

# KAYA CIVATALARININ TAŞIMA KAPASİTESİ İLE İÇİNDE VE CİVARINDA OLUŞAN GERİLME DAĞILIMLARI

Ömer AYDAN(\*)  
Toshikazu KAWAMOTO(\*\*)

## ÖZET

*Bu yazıda kaya civatalarının taşıma kapasitesi ile içinde ve civarındaki gerilme, birim deformasyon ve yerdeğiştirmeler ile ilgili olarak; civata-harç veya harç-kaya ara yüzeyinin elastik-zayıflama-plastik akma davranışını gözönüne alan teorik bir çözüm sunulmuştur. Teorinin nümerik uygulamaları verilmiş ve teorinin kullanılışlığı ve geçerliliğı tartışılmıştır.*

## ABSTRACT

*In this paper, a theoretical solution for load bearing capacity and stress, strain and displacement distributions in/along rockbolts is presented by condirering-elastic-softening-plastic flow behaviour of bolt-grout or grout-rock interface. The applications of the theory has been shown numerically and its applicability and use is discussed.*

(\*) Maden YÜk. MUh., Dept. of Geotech. Eng., Nagoya University, JAPAN  
(\*\*) Professor, ditto, Dept. of Geotech. Eng., Nagoya university, JAPAN

## 1. GİRİŞ

Kaya cıvataları uzun zamandan beri bir tahkimat unsuru olarak ülkemiz ve dünya madencilik ve inşaat mühendisliği alanlarında yaygınca kullanılmaktadır. Kaya cıvatalarının ilk ankraj şekli kamalı tiptir. Fakat bunların yerleştirilmesindeki güçlüklerden dolayı yerleştirilmesi daha kolay olan genişleme parçalı (expansion shell type) cıvatalar geliştirildi. Mekanik olarak tespit edilen bu tip cıvataların kullanılmasında aşağıda verilen problemlerle karşılaşmıştır(1).

- a) Bazı kayalarda cıvatanın tespitindeki zorluklar,
- b) Ankrajın zamanla sünmesi (creep) nedeniyle cıvatanın kuvvetindeki düşmeler ve
- c) Cıvatalara ilk gerilmelerin uygulanmasındaki güçlükler,

Bu zorlukları gidermek amacıyla tüm boy ankraj prensibine dayanan ve bağlayıcı madde olarak ya betonun veya reçine (resin) tipi harçların kullanıldığı cıvatalar geliştirildi. Bu tip pasif kaya cıvatalarının (untensioned grouted rockbolts) kullanımları oldukça yaygın olmasına karşın, tahkim edici etkileri halen iyi bir şekilde anlaşılmış değildir. Bu ise kaya cıvataları ile kaya kütlelerinin arasındaki karmaşık ilişkilerden kaynaklanmaktadır.

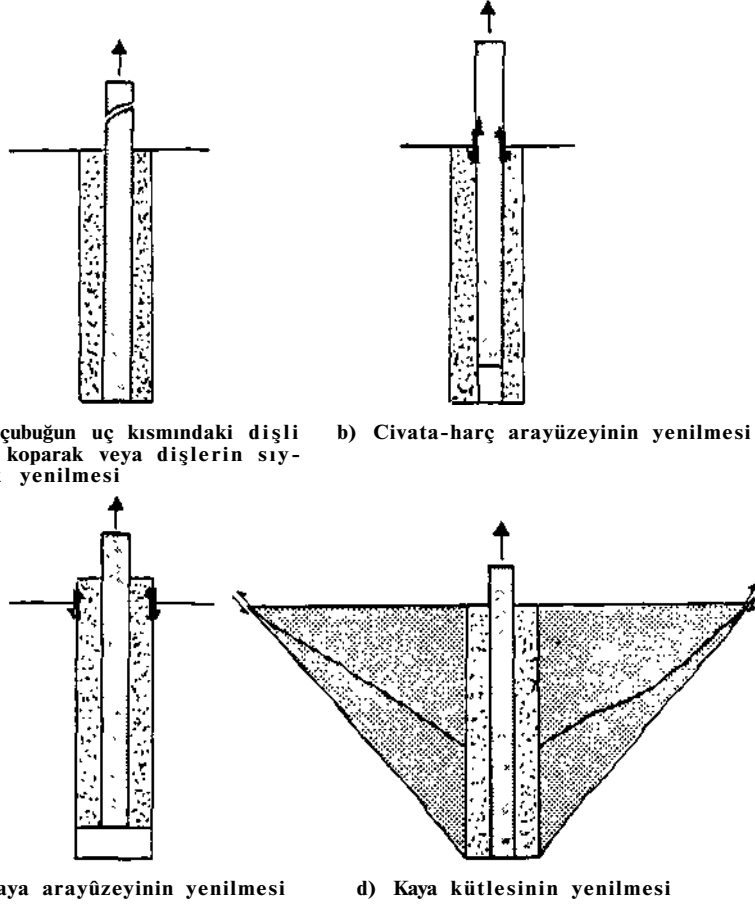
## 2. ÇEKME DENEYLERİ

Kaya cıvatalarının çekme deneyleri hem laboratuvarında hem de arazide en azından taşıma kapasitelerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu testlerden elde edilen sonuçlara göre kaya cıvatalarının taşıma kapasiteleri ile gerilme dağılımı şeklinin oldukça değiştiği görülmüştür. Littlejohn ve Bruce, Gilkey ve arkadaşlarının deneysel çalışmalarına dayanarak bir çekme deneyinin değişik safhalarındaki çelik çubuk içinde ve civarında oluşan gerilme dağılımlarını genelde şu şekilde tartışmaktadır(2). Çubuğun yükün uygulandığı ucu civarında büyük kesme kuvvetleri oluşmakta ve kısmi kaymayla birlikte çekme ve kesme gerilmeleri devamlı bir şekilde yükün uygulandığı uçtan uzak kısma doğru taşınmaktadır. Kesme gerilmelerinin yüksek olduğu bölge çekip çıkarmaya çalışan kuvvetin artmasına bağlı olarak yükün uygulandığı uçtan uzaklaşırlar.

