

KARADENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
GEOTEKNİK DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

MERKEZ	10503
Fİyat	100

TEZ NUMARASI

Genel :

Anabilim dalı :

Program :

TÜNEL MEKANIĞI
VE
KAPLAMALARININ PROJELENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa AYTEKİN

Yönetici : Doç.Dr. Akın ÖNALP

Trabzon, 1985

ÖNSÖZ

Girişilen ve ele alınacak hidroelektrik, sulama-su getirme-kanalizasyon ve ulaşım yapıları nedeniyle yurdumuz inşaat mühendisliği çalışmalarında tüneller önemli yer tutmaktadır. Bu çalışmada tünellerin projelendirilmesinde öncelik taşıması gereken analitik ve sayısal çözüm yöntemleri ele alınmıştır. Zemin-destek etkileşiminin iyi anlaşılmasıyla güvenlik yanında düşük maliyet sağlanabileceği görülmektedir.

Bilgisayar hesapları Karadeniz Üniversitesi Elektronik Hesap Bilimleri Enstitüsünde (EHBE) gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarının her aşamasında bana yol gösteren ve büyük yardımlarını gördüğüm Hocam Sayın Doç.Dr. Akın ÖNALP'e teşekkürlerimi sunarım. Şekilleri itina ile çizen Ersegün Serdar'a, tezi daktilo eden Temel Tosun'a teşekkür ederim.

Mustafa AYTEKİN

1985, Trabzon

İÇİNDEKİLER

ÖZET

SİMGELER

1. GİRİŞ	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI	1
1.2. TARİHSEL GELİŞİM	1
1.3. TÜNEL TASARIMI	2
2. DESTEKLEME KAVRAMI	3
2.1. DESTEK TEORİSİ	3
2.2. AMPİRİK DESTEK HESABI	6
2.3. KATMAN YÜKÜ YAKLAŞIMI	8
3. ANALİZ YÖNTEMLERİ	11
3.1. TEORİK ELASTİSİTE ANALİZİ	11
3.2. PLASTİK BÖLGE KAVRAMI	15
3.3. DEFORMASYONLARIN ROLÜ	18
3.4. TEPKİME EĞRİLERİ	19
3.5. KIRILMA TEORİLERİ	22
3.6. TEPKİME EĞRİLERİNİN ELDE EDİLMESİ	29
3.6.1. Şekil ve Yerdeğiştirmeler	33
3.6.2. Zemin (Temel) Tepkime Eğrileri	36
3.6.3. Stepwise (Adım Adım Yaklaşarak) Çözümü	37
3.6.4. Adım Adım Çözümde Şekil ve Yerdeğiştirmeler	38
3.6.5. Gerilmeler	39
4. TÜNEL KAPLAMALARININ BASİT OLARAK PROJELENDİRİLMESİ	44
4.1. PROJELENDİRMEDEKİ YAKLAŞIM	44
4.2. KAPLAMA'nın ANA ÖZELLİKLERİ	44
4.3. ÇERÇEVE MODELİ	45
4.4. KAPLAMA ELEMANLARI VE DÜĞÜM NOKTALARI	46
4.5. AKTİF BASINÇLAR	48
4.6. PASİF REAKSİYONLAR VE ÇUBUK ELEMANLAR	49
4.7. ÇUBUK ELEMANLARIN GEVŞETİLMESİ İŞLEMİ	50
4.8. ELEMAN YEREL KOORDİNAT SİSTEMİ	53
4.9. MAFSALLI KAPLAMA BAĞLANTILARI	54

4.10. TİP ANALİZLERİ	54
4.10.1. Çatlaksız Simetrik Kesit	55
4.10.2. Çatlaksız Asimetrik Kesit	56
4.10.3. Donatılı Kesit	57
4.10.4. Kaplama Programının Uygulaması	61
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKÇA	70
EK-I BİLGİSAYAR PROGRAMININ KULLANIMI	72
EK-II DONATILI KESİTTE TARAFSIZ EKSEN, KESİT ÖZELLİKLERİ VE GERİLMELERİN HESABI	75
EK-III PROGRAMIN LİSTESİ	82

SİMGELER

- A : Kesit alanı
- a : Plastik bölgenin dış sınırından, tünelin merkezine olan uzaklık
- A_{s1}, A_{s2} : Donatı kesit alanları
- B : Destek sağlanmadan yapılabilecek kazı limiti
- b : Kesit genişliği
- c : Kohezyon
- E : Elastisite modülü
- e : Eksantirisite
- E_c : Betonun elastisite modülü
- E_s : Çeliğin elastisite modülü
- ESR : Kazı destek oranı (Excavation support ratio)
- F_{c1} : Kaplama intradosundaki beton gerilmesi
- F_{c2} : Kaplama ekstradosundaki beton gerilmesi
- F_{s1} : Kaplama intradosundaki donatı gerilmesi
- F_{s2} : Kaplama ekstradosundaki donatı gerilmesi
- G : Kayma modülü
- H_p : Katman yükü
- H_t : Tünel yüksekliği
- h : Kesit yüksekliği
- I : Atalet momenti
- J_a : Çatlak düzeltme sayısı (Joint alteration number)
- J_n : Çatlak sistemi sayısı (Joint set number)
- J_r : Çatlak pürüzlülük sayısı (Joint roughness number)
- J_w : Çatlaksuyu değişim faktörü (Joint water reduction factor)
- k_s : Yatak katsayısı
- M : Moment
- m : Kaya kütlelerine bağlı bir sabit
- $N=E_s/E_c$: Modül oranı
- p_i : Destek basıncı
- p_{icr} : Kritik destek basıncı
- p_{tav} : Tünelin tavan basıncı
- p_o : Tünele gelen hidrostatik basınç
- Q : Kayaç niteliği katsayısı (Rock mass quality)
- R : Yarıçap
- r : Tünel merkezinden, ortamın herhangi bir noktasına olan uzaklık

- r_e : Tünel merkezinden, plastik bölgenin dış sınırına olan uzaklık
- S : Kesme kuvveti
- s : Kaya kütlelerinin durumuna bağlı bir sabit
- SRF : Gerilme değişim faktörü (Stress raduction fackor)
- T : Normal kuvvet
- u : Şekil değiştirme
- V : Hacım
- V_f : Hacımsal kapanma
- V_v : Kazıdan alınan malzemenin, alınmadan önce doğal gerilmeler sonucu oluşabilecek hacim azalması
- W_f : Kazıdan sonraki birim deformasyon enerjisi
- W_G : Potansiyel kaybı
- W_I : Biriken enerji
- W_i : Kazıdan önceki birim deformasyon enerjisi
- W_R : Serbest kalan enerji
- W_S : W_i ile W_f arasındaki fark
- x : Kaplama kesitinin basınç alan kenarından itibaren tarafsız eksen uzaklığı
- z : Kesit modülü
- δ_i : Radyal genişleme
- ϵ : Birim boy değişimi
- ν : Poisson oranı
- σ : Gerilme
- σ_o : Katman yükü basınç gerilmesi
- σ_c : Malzemenin serbest basınç direnci
- σ_r : Radyal (çevresel) gerilme
- σ_θ : Teğetsel gerilme
- σ_1 : Kırılma anındaki büyük asal gerilme
- σ_3 : Kırılma anındaki küçük asal gerilme
- τ : Kayma gerilmesi
- Φ : Airy gerilme fonksiyonu
- ϕ : İçsel sürtünme (kayma direnci) açısı

ÖZET

Türkiye'de tünellerin kaplamaları analitik yöntemlere dayandırılmadığından uzun süre gereğinden çok daha güvenli yapılmıştır. Burada kaplamaların projelendirilmesinde gerçeğe daha yakın çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışma dört bölüm halinde sunulmaktadır. Birinci bölümde amaca, tünellerin mekaniğindeki gelişim ve tasarıma kısaca değinilmiştir. İkinci bölümde tünellerin kaplamasının kavram olarak ne olduğu verilmeye çalışılmış, bu kavramın anlatılmasında öne sürülen yaklaşımlar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde ise analiz yöntemleri üzerinde durulmuş, yöntemler tarihi gelişim içerisinde sırayla incelenmiştir. Tünellerin mekaniğindeki analiz yöntemlerinden, teoriye dayandırılan ilk yöntem elastisite analizidir. Burada tünellerin açılan ortam homogen, izotrop ve elastiktir. Bu kabul zemin ve kaya için gerçeğe uymaz. Bu analizden sonra zemin ve kaya ortamının özellikleri dikkate alınarak, çözümlerde parametre sayısı artırılmış, örneğin tünellerin çevresinde oluşan plastik bölgenin etkisi dikkate alınmıştır.

Son yıllarda, kaplama ile tünellerin açılan ortam arasındaki etkileşim incelenerek reaksiyon (tepkime) eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerden optimum destek basıncı bulunmakta ve kaplamanın projelendirilmesi buna göre yapılabilmektedir. Dördüncü bölümde kaplamanın projelendirilmesi için hazırlanan bilgisayar programının hangi esaslara dayandırıldığı anlatılmıştır. Kaplamanın çözümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Ekler bölümünde programın kullanım biçimi, listesi ve örnekler verilmiştir. Program geliştirilerek tepkime eğrilerinden bulunan optimum destek basıncı kullanılarak da kaplama analizi yapılabilir.

1. GİRİŞ

1.1 ÇALIŞMANIN AMACI

Türkiye'de tünel yapımının tümüne yakını devlet kuruluşlarının sorumluluğu altında gerçekleştirilmektedir. Buna karşın zemin ve kaya mekaniğinde son yıllarda görülen hızlı gelişmelerin sözkonusu kuruluşların proje bürolarına hızla yansımadağı görülmektedir. Sonuçta tünel kaplamaları genelde gereğinden çok daha güvenli yapılmaktadır. Bunun nedeni ortam basıncının yeterli doğrulukta bilinmemesi, daha da önemlisi zeminin yapılacak kaplama ile ilişkisinin tahmin edilememesidir. Bu çalışmanın amacı projelendirilmenin gerçekçi bir biçimde yapılmasını sağlayacak çözümler önermektir.

1.2 TARİHSEL GELİŞİM

Yeraltı yapıları inşaat yanında, nükleer, petrol, maden ve jeoloji mühendisliği dallarının da yakından ilgili olduğu bir konudur. İnsanlar tarafından belirli boyutlarda açılmış, ortama istenen uzunlukta giren yapılara galeri denir. İki ucu açık ve genellikle taşıma amacıyla geliştirilen yeraltı yapılarına ise tünel adı verilir.

Tünel yapımı ilk önceleri bir sanat dalı olarak ortaya çıkmıştır. Hiçbir teoriye dayanmadan, sadece tecrübelerle dayanarak kazı ve kaplama uzun süre yapılmıştır.

Gerilme analizi ilk kez, problemi düzlemsel kabul edip, üniform ve sonsuz, elastik bir ortamda dairesel bir deliğin çevresindeki gerilmelerin incelenmesiyle Kirsch tarafından yapılmıştır.

Tünelcilik alanındaki çalışmalarla elde edilen bilgilerden stabilitenin, teorik gerilmelerin malzemenin dayanımını aşması durumunda hemen kaybolmadığı anlaşılmıştır. Özellikle kayada ilk zamanlarda "gevşeme bölgesi" olarak adlandırılan bir halkanın tünel çevresinde olduğu ve halka kalınlığı belirli bir limitin üzerine çıkmadan göçme olmadığı izlenmiştir. Daha sonra "plastik bölge" olarak nitelendirilen bu halkanın tünel stabilitesinde önemli rol oynadığı Fenner tarafından gösterilmiştir.⁽⁶⁾

Bu gelişmelerden farklı olarak Terzaghi⁽²²⁾, yeraltı yapılarının kayada "kaya yükü" zeminde ise "toprak yükü" aldığı varsayımından hareket etmiştir. Buna göre, tünel üzerinde yeterli katman yükü bulunmadığında tünelin üzeri açılma eğilimi gösterir ve göçmeler yapılan kazının tümü kapanıncaya kadar sürer.

Son yıllarda tünel mekaniğinde en önemli kavramın zemin-kaplama arasındaki tepkime (reaksiyon) eğrileri ve bunların girişimini gösteren grafik olduğu söylenebilir. Kayaç-zemin yükünü Terzaghi yaklaşımı ile hesaplayan yöntemlerin %10-50 lik bir aşırı tasarıma (over-design) neden olduğu da bu incelemeler sonucu bulunmuştur. Sayısal analiz yöntemlerindeki gelişmeler 1960 tan sonra zemin-destek-kaplama tepkime eğrilerinin ayrıntılı incelenmesine olanak sağlamıştır.

1.3 TÜNEL TASARIMI

Yeraltı yapılarında gerilme analizinin fazla sayıda değişkene bağlı bir problem olduğu bilinmektedir. Jeolojik yapı ve kazı yöntemlerinin getirdiği koşullar tünelde ek sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle de tek başına bir analitik çözümün yapılamayacağı kanısı yaygınlaşmıştır. Bunun doğal sonucu olarak ampirik yöntemler güç kazanmaktadır.

Ayrıntılı jeolojik incelemeler ve sondaj eskiden tünelcilikte uygulanmadığı halde modern uygulamada standart işlem haline gelmiştir. Bu çalışmalardan tünel geçkisinin yeri ve geometrisi değiştirilebilmektedir. Bundan sonra açılan pilot galeride çatlak geometrisi kesin olarak saptanmakta ve bilgisayar belleğine depolanmaktadır.

Sondajdan ve galeriden alınan örneklerin mekanik özellikleri laboratuvarında ölçülürken, yerinde deneylerle de ortamın davranışı hakkında bilgi toplanmaktadır. Bu deneylerde ölçülen önemli parametrelerden biri kayaç kütlesindeki kalıcı gerilmelerdir. Daha sonra analitik çözüme geçilmekte, bu çözüm elastik, elasto-plastik iki veya üç boyutlu elemanlar yöntemi ile yapılabilmektedir.

Günümüzde bu hesaplar sonlu ve sınır elemanlar yöntemleri kullanılarak bilgisayarlarla yapılmaktadır.

2. DESTEKLEME KAVRAMI

2.1 DESTEK TEORİSİ

İnşaat mühendisliğinin birçok dalında olduğu gibi yeraltı yapılarında da kayacın her durumda elastik bölgenin altında gerilmelerde kalmasına özen gösterilir. Böylece konu deformasyonların kontrolü şekline dönüşmektedir. Genel destekleme teorisi yeraltı kazısı yapıldığında elastik ortam varsayımı ile serbest kalan enerjinin incelenmesi ile geliştirilebilir. ⁽¹⁹⁾

V hacminde bir kazı yapıldığında serbest kalan enerji:

$$W_R = \sigma_o V \quad (1)$$

ifadesiyle özetlenebilir.

Serbest kalan enerjiye ek olarak ortamda kazı sonucu oluşan düşey deformasyonlar yatay yönde eşdeğer potansiyel enerji değişimini getirir.

$$W_H = \sigma_2 (\delta V_2) + \sigma_3 (\delta V_3) \quad (2)$$

Kazı düzeyinin üzerindeki kitle, yerküre merkezine doğru hareket edeceğinden potansiyel kaybı da:

$$W_G = \delta V_1 \sigma_1 \quad (3)$$

olur.

Gerekli ara işlemler ve değişimler yapıldığında kazıda oluşan hacimsel kapanma:

$$V_f = \delta (V_1 + V_2 + V_3) - V_v \quad (4)$$

olarak yazılabilmektedir.

V_v kazıdan alınan malzemenin alınmadan önce doğal gerilmeler sonucu oluşabilecek hacim azalmasını göstermektedir. Bu model R_1 yarıçaplı derin bir tünelin hidrostatik çevre basıncı P_o altında davranışında denenebilir. R_2 ortamın kazıdan etkilenmediği üst limit ise kazı yapılmadan önceki birim deformasyon enerjisi halkanın elastik davranışından,

$$W_i = \pi \frac{1+\nu}{1-2\nu} P_o^2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{E} \quad (5)$$

Kazı yapıldıktan sonraki birim deformasyon enerjisi

$$W_f = \pi (1+\nu) p_o^2 \frac{(1-2\nu)R_2^4 + R_2^2 R_1^2}{E(R_2^2 - R_1^2)} \quad (6)$$

olarak yazılır. R_1^2 , R_2^2 ye bağıl olarak ihmal edilirse, tünelden dolayı biriken ek enerji W_i ile W_f arasındaki farktan destek gereksinimi

$$W_s = \pi p_o^2 R_1^2 \frac{(1+\nu)(3-4\nu)}{E} \quad (7)$$

olarak bulunur.

Tünel yapımından dolayı R_2 radyal uzaklıktaki deformasyon

$$U_{21} = \frac{2(1+\nu)(1-\nu)}{(R_2^2 - R_1^2)E} p_o R_1^2 R_2^2 \quad (8)$$

ve $R_2 - R_1$ arasındaki halkanın hacimsel sıkışması $R_2 \gg R_1$ kabulü ile

$$V = \frac{4\pi(1+\nu)(1-\nu)}{E} p_o R_1^2 \quad (9)$$

olarak belirir.

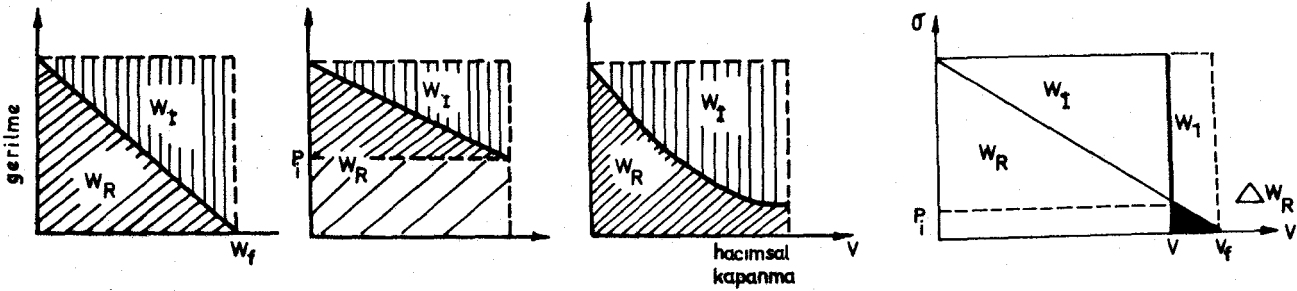
Kitlenin yaptığı iş de:

$$(W_G + W_H) = \frac{4\pi(1+\nu)(1-\nu)}{E} p_o^2 R_1^2 = 2 (W_I + W_V) \quad (10)$$

ifadesiyle verilir.

Bu formülasyon özetlenirse kazı yapıldığında serbest kalan enerjinin hacimsal kapanmaya, kazı çevresinde gerilme yoğunlaşmasında buna ve kazıdan çıkan hacime bağlı olduğu söylenebilir. Kitlede biriken enerjinin geri kazanılabilmesi, bunun da tünel çevresinde kayacın kırılma ve akmasına neden olmaması gerekir. Ancak biriken enerjinin çevredeki diğer kazılarda etkilemesi beklenmelidir. Kayaç ve zeminin yapı çevresinde kırılma nedeni serbest kalan enerjidir.

Destek teorisi Şekil-1'deki eğrilerle açıklanmıştır. Elastik ortamda malzemede kırılma ve akma olmaması durumunda (Şekil-1a) serbest kalan enerji W_R ve deformasyon sonucu biriken enerji W_I ya eşittir. Eğer destek sağlanırsa serbest bırakılan enerji W_R biriken enerjiden (W_I) Şekil-1b'de gösterildiği gibi fazla olacaktır. Stabilite kaybına izin verilirse hacimsal kapanma ve serbest kalan enerji artacaktır (Şekil-1c).



Şekil-1 Elastik destek teorisi

Buradan bir kazı çevresinde kırılma ve akmayı azaltmak için hacimsal kapanmanın en azda tutulması gerektiği sonucu kolayca çıkarılabilir. Tünelde duraylılığı sağlamak için kazı boyutlarının minimumda tutulması ve yapılacak kazının tam kesit üzerinden yapılması gereklidir.⁽¹⁾ Eğer tünel yüzeyi p_i ye eşit gerilme sağlayan destekle tutulursa, kazı kapanması δV , desteksiz durumda beklenen hacimsal kapanma V_f den küçük olacaktır. Ancak kapanma sırasında ortalama gerilme giderek artacağından (Şekil-1d) destekli ve desteksiz kazıda serbest kalan enerji farkı:

$$\Delta W_R = V_f p_i^2 / 2\sigma_0 \quad (11)$$

kapanmadan dolayı biriken enerji farkı:

$$\Delta W_I = V_f p_i (1 - p_i / 2\sigma_0) \quad (12)$$

den küçük olmalıdır.

Kapanma sırasında destek uygulanıyorsa, serbest bırakılan enerjinin minimuma indirilerek tünel çevresinde kırılma ve akmanın azaltılması için sağlanan desteğin aldığı gerilmenin kayadaki doğal gerilmelerden çok küçük olmaması gerektiğini göstermektedir.

2.2 AMPİRİK DESTEK HESABI

Tünele sağlanacak desteğin analitik yoldan hesaplanması genellikle proje başlamadan tamamlanır. Gereken zaman ve harcama yeraltı santrali mağarası gibi önemli yapılarda zorunludur. Öte yandan, çok uzun ve değişik katmanlardan geçen tünellerde özellikle hızla değişen zemin koşulları nedeniyle desteğin kısa zamanda sağlanması gerekir. Bunun sonucu olarak günümüzde arazi bulguları ile destek tarifleyen ampirik yöntemler tercih edilmektedir. Bu yöntemler arazi ölçümleri ve mühendislik önsezisine uygun olarak kullanılabilirdiği sürece başarılı sonuçlar verirler. Ampirik yöntemlerin dikkati çeken ilk denemesi Terzaghi tarafından geliştirilenidir. Kendisinin de ilk aşamada kabul ettiği gibi bu yöntemin önerdiği destek aşırı boyutlara ulaşmaktadır. Güney Afrikada geliştirilen jeomekanik sistemde kayacın kitlesel özellikleri RMR (rock mass rating) katsayısı ile gösterilmiştir. Benzer olarak geliştirilen İskandinav Q sistemi ve Amerikan RSR (rock structure rating) sınıflandırmaları yeraltı yapılarının desteklenmesi için tablolar önermektedir. Bu yöntemler genel amaçlar için geliştirildiğinden, belirli bir projede yerel koşulların niteliğine uyularak daha elverişli bir formül geliştirilmesi imkanı bulunmaktadır.

Tablo-1 Güney Afrika RMR sistemi destek sınıflarını göstermektedir. Araştırmacıya göre bu tablodan bulunan destek tünelin sürekli çalışması için yeterli olacak güçtedir.

Genel kural olarak ankraj yükü tünel genişliğinin yarısı olarak alınır. Q sisteminde Güney Afrika yönteminden farklı olan en önemli etken, doğal gerilmelerin değerlendirmeye katılması olup yeraltı yapısında stabilitenin göstergesi olarak kazıdan sonra desteksiz bırakıldığında göçmeye kadar geçen süre alınmıştır. Doğal ve insan yapısı hacımlarda stabilitenin kaybolmadığı durumların incelenmesinden desteksiz kazı limiti;

$$B = 2(ESR)Q^{0.4} \quad (13)$$

genişliğiyle verilmiştir. Burada

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Tablo-1 RMR Sistemine göre tünelde destek gereksinimi

KAYAÇ SINIFI	KAZI-DESTEK ÖZELLİĞİ	D E S T E K		
		ANKRAJ	PÜSKÜRTME BETON	ÇELİK KEMER
I. Çok iyi (RMR=81-100)	Tam kesitte kazı, 3m ilerleme	Birkaç yerel ankrajın dışında genellikle destek gerekli değil		
II. İyi (RMR=61-80)	Tam kesitte 1-1.5 m ilerleme Aynadan 20 m geride tam destek	Tavanda 2.5m aralıklı 3m lik yerel, gerektiğinde kafes telli	Gerektiğinde tavanda 50 mm	Gerekmez
III. Orta (RMR=41-60)	Yarım kesitte, üst galeride 1.5-3m her atımdan sonra destek aynadan 10m geride tam destek	4m uzunluğunda 1.5-2m aralıklı sistematik ankraj, tavanda hasır çelikli	Tavanda 50-100 mm duvarlarda 30 mm	Gerekmez
IV. Zayıf (RMR=21-40)	Yarım kesitte; üst galeride 1-1.5m destekler kazıyla birlikte	4-5m uzunlukta, 1-1.5m aralıklı, tavanda ve duvarlarda hasır çelik	Tavanda 100-150mm duvarlarda 100mm	Gereken bölgelerde 1.5m aralıklı, hafif profilli
V. Çok zayıf (RMR<20)	Üst ve yan galerilerle; üst galeride 0.5-1.5m destek kazıyla birlikte patlatmadan hemen sonra beton püskürtme	5-6m uzunlukta, 1.5m aralıkta tavan, duvar ve tabanda hasır çelikli	Tavanda 150-200mm duvarlarda 150mm aynada 50mm	0.75m aralıklı orta ağır profil yanal destek

At nalı tipi, 10m genişlik, $\sigma_0 \leq 2.5$ kg/cm², patlatma ile kazı

değeri alınır. ESR bir yeraltı kazısının güvenlik gereksinmesine göre saptanan bir katsayı olup (Excavation support ratio) değerleri Tablo-2 de verilmiştir. Genel görünüşü ile İskandinav yöntemi bu ülkelerdeki kayaç koşullarının iyi olması nedeniyle diğerlerinden daha iyimser sonuçlar vermektedir. Formüldeki diğer katsayıları tablolardan bulmak mümkündür. Yapılan analizler sonucu yeraltı yapısında maksimum gerilme alan tavan basıncı da

$$P_{tav} = \frac{2J_n^{0.5} Q^{-1/3}}{3J_r} \quad (14)$$

olarak verilmiştir.

