

Kayaçların Yorulmadan Dolay Yenilme Zamanının Saptanması*

Determination of Failure Time of Rocks due to Creep Effect

Mehmet DOKTAN (*)

ÖZET

Tünel, topuk ve açtk ocak basamakları gibi kayasal yapılar yük altında yorulma (creep) olayı etkisinde kalıp zamanla yenilebilirler. Bu yenilme olayı zamanının tam olarak saptanması mühendis için büyük önem taşır.

Laboratuvarda uzun dönem yorulma deneyi uygulanan maden suyu içerisindeki jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) örneklerinden alınan sonuçlar incelenerek yenilme zamanının saptanmasında kullanılabilecek bir eşitlik elde edilmiştir. Eşitlik üç deneysel veri ile ve grafiksel olarak çözülebilecek şekilde genişletilmiştir. Oda topukla çalışılan bu jips madenindeki uygulamadan ve diğer yapılarda uygulama olanaklarından kısaca söz edilmiştir.

ABSTRACT

Rock structures under a certain pressure like tunnels, pillars and open pit walls may fail with time due to creep effect. For the engineer, it is of great importance to determine the exact time of failure of this structure.

By studying the results taken from the submerged gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) specimens subjected to long term creep testing in laboratory, an equation to be used in forecasting the failure time has been obtained.

The equation has been developed such a way that it can be solved, graphically using only three experimental readings. The possibilities of application of the developed prediction procedure to various full scale structures have been briefly stated.

(*) Dr., Maden Y. Mühendisi, ELI Etüd-Tesis Şube Müdürlüğü, Soma - MANİSA.

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında belki de en önemli bilgi, dizayn edilen yapının çalışma ömrünün tam olarak bilinmesidir. Eğer bu yapı bir tünel, galeri, topuk ya da açık ocak basamakları şeklinde bir kaya yapısı olupda önceden kestirilemeyen bir etken kayanın yenilme sürecini başlattığında üretimi aksatır, alet ve ekipmana zarar verir ve çalışanların hayatlarını tehdit eder duruma gelirse, bu yapının ömrünü tahmin edebilecek bilgi çok daha fazla önem taşır.

Çok uzak olmayan geçmişte birçok irili ufaklı maden göçükleri ve basamak kaymaları (1, 2, 3, 4) bildirilmiştir. Yerinde (In situ) ve laboratuvarında yapılan kaya mekaniği çalışmaları göçük tehlikesini belirlemiş olmasına karşın çok az sayıda çalışma göçüğün oluş zamanını tam olarak belirleme yönünde olmuştur.

Şili'de Chuquicamoto madeninde büyük bir basamak kayması zamanında saptanarak madenin kapanması ve olası can kaybı önlenmiştir (5). Ekstrapolasyon tekniği kullanılarak kayma zamanı bir ay önceden çok yakın bir doğrulukla saptanmıştır. Kullanılan teknik ayrıntılı olarak verilmiş olup tartışmaya açıktır.

Japonya'da laboratuvarında toprak örnekleri üzerinde yapılan yorulma (creep) deneyleri sonuçlarının bir eşitlik şekline sokulup demiryolu için açılan yarmaların kayma zamanını saptamak amacıyla kullanıldığı bilinmektedir (6).

2. YORULMA (CREEP)

Yorulma, bir maddenin elastik basınç dayanımının altındaki bir yükte zamana bağlı olarak deforme olması olayıdır. Bu nedenle, kısa dönem dayanım özelliklerine göre dizayn edilen yapılar uzun zaman ayakta kalıp daha sonra yenilebilirler.

Yorulmanın çok geniş olarak incelendiği metallerde genellikle yorulmanın başlaması için yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. Fakat kayaçların çoğunluğunda, takviye, yüksek sıkıştırma (confining) basıncı ya da solüsyonların varlığı da gerekmektedir.

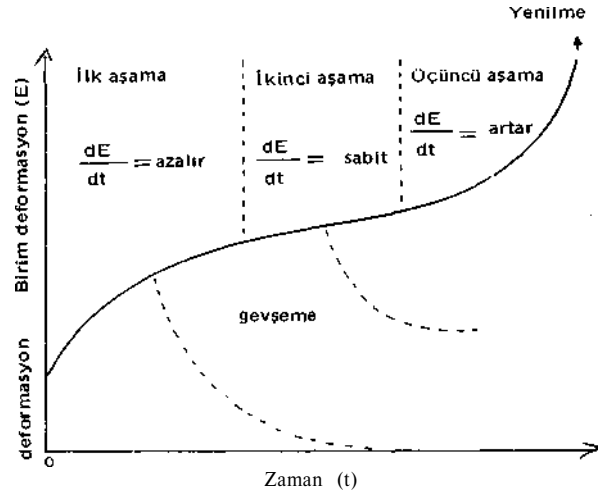
Kayaçların yorulma karakteristikleri, örneğin boyutları ve şekli, uygulanan basınç ve uygulama hızı, sıcaklık, nemlilik, solüsyonların varlığı ve kayaç özellikleri (dayanımı, tane boyu ve bileşimi,

gözeneklilik, bozulma oranı, vb.) gibi özelliklerden etkilenir.

