte ve konfor ile sağlık açısından titreşimin önemini ortaya koymayı amaçlamaktadır (ISO, 1997, 2004). Ülkemizde kullanılan TS ISO 2631-1 (2013) standardı, ISO 2631-1 standardından faydalanılarak hazırlanmıştır.



Şekil 2. İnsan Vücudu Titreşim Frekansları (Brauch, 2009)

2.3. Tüm Vücut Titreşimi: Ölçümü ve Değerlendirilmesi

2.3.1. Tanımlar ve ölçüm yöntemi

“Avrupa Fiziksel Ajanlar (Titreşim) Direktifi” (EU PA(V)D – EEC:2002) 2002 yılında Avrupa Birliği Konseyi tarafından işçi sağlığı ve güvenliğinde gelişmiş seviyede koruma sağlamak için özellikle çalışma ortamında gelişmeleri teşvik etmek amacıyla yayımlanmıştır. PA (V) Direktifi'nin gerekçesi “Özellikle kas/kemik yapısı, nörolojik ve damar hastalıklarına neden olabildiği için, işçilerin sağlık ve güvenliği üzerindeki etkileri nedeniyle, çalışanları titreşimden kaynaklanan risklerden korumak için önlemler geliştirmek”tir. PA (V) direktifinde bu hedef, çalışanları titreşim maruziyeti sonucu ortaya çıkan risklerden koruyarak başarmak olarak belirlenmiştir.

Ülkemizde ise Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, Madde 4'e göre:

- Bütün vücut titreşimi: Vücudun tümüne aktarıldığında, çalışanın sağlık ve güvenliği için risk oluşturan, özellikle de bel bölgesinde rahatsızlık ve omurgada travmaya yol açan mekanik titreşimi,
- Maruziyet eylem değeri: Aşıldığı durumda, çalışanın titreşime maruziyetinden kaynaklanabilecek risklerin kontrol altına alınmasını gerektiren değeri,
- Maruziyet sınır değeri: Çalışanların bu değer üzerinde bir titreşime kesinlikle maruz kalmaması gereken değeri ifade etmektedir.

Madde 5: Bütün vücut titreşimi için;

- Sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet sınır değeri: 1,15 m/s².
- Sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet etkin değeri: 0,5 m/s² olarak verilmiştir.

Yine, aynı Yönetmeliğin EK 2: Maruziyet değerlendirilmesi'ne göre;

Bütün vücut titreşiminde maruziyet düzeyinin değerlendirilmesi, günlük maruziyet değerinin hesaplanmasına dayalı olarak sekiz saatlik dönemde A(8) sürekli ivme eşdeğeri cinsinden tanımlanan en yüksek (RMS) değeri olarak hesaplanan, TS EN 1032+A1:2011 “Mekanik Titreşim – Titreşim Emisyon Değerinin Belirlenmesi Amacıyla Hareketli Makinelerin Deneye Tabi Tutulması” ile

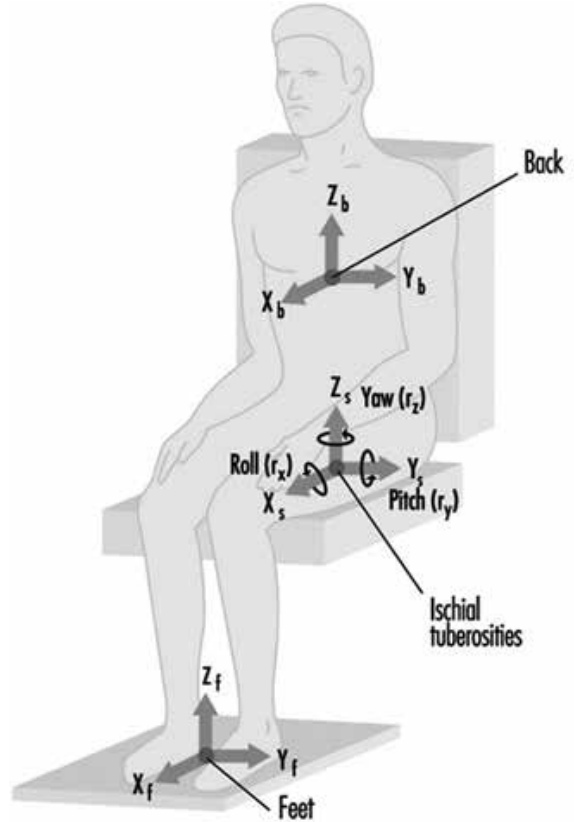
TS ISO 2631-1 “Mekanik Titreşim ve Şok-Tüm Vücut Titreşime Maruz Kalma Değerlendirilmesi – Bölüm 1: Genel Kurallar” standartlarına ve bu standartların en güncel hallerine göre yapılır.

Titreşim riskinin tahmin edilmesi ve değerlendirilmesi etkin değer ve sınır değer ile karşılaştırma yapılarak gerçekleştirilir. Buna göre;

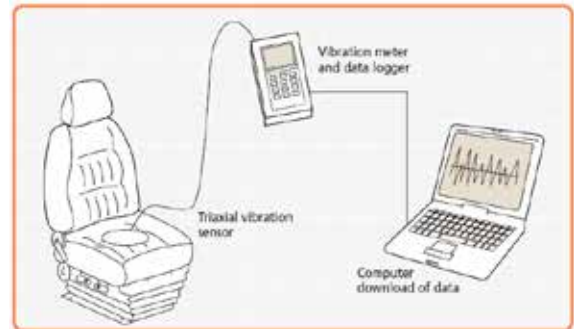
- Etkin değer altında hassas bünyeler hariç risk yoktur. Çalışana aktarılan titreşim tolere edilir.
- Etkin değer ile sınır değer arasındaki bölgede risk vardır. Tolere edilemeyeceğine maruz kalınan süreye göre karar verilir. Etkin değer ile sınır değer arasındaki bölgede riskin kaynağında yok edilmesi için çalışmalar yapmak, sağlık taraması yapmak gerekmektedir.
- Sınır değer üzerinde maruz kalınan titreşim tolere edilememektedir. Sınır değer üzerinde, titreşim değerinin sınır değer altına indirilmesi için acil bir şekilde önlem alınmalıdır. Değer, sınır değer altına indirilemiyorsa çalışma saatlerini düzenleyerek çalışanın 8 saatlik maruziyet değeri azaltılmalıdır.

Sürücü ya da operatörün maruz kaldığı tüm vücut titreşimi (TVT) ivmeleri operatör koltuğu yüzeyinde ve zeminde, oturak ayak dikmesi yakınlıklarında uygun bir noktada ölçülmelidir. Ölçümler TS EN 1032 + A1 “Mekanik titreşim - titreşim emisyon değerinin belirlenmesi amacıyla hareketli makinaların deneye tâbi tutulması” ve bu standartta atfedilen TS ISO 2631-1 standardına uygun şekilde karşılıklı dik eksenlerde (X – ileri ve geri, Y – her iki yana, Z – yukarı ve aşağı) yapılmalıdır (Şekil 3). ISO 2631-1 ve ISO 2631-5 uluslararası standartları tüm vücut titreşimini incelemekte ve konfor ile sağlık açısından titreşimin önemini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Operatörlerin tüm vücut titreşimi maruziyetini tespit edebilmek amacıyla koltuk yüzeyinde üç (X_{seat} , Y_{seat} , Z_{seat}) ve kabin zemininde de üç (X_{floor} , Y_{floor} , Z_{floor}) kanal olmak üzere toplam altı kanaldan örnekleme yapılmalıdır (Şekil 4). Aslen koltuk yüzeyinde yapılan TVT ölçümleri yeterli olsa da, kabin zemininden yapılan örnekleme ile operatör koltuğunun titreşim sönümlenme kapasitesi değerlendirilebilmektedir.



Şekil 3. İnsan Vücudunun Basicentric Eksenleri (Anon(c))



Şekil 4. Operatör Koltuk Yüzeyindeki İvmeölçer ile X, Y ve Z Eksenleri Üzerinden Yapılan TVT Ölçümü (McPhee et al, 2009)

2.3.2. Ölçülen büyüklükler

- Tüm vücut titreşimi analizi için operatör koltuğu yüzeyi ve kabin zeminini için ayrı ayrı olmak üzere aşağıdaki büyüklükler ölçülmelidir:
- Frekans ağırlıklı $a_{wx}(t)$, $a_{wy}(t)$ ve $a_{wz}(t)$ titreşim ivme sinyalleri (m/s^2). X (arkadan öne) ve Y (sağdan sola) yönlerinde W_d tüm vücut frekans ağırlıklandırma eğrisi, Z (kalçadan

kafaya) yönünde W_k tüm vücut frekans ağırlıklandırma eğrisi kullanılmıştır.

- c. Tepe titreşim ivmesi (PEAK) (m/s^2)
 - d. Tepe-tepe titreşim ivmesi (P-P) (m/s^2)
 - e. Titreşim dozu değeri (VDV) ($m/s^{1.75}$)
- Maksimum geçici titreşim değeri (MTVV) (m/s^2)

2.3.3. Hesaplanan Büyüklükler

- a. Frekans ağırlıklı ivme sinyallerinin karelerinin ortalamasının karekökü (RMS) değeri (m/s^2)
- b. Tepe faktörü (CRF)
- c. Koltuk etkinliği genlik geçirgenliği ($SEAT_{R_{MS-X}}$) faktörü
- d. Koltuk etkinliği genlik geçirgenliği ($SEAT_{R_{MS-Y}}$) faktörü
- e. Koltuk etkinliği genlik geçirgenliği ($SEAT_{R_{MS-Z}}$) faktörü
- f. Koltuk etkinliği genlik geçirgenliği ($SEAT_{VDV-X}$) faktörü
- g. Koltuk etkinliği genlik geçirgenliği ($SEAT_{VDV-Y}$) faktörü
- h. Koltuk etkinliği genlik geçirgenliği ($SEAT_{VDV-Z}$) faktörü
- i. En yüksek titreşim ivmesi vektörü; operatör koltuğu yüzeyindeki ağırlıklandırılmış titreşim ivmesi vektör değeri ($VECTOR_{1-3}$) (m/s^2)
- j. En yüksek titreşim ivmesi vektörü; kabin zeminindeki ağırlıklandırılmış titreşim ivmesi vektör değeri ($VECTOR_{4-6}$) (m/s^2)
- k. En yüksek titreşim ivmesi fonksiyonu; operatör koltuğu yüzeyindeki ağırlıklandırılmış en büyük titreşim ivmesi değeri (RMS_{WB}) (m/s^2). X ve Y eksenleri için $k = 1,4$ ve Z eksenini için $k = 1,0$ çarpanı kullanılmaktadır.
- l. Operatör koltuğu yüzeyindeki ağırlıklandırılmış en büyük titreşim ivmesi değeri yönü (X için Ch1, Y için Ch2 ve Z için Ch3)
- m. En yüksek titreşim dozu fonksiyonu; operatör koltuğu yüzeyindeki ağırlıklandırılmış en büyük titreşim dozu değeri (VDV_{WB}) ($m/s^{1.75}$) X ve Y eksenleri için $k = 1,4$ ve Z eksenini için $k = 1,0$ çarpanı kullanılmaktadır.
- n. Operatör koltuğu yüzeyindeki ağırlıklandırılmış en büyük titreşim dozu değeri yönü (X için Ch1, Y için Ch2 ve Z için Ch3)

- o. Geçerli doz fonksiyonu; titreşim dozunun, operatör koltuğu yüzeyindeki ağırlıklandırılmış titreşim dozu değerleri kullanılarak hesaplanan bir ölçüsü (CDose) ($m/s^{1.75}$)
- p. Günlük doz fonksiyonu; titreşim dozunun, 8 saatlik bir süreye atfen, belirli bir maruziyet süresi için hesaplanan bir ölçüsü (DDose) ($m/s^{1.75}$)
- q. Geçerli maruziyet fonksiyonu; titreşim ivmesinin, seçilen bir süreye atfen hesaplanan bir ölçüsü (CExp) (m/s^2)
- r. Günlük maruziyet fonksiyonu; belirli bir maruziyet süresinde oluşan titreşim dozunun, seçili bir süreye atfen hesaplanması ile bulunan bir ölçü (A8) (m/s^2)
- s. Titreşim dozu değerinin kestirim fonksiyonu; VDV ölçülmediği zaman RMS değeri kullanılarak hesaplanan tahmini titreşim dozu değeri (eVDV) ($m/s^{1.75}$)
- t. Maruziyet etkin değerine erişim süresi fonksiyonu (RMS); 8 saatlik referans maruziyet süresi dikkate alındığında $0,5 m/s^2$ 'lik maruziyet etkin değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresi ($EAV_{TT(RMS)}$) (ss:dd:nn)
- u. Maruziyet etkin değerine erişim için kalan süre fonksiyonu (RMS); 8 saatlik referans maruziyet süresi dikkate alındığında $0,5 m/s^2$ 'lik maruziyet etkin değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresinden ölçüm süresinin çıkarılmasından sonra kalan süre ($EAV_{TL(RMS)}$) (ss:dd:nn)
- v. Maruziyet sınır değerine erişim süresi fonksiyonu (RMS); 8 saatlik referans maruziyet süresi dikkate alındığında $1,15 m/s^2$ 'lik maruziyet sınır değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresi ($ELV_{TT(RMS)}$) (ss:dd:nn)
- w. Maruziyet sınır değerine erişim için kalan süre fonksiyonu (RMS); 8 saatlik referans maruziyet süresi dikkate alındığında $1,15 m/s^2$ 'lik maruziyet sınır değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresinden ölçüm süresinin çıkarılmasından sonra kalan süre ($ELV_{TL(RMS)}$) (ss:dd:nn)
- x. Maruziyet etkin değerine erişim süresi fonksiyonu (VDV); $9,1 m/s^{1.75}$ 'lik maruziyet etkin değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresi ($EAV_{TT(VDV)}$) (ss:dd:nn)
- y. Maruziyet etkin değerine erişim için kalan süre fonksiyonu (VDV); $9,1 m/s^{1.75}$ 'lik maruziyet etkin değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresinden ölçüm süresinin çıkarılmasından sonra kalan süre ($ELV_{TL(VDV)}$) (ss:dd:nn)

ziyet etkin değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresinden ölçüm süresinin çıkarılmasından sonra kalan süre ($EAV_{T_{L(VDV)}}$) (ss:dd:nn)

- z. Maruziyet sınır değerine erişim süresi fonksiyonu (VDV); $21,0 \text{ m/s}^{1,75}$ 'lik maruziyet sınır değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresi ($ELV_{TT(VDV)}$) (ss:dd:nn)
- aa. Maruziyet sınır değerine erişim için kalan süre fonksiyonu (VDV); $21,0 \text{ m/s}^{1,75}$ 'lik maruziyet sınır değerine erişim için gerekli toplam maruziyet süresinden ölçüm süresinin çıkarılmasından sonra kalan süre ($ELV_{TL(VDV)}$) (ss:dd:nn)

3. TÜM VÜCUT TİTREŞİMİ ENVANTERİ ÇALIŞMASI

ÇSGB'na bağlı İSGÜM (Merkez ve Bölgeler) tüm vücut titreşimi maruziyeti ölçümleri yapmaktadır (Sağlam, 2011). Ancak maden işletmelerinde çalışan ve tüm vücut titreşimine maruz kalan personel üzerinde sistematik bir çalışma yapılmamış olması kaydedilmiştir.