Tablo-2. Değişik yeraltı kazılarında destek oranı (ESR)

Kazının türü	ESR
Geçici Maden Kazıları	3-5
Derivasyon Tünelleri, Pilot Galeriler	1,6
Depolama mağaraları, kanalizasyon arıtma, denge bacası, küçük ulaşım tünelleri	1,3
Yeraltı santralleri, önemli ulaşım tünelleri, giriş ve kesişme yerleri	1,0
Yeraltı nükleer santralleri, istasyon, fabrika, kamu toplanma yerleri	0,8

2.3 KATMAN YÜKÜ YAKLAŞIMI

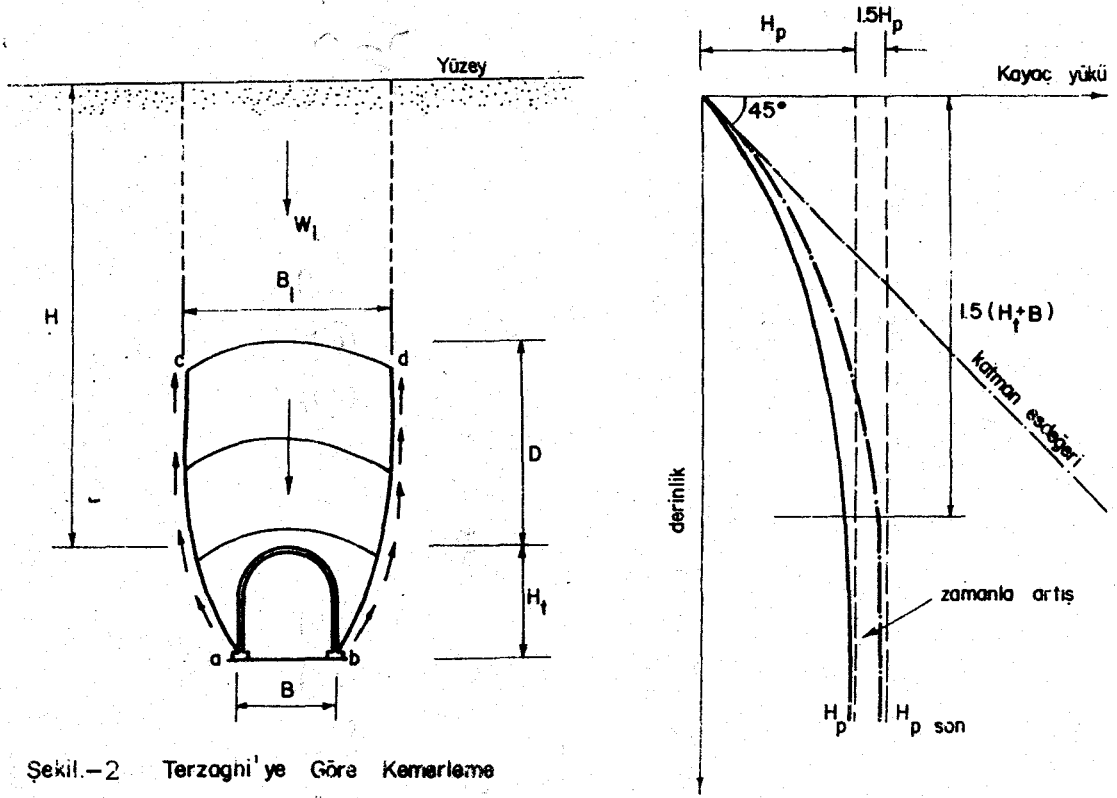
İlk kez Bierbaumer⁽²²⁾ tarafından tünele uygulanan teoride zeminin tünel üzerindeki katman yükünden önemli bir bölümünün kemerlenme sonucu yandaki kitlelere aktarıldığı kabul edilmiştir. Bu teoride tünele gelen basıncın toprak basıncı teorisine uygun olarak Şekil-2 deki diyagramın geçerli olduğu savunulmuştur. Kum, yapılan kazıya önemli bir basınç uygulamaktadır. Yanal basınç 1/2 eğimindeki kamalardan geldiğinden kemer genişliği yaklaşık olarak

$$B_1 = B + H_t \quad (15)$$

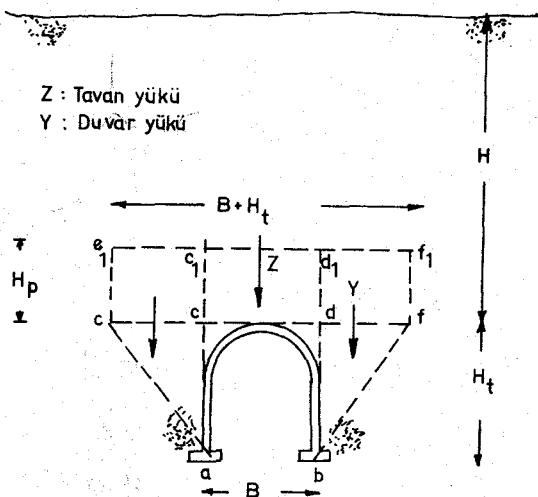
ye yükseleceğinden kayaç yükü $eff_1 e_1$ olacaktır.

$$H_p = C_1 (B + H_t) \quad (16)$$

Terzaghi⁽²²⁾ C_1 in sıkı kumda 0.27-0.60, gevşek kumda 0.47-0.60 limitleri arasında değiştiğini bulmuştur. Minimum ve maksimum değerler tavanda karşılıklı olarak $0.01(B + H_t)$ ve $0.15(B + H_t)$ hareketleri ile oluşmaktadır. Terzaghi çatlaklı kayaç için kubbe etkisini tarif etmiştir. Kemerlenmeden farklı olarak kayaçta daha büyük yük taşıma yeteneği olan bir küresel bölgenin katman yükünü çevreye aktardığı kabul edilmektedir.



Şekil.-2 Terzaghi'ye Göre Kemerleme



Şekil-3 Katman yükü kavramında Terzaghi yaklaşımı

Tablo-3 Kum ve Çatlaklı-damarlı kayaçta kayaç yükleri
($k=B+H_t$)

YASS ÜSTÜNDE			YASS ALTINDA	
	H_p minimum	H_p maksimum	H_p minimum	H_p maksimum
Sıkı kum ilk	0.27k	0.60k	0.54k	1.2k
son	0.31k	0.69k	0.62k	1.38k
Gevşek kum ilk	0.47k	0.60k	0.94k	1.20k
son	0.54k	0.69k	1.08k	1.38k
Bloklu kayaç	0			0.35k
Çok parçalanmış kayaç	0.6k			1.1k

3. ANALİZ YÖNTEMLERİ

3.1 TEORİK ELASTİSİTE ANALİZİ

Tünel açılan ortamda meydana gelen gerilmelerin teorik incelemesini yapan Kirsch⁽²²⁾, ortamın ideal malzeme davranışı gösterdiğini kabul ederek elastisite yasalarına göre bir çözüm yapmıştır. Şekil-4 de gösterildiği gibi R yarıçapında bir delik σ_x ve σ_z gerilmeleri almaktadır. Buradaki gerilmeleri tarifleyecek diferansiyel denklemlerin çözülmesi için Airy gerilme fonksiyonu Φ ; radyal, teğetsel ve makaslama gerilmeleri için kutupsal koordinatlar türünden:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \quad (17)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \quad (18)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial \theta} \quad (19)$$

olarak yazılmıştır. Φ fonksiyonu A-B-C-D-E-F sabitleri ile şu şekilde seçilirse:

$$\Phi = A \log r + Br^2 + (Cr^2 + Dr^4 + Er^{-2} + F)$$

$$\sigma_r = \frac{A}{r^2} + 2B + (-2C - 6Er^{-4} - 4Fr^{-2}) \cos 2\theta \quad (20)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + 2B + (2C + 12Dr^2 - 6Er^{-4}) \cos 2\theta \quad (21)$$

$$\tau_{r\theta} = (2C + 6Dr^2 - 6Er^{-4} - 2Fr^{-2}) \sin 2\theta \quad (22)$$

olur.

$r \rightarrow \infty$ için

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \cos 2\theta = 2B - 2C \cos 2\theta \quad (23)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\theta = [2C + 6D(\infty)^2] \sin 2\theta \quad (24)$$

Tünel yüzeyinde $r=R$ olacağından

$$\sigma_r = 0 = \frac{A}{R^2} + 2B + (-2C - 6ER^{-4} - 4FR^{-2}) \cos 2\theta \quad (25)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 = (2C + 6DR^2 - 6ER^{-4} - 2FR^{-2}) \sin 2\theta \quad (26)$$

Son dört denklem θ nın bütün değerleri için geçerlidir. Ancak $r \rightarrow \infty$ durumunda gerilme sonsuz olmayıp sıfırdır. O halde şu koşullar geçerlidir.

$$D = 0 \quad (27)$$

$$2B = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_z) \quad (28)$$

$$-2C = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_z) \quad (29)$$

$$\frac{A}{R^2} + 2B = 0 \quad (30)$$

$$-2C - 6ER^{-4} - 4FR^{-2} = 0 \quad (31)$$

$$2C + 6DR^2 - 6ER^{-4} - 2FR^{-2} = 0 \quad (32)$$

Bu denklemlerin çözümünden Airy gerilme fonksiyonundaki sabitle-
rin değerleri bulunur.

$$A = -\frac{R^2}{2} (\sigma_x + \sigma_z) \quad (33)$$

$$2B = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_z) \quad (34)$$

$$2C = -\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_z) \quad (35)$$

$$D = 0 \quad (36)$$

$$E = -\frac{1}{4} (\sigma_x - \sigma_z) R^4 \quad (37)$$

$$F = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_z) R^2 \quad (38)$$

Bulunan bu sabitler (20-21-22) denklemlerinde yerlerine yazılırsa

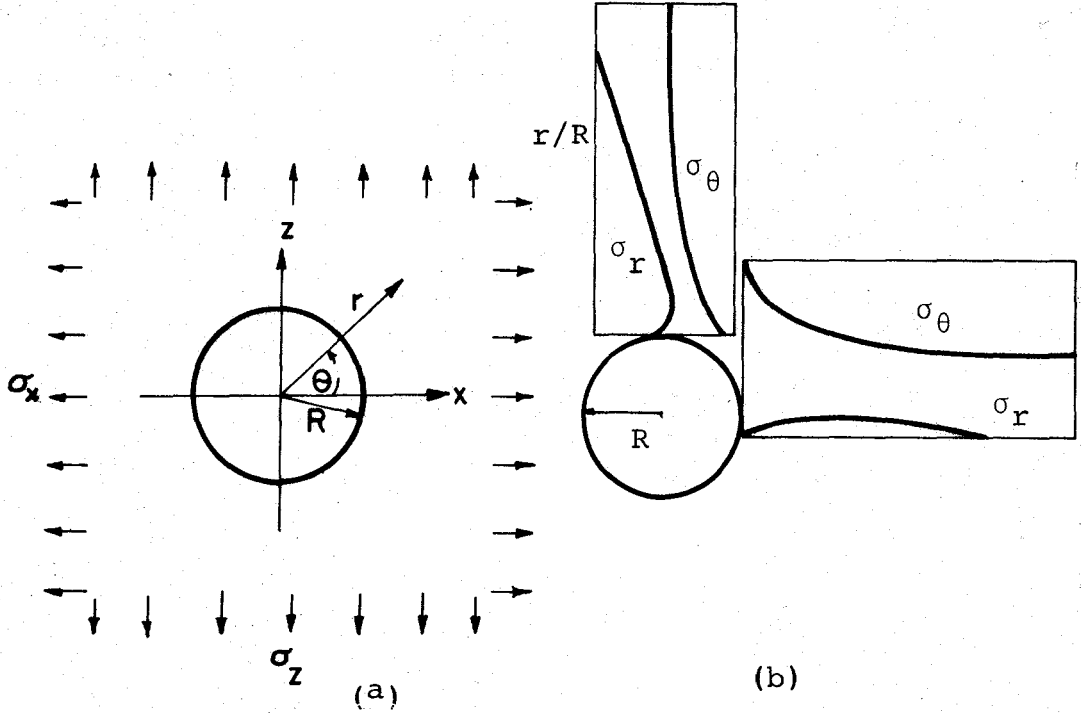
$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_z) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_z) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (39)$$

$$\sigma_{\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (40)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (41)$$

Buradan maksimum teğetsel gerilmenin dairesel deliğin sınırında olduğu görülmektedir.

İzotrop gerilme koşulunda, yani düşey ve yatay gerilmelerin birbirine eşit olması durumunda ($\sigma_x = \sigma_z = \sigma$) denklemler basitleşerek şu şekli almaktadırlar.



Şekil-4 Dairesel delik çevresinde gerilmeler

$$\sigma_r = \sigma \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (42)$$

$$\sigma_{\theta} = -\sigma \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (43)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (44)$$

Radyal gerilmenin değeri delik sınırında ($r=R$) sıfır olduğundan burada maksimum makaslama gerilmesi sayısal olarak σ ya eşit olmakta ve sınırla 45° düzlemde etkimektedir. Sekil-4b de $\sigma_x=0$ özel durumu için simetri eksenlerinde gerilme dağılışı gösterilmektedir. Teğetsel gerilmenin maksimum değeri malzemenin direncini aştığı zaman tünelde stabilitenin kaybolduğu varsayılmakta deformasyonlar ise bu gerilmelerin elastisite denklemlerine yerleştirilmesi ile hesaplanmaktadır.

Bu incelemeden elde edilen gerilmeler ideal malzeme (Hooke cismi) içindir. Halbuki yeraltında yapılan bir kazı ortamdaki doğal gerilme ve su basıncı dengesini değiştirerek bu bölgedeki gerilmelerin yapılan kazı çevresinde yoğunlaşmasına neden olur. Başlangıçta teorik yöntemler tünelde oluşacak yatay ve düşey gerilmelerin uzun sürede hidrostatik duruma dönüşeceğini, diğer bir deyişle düşey ve yatay gerilmelerin katman yüküne eşdeğer olacağı varsayımına dayandırılmıştı. Heim hipotezi⁽⁷⁾ tünel mekaniğine kalıcı gerilmelerin etkisini de katmıştır. Terzaghi bu durumu elastisite yasalarına göre incelemiş ve "yatay gerilmelerin Poisson oranı nedeniyle kural olarak düşey gerilmelerden daha küçük olacağı" teorik sonucuna varmakla birlikte, doğal gerilmelerin varlığının ihmal edilemeyeceğini belirtmiştir.⁽²²⁾ Günümüzde teorik analizin, ölçülerek bulunan doğal gerilmelerin denklemlerde dikkate alınarak yapılabileceği bilinmektedir.

Szechy ortamdaki gerilmeleri ikiye ayırmaktadır.⁽²¹⁾ Birincisi kazıdan önceki mevcut gerilmeler, ikincisi ise kazı yapıldıktan sonra ortaya çıkan gerilmelerdir. Bu ikinci gerilmeler tünelin boyutları, kazı yöntemi, desteksiz kalma süresi ve sağlanan desteğin niteliklerine bağlanmaktadır. Yatay gerilmeler düşey gerilmelerin bir fonksiyonu olduğuna göre teorik problem düşey gerilmelerin çözümüne bağlı olmalıdır. Tünelin geometrisi nedeniyle teorik çözüm çoğun kutupsal koordinatlarla yapılır.

Tünelin çevresindeki gerilmelerin incelenmesinde yapılan yaklaşımları şu şekilde sıralayabiliriz.⁽¹⁹⁾

- a) Kitlede teorik gerilme koşullarına dayandırılan elastik yöntemler
- b) Deformasyon ve denge kavramına göre çözümler
- c) Gevşeme-kemerlenme özelliğini esas alan gözlemsel çözümler

d) Sayısal analizle yarı ampirik çözüm, sonlu elemanlar, sınır elemanları.

Tünel açılan ortamdaki gerilmelerin daha gerçekçi olarak belirlenebilmesi için ortamı meydana getiren malzemenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin bilinmesi gereklidir. Bu ilişkinin ideal gösterimleri Şekil-7 deki gibidir.

3.2 PLASTİK BÖLGE KAVRAMI

Ortamdaki gerilmelerin plastik dengeye ulaşması, diğer bir deyimle gerilme dairelerinin Mohr zarfına teğetliği durumunda plastik bölge oluşup, genişlemeye başlamaktadır. Şekil-5 de bu bölgenin özellikleri gerilmelere bağlı olarak gösterilmiştir. Tünel içinde p_i basıncının uygulandığı durumda plastik bölgeyi oluşturan kritik gerilmeler

$$\sigma_r = -c \cot \phi + (p_i + c \cot \phi) \left[\frac{R}{a} \right]^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (45)$$

$$\sigma_\theta = -c \cot \phi + (p_i + c \cot \phi) \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \left[\frac{R}{a} \right]^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (46)$$

olarak verilmektedir.

Buna göre plastik bölgenin genişlememesi için gerekli iç basınç

$$p_i = -c \cot \phi + [c \cot \phi + \sigma_o (1 - \sin \phi)] \left[\frac{R}{a} \right]^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (47)$$

değerinden büyük olmalıdır.

Destekleme teorisinde ilk gelişme, bugün Fenner-Kastner, Talobre formülü olarak bilinen bu hesaplama olmuştur.

Plastik bölgedeki bir elemanın statik dengesi için

$$(\sigma_\theta - \sigma_r) dx - x d\sigma_r - \gamma x dx = 0 \quad (48)$$

Elemanın kaymaması için de:

$$\frac{\sigma_{\theta} + c \cot \phi}{\sigma_r + c \cot \phi} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (49)$$

koşulunu sağlaması gerekmektedir.

Bu iki denklem σ_{θ} ya göre eşitlenirse

$$(\sigma_r + c \cot \phi) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} = x \left(\frac{d\sigma_r}{dx} + \gamma \right) \quad (50)$$

bulunur.

Kaplamada $\sigma_r = p_i$ iken tünel yüzeyinde $x=R$ olacağından denklemin genel çözümü:

$$\sigma_r = -c \cot \phi + \gamma x \frac{1 - \sin \phi}{3 \sin \phi - 1} + (p_i + c \cot \phi - \gamma R \frac{1 - \sin \phi}{3 \sin \phi - 1}) \left(\frac{x}{R} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (51)$$

sonucunu verir. Plastik bölgenin sınırında $x=a$ ise

$$(\sigma_r + \sigma_{\theta}) = 2\sigma_o \frac{2\sigma_r}{1 - \sin \phi} + \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (52)$$

bulunur.

Radyal gerilme ise:

$$\sigma_r = \sigma_o (1 - \sin \phi) - c \cos \phi \quad (53)$$

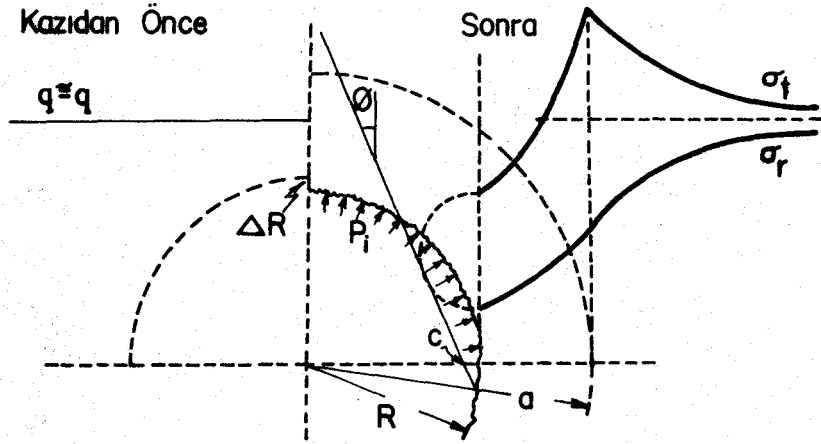
Buradan plastik bölgenin yarıçapı:

$$\left(\frac{a}{R} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} (p_i + c \cot \phi - R \frac{1 - \sin \phi}{3 \sin \phi - 1}) + \gamma a \frac{1 - \sin \phi}{3 \sin \phi - 1} = (c + \sigma_o) (1 - \sin \phi) \quad (54)$$

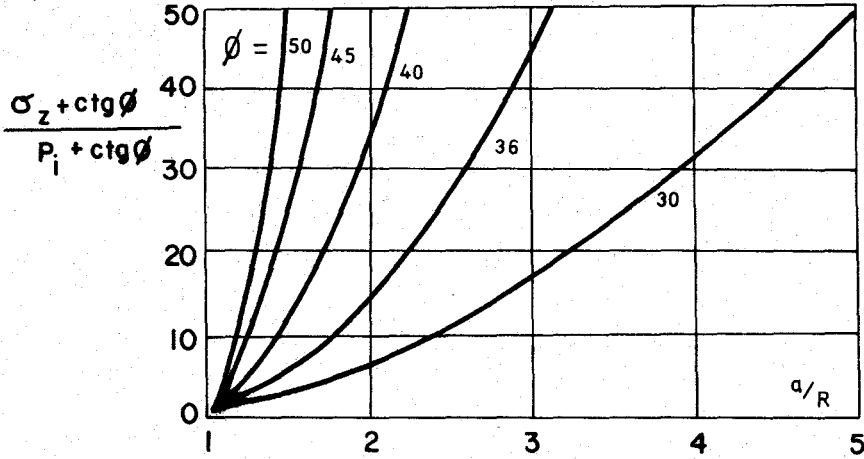
$$a = R \frac{\sigma_o (1 - \sin \phi) + (3 - \sin \phi) / 2 c \cot \phi}{p_i + c \cot \phi} \quad (55)$$

olur. Görüldüğü gibi bu yaklaşımda malzeme plastik kabul edilme le birlikte yenilme bölgesinde malzemenin hacim değiştirme özellikleri gözönüne alınmamıştır.