Kayaların yorulma mekanizmaları üzerinde, makroskopik olarak çatlak oluşumundan, mikroskopik olarak kristal örgüdeki dislokasyonlara (7, 8,9) kadar değişen bir çok teori vardır.

Yorulma olayında birden fazla mekanizmanın rol oynadığı söylenebilir de bu konuda daha fazla durulmayacaktır.

Şekil 1'de tipik bir yorulma eğrisi görülmektedir. Örneğe uygulanan yükten dolayı ortaya çıkan elastik deformasyondan sonra eğri üç aşamada incelenebilir.



Şekil 1. Tipik bir yorulma eğrisi

Birinci yorulma aşaması: Bu aşamada deformasyon hızı zamana bağlı olarak azalır ve yük alındığında örnek üzerinde kalıcı bir deformasyon kalmaz.

İkinci yorulma aşaması: Bu aşamada deformasyon hızı sabittir ve yük alındığında kalıcı bir deformasyon söz konusudur.

Üçüncü yorulma aşaması: Bu aşama son aşama olup deformasyon hızı artar ve örnek yenilir.

Deney şartlarına göre, bu aşamalardan bir veya ikisi gözlenmeyebilir ya da hepsi var olabilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel İngiltere'de, Yorkshire bölgesinde oda-topuk yöntemiyle çalıştırılan bir jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) madenin uzun dönemde su baskınına uğrayacağı öngörülerek topukların yeraltı suyu ile çepeçevre sarıldığında göstereceği deformasyonu tahmin edebilmek için geniş kapsamlı bir projenin parçası olarak yapılmıştır (10).

Madenin çeşitli zonlarından alınan, yükseklik genişlik oranı 1: 1 olan 2,5 inç (6,35 cm) çapında silindirik örnekler; bu amaçla Newcastle Upon Tyne Üniversitesi'nde hazırlanmış yorulma deneyi preslerinde, sıcaklığı 13°C ve nem oranı (% 60) madendekiyle aynı tutulmak için özel sistemle

donatılmış odalarda; ve örneklerin yaş tek eksenli basma (uniaxial) dayanımının % 75'ine denk gelen yüklerle yüklenmiş ve uzun dönemde (2-3 yıl) örnekleri çevreleyen yeraltı suyunun etkisinin örnekler üzerinde yaratacağı zayıflama boyosal kılma ve yenilme şeklinde ölçülerek, gözlemlenmiştir. Kullanılan maden ocağı suyunun ve örneklerin bazı özellikleri Çizelge 1, 2 ve 3'de verilmiştir.

Örnekler, yükleme yüzeylerinin çelik pistonlarından etkilenmemesi (end-effects) için aynı enkesitli Dolanit kayasından hazırlanmış silindirik parçalarla yüklenmiştir.

İki adet 1/1000 inçlik komparatör (dial gauge) boyuna deformasyonu ölçmek amacıyla kullanılmıştır.

Çizelge 1 — Kullanılan Maden Ocağı Suyunun Analizi (7) (Sulfat içeriği eşdeğeri olarak, ppm)

Örnek	Fauld	Marbleagis
Kalsiyum, CaO	1836,0	1707,0
Magnezyum, MgO	416,0	426,0
Demir, Fe ₂ O ₃		
Sodyum, Na ₂ O	86,0	117,0
Potasyum, K ₂ O	7,0	25,0
Alüminyum, Al ₂ O ₃		
Toplam	2345,0	2275,0
Toplam Çözünür	2410,0	2390,0
Hata (%)	2,7	4,8

Çizelge 3 — Yorulma Deneyi Örnekleri ve Uygulanan Basınç (Doymuş dayanım değerinin % 75'i)