Bu çalışmada Sivas ili merkez ilçesi ve diğer ilçelerinde faaliyet gösteren kömür, demir, kil açık maden ocakları, taş ocakları, yol şantiyesi, asfalt döküm işleri vb. faaliyetlerde kullanılan değişik tip, marka ve modelde toplam 147 iş makinesinden tüm vücut titreşimi maruziyeti ölçümleri TS ISO 2631-1 standardında belirtilen esaslara uygun olarak yapılmış ve analiz edilmiştir. Örnek bir operatör TVT maruziyeti değerlendirme çizelgesi Şekil 5'de verilmiştir. Bu ekipmanlar arasından madenlerde yoğun olarak kullanılan 130 adedi Şekil 6'da, operatörlerin ortalama tüm vücut titreşimi ivmesi değerleri (A(8)) ve standart sapması Çizelge 1'de sunulmuştur.

Ölçümler bir adet titreşim analizörü, birer adet koltuk tipi ve zemin tipi ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizör ISO 8041:2005, ISO 2631-1, ISO 2631-2, ISO 2631-5 ve ISO 5349 standartlarında öngörülen gereklilikleri karşılamakta ve tüm vücut titreşimi için W_d , W_k , W_m , W_b (ISO 2631 gereği) ve el-kol titreşimi için W_h (ISO 5349) filtrelerini kanallar bazında ayarlamaktadır. Koltuk tipi ivmeölçer eşzamanlı olarak üç eksenli (X, Y ve Z) veri kaydedebilmekte, $0,01 \text{ m/s}^2 - 50 \text{ m/s}^2$ arası ivmeleri ölçebilmekte ve $0,1 \text{ Hz}$ ile 125 Hz arasındaki frekans değerlerini ayıklayabilmektedir. Ölçümlerde kullanılan zemin tipi ivmeölçer, koltuk etkinliği genlik geçirgenliği (SEAT) oranını belirlemek için ISO 2631-

1 standardına uygun şekilde ölçüm almak amacıyla operatör kabini zemininde, koltuk ayağının zemine birleştiği yere çok yakın ve uygun olan bir noktaya yerleştirilerek X, Y ve Z eksenlerinde ölçüm alınmaktadır. En yüksek 160 m/s^2 PEAK ivmeyi ölçebilmekte ve $0 \text{ Hz} - 500 \text{ Hz}$ arasındaki frekans değerlerini de ayıklayabilmektedir.

Ölçülen titreşim değerleri, önerilen maruziyet sürelerini belirlemek amacıyla 1997 ISO 2631-1 Sağlık Rehberlik Dikkat Bölgeleri (HGCZ) ile karşılaştırılmıştır. ISO 2631-1 (1997) standardı, HGCZ karşılaştırması yaparken, kaydedilen en yüksek ivme sinyalinin en düşük ivme sinyaline bölümünden elde edilen tepe faktörü (CRF) değerinin dokuz ve altında ($CRF \leq 9$) olduğu durumlarda frekans ağırlıklı RMS ivme değerlerinin (Şekil 7 kırmızı bölge), daha yüksek oranlarda ($CRF > 9$) ise titreşim dozu değerinin (VDV) (Şekil 7 yeşil bölge) kullanılmasını önermekte ise ilgili Yönetmelikte yalnızca frekans ağırlıklı RMS ivme değerine atıf yapıldığı için HGCZ karşılaştırmaları A(8) değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. TVT Ölçüm Sonuçları.

İş makinesi	Adet	A(8) (m/s^2)
Traktör tipi terskepçe ekskavatör	5	1,084 (0,505)
Lastik tekerlekli yükleyici	22	0,923 (0,230)
Paletli dozer	7	0,918 (0,165)
Lastik tekerlekli dozer	1	0,847 (-)
Lastik tekerlekli greyder	7	0,796 (0,260)
Silindir	8	0,780 (0,595)
Hidrolik kırıcı	5	0,654 (0,324)
Ocak tipi kamyon	8	0,644 (0,208)
Damperli piyasa kamyonu	21	0,618 (0,211)
Çatallı kaldıraç (forklift)	13	0,530 (0,172)
Paletli hidrolik terskepçe ekskavatör	22	0,530 (0,157)
Lastik tekerlekli malzeme elleçleyici	1	0,516 (-)
Delici	4	0,243 (0,140)
Halatlı ekskavatör	5	0,196 (0,056)
Çekmekepçe (dragline)	1	0,162 (-)

Ölçüm tarihi	08.11.2014						
Ölçüme başlama (ss:dd:nn)	13:54:24						
Ölçüm süresi (ss:dd:nn)	00:07:46						
Makine	Paletli hidrolik terskepçe ekskavatör						
Marka/Model	HITACHI ZAXIS 670LCH (Kapı no: 34)						
Yapılan iş	Üst kömür damarında kömür yükleme						
Saha	Kömür ocağı üst kömür damarı						



1. Koltuk ve zeminde ölçülen ağırlıklanmış tüm vücut titreşimi ivme (a_w) ve doz değerleri

Channel	Axis	PEAK m/s ²	P-P m/s ²	RMS m/s ²	VDV m/s ^{1.75}	MTVV m/s ²	CRF
Ch1	X _{seat}	3.195	6.012	0.295	2.921	1.282	10.814
Ch2	Y _{seat}	2.486	4.955	0.215	2.089	0.973	11.548
Ch3	Z _{seat}	8.026	12.218	0.317	3.728	1.299	25.322
Ch4	X _{floor}	2.897	5.534	0.280	2.673	1.198	10.363
Ch5	Y _{floor}	2.443	4.667	0.164	1.704	0.896	14.911
Ch6	Z _{floor}	8.551	16.088	0.357	4.472	1.501	23.961

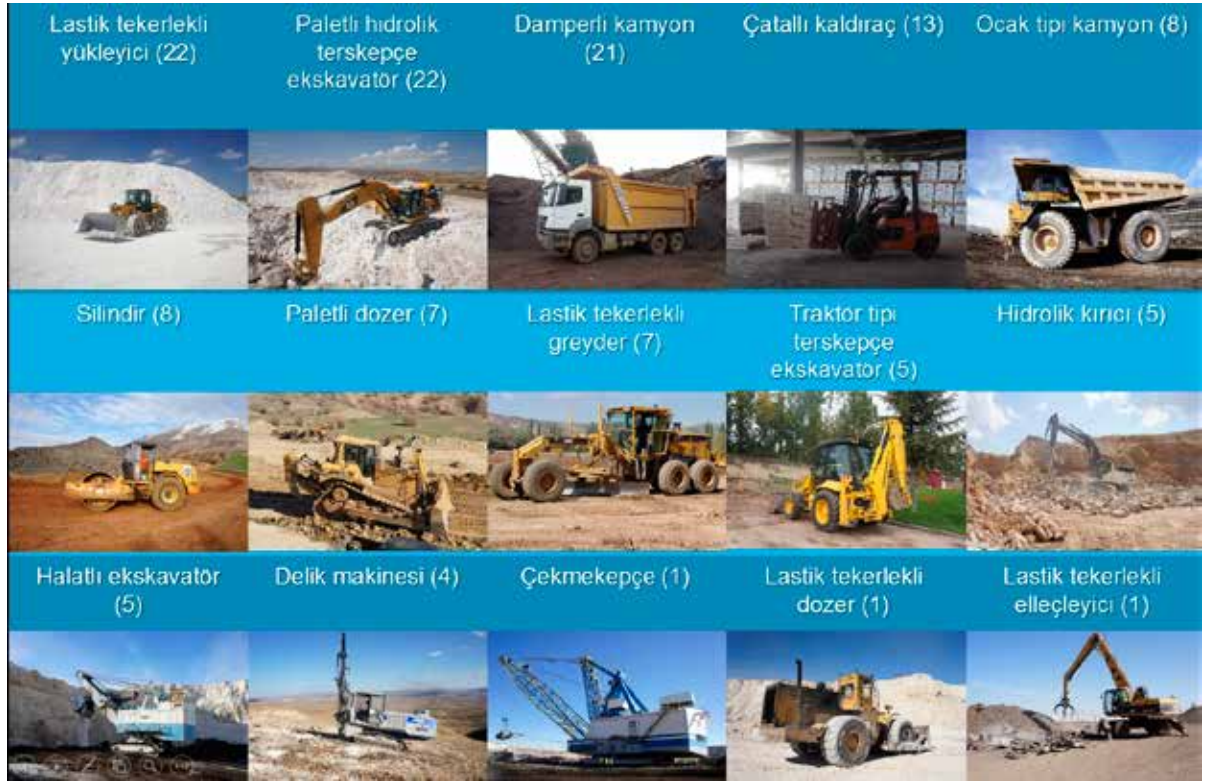
2. Tüm vücut titreşimi ivmesi ve dozu için koltuk etkin genlik iletkenliği katsayıları (SEAT)

SEAT _{RMS-X} (Ch1/Ch4)	1.057	SEAT _{VDV-X} (Ch1/Ch4)	1.093
SEAT _{RMS-Y} (Ch2/Ch5)	1.314	SEAT _{VDV-Y} (Ch2/Ch5)	1.226
SEAT _{RMS-Z} (Ch3/Ch6)	0.888	SEAT _{VDV-Z} (Ch3/Ch6)	0.834

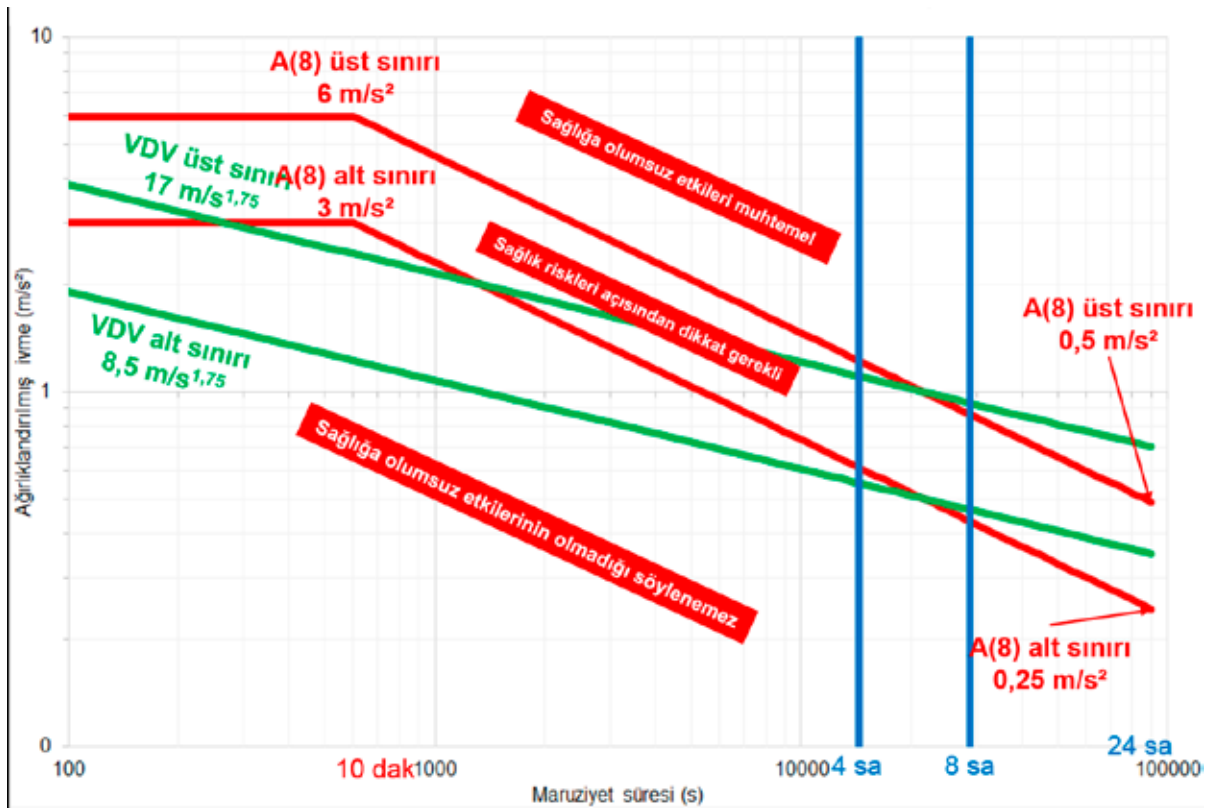
3. Tüm vücut titreşimi ivmesi için vektör değerleri

VECTOR ₁₋₃ (m/s ²)	0.602	EAV _{TT(RMS)} (ss:dd:nn)	11:41:20
VECTOR ₄₋₆ (m/s ²)	0.577	EAV _{TL(RMS)} (ss:dd:nn)	11:33:34
RMS _{WB} (m/s ²)	0.414 Ch1	ELV _{TT(RMS)} (ss:dd:nn)	61:50:03
VDV _{WB} (m/s ^{1.75})	4.089 Ch1	ELV _{TL(RMS)} (ss:dd:nn)	61:42:17
CDose (m/s ^{1.75})	4.089	EAV _{TT(VDV)} (ss:dd:nn)	3:10:26
DDose (m/s ^{1.75})	11.466	EAV _{TL(VDV)} (ss:dd:nn)	3:02:40
CExp (m/s ²)	0.053	ELV _{TT(VDV)} (ss:dd:nn)	90:00:59
A(8) (m/s ²)	0.414	ELV _{TL(VDV)} (ss:dd:nn)	89:53:13

Şekil 5. Operatör TVT Maruziyeti Değerlendirme Çizelgesi



Şekil 6. Madenlerde TVT Ölçümü Yapılan Ekipman Tıp ve Adetleri



Şekil 7. ISO 2631-1 (1997) Sağlık Rehberlik Dikkat Bölgesi Sınırları ve Sağlığa Olası Etki Bölgeleri

ISO 2631-1'e göre, 8 saatlik maruziyet süresi için HGZ alt (dikkat) ve üst (risk) sınırlarına karşılık gelen frekans ağırlıklı ivme değerleri, sırasıyla 0,45 m/s² ve 0,90 m/s²'dir. Diğer yandan Avrupa Birliği (AB) Direktifi 2002/44/EC'ye göre A(8) günlük maruziyet eylem değeri ve günlük maruziyet sınır değeri, sırasıyla 0,5 m/s² ve 1,15 m/s²'dir. Buradan, ISO 2631-1 standardının AB direktifine göre daha sıkı emniyet sınırları belirlendiği görülebilir.