Şekil-6 yukarıda verilen bağıntılardan yararlanarak hazırlanmıştır. Görüldüğü gibi doğal gerilme σ_o ve kayma direnci açıs



Şekil.- 5. Tünelde kazıdan önceki ve sonraki gerilmeler

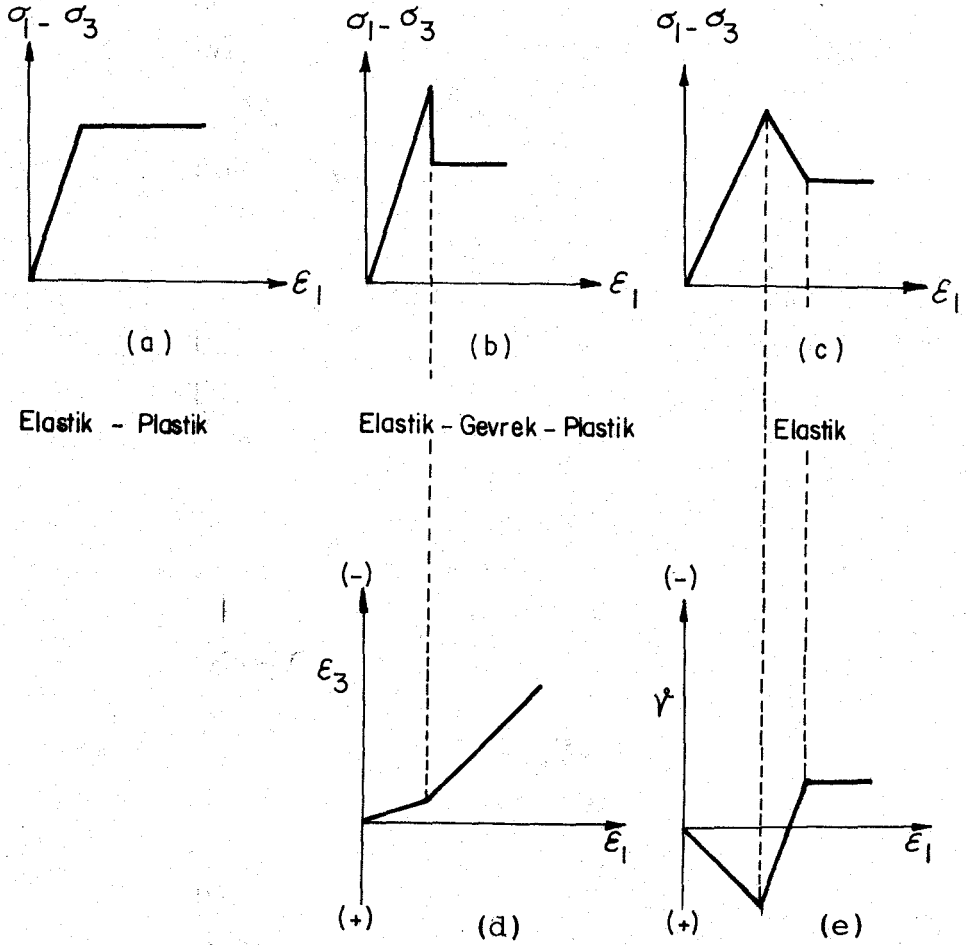


Şekil-6. Plastik bölge genişliği

plastik bölgeyi en çok etkileyen özelliklerdir. Son yıllarda yapılan ölçümler geleneksel patlama yöntemleri ile kazı yapıldığında tünel çevresinde kalınlığı 0.5-1.5 m yi bulan bir halkada kayanın parçalanarak gevşeme durumuna geldiğini göstermiştir. Böylece kayanın parçalanmış-gevşemiş plastik ve elastik denge gibi mekanik özellikleri birbirinden farklı üç bölgede düşünülmesi gerektiği anlaşılmıştır. Daha da önemlisi kazı sırasında katmanların patlatma gibi yöntemlerle örselenmemesinin tünelin ilerideki davranışlarına olumlu katkıda bulunacağı artık kabul edilmektedir.

3.3 DEFORMASYONLARIN ROLÜ

Şekil-7 (a) elastik-plastik, (b) elastik-gevrek-plastik (c) ise elastik davranışı göstermektedir. Yukarıda anlatılan Kirsch çözümü Şekil-7 de görülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinde birinci bölgede kalarak çözüm yapmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilerden tünelin stabilitesinin, gerilmelerin malzeme dayanımını aşması durumunda hemen kaybolmadığı anlaşılmıştır.



Şekil-7 Malzeme davranışı modelleri

Şekil-7 (e) de hacimsal şekildeğiştirme idealize edilmiş, Ladanyi⁽¹³⁾ girişim eğrisi ile karşılaştırılıp elastik ve plastik bölgelerde ϵ_1 ve ϵ_3 arasındaki ilişki gösterilmiştir. Eski çözümlerin tümünde kayaç kitlesi için Mohr-Coulomb kırılma hipotezi kullanılmış, bunun yanısıra malzemenin tam elastik-plastik (Şekil-7 a) davrandığı kabul edilmiştir.

Morisson ve Coates⁽¹⁵⁾ çözümde ilk kez direnç azalmasını dikkate almışlar, sıfır kohezyon durumunda kayaçta plastikleşen bölge için, üç eksenli deneyle bulunacak doğrusal olmayan direnç kriterini kullanarak gerçeğe yakın çözümler önermişlerdir.

Hoek ve Brown^(10,11)'un kullandığı kaya kütleleri için geliştirilen doğrusal olmayan direnç kriteri de ortamın davranışını hesaplamada iyi sonuçlar vermiştir. Böylece elastisite teorisinden bulunan gerilmelerin malzeme dayanımını aşması durumunda da stabilitenin kaybolmadığı gözönüne alınabilmektedir.

Daha önceki çözümlerde ortamın plastik bölgedeki hareketi çoğun sabit hacimli kabul edilmiştir. Ayrıca plastik bölgede meydana gelecek olan direnç azalması düşünülmüş olmasına rağmen göçen kütle içerisinde, direnç azalması ile birlikte oluşacak plastik hacimsal değişimler gözönüne alınmıştır. Limit gerilmelerden dolayı tünel çevresinde oluşan plastik halkanın kalınlığı değişken olabilir. Hesaplarda kolaylık sağlanması için bu değişimin düzgün olduğu varsayılmalıdır. Aksi durumda problemin çözümü güçleşir. Tünel çevresindeki yerdeğiştirmeleri ölçerek değişken halkanın analizi yapılabilirse de, bu fazla zaman ve para gerektirmektedir. Çözümler son olarak Şekil-7 c de gösterilen bölgenin üç doğrusal gerilme-şekildeğiştirme durumunu dikkate alarak hazırlanmakta, böylece daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir.

3.4 TEPKİME EĞRİLERİ

Yukarıda özetlenen bulgular kazıdan sonra zeminin davranışı ile destek-zaman ikilisinin ortak davranışlarının bir karakteristik tepkime eğrisi ile gösterilebileceğini kanıtladığından, günümüzde tünelcilik konusunda yapılan çalışmalar tepkime eğrilerinin geliştirilmesi yönünde yoğunlaşmaktadır. Bu eğrilerden yararlanılarak zemin-destek etkileşimi belirlenmektedir. Belirlenen karşılıklı etkileşim ile tüneldeki gerilmelerin optimum noktasında destek seçilmekte ve inşaa edilmektedir. Destek basıncı-zemin etkileşimi yaklaşımı ile yapılan hesaplarda tepkime eğrileri kullanılarak, elemanların boyutlandırılmasında etkin düzenlemeler yapılır. Tepkime eğrisi yöntemi dairesel bir tünelde kazıya tam

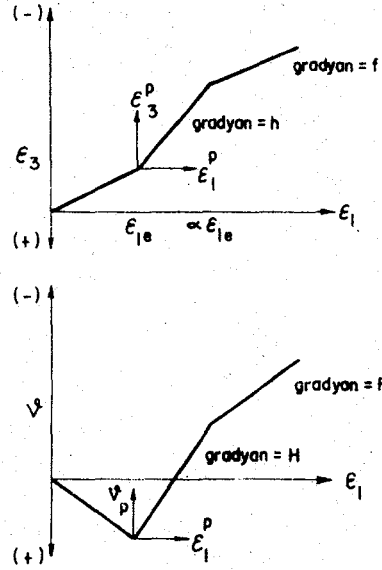
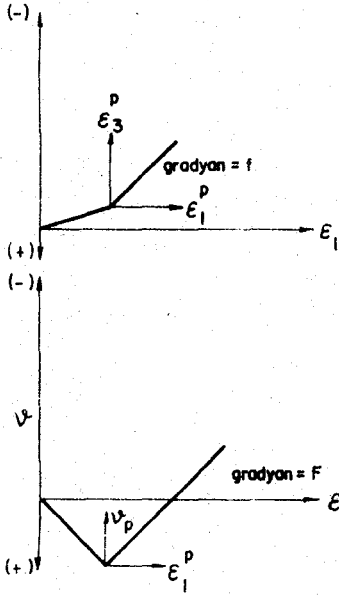
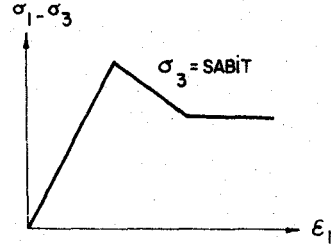
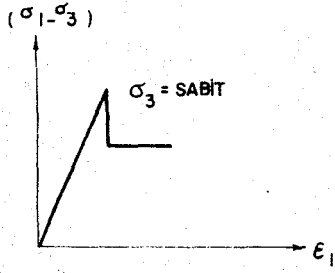
çelik kemerler örnek olarak gösterilebilir. Optimum çözüm destek rijitliğinin tam H noktasında kesişimi sağlanması durumunda sağlanır (PH). Buradan anlaşılacağı gibi destek çözümü zemin ve destek reaksiyon eğrilerinin optimum kesişme noktasının bulunmasına bağlıdır.

Yapılan destek yeterli rijitliğe sahip değilse tepkime eğrilerinde kesişme sağlanamayacağından (PJ) göçme yine kaçınılmaz olur. Destek yapımında gecikilirse (R) desteğin rijitliği yeterli bile olsa (RK) tünel çevresinde plastik bölge gereksiz yere genişleyeceğinden gerilmeler artacaktır. O halde başarılı bir destek sistemi, eğrilerin G ve H noktaları arasında kesişmesini sağlayan bir kapanmaya imkan tanıyanıdır. Bu da, son yıllarda uygulanması yapılan püskürtme beton, ankraj veya bunların karışımı sistemlerle başarılı olarak yerine getirilmektedir.

Tepkime eğrilerinin belirlenmesinde iki yöntem vardır. Bu yöntemlerden birincisi kapalı-biçim (closed-form) çözümü, ikincisi ise adım adım yaklaşarak (stepwise) çözümdür. Bunların ilki Şekil-9 da gösterilen malzeme davranışını, ikincisi de Şekil-10 da görülen malzeme davranışını esas alarak çözüme giderler.

Kapalı-biçim çözümünde tünelin geometrisi ve hidrostatik destek basıncı dikkate alınmaktadır. Ayrıca problemlerin çözümünde kullanılan bazı sayısal yöntemler çok karmaşık kazı geometrileri ve gerilme durumlarının da kapsamaktadır. Bununla birlikte kütlelerin davranışı tam olarak bilinemediğinden direnç kriteri, gerilme-şekildeğiştirmeleri hakkında önemli tahminler yapmak zorunludur. Genellikle basit olarak bulunabilen malzeme davranışı yöntemleri kullanılır. Bunun yanında çözümlere kütle davranışının çok karmaşık ve gerçekçi modellerle içerilmesi mümkündür.

Tünel açılan ortamın davranışının belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan doğrusal Mohr-Coulomb kırılma teorisi en çok kullanılanıdır. Hobbs⁽⁸⁾ ise üstel fonksiyon kriterini kullanmıştır.



Şekil. 9 Kapalı-biçim çözümünde kullanılan malzeme davranış modeli

Şekil 10 Adım adım yaklaşarak çözümde kullanılan malzeme davranış modeli

3.5 KIRILMA TEORİLERİ

Ladanyi⁽¹³⁾, Griffith gevrek kırılma teorisini esas alan Fairhurst'un⁽⁵⁾ doğrusal olmayan direnç kriterini kullanmıştır. Deneysel sonuçlar da kayaç kütesindeki kırılma zarfının çoğun doğrusal olmadığını ortaya koymaktadır.

Şekil-9 daki malzeme davranışı kayacın, dökme demir, cam, kömür ve benzeri malzemeler gibi gevrek olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle gerilme altında plastik özellikler göstermeden parçalanarak dağılabilmektedir. Bunun kökeninde dane, kristal ve mineraller arasında çok kuvvetli bağlar bulunmasına karşın ortamın mikro-çatlaklarla kaplı olması yatmaktadır. Uygulanan gerilme belirli bir düzeye geldiğinde çatlaklar genişleyerek yayılmaya başlar. Bu çatlaklar hızla ortama yayılarak mikro-çatlaklara

dönüşür. Bu dönüşüm çok ani olduğundan kırılma dediğimiz olay meydana gelir. Kısaca, kayacın direnci çekme dayanımı ile tanımlanan kohezyon ve içsel sürtünmenin katkılarından oluşmaktadır.

Bugüne kadar zeminde uygulama alanı bulmuş olan Mohr ve Mohr-Coulomb-Navier kriterleri kayalara bir ölçüde ve genel anlamda uygulanabilirse de gevrek kırılmanın mikro-ölçekli bir yaklaşımla tarifini fizik yasalarına daha uygundur. Mohr-Coulomb denklemi,

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \phi \quad (56)$$

$\alpha = 45 + \phi/2$ ile tekrar yazılırsa

$$\bar{\sigma}_1 = 2c \tan \alpha + \bar{\sigma}_3 \tan^2 \alpha \quad (57)$$

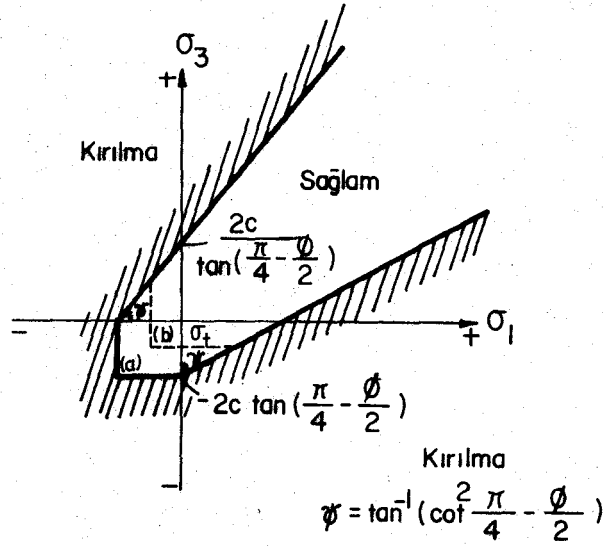
ile büyük ve küçük asal gerilmeler arasında doğrusal bir bağıntının bulunmasının gerekmediği görülecektir. Bu teori sadece basınç gerilmeleri için geliştirildiğinden, asal gerilmelerden biri çekmeye dönüştüğünde (56) bağıntısından, çekmeye dayanımın $(-2c/\tan \alpha)$ olması gerekecektir. Şekil-11, a ordinatıyla gösterilen bu direnç gerçekte elde edilen değerlerden büyüktür. Bu nedenle Paul kırılmanın malzemeye özgü σ_t değerinde (b ordinatı), ya da (57) nolu denklemi sağlayan düzlemde olacağını söylemiştir⁽²⁰⁾. Ancak σ_t nin basınca dayanımla bağıntısını tariflememektedir. Burada σ_t dengeyle belirlenmelidir.

Şekil-11 de Mohr-Coulomb teorisinin σ_c/σ_t oranını $\tan \psi = \tan^2 \alpha = \frac{1}{\mu \phi}$ olarak verdiği görülebilir. Bu eğim malzemenin sürtünme katsayısına bağlı olduğundan, yüksek gerilmelerde, sürtünme katsayısı μ deki değişimle doğrusallığını yitirebilmektedir. $\mu = 0$ değeri için $\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = 1$ ve $\mu = 1$ uç değeri için de $\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = 5.8$ bulunacağından teorisinin gevrek kırılmayı kabaca anlatabileceği söylenebilir.

Griffith⁽⁹⁾ camın basınca oranla beklenenden çok düşük çıkan çekmeye dayanımını incelemiştir. Griffith'in çekme gerilmeleri için geliştirdiği teori, basınç gerilmeleri için de geçerlidir. Teorik ve deneysel olarak $\tau > 0$ durumunda çatlak yörüngesinin bir eğri olarak sürdüğü gösterilmiştir.

Çatlak kendisini büyük asal gerilmenin yönüne uyacak şekilde genişlemektedir. $\sigma_3 > 0$ durumunda ise eliptik çatlak kenarlarında

gerilme basınca dönüşmektedir. Başka bir deyişle σ_1 ve σ_3 ün basınç olduğu durumda tek eliptik çatlağın malzemenin kırılmasını sağlayamadığı görülmektedir. Ancak bu son durumdaki gerilmeler için, örneğin serbest basınç durumunda, sisteme dıştan etkiyen hiç bir çekme gerilmesi olmadığı halde çatlak köşelerinde çekme gerilmelerinin oluştuğu saptanmıştır.



Şekil: II. Mohr-Coulomb Teorisi İçin Kırılma Koşulları

Griffith yaklaşımıyla gerilme analizi tek değişkenli bir kırılma kriteri getirir. Bu açıdan da Mohr teorisinden daha basit ve sağlam bir teoridir.

$$\sigma_3 = \sigma_t \quad (\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0) \quad (58)$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)} = 8\sigma_t \quad (\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0) \quad (59)$$

Görüldüğü gibi, asal gerilmenin çekme olması halinde kayacın dayanımı σ_t olarak sınırlandırılmıştır. Sadece basınç durumunda ise (59) nolu denklem geçerlidir. Böylece en azından teorik olarak tek ölçümle σ_t kayacın kırılma sırasındaki asal gerilmeleri ve kırılma açısını bulmak mümkündür. Bu teoriye göre, büyük asal gerilme ile $(45-\beta)$ açısı yapan kritik mikro-çatlakta,

$$\cos 2\beta = -0.5 \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (60)$$

bağıntısı gösterilebilir⁽¹⁴⁾. Böylece serbest basınç deneyinde ($\sigma_3=0$) kırılma yüzeyinin yük eksenine 30° yapması gerekmektedir. $\sigma_3 = -\sigma_1/3$ için ise $\beta=90^\circ$ bulunur, yani kırılma düzlemi çekme gerilmesi eksenine dikey olacaktır. σ_3 ün değeri σ_1 'e yaklaştıkça $\beta \rightarrow 45^\circ$ olacak ve kırılma düzlemi yüksek çevre gerilmelerinde maksimum basınç gerilmesi ekseninden uzaklaşacaktır. Griffith kriteri Şekil-12 de gösterilmiştir. Fakat burada bir çelişki görülmektedir. Asal gerilmelerin ikisi basınç olduğunda mikro-çatlaklardan bir bölümü kapandığından daha önce mevcut olmayan bir etki doğar; kapanan çatlaklarda sürtünme uyanır. Devam eden deformasyonlar malzemede bu özellik uyarınca ek direnç oluşturduğundan malzemenin dayanımında artış beklenir. Eğer σ^* bir çatlağın kapanmasını sağlayan gerilme ise, $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$ koşullarında Griffith kriteri

$$-\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu^2)^{1/2} + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\mu = -2\sigma_t \left(1 + \frac{\sigma^*}{\sigma_t}\right) + \mu\sigma^* \quad (61)$$

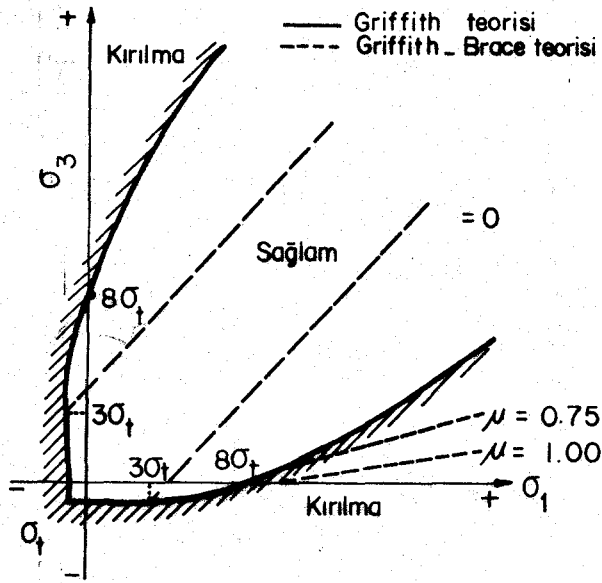
şekline dönüşecektir. Bu da Mohr-Coulomb kriterinin doğrusal bir ifadesidir. μ nün sıfırdan büyük olması durumunda kırılma zarfı Şekil-12 deki doğrularla gösterilecektir. Gerilmelerin Griffith kriterini sağlaması halinde bile makro-çatlakların oluşmamasının nedeni budur. Şekil-12 de görülen bir çelişkili nokta parabolün sağa açık olmasıdır. Buna göre, zarf içinde kalmak koşulu ile σ_1 ve σ_3 ne kadar artarsa artsın kırılma olmayacaktır. Halbuki yüksek gerilmelerde kırılmanın karakteri gevrekten süneğe geçtiğinden plastik akma sözkonusudur.

Denklemler normal gerilme ve makaslama gerilmesi olarak ifade edildiğinden denklem (59),

$$\tau^2 - 4\sigma_t \sigma_n = 0 \quad (2\sigma_n > \tau) \quad (62)$$

$$\tau = \sigma_n + \sigma_t \quad (2\sigma_n < \tau) \quad (63)$$

şeklinde yazılabileceğinden Mohr zarfı;



Şekil_12. Griffith ve Brace Gevrek Kırılma Teorisi

$$\tau^2 - 4\sigma_n \sigma_t - 4\sigma_t^2 = 0 \quad (64)$$

olarak tariflenecektir. Mohr-Coulomb teorisinin tarif ettiği "kohezyon" terimi $2\sigma_t$ ordinatında çıkmaktadır. Ancak Griffith kırılma zarfı paraboliktir. Çatlakların kapanması sonucu sürtünme olduğu düşünülmezse Griffith teorisi basınca dayanımla çekmeye dayanım oranının değişmez olduğunu öngörmektedir.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = 8 \quad (65)$$

Buna rağmen deneylerde bulunan oranın 8 den büyük çıkması ilginçtir. Çatlaklarda uyanan sürtünmeden kaynaklanan bu uyumsuzluk $\mu > 0.75$ ve $\sigma = 0$ koşullarında geçerlidir.

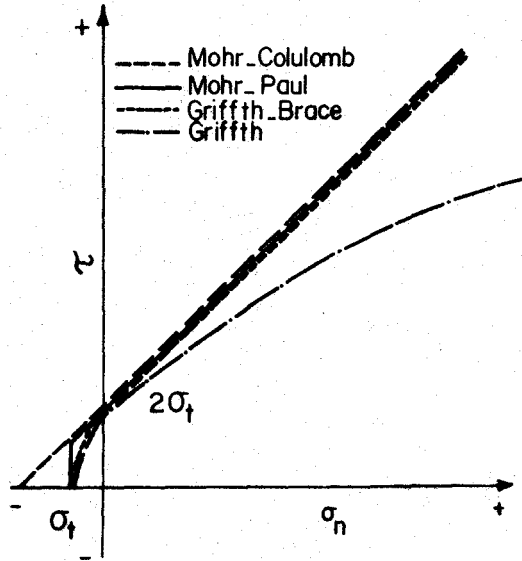
Bu durumda Griffith denklemi çatlak kapanması etkisi için:

$$4\sigma_t = [(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu^2)^{1/2}] - \mu[\sigma_1 - \sigma_3] \quad (66)$$

şeklini alacaktır. Kırılma zarfı ise;

$$\tau = \mu\sigma + 2\sigma_t \quad (67)$$

olarak basitleşir. Şekil-13 de buraya kadar sözü edilen kırılma kriterleri karşılaştırılmaktadır.



Şekil:13. Gevrek Kırılma Zarfları

Bu teorileri dikkate alarak Hoek ve Brown^(10,11) problemi yeniden inceleyip kayaç kütleleri için ampirik bir direnç kriteri geliştirmişlerdir.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + (m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s)^{1/2} \quad (68)$$

Bu bağıntıda gerilmeleri normalleştirilerek $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \sigma_{1n}$, $\frac{\sigma_3}{\sigma_c} = \sigma_{3n}$ yazalım,

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + (m\sigma_{3n} + s)^{1/2} \quad (69)$$

(56) nolu eşitlikte $\sigma_3 = 0$ yazalım. Böylece örneğin serbest basınç direnci:

$$\sigma_{cs} = (s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (70)$$

Sağlam kayaç için $s=1.0$ ve $\sigma_{cs} = \sigma_c$ olur. Kırılmaları olan kayaçta $s < 1.0$ ve basınç direnci eşitlik (57) den bulunur.

Numunenin çekme dayanımı (56) nolu eşitlikte $\sigma_1 = 0$ konularak çözümlenince bulunan $\sigma_3 = \sigma_t$ için sonuç:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_c}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (71)$$

Tamamen kırılmış kayaç için ise $s=0$, $\sigma_t=0$ olması gerekir. Sağlam kayaçta $s=1.0$ ve $m \gg 1$, $m \approx \frac{\sigma_c}{|\sigma_t|}$ olduğundan m 'nin değeri örneğin kırılmasıyla azalacaktır.

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{m\sigma_c} \quad (72)$$

$$\tau = (\sigma - \sigma_3) \left(1 + \frac{m\sigma_c}{4\tau_m}\right)^{1/2} \quad (73)$$

Burada

$$\tau_m = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (74)$$

Şekil-14 de τ ve σ nın normalleştirilmiş değerleri görülmektedir.