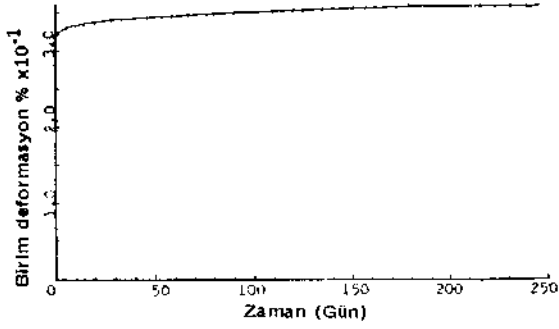
Örnek No.	Örnek	Uygulanan Basınç (MPa)	Şekil No
1	Marbleagis	19,5	2
2	Marbleagis	19,5	3
3	Fauld	16,8	4
4	Fauld	16,8	5
5	Mountfield	22,6	6
6	Marbleagis	19,5	7
7	Fauld	16,8	8

Çizelge 2 — Jips Türlerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımı

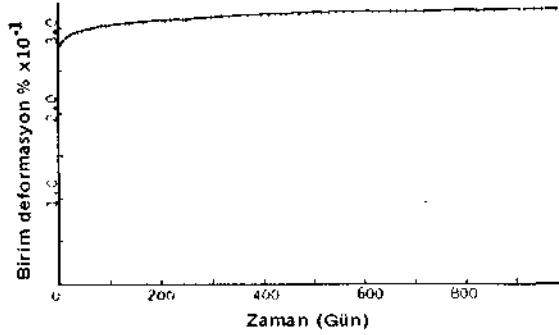
Örneklerin Kaynağı	Kuru Dayanım (MPa)			Doymuş Dayanım (MPa)		
	Değerler	Ortalama	Std. Sapm.	Değerler	Ortalama	Std. Sapm.
Mountfield Damar 1	48,8 44,2	46,5	2,3	32,2 28,1	30,2	2,05
Mountfield Damar 4	33,2 31,6	32,4	0,8	25,7 22,3	24,0	2,0
Fauld	41,1 36,7	38,9	2,2	24,5 20,5	22,5	1,7
Marbleagis	48,4 38,2	43,3	5,1	20,5 31,5	26,0	5,0

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

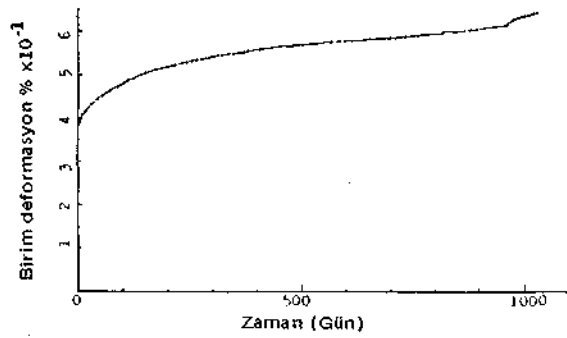
Yorulma deneyleri sonuçları Şekil 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'de birim deformasyon ve zaman eksenlerinde verilmiştir. Çeşitli yörelerden alınan örnekler aynı basınç altında değişik zamana bağımlı deformasyon özellikleri göstermiştir. Tane boyutlarının, porozitenin ve anhidrat içeriğinin farklı olması buna yol açmıştır (10).



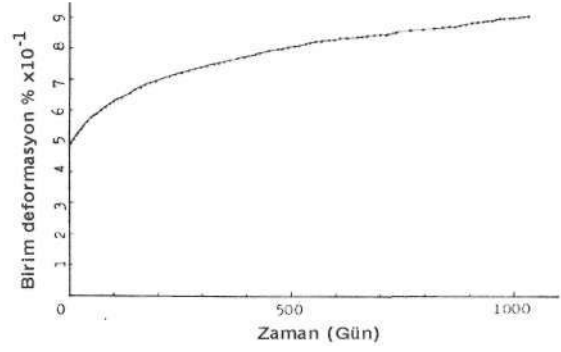
Şekil 2. Marbleagis jipsinin yorulma eğrisi (Örnek No. 1)



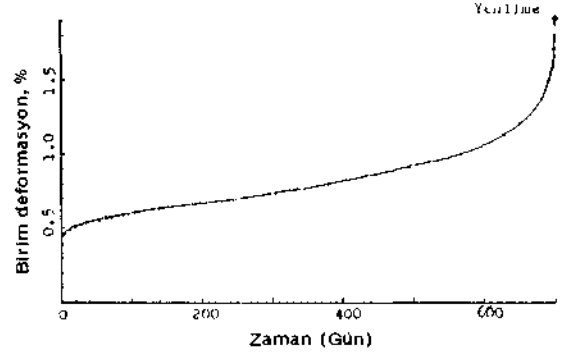
Şekil 3. Marbleagis jipsinin yorulma eğrisi (Örnek No. 2)