Çekme deneyleri esnasında harçlı kaya cıvatası aşağıdaki 4 yenilme biçiminden birinde veya bunların birkaçının birleşik bir şeklinden etkilenirler(3 ve 4).

- a) Demir çubuğun uç kısmındaki dişli kısmın kopup veya dişlerin sıyrılıp yenilmesi
- b) Cıvata harç ara yüzeyinin yenilmesi
- c) Harç kaya ara yüzeyinin yenilmesi
- d) Kaya kütlelerinin yenilmesi

Kaya cıvatasının bu yenilme biçimleri Şekil 1 'de verilmiştir. En az karşılaşılan yenilme biçimi d olup, burada kaya kütlesi tepe açısı 60 ile 90 arasında değişen bir koni şeklinde yenilmektedir(5).



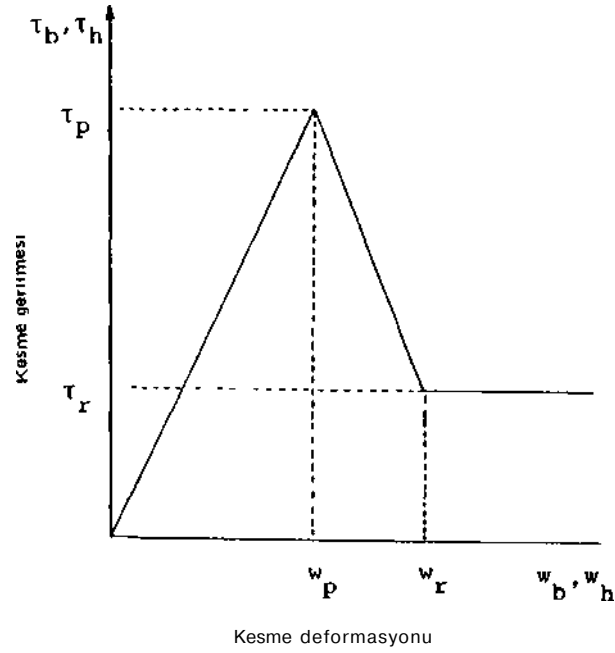
Şekil 1— Çekme deneylerinde görülen yenilme biçimleri

Yenilme biçimi b ve c gerçekte en fazla görülen yenilme biçimidir. Yenilme ya civata-harç veya harç-kaya ara yüzeyinin kesmeye uğrayıp civata veya civata ve harcın birlikte sıyrılıp çıkması şeklinde olur. Yenilmenin hangi ara yüzeyde olacağı, yüzeylerin kesme dayanımlarına ve bu ara yüzeylerdeki kesme gerilmelerinin değerine bağlıdır. Ara yüzeylerin kesme dayanımları ise civatanın içinde bulunduğu deliğe etki eden yan basınç, malzemeler arasındaki adhezyona, delik ile civata yüzeyinin şekline (düzgün veya pürüzlü, nervürlü veya nervürsüz vs.) bağlıdır, örneğin Nagano ve Takagi kaya civatalarının yüzey şeklinin, civataların taşıma kapasitelerinin değerinde nasıl etkin olduğunu deneysel olarak güzel bir şekilde sunmaktadır(6). Neticelerine göre, nervürlü çubukların taşıma kapasitesi nervürsüz çubukların taşıma kapasitesinin en az 2 katı olup, nervürler arası aralık arttıkça daha büyük taşıma kapasiteleri elde edilmektedir. Delik civarındaki yan basınç gerilmeleri ise civataların taşıma kapasitelerini ve yenilme sonrası özelliklerini değiştirmektedir.

Çelik çubukların yenilmesi ya çelik çubuğun çekmeyle kopup kırılması veya dişlerinin sıyrılması şeklinde olur (3 ve 7). Bundan sonraki konularda sadece b ve c tipi yenilme ele alınacaktır.

Kaya civataları ile ilgili ilk analitik çalışmaların, Hawkes ve Evans'ın beton içindeki çelik çubuklarla ilgili çalışmayla başlatıldığı söylenebilir. Daha sonra Phillips aynı çözümü biraz daha geliştirmiştir(8). Farmer reçineli civatalarla ilgili olarak oldukça detaylı bir çözüm sundu(7). Yazarın çözümünde sadece elastik davranışı göz önüne alması ve de delik cidarının rijid olduğunu kabul etmesi nedeniyle kullanım alanı oldukça kısıtlıdır. 1982'de Kitatsu ve Nishimura civata-harç ara yüzeyinin elastik-mükemmel veya gevrek plastik davranışı göz önüne alan yeni bir çözüm geliştirdi(9). Yazarların çözümlerinde delik cidarının Farmer'da olduğu gibi rijid olduğunu kabul etmeleri ve aynı zamanda zayıflama (softening) olgusunu dikkate almamaları nedeniyle bu çözümün kullanım alanı kısıtlı hale gelmektedir.