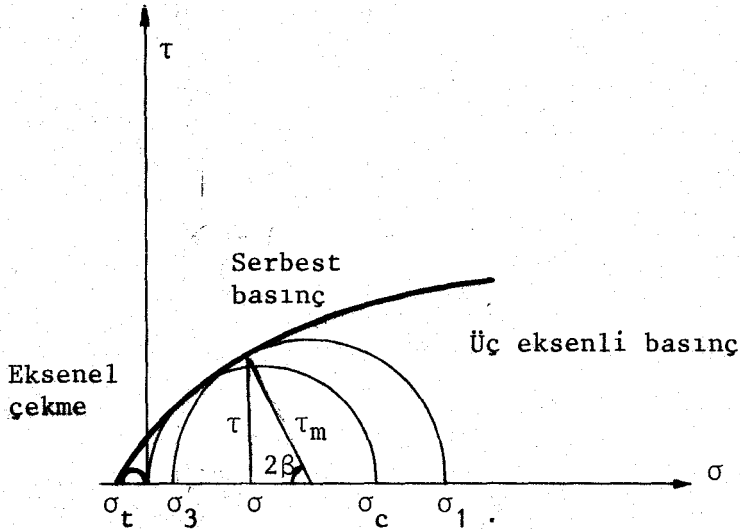
$$\sigma_n = \sigma / \sigma_c \quad \text{ve} \quad \tau_n = \tau / \sigma_c$$

$$\tau_n = A(\sigma_n - \sigma_{tn})^B \quad (75)$$

Kayaçta normalize edilen çekme direnci

$$\sigma_{tn} = \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (76)$$

A ve B, m değerine bağlı sabitlerdir.



Şekil-14 Gerilmeler arasındaki ilişkiyi gösteren kırılma zarfı

3.6 TEPKİME EĞRİLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Burada Hoek ve Brown tarafından geliştirilen ampirik direnç kriteri kullanılarak tepkime eğrileri belirlenecektir.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (77)$$

bağıntısında m ve s , σ_1 ve σ_3 gerilmelerine bağlıdır.⁽¹²⁾

m ve s sabitleri Q faktörü, kaya kütlesi oranı (RMR), kaya kütlesi kalitesi (RQD) kayaç türüne bağlı olarak değişik değerler alırlar. Kayaç türlerine göre gerilme kriterleri Tablo-4 de verilmektedir.

Yukarıda sözü edilen kapalı-biçim çözümü ve adım adım yaklaşarak çözüm yöntemlerinde kayaç kitlesinin başlangıçtaki direnci (69) denklemi ile hesaplanmaktadır. Düşünülen kırılma bölgesi, ya da diğer bir deyişle plastik bölgede m ve s sabitlerinin değerleri azalarak m_r ve s_r olacaktır. O zaman kayaçta göçme olmadan hemen önceki kalıcı direnç:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \sigma_3 + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \quad (78)$$

biçiminde gösterilebilir.

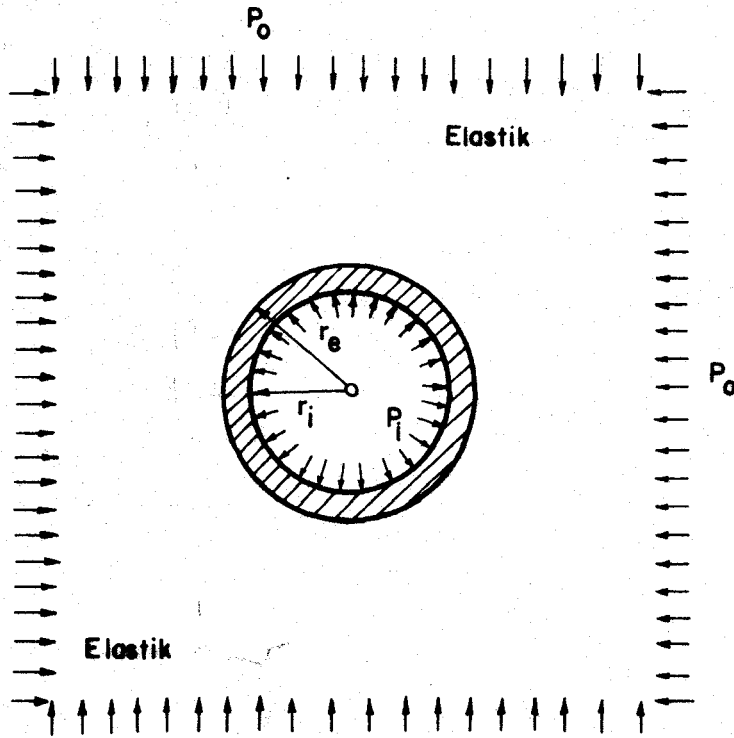
Bu bağıntıdaki m , s sabitleri ve kayacın serbest basınç direnci σ_c belirlenerek ortamın direnci bulunup, tünel tasarımında kullanılabilir.

Şekil-9 da gösterilen idealleştirilmiş gerilme-şekildeğiştirme durumu kapalı-biçim (closed-form) çözümü içindir. Çünkü direnç kriterinin doğrusal olmayan karmaşık etkileri Şekil-10 daki model kullanılarak kapalı-biçim çözümü yapılamaz. Bu model için adım adım yaklaşımla (stepwise) hesap yapan bir yöntem kullanılmalıdır. Stepwise ve closed-form çözümlerinin her ikisinde de kayacın lineer elastik olduğu kabul edilerek hesaplarda E ve Poisson oranı ν kullanılır. σ_3 ün değişik değerleri için elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil-10 da görülen karmaşık modelden şekildeğiştirmelerin artması ile yavaş yavaş Şekil-9 daki basit modeldeki kalıcı direnç düşmesi meydana gelir. Bu modellerde görülen α, f, h, F, H değerlerinin deneylerle belirlenmesi gereklidir. Bazı değer-

lendirmeler, muhtemel hacimsal şekildeğiş-tirmelerin belirlenmesi ile çatlaklı kayaç modeli için laboratuvar da deney yapılarak sonuç alınabileceğini göstermektedir.

Karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılacak ayrıntılı sayısal yöntemler bulunmakla beraber, basit bir aksel simetrik problem çözümüyle, kayaç kütesinin davranışı, kaya-des-tek etkileşiminin analizi yapılmıştır. r_i yarıçaplı dairesel bir tünel, homogen ve izotrop bir ortamda, ilk önce p_0 hidrostatik gerilmesi altında alınır. Üniform radyal destek basıncını (p_i)yi sağlayan sistem kabul edilebilir destek sistemidir.

Şekil-15 deki düzlemde tüm gerilmelerin oluştuğu varsayılırsa bu aksel simetrik problemde (σ_θ) teğetsel ve (σ_r) radyal asal gerilmeleri tünel açılan ortamda oluşacaktır. Tünelin geometrisi nedeniyle σ_θ ve σ_r gösterilmelerinin kullanımı σ_1 ve σ_3 'e tercih edilmelidir.



Şekil-15. Aksel simetrik tünel problemi

Buradaki aksenal simetrik tünel problemi için diferansiyel denge denklemi:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (79)$$

Plastik/elastik durumda sınır şartları:

$r=r_e$ iken $\sigma_r = \sigma_{re}$ ve $r \rightarrow \infty$ iken $\sigma_r = p_0$, elastik bölgedeki gerilmeler alınarak bu denklem çözülürse

$$\sigma_\theta = p_0 + (p_0 - \sigma_{re}) (r_e/r)^2 \quad (80)$$

ve

$$\sigma_r = p_0 - (p_0 - \sigma_{re}) (r_e/r)^2 \quad (81)$$

Kırılan bölge için (78) nolu denklem kullanılarak kayaç kütlelerinin kalıcı direnci limit gerilmelerde $\sigma_\theta = \sigma_1$ ve $\sigma_r = \sigma_3$ koyularak (78) numaralı denklemi yeniden yazalım:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + (m_r \sigma_c \sigma_r + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \quad (82)$$

Kırılan bölgede radyal gerilmeler için sınır şartı:

$r=r_i$ iken $\sigma_r = p_i$ alınarak (79) nolu eşitlik integre edilirse;

$$\sigma_r = \frac{m_r \sigma_c}{4} [\ln(r/r_i)] (m_r \sigma_c p_i + s_r \sigma_c^2)^{1/2} + p_i \quad (83)$$

σ_{re} gerilmesi ve r_e ile tanımlanan plastik bölgenin uzunluğunun belirlenmesi (79) ve (80) denklemlerinden $r=r_e$ iken elastik bölgenin iç çevresinde yeterli olan kayaç kitlesinin gevrek kırılmanın başlangıcı (78) nolu denklemden bulunabilir.

Asal gerilmenin türevi

$$\sigma_{\theta e} - \sigma_{re} = 2(p_0 - \sigma_{re}) \quad (84)$$

olduğundan bu durumda yeniden beliren kırılma başlangıcı kriteri (77) nolu eşitlikten:

$$\sigma_{\theta e} - \sigma_{re} = \sigma_c \left(m \frac{\sigma_r}{\sigma_c} + s \right)^{1/2} \quad (85)$$

TABLO-4 ASAL GERİLMELER ARASINDAKİ İLİŞKİ, ÇATLAKLI KAYA KÜTLESİNDE TAHMİNİ MOHR ZARFLARI ^(10,11)

	DOLAMİT, KİREÇTAŞI VE MERMER	ÇAMURTAŞI, SİLT TAŞI, ŞEYL VE KAYAĞAN TAŞ	KUMTAŞI VE KUVAR	ANDEZİT, DOLORİT, DİYABAZ VE RİYOLİT	ANFİBOL, GABRO, GNAYS GRANİT KUVAR DİYORİT
ÇOK SAĞLAM KAYA ÖRNEĞİ	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{7\sigma_{3n} + 1.0}$ $\tau_n = 0.816(\sigma_n + 0.140)^{0.658}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{10\sigma_{3n} + 1.0}$ $\tau_n = 0.918(\sigma_n + 0.099)^{0.667}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{15\sigma_{3n} + 1.0}$ $\tau_n = 1.044(\sigma_n + 0.067)^{0.692}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{17\sigma_{3n} + 1.0}$ $\tau_n = 1.086(\sigma_n + 0.059)^{0.696}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{25\sigma_{3n} + 1.0}$ $\tau_n = 1.22(\sigma_n + 0.040)^{0.705}$
ÇOK İYİ KALİTELİ KAYAÇ KÜTLESİ	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{3.5\sigma_{3n} + 0.1}$ $\tau_n = 0.651(\sigma_n + 0.028)^{0.679}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{5\sigma_{3n} + 0.1}$ $\tau_n = 0.739(\sigma_n + 0.020)^{0.692}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{7.5\sigma_{3n} + 0.1}$ $\tau_n = 0.848(\sigma_n + 0.013)^{0.702}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{8.5\sigma_{3n} + 0.1}$ $\tau_n = 0.883(\sigma_n + 0.012)^{0.705}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{12.5\sigma_{3n} + 0.1}$ $\tau_n = 0.998(\sigma_n + 0.008)^{0.712}$
İYİ KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.7\sigma_{3n} + 0.004}$ $\tau_n = 0.369(\sigma_n + 0.006)^{0.669}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{1\sigma_{3n} + 0.004}$ $\tau_n = 0.427(\sigma_n + 0.004)^{0.683}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{1.5\sigma_{3n} + 0.004}$ $\tau_n = 0.501(\sigma_n + 0.003)^{0.695}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{1.7\sigma_{3n} + 0.004}$ $\tau_n = 0.525(\sigma_n + 0.002)^{0.698}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{2.5\sigma_{3n} + 0.004}$ $\tau_n = 0.603(\sigma_n + 0.002)^{0.707}$
ORTA KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.14\sigma_{3n} + 0.0001}$ $\tau_n = 0.198(\sigma_n + 0.0007)^{0.662}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.20\sigma_{3n} + 0.0001}$ $\tau_n = 0.234(\sigma_n + 0.0005)^{0.675}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.30\sigma_{3n} + 0.0001}$ $\tau_n = 0.28(\sigma_n + 0.0003)^{0.688}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.34\sigma_{3n} + 0.0001}$ $\tau_n = 0.295(\sigma_n + 0.0003)^{0.691}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.50\sigma_{3n} + 0.0001}$ $\tau_n = 0.346(\sigma_n + 0.0002)^{0.70}$
KÖTÜ KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.04\sigma_{3n} + 0.00001}$ $\tau_n = 0.11(\sigma_n + 0.0002)^{0.646}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.05\sigma_{3n} + 0.00001}$ $\tau_n = 0.129(\sigma_n + 0.0002)^{0.655}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.08\sigma_{3n} + 0.00001}$ $\tau_n = 0.162(\sigma_n + 0.0001)^{0.672}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.09\sigma_{3n} + 0.00001}$ $\tau_n = 0.172(\sigma_n + 0.0001)^{0.676}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.13\sigma_{3n} + 0.00001}$ $\tau_n = 0.203(\sigma_n + 0.0001)^{0.686}$
ÇOK KÖTÜ KALİTEDE KAYA	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.007\sigma_{3n} + 0}$ $\tau_n = 0.042(\sigma_n)^{0.534}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.01\sigma_{3n} + 0}$ $\tau_n = 0.050(\sigma_n)^{0.539}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.015\sigma_{3n} + 0}$ $\tau_n = 0.061(\sigma_n)^{0.546}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.017\sigma_{3n} + 0}$ $\tau_n = 0.065(\sigma_n)^{0.548}$	$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{0.025\sigma_{3n} + 0}$ $\tau_n = 0.078(\sigma_n)^{0.566}$

son iki denklemin sağ taraflarını birbirine eşitlersek sonuç olarak:

$$\sigma_{re} = p_o - M\sigma_c \quad (86)$$

bulunur. Burada,

$$M = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m}{4} \right)^2 + m \frac{p_o}{\sigma_c} + s \right]^{1/2} - \frac{m}{8} \quad (87)$$

$r=r_e$ iken eşitlik (83) de $\sigma_r = \sigma_{re}$ yazılması yeterlidir. (83) ve (86) nolu denklemlerden alınan σ_{re} değerleri eşitlenerek plastik bölgenin yarıçapı hesaplanabilir.

$$r_e = r_i \exp \left[N - \frac{2}{m_r \sigma_c} (m_r \sigma_c p_i + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \right] \quad (88)$$

Burada,

$$N = \frac{2}{m_r \sigma_c} (m_r \sigma_c p_o + s_r \sigma_c^2 - m_r \sigma_c^2 M)^{1/2} \quad (89)$$

kritik destek basıncı denklem (86) dan görüldüğü gibi,

$$p_{icr} = p_o - M\sigma_c \quad (90)$$

biçiminde çıkacaktır.

3.6.1 Şekil ve Yerdeğiştirmeler

Buraya kadar yapılan işlemlerde basınç gerilmeleri ve şekil değiştirmeler pozitif olarak alınmıştır. Bunlara uygun olması bakımından şekil değiştirmelerdeki işaret kabulünde, radyal dışarıya doğru olan yerdeğiştirmeler pozitif alınacaktır.

Radyal şekil değiştirme, başlangıçta p_o hidrostatik basınç altındaki ortamda σ_{re} değeri azalarak σ_r olmasıyla

$$\epsilon_{re} = \epsilon_{3e} = - \left(\frac{1+\nu}{E} \right) (p_o - \sigma_{re}) \quad (91)$$

veya

$$\varepsilon_{re} = - \frac{M\sigma_c}{2G} \quad (92)$$

Burada

$$G = E/[2(1+\nu)] \quad (93)$$

Buradan elastik-plastik çevrenin radyal yerdeğişmeleri

$$u_e = - \frac{M\sigma_c}{2G} r_e \quad (94)$$

Benzer olarak elastik-plastik çevrede meydana gelen teğetsel şekil değiştirmeler

$$\varepsilon_{\theta e} = \varepsilon_{1e} = \frac{M\sigma_c}{2G} \quad (95)$$

Son derece küçük şekil değiştirmelerde, üç asal şekil değiştirmenin toplamıyla birim hacimdeki değişimi veya hacimsal şekil değiştirmeyi alalım.

Düzlem gerilme probleminde sunulan, kazıyla asal şekil değiştirmeler arasında artış olmayacak, böylece elastik-plastik çevrede hacimsal şekil değiştirme:

$$v_e = \varepsilon_{1e} + \varepsilon_{3e} = 0 \quad (96)$$

Asal şekil değiştirme plastik bölgede hesaplanırsa

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_1 = \varepsilon_{1e} + \varepsilon_1^p \quad (97)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_3 = \varepsilon_{3e} + \varepsilon_3^p \quad (98)$$

Burada ε_1^p ve ε_3^p Şekil-9 da üst değerden sonraki şekil değiştirme tarifi ile:

$$\varepsilon_3^p = - f \varepsilon_1^p \quad (99)$$

Şekil-9 dan

$$v^p = \varepsilon_1^p + \varepsilon_3^p = F \varepsilon_1 \quad (100)$$

Son iki denklemden

$$f = 1+F \quad (101)$$

Burada kural olarak plastisite teorisine başvurulur.

$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = - \frac{\epsilon_3^p}{\epsilon_1^p} = f = 1+F \quad (102)$$

σ_1 diferansiyel ifadesi (77) de $\sigma_3 = \sigma_{re}$ konularak sonuç (1+F) ye eşitlenir. Ve sonunda

$$F = \frac{m}{2 \left(m \frac{\sigma_{re}}{\sigma_c} + s \right)^{1/2}} \quad (103)$$

bulunur.

Kaya kütlesi için uygun ölçümler yapılırsa (103) denkleminde F hesaplanır.

Radyal yerdeğiştirme u , yarıçap r ve meydana gelen şekil de-ğiştirmelerle ilgili eşitlikler

$$\frac{u}{r} = -\epsilon_\theta \quad (104)$$

ve

$$\frac{du}{dr} = -\epsilon_r \quad (105)$$

(97-99) ve (104-105) denklemlerinden

$$\frac{du}{dr} = -\epsilon_{re} - f \left(\frac{u}{r} + \epsilon_{\theta e} \right) \quad (106)$$

veya (92) ve (95) denklemleri kullanılarak

$$\frac{du}{dr} = - \frac{M\sigma_c}{2G} (f-1) + f \frac{u}{r} \quad (107)$$

Bu diferansiyel denklemin çözümünden

$$u = \frac{M\sigma_c (1-f) r}{2G(f+1)} + Cr^{-f} \quad (108)$$

ve

$$\epsilon_{\theta} = -\frac{u}{r} = \frac{M\sigma_c (f-1)}{2G(f+1)} - c_r^{-(f+1)} \quad (109)$$

Buradaki C (94) numaralı denklemde $r=r_e$ alınırsa ϵ_{θ} olarak alınabilecek bir intigrasyon sabitidir.

Teğetsel şekil değiştirmeler için çözümlerde şu yol izlenir.

$$\epsilon_{\theta} = -\frac{u}{r} = \frac{M\sigma_c}{G(f+1)} \left[\frac{f-1}{2} + \left(\frac{r_e}{r}\right)^{f+1} \right] \quad (110)$$

Plastik bölgede radyal deplasmanlar gösterilerek hesaplanabilir. (106) denklemiyle uygulanan radyal yerdeğiştirmeler hesap edilebilir.

$$\epsilon_r = \frac{fM\sigma_c}{G(1+f)} \left[\frac{f-1}{2f} - \left(\frac{r_e}{r}\right)^{f+1} \right] \quad (111)$$

Buraya kadar verilen eşitlikler kullanılarak kapalı-biçim çözümlüyle tepkime eğrisi belirlenebilir.

3.6.2 Zemin (Temel) Tepkime Eğrileri

p_i iç destek basıncıyla zeminin tepki eğrisi arasındaki ilişki ve tünel çevresindeki radyal yerdeğiştirme u_i olarak gösterilsin. Elastik kaya kütleğinde plastik bölge oluşmadan önce tepki eğrisi şu biçimde elde edilir.

$$\frac{u_i}{r_i} = -\frac{p_o - p_i}{2G} \quad (112)$$

plastik bölge oluşmuşsa (110) denkleminde:

$$\epsilon_{\theta} = \frac{u_i}{r_i} = -\frac{M\sigma_c}{G(f+1)} \left[\frac{f-1}{2} + \left(\frac{r_e}{r_i}\right)^{f+1} \right] \quad (113)$$

r_e , p_i 'ye bağlı olarak (88) bağıntısından hesaplanabilir.

M: p_o gerilme durumu ve kaya kütleli özelliklerinin bir fonksiyonudur. Teorik olarak alınan u_i radyal genişleme değerleri

Plastik bölgeyi halka şeklinde kuşatarak ayıran, halkadaki gerilmeler ve şekil değiştirmeler ardışık yaklaşım yöntemiyle sayısal çözümler kullanılarak belirlenebilir (Şekil-16).

r_j ve r_{j-1} arasında uzanan $j-1$ halkasını gözönüne alalım. Yer, şekil değiştirmeler ve gerilmeleri bu kısım için yazalım.

$u_j, \epsilon_{\theta j}, \epsilon_{rj}, \sigma_{\theta j}, \sigma_{rj}, u_{j-1}, \epsilon_{\theta j-1}, \epsilon_{rj-1}, \sigma_{\theta j-1}$ ve σ_{rj-1} dir.

3.6.4 Adım Adım Çözümde Şekil ve Yerdeğiştirmeler

Eksenel simetri durumlarda, şekil değiştirme-deplasman ilişkisi r_j ve r_{j-1} arasındaki kısımda yazılabilir.

$$\frac{u_{j-1}}{r_{j-1}} = -\epsilon_{\theta(j-1)} \quad (117)$$

$$\left(\frac{du}{dr}\right)_{j-1} = -\epsilon_{r(j-1)} \quad (118)$$

$$\frac{u_j}{r_j} = -\epsilon_{\theta(j)} \quad (119)$$

$$\left(\frac{du}{dr}\right)_j = -\epsilon_{r(j)} \quad (120)$$

İnce halkada şu tahminleri yapabiliriz.

$$\frac{u_{(j-1)} - u_{(j)}}{r_{(j-1)} - r_{(j)}} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{du}{dr}\right)_{j-1} + \left(\frac{du}{dr}\right)_j \right] \quad (121)$$

(120) ve (121) denklemlerinin türevleri alınıp deplasmanlar için ifadelerin karşılığı (122) denklemine konulup, sadeleştirmeler yapılırsa:

$$\frac{r_{(j)}}{r_{(j-1)}} = \frac{2\epsilon_{\theta(j-1)} - \epsilon_{r(j-1)} - \epsilon_{r(j)}}{2\epsilon_{\theta(j)} - \epsilon_{r(j)} - \epsilon_{r(j)}} \quad (122)$$

$$d\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{\theta(j-1)} \quad (123)$$

Sonra şekil değiştirme, gevşeme bölgesinde

$$\varepsilon_r(j) = \varepsilon_r(j-1) - hd\varepsilon_{\theta} \quad (124)$$

Elastik-plastik çevrede asal şekil değiştirmeler (92-95) denklemlerinde $r=r_1=r_e$ alınır.

Keyfi olarak seçilen bir $d\varepsilon_{\theta}$ değeri ve bu değerler kullanılarak (123-124) ve (122) denklemleri $\varepsilon_{\theta 2}$, $\varepsilon_{r 2}$, r_2 ve u_2 değerleri (119) denkleminde kullanılacaktır.

Plastik bölgede karmaşık şekil değiştirme ve deplasmanları belirlemede işlem birkaç kez tekrarlanmalıdır.

ε_{θ} , $\alpha\varepsilon_{\theta e}$ ye ulaştığı zaman, kaya kütesinin kalıcı direncine ulaşılır. Ve ardışık hesap yapılarak (124) denklemi kullanılmaz. $r_j=r_i$ olduğu zaman ε_{θ} , $\alpha\varepsilon_{\theta e}$ ye ulaşmıyorsa, kalıcı dirence ulaşılmamış ve şekil değiştirip-gevşeyen bölgede tam plastik bölgedir.

$\varepsilon_{\theta} \geq \alpha\varepsilon_{\theta e}$ için önceden tanımlandığı gibi ardışık hesap gerekir. (124) denklemi yerine

$$\varepsilon_r(j) = \varepsilon_r(j-1) - fd\varepsilon_{\theta} \quad (125)$$

Burada $f: \varepsilon_3^D$ nin ikinci kısmının eğimidir.