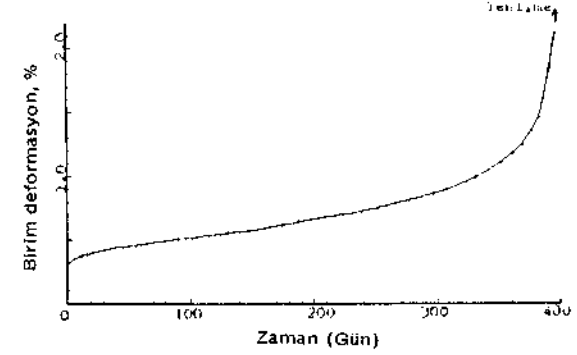
Şekil 4. Fauld jipsinin yorulma eğrisi (Örnek No. 3)



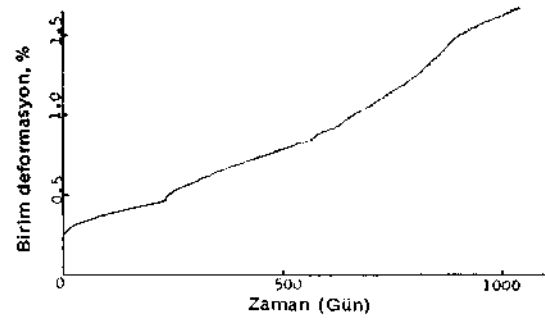
Şekil 5. Fauld jipsinin yorulma eğrisi (Örnek No. 4)



Şekil 6. Mountfield jipsinin yorulma eğrisi (Örnek No. 5)



Şekil 7. Marbleagis jipsinin yorulma eğrisi (Örnek No. 6)



Şekil 8. Fauld jipsinin yorulma eğrisi (Örnek No. 7)

4.1. Ampirik Eşitliğin Bulunması

Şekil 6 ve 7'deki örneklerin deney sonuçları incelendiğinde deformasyon hızının zamanla hiperbolik olarak arttığı ve yenilme zamanına asimtotik olduğu görülür. Bu aşağıdaki gibi bir eşitliği gerektirir.

$$\frac{dE}{dT} = \frac{M}{T_F - T}$$

M : Sabit
T_p: Yenilme zamanı
T : Zaman
E : Birim deformasyon

$\frac{dE}{dT}$ O olduğu zaman $T = T_0$ ve entegrasyonla

$$E = M \ln \frac{T_F - T_0}{T_F - T} \quad [1]$$

5^ $E_1 - E_2 = E_2 - E_3$ olmak koşuluyla deneysel verilerden Uç adet zaman-birim deformasyon değeri alınıp eşitlik 1 'de yerine konulursa;

$$E_1 = M \ln \frac{T_F - T_0}{T_F - T_1} \quad [2]$$

$$E_2 = M \ln \frac{T_F - T_0}{T_F - T_2} \quad [3]$$

$$E_3 = M \ln \frac{T_F - T_0}{T_F - T_3} \quad [4]$$

3'den 2 çıkarılırsa,

$$E_1 - E_2 = M \ln \frac{T_F - T_2}{T_F - T_1} \quad [5]$$

4'den 3 çıkarılırsa

$$E_2 - E_3 = M \ln \frac{T_F - T_3}{T_F - T_2} \quad [6]$$

5 ve 6 bölündüğünde ve $E_1 - E_2 = E_2 - E_3$

$$\frac{T_F - T_1}{T_F - T_2} = \frac{T_F - T_2}{T_F - T_3}$$

ve buradan da düzenleme yapılarak

$$T_F - T_1 = \frac{(T_2 - T_1)^2}{2T_2 - T_1 - T_3} \quad [7]$$

elde edilir. Bu eşitliğin önemi büyüktür çünkü yenilme zamanı (T_F)'i bulabilmek için $E_1 - E_2 = E_2 - E_3$ koşulunu sağlayan üç zaman değeri yeterli olmaktadır.

Denenen 7 adet örnekten yalnız iki tanesi (5 ve 6 no'lu örnekler) ikinci yorulma aşamasından üçüncü aşamaya girerek yenilmiştir. Şekil 6 ve 7'de görüldüğü gibi üçüncü yorulma aşaması oldukça uzun olup örnek tamamen yenilmezden önce yeterli uyarıyı vermektedir. Bu, kaynak 11'de belirtilen bu konudaki görüşlerden farklıdır.

Teorik ve deneysel çalışmalar genellikle yorulmanın üçüncü aşama başlangıç noktasını saptama konusunda yoğunlaşmıştır (12,13,14).