Aydan ve arkadaşlarının geliştirdikleri çözümlerde değişik mekanik davranışlar ve kaya kütlelerinin belirli bir kısma kadar deforme olabilme koşulları kullanılmıştır(10,11, ve 12). Bu nedenle yazarlar diğer çözümlere kıyasla sundukları çözümlerin, kaya civatalarının taşıma kapasiteleri ile gerilme durumlarını tespit etmede oldukça gerçekçi olacağı kanısındadırlar.



Şekil 2— Arayüzeylerin kesme davranışları

### 3. ARA YÜZEYLERİN MEKANİK DAVRANIŞI VE TEORİK ÇÖZÜM

#### 3.1. Ara Yüzeylerin Mekanik Davranışı

Ara yüzeylerin mekanik davranışı elastik-zayıflama-plastik olarak Şekil 2'de gösterildiği gibi kabul edilmiştir. Elastik bölgede, ara yüzeyin davranışı en büyük dayanım noktasına kadar lineer elastik olup ara yüzeyin dayanımı oluşan teğetsel (kesme) deformasyona (yer değiştirmeye) bağlı olarak zayıflama bölgesinde lineer olarak azalır. Plastik akma bölgesinde ise, kalıcı dayanım bütün bölge için sabittir. Zayıflama bölgesinde ara yüzeylerin kesme gerilmesi ( $T$ ,  $T^g$  ve  $r^g$ ) ile kesme deformasyonu ( $w^g$ ,  $w^r$  ve  $w^p$ ) arasında aşağıdaki ilişkilerin var olduğu kabul edilir. Buradaki indekslerden b civatayı, r kayayı, g harcı, p plastik bölgeyi ve bg ise civata-harç ara yüzeyini simgelerler.

Civat-harç ara yüzeyinde

$$\tau_b = \tau_p^{bg} - \frac{(w_b - w_b^p)}{(w_b^r - w_b^p)} (\tau_p^{bg} - \tau_r^{bg}) \quad (1)$$

Burada

$$w_b^p = \frac{\tau_p^{bg}}{k_g} \quad w_b^r = \gamma w_b^p$$

Harç-kaya ara yüzeyinde

$$\tau_h = \tau_p^{gr} - \frac{(w_h - w_h^p)}{(w_h^r - w_h^p)} (\tau_p^{gr} - \tau_r^{gr}) \quad (2)$$

Burada

$$w_h^p = \frac{\tau_p^{gr}}{k_r} \quad w_h^r = \gamma w_h^p$$

Plastik akma bölgesinde ise ara yüzeylerin kesme dayanımları ve deformasyonları arasındaki ilişkiler şu şekilde kabul edilir.

Civat-harç ara yüzeyinde

$$\tau_b = \eta \tau_p^{bg} \quad (3)$$

Burada

$$\eta = \frac{\tau_r^{bg}}{\tau_p^{bg}}$$

Harç-kaya ara yüzeyinde

$$\tau_h = \eta \tau_p^{gr} \quad (4)$$

Burada

$$\eta = \frac{\tau_r^{gr}}{\tau_p^{gr}}$$

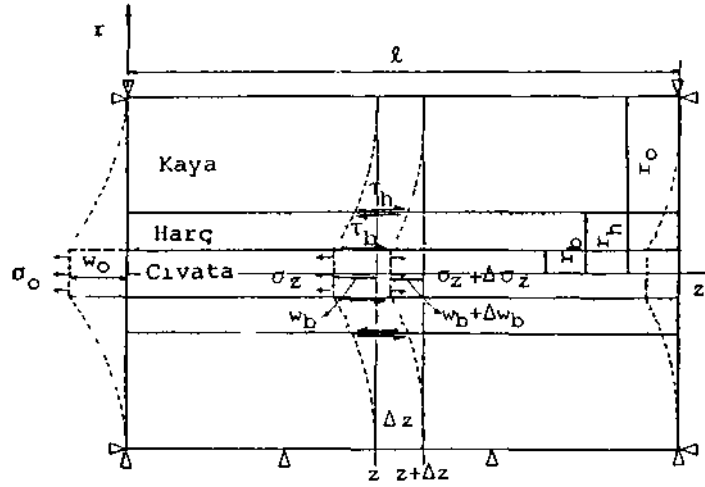
### 3.3. Teorik Çözüm

Harçlı bir kaya civatasında ve civarındaki gerilme ve deformasyon durumu Şekil 3'de görüldüğü gibi gösterilebilir. Bir kaya civatasına bir çekme kuvveti uygulandığında bu kuvvet harca ve kayaya kesme gerilmeleri olarak ara yüzeyler aracılığıyla aktarılacaktır (7 ve 13). Şekilde zile z + Δz arasındaki ince olan aksel simetrik bir dilimde bu transfer matematik olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{2}{r_b} \tau_b = 0$$

Şayet civata elastik olarak davranıyorsa bu ilişki aşağıdaki hale dönüşür

$$\tau_b = \frac{E_b r_b}{2} \frac{d^2 w_b}{dz^2} \quad (6)$$



Şekil 3— Harçlı bir kaya civatasında gerilme ve deformasyon durumu ve notasyon

Harç ve kaya içindeki denge şartı ise silindirik koordinatlar cinsinden aşağıdaki gibi verilebilir (7 ve 14).

$$\frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (7)$$

Yukarıdaki denge denklemlerinde Çizelge Vde verilen sınır koşulları ile malzeme koşulları kullanıldığında plastik akma, zayıflama ve elastik bölgelerde gerilme ve deformatyonlarla ilgili çözümler kolaylıkla elde edilebilir. Yazarlar çözümlerin nasıl yapıldıklarını başka bir yazılarında göstermiş olmaları nedeniyle burada bu formüller toplu bir şekilde Çizelge 1'de verilecektir (10, 11 ve 12). Çizelge 2'de ise her bir ara yüzeyin yenilmesi hali için civata içindeki  $f_z$  gerilmesi, civatanın deformatsiyonu WL ve harç-civata ara yüzeyindeki kesme gerilmesi  $r$  verilmiştir.