3.6.5 Gerilmeler

Sırasıyla $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta}$ ve $\varepsilon_{\theta} \geq \alpha\varepsilon_{\theta e}$ olduğu zaman en üst ve kalıcı direnç denklemleri (77 ve 78) diferansiyel denge denklemleri gerilme dağılımında yeterli olmalıdır. $\sigma_3 = \sigma_r$ ile (79) ve (114) denklemlerinden

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{(\bar{m}\sigma_r\sigma_c + \bar{s}\sigma_c^2)^{1/2}}{r} \quad (126)$$

$r(j-1)$ ve r_j arasında alınan genel halkaya bunu uygulayalım.

$$\frac{\sigma_{r(j-1)} - \sigma_{r(j)}}{r(j-1) - r(j)} = \frac{\left\{ \frac{\bar{m}_a}{2} [\sigma_{r(j)} + \sigma_{r(j-1)}] \sigma_c + \bar{s}_a \sigma_c^2 \right\}^{1/2}}{\frac{1}{2} [r(j-1) + r(j)]} \quad (127)$$

Burada:

$$\bar{m}_a = \frac{1}{2} (\bar{m}(j-1) + \bar{m}(j)) \quad (128)$$

ve

$$\bar{s}_a = \frac{1}{2} (s(j-1) + \bar{s}(j)) \quad (129)$$

Birtakım ara işlemlerden sonra

$$\sigma_{r(j)} = b - \sqrt{b^2 - a} \quad (130)$$

Burada

$$a = \sigma_{r(j-1)}^2 - 4k \left[\frac{1}{2} \bar{m}_a \sigma_c \sigma_{r(j-1)} + \bar{s}_a \sigma_c^2 \right]$$

$$b = \sigma_{r(j-1)} + k \bar{m}_a \sigma_c \quad (131a)$$

$$k = \left[\frac{r(j-1) - r(j)}{r(j-1) + r(j)} \right]^2 \quad (131b)$$

(86) denkleminde $r=r_1=r_e$ alınarak birinci halkanın dış çevresindeki radyal gerilmeler bulunur.

Şekil ve yerdeğiştirme analizinde (122) numaralı denklemden yarıçaplar için (130) numaralı denklemden $\sigma_{r(j)}$ nin değerleri ardışık olarak hesaplanabilir.

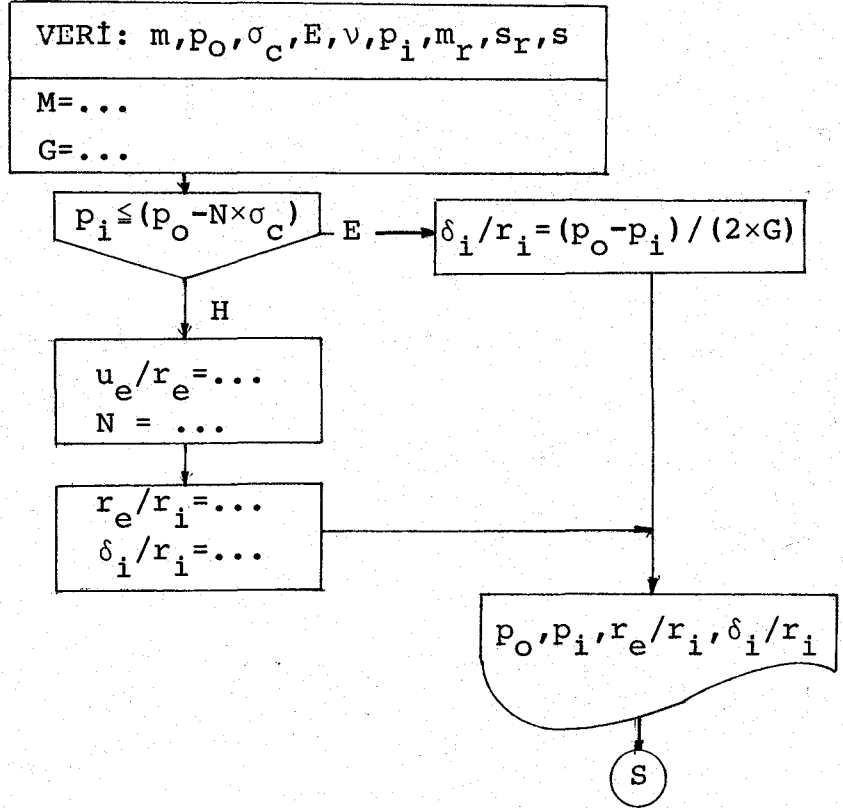
$\epsilon_\theta, \alpha \epsilon_{\theta e}$ yi geçerse (75) nolu denklemde alınan kaya kütlelerinin direnci ve σ_r nin tüm değerleri $m_j = m_r, s_j = s_r$ alınarak hesap yapılmalıdır.

σ_r için anlatılan bu hesaplama benzer yaklaşımla σ_θ nin bulunmasında kullanılabilir. Zemin tepkisi eğrilerinin belirlenmesinde $r/r_e, u/r$ değerlerinin hesabında olduğu gibi j değerleri için σ_r ler uygun olarak sıralanır. $p_i = \sigma_r$ alınarak egride işaretlenir. $\frac{u}{r} r_i$ den u_i değerleri hesaplanarak $\delta_i = -u_i$ olarak alınır.

Tepkime eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan kapalı-biçim (closed-form) çözümünün hesap sırası şöyle verilebilir.

- 1) $M = 1/2 [(m/4)^2 + (mp_o/\sigma_c) + s]^{1/2} - m/8$
- 2) $G = E/[2(1+\nu)]$
- 3) $p_i \geq (p_o - M\sigma_c)$ için tünelin çevresindeki deformasyon elastik:
 $\delta_i/r_i = (p_o - p_i)/(2G)$
- 4) $p_i < (p_o - M\sigma_c)$ tünelin çevresinde plastik deformasyon meydana gelir.
- 5) $N = 2\{ [(p_o - M\sigma_c)/m_r\sigma_c] + (s_r/m_r^2) \}^{1/2}$
- 6) $r_e/r_i = \exp\{N - 2[(p_i/m_r\sigma_c) + (s_r/m_r^2)]^{1/2}\}$
- 7) $\delta_i/r_i = M\sigma_c/[G(f+1)]\{ [(f-1)/2] + (r_e/r_i)^{f+1} \}$

Yöntemin akış diyagramı Şekil-17 de verilmiştir.



Şekil-17 Kapalı-biçim çözümündeki hesaplar için akış diyagramı

Adım adım yaklaşarak çözüme girmeden önce bir ön hesaplama yapmak gereklidir.

Ön hesaplamalar:

- 1) $M=1/2 [(m/4)^2 + (mp_o/\sigma_c) + s]^{1/2} - m/8$
- 2) $G=E/[2(1+\nu)]$
- 3) $\epsilon_{\theta 1} = \epsilon_{\theta e} = M\sigma_c/2G$
- 4) $\epsilon_{r1} = \epsilon_{re} = -M\sigma_c/2G$
- 5) $\sigma_{r1} = p_{cr} = p_o - M\sigma_c$
- 6) $\sigma_{\theta 1} = 2p_o - \sigma_{r1}$
- 7) $m_1 = m$
- 8) $s_1 = s$
- 9) $\lambda_1 = r_1/r_e = 1$

Herbir ince halkada yapılan hesaplar:

- 1) $d\epsilon_{\theta(j)} = 0.01\epsilon_{\theta(j-1)}$
- 2) $\epsilon_{\theta(j)} = \epsilon_{\theta(j-1)} + d\epsilon_{\theta(j)}$
- 3) $\epsilon_r(j) = \epsilon_r(j-1) - hd\epsilon_{\theta(j-1)}$
- 4) $\epsilon_{\theta(j)} > \alpha\epsilon_{\theta(1)}$ ise $\epsilon_r(j) = \epsilon_r(j-1) - f d\epsilon_{\theta(j-1)}$
- 5) $\lambda_j = \{ [2\epsilon_{\theta(j-1)} - \epsilon_r(j-1) - \epsilon_r(j)] / [2\epsilon_{\theta(j)} - \epsilon_r(j-1) - \epsilon_r(j)] \}^{\lambda_{j-1}}$

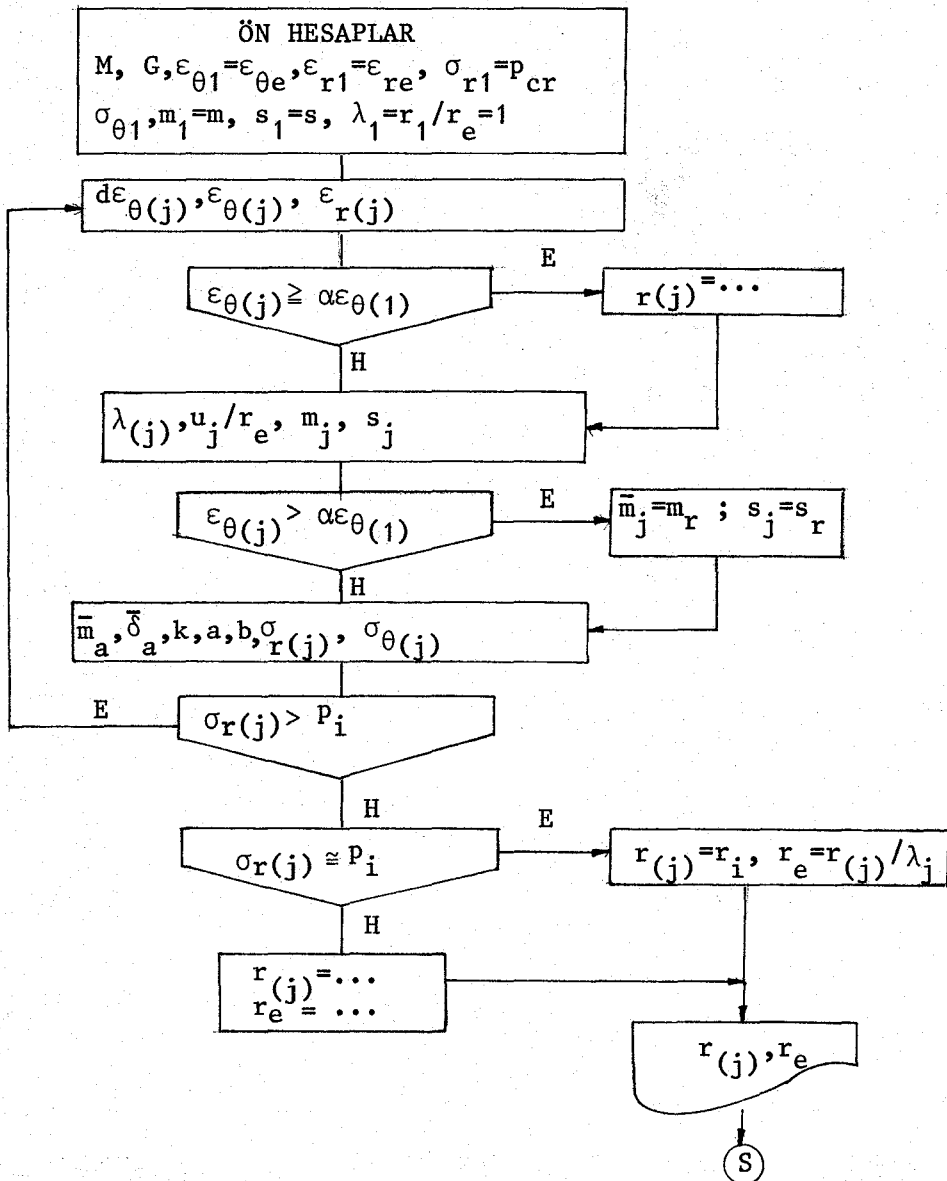
Burada

$$\lambda_j = r(j)/r_e; \quad \lambda_{j-1} = r(j-1)/r_e$$

- 6) $u_j/r_e = -\epsilon_{\theta(j)} \times r(j)/r_e$
- 7) $\bar{m}_j = m + (m_r - m) (\epsilon_{\theta(j)} - \epsilon_{\theta e}) / [(\alpha - 1)\epsilon_{\theta e}]$
- 8) $\bar{s}_j = s + (s_r - s) (\epsilon_{\theta(j)} - \epsilon_{\theta e}) / [(\alpha - 1)\epsilon_{\theta e}]$
- 9) $\epsilon_{\theta(j)} > \alpha\epsilon_{\theta 1}$ ise $\bar{m}_j = m_r$ ve $\bar{s}_j = s_r$
- 10) $\bar{m}_a = 1/2 (\bar{m}_{j-1} + \bar{m}_j)$
- 11) $\bar{s}_a = 1/2 (\bar{s}_{j-1} + \bar{s}_j)$
- 12) $k = [(\lambda_{j-1} - \lambda_j) / (\lambda_{j-1} + \lambda_j)]^2$
- 13) $a = \sigma_r^2(j-1) - 4k(1/2 \bar{m}_a \sigma_c \sigma_r(j-1) + \bar{s}_a \sigma_c^2)$
- 14) $b = \sigma_r(j-1) + k\bar{m}_a \sigma_c$
- 15) $\sigma_r(j) = b - \sqrt{b^2 - a}$

- 16) $\sigma_{\theta(j)} = \sigma_{r(j)} + (\bar{m}_j \sigma_{r(j)} \sigma_c + \bar{s}_j \sigma_c^2)^{1/2}$
- 17) $\sigma_{r(j)} > P_i$ ise 1. deki artım yapılarak bir sonraki halka için hesaplara devam edilir.
- 18) $\sigma_{r(j)} \cong P_i$ ise $r(j) = r_i$, $r_e = r(j) / \lambda_j$
- 19) Yarıçapların tümünün hesabında $r(j) = \lambda_j r_e$ kullanılır.
- 20) u_j yerdeğiştirmeleri, hesabedilen $r_e = \frac{u_j}{r_e}$ değerlerinden belirlenir.

Şekil-18 de yöntemin akış diyagramı görülmektedir.



Şekil-18 Adım adım çözümün akış diyagramı

4. TÜNEL KAPLAMALARININ BASİT OLARAK PROJELENDİRİLMESİ

4.1 PROJELENDİRMEDEKİ YAKLAŞIM

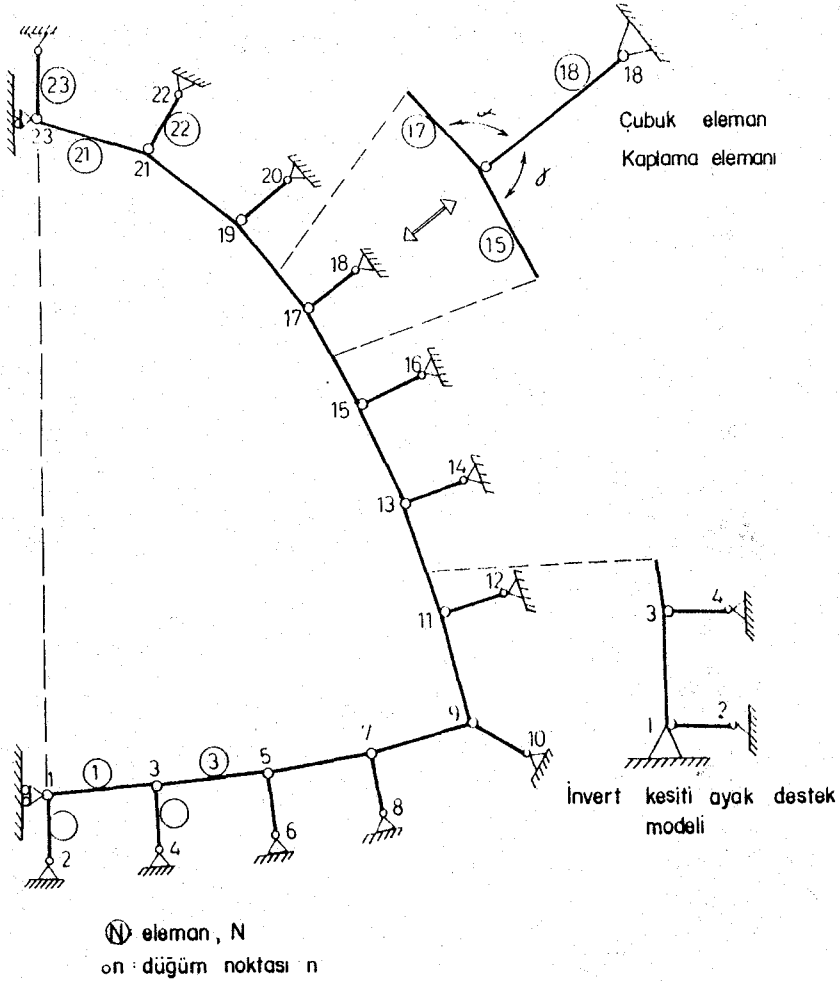
Tünelde gerilme analizi ve destek hesabının 3.2, 3.3 ve 3,4 de özetlenen yaklaşımla yapılabilmesi oldukça geniş bilgisayar programlarının geliştirilmesini gerektirir. İncelemenin daha basitçe yapılabilmesi zeminin ve desteğin lineer elastik davrandığı varsayımı ile mümkün olabilir. Lineer elastik sistemlerin çözümünde büyük kolaylık sağlayan sayısal yöntem ise sonlu elemanlar yöntemidir. Zemin sistemi yatak katsayısı ile karakterize edilerek tünel kaplamasının bu elastik ortama oturan kiriş ya da kolon olarak düşünüldüğü KAPLAMA adlı bilgisayar programı bu bölümde tanıtılacaktır. Programın çekirdeğini ABD Kaliforniya Üniversitesinde geliştirilen sonlu elemanlar algoritması oluşturmaktadır.

4.2 KAPLAMA'nın ANA ÖZELLİKLERİ

Yukarıdaki varsayımlarla tanımlanan ortamda desteğe gelen basınçlar ve desteğin buna karşı gösterdiği direnç vardır. Destek-zemin etkileşimi bu aşamada önem kazanmaktadır. Ortam genişledikçe desteğe gelen gerilmeler artmakta ve destek bu zorlanmalara kendisini uydurmaya yönelmektedir. Bu durumda kaplamanın bazı kesitlerinde istenmeyen çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Programın hazırlanması bu durum dikkate alınarak yapılmıştır. Çekme gerilmesi meydana gelen kesitlerde gevşetme işlemi yapılarak bu gerilmeler, kabul edilebilir sınırlar içine çekilmektedir. Zemin-destek etkileşiminden oluşan pasif reaksiyonlar da analize içerilmiştir. KAPLAMA ile dikdörtgen kesitli beton ya da betonarme destekler, hazır (prefabrike) ve sürekli kaplama plakaları boyutlandırılabilir. Seçilen kaplama kalınlığına bağlı olarak kesit tesirleri hesaplanmakta ve sonuçlar tablo halinde listelenmektedir. Sonuçların, tünelde hareketlerin minimum düzeyde tutulması koşuluyla gerçekçi olacağı söylenebilir.

4.3 ÇERÇEVE MODELİ

İncelenen destek sisteminin biçimi ve aktif basınçlar, tünelin düşey ekseninde simetrik olma koşulu ile serbestçe seçilebilir (Şekil-19).

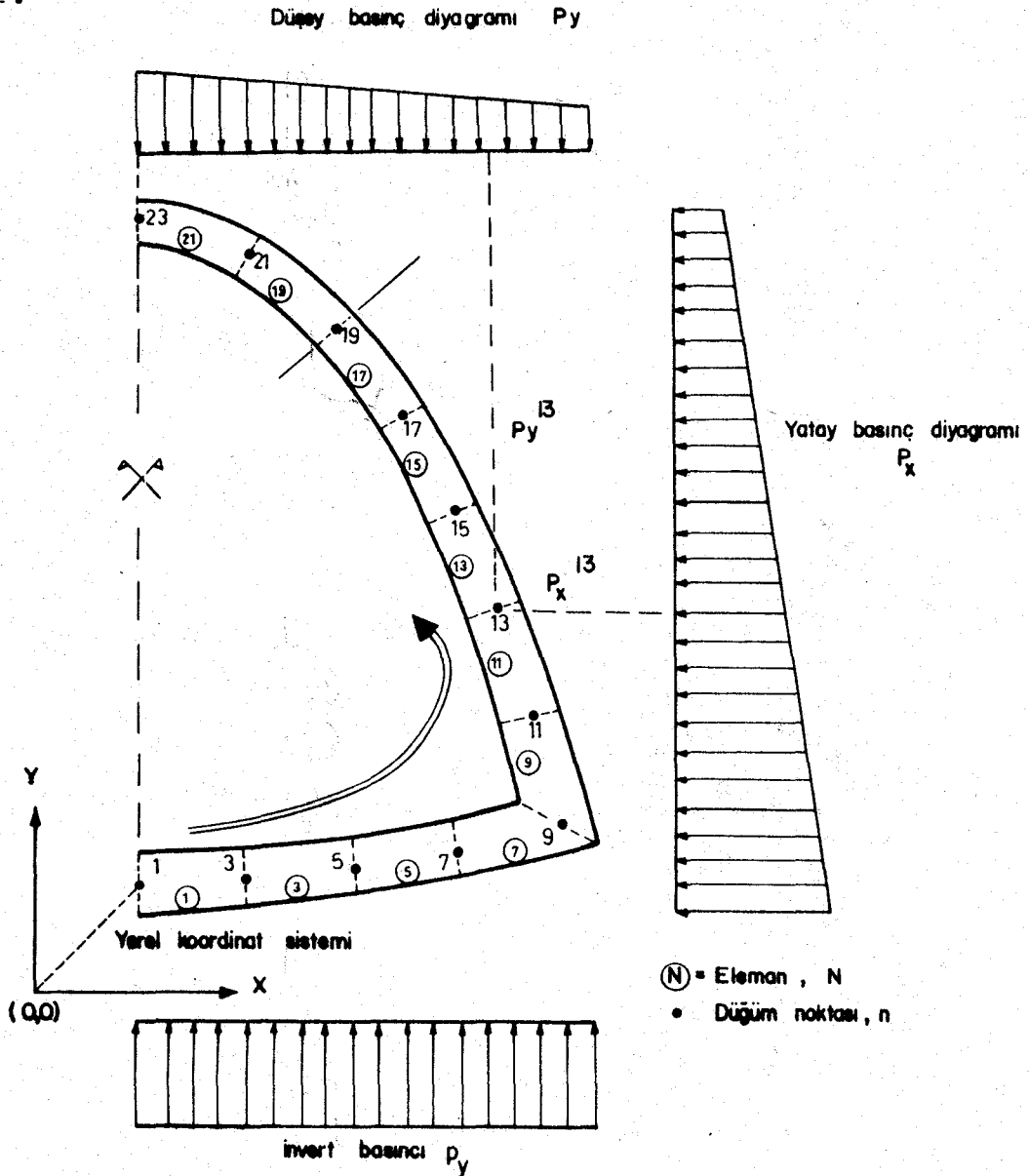


Şekil-19: Tünel kaplamasının çerçeve modeli

Genel problem simetri nedeniyle yarı yarıya azalacağından girdi verilerinden, bilgisayar belleğinden ve zamanından yaklaşık %50'lik bir tasarruf sağlanmaktadır. Analiz için simetrik çerçevenin sadece sağ tarafı alınır. Çerçevenin hesabını yapabilmek için kaplamanın arın ve invert kesitlerinin yatay ve düşey hareketini önleyen mesnetlendirmeler yapılmıştır. Bu mesnetler, sözkonusu kesitlerdeki yerdeğiştirmelerin sıfır olduğunu göstermek içindir. Bu kesitlerde momentin sıfır olacağı düşünülmemelidir. Nitekim çeşitli destekler için bu kesitlerde bir moment değeri belirlemektedir.

4.4 KAPLAMA ELEMANLARI VE DÜĞÜM NOKTALARI

Program düzlemsel bir çerçeve analizi esas alınarak yazılmıştır. Burada kaplama çerçevesinin eksen koordinatlarından destek sistemi için bir çerçeve modeli oluşturulur. Bunu sağlamak için kaplama çerçevesinin sağ yarısı 10-20 kadar eşit uzunlukta elemana ayrılır (Şekil-20). Elemanların uzunluklarının aynı olması kolaylık yanında doğruluğu arttırmakta ve son çözümde yakınsaklığı hızlandırmaktadır. Elemanlar oluşturulan çerçevenin invertinden başlayarak tek sayılarla saat dönüşünün tersi yönde numaralanmıştır.



Şekil-20 Aktif basınç diyagramı ve kaplamanın elemanlara ayrılması

Birinci eleman daima invert de, son eleman ise tünel aranın-da yer alır. Maksimum kaplama elemanı sayısı 99 olmakla beraber normal koşullarda bunun sadece üçte biri kullanılır. Şekil-20 de gösterilen örnek kaplama çerçevesi, düğüm noktaları yardımıyla çeşitli elemanlara bölünmüştür. Her eleman kendi yerini ve uzunluğunu tespit eden iki düğüm noktasının koordinatları ile tariflenir. İlk düğüm noktası i , o elemanın numarasını taşımaktadır. İkinci düğüm noktası j , eleman sayısı+2 ile gösterilir.