Griggs ve Coles (15) hızlanan üçüncü aşama yorulma eğrisini bir parabolik eşitlikle ifade etmeye çalışmışlardır. Eşitlik aşağıdaki gibi olup yenilme zamanını tahmin etmede kullanılmak için uygun değildir.

$$E = A - B \cdot T^2$$

E: Birim deformasyon

T: Zaman

A ve B sabitlerdir.

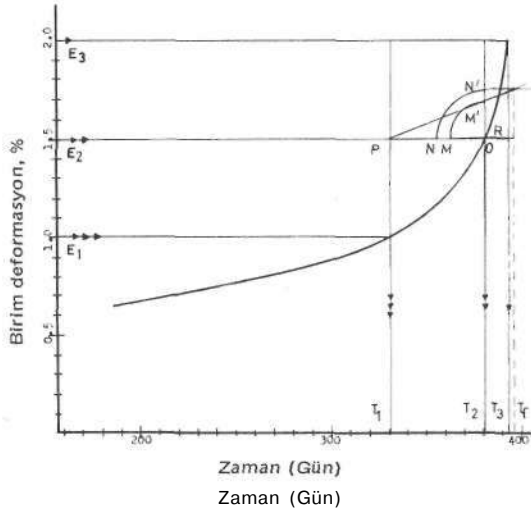
Kaynak 6'da sunulan eşitlik ise aşağıdaki gibi olup başarıyla uygulanmıştır.

$$T_R \cdot E_2 = 214$$

T_R : Yorulma zamanı

E₂ : İkinci aşamadaki yorulma hızı (inçx
10⁻⁴ dakika)

Bu çalışmada yorulma eğrisinin üçüncü aşaması için değişik bir yöntem irdelenecek ve yenilme zamanının tahmini için kullanılacaktır.



Şekil 9. Yenilme zamanını tahmin için grafiksel yöntem

Grafikte; $E_j - E_2 = E_2 - E_3$
 $MR = MP = 1/2 RP$
 $NO = NP = 1/2 OP$
 $OM = OM'$
 $ON = ON'$

4.2. Grafiksel Çözüm

Yenilme zamanını arazide daha hızlı saptayabilmek amacıyla 7 no'lu eşitlik grafik üzerinde çözülebilir.

7 no'lu eşitlik aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$T_F - T_1 = \frac{(T_2 - T_1)^2}{2(T_2 - T_1) - (T_3 - T_1)} \quad [8]$$

$$T_2 - T_1 = (T_F - T_1) \frac{2(T_2 - T_1) - (T_3 - T_1)}{(T_2 - T_1)}$$

ve her iki tarafı 2'ye bölüp, $(E_2 - E_1)$ ile toplarsak

$$\frac{T_2 - T_1}{2} + (E_2 - E_1) =$$

$$\frac{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_1)}{2}$$

$$(T_F - T_1) + (E_2 - E_1)$$

Bu eşitliğin her iki tarafı birim deformasyon (E) ve zaman (T) eksenlerinde iki doğru parçasını ifade eder. Bu iki doğru parçasının kesim noktası zaman ekseninde (T) yenilme zamanını (T_F) belirler.

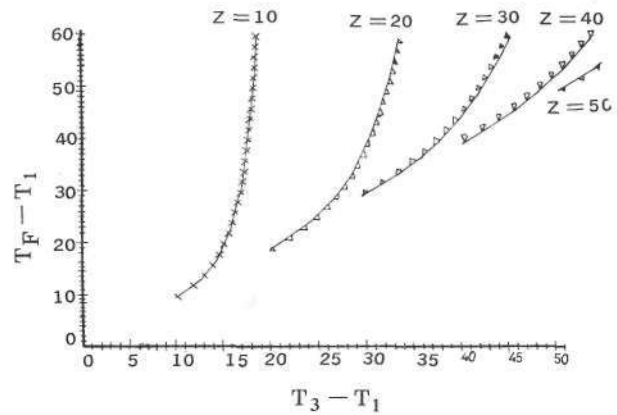
Şekil 9'da grafiksel çözüm şekli gösterilmiştir. Üç adet birim deformasyon değeri $E_j - E_2 = E_2 - E_3$ 'ü sağlayacak şekilde alınır ve bu noktalara karşı gelen zaman değerleri eksende işaretlenir. E_2 'den geçen ve zaman eksenine paralel doğru çizilir ve doğru üzerinde O, P, R noktaları işaretlenir. O ve P'nin orta noktası N, R ve P'nin orta noktası M olarak bulunur. N' ve M'olarak yansıtılır. Yenilme zamanı T_F , N' den geçen ve zaman eksenine paralel doğru ile P ile M' den geçen doğrunun kesim noktası olarak yatay eksenden okunur.