Çalışmada incelenen tüm iş makinelerine ait ortalama titreşim ivmesi değerleri, ISO 2631-1 standardı ve AB 2002/44/EC direktifinde öngörülen dikkat ve risk eşikleri bazında Şekil 8'de sıralanmıştır. Türkiye'de kabul edilen eşik değerler dikkate alındığında, ortalamalar üzerinden, tüm iş makinesi operatörlerinin sınır değeri olan 1,15 m/s²'nin altında tüm vücut titreşimine maruz kaldığı görülmektedir. Deliciler, halatlı ekskavatörler ve çekmekepçe, maruziyet eylem değeri olan 0,50 m/s² değerinin altında titreşim ivmesi verdiğinden, hassas bünyeler hariç riskin olmayacağı ve operatöre aktarılan titreşimin tolere edileceği öngörülmüştür. Diğer yandan traktör tipi terskepçe ekskavatörler, lastik tekerlekli yükleyiciler, paletli dozerler, lastik tekerlekli dozer, lastik tekerlekli greyderler, silindirler, hidrolik kırıcılar, ocak tipi kamyonlar, damperli piyasa kamyonları, çatallı kaldıraçlar, paletli hidrolik terskepçe ekskavatörler ve lastik tekerlekli malzeme elleçleyici maruziyet eylem değeri ile sınır değer arasındaki bölgede titreşim vermişlerdir. Bu aralıkta riskin olduğu kabul edilmiştir. Bu bölgede riskin kaynağında yok edilmesi için çalışmalar yapmak ve titreşime maruz kalan personele sağlık taraması gerçekleştirmek gerekmektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgular değerlendirildiğinde aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmaktadır:

- Yeni iş makineleri, eskilere kıyasla daha düşük TVT maruziyeti vermektedir. Bunun temel nedeni, ekipman üreticilerinin teknolojik gelişmeleri benimsemesi ve makinelere uygulamasıdır. Bunlar arasında operatör kabinlerinin makine gövdesinden bağımsız süspansiyonlara sahip olarak imal edilmesi en büyük etken olarak görülmektedir.
- Kabin zemininde ölçülen TVT ivme değerleri, koltukta ölçülen TVT ivmelerinden yüksektir. Bu durum özellikle düşey yönlü TVT ivmeleri için geçerlidir. Buradan, yukarıdaki maddede belirtildiği üzere, koltuk süspansiyon sistemlerinin TVT ivmesini sönmüleyecek şekilde

tasarımlandığı sonucuna varılmaktadır.

- Düşey yönlü TVT ivmeleri (Z), ileri-geri (X) ve yandan-yana (Y) yönlü ivmelere göre daha büyüktür. Operatör/sürücü üzerinde yerçekimi ivmesinin etkisi ile katlanabilen etki yapmakta olduğundan, birçok çalışmada yalnızca düşey yönlü TVT ivmeleri üzerinden maruziyet değerlendirmesi yapılmaktadır.
- Operatör/sürücünün TVT ivmesi maruziyeti kullandığı aracın kütlesi ile ters orantılıdır. Araç hafifledikçe TVT ivme değeri artmakta, ağırlaştıkça, azalmaktadır. Bu nedenle özellikle taşımada kullanılan lastik tekerlekli araçların boş seyahatlerinde, üretici tarafından önerilen hız sınırlarını aşmamaları gerekmektedir.
- İş makinesinin süratli kullanımı operatör/sürücünün TVT maruziyetini artırmaktadır.
- Lastik tekerlekli iş makineleri paletli olanlara göre daha düşük TVT ivmesi vermektedir. Özellikle ripperli dozerler, hem zemin üzerinde yürüme gücünün hem de operatörün geriye doğru anormal şekilde dönerek ripperleme işlemini sürdürmesinden ötürü operatörün kas-iskelet sistemi üzerine önemli ölçüde baskı uygulamaktadır.
- Operatör/sürücü yetkinliği, iş makinesi kaynaklı TVT ivmesini etkilemektedir. Aynı koşullar altında, tecrübeli operatörler daha düşük TVT ivmesine maruz kalmaktadır. Bu nedenle operatör/sürücüler düzenli aralıklarla uzman eğitimciler tarafından araç kullanma eğitimlerine alınmalıdır.
- Zemin koşulları ve taşıma yolu düzgünlüğü TVT maruziyetini etkilemektedir. Düzgün, bakımlı ve çukur/patar bulunmayan yollar daha düşük TVT maruziyeti vermektedir.
- Lastik tekerlekli iş makinelerinin lastik havaları, aracın emniyetli çalışma sınırları gözetilerek, düzenli olarak kontrol edilmelidir. Aşırı şişirilmiş lastikler yüksek TVT ivmesine yol açmaktadır.



Şekil 8. Tüm Vücut Titreşimi İvmesi Değerlerinin (A(8)) ISO 2631-1 ve Avrupa Birliği Direktifi Maruziyet Eşikleri ile Karşılaştırılması

Sonuç ve Öneriler

Madenlerde kullanılan iş makinelerinden kaynaklanan tüm vücut titreşimi, operatör/sürücülerin sağlığını etkileyebilmektedir. Bu araçların mümkün olan en yüksek verim/performans ve en düşük maliyet ile kullanılabilmesi için pek çok çalışma sürdürülmektedir. Sürücü/operatörün titreşim maruziyetini en aza indirmek ve çalışma verimini artırmak amacıyla operatörlere doğru araç kullanma eğitimi verilmeli, uygun taşıma yolu tasarımı ile yol kaynaklı titreşim minimize edilmeli, periyodik bakımlar ile iş makinelerinden kaynaklanan titreşim azaltılmalı, ocak içi çalışma zeminleri ile yollarda yapılacak bakım ile zemin düzenlenmeli ve lastikli araçlarda hava basıncı düzenli olarak kontrol edilmelidir. Dozerler hariçindeki paletli iş makineleri genellikle belirli bir noktada konumlanarak çalıştılarından operatörler, alt yapıdan kaynaklanan titreşime maruz kalmamakta ve TVT ivmeleri lastik tekerlekli iş makinelerine göre daha düşük düzeyli olmaktadır. Ancak dozerler hareket ederek çalışırken durumunda olduklarından paletli yürüyüş sisteminden kaynaklanan titreşim, operatör kabinine iletilmekte ve operatör, yüksek titreşim ivmesine maruz kalmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (CÜBAP) tarafından M-535 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Aye, S., ve Heyns, P., 2011; "The Evaluation of Whole-Body Vibration in a South African Opencast Mine", The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 111(November), 751-757.
- Bilir, N., 2007; "Mesleki Kas İskelet Sistemi Hastalıkları", İş Sağlığı Ve Güvenliği Dergisi, Sayı 34, 10-13.
- Blood, R., Rynell, P., ve Johnson, P., 2012; "Whole-Body Vibration in Heavy Equipment Operators of a Front-End Loader: Role of Task Exposure and Tire Configuration with and without Traction Chains", Journal of Safety Research, JSR-01036, 1-8.
- Bovenzi, M., 1996; "Low Back Pain Disorders and Exposure to Whole-Body Vibration in the Workplace", Seminars in Perinatology, 20(1), 38-53.
- Brauch, R., 2009; "Vibration Analysis and Standards - A Review of Vibration Exposure Regulations,

Standards, Guidelines and Current Exposure Assessment Methods”, Proceedings of American Industrial Hygiene Association (AIHA) Florida Spring 2009 Conference, Larson Davis division of PCB Piezotronics, Inc, Florida, USA.

Çay, İ., 2006; “Tarım Traktörleri Sürücü Koltukları Titreşim Sönümlenme Elemanları Üzerine Bir Araştırma”, Doktora tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri ABD., Ankara.

ÇSGB, 2012; “İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği”, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.

ÇSGB, 2013a; “Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik”, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.

ÇSGB, 2013b; “İş Hijyeni Ölçüm, Test ve Analiz Laboratuvarları Yeterlilik Yönetmeliği”, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.

Eger, T., 2007; “Whole-Body Vibration: Investigation of Health Risks Associated with Vibration Exposure, Vibration Transmissibility and Posture During Operation of Mining Vehicles”, PhD thesis, Queen’s University, Canada.

Eger, T., Stevenson, J., Boileauc, P.E., Salmoni, A. ve VibRG, 2008a; “Predictions of Health Risks Associated with the Operation of Load-Haul-Dump Mining Vehicles: Part 1—Analysis of Whole-Body Vibration Exposure Using ISO 2631-1 and ISO-2631-5 Standards”, International Journal of Industrial Ergonomics, 38, 726–738.

Eger, T., Stevenson, J., Boileauc, P.E., Salmoni, A. ve VibRG, 2008b; “Predictions of Health Risks Associated with the Operation of Load-Haul-Dump Mining Vehicles: Part 2—Evaluation of Operator Driving Postures and Associated Postural Loading”, International Journal of Industrial Ergonomics, 38, 801–815.

ISO, 1997; ISO 2631-1: Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part 1: General Requirements, International Standards Organization, Geneva.

ISO, 2004; ISO 2631-5: Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part 5: Method for Evaluation of Vibration Containing Multiple Shocks, International Standards Organization, Geneva.

İşsever, H., 1999; “Vibrasyon ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri”, İş Sağlığı ve Güvenliği Konferansı TMMOB Makine Mühendisleri Odası Bildiriler Kitabı, MMO Yayın No: 239, ISBN:975-395-357-7, 85-98.

Langer, T., Iversen T., Andersen, N., Mouritsen, O. ve Hansen, M., 2012; “Reducing Whole-Body Vibration Exposure in Backhoe Loaders by Education of Operators”, International Journal of Industrial

Ergonomics, 42, 304-311.

Lundström, R., Holmlund, P. ve Lindberg, L., 1998; “Absorption of Energy During Vertical Whole-Body Vibration Exposure”, Journal of Biomechanics, 31(4), 317-326.

Kumar, S., 2004; “Vibration in Operating Heavy Haul Trucks in Overburden Mining”, Applied Ergonomics, 35, 509–520.

Mandal, B. ve Srivastava, A., 2010; “Musculoskeletal Disorders in Dumper Operators Exposed to Whole Body Vibration at Indian Mines”, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 24(3), 233–243.

McPhee, B., Foster, G. ve Long, A., 2009; Bad Vibrations - A Handbook on Whole-Body Vibration Exposure in Mining, Coal Services Health & Safety Trust, NSW, Australia.

Okunribido, O., Magnusson, M. ve Popea, M., 2006. “Low back pain in drivers: The Relative Role of Whole-Body Vibration, Posture and Manual Materials Handling”, Liberty Safe Work Research Centre, Department of Occupational and Environmental Medicine, University of Aberdeen, Foresterhill, Aberdeen, AB25 2ZP, UK.

Rasmussen, G., 1983; “Human Body Vibration Exposure and Its Measurements”, The Journal of the Acoustical Society of America.

Rehn, B., 2004; “Musculoskeletal Disorders and Whole-Body Vibration Exposure”, Umea University, ISSN 0346-6612, ISBN 91-7305*-517-4, Sweden.

Sağlam, H., 2011; “Çalışma Hayatında Maruz Kalınan Titreşimin Ölçülmesi ve Bu Maruziyetten Kaynaklanan Titreşimin İnsan Sağlığına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 91 s.

Salmoni, A., Cann, A. ve Gillin, K., 2010; “Exposure to Whole-Body Vibration and Seat Transmissibility in a Large Sample of Earth Scrapers”, Work, 35, 63–75.

Shervin, L., Owende, P., Kanali, C., Lyons, J. ve Ward, S., 2004; “Influence of Type Inflation Pressure on Whole-Body Vibrations Transmitted to the Operator in a Cut-to-Length Timber Harvester”, Applied Ergonomics, 35(3), 253-261.

Sezgin, C. ve Birlik, G., 2004; “Helikopterlerde Alçak Frekans Titreşimlerinin Etkisi”, Havaacılıkta İleri Teknolojiler ve Uygulamalar Sempozyumu HİTEK Bildiriler Kitabı, İstanbul, 665-667.

Smets, M., Eger, T. ve Grenier, G., 2010; “Whole-Body Vibration Experienced by Haulage Truck Operators in Surface Mining Operations: A Comparison of Various Analysis Methods Utilized in the Prediction of Health Risks”, Applied Ergonomics, 41, 763–770.

Şahin, M. ve Işık, G., 2007; “Titreşim, İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Etkileri Risklerin Kontrolü ve

Uygulamaları”, İş Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 241-261.

Thalheimer, E., 1996; “Practical Approach to Measurement and Evaluation of Exposure to Whole-Body Vibration in the Workplace”, Seminars in Perinatology, 20(1), 77–89.

TS ISO 2631-1, 2013; “Mekanik Titreşim ve Şok - Tüm Vücut Titreşime Maruz Kalma Değerlendirilmesi - Bölüm 1: Genel Kurallar”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Ver, I. ve Beranek, L.L., 2006; Noise and Vibration Control Engineering, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, 966.

Anon(a), 2013; “Mekanik Titreşimler Ders Notları”, Zeki Kıral, http://kisi.deu.edu.tr/zeki.kiral/Mekanik_Titresimler_Ders_Notlar%C4%B1Zeki_K%C4%B1ral.pdf

Anon(b), 2014; “Titreşim Analizi”, http://80.251.47.4/download/notlar/811518/titresim_analizi1.doc

Anon(c), 2015; http://www.ilo.org/iloenc/images/stories/enlarged/Part06/VIB_imgs/VIB020F3.jpg

Bu Makale 14 – 17 Nisan 2015 tarihinde düzenlenen IMCET 2015-Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi'nde bildiri olarak sunulmuştur.

MADEN İŞLETMELERİNDE İŞÇİ SAĞLIĞI VE İŞ GÜVENLİĞİ SEMPOZYUMU'2015



TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Adana Şubesi



Çukurova Üniversitesi
Maden Mühendisliği Bölümü



21-22 ARALIK 2015
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ MİTHAT ÖZSAN AMFİSİ
ADANA

İLETİŞİM

TMMOB Maden Mühendisleri Odası Adana Şubesi

web : www.madenisg.org

e-posta : isg@madenisg.org

Tel. : 0 322 459 97 60 - 0.546 425 10 76

Faks : 0 322 459 97 61



TÜRKİYE 5. ULUSLARARASI
MADEN MAKİNALARI
SEMPOZYUMU VE SERGİSİ



1-2 EKİM 2015
ESKİŞEHİR - TÜRKİYE



PLASTİK GÖVDELİ SÜRTÜNMELİ KAYA SAPLAMALARININ KULLANILABİLİRLİĞİ

THE USABILITY OF FRICTIONAL ROCK BOLTS WITH PLASTIC BODY

Eren KÖMÜRLÜ*
Ayhan KESİMAL**

ÖZET

Bu çalışmada, polipropilen random kopolimer (PP-R) türü cam lif katkılı malzemeden üretilen tüplerin korozyonun önlenmesi adına çelik split setler yerine sürtünmeli kaya saplaması olarak kullanılabilirliği bir dizi deneysel çalışma ile değerlendirilmiştir. PP-R tüpler tipik çelik split setler ile kıyaslamalı olarak statik yük testleri (çekme ve makaslama), ani yükleme testleri, sünme, korozyon, çapsal daralma ve montaj testleri ile incelenmiştir. Kimyasal olarak yüksek dirence sahip olması ve mekanik özellikleri nedeni ile içme suyu taşıma, basınçlı gaz taşıma gibi amaçlar ile ekonomik olarak kullanılmakta olan PP-R tüplerin, bu çalışma kapsamında elde edilen veriler ışığında sürtünme ile yük taşıma amaçlı kaya mühendisliğinde kullanılabilir olduğu görülmüştür. Korozyon problemi olmaması, delik pürüzlerine bağlı temas yüzeyinin şeklini alabiliyor olması, yüksek çatlak ilerleme direnci nedeni ile ideal tahkimat reaksiyonları göstermesi gibi önemli avantajlara sahip olsa da, PP-R tüplerin delik içerisinde gerilme rahatlaması yaşaması dikkate alınması gereken bir özellik olarak değerlendirilmiştir. Farklı test sonuçlarına göre tahkimat özellikleri irdelenen lif katkılı PP-R kompozit tüplerin çelik split setlerin yerine kullanımı için yeni kaya saplaması ürünlerinin geliştirilmesi önerilmiştir.