#### 4. NÜMERİK UYGULAMALAR VE TARTIŞMA

İlk nümerik uygulamada kaya civataları ile kayanın elastisite modülüsleri oranının etkisi gösterilmiştir. Burada sistem kaya ve civatadan oluşmakta ve kaya ile civata arasında mükemmel bir bağın (bond) olduğu kabul edilmiştir. Şekil 4'de civata içindeki çekme gerilmesi ile civata-harç ara yüzeyindeki kesme gerilmesinin dağılımları değişik kaya ile civataya ait elastisite modülü oranları için gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere gerilmelerin dağılımı oldukça ortamı *oluşturan* malzemelerin elastisite modülü oranından etkilenmektedir. Sağlam ve sert kayalarda eğri eksponansiyel bir halde iken zayıf kayada doğrusal bir şekil almaktadır. Bu eğriden çıkarılabilecek sonuçlardan bir tanesi sert kayalarda yükün uygulanacağı uçta gerilme yoğunlaşmasının olacağı ve kaya civatasının tamamının yük almasının mümkün olmayacağıdır. Bu nedenle kaya civatalarının yük taşıma yeteneğinin belirlenmesinde kullanılan aşağıdaki formülün kullanılması kesme dayanımının uniform olması nedeniyle uygun değildir.

$$P = 2 \pi r_b l T \quad (8)$$

Burada

$P$  = civatanın taşıyacağı yük

$r_b$  = civatanın yarıçapı

$l$  = civatanın boyu

$T$  = kaya veya harcın kesme dayanımı (Genellikle zayıf olanının tek e' nli dayanımının 1/10'u olarak alınır.)

Zayıf kayalarda ise gerilme uniform hale gelmekte başka bir deyişle civatanın taşıma kapasitesinin belirlenmesinde yukarıdaki formülün kullanılması uygun hale gelmektedir. Bu nedenle uygulamada, sık sık kullanılan yukarıdaki formülün kullanılabilme sınırları iyice bilinmelidir.

Çizelge 1— Çözümlerde kullanılan sınır ve malzeme koşulları

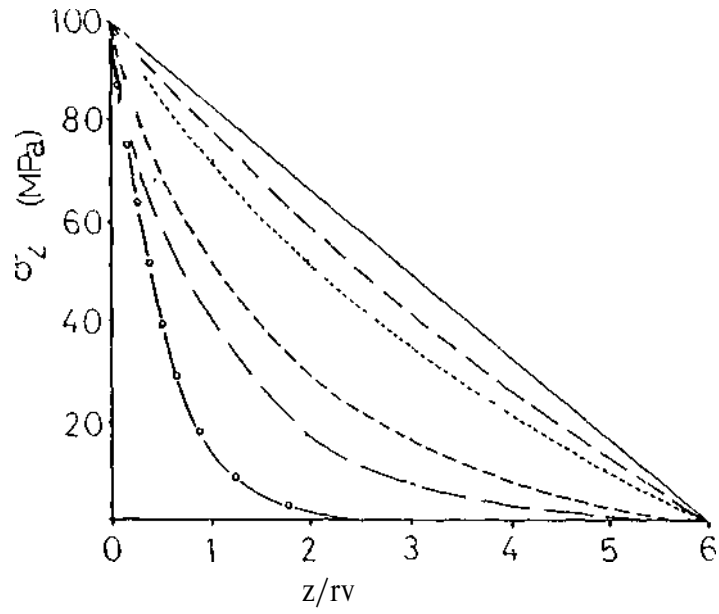
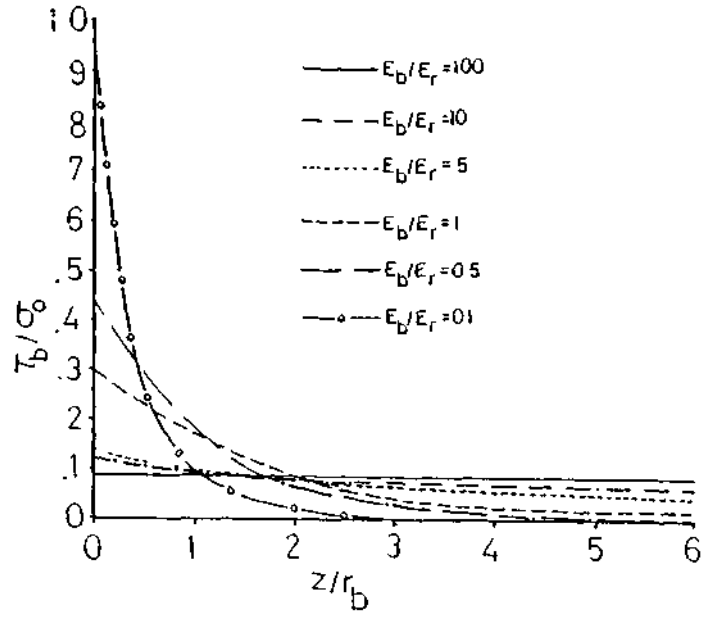
| Elastik $\tau_b$ ve $\tau_h$ ile ilgili sınır koşulları | $r=r_h$ de $w_{rz} = -w_h$<br>$r=r_b$ de $w_{rz} = -w_b$               | $r=r_0$ da $w_{rz} = 0$<br>$r=r_h$ de $w_{rz} = -w_h$                  |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Yenilme tipi                                            | Yenilme harç-kaya arayüzünde                                           |                                                                        |
| Genel gözlemlerle ilgili sınır koşulları                | $z=0$ da $\sigma_z = \sigma_0$<br>$z=t_1$ de $\tau_b = \tau_p^{bg}$    | $z=0$ da $\sigma_z = \sigma_0$<br>$z=t_1$ de $\tau_h = \tau_p^{gr}$    |
|                                                         | $z=t_1$ de $\tau_b = \tau_p^{bg}$<br>$z=t_2$ de $\tau_b = \tau_p^{bg}$ | $z=t_1$ de $\tau_h = \tau_p^{gr}$<br>$z=t_2$ de $\tau_h = \tau_p^{gr}$ |
|                                                         | $z=l$ de $\sigma_z = 0$<br>$z=t_2$ de $\tau_b = \tau_p^{bg}$           | $z=l$ de $\sigma_z = 0$<br>$z=t_2$ de $\tau_h = \tau_p^{gr}$           |