Bu işlemin birçok üçlü noktaları ile yinelenmesi ideal olarak aynı T_F yenilme zamanını vermeli-dir. Fakat küçük gözlem hataları birbirine yakın farklı yenilme zamanını gösterebilir. Ayrıca en son alınan üç değer ile yapılacak tahmin daha hassas sonuç verecektir.

4.3. Yenilme Zamanı Tahmin Nomogramı

Eşitlik 8'deki $(T_2 - T_j)$ ve $(T_3 - T_j)$ 'lere çeşitli değerler verilirse $(T_F - T_j)$ değerleri hesaplanabilir. Her bir $(T_2 - T_j)$ için $(T_3 - T_j)$, $(T_F - T_j)$ 'e karşı çizilirse Şekil 10'daki gibi bir seri eğri elde edilir.

Bu nomogram yenilme zamanı tahmin işlemlerini çok daha basite indirger. $E_j - E_2 = E_2 - E_3$ şartını sağlayan üç nokta için $(T_3 - T_j)$ eksenin-



Şekil 10. Yenilme zamanı tahmin diyagramı ($Z = T_2 - T_1$)

den bilinen ($T_2 - T_j$) eğrisine çıkılan dikmenin kesim noktasının dik eksendeki değeri yenilme zamanını verir.

4.4. Bilgisayar Uygulaması

Üçüncü yorulma aşamasına ait yorulma deney verileri Fortran IV dilinde yazılmış bir programla birim deformasyon-zaman ikilileri şekline çevrilip bundan sonra işleme tabi tutulmuştur.

Aynı program ile $E_j - E_2 = E_2 - E_3$ eşitliğini sağlayan tüm mümkün üç nokta setleri bulunmuş ve bunlara ait zaman değerleri eşitlik 7'de yerlerine konarak yenilme zamanları bulunmuştur.

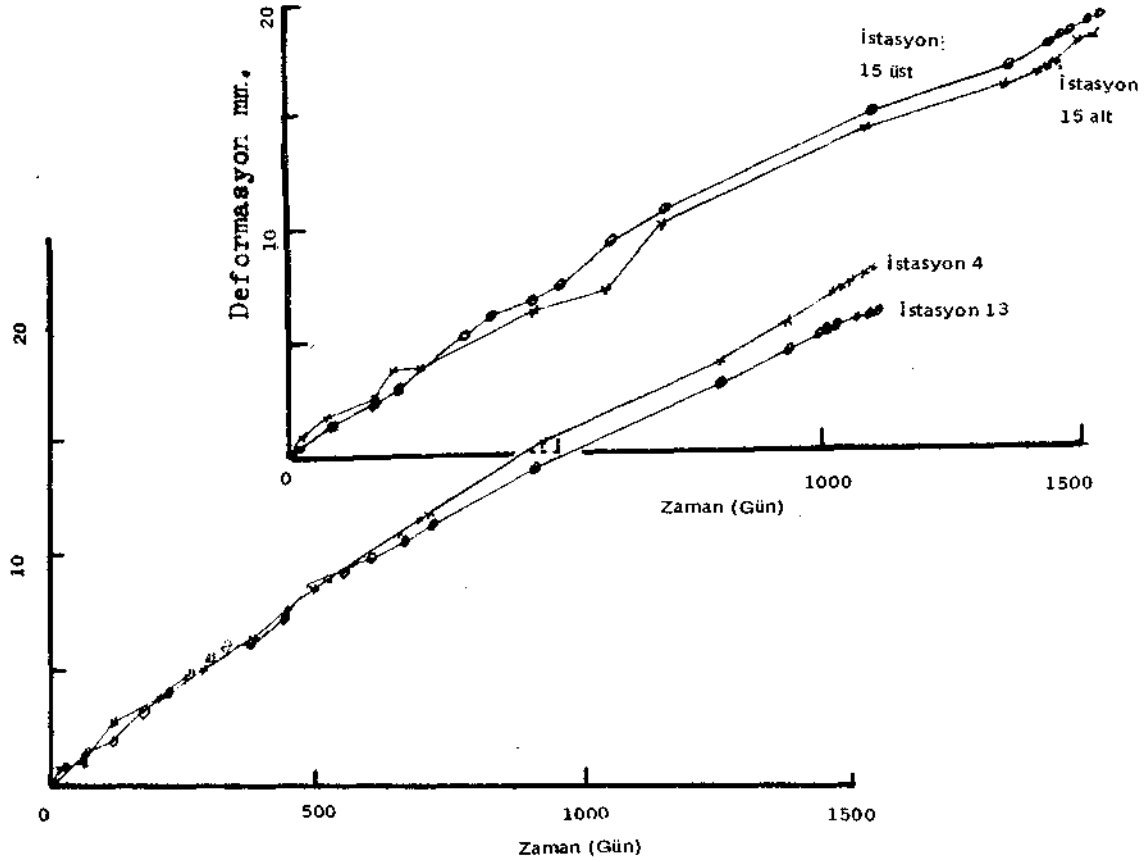
Yenilme zamanı bulunduktan sonra "Least Square" eğri uyarlaması programları kullanılarak eşitlik 2'deki sabitler I.D. (Index of determination) ile birlikte bulunmuştur.