Anahtar sözcükler: Kaya saplamaları, Split set, Sürtünmeli kaya saplamaları, Polimer tahkimat malzemeleri, Çelik korozyonu, Polipropilen

ABSTRACT

In this study, polypropylene random copolymer (PP-R) tubes were assessed with a series of experimental study to use instead of steel split sets, in terms of prevention of the corrosion problem. PP-R tubes and typical steel split sets were comparatively investigated with statical loading (pull and shear), impact loading, creep, corrosion, diametral compression, insertion tests. PP-R tubes having proper chemical resistivity and mechanical properties to be economically used in drinking water carriage and pressurized gas transportation applications were assessed to be usable as frictional rock bolts in rock engineering. In spite of the important advantages of being a noncorrosive material, being shaped by the roughness of the drillhole surface, having ideal support reactions resulting from high crack propagation resistivity, strain relaxation of the PP-R tubes inserted into the drillholes was found to be considered. According to the data obtained with different tests, it was suggested to develop new rock bolt products to use PP-R tubes instead of steel split sets.

Key words: Rock bolts, Split sets, Frictional rock bolts, Polymeric support materials, Steel corrosion, Polypropylene

* Araş. Gör., Karadeniz Teknik Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., TRABZON, ekomurlu@ktu.edu.tr
** Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniv., Müh. Fak., Maden Müh. Böl., TRABZON

GİRİŞ

Split setler 1970'li yılların başlarında bulunmuş olan ilk sürtünmeli kaya saplamalarıdır. Split setler üzerine yapılan ilk yayın 1974 yılında "Zemin kontrolü problemleri için sürtünmeli kaya saplamaları ve uygulamaları" ismi ile Dr. J. J. Scott tarafından sunulmuştur. Split setler boyları genellikle 2 ile 3 metre aralığında değişen uygulandıkları delik çapından daha büyük nominal çapa sahip ve kesitlerinde genelde 1.25 cm veya 1.5 cm eninde yarık bulunduran kaya saplamalarıdır. Nominal çaplarından daha küçük çapta delinen deliklere montajları yapıldığı esnada yarıktaki daralma ve çaplarındaki azalma nedeni ile delik çeperine basınç uygulama ve sürtünme ile yük taşıma özelliklerine sahiptirler (Davis, 1979; Komurlu vd., 2014; Brady ve Brown, 2005).

Split setler deliğe montajları yapılması ile hemen yük taşımaya başlayabilen, dolgulu saplamalarda olduğu gibi enjeksiyon malzemesinin kürlenmesi için beklemeye gerek olmayan, yüksek deformasyon değerlerinde taşıma kapasitelerini önemli ölçüde koruyarak ideal tahkimat reaksiyonları gösterebilen saplamalardır. Uygulamaları pratiktir ve dolgulu ribar saplamalara nazaran hatalı işçilikten kaynaklı taşıma kapasitesindeki düşüş ihtimali oldukça azdır. Ancak, yeraltı suları ile direk temas halinde olmaları nedeni ile erken korozyona uğrayabilmektedirler.

Özellikle, uzun süreler ve asidik yeraltı suları ile temas durumları için önemli oranda taşıma kapasitelerini kayıp etmektedirler. Korozyondan koruma amaçlı galvaniz kaplamalar kullanılıyor olsa da, deliğe uygulama esnasındaki çizilmeler nedeni ile galvaniz yüzeyin korozyonu önlemekten ziyade uzun süreli korozyonda azalmalara imkan sağlaması söz konusu olmaktadır (Hoek, 2006; Komurlu ve Kesimal, 2014; Hassel ve Villaescusa, 2005).

Split setlerin taşıma kapasitelerinin artırılması adına saplama çapının delik çapına oranının artırılması bir seçenek olsa da bu durum montaj esnasında yüzeye etkileyen gerilmeleri de artırmış olduğu için korozyon problemi artmaktadır. Delik çapının kaya saplaması çapına oranı split set uygulamaları için tipik olarak 0,90 ile 0,95 arasında değişmektedir. Split setlerin yük taşıma kapasitesini etkileyen iki temel unsur zemin ve saplama yüzeyindeki normal gerilme ve sürtünme katsayısıdır (Li vd., 2014; Heerden, 2007; Qingliang vd., 2013). Yarıktaki ve dolayısı ile çaptaki daralma nedeni ile yüzeye etkileyen nor-

mal gerilmenin yüksek olması adına kaya saplamasının rijit bir malzeme kullanılarak üretilmiş olması avantaj sağlayacak olsa da, rijit bir yüzey nedeni ile delik yüzeyi şekilleri iyi alınmamakta, sürtünme katsayısı düşmektedir.

Kaya kütlesi deformasyonu nedeni ile kaya saplamaları için iki temel yüklenme mekanizmaları aksel ve makaslama etkileri başlıkları altında incelenebilir. Zemin süreksizliklerinin hareketi ile makaslanan kaya saplamalarında aynı zamanda eğilme etkisi görülmekte ve eğilme momentleri oluşmaktadır. Genellikle, kaya kütlesi içerisinde makaslama etkisi aksel yüklenme ile birlikte yaşanmakta ve delik yüzeyindeki sürtünme hem aksel yük hem makaslama etkileri açısından taşıma kapasitesini belirleyici olmakta, tahkimat reaksiyonlarını etkilemektedir (Pellet ve Egger, 1996; Srivastava ve Singh, 2014; Oreste ve Cravero, 2008).

Sürtünmeli kaya saplamaları tercih edilirken delik yüzeyi ile olan etkileşim ve malzeme dayanımı göz önüne alınmalıdır. Duraysızlık sürtünme yüzeyinden başlayabileceği gibi yüksek makaslama ve/veya aksel yüke maruz kalan bir saplama gövdesinin yenilmesi şeklinde de gerçekleşebilmektedir. Dayanım değerlerinin yanı sıra, tercih edilen malzemeye ait deformasyon modülleri (Elastisite modülü, Rijidite modülü) tahkimat reaksiyonları açısından belirleyicidir (Li vd., 2012; Kömürlü ve Kesimal, 2013; Strygin, 1965).

Saplama malzemesine ait Elastisite modülü değeri tahkimat uygulanan zemin reaksiyonlarını iki temel nedene bağlı olarak etkilemektedir. Bunlardan ilki, zemin deformasyonu ile saplamanın deformasyona uğraması ve tahkimat katılığına bağlı olarak kaya kütlesi deformasyonuna müsaade etmesidir (Deb ve Das, 2014; Aziz vd., 2003). İkincisi ise yarık daralması esnasında malzeme rijitliğine bağlı olarak delik yüzeyine uygulanan gerilmenin sürtünme ile yük taşıma kapasitesini ve sürtünme yüzeylerinin rijidite modülünü belirlemesinden kaynaklanmaktadır (Soni, 2000; Akkiriş, 2014; Kömürlü ve Kesimal, 2012a).

Çelik split set alternatifi olması açısından polimer malzeme türüne bağlı olarak nispeten daha kalın duvarlı tüplerin kullanımına ihtiyaç olmaktadır. Eğer dayanımı ve Elastisite modülü oldukça düşük olan çeşitli polimer malzemelerden birisi kullanılıyor ise katı kesite sahip saplamaların kullanımı durumunda dahi istenen tahkimat reaksiyonları sağlanamayacaktır. Bu yüzden,

malzeme tercihinin son derece önemli olduğu ve sonuçları etkileyeceği açıktır. Aynı zamanda, yüksek dayanıma sahip mühendislik polimerlerinin fiyatları düşünüldüğünde ekonomik bir çözüm sunmak adına, alternatif malzemelere yönelik kapsamlı bir inceleme yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Split set uygulamalarında delik içerisine montajı yapılan tüp kesitinde yarık bulunması nedeni ile tahkimat performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Polimer tüp uygulamalarında yarık eni delik çapına bağlı olarak seçilip, delik içinde yarık kenarlarının temas etmesi ve tüp çapındaki bir miktar azalmanın yüzey deformasyon özellikleri nedeni ile gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Yarığın delik içine itirildikten sonra kapanmasının delik yüzeyine uygulanan normal gerilmeyi ve dolayısı ile sürtünme ile yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkileyeceği düşünülmüştür. Ayrıca, bu uygulamada tüm delik yüzeyi ile temas olması nedeni ile de taşıma kapasitesi açısından avantaj sağlanması beklenmiştir.

Kaya saplaması duvar (et) kalınlığı arttıkça delik içindeki çap daralması nedeni ile delik yüzeyine uygulanan gerilme artmaktadır. Yarığın temas edip yüzeyin sıkışması delik temas yüzeyine etkileyen gerilmelerin artmasına neden olacak ve bu sebeple kaya saplamalarının taşıma kapasitelerinde artış görülebilecektir. Ancak, çelik saplamalar için yalnızca yarık daralması yolu ile sürtünme yüzeyine normal gerilme sağlanabilmektedir. Delik içinde yarık olması nedeni ile makaslama etkisi altında kaya saplamalarının tahkimat reaksiyonları yarık konumu ve kuvvet doğrultusuna bağlı olarak önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, yarık içermeyen bir kesit kaya kütlesi hareketleri karşısında tahkimat katılığını (rijitliğini) ve dayanımını artırılabilir.

Kaya saplaması ve delik yüzeyindeki sürtünme kuvvetlerine karşı direncin yüksek olması yalnızca aksenal yüklere karşı kaya saplamalarının performansını artırmayıp, aynı zamanda makaslama gerilmelerine maruz kalan kaya saplamaları için de taşıma kapasitesini artırmaktadır. Bu konuda arayüzey tokluğu mikro sıyrılmaların ilerlemesi konusundaki direnci belirleyecek ve elastik deformasyon limitine bağlı olarak sıyrılmaya başlangıcı, bir diğer ifadeyle plastik deformasyon engellenebilecektir. Temas yüzeyinin pürüzlülüğü arayüzeyin elastik deformasyon limitini ve çatlak ilerleme direncini artıran bir unsurdur. Polimer yüzeylerin bu konuda sağlayacağı avantaja ek olarak, kendi elastik deformasyon limiti-

rinin yüksek olması ve sünek malzeme özellikleri de arayüzeyin çatlak ilerleme direnci açısından olumlu etkilere sahiptir (Bengisu ve Akkaya, 1999; Akono vd., 2012; Czichos, 1986; Moliq, 1994).

Kaya saplaması malzemesi tercihinde en önemli unsurlardan biri de malzemenin kimyasal direncidir. Korozyon problemi olmayan bir malzeme kullanılarak aynı zamanda çelik split setlerdeki su yalıtım malzemesi masraflarından kaçınılmış olacaktır. Kimyasal direnç ve fiyat maliyeti olarak sergiledikleri yüksek performansları nedeni ile polietilen ve polipropilen türü termoplastikler Dünya'da en yaygın kullanılan iki polimer malzemedir. Günümüzde bu malzemeler gıda, ilaç ve kozmetik paketleme işlemleri, içme suyu taşıma ve depolama uygulamaları gibi kimyasal direncin çok önemli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Kömürlü vd., 2014; Lyons, 2013; Piringer ve Baner, 2008). Ayrıca, yaklaşık olarak çelikten 7 kat daha hafif olmaları bu malzemelerin kullanım pratikliği açısından önemli avantaj sağlamaktadır (Kömürlü ve Kesimal, 2012a; Kömürlü ve Kesimal, 2012b).

Mekanik özelliklerine bakıldığında aynı isime sahip olan polimerlerin üretim detaylarına bağlı olarak farklılıklar sergiledikleri görülebilmektedir. Polimer malzeme tercihinde tipik dayanım değerlerinin göz önünde bulundurulması gibi farklı ürünlerin kıyaslanması adına ürün detaylarının dikkate alınması gereklidir. Mekanik özellikleri nedeni ile tercih edilen polimerler genellikle mühendislik polimerleri olup, Poliamid, ABS, Akrilik gibi türler en popüler olanlarındandır. Bu tür mühendislik polimerlerinin fiyatları da nispeten daha yüksektir. Kaya saplamalarının uygulanacağı zemindeki suyun kimyasal özelliklerine bağlı olarak polimer ürünler tercih edilmelidir.

Polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için lif katkıları üretim yaygınlaşmış bir yöntemdir. Cam lif katkıları bu amaçla en yaygın kullanılan lif türüdür. Cam lif katkıları polimer kompozitlerin elastisite modülü de dayanım değerleri gibi lif katkısız polimerlere nazaran yüksektir. Çeşitli polimer malzemelere yönelik tipik dayanım ve deformasyon modülü değerleri oda sıcaklığı şartı için Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Çeşitli Polimerlerin Tipik Dayanım, Deformasyon Modülü ve Özgül Ağırlık Değerleri (Kömürlü ve Kesimal, 2012b)

Polimer türü	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık	E (GPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme modülü (GPa)
ABS	75-80	1.04	2-3	75	2.5
ABS+30% cam lif	115	1.54	8-9	120	7
Poliamid-6	80-90	1.20	3-4	85	2.3
Poliamid-66	80-90	1.14	3-4		
Polimid	220-240	1.42	4-5	175	5.5
Polimid+40% cam lif	250-270	1.90	10-12	270	12
Poliyeten (HDPE)	30-40	0.94	1-3	45	1.2
Polipropilen	30-40	0.91	2-3	45	1.5
Polipropilen+30% cam lif	50-70	1.12	4-6		
Polistren	60-70	1.05	3-4	40	1.5
Poliüre	20-30	1.25	0.2-0.5		

Delik içerisinde sıkışma sonucu yüzeyin elastik olarak deformasyona uğraması sürtünme yüzeyine uygulanan kuvveti artıracaktır. Polimer malzemenin elastisite modülü değerinin yüksek olması aynı zamanda çapsal daralma nedeni ile kaynaklanan yüzeye temas kuvveti ve sürtünme ile yük taşıma anlamında önemlidir. Daha önce gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında çelik split set kaplama malzemesi olarak poliüre türü malzeme denenmiş ve Çayeli Bakır İşletmeleri'ne ait yeraltı galerilerinde taşıma kapasitesi testlerinde (çekme testi) olumlu sonuçlar alınmış ve polimer yüzeylerin çelik yüzeylere nazaran delik içerisinde daha yüksek sürtünme ile yük taşıma kapasitesi sağlayabildiği görülmüştür (Kömürlü ve Kesimal, 2014).