Çizelge 2— Çözümlerde kullanılan denklemler

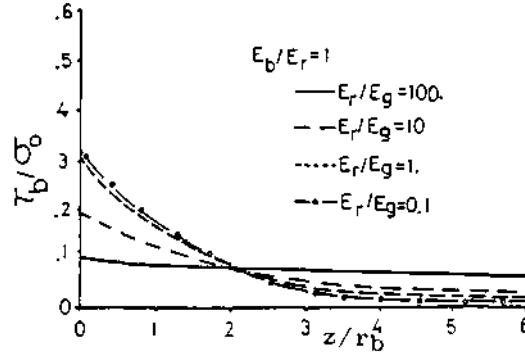
|                                                                | Yenilme civata-harç arayüzeyinde | Yenilme harç-kaya arayüzeyinde                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Plastik alma bölgesi<br>(Plastic flow region)<br>$0 < z < t_1$ | $w_D$                            | $= \frac{\eta \tau_p^{bg}}{E_b r_b} z^2 - \frac{\sigma_0}{E_b} z + w_0$                                                                                           | $= w_0 - \frac{\sigma_0}{E_b} z + \frac{\eta \tau_p^{gr}}{E_b r_b} \frac{k_g}{k_r} \kappa z^2$                                                                         |
|                                                                | $\tau_D$                         | $= \eta \tau_p^{bg}$                                                                                                                                              | $= \frac{k_g}{k_r} \kappa \eta \tau_p^{gr}$                                                                                                                            |
|                                                                | $\sigma_z$                       | $= \sigma_0 - \frac{2\eta \tau_p^{bg}}{r_b} z$                                                                                                                    | $= \sigma_0 - \frac{k_g}{k_r} \kappa \frac{2\eta \tau_p^{gr}}{r_b} z$                                                                                                  |
| Zayıflama bölgesi<br>(Softening region)<br>$t_1 < z < t_2$     | $w_D$                            | $= \tau_p^{bg} \left[ \beta \left( \frac{(A-\eta B) \cos(pz) + (\eta C-D) \sin(pz)}{\sin(p(t_2-t_1))} \right) + \frac{\gamma-\eta}{1-\eta} \frac{1}{k_g} \right]$ | $= \tau_p^{gr} \left[ \beta \left( \frac{(A-\eta B) \cos(pz) + (\eta C-D) \sin(pz)}{\sin(p(t_2-t_1))} \right) + \frac{\gamma-\eta}{1-\eta} \frac{\kappa}{k_r} \right]$ |
|                                                                | $\tau_D$                         | $= \tau_p^{bg} \left( \frac{(\eta A-B) \cos(pz) + (D-\eta C) \sin(pz)}{\sin(p(t_2-t_1))} \right)$                                                                 | $= \tau_p^{gr} \left( \frac{(\eta A-B) \cos(pz) + (D-\eta C) \sin(pz)}{\sin(p(t_2-t_1))} \right) \frac{k_g}{k_r} \kappa$                                               |
|                                                                | $\sigma_z$                       | $= \frac{\tau_p^{bg} \beta E_b}{k_g} \left( \frac{(A-\eta B) \sin(pz) + (D-\eta C) \cos(pz)}{\sin(p(t_2-t_1))} \right)$                                           | $= \kappa \frac{\tau_p^{gr} \beta E_b}{k_r} \left( \frac{(A-\eta B) \sin(pz) + (D-\eta C) \cos(pz)}{\sin(p(t_2-t_1))} \right)$                                         |
| Elastik bölge<br>(elastic region)<br>$t_2 < z < l$             | $w_D$                            | $= \frac{\tau_p^{bg}}{k_g} \frac{\exp(\alpha(z-t_2)) + \exp(\alpha(2l-t_2-z))}{\exp(2\alpha(l-t_2))+1}$                                                           | $= \frac{\tau_p^{gr}}{k_r} \frac{\exp(\alpha(z-t_2)) + \exp(\alpha(2l-t_2-z))}{\exp(2\alpha(l-t_2))+1} \kappa$                                                         |
|                                                                | $\tau_D$                         | $= \tau_p^{bg} \frac{\exp(\alpha(z-t_2)) + \exp(\alpha(2l-t_2-z))}{\exp(2\alpha(l-t_2))+1}$                                                                       | $= \tau_p^{gr} \frac{\exp(\alpha(z-t_2)) + \exp(\alpha(2l-t_2-z))}{\exp(2\alpha(l-t_2))+1} \frac{k_g}{k_r} \kappa$                                                     |
|                                                                | $\sigma_z$                       | $= \frac{\tau_p^{bg} \alpha E_b}{k_g} \frac{\exp(\alpha(2l-t_2-z)) + \exp(\alpha(z-t_2))}{\exp(2\alpha(l-t_2))+1}$                                                | $= \frac{\tau_p^{gr} \alpha E_b}{k_r} \frac{\exp(\alpha(2l-t_2-z)) + \exp(\alpha(z-t_2))}{\exp(2\alpha(l-t_2))+1} \kappa$                                              |
| Civatanın yığılma ve gerilme def. ve ger.                      | $\epsilon_0$                     | $= \frac{\sigma_0}{E_b} \epsilon_1 + \frac{\tau_p}{k_g} \left( \gamma - \frac{\eta k_g}{E_b r_b} t_1^2 \right)$                                                   | $= \frac{\sigma_0}{E_b} \epsilon_1 + \kappa \frac{\tau_p^{gr}}{k_r} \left( \gamma - \frac{\eta k_g}{E_b r_b} t_1^2 \right)$                                            |
|                                                                | $\sigma_0$                       | $= \tau_p^{bg} \left( \frac{\beta E_b}{k_g} \left( \frac{1-\eta \cos(p(t_2-t_1))}{\sin(p(t-t_1))} \right) + \frac{2\eta}{r_b} t_1 \right)$                        | $= \tau_p^{gr} \left( \frac{\beta E_b}{k_r} \left( \frac{1-\eta \cos(p(t_2-t_1))}{\sin(p(t-t_1))} \right) + \frac{k_g 2\eta}{k_r r_b} t_1 \right) \kappa$              |