5. TAM BOYUTLU YAPILARDA GELİŞTİRİLEN YÖNTEMİN UYGULANMASI

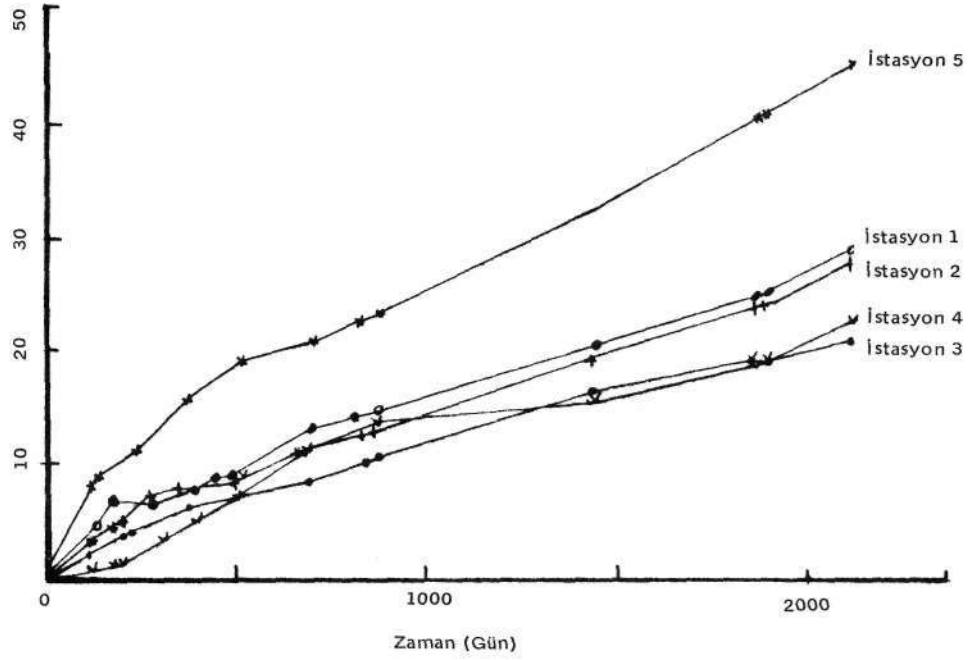
Yorulma deneylerinde üçüncü zaman yorulma devresine giren örnekler 5 ve 6 üzerinde yenilme zamanı tahmin çalışmaları yapılmış ve yenilmeden bir ay gibi bir süre önce örneklerin yenilme zamanı yarım günlük bir hata ile saptanmıştır. Bu şekilde aletlere olabilecek herhangi bir zarar önlenmiştir.

Geliştirilen yöntemin uygulanması için tek başına periyodik olarak alınan yer değiştirme ya da deformasyon değeri yeterli olduğu için optik ya da mekanik çeşitli uzaklık ölçer aletler yeterli olmaktadır.

Bu yazıda sözü edilen jips madeninde, madenin çeşitli yerlerine yerleştirilmiş çok sayıda konverjans ölçer aletler (Mak II tipi, tape extansometer) yardımıyla periyodik olarak ölçüler alınmıştır.



Şekil 11. Tavan deformasyon ölçüm değerleri (Lokasyon 8N-6E)



Şekil 12. Tavan deformasyon ölçüm sonuçları
(Lokasyon 7E/9-11S)

Bunlardan bazıları Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Hiç bir istasyon üçüncü aşama yorulmayı göstermediğinden yenilme tahmini yapılmamıştır.

Açık ocak basamaklarında, karayolu ya da demiryolu için açılan yarımlarda, çeşitli nedenlerden dolayı (yağmur, fazla yük veya tesbit edilememiş bir zayıf yüzey) meydana gelebilecek heyelanın oluş zamanı bu yöntemle tahmin edilebilir. Saptanacak sabit noktalarla kayma olasılığı olan kütle üzerinde alınacak noktalar arası uzaklığın periyodik olarak alınacak ölçülerle kontrol edilmesi gerekmektedir.