Ancak, poliürenin çeliğe alternatif bir gövde malzemesi olarak kullanımı uygun değildir. Yüzey özelliklerinin yanı sıra gövde dayanımı ve deformasyon özelliklerinin malzeme seçimi konusunda dikkate alınması gerekmektedir. Basit bir yaklaşımla, kesitin eksenel yük taşıma kapasitesi kesit alanı ile oranlandığında, çekme dayanımı 45 MPa olan bir polimer malzeme 2 mm duvar kalınlığında 4 cm dış çapa sahip bir çelik split set tüp ile yaklaşık aynı eksenel yük taşıma kapasitesine sahip olması için kesitinde boşluk bulundurmamalıdır (çeliğin akma dayanımı 250 MPa olarak dikkate alınmıştır). Bu durumda kesitinde boşluk bulunan bir tüp kullanmak için 45

MPa üzerinde çekme dayanımı değerine sahip bir malzeme kullanmak gerektiği anlaşılmaktadır. Bu durumda mühendislik polimerleri kullanımı veya lif katkılı polimer kompozitlerin kullanımı söz konusu olabilmektedir. Eksenel yük taşıma kapasitesinin yanısıra gövdenin makaslama dayanımı ve rijitliği polimer tüplerin çelik split set alternatifi olarak kullanılabilirliği konusunda belirleyici özelliklerdir.

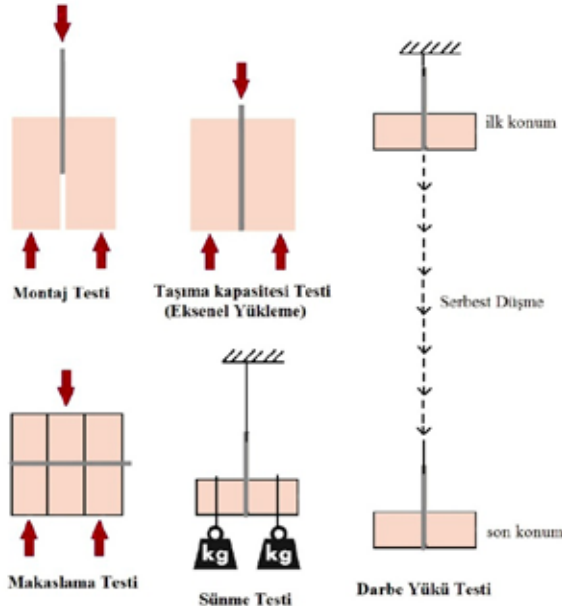
Bu çalışma için lif katkılı polipropilen random kopolimer (PP-R) malzemenin ekonomik olarak istenilen mekanik özellikleri sağlayabileceği değerlendirilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere temin edilmiştir. Kimyasal direnci yüksek olması nedeni ile içme suyu taşımak için yaygın kullanılan malzemelerden biri olan PP-R normal homopolimer polipropilenlere nazaran daha yüksek darbe dayanımına, elastik deformasyon aralığına, çatlak direncine sahiptir. Çalışmada kullanılan lif katkılı PP-R tüplerin duvar kalınlığı 6 mm olup, bu değer tipik bir split set tüpün duvar kalınlığına nazaran 3 kat daha fazladır. Yüzey temas alanının artmasını sağlamak için çalışmada lif katkılı kompozit gövde üzerinde katkısız PP-R katmana sahip tüpler kullanılmıştır. PP-R fiyat performans olarak uygun bir malzeme olup, darbe dayanımının yüksek olması kaya patlaması problemlerine karşı avantaj sağlayabilecektir. Kaya patlamaları yaşanan zeminde yüzey sürtünmeleri nedeni ile belirli

temas uzunluğu üzerindeki kaya saplamalarının gövdeleri yenilebilmektedir. Kaya patlaması problemleri ile mücadele edilmesi adına polimer malzemeler yüksek enerji emme kapasiteleri ve darbe dirençleri nedeni ile tercih edilmektedirler (Kömürlü, 2012; Wu ve Oldsen, 2010; Archibald ve Dirige, 2006).

1. DENEYSEL YÖNTEM

DeneySEL çalışmalar kapsamında 25cm x 25cm x 15 cm boyutlarında kumtaşı blokları temin edilmiş ve herbirine 25 cm uzunluğundaki kenarları doğrultusunda 36 mm çapına sahip karotiyer ile delikler delinmiştir. Bu deliklere farklı kaya saplaması numuneleri (polimer ve çelik) monte edilerek deformasyon kontrollü olarak tahkimat performansları incelenmiştir.

Polimer sürtümlü kaya saplamalarının tahkimat performanslarının değerlendirilmesi ve çelik saplamalar ile kıyaslanması adına aşağıdaki alt başlıklar halinde verilen deney programları gerçekleştirilmiştir. DeneySEL çalışmalara yönelik şematik bir gösterim Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 2-5’te ise testlerde kullanılan kaya blokları ve hazırlık işlemleri görülmektedir.



Şekil 1. DeneySEL çalışmaların Şematik Gösterimleri



Şekil 2. Delik Delinecek Konumun Bloklar Üzerinde İşaretlenmesi



Şekil 3. Delik Delinecek İşaretlenmiş Yer



Şekil 4. Delik Delme İşlemi



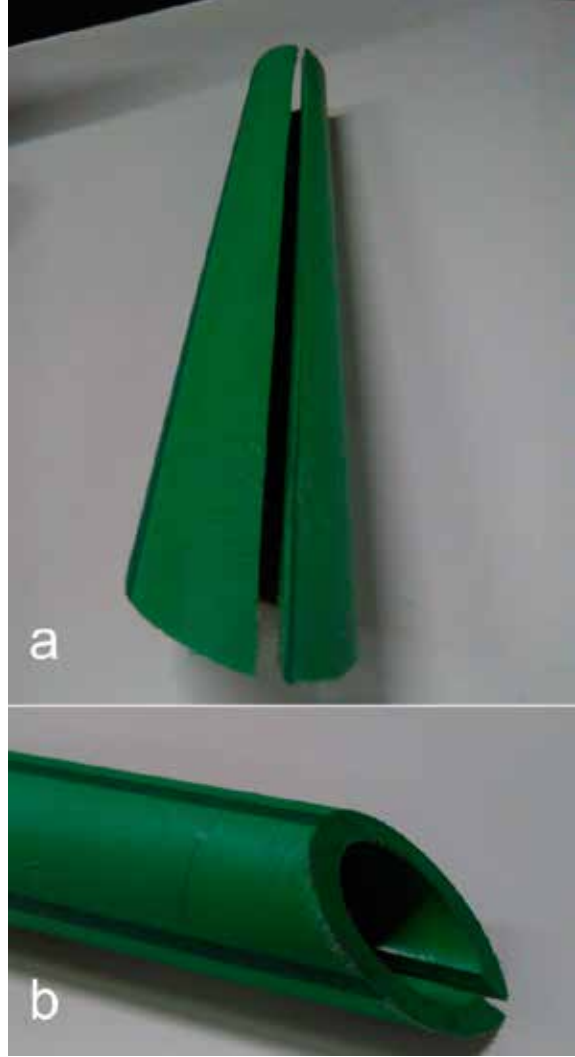
Şekil 5. Kesilmiş ve Kesilecek Makaslama Testi Numuneleri

Kaya blokları makaslama testlerinde kullanılmak için kesilerek üç eş parçaya bölünmüş ve ortadaki bloğun ittirilmesi, sağ ve sol tarafta kalan blokların ise mesnetlenmesi neticesi ile delik içine montajı yapılmış kaya saplamalarının makaslama tepkileri incelenmiştir.

40 mm çapındaki polimer tüplerin montajları için uçları 45° açı ile kesilmiştir. Delik içinde yarığın teması için yarık eni 8 mm olarak seçilmiştir ve yarıklar tüplerin uzun kenarı boyunca açılmıştır (Şekil 6). Montaj için hazır olan polimer saplamaların uzun kenarı 33 cm ve kısa kenarı 29 cm uzunluğundadır. Kullanılan split setlerin konik uçları nedeni ile deliğe montajları gerçekleştirilebilmiştir. Çelik split setlerin konik uçları montaj tamamlandığında dışarıda olacak şekilde taşıma kapasitesi testlerinde delik içine tamamen temas halinde kullanılmışlardır. Montajın devam edeceği konumu belirlemek için split setlerin konik kısımları Şekil 7'de görüldüğü gibi işaretlenmiştir. 10 cm uzunluğa sahip olan konik kısmın 5 cm uzunluğundaki uç kısmı test düzeneğindeki alt delik derinliği nedeni ile kesilerek split set numuneleri montajları yapılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Split set numuneleri toplam uzunlukları konik uç dahil 35 santimetre boyutuna sahip olacak şekilde hazırlanmışlardır.

1. 1. Montaj Testi

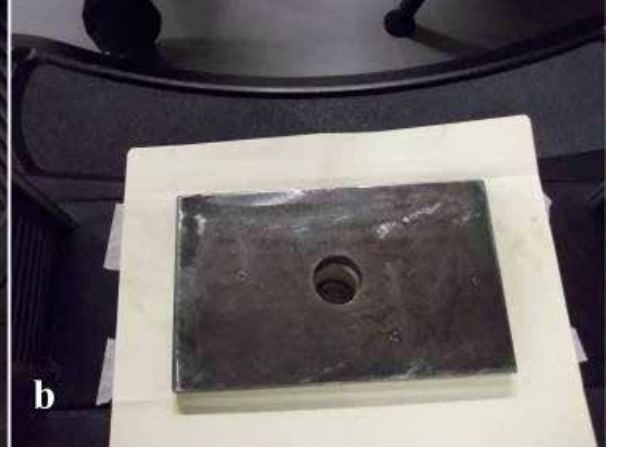
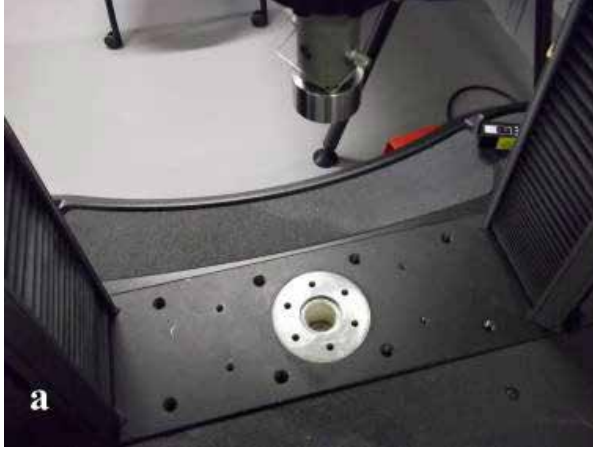
Montaj testinde amaç farklı kaya saplamalarının delik içine uygulanmalarının ne derece pratik olduğunu tayin etmektir. Bu test deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilip delik temas yüzündeki deformasyonlara bağlı olarak saplamaların montajı için gerekli yükler incelenmektedir. Montajı yapılacak bloklar 5 santimetre çapında



Şekil 6. Montaj İçin Hazır Polimer Tüp



Şekil 7. Montaj İçin Hazır, Uçları Kesilmiş Çelik ve Polimer Saplama Numuneleri



Şekil 8. a) Pres Makinası Alt Deliği, b) Delikli Alt Platen

delinmiş olan alt çelik platen üzerine yerleştirilmişlerdir (Şekil 8). Test ekipmanının çapı 6 santimetre olan üst yükleme plateni kesiti ve kaya blok deliği kesiti merkezlerinin düşey doğrultuda aynı hizada olacak şekilde yerleştirilmesinden sonra montaj için hazırlanmış olan kaya saplaması numuneleri ilk olarak deliğe el ile yerleştirilip delik içine pres makinası yardımı ile ittirilmeden önce düşey hizada (düşey ile paralel) olduklarının kontrolleri yapılmıştır (Şekil 9). Yüklemeye başlamadan önce üst platen ve kaya saplamalarının merkezlerinin kesiştiği kontrol edilmiştir.



Şekil 9. Saplamanın Düşey İle Paralelliğinin Kontrol Edilmesi

Tüm hizalama (saplamaların düşey doğrultu ile paralelligi, blok içindeki delik ile alt platen deliği ve üst platen kesit merkezlerinin kesişimi ve kaya saplaması ile üst platen kesitlerinin temas halinde merkezlerinin kesişmesi) ölçülerinde 1 mm maksimum sapmaya müsaade edilmiştir.

Kaya saplaması numuneleri delik içine itilirken yükleme hızı 100 mm/dakika olarak seçilmiştir (Şekil 10). Kaya saplamaları ile kaya bloğu deliği içinde tam temas sağlanması için polimer tüplerin açılı kesilen uçları tamamen dışarı çıkana kadar itilmişlerdir. Çelik split set tüplerin ise montajları öncesinde işaretlenen uç kısımları dışarda kalacak şekilde montajları tamamlanmıştır.

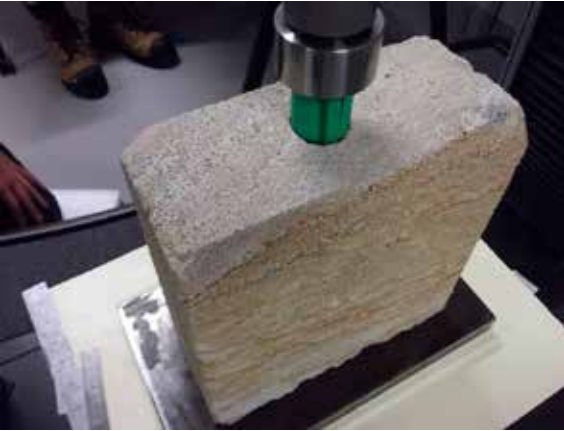
Makaslama numunelerinin montajı için 3 parça halinde kesilmiş bloklar sırası ile üst platen dairesel kesitine göre hizalanarak yerleştirilmiştir. Bloklar üst üste yerleştirildikten sonra dış kenarlarından hizalanmış ve delik içlerinin hizalı oldukları kontrol edilmiştir. Ek olarak ikinci ve üçüncü parçalar konulduğunda delik içine 35 mm çapında bir çubuk sokularak parçaların temas konumlarının hizalı oldukları kontrol edilmiştir.



Şekil 10. Kaya Saplaması Montaj Testi

1. 2. Eksenel Yük (İtme) Testi

Montajı tamamlanmış olan kaya saplamalarının korozyon etkisini tayin etmek amaçlı farklı bekleme sürelerinde sürtünme ile yük taşıma kapasitelerinin incelenmesi adına eksenel yük testi deformasyon kontrollü olarak uygulanmıştır (Şekil 11). Bu sebeple, tahkimat katılığı (kN/mm) da eksenel yük testleri kapsamında tayin edilebilmiştir. Montajları tamamlanan numunelerin bir kısmı uzun dönem testleri için kür havuzuna alınmışlardır. Kür havuzu uygulaması için musluk suyu ile doldurulmuş olan konteynırlar kullanılmıştır. Kısa dönem testleri ise montajların ertesi günü uygulanmışlardır. Saplamaların kaya deliği dışına çıkmış olan, yükleme testi başında alt platen deliğine giren 40 milimetrelük uç kısımlarına ek olarak delik içerisinde 50 milimetrelük ek deformasyon limitleri dahilinde itme testleri 35 milimetre deformasyon miktarına kadar devam ettirilmiştir. İtme testleri uygulanmadan önce kaya saplamaları ve üst platen kesit merkezleri temas halinde aynı düşey doğrultuda olacak şekilde hizalanmışlardır ve 50 mm/dakika yükleme hızı ile düşey yönde itme testleri uygulanmıştır.