$$\alpha = \left( \frac{2k_g}{E_b r_b} \right)^{1/2} \quad \beta = \left( \frac{2k_g}{E_b r_b} \frac{1-\eta}{\gamma-1} \right)^{1/2} \quad \gamma = \frac{\kappa-1}{\kappa} \quad \epsilon_1 = \frac{G_g}{r_b \ln(r_h/r_b)} \quad \kappa_r = \frac{G_r}{r_h \ln(r_o/r_h)} \quad \kappa = \frac{G_r}{G_g} \frac{\ln(r_h/r_b)}{\ln(r_o/r_h)} + 1 \quad A = \sin(p t_1) \quad B = \sin(p t_2) \quad C = \cos(p t_2) \quad D = \cos(p t_1) \quad \beta = \frac{\gamma-1}{1-\eta}$$



Şekil 4— Cıvata ile kayanın değişik elastik modulleri oranlarına bağlı olarak cıvata-harç arayüzeyinde ve cıvata içinde derinliğe göre gerilmelerin dağılımları

İkinci uygulamada sistemi oluşturan malzemelerin civata, narç ve kayadan oluştuğu göz önüne alınmış ve harcın elastisite modülünün gerilme dağılımına etkisi incelenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5— Harcın elastisite modülünün etkisi

Şekilden de görüleceği üzere civata ve kayanın elastisite modülünün etkisi en önemlidir. Harcın elastisite modülünün kayaninkinden küçük olması halinde harcın elastisite modülünün etkisi oldukça önemli olmasına karşın kayaninkini geçtiğinde birden bire ihmal edilebilecek hale gelmektedir. Başka bir deyişle, sağlam kayalarda civataların kullanılması halinde harcın elastisite modülünü küçük seçmekle mümkün gerilme yoğunlaşması azaltılabilir.