6. SONUÇ

Oda topuk yöntemiyle çalışan bir jips madeninde, topukların yeraltı suyu ile çevreye sarıldığında gösterecek yorulma karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerden elde edilen verilerle yenilme zamanı tahmin yöntemi geliştirilmiştir.

Bu yöntemin yorulma özellikleri gösteren diğer kayasal yapılarda uygulanması için neden yoktur. Ancak, bu tezi desteklemek için daha fazla laboratuvar ve saha çalışmalarına gereksinim vardır.

Tahmin işlemlerinin yapılabilmesi için;

Kayacın yorulma özellikleri ya da başka bir deyişle zamana bağlı deformasyon göstermesi gerekir.

Yenilme zamanı tahmini yapılacak olan kayasal yapının deformasyonu çeşitli yöntemlerden biri yardımıyla periyodik olarak ölçülmelidir.

Zaman-deformasyon verileri, yapının üçüncü zaman yorulma aşamasına girdiğini yani artan deformasyon hızını göstermelidir.

Yenilme zamanı tahmini için üç okuma değeri yeterli olup grafiksel olarak çok seri bir şekilde yapılabilir. En son okuma değerlerini kullanarak yapılan tahminin daha hassas sonuç vereceği açıktır.

Yeraltında olabilecek bir göçüğün, açık ocaklarda olabilecek bir heyelanın oluş zamanını yakın bir doğrulukla önceden tahmin edilebilir olanağına maden mühendisine sağlayan bu yöntemin değişik ortamlarda uygulanması ve daha da geliştirilmesi için çalışmaların devam etmesi ümit edilmektedir.

KAYNAKLAR

1. BRYAN, A., BRYAN, I.C. and Fouche, Some Problems of Strata Control in Pillar Workings, Mining Engineering, 123, 1964, 238-266.
2. WILSON, I.W., An Investigation into Ground Movement Associated With Board and Pillar Mining in Soguth African. M.Sc Thesis. Univ. Newcastle Upon Tyne, 1965.
3. SALOMON, M.D.G., Recent Developments in the Design of Board and Pillar Layouts in South African Coal Mines Proc. 9th Common Wealth Mining Metall. Congress.cilt 1, 1969, s. 13-31.
4. MOTTAHED, P., ve SZEKI, A., The Collapse of Room and Pillar Workings in a Shaley Gypsum Mine Due to Dynamik Loading Symp. on Strata Mech. Newcastle, 1982, s. 260-264.
5. KENNEDY, B.A., ve NIERMEYER, K.E., Slope Monitoring Systems Used in the Prediction of a Major Slope Failure at the Chuquicamata Mine, Chile Proc. Symp. Planning Open Pit Mines. Johannesburg. 1979, s. 215-225.
6. SAITO, M., ve UZZAMA, H., Failure of Soil due to Creep, Prof. 5th soil Mech. Found. Eng. Conf. 1965, s. 315-318.
7. PRESTON, IC, The Influence of Water on the Strength Characteristics of Gypsiferous Rocks, M.Sc Thesis. Newcastle Upon Tyne, 1980.
8. HÖFER, K.H., ve KNOLL, P., Investigations into the Mechanism of Creep Deformation in Carnallite and Practical Applications, Int. Jour. Rock Mech. and Min. Sc. Cilt 8, 1971, s. 61-73.
9. GORDON, J.E., The New Science of Strong Material, Penguin Books, London, 1976.
10. DOKTAN, M., The Longterm Stability of Room and Pillar Workings in a Gypsum Mine, Ph.D. Thesis, Univ. Newcastle Upon Tyne, 1983.
11. İNCEEFE, S., Ankara Andeziti, Kireçtaşı ve Bazı Travertenlerin Yorulma Karakteristikleri, Türkiye Bilimsel ve Teknik 4. Kongre à, Maden Mühendisleri Odası, Ankara 1975, s. 353-383.
12. SİNGH, D.P., A Study of Creep of Rocks, Int. Jour. Rock Mechs. and Min. Sc, Cilt 12, 1975, s. 271-276.
13. MUNDAY, J.G.L., A Criteria for Predicting the Long Term Compressive Strength of Rock, Conf. on Rock Eng., Newcastle, 1977, s. 127-135.
14. DEDAME, CD., Rheologie Behaviour of Heterogeneous Salt Rocks, Poc. 4th. Int. Conf. on Rock Mechs, Cilt 1, Montreux 1979, s. 107-113.
15. GRIGGS ve COLES (GLEN. I.W.). The Mechanical Properties of Ice, Advances. Phys, Cilt 7, No. 26, 1958, s. 254-265.