Şekil 11. İtme Testi Uygulanan Montajı Tamamlanmış Numune

1. 3. Makaslama Testi

Sağ ve sol blokların mesnetlenmesi ve ortadaki bloğun düşey yönde itilmesi nedeni ile deformasyon kontrollü olarak polimer ve çelik saplamaların makaslama gerilmelerine karşı tepkileri test edilmiştir. Makaslama testleri de itme testleri gibi korozyon etkisini incelemek için farklı sürelerde bekletilmiş olan numunelere uygulanmıştır (1 gün ve 6 ay). Korozyon etkisinin görülmesi adına montajı yapılmış bloklar su içinde bekletilmiş-

lerdir. Makaslama testi sonuçlarının çelik tüplerin yarık konumuna bağlı olarak değişmesi beklendiğinden, yarık ve yükleme doğrultusu arasındaki açı 45° olacak şekilde numune montajları yapılmıştır (yarık kenarlarını bağlayan doğru düşey ile 45° açığıya sahiptir). Üç parça halinde kesilmiş olan makaslama testi blokları sıra ile hizalanarak yerleştirilmiş ve kaya saplaması numuneleri montajları itme testi numunelerinde olduğu gibi 100mm/dakika yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Makaslama testlerinde ve itme (eksenel yükleme) testlerinde kullanılan kaya saplamaları aynı özelliklere sahiptir. Ayrıca, makaslama testlerinde kullanılan kaya blokları itme testlerinde kullanılan bloklar ile aynı fiziksel özelliğe sahip olup aralarındaki fark makaslama testlerinde kullanılan blokların üç eş parçaya kesilerek ayrılmış olmalarıdır.

Makaslama numuneleri için kaya saplaması montajları yapıldıktan sonra uzun dönem numuneleri kür havuzuna alınmış ve kısa dönem numuneleri ise ertesi gün teste taabi tutulmuşlardır. Makaslama testleri için 3 parça halinde kesilmiş blokların sağ ve sol parçalarının altına düz yüzeyli 50 milimetre yüksekliğinde çelik platenler yerleştirilmiş ve ortadaki bloğun üst platen tarafından itilmesi neticesinde testler uygulanmıştır (Şekil 12). Makaslama testleri blok numuneleri içindeki yatay konumdaki kaya saplamalarının kesit merkezleri ve üst platen kesit merkezinin düşey doğrultuda kesişmeleri için yükleme öncesi numuneler hizalanmıştır. Makaslama testlerinde yükleme hızı 10 mm/dakika olarak seçilmiştir.

1. 4. Çapsal Daralma Testleri

Çapsal daralma testleri için 20 santimetre uzunluğundaki çelik ve polimer tüpler yarık kenarları arasındaki doğru yükleme doğrultusu ile paralel olacak şekilde v bloğu kanalı içine yerleştirilmiştir (Şekil 13). Bu test ile kısa dönem ve su içinde kürlenmiş numunelerin birim çapsal daralmaları için gerekli olan yükler incelenmiştir. Çapsal daralma testi uygulanarak numunelerin yarıklarındaki daralma nedeni ile delik yüzeyine etkileyen normal gerilmeler hakkında karşılaştırma imkanı bulunabilmiş ve paslanma neticesinde değerlerdeki değişimin korozyona bağlı olarak sürtünme ile yük taşıma performansı üzerindeki etkileri hakkında bilgi elde edilebilmiştir. Çapsal daralma testlerinde kullanılan 7 cm x 7 cm boyutlarındaki kare kesitli üst platen saplama numuneleri uzunluklarını ortalayacak şekilde yükleme yapılmıştır.



Şekil 12. a) Makaslama Testi, b) Makaslanmış Polimer Saplama

1. 5. Sünme Testleri

Sünme direnci analizleri için itme testinde kullanılan bloklar kullanılmıştır. Kısa dönem itme testleri uygulanan, uçları montajları öncesinde delinmiş ikişer adet polimer ve çelik tüp numuneleri, itme testlerinden sonra deliklerine bağlanan metal teller yardımı ile asılmışlardır. 15 kg kütleyle sahip bloklar üzerine Şekil 14'te görüldüğü gibi konulan ekstra 15 kilogram değerindeki yükler ile 25 santimetre uzunluğundaki sürtünme yüzeyine yaklaşık 300 N düşey yük bir ay süre ile etki etmiş ve bu süreç sonunda sünme testi



Şekil 13. Çapsal Daralma Testi

numunelerine Şekil 14'de görüldüğü gibi ekstra 24 kilogram yük daha eklenerek, saplama ve blok sürtünme yüzeyine toplam yaklaşık 540 N değerinde kuvvet etkimiştir. Bu durumda, 2.16 kN/m değerindeki sabit yük altında numuneler 6 ay süre ile sünme testine taabi tutulmuşlardır. Delik ve saplama sürtünme yüzeyindeki sünme etkisinin incelenmesi için tüplerin blok dışına çıkmış olduğu sınırları işaretlenmiş ve sürtünme yüzeyindeki deformasyon, bloğun kayması neticesinde oluşabilecek yer değiştirmeler bu referans çizgilere bağlı olarak tayin edilmiştir. Sürtünme yüzeyindeki sünme analizlerinin yanı sıra, kaya saptamalarının blok dışında kalan kısımlarının boylarındaki hassas ölçüm yolu ile tüplerin de sünme etkileri incelenebilmiştir.

1. 6. Darbe Testleri

Polimer ve çelik saplama sürtünme yüzeylerinin darbe etkilerine karşı, kaya patlama problemlerinde olduğu gibi ani yüklenme durumundaki taşıma kapasiteleri değerlendirilmektedir. Bu test için bloklara montajı yapılmış kaya saptamalarının blok içine montajı yapılmayan kısımlarında delikler delinmiş ve bu deliklere yüksek dayanımlı çelik halat ile ağırlıklar bağlanmıştır. Delikler tüp kesitlerinin merkezinden ve karşılıklı tüp



Şekil 14. a) Askıdaki Polimer Saplmalı Bloklar, b ve c) Blok Üzerine Konan 15 Kilogram Yük, d) Blok Üzerindeki 39 Kilogram Ağırlık

duvarlarından geçecek şekilde delinmiştir. Ağırlıklar belirli bir yükseklikten düşüklerinde bağlı oldukları halatın hareketi durdurması sebebi ile sahip olunan kinetik enerji sürtünme yüzeyinde kayma şeklinde harekete neden olmuştur. Darbe dayanımı testleri numunelere bağlanmış ağırlıkların serbest düşme hareketi ve halat boyu yüksekliğindeki hareket tamamlandıktan sonra ani durma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu test, yüzeydeki sürtünmelere bağlı olarak bloklar saplamalardan sıyrılanaya kadar 1 metre uzunluğundaki halat ucuna takılan ağırlıklar her basamakta 4 kilogram artırılarak uygulanmıştır.

Sürtünme yüzeyi uzunluğu 8 cm olmak üzere darbe dayanımı testlerinde kullanılan bloklar 15 cm x 25 cm x 8 cm boyutlarındadır. Farklı ağırlıkların 1 metre yükseklikten düşmesi ile polimer ve çelik saplamaların kaya bloğu sürtünme yüzeyi ile darbe etkisinden kaynaklı deformasyon miktarları ve tamamen sıyrılmaları için gerekli enerji miktarları hesaplanmıştır. Şekil 16'da görüldüğü üzere ağırlıkların takıldığı kanca yukarı çekilip plastik bir kelepçe yardımı ile askıya alınmış ve test edilen ağırlıkların asılması ardından plastik kelepçe kesilerek saplamalara çelik halat ile bağlı olan yükün düşmesi sağlanmıştır.

Darbe dayanımı numuneleri montajları öncesi saplamaların delik içine tam teması için split set konik uçlarının ve polimer tüplerinin açılı kesilmiş olan uçlarının sınırları çizilmiştir. Darbe dayanımı numunelerinin montajları tamamlandığı zaman çizilmiş uç sınırlarından daha fazla bir uzunluğun delik içinden dışarı çıkmaması, dar-

be esnasında yalnızca delik içine temas eden 8 santimetre uzunluğundaki kısmın yük taşıma kapasitesinin test edilmesi için delik boyu olan 8 santimetre uzunluğundaki kısım saplamalar üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 15). İşaretlenmiş bu aralık blok içinde kalana kadar numunelerin montajları gerçekleştirilmiştir. Darbe dayanımı numunelerinin montajları diğer test numunelerinin montajları gibi 100 mm/dakika yükleme hızı ile uygulanmıştır.

2. BULGULAR

Montaj esnasında elde edilen yük deformasyon ilişkileri Tablo 2-4'te itme testi, makaslama testi ve darbe testi numuneleri için verilmiştir. Sonuçlara göre polimer saplama numunelerinin montajları esnasındaki değerler arasındaki sapmaların çelik tüplere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür. Polimer tüplerin montajı esnasındaki yük-deformasyon ilişkilerinin farklı numunelere göre gösterdiği geniş aralıktaki değişim Şekil 17'de verilmektedir.



Şekil 15. a) Çelik Split Setlerin Blok İçinde Sürtünme Yüzeyi Temas Konumunun Çizilmesi, b) Çelik Split Set Montajı, c) Polimer Tüplerin Blok İçindeki Temas Konumu Sınırlarının Çizilmesi, d) Montajı Tamamlanmış Çelik ve Polimer Tüpler



Şekil 16. a) Darbe Testi Deney Düzeneği, b) Plastik Kelepçenin Kesilmesi, c) Ağırlığın Düşmesi, d) Kaya Saplamasının Sıyrılmış Olduğu Numune

Tablo 2. İtme Testi Numuneleri Montajlarında Ölçülen Maksimum Yükler (P: Polimer, S: Çelik)

Numune ismi	Yük (kN)	Numune ismi	Yük (kN)
P1	4.87	S1	7.99
P2	2.99	S2	4.73
P3	6.57	S3	8.23
P4	4.32	S4	10.89
P5	9.83	S5	14.64
P6	2.65	S6	10.05
P7	4.60	S7	8.14
P8	14.33	S8	9.30
P9	8.64	S9	9.44
P10	8.26		
P11	13.70		
Ortalama	7.34	Ortalama	9.27
Standart sapma	4.03	Standart sapma	2.66

Tablo 3. Makaslama Testi Numuneleri Montajları Esnasında Ölçülen Maksimum Yükler

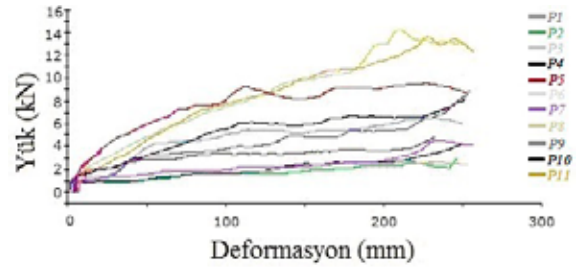
Numune ismi	Yük (kN)	Numune ismi	Yük (kN)
P1	7.51	S1	9.44
P2	2.51	S2	8.81
P3	6.43	S3	7.73
P4	5.40	S4	10.12

Table 4. Darbe Dayanımı Testi Numuneleri Montajlarında Ölçülen Maksimum Yükler

Numune ismi	Yük (kN)
P1	2.54
P2	5.70
P3	4.75
S1	7.60
S2	6.81
S3	7.49

Polimer tüplerin itme testlerinde elde edilen yük-deformasyon eğrileri ve ilişkilerinin çelik saplamalarınınkine nazaran farklı olduğu görülmüştür. Çelik tüpler maksimum yük değerine ulaştıktan sonra kayma esnasında benzer gerilmeler altında deformasyona devam ederken, polimer tüplerin delik içinde kaymaya devam etmesi için önemli ölçüde yük artışı yaşanmıştır. Tablo 5'te kaymaya başlanan yük ve 35 milimetre deformasyon sonrası testler sonlandırıldığında ölçülen yükler (ML) verilmektedir. Ek olarak, Şekil 18 ile çelik ve polipropilen tüpler için itme testlerinden elde edilen bazı yük deformasyon grafikleri verilmiştir.

Ayrıca, itme testlerinde kaymaya başlama (plastik deformasyon) için ölçülen yük değerleri (PL) ile montaj esnasındaki ulaşılan maksimum yük (IL) değerleri arasındaki oranlar da Tablo 5'te verilmektedir. Kısa dönem testlerinden elde edilen değerleri veren Tablo 5'teki aynı parametreler için uzun dönem testlerinden elde edilen değerler Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 17. İtme Testi Polimer Numunelerinin Montajları Esnasındaki Yük-Deformasyon İlişkileri