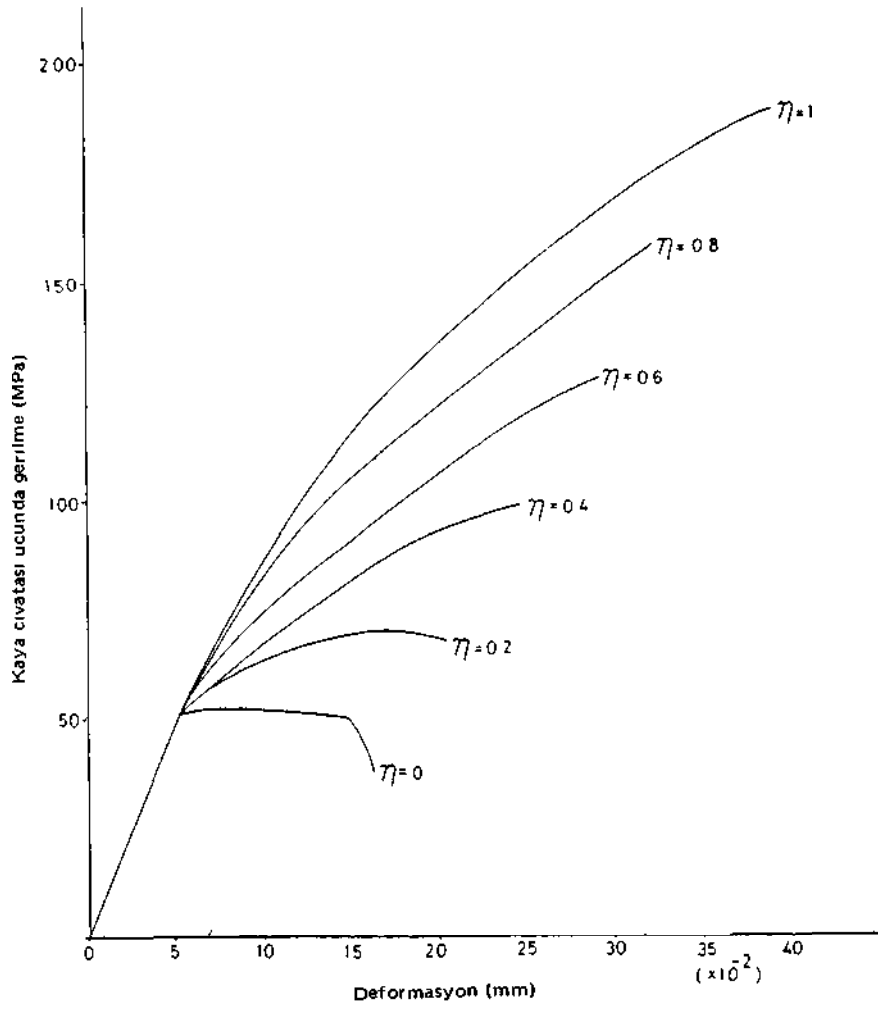
Üçüncü uygulamada yazarlar kaya ve civataların poisson oranlarının gerilmeye olan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışma ile ilgili şekiller sunulmamasına karşın çalışmaların neticeleri kısaca şu şekilde özetlenebilir.

a) Kaya ve harcın poisson oranlarının artması yükün uygulandığı uçtaki gerilme yoğunlaşmasını azaltmaktadır.

b) Kayanın poisson oranındaki artışın etkisi harcınkine nazaran daha büyüktür.

Yukarıdaki sonuçların doğruluğu bundan sonra yapılacak sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde daha detaylı olarak incelenecektir.

Dördüncü uygulamada elastik-gevrek plastik bir davranıştan elastik-mükemmel plastik bir davranışa kadar değişen davranış gösteren harç-civata ara yüzeyine sahip bir civatanın ucuna tesir eden gerilme  $\sigma_0$  ( $P_0 = \sigma_0 H r_b^2$ ) ile deformasyon ( $w_0$ ) eğrisinin değişimi incelenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6— Elastik-mükemmel plastik davranıştan elastik-gevrek plastik davranışa kadar değişik davranış gösteren bir civata-harç arayüzeyine sahip bir kaya civatasının yük-deformasyon eğrileri

Çizelge 3- Kullanılan malzeme özellikleri (4. Uyg.)

| Kaya     |       | Harç     |       | Civata   |       | $\tau_{p}^{bg}$<br>MPa | $\gamma$ | $\eta$ | $r_b$<br>cm | Boyutlar    |             |           |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|------------------------|----------|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| E<br>GPa | $\nu$ | E<br>GPa | $\nu$ | E<br>GPa | $\nu$ |                        |          |        |             | $r_h$<br>cm | $r_o$<br>cm | $l$<br>cm |
| 27       | .3    | 9.8      | .25   | 210      | .3    | 4                      | 3.1      | 0.1    | 1.1         | 1.8         | 100         | 56        |

Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3'de verilmiştir. Şekilden çıkarılacak anlam yenilme sonrası kalıcı dayanımının civatanın taşıma kapasitesinin miktarında nasıl etkin olduğunu göstermesidir.

Besinci uygulamada ise elastik-zayıflama-plastik akma şeklinde bir davranış göz önüne alınmıştır. Analizde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 4'de verilmiş olup, yenilmenin harç-cıvata ara yüzeyinde olduğu kabul edilmiştir. Şekil 7'de civatanın yüklenme eğrisi, değişik yük seviyelerinde cıvata içinde ve civarındaki gerilmelerin dağılımı gösterilmiştir. Tebliğin girişinde sözü edilen gerilme dağılımının değişimi, ilk yazarın geliştirdiği teori ile kolaylıkla matematiksel olarak hesaplanabilmektedir. Yük-deformasyon eğrisi ve gerilme dağılımları niteliksel olarak yapılmış çekme deneyleri ile iyi bir uyum içerisindedir. Özellikle analiz neticesi elde edilen deformasyon miktarı deneysel neticelerden daha küçüktür. Bu büyük bir olasılıkla Nagano ve Takagi'nin de(6) işaret ettiği üzere çekme deneyleri esnasında ölçülen cıvata ucu deformasyonunun gerçek deformasyon olmamasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi çekme kuvvetini veren hidrolik piston ile kaya civatasının arasındaki bağlantıyı sağlayan kavrama'nın dişli kısmına yük uygulandığında dişli kısımda gerilme yoğunlaşması olmaktadır. Bu yoğunlaşma tüm kesitin plastik hale geçmesinden evvel dişli kısmın plastik hale geçmesine dolayısıyla büyük deformasyonlara neden olmaktadır. Bu nedenle bundan sonra yapılacak çekme deneylerinde bu hususa gereken önemin verilmesi gerekir.

Çizelge 4- Kullanılan malzeme özellikleri (S. Uyg.)