Verilen örnek çerçevede 1 nolu elemanın birinci düğüm noktası, düğüm 1. ve ikinci düğüm noktası, düğüm 3 olarak gösterilmektedir. Burada 1 ve 3 nolu elemanların 3 nolu düğüm noktasını ortak olarak kullandıkları ve bu düğümün iki elemanı bağladığı açıkça görülmektedir. Tüm durumlarda, kaplama düğüm noktaları elemanlara benzer olarak numaralanmaktadır. Numaralama saat dönüş yönünün tersine ve tek sayı olarak dizilecektir.

Ana kaplama biçimini modelleyen çerçevenin geometrisi ve yüklenme biçimi, her elemanın kalınlığı ve uygulanan aktif basınç, her düğüm noktası için verilen bilgiler türünden belirtilir. Çerçevenin geometrisi ortak bir orijin veya global koordinat sistemine göre, her düğüm noktasının x, y koordinatlarından elde edilir. Kolaylık sağlamak için orijin y ekseninin simetri ekseni ile x ekseninin 1. düğüm noktasıyla kesiştiği invert'e koyulmalıdır. Şekil 20 de olduğu gibi kapalı yapılarda orijin 1. düğüm noktası ile çakışır. Tüm durumlarda her düğüm noktasının koordinatı pozitif bir sayı olmalıdır. Diğer bir deyişle çerçeve kartezyen koordinat sisteminde x ve y nin pozitif olduğu bölgede bulunmalıdır. Bir diğer önemli nokta tüm düğüm noktalarının intrados ve ekstrados arasında kaplamayı yarıya bölecek şekilde yerleştirilmelidir.

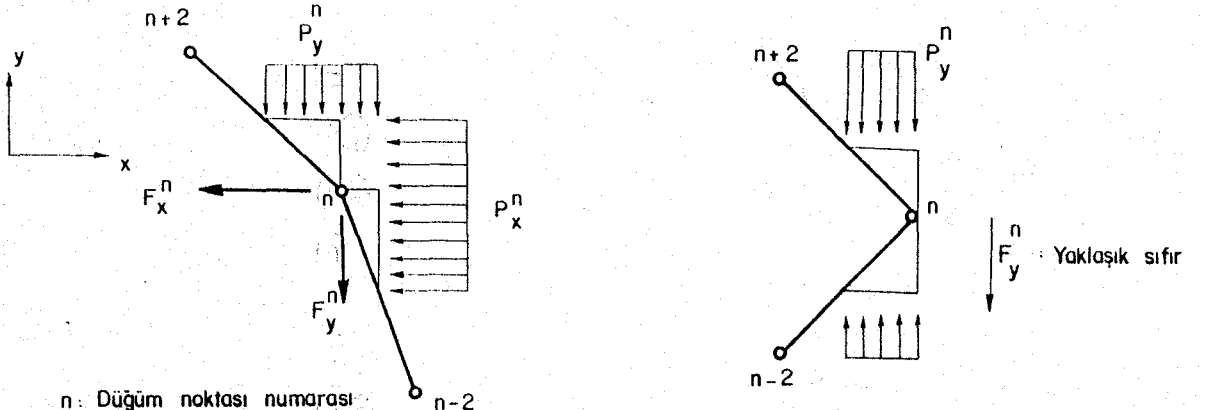
Şekil-20 de gösterilen kaplama yapısı düğüm noktaları koordinatlarını kullanarak düzlemsel bir çerçeve oluşturulur. Her kaplama elemanı iki komşu düğüm noktasını birleştiren giriş veya kolon olarak alınır. Kplama elemanları arasındaki düğüm noktası bağlantısı, momentlerin tümünü aktaran ankastre bir mesnettir. Kapalı bir çerçevenin sağ yarısını doğru olarak modellemek için ilk ve son kaplama düğümlerindeki sınır şartının hareketli bir mesnet olduğu varsayılır. Bu mesnet düşey harekete izin vermekte ancak yatay hareketi ve dönmeleri önlemektedir. İnverti bulunmayan atnalı şekli veya açık çerçevelerde temel bir sabit mesnetle temsil

edilir. Program ilk ve son kaplama düğüm noktalarının x koordinatını karşılaştırarak duruma uygun olan sınır şartını belirler. Her iki x koordinatı aynı ise çerçeve kapalı, değilse sabit bağlantılı süreksiz kabul edilir.

4.5 AKTİF BASINÇLAR

Kaplama projelendirilirken her düğüm noktasına etkiyecek yükler belirlenir. Kolaylık sağlaması açısından çerçeve ölçekli olarak çizilmeli ve üzerinde aktif basınç diyagramı gösterilmelidir. Böylece 13. düğüm noktasında gösterildiği gibi her düğüm noktasına etkiyen basınç değeri diyagramdan doğrudan okunabilir (Şekil-20). Aktif basınçlar, global koordinat sistemi ile belirlenmiş işaretlerle gösterilmektedir. Şekil-20 de gösterildiği gibi arın basıncı ve yatay basınç seçilen eksen takımına göre negatif x, y yönünde etkimektedir.

Koordinat sisteme göre, basınçların negatif değer aldığı görülmektedir. Sadece invert boyunca etkiyen düşey aktif basınç pozitif değerlidir. Aktif basınçlar kaplama düğüm noktasında Şekil-21a da gösterildiği gibi tekil kuvvetlere dönüştürülürler. Basit olan bu yöntemle aktif basınç diyagramlarında dış yüklerin değerleri yaklaşık olarak sağlanır. Tünelin tepe kısmındaki elemanlar yataya yakın olduklarından bu kısımlardaki yatay kuvvetler sifıra yakın olacaklardır (Şekil-21b).



n : Düğüm noktası numarası
 p_x^n : n düğümüne etkiyen yatay aktif basınç
 p_y^n : n düğümüne etkiyen düşey aktif basınç

F_x^n : F_y^n : n düğümüne etkiyen basınçların eşdeğer yük karşılığı

a : Kaplama ekstrasunda aktif basınçların düğüm noktasına yüklenmesi

b : Eşdeğer alanlarda hata sebebi

4.6 PASİF REAKSİYONLAR VE ÇUBUK ELEMANLAR

Her düğüm noktasına kaplamanın şekil değiştirmelerinden oluşan pasif zemin reaksiyonunu modelleyen bir çubuk eleman bağlanmıştır. Çubuk elemanlar çift sayılandırılmış bir eleman takımı olarak, tek sayılandırılmış kaplama elemanları ve düğüm noktaları arasına yerleştirilmiş düğüm noktaları olarak programda kendiliğinden oluşturulur. Son çubuk elemanı aynı zamanda model çerçevesinin son elemanı olup son kaplama düğüm noktasına eşit bir sayıdır. Çubuk elemanlar zeminin içine radyal olarak uzanmakta ve çubuk elemana komşu iki kaplama elemanı arasında eşit α açısı oluşturmaktadır (Şekil-19). Bu konum simetri eksenine paralel olarak düşey durumdaki birinci ve sonuncu elemanlara uygulanmaz. Çubuk elemanla kaplama arasındaki bağlantı her iki uçta mafsalı bir çubuk, yani pandül ayaktır. Böylece çubuk elemanlar kaplamadan radyal yönde eksenel kuvvet almaktadır. Elemanın katılığı yatak katsayısı ve çubuğun temsil ettiği alan tarafından belirlenmektedir. Bu alan komşu iki kaplama elemanının uzunluğunun birim genişlikle çarpımının yarısına eşittir. Bu uzunluk kaplamanın dış yüzünden itibaren hesaplanmaktadır. Eğer kaplama takozlandırılmış, çelik kaburgadan oluşturulmuş ve çelik profil doğrudan zemine dayanıyorsa yatak katsayısı kabul edilen birim genişlikten farklı olan profil kenarı genişliğine uyarlanır. Programda kullanılacak bu yatak katsayısı birimler uygun olmak koşulu ile,

$$k_{s_{yeni}} = k_s \cdot \text{Kenar (flaş) genişliği} \quad (133)$$

olarak elde edilir.

Kaplamada yer değiştirmeler ya da eğilmeler sonucu uyanan pasif reaksiyonlar, kaplama yapısının sadece eğilmesinden bulunmakta, kaplama yapısından doğan eksenel kısalma dikkate alınmamaktadır. Eldeki bilgiler özellikle esnek çelik kaplama plakalarında eksenel hareketler hesaba katıldığında hesaplanacak momentlerin, gerçekten yüksek çıktığını göstermektedir.

Programda kullanılan çerçeve modeli kaplamanın yerleştirilmesinden hemen sonra oluşacak ek kaplama eğilmesinin ihmali kabul edilebilir bir yaklaşım olarak alınabilir. Bu anlamda çerçeve modeli karmaşık bir problemi yaklaşık olarak çözmek için

bir araç olarak görülebilir. Beton kaplama ve çelik kaburgalarda olduğu gibi nispeten büyük enkesit alanlı kaplama kesitlerinin analizinde, aksenal kısalma hesaplanacak sonuçlara çok küçük bir etki yaptığından bunlar büyük bir aksenal alan veya katılık (rijitlik) kullanılarak ihmal edilebilir. Katılığın değeri 10^{12} nin eleman boyuna bölünmesi ile bulunur. Bu değer yapılan kaplamaların aksenal katılığının yaklaşık bir milyon katıdır.

4.7 ÇUBUK ELEMANIN GEVŞETİLMESİ İŞLEMİ

Düğüm noktalarının verilen koordinatlarına göre bir çerçeve oluşturulur. Aktif basınçlar yukarıda anlatıldığı şekilde düğüm noktalarına tekil kuvvetler olarak yüklenir. Meydana gelen hiperstatik çerçevenin çözümü yapılır. Çubuk kuvvetleri hesaplanır. Çubuklardan bazıları basınç alırken bazıları çekmeye çalışmaktadır. Bu çubuklar çekme alacak şekilde tasarlanmadığından çekme alan elemanlar hatalıdır. Doğru çözümü elde etmek için çekme aldığı anlaşılan çubuk elemanlar düzenli bir şekilde gevşetilerek veya ortadan kaldırılarak sonunda çekme almayan bir sistem oluşturana kadar işlem sürdürülür.

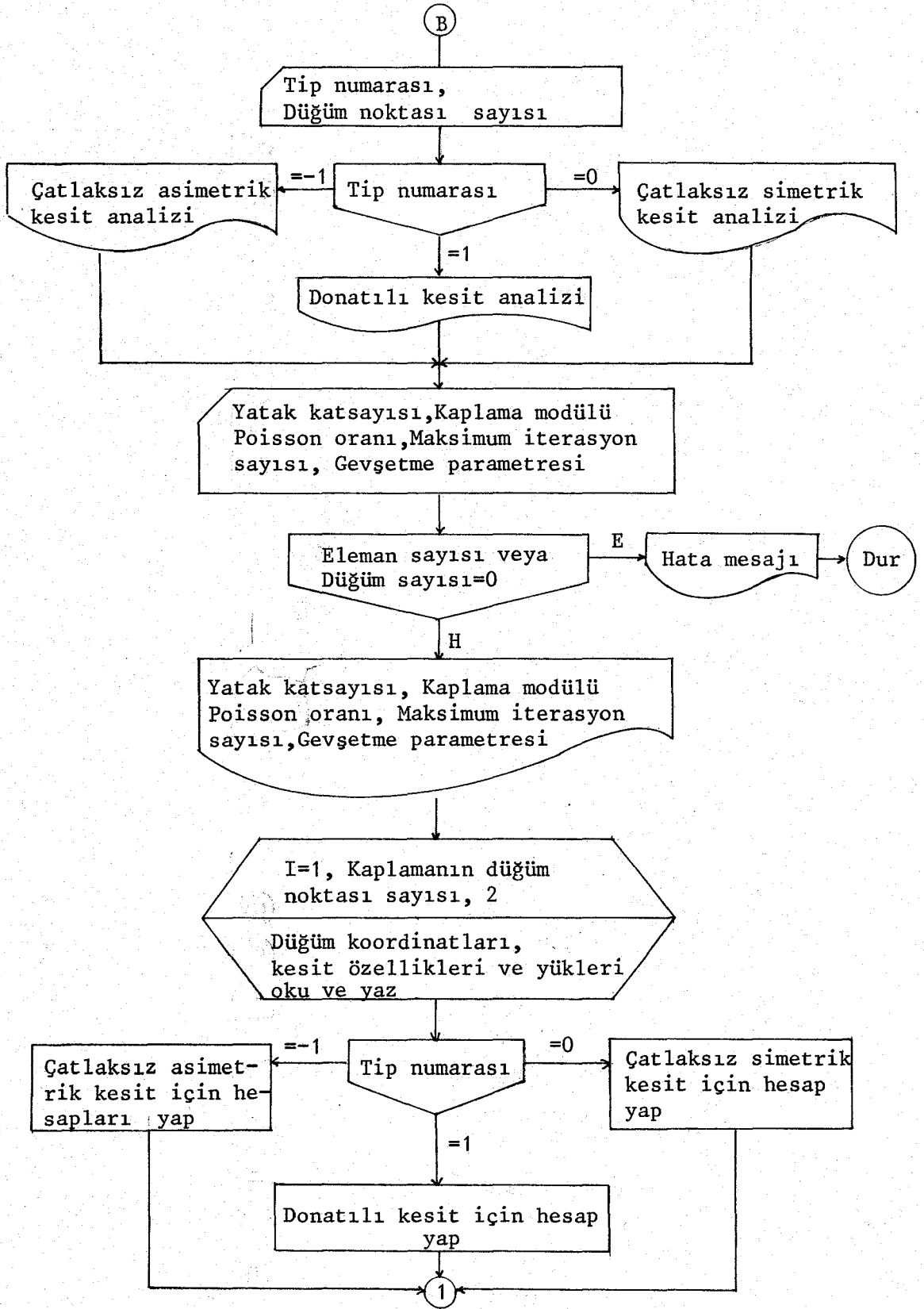
Çerçeve modelinde müsaade edilebilen maksimum çekme kuvvetini aşan elemanların serbest bırakılması için bir algoritma geliştirilmiştir. Çoğun çekme alan çubuk elemanların tümünün serbest bırakılması mümkün değildir. Böyle yapıldığında ek kaplama hareketleri oluşacağından çekme kuvveti alan çubukların basınç alması mümkündür. Daha önce çekme alan ve bu nedenle kaldırılan çubuk eleman basınca dönerse uygun pasif reaksiyonu uyandıramayacağından çözüm yine hatalı olacaktır.

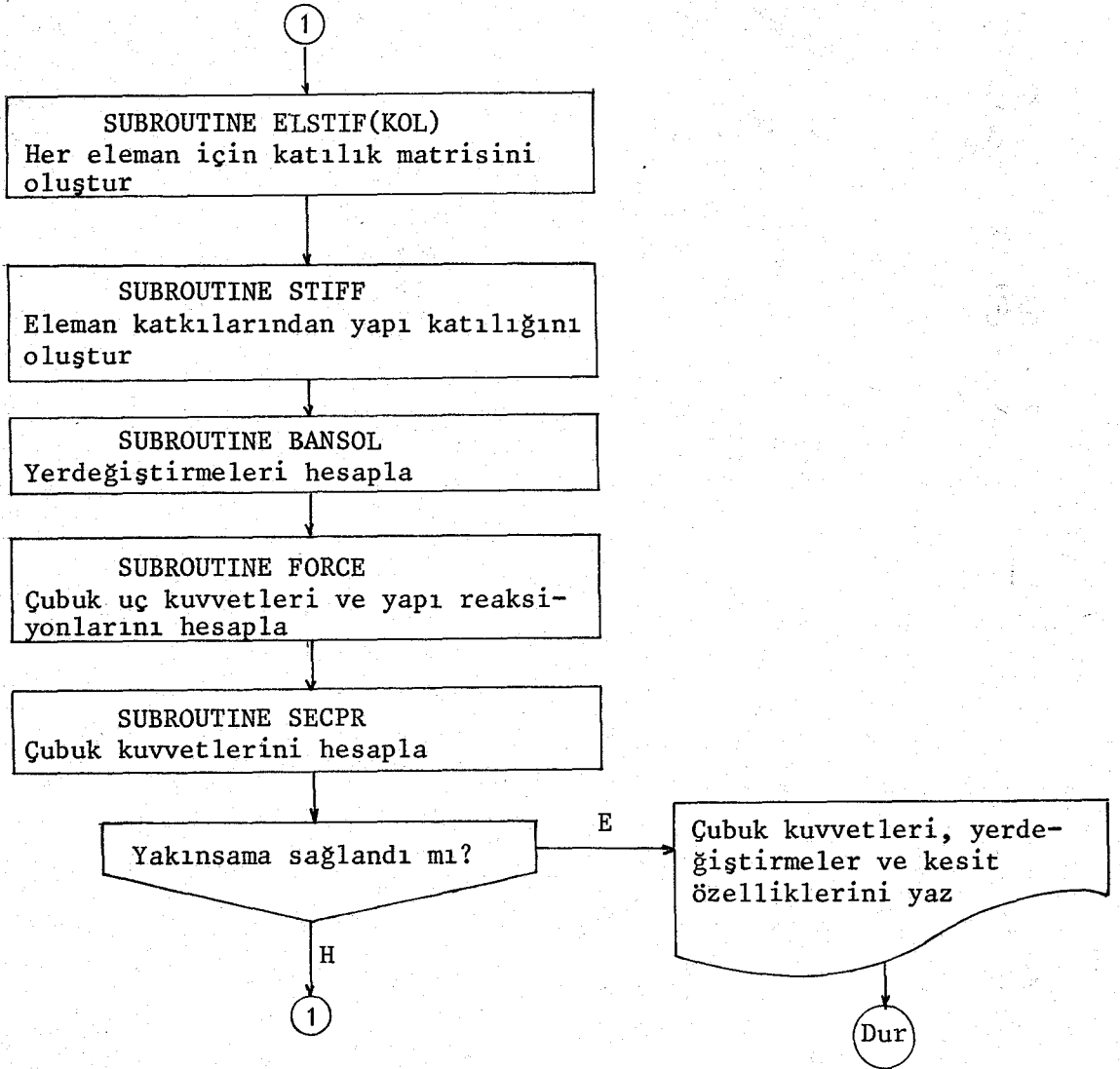
Çubuk elemanın gevşetme parametresi kullanıcıya her iterasyonda eleman sayısını seçme olanağı verir. Çekmeye çalışan elemanların tümünü serbest bırakmak için gevşetme parametresini 1.0 olarak almak gerekir. Ancak yukarıda anlatıldığı gibi bu bazı hatalar getirmektedir. Bu değer 0.0 alınırsa sadece en büyük çekme kuvveti alan eleman serbest bırakılır. Bu yaklaşım yavaş ve pahalı olduğu gibi çerçeve modelinin yeniden analizinde, birden fazla elemanın serbest bırakılmasını gerektirmektedir. Tecrübeler bu elemanları maksimum çekme kuvveti alan elemanların %20 sine kadar gevşetmenin

(gevşetme parametresi=0.20) yeterli olacağını göstermektedir. Eğer serbest bırakılan eleman basınca dönüş yaparsa program içi bir kontrol bu hatayı farketmekte ve hata mesajı vermektedir. Çubuk elemanların gevşetilmesinde iterasyon sayısı çoğun 6'dır. Her iterasyon sonunda sadece bir eleman gevşetildiğinden gerekli iterasyon sayısı gevşetilen eleman sayısına eşit olmaktadır. Her iterasyondan sonra serbest bırakılmış elemanların numarası da program çıktısında yazılmaktadır. Bu bilgi kullanıcıya analizin gidişini ve programın mantıksallığını göstermektedir.

Yüksek aktif basınçlar nedeniyle tünel içine hareket etmekte olan bölümler programda izlenebilmektedir. Gevşetmenin yapılmadığı bölgelerdeki çubuk elemanlar pasif reaksiyonlar oluşturmaktadır. Serbest bırakma sürecinde çubuk elemanlar çerçeve modelinden fiziksel olarak kaldırılmamakta ancak program çubuk katılığını çok küçük bir değere indirerek ihmal etmektedir. Bu işlem serbest bırakılmış bir çubuk elemanın hesaplanmış ilk katılığının 10^{20} faktörüyle azaltılması ile yapılmaktadır. Serbest bırakılan elemanı çok küçük bir katılıkta bırakmakla elemanın basınç durumuna dönüş yapması halinde hata kolayca tanımlanabilmektedir. Programın genel akış diyagramı Şekil-22 de verilmektedir.

Şekil-22 de görüldüğü gibi program kesit tipine göre hesaplar da dikkate alacağı bağıntıları kullanmak için yönlendirilmektedir. Bundan sonra, çerçeve modelindeki sonlu çubuk elemanların katılık matrisi ve sistemin katılık matrisi altprogramlar ile oluşturulmaktadır. Düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmelerin hesabı ve çubuk kuvvetleri iterasyonla hesaplanmakta, yeterli yakınsama sağlandıktan sonra ana programa dönülerek çubuk kuvvetleri, yerdeğiştirmeler ve kesit özellikleri sıralanmaktadır.





Şekil-22 Programın genel akış diyagramı

4.8 ELEMAN YEREL KOORDİNAT SİSTEMİ

Düğüm noktası koordinatları, aktif basınçlar ve hesaplanmış düğüm noktası hareketleri kaplamanın yerel koordinat sistemine bağlanmıştır. Hesaplanmış eleman uç kuvvetleri, normal kuvvet, kesme kuvveti ve momentlerde şekil-20 de gösterildiği gibi yerel bir koordinat sistemine bağlanmıştır.

Program normal kuvvetin işaretini eksen takımında x yönünü pozitif alarak, elemanın düğüm noktalarını kullanarak belirler. Benzer şekilde kesme kuvveti işareti y yönünde pozitif alınır. Moment ise düğüm noktası çevresinde saat yönüne ters dönüşte pozitif alınır. Çerçeve modelindeki elemanların diziliminden görü-

leceği gibi 1. veya i. inci düğüm için pozitif olan kesit etkileri 2. ya da j. düğümde negatif değeri alacaktır.

4.9 MAFSALLI KAPLAMA BAĞLANTILARI

Hazır (prefabrike) kaplamalarda olduğu gibi bazen kaplama yapısında mafsallı kullanmak gerekebilir. Bu etki gerekli noktalarda kısa ve nispeten esnek elemanların yerleştirilmesi ile sağlanmıştır. Örneğin, şekil-19 da 9. düğüm noktasında olduğu gibi yan duvarla invert arasına bir mafsallı yerleştirmek gerekebilir.

Komşu kaplama elemanlarının uzunluğunun, kabaca 1/10'u kadar bir kısa mafsallı elemanı ek bir düğüm noktası kullanılarak 9. düğüm noktasının iki yanına yerleştirilir. Bunun sonucunda kaplamanın son düğüm noktası 23 değil 25 olacaktır. Bir kaplama elemanının eğilme katılığı (EI/L) ye orantılı olduğundan kullanıcı atalet momentini ayarlayarak istediği katılığı oluşturabilir. Çoğun mafsallı bağlantının katılığının çok küçük bir elemanla modellenmesi arzu edilir. Bu durum mafsallı sabit mesnet olarak düşünülebilir. Bu işlemler mafsallı elemanına komşu kaplama elemanlarının 1/1000-1/10000 i bir atalet momenti vermekle sağlanır. Bu varsayımın doğruluk derecesi iki ayrı analizle kontrol edilebilir. Birincisinde uygun küçüklükte bir mafsallı elemanı, ikincisinde ise bunun 1/10 katı atalet momenti kullanılır. Eğer mafsallı elemanları sabit mesnet bağlantısı gibi görev yapıyorlarsa bu iki yaklaşımın karşılaştırılması çok küçük farklar gösterecektir.

4.10 TİP ANALİZLERİ

Üç değişik kaplama kesitinde hesap yapılması öngörülmüştür.

- 1- Çatlaksız simetrik kesit analizi
- 2- Çatlaksız asimetrik kesit analizi
- 3- Donatılı kesit analizi

Simetrik veya asimetrik çatlaksız kesit analizleri, hesaplanacak kuvvetler ve gerilmelerden bağımsız olarak, kesit özelliklerinin değişmediğini kabul etmektedir. Hesaplanan itki ve momentler, iç ve dış uç lif gerilmeleri cinsinden bulunur.