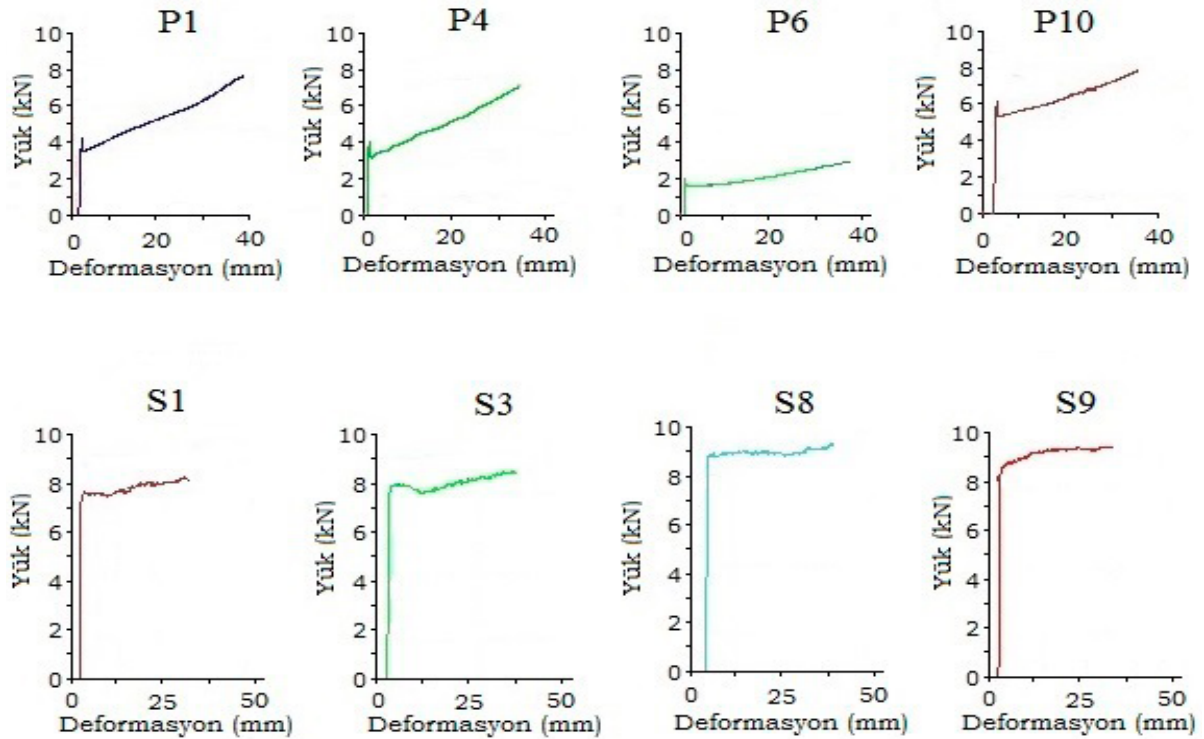
Makaslama testlerinden elde edilen maksimum yük ve plastik deformasyon öncesi yük deformasyon ilişkilerine yönelik ölçülen veriler Tablo 7'de verilmiştir. Tablolarda yer alan katılık değerleri saplamaların taşıma kapasitelerinin 50% değerlerine ulaştıkları gerilme ve deformasyon değerleri dikkate alınarak verilmiştir. Çelik tüp montajı yapılmış olan kısa dönem (paslanmamış) numunelerin makaslama testleri kaya bloğu kırılması nedeni ile sonlandırılmıştır. Polipropilen ve çelik saplamaların makaslama testlerinden elde edilen tipik yük-deformasyon ilişkilerini gösteren test sonuçları Şekil 19'da verilmiştir. Test sonuçlarına göre, polimer tüpler yenilme esnasında sünek malzeme özelliği göstermişlerdir. Uzun dönem makaslama testi numuneleri için testler blokların kırılması ile son bulmuştur. Makaslama testleri ile ölçülen katılık değerlerine göre polipropilen kompozit saplamaların çeliğe

Table 5. Kısa Dönem İtme Testi Sonuçları (P: Polipropilen, S: Çelik)

Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)	Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)
P1	4.18	86	3.93	7.72	S1	7.55	95	6.28	8.60
P4	4.07	94	6.46	7.03	S3	7.94	96	4.41	8.50
P5	6.05	62	4.81	4.06	S8	8.86	95	7.38	9.32
P6	2.00	76	3.78	2.91	S9	8.67	92	6.60	9.37
P8	8.71	61	5.53	7.70					
P10	6.16	75	6.41	7.95					
Ortalama	5.20	76	5.15	6.23	Ortalama	8.23	95	6.17	8.95

Tablo 6. Uzun Dönem İtme Testi Sonuçları (P: Polipropilen, S: Çelik)

Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)	Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)
P2	1.56	52	2.93	3.35	S2	3.59	76	2.38	3.91
P3	3.50	53	4.68	5.34	S4	6.92	64	3.65	6.04
P7	2.79	61	3.01	7.08	S6	6.96	69	3.31	7.59
P9	4.68	54	3.18	4.15	S5	8.08	55	3.09	7.88
P11	6.63	48	4.03	9.23	S7	4.82	59	2.94	3.96
Ortalama	3.83	54	3.57	5.83	Ortalama	6.07	65	3.07	5.88



Şekil 18. Kısa Dönem İtme Testleri Yük-Deformasyon Eğrileri

alternatif olabileceğine dair bulgu elde edilmiştir. Aynı zamanda, korozyona uğramış çelik split setlerin de aksel yüklemeye testlerinden elde edilen sürtünme yüzeyindeki yük deformasyon ilişkileri paslanma neticesinde çelik saplamaların katılık değerlerinde önemli bir azalma yaşandığını göstermiştir. Çapsal daralma testlerinden elde edilen maksimum yük değerleri ve yüke bağlı çapsal daralma ilişkileri sırası ile Tablo 8 ve Şekil 20'de verilmektedir.

Sünme ve ani yüklemeye (darbe) testlerinden elde edilen sürtünme yüzeyindeki deformasyon (sıyırılma) değerleri Tablo 9'da verilmektedir. Sünme testi sonuçlarına göre ise çelik ve polimer tüp-

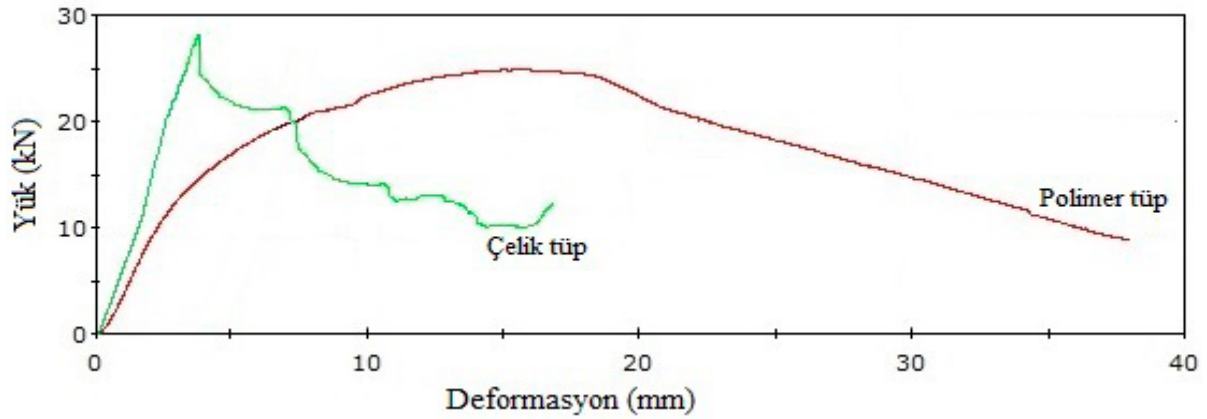
lerin 6 ay süre ile 540 N (sürtünme yüzeyi için 2.16 kN/m) sabit yük altında beklemeleri sonucu sürtünme yüzeylerinde veya saplama malzemelerinde deformasyon gözlemlenmemiştir.

3. MALİYET

Bu çalışma kapsamında test edilen cam lif katkılı PP-R kompozit boruların fiyatı perakende alımlar için 3,3 \$/metre değerindedir. 2 – 2,4 metre uzunluğunda tipik bir çelik split set fiyatının 7 \$ – 8 \$ aralığında olduğu göz önünde bulundurulduğunda, PP-R kompozit boruların çelik split setler ile benzer maliyetlere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Makaslama Testlerinden Elde Edilen Maksimum Yük Değerleri

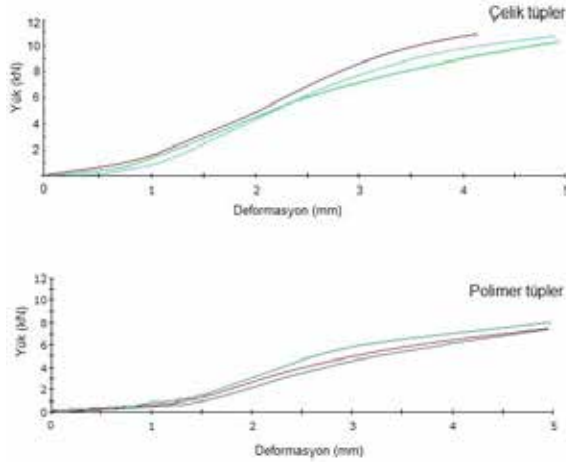
Kısa dönem			Uzun dönem		
Numune adı	Yük (kN)	Katılık (kN/mm)	Numune adı	Yük (kN)	Katılık (kN/mm)
P1	24.88	4.85	P3	20.63	3.95
P2	25.41	4.70	P4	19.16	4.36
S1	28.37	6.67	S3	21.67	4.51
S2	30.55	6.51	S4	20.04	5.02



Şekil 19. Çelik ve Polimer Tüpler İçin Kısa Dönem Makaslama Testi Yük-Deformasyon Eğrileri

Tablo 8. Çapsal Daralma Testi Verileri

Kısa dönem				Uzun dönem			
Numune adı	Yük (kN)	Numune adı	Yük (kN)	Numune adı	Yük (kN)	Numune adı	Yük (kN)
P1	7.14	S1	11.13	P1	8.03	S1	7.69
P2	6.87	S2	10.30	P2	6.71	S2	6.83
P3	7.39	S3	11.08	P3	7.14	S3	7.60
Ortalama	7.13	Ortalama	10.84	Ortalama	7.29	Ortalama	7.37



Şekil 20. Çapsal Daralma Testi Numuneleri İçin Yük-Deformasyon Grafikleri (kısa dönem)

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Polimer saplamaların itme testlerinde ve montajları esnasında çelik saplamalardan ölçülen yük değerlerine nazaran daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Polimer saplamalar için montaj esnasındaki ve itme testleri sırasındaki ölçülen yükler arasında önemli ölçüde fark olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile elde edilen bulguların da doğruladığı üzere delik içerisinde çapsal daralma nedeni ile gerilmeye maruz kalan saplamaların zaman içerisinde gerilme rahatlaması etkisi neticesinde yüzeye uyguladıkları normal gerilmelerin azalması sürtünme ile yük taşıma kapasitelerinde düşüşe neden olmaktadır (Kömürlü vd., 2015; Kömürlü ve Kesimal, 2014). Bu konuda polimer saplamaların tüp kalınlıklarının artması ve/veya kompozit gövde içerisindeki cam lif katkınının daha yüksek oranda olduğu ürünlerin seçimi avantaj sağlayacaktır (Ariyama vd., 1997; Deng ve Zhou, 2006).

Montaj testlerinde ulaşılan maksimum yük değeri artışı ile itme ve montaj testleri esnasındaki yük değerleri arasındaki farkın yükseldiği gözlenmiştir. Bu durum yüzeye etkiyen normal gerilme artışı ile gerilme rahatlamasından kaynaklı yüzeydeki normal gerilme değerinin daha çok azalması açısından beklenen bir durumdur (Razavi-Nouri, 2012). Montaj ve itme testleri sonuçlarına göre polimer yüzeylerin delik değişimi ile sürtünme katsayılarında önemli ölçüde farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, polimer saplamaların zemin özelliğine bağlı olarak çeliğe nazaran tahkimat performanslarının daha çok etkilenmesi beklenmektedir. Polimer saplamaların montaj ve itme testlerinden elde edilen standart sapma değerlerinin çelik saplamaların değerlerine nazaran daha yüksek olması, sürtünme yüzeylerinin bağlı sertlikleri arasındaki farkın artması neticesinde yüzey pürüz şekillerine bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin artışı doğrulamaktadır (Mikhin ve Lyapin, 1970; Kömürlü vd., 2014; Basavaraju ve Ranganatha, 2013).

Pratikte gerek kaya kalitesine gerekse delici özelliklerine bağlı olarak delik çapı değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle farklı kaya türlerinde delik çapı ölçümü yapılması ile farklı bitler kullanılarak istenilen delik çapına sahip olunması ve/veya farklı delik çapları için yarı boyutlandırımı yapılarak plastik gövdeli sürtünmeli kaya saplamalarının tahkimat performanslarının artırılabilmesi göz önünde bulundurulmalıdır.

Çapsal daralma testlerinden elde edilen verilere göre kullanılan polimer tüp yüzeylerindeki gerilmelerin çelik tüplere göre daha düşük değerlerde olduğu ve polipropilen yüzeyin delik yüzeyi ile sahip olduğu sürtünme katsayısının istenilen seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Deliklerin 36 mm olarak planlanması ancak delgi işleminden sonra

Tablo 9. Ani Yük Testi Sürtünme Yüzeyindeki Deformasyon Verileri (T.F=tamamen saplamanın kaya bloğundan sıyrılması)

Kütle	Polimer tüp			Kütle	Çelik tüp		
	Polimer tüp 1	Polimer tüp 2	Polimer tüp 3		Çelik tüp 1	Çelik tüp 2	Çelik tüp 3
4 kg	2.0 cm	0.5 cm	1.6 cm	4 kg	0	0 cm	0 cm
8 kg	1.8 cm	0.7 cm	2.2 cm	8 kg	1.8 cm	0 cm	1.1 cm
12 kg	1.8 cm	1.2 cm	2.1 cm	12 kg	2.3 cm	1.0 cm	2.0 cm
16 kg	T.F.	3.3 cm	T.F.	16 kg	TF	0.6 cm	2.8 cm
20 kg	-	T.F.	-	20 kg	-	3.5 cm	T.F.
24 kg	-	-	-	24 kg	-	T.F.	-

delik çaplarının delici bitlere nazaran 1 mm dolaylarında daha geniş olması nedeni ile 37 mm çapındaki delikler içinde plastik tüplerin yarık yüzeyleri istenilen ölçüde kapanmamış ve bu nedenle sürtünme yüzeyine etkiyen gerilmeler istenilen seviyenin altında kalmıştır. Şekil 21’de görüldüğü üzere yarık kenarlarının yalnız tüp dış çeperinde temas halinde olduğu, tüp iç kısmında temas halinde olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 21. Polimer Tüp Yarık Temas Yüzeyleri

Paslanma neticesinde çelik saplamalar için çapsal daralma testlerinde ölçülen yük değerlerinde önemli bir düşüş ve bu neden ile uzun dönem testlerinde sürtünme ile yük taşıma kapasitesinde korozyonun olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile çelik saplamaların paslanma problemi karşısında polimer tüplerin gerilme rahatlaması problemlerinin sürtünme ile yük taşıma kapasitelerini ne oranda değiştirdikleri kısa ve uzun dönem itme testleri sonuçlarına bağlı olarak incelenmiştir. Literatürden ulaşılan bilgiler polipropilen malzemelerin gerilme rahatlaması etkisinin kısa dönemde daha yüksek olduğunu ve delik içindeki çapsal daralma ve sabit birim deformasyon seviyesine bağlı olarak sürtünme yüzeyine etkiyen gerilme değerlerindeki azalmanın pratik olarak saatler mertebesinde durduğu bilinmektedir (Kömürlü ve Kesimal, 2015; Meredith ve Hsu, 1962; Yamaguchi vd., 2015; Phillips

ve Statton, 1970; Robert vd., 1994). Bu sebep ile kısa dönem testleri numunelerine kıyas ile daha yüksek oranda taşıma kapasitesini kayıp eden polimer tüplerden elde edilen sonuçlar açısından kaya bloklarının 6 ay süre ile su içerisinde ıslanma ve kaya malzemesinin deformasyon özelliklerinin değişmiş olması etkin bir role sahiptir (Vasarhelyi ve Van, 2006). Çelik saplamaların gerilme rahatlama süreleri polimer tüplere nazaran daha uzun olması nedeni ile uzun dönem itme testleri sonuçları üzerinde korozyona ek olarak olumsuz bir etkinin yaşanmış olması da mümkündür. Testlerde kullanılan çelik saplamaların musluk suyu ile temas halinde paslanmış olması ve sülfirik cevher içeren madenlerde olduğu gibi asidik yeraltı sularına sahip alanlarda çelik saplamaların daha yüksek oranda taşıma kapasitelerini kayıp ettikleri dikkate alınmalıdır (Kömürlü vd., 2014).