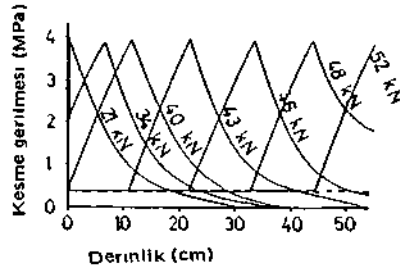
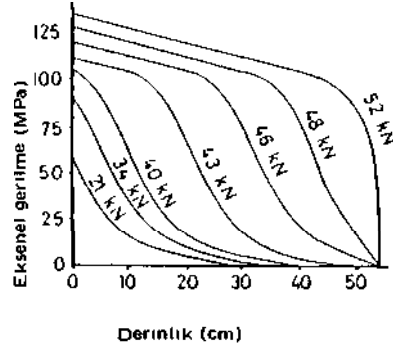
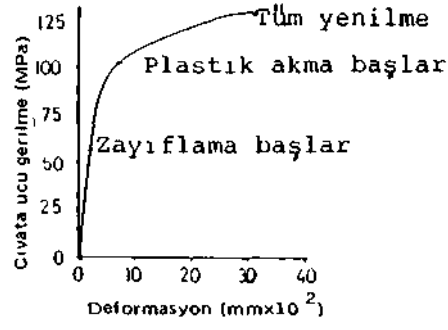
| Kaya     |       | Harç     |       | Cıvata   |       | $\tau_{bg}$<br>rvfpa | Boyutlar    |             |             |    |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------------------|-------------|-------------|-------------|----|
| E<br>GPa | $\nu$ | E<br>GPa | $\nu$ | E<br>GPa | $\nu$ |                      | $r_b$<br>cm | $r_h$<br>cm | $r_o$<br>cm | cm |
| 10.      | .2    | 4.5      | .17   | 210      | .3    | 2.5                  | 2.          | 2.85        | 80          | 80 |

## 5. SONUÇLAR

Bu yazıda sunulan çözümlerle kaya civatalarının taşıma kapasiteleri ve içinde ve civarındaki gerilme dağılımları gerçekçi bir şekilde hesaplanır.

Gerilme dağılımlarında en önemli etmen kaya ve civatanın mühendislik özellikleri olup harcın etkisi ikincildir. Harç kayadan daha sağlam olması halinde harcın mühendislik özelliklerinin etkisi oldukça azalmaktadır.

Ara yüzeylerin mekanik davranışlarının etkisi kaya civatasının taşıma kapasitesinde oldukça önemlidir. Dolayısıyla kaya civataları ile ilgili yapılacak çalışmalarda, bu ara yüzeylerin sistemde zayıflık yüzeylerini oluşturmaları nedeniyle taşıma kapasiteleri ve tahkim edici etkilerini hesaplamak için bu yüzeylerin mühendislik özellikleri kullanılmalıdır.



Şekil 7— Cıvata içinde ve civarında gerilme dağılımı ve yükdeformasyon eğrisi

## KAYNAKLAR

1. DUNHAM, R.K.: Some Aspects of Resin Anchored Rock Bolting, Tunnels and Tunnelling, July, 1973
2. LITTLEJOHN, G.S. and BRUCE, D.A.: Rock Anchors-State of the Art, Part 1, Design-Ground Engineering, July, 1975
3. BROWN, D.G.- Uplift Capacity of Grouted Rock Anchors, Ontario Hydro Research Quaterly, Vol. 22, 1970
4. LITTLEJOHN, G.S. and BRUCE, D.A.: Rock Anchors-Design and Quality Control, Procs. 16 th U.S. Symp. Rock Mechs., 1977
5. BALIVY, G and MARTIN, A.: The dimensioning of grouted Anchors, Procs. Int. Symp. Rock Bolting, Abisko, 1983
6. NAGANO, T and TAKAGI, Y.- Pull-out Test of Rock Bolts (in Japanese), Tunnels and Underground, Vol. 13, 1982
7. FARMER, I.w.. Stress Distribution along a Resin Grouted Anchor, Int. I. Rock Mech. Min. Sei., Vol. 12, 1975
8. PHILLIPS, S.: Factors Affecting the Design of Anchorages in Rock, Cementation Research Report, R48/70, Cementation Research Ltd., Rickmansworth, 1970
9. KITATSU, T. and NISHIMURA, M.: Fundamental Research into Interaction Mechanism between Rockmass and Rockbolts (in Japanese), Omura Corp., Annual Report of Technology, No. B, 1982
10. AYDAN, o.: Nev Analytical Solutions for Stresses and Displacements of Rockbolts Considering Elastik-Softenin-Plastic Flow Behaviour of the Bolt-Grout interface. Internal Report, Geotech. Eng. Dept., Nagoya University, July, 1984
11. AYDAN, O., KAWAMOTO, T., ICHIKAWA, Y. and ERSEN, A.: Kaya Cıvatalarının İçinde ve Cıvarında ekme Deneyleri Eshnasında Oluşan Gerilme, Birim Deformasyon ve Yer Deęiřtirmelerle ilgili Yeni bir Analitik ozum, Yayınlanmak üzere Madencilik, Mart, 1985
12. AYDAN, o., ICHIKAWA, Y. and KAWAMOTO, T.: Load Bearing Capacity and Stress Distributions in/along Rockbolts with Inelastic Behaviour of Interfaces, to be Appeared in Procs. 5th Int. Symp.
13. HANS, K. Zur Wirkungsweise und Belastbarkeit von Einbetonierten Ankern, Bergakademie, Nov. 1969
14. JOHN, CM. and Van Diller, D.F. Rockbolts: A new Numei.cal Representation and its Application in Tunnel Design, 24 th U.S. Symo. Rock Mechns., 1983