4.10.1 Çatlaksız Simetrik Kesit

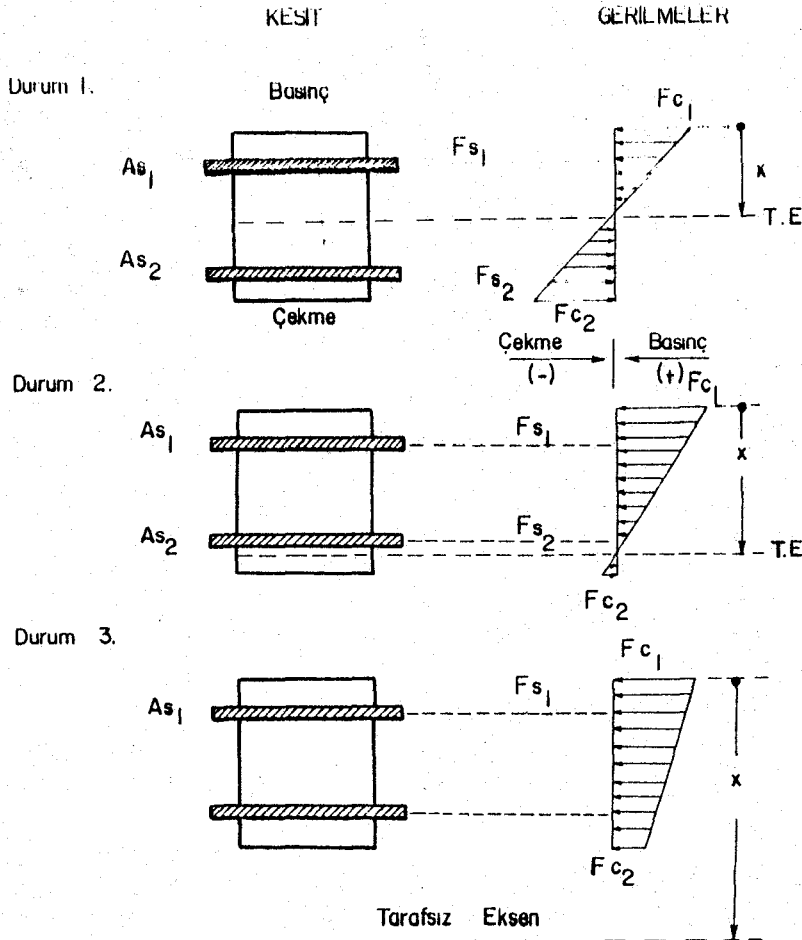
Kaplama geometrisi ve kesit özellikleri verildiğinde eleman kuvvetleri ve yerdeğiştirmeler hesaplanarak programın sonunda iki tablo halinde verilir. Normal kuvvet ve momentlerin maksimum değerleri eleman düğüm noktasında bulunan iki değerden daha büyüğü olarak alınır. Kaplamada basınç oluşturan normal kuvvet, iç liflerde çekme oluşturan moment pozitif olarak kabul edilir. En büyük lif gerilmeleri dikdörtgen bir kesitin bilinen özelliklerinden hesaplanmaktadır. Maksimum basınç gerilmesi,

$$F_{c1} = \frac{T}{A} + \frac{Mh}{2I} \quad (134)$$

öteki uçtaki gerilme

$$F_{c2} = \frac{T}{A} - \frac{Mh}{2I} \quad (135)$$

olarak hesaplanmaktadır. Momentin pozitif olduğu durumlarda F_{c1} kaplamanın dış yüzündeki maksimum gerilmedir (Şekil-23).



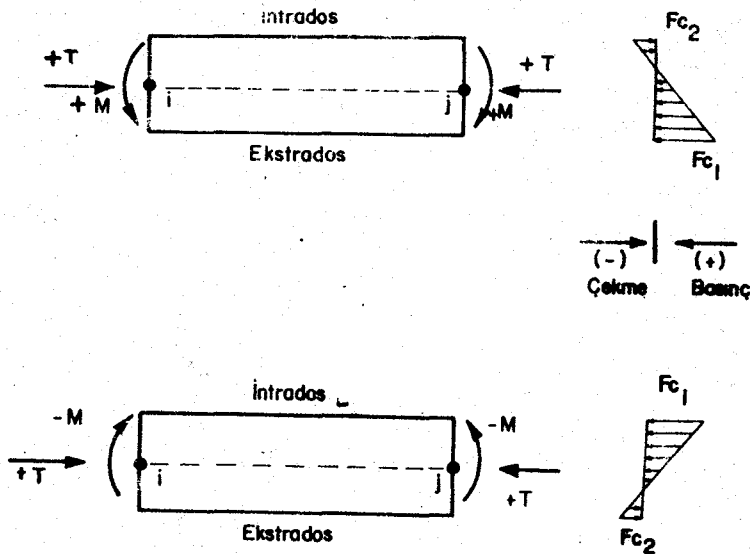
Şekil-23: Üç ayrı durum için tarafsız eksenin pozisyonu

F_{c1} ve F_{c2} gerilmelerin hesabında kesit ve eleman kalınlığının ortalama değerlerinin kullanıldığı unutulmamalıdır. Bu değer her elemanın birinci ve ikinci düğüm noktasında verilmiş kalınlıklarının ortalamasıdır. Değişken olmayan kesitlerde bu değer kaplamanın kalınlığına eşittir.

Alan ve atalet momenti girdi verilerinin bir tekrarı olup, doğru olup olmadıkları kontrol edilmelidir. Eğer bunlar verilmiş veya sıfır değer taşıyorsa program her iki değişkeni ortalama eleman kalınlığı ve kabul edilen birim genişliği kullanarak standart dikdörtgen kesit için hesaplayacaktır. Kesidin tarafsız eksenini F_{c1} ve F_{c2} gerilmeleri ile elemanın ortalama kalınlığından hesaplanır. Eksenin hesaplanmış durumu maksimum basınç yüzünden uzaklık olarak ölçüldüğünden gerilmelerin değerine bağlı olarak kesitin içine veya dışına düşebilir.

4.10.2 Çatlaksız Asimetrik Kesit

Simetrik ve asimetrik seçenekler arasında en belirgin fark kullanıcının her kaplama elemanının iç ve dış kesit modülünü (z) önceden verebilmesidir. Böylece modülü bilinen herhangi bir kesidin analizi yapılabilir. Gerilmeler simetrik kesite benzer olarak hesaplanmakta ancak moment bileşeni $\frac{M}{z}$ olarak alınmaktadır.

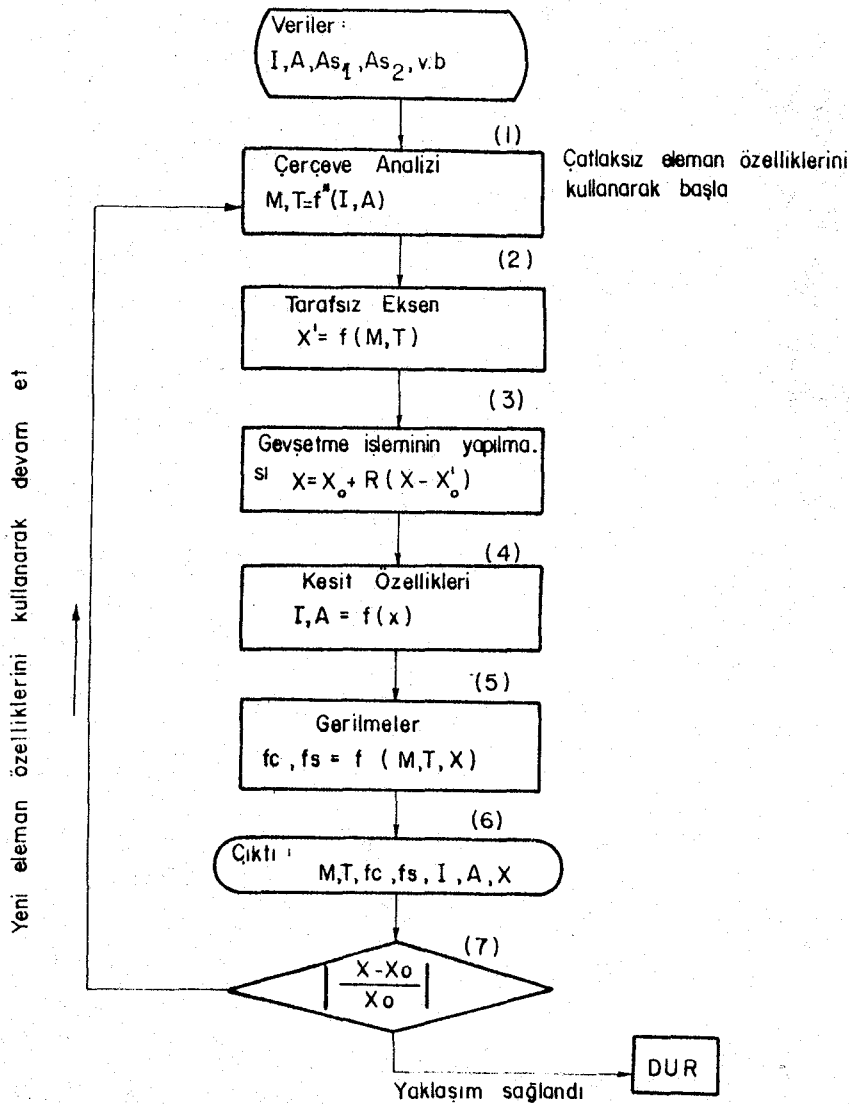


Şekil 24 Maksimum çubuk kuvvetleri ve gerilmeler için pozitif yönler

Ancak maksimum ve minimum uç lif gerilmeleri F_{c1} ve F_{c2} nin hesaplanmasında doğru modül değerlerinin kullanılması gereklidir. Bu amaçla Şekil-24 de gösterilen moment işareti kullanılır. Pozitif bir moment dış liflerde basınç oluşturur. Böylece F_{c1} 'i hesaplamak için dış kesit modülü, F_{c2} yi hesaplamak için ise iç kesit modülü kullanılır. F_{c1} iç modülden işaret değiştirerek hesaplanır.

4.10.3 Donatılı Kesit

Donatılı bir kesidin projelendirilmesi hiperstatikliği nedeniyle tatmin edici bir sonuca gitmek için iteratif çözüm yolu gerektirmektedir. Bu çözüm için algoritma ve program adımları Şekil-25 de gösterilmektedir.



Şekil 25 Donatılı kesit analizi için akış diyagramı

Program döngüsünde altı ana adım bulunmakta, yakınsaklığı sağlamak ya da işlemi sonundan önce bitirilmek üzere istenen sayıda tekrara müsaade edilmektedir. Bunlar:

- 1- Kaplama elemanlarının kuvvetlerini hesaplamak
- 2- Kesitin tarafsız eksenini (T.E) bulmak
- 3- T.E yi serbest bırakmak
- 4- Kesit özelliklerini bulmak
- 5- Gerilmeleri hesaplamak
- 6- Yakınsaklık için kontrol

olarak özetlenebilir.

ADIM 1 de kaplama çubuk kuvvetleri çerçeve modelinden hesaplanır. İteratif işlemleri başlatmak için önce donatı hesaba katılmadan çatlaksız kesit özellikleri bulunur. Sonra kaplamadaki itkiler ve momentlerin gerçek değerlerini bulmak için kesit özelliklerinin yeni değerleri işleme sokulur. ADIM 2 de T.E nin hesaplanması üç olası durum bulunduğu için güçlük çıkarabilir.

Birinci durumda tarafsız eksenin genel bir donatılı kesitte çekme ve basınç donatısı arasında bulunmasıdır. İkinci durumda T.E nin beton kesitin kenarı ile donatı arasında bulunmasıdır. Üçüncü durumda ise şekil-23 de gösterildiği gibi T.E nin kesit dışında bulunmasıdır. T.E nin gerçek yeri beton kesitin geometrisi, donatı demirinin alanı, modül oranı ve çubuk kuvvetlerine bağlıdır.

Birinci durumda donatı kesit alanı A_{s1} olarak gösterilmiştir. Bu durumda kesitin maksimum basınç alan kenarına en yakın donatı alanı A_{s1} basınca çalışmakta, karşı yüzdeki A_{s2} ise çekme almaktadır. Her iki yandaki donatı için sıfır gerilme de mümkündür. İkinci durumda donatı alanlarının her ikisinde basınçtır. Ancak A_{s2} ye yakın dış yüz bu sırada sıfır veya çekme gerilmesi almaktadır. Üçüncü durumda kesitin tamamı basınca çalışmakta olduğundan çatlak sözkonusu değildir. Birinci ve ikinci durum için T.E nin bulunması Ek-2 de gösterilmektedir. Üçüncü derece polinom ya da kübik denklem çözüm bölgesini yüz eşit artışla tarayarak gerçek kök bulunur ve çözüme devam edilir. Birinci durum polinomu incelenen bölge için bir kök vermiyorsa ikinci durum polinomu benzer şekilde araştırılır. Tarafsız eksen bu sefer de bulunamıyorsa kesitin dışında olduğu kabul edilir. Kesit çatlaksız olarak alınır ve üçüncü durum çözümü yürütülür.

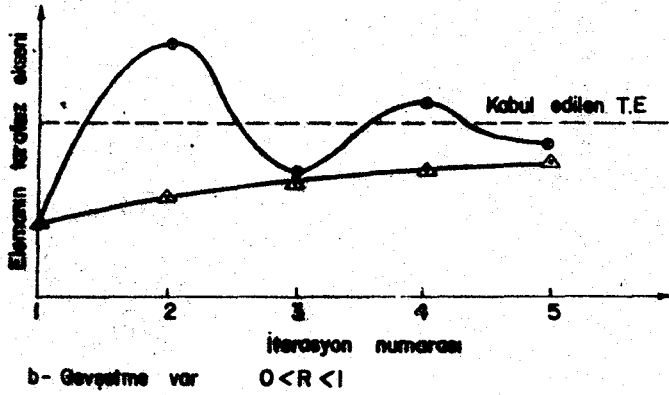
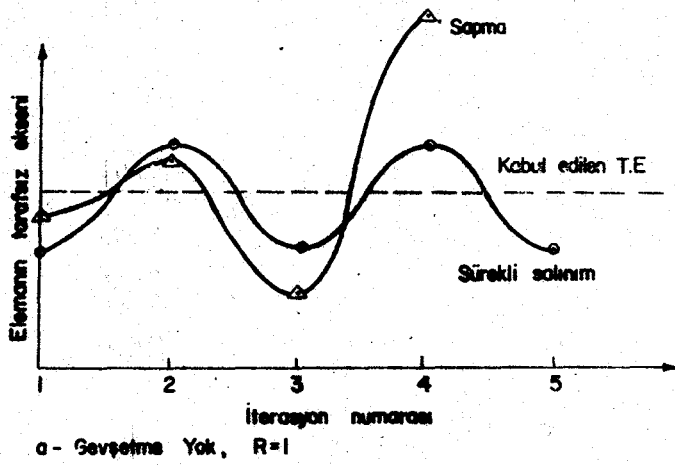
Bu işlemler oluşturulan çerçevenin her elemanı için teker teker yapılmaktadır. ADIM 3 de çatlaklı ve çatlaksız kesit özellikleri arasında değişimden kaçınmak için T.E nin hesaplanmış değeri büyük oranda gevşetilir. Bu işlem, tarafsız eksenin yeni değeri ile eski değeri arasındaki farkı dikkate alarak yapılmalıdır (Şekil-25). Başlangıçta, ilk iterasyon için eski değer, birinci ve ikinci durum için kaplama kalınlığının yarısı olarak, üçüncü durumda ise kalınlığın tümü alınır.

Eğer gevşetme yapılmıyorsa (gevşetme parametresi=1) hesaplanan T.E Şekil-26a da gösterildiği gibi gerçek değer etrafında değişecek ve muhtemelen ıraksak olacaktır. Gevşetme halinde parametrenin uygun değeri verildiğinde çözüm azalan genlik değerleri ile doğru değerın çevresinde dönecek ve bir kaç döngüden sonra (Şekil-26b) yakınsaklık sağlanacaktır. Bu istenen bir durumdur. Ancak gevşetme parametresi sifıra yakın olarak, aşırı bir gevşetme yapılmışsa çözümde yeterli yakınsaklığın sağlanabilmesi için çok sayıda iterasyon gerekecektir. Ayrıca bu iterasyonlarla, bazı durumlarda yanlış değere yakınsaklık da sağlanabilir. Bu nedenle her iterasyondan sonra T.E nin yazılmış değerlerini incelemek ve yakınsaklığın gerçekten sağlanıp sağlanmadığını değerlendirmek gerekmektedir.

Gevşetme parametresinin "en iyi" değerini seçmek her kaplama elemanının farklı hızda yakınsaması nedeniyle zor bir işlemdir. Genellikle bu parametrenin 0.3-0.8 arasında sınırlandırılması ve çoğun 0.6 alınması uygun olur. Bazı problemlerde kullanıcının elindeki probleme uygun "en iyi" değeri bulmak için denemeler yapması uygun olur.

ADIM 4 de kesit özellikleri, adım üçde bulunan yeni tarafsız eksenini kullanarak birinci ve ikinci durumdaki çatlaklı dönüştürülmüş alanlardan hesaplanır. Üçüncü durumda T.E kesitin kalınlığına eşit olup, ikinci durumun limit değerinden elde edilir. Ek-2 de denklemler çıkarılmıştır.

ADIM 5 de gerilmeler, T.E nin bulunduğu denklemden hesaplanır. Üçüncü durumda ise dönüştürülmüş kesit özellikleri ve çubuk kuvvetlerinin tümü kullanılmaktadır. Burada da gerilmelerin ve T.E nin hesabında ortalama eleman kalınlığı kullanılmaktadır.



Şekil 26 Yaklaşımında gevşetmenin etkisi

Asimetrik kesitin analizinde olduğu gibi maksimum ve minimum dış lif gerilmeleri F_{c1} ve F_{c2} yi bağıntılandırmak için eleman moment işaretini kullanmak uygun olacaktır. Aynı uygulama kaplama içi ve dışındaki donatı gerilmeleri F_{s1} ve F_{s2} için de geçerlidir. Şekil-24 de görüldüğü gibi bir pozitif moment kaplamanın dış yüzünde basınç oluşturur. Böylece F_{c1} ve dış yüzde donatı gerekiyorsa F_{s1} kaplama ekstradosuna bağitlandırılır. Moment negatif ise iç tarafta donatı konulması koşulu ile F_{c1} ve F_{s1} intradosda geçerlidir. Eğer iç ve/veya dış donatı verilmemişse F_{s1} ve/veya F_{s2} gerilmeleri için çıktı değerleri sıfırdır. Kaplama yüzüne yakın yerde minimum gerilme ile donatı kullanılmış ($A_{s2} \neq 0$) ve F_{c2} çekme değeri taşıyorsa F_{c2} nin çıktısı sıfır olarak yazılır. Bu çatlaklı davranışı hesaplara yansıtmak için yapılmıştır. Ancak donatı kullanılmamışsa negatif çekme değeri yazılacak ve bu kullanıcıya donatı gerektiğini hatırlatmak için açık bir belirti olacaktır. Kesit özellikleri ve gerilmelerin hesaplanmasında tüm

donatısız kaplama elemanları çatlaksız simetrik kesit olarak alınır. İterasyon ilerlediğinde son adım yakınsama kontrolüdür. T.E nin eski ve yeni değerleri arasındaki farkın mutlak değeri tüm donatılı kaplamalarda öngörölmüş yakınsaklık parametresinden küçük veya ona eşitse iterasyon işlemi sona erdirilir.

Projelendirmede ondalık cinsinden ifade edilmiş %1-5 lik yaklaşım parametresi yeterli doğruluk sağlayacaktır. %1 den daha duyarlı bir doğruluğa, programdaki kısıtlamalar gözönünde tutularak, pahalı ve zor çözüm olduğundan teşebbüs edilmemelidir. Problemlerin çoğunda 6-8 iterasyon uygundur. Daha fazla iterasyon isteniyorsa sonuçlar gözden geçirilmeli ve gevşetme parametresinin değerinin değiştirilmesi hatta kaplama yapısı elemanlarını bölme yolları düşünölmelidir. Yakınsaklık sağlanmadan iterasyon limitine erişilmişse son çıktıdan önce "KESİT ÖZELLİKLERİ İÇİN YAPILAN MAX. İTERASYON SAYISI=..YAKINSAKLIK SAĞLANAMADI" mesajı yazılacaktır.

Her iterasyon döngüsü tamamlandığında maksimum çubuk kuvvetleri, gerilmeler ve kesit özellikleri bir tabloya yazılır. Listelenen kuvvet değerleri daha önce yazılmış tablodaki ve bir önceki iterasyondaki kesit özelliklerinden hesaplanır. Ancak kesit özellikleri ve gerilmeler şekil-25 de gösterildiği gibi tarafsız eksenin en son ve en iyi değerlerinden elde edilir. Kesit özellikleri ve gerilmeler hesaplarda kullanıldığından tarafsız eksenin sadece gevşetilmiş değeri tabloda yazılacaktır. Buna ek olarak tarafsız eksenin kesit dışında bulunduğu durumlarda (üçüncü durum) maksimum basınç alan yüzden 2540 cm uzakta alınarak yazılmaktadır.

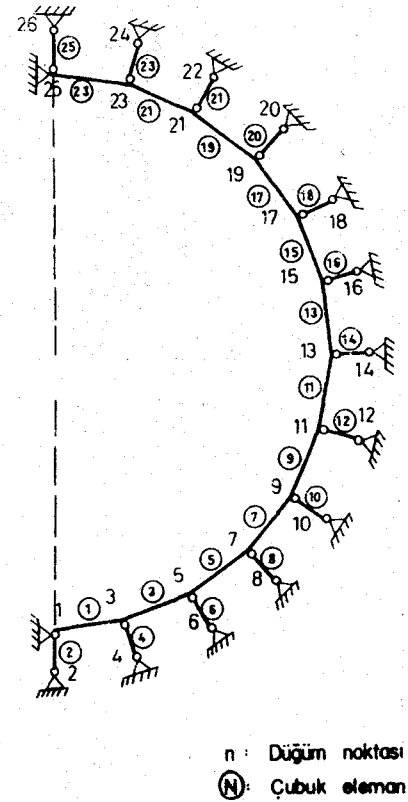
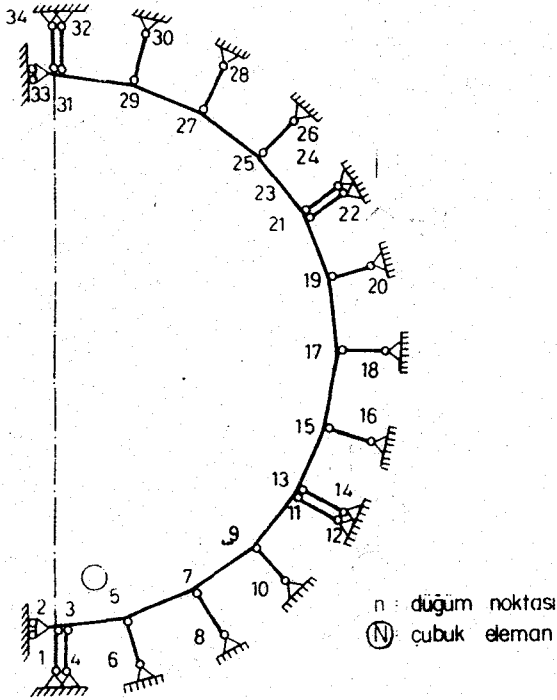
Çubuk kuvvetleri, gerilmeler ve kesit özelliklerinin her iterasyondan sonra tablo halinde yazılması gerçeği makul bir yakınsaklık sağlanması koşulu ile önem taşımayacaktır. Bu kontrol yakınsak çözümün ya da son iterasyonun bir önceki ile karşılaştırılması ile yapılır. İstenen duyarlılığa bağlı olarak farklar küçük olmalıdır.