Delik içi sürtünme yüzeyindeki sünme etkisine yönelik blok asma testlerinden elde edilen sonuçlara göre herhangi bir kayma ve yüzeyde deformasyon gözlenmemiştir. Polimer saplamaların taşıma kapasitelerinin %20 dolaylarında yüke maruz kalan sürtünme yüzeylerinin 6 ay süre sonundaki sünme dirençlerinin istenilen seviyede olduğu görülmüştür. Bu çalışma, eksenel gerilmelerin yanı sıra, blok hareketlerinin engellenmesi nedeni ile yeraltında maruz kalınan makaslama gerilmelerine karşı olan sünme dirençleri ve tahkimat performanslarının sünme nedeni ile zamana bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Makaslama testleri uygulanan polimer tüplerin, maksimum yük seviyelerine ulaştıktan sonra kısa süre içerisinde kırılmak veya kopmak yerine yüksek deformasyon limitlerine izin verdikleri ve bu esnada yüksek çatlak ilerleme direnci nedeni ile önemli ölçüde yük taşıma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. Polimer tüplerin göstermiş oldukları bu sünek malzeme özelliğinin kaya patlaması problemi olan alanlarda enerji absorpsiyonu kapasitesini artıracığı ve olumlu etkilere sahip olacağı öngörülmektedir (Yi ve Kaiser, 1994; Li, 2010; Li ve Doucet, 2012; Li vd., 2014). Kaya patlaması problemlerine karşı gövde dayanımı açısından görülen avantajın yanısıra delik ve saplama sürtünme yüzeylerine uygulanan ani yük testleri sonuçları sürtünme yüzeyine uygulanan normal gerilme ile birlikte değerlendirildiğinde polimer tüplerin çelik numunelere nazaran daha avantajlı olduğu yönündedir. Ancak, bu çalışma kapsamında elde edilen test sonuçları

ışığında polimer ve çelik numunelerin sürtünme yüzeylerinin benzer seviyede ani yük taşıma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür.

Çapsal daralma testleri ile elde edilen bulgular polimer tüplerin mekanik özelliklerinde su ile temas nedeni ile bir değişim olmadığını doğrulamıştır. Çelik tüplerin paslanma problemine karşılık polimer tüplerin yüksek kimyasal dirençleri nedeni ile avantajlı olduklarını söylemek mümkündür. Ancak, polimer malzeme ve tüp kalınlığının tahkimat reaksiyonları açısından değerlendirilmesi sürecinde polimer gövdelerin gerilme rahatlaması problemlerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Sürtünmeli kaya saplamalarının genellikle madencilikte bir yılı bulmayan kısa hizmet süreleri için kullanıldıkları düşünüldüğünde çalışmanın 6 aylık inceleme sürecinin önemli ölçüde fikir verdiği kabul edilebilir. Ancak, birkaç yılı bulan hizmet süreleri için daha uzun süreli incelemeler gereklidir (Hoek, 2006; Hassell ve Villaescusa, 2005).

Paslanma problemi nedeni ile çelik tüplerin taşıma kapasitelerini ve tahkimat katılıkları (rijitliklerini) uzun dönemde önemli ölçüde kayıp ettiği ve uzun süreli korozyon sonucu polimer tüplerin avantajlı olduğuna yönelik bulgular elde edilmiştir. Tüplerin duvar (et) kalınlığı artışı ile çapsal daralma neticesinde yüzeye etkiyen gerilme ve taşıma kapasitesi artışı beklenmektedir (Bawden, 2011; Davis, 1979). Polimer tüplerin kısa dönem taşıma kapasitelerinin çelik tüplere nazaran daha düşük olması, 6 mm olarak tercih edilen polimer tüp kalınlığının artırılması gerektiğini göstermiştir. Kalınlık artışı ile beklenen montaj yükündeki artış açısından 6 mm tüp duvar (et) kalınlığındaki polimer saplamalardan ölçülen montaj testi esnasındaki maksimum yük değerleri göz önüne alındığında et kalınlığı artışının müsaade edilebileceği sonucuna varılmaktadır. Ancak, polimer tüplerin gerilme rahatlaması problemi nedeni ile kısa dönem taşıma kapasitelerinin aynı montaj yüküne sahip çelik tüplerinkine nazaran daha düşük olması beklenmektedir.

Polimer tüplerin itme (eksenel yükleme) ve makaslama testlerinden elde edilen katılık değerleri çelik tüplerden elde edilen değerlere nazaran kısa dönem için düşük ancak yakın değerler vermiştir. Çelik tüplerin korozyon problemi sonucu polimer saplamaların uzun dönem testlerinde çelik tüplere nazaran daha yüksek katılık değerleri sağladığı görülmüştür. Tüp kalınlığı artışı, yüzeye etkiyen normal gerilme değerlerindeki artış neticesinde polimer tüplerin tahkimat katılı-

ğı değerlerindeki artış için de gereklidir (Dupont ve Bapna, 1994; Zhai vd., 2014; Johnson vd., 2003). Eksenel yükleme testlerinde kullanılan polimer tüp yüzeylerinde çiziklerin görülmesi kaymaya başlanması ile delik pürüz ve mineral tanelerine takılma olması nedeni ile yük değerlerinde artış yaşanmış olduğunu doğrulamaktadır. Polimer tüplerin kaymaya devam etmesi için yük artışına gerek olması duraysızlıkların önlenmesi ve ideal tahkimat reaksiyonlarına sahip olunması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu çalışma ile elde edilen, paslanma problemi olmayan plastik tüplerin kullanımına yönelik deneysel veriler ışığında cam lif katkılı PP-R kompozit tüplerin çelik split setlerin yerine kullanımı için yeni ürünlerin geliştirilmesi önerilmektedir.

Kaynaklar

- Akkris, D., 2014. Advantages of the frictional rock bolt swellex, Proceedings of 11th Regional Rock Mechanics Symposium of Turkey, Afyonkarahisar, Turkey, pp. 247-252
- Akono, A.T., Randall, N.X., Ulma, F.J., 2012. Experimental determination of the fracture toughness via microscratch tests: Application to polymers, ceramics, and metals. J Mater Res, 27, 485-493
- Archibald, J.F., Dirige, P.A., 2006. Thin Spray-On Lining Applications for Rockburst, Blast and Fire Damage Mitigation, Proceedings of the 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Golden, Colorado, Proc. number: 06-1005
- Ariyama, T., Mori, Y., Kaneko, K., 1997. Tensile properties and stress relaxation of polypropylene at elevated temperatures, Polymer Engineering & Science, 37(1), 81-90
- Aziz, N., Pratt, D., Williams, R., 2003. Double Shear Testing of Bolts, Proceedings of Coal 2003: Coal Operators' Conference, Australia, pp. 154-161.
- Bawden, W.F., 2011. Ground control using Cable and Rock Bolting, SME Mining Engineering Handbook, SME, USA, pp. 611-625
- Bengisu, M.T., Akay, A., 1999. Stick-slip oscillations: Dynamics of friction and surface roughness, J Acoust Soc Am, 105, 194-205
- Brady, B.H.G., Brown, E.T., 2005. Rock Mechanics for Underground Mining, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Basavaraju, M., Ranganatha, S., 2013. Effect of Soft Material Hardness and Hard Material Surface Morphology on Friction and Transfer Layer Formation; Dry Condition, International Journal of Recent Technology and Engineering, 2(4), 40-46
- Czichos, H., 1986. Introduction to friction and wear,

- Friction and Wear of Polymer composites (ed. By Friedrich K), Elsevier, Amsterdam, pp.1-23
- Davis, W.L., 1979. Split-set Rock Bolt Analysis, *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 16, 1-10
- Deb, D., Das, K.C., 2014. A new doubly enriched finite element for modelling grouted bolt crossed by rock joint, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 70, 47–58
- Deng, M., Zhou, J., 2006. Effects of temperature and strain level on stress relaxation behaviors of polypropylene sutures, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 17(4), 365-369
- Dupont, P.E., Bapna, D. 1994. Stability of sliding frictional surface with varying normal force, *Journal of Vibration and Acoustic*, 116, 237-242
- Hassell, R., Villaescusa, E., 2005. In-situ corrosion assessment of galvanised friction bolts using overcoring techniques, 24th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, pp. 349-356
- Heerden, V.D., 2007. Rock Support in Southern African Hard Rock Mines, *Proceedings of The Fourth Southern African Conference on Base Metals*, Swakopmund, Namibia, pp. 77-91
- Hoek, E., 2006. *Practical Rock Engineering* (Turkish translation by Karakus&Basarir), Publication of Chambers of Mining Engineers of Turkey, Ankara.
- Johnson, J., Williams, T., Sunderman, C., Signer, S., Bayer, D., 2003. [Field Test With Strain-Gauged Friction Bolts At The Gold Hunter Mine, Mullan, Idaho, USA](#), 22nd International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia
- Komurlu, E., 2012. Effects of rock and granular material horizontal stresses on support design, MSc Thesis, Karadeniz Technical University Mining Engineering Department, Trabzon, Turkey
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2012a. New Engineering Materials for Underground Constructions, 16th International Metallurgy and Materials Congress, pp. 307-319, İstanbul, Turkey.
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2012b. Using sprayed polymer as tunnel support, *Proceedings of 7th Asian Rock Mechanics Symposium*, Seoul, South Korea, pp. 1486-1499
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2013. Tunnelling and support materials from past to present, *The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey*, 52, 33-47
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2014. Improved Performance of Rock Bolts using Sprayed Polyurea Coating, *Rock Mechanics and Rock Engineering* (Published online: 21 December 2014), DOI: 10.1007/s00603-014-0696-4
- Komurlu, E., Kesimal, A., Colak, U., 2014. Polyurea type Thin Spray-on Liner Coating to Prevent Rock Bolt Corrosion, *Proceedings of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium*, Saporro, Japan, October 2014, pp. 1389-1397
- Komurlu, E., Kesimal, A., 2015. Reinforcing Rock Columns using Heated Polymeric Ties: An Experimental Study, *Rock Mechanics and Rock Engineering* (Under Review)
- Komurlu, E., Kesimal, A., Colak, U., 2015. Effect of polyurea type thin spray-on liner on support performance of rock bolts, *The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey* (Accepted: January 2015)
- Li, B., Qi, T., Zhengzheng, W., Yang, L., 2012. Back analysis of grouted rock bolt pullout strength parameters from field tests, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 345–349
- Li, C.C., 2010. Field Observations of Rock Bolts in High Stress Rock Masses, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43, 491-496
- Li, C.C., Doucet, C., 2012. Performance of D-Bolts Under Dynamic Loading, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 193-204
- Li, C.C., Stjern, G., Myrvang, A., 2014. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 315-327
- Lyons, A., 2013. *Construction materials reference book* (ed. by Doran&Cather), Routledge, USA
- Meredith, R., Hsu, B.S., 1962. Stress Relaxation in Nylon and Terylene: Influence of Strain, Temperature, and Humidity, *Journal of Polymer Science*, 61, 253-270
- Mikhin, N.M., Lyapin, K.S., 1970. Hardness dependence of the coefficient of friction, *Soviet Physics Journal*, 13(3), 317-321
- Molique, R.S., 1994. *Frictional Behaviour of Polymers: the transition from static to kinetic conditions*, MSc. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University Mechanical Engineering, USA
- Oreste, P.P., Cravero, M., 2008. An analysis of the action of dowels on the stabilization of rock blocks on underground excavation walls, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41, 835–868
- Pellet, F., Egger, P., 1996. Analytical Model for the Mechanical Behaviour of Bolted Rock Joints Subjected to Shearing, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29 (2), 73-97
- Phillips, W.L., Statton, W.O., 1970. Stress-relaxation hardening of Nylon 66 filaments, *Journal of Material Science*, 5, 1021-1026
- Qingliang, C., Huaqiang, Z., Zhihong, X., Shiping, S., 2013. Anchoring mechanism and application of

hydraulic expansion bolts used in soft rock roadway floor heave control, *International Journal of Mining Science and Technology*, 23, 323–328

Piringer, O.G., Baner, A.L., 2008. [Plastic packaging: interactions with food and pharmaceuticals](#), Wiley-VCH, Germany

Razavi-Nouri, M., 2012. Creep and stress relaxation behavior of polypropylene, metallocene-prepared polyethylene and their blends, *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 9, 60-69

Soni, A., 2000. Analysis of swellex bolt performance and a standardized rockbolt pull test datasheet and database, Msc. thesis, University of Toronto Graduate Department of Civil Engineering, Canada

Srivastava, L.P., Singh, M., 2014. Effect of Fully Grouted Passive Bolts on Joint Shear Strength

Parameters in a Blocky Mass, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI 10.1007/s00603-014-0615-8

Strygin, B.I., 1965. Stresses in metal rock bolts and the choice of their diameter, *Journal of Mining Science*, 1, 326-331

Vasarhelyi, B., Van, P., 2006. Influence of water content on the strength of rock, *Engineering Geology*, 84, 70–74

Wu, Y.K., Oldsen, J., 2010. Development of a New Yielding Rock Bolt – Yield-Lok Bolt, *Proceedings of 44th US Rock Mechanics Symposium*, Salt Lake City, UT

Yamaguchi, K., Thomas, A.G., Busfield, J.J.C., 2015. Stress relaxation, creep and set recovery of elastomers, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 68, 66–70

Yi, X., Kaiser, P.K., 1994. Impact testing for rockbolt design in rockburst conditions, [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts](#), 31, 671-685

Zhai, C., Bevand, S., Gan, Y., Hanaor, D., Proust, G., Guelorget, B., Retraint, D., 2014. Measurement of normal contact stiffness on fractal rough surfaces, *Proceedings of 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, NSW, Australia, pp 1-6



TMMOB
MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ

VIII. DELME-PATLATMA SEMPOZYUMU

www.delpatsempozyumu.org

19-20 Kasım 2015, İstanbul

Steigenberger Maslak Hotel

ÖNEMLİ TARİHLER:

15 Haziran 2015	Özetlerin Gönderilmesi
30 Haziran 2015	Özetlerin Kabul/Ret Sonucunun Yazara Bildirilmesi
31 Ağustos 2015	Bildirgi Tanı Meclisinin Sempozyum Sekreterliğine Ulaştırılması
30 Eylül 2015	Bildiriye Kabul Edilip Edilmediğinin İlgili Yazara Bildirilmesi
20 Ekim 2015	Düzenleme Bildiri Meclisinin Sempozyum Sekreterliğine Ulaştırılması
30 Ekim 2015	Bildirgi Kitabının Baskıya Sunulması

İletişim:

Büyükdere Cad. Çınar Apt. No:95 K:8 D:31 Mecidiyeköy İstanbul
Tel: 0212 356 7410, delpat@delpatsempozyumu.org, Istanbul@maden.org.tr



TMMOB
MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI

V. MADENCİLİK VE ÇEVRE SEMPOZYUMU

26 - 27 KASIM 2015 / ANTALYA