4.10.4 Kaplama Programının Uygulaması

Tünel açılacak olan ortamın yatak katsayısı kaplama malzemesinin elastisite modülü ve Poisson oranı deneysel olarak ölçül-

dükten sonra, inşaa edilecek olan tünelin geometrisi belirlenir. Tünel geometrisi ne olursa olsun çoğun simetriktir. Programda bu özellik dikkate alınarak hesaplar, simetri ekseninin sağında kalan kısım için yapılmıştır. Kaplama geometrisi daha önce anlatıldığı gibi programa girdi olarak verilen düğüm noktalarının koordinatlarından oluşturulmaktadır. Bu çalışmada yapılan uygulamalarda dairesel tünel kaplamaları analiz edilmiştir. Kaplamanın beton, betonarme, çelik ve hazır beton (prefabrike) eleman olması durumunda programda nasıl değerlendirildiği gösterilmiştir. Beton, betonarme ve çelik kaplamalarda hiç bir süreksizlik olmamasına karşın hazır beton kaplamalarda, prefabrike elemanların birleşim yerleri mafsal olarak düşünülmüş ve bu kısımlar birbirine çok yakın iki ayrı düğüm noktası ile numaralandırılmıştır (Şekil-27).

a) KAYADA AÇILAN DAİRESEL TUNELİN PREFABRİK ELEMANLARININ ÇERÇEVE MODELİ b) KAYADA AÇILAN DAİRESEL TUNELİN ÇERÇEVE MODELİ



Şekil-27 Çerçeve modelleri

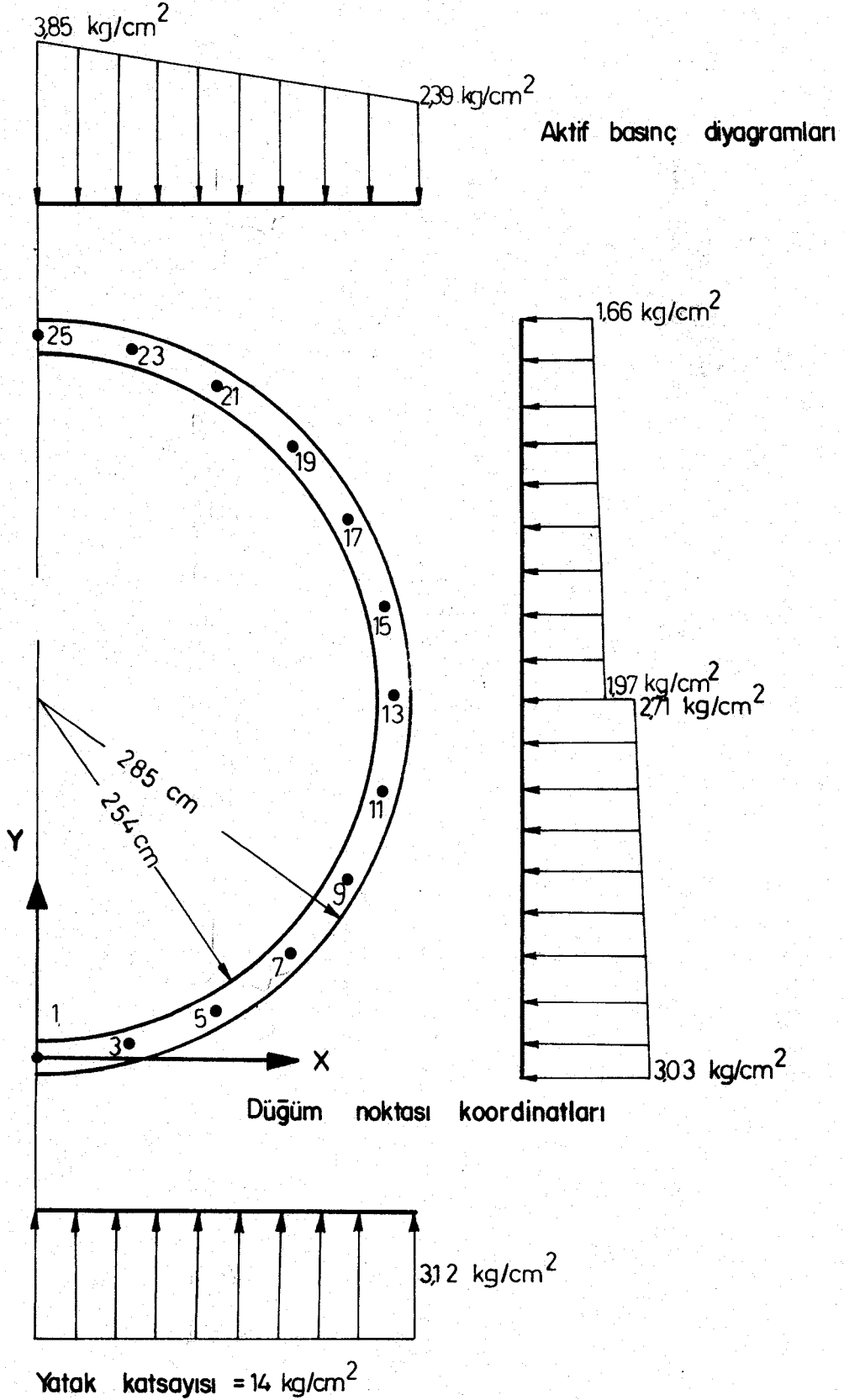
Kaplama kalınlıkları genellikle 20-40 cm arasında tutulduğundan, burada hesaplar 30.5 cm için yapılmıştır. Kaplamaya uygulanan aktif basınçlar Şekil-28 de gösterilmiştir. Kesit etkileri verilen kaplamalarda, dış yük ya da aktif basınçlar aynı fakat kaplama malzemesine bağlı değişkenler farklıdır. Poisson oranı 0.27 ve yatak katsayısı 14 kg/cm^2 olarak alınmıştır. Çelik kaplamanın elastisite modülü $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, diğer kaplamalarda ise betonun elastisite modülü $2.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ olarak alınmıştır. Kesit etkileri diyagramlarından anlaşılacağı gibi beton ve betonarme kaplamalar yaklaşık olarak aynı kesit zorlanmalarına maruz kalmaktadır.

Uygulaması yapılan tüm kaplama türleri için tünelin geometrisi ve aktif basınçlar aynı olmasına karşın, kesit etkileri diyagramlarında görülen farklar, kaplamanın özağırlığı ve oluşturulan çerçeve modelindeki düğüm noktası sayısının değişiminden ileri gelmektedir. Çelik kaplama için görülen belirgin fark, çeliğin elastisite modülünün yüksek olmasından dolayı uyandırdığı pasif reaksiyonların farklı oluşundandır. Betonarme kaplamalarda donatı alanları eşdeğer beton alanına çevrilmekte ve hesaplara devam edilmektedir.

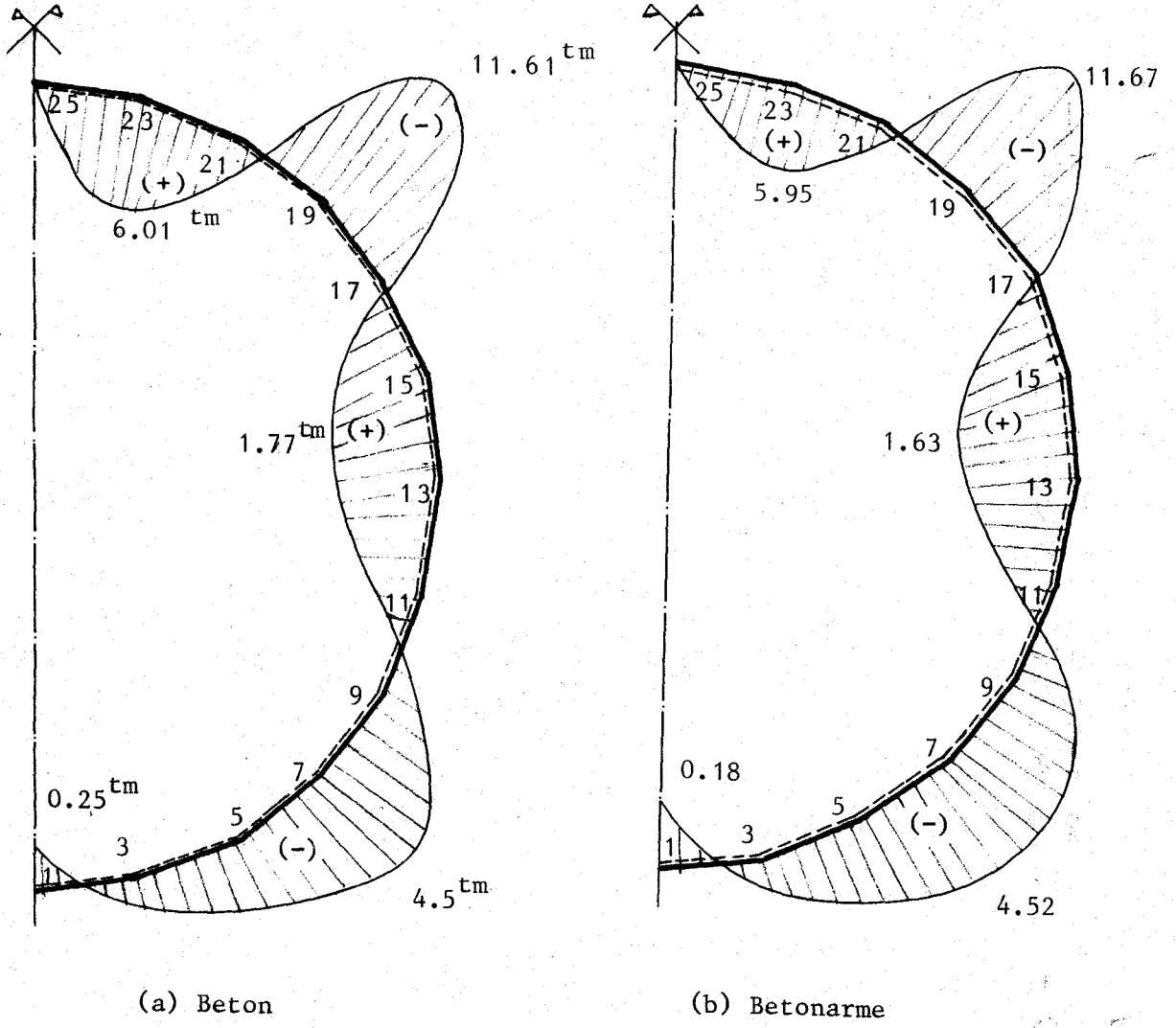
Şekil-29,30 ve 31 de bu kaplamalar için elde edilen kesit etkileri diyagramları görülmektedir. Şekil-32 de ise hazır beton (prefabrike) kaplama için normal kuvvet diyagramı çizilmiştir. Çelik, beton ve betonarme kaplamalarda tünel 25 elemandan ve bunları birleştiren 26 düğüm noktasından oluşmaktadır. Prefabrike kaplamada, hazır elemanların birleşim noktaları da birer düğüm noktası olarak düşünüldüğünden, burada yapılan uygulamada 33 eleman ve 34 düğüm noktasından meydana gelmektedir.

Beton ve betonarme kaplamalarda moment diyagramlarındaki benzerlikler dikkati çekmektedir. İki kesit arasındaki fark doğal olarak malzemenin davranışından kaynaklanacaktır. Diğer bir deyişle çekmeye dayanıksız olan betonun çatlama olasılığı yüksek iken betonarme kesit aynı gerilmelerden etkilenmeyecektir. Bu gibi etkiler gözönüne alınarak kaplama türü seçilmelidir. Örneğin, su ya da kanalizasyon tünellerinde beton kaplama yapmak sızıntılara neden olacağından uygun değildir. Seçilecek kaplama türünün amaca uygun olması gereklidir.

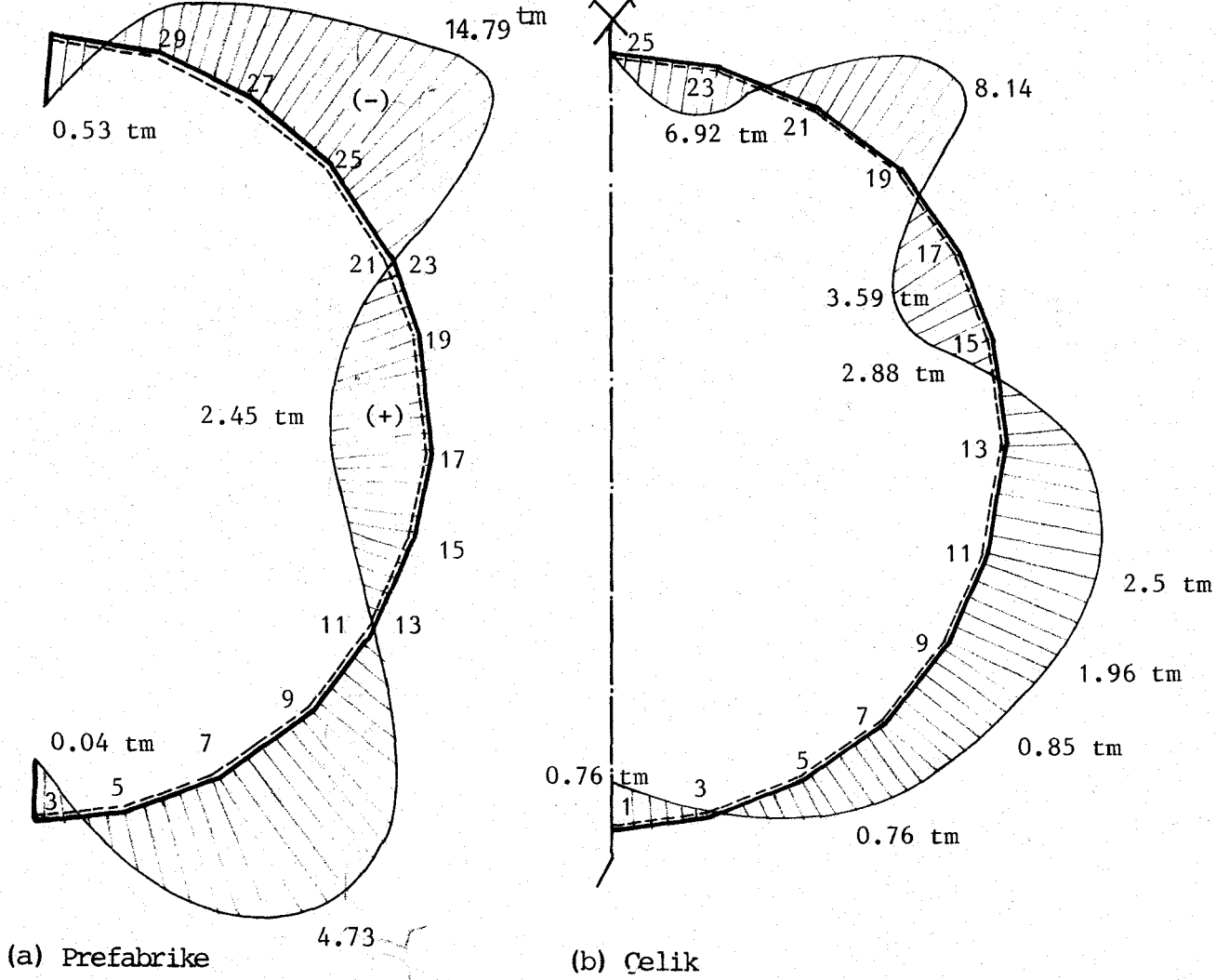
KAYADA DAİRESEL TÜNEL

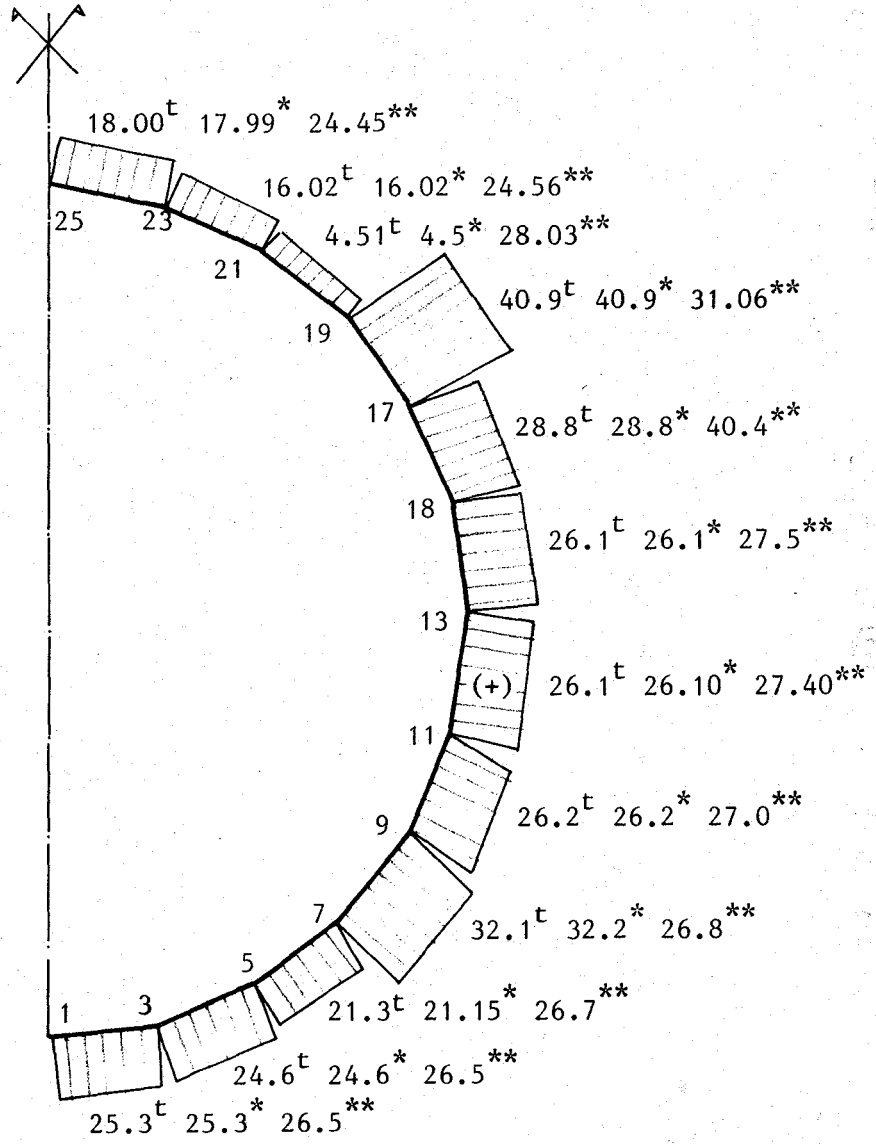


Şekil - 28 : Tünel etkiyen basınçlar



Şekil-29 Beton ve betonarme kaplamalar için moment diyagramları



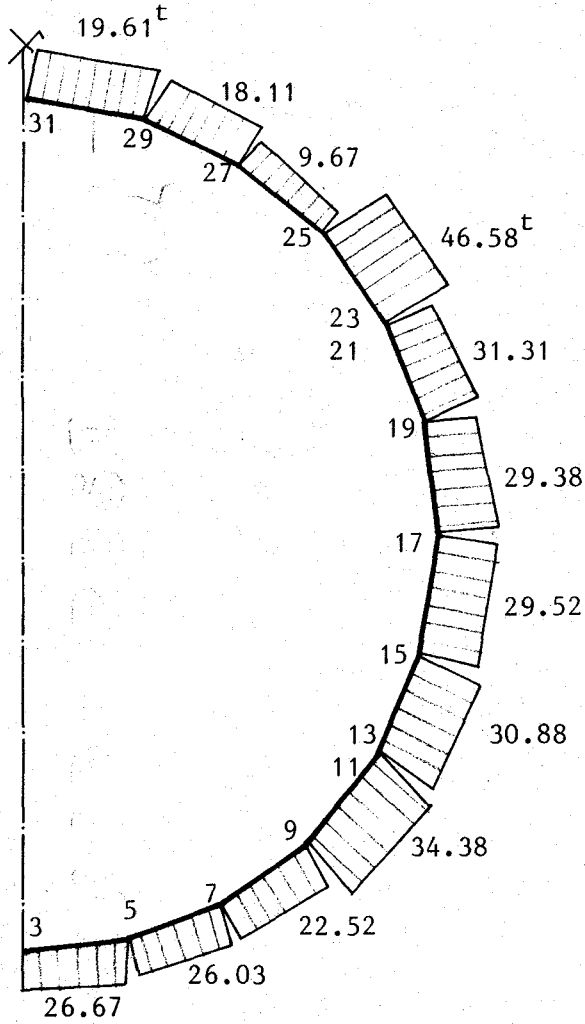


yıldızsız: Betonarme

* : Beton

** : Çelik

Şekil-31 Betonarme, beton ve çelik kaplamalar için normal kuvvet diyagramı



Şekil-32 Hazır beton kaplama T diyagramı

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Yapılan literatür araştırmalarında tünel mekaniği ve destek sistemlerinin projelendirilmesinde henüz son sözün söylenmediği ve geniş araştırma programlarının sürdürüldüğü görülmüştür.

2. Patlatma, destek sağlanmasında gecikme gibi olaylar sonucu zemin ortamında plastik bölge oluşması, belirgin yerdeğiş-tirmeler tünel analizinde deformasyon etkilerinin de hesaba katılarak yeni bir yenilme ve etkileşim modelinin kurulmasını gerektirmektedir.

3. Kaplamanın kapalı kesit olması, sakıncası yoksa dairesel seçilmesi taşıyıcılık özelliğini artıracaktır.

4. Tünel açılan ortam mümkün olduğu kadar az kurcalanmalıdır. Tünelin biçimini ve boyutlarını değiştirmeye yönelik her yeni kazı, gerilmelerin şiddetini, yönünü ve yerini değiştirecek, böylece ortamın taşıma gücü azalacaktır.

5. Zemin tepkime (reaksiyon) eğrileri belirlenerek, ortamın özelliklerini yansıtan parametrelerle desteğe gelecek optimum gerilmeler ve bu gerilmeler altında tünelde oluşacak kapanma hesaplanabilir.

6. Analizin daha gerçekçi yapılabilmesi için zemin-destek etkileşimini hesaba katarak, tepkime eğrilerinden yararlanarak projelendirme yapmak, kaplamanın ekonomikliğini artıracaktır.

KAYNAKÇA

1. anon. 1980 Jeoteknik, Cilt I,II, DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.
2. Cook, N.G.W., 1970 An experiment proving that dilatancy is a pervasive volumetric property of brittle rock loaded to failure Rock Mechanics, 2:4:181-188.
3. Crouch, S.L., 1970 Experimental determination of volumetric strains in failed rock, International journal of rock mechanics and mining sciences, 6:7: 589-603.
4. Daemen, J.J.K., 1977, Problems in Tunnel Support Mechanics, Underground Space, 1:3:163-172.
5. Fairhurst, C., 1964 On the validity of the Brazilian test for brittle materials, International journal of rock mechanics and mining sciences, 1:1:535-546.
6. Fenner, A., 1938 Untersuchung zur erkenntnis des gebrügdruckes, Glückauf, 74:32: 681
7. Heim, A., 1912 Zur frage der Gebirgs-und Gesteinfestigkeit Schweiz. Bauzeitung 50:2:187.
8. Hobbs, D.W., 1966 A study of the behavior of broken rock under triaxial compresion and its aplication to mine roadways. International journal of rock mechanics and mining sciences, 1:3:11-43.
9. Hobst, L., ve Zajic , 1977 Anchoring in Rock Elsevier, Amsterdam
10. Hoek, E. ve Brown, E.T., 1980 Empirical strength criterion for rock masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 1013-1035.
11. Hoek, E. ve Brown, E.T., 1980 Underground excavations in Rock, The Institution of Mining and Metalurgy, London.
12. Kastner, H., 1949 Uber den echten gebirgsdruck beim bau tiefliengender tunnel, Osterreichische Bauzeitschrift.
13. Ladanyi, B., 1974 Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings, Proceedings Third congress of the international society for rock mechanics 2:B:1150-1156.

14. Langefors, U. ve Kihlstrom 1978 Rock Blasting Wiley, New York.
15. Morisson, R.G.K. ve Coates, D.F., 1955 Soil mechanics applied to rock failure in mines, The Canadian mining and metallurgical Bulletin , 48:523:701-7111.
16. Muir-Wood, M.A., 1975 The circular tunnel in elastic ground, Geotechnique, 25:1: 115.
17. Nussbaum, H., 1973 Recent development of the New Austrian Tunelling method Proc. ASCE CO1:115.
18. Önalp, A., 1982, İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi Cilt I, K.T.Ü. Trabzon.
19. Önalp, A., 1983, İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi Cilt II, K.Ü. Trabzon.
20. Schmidt, J., 1926 Statische probleme des Tunnel-und Stollenbaues, Berlin.
21. Szechy, K., 1966, The art of tunelling, Akademiai Kiadó, Budapest.
22. Terzaghi ve Richart, 1952, Stress in rock about cavities Geotechnique , 3:1:2.
23. Wahlström, E.E., 1973, Tunelling in rock. Elsevier, Amsterdam.

EK-1 BİLGİSAYAR PROGRAMININ KULLANIMI

GİRDİ-ÇIKTI FORMATLARI

KAPLAMA üç tür analiz yürütmek üzere seçeneklere sahiptir. Bu analizlerin girdi-çıkıtı formatları standartlaştırılmıştır. Çatlaksız simetrik kesit analizinde gereken ana bilgiler ya da girdiler çatlaksız asimetric veya betonarme kesit için olandan farklıdır. Son iki durumda doğal olarak kesit modülleri ve donatı için ek bilgi isterler. Fakat çıkıtı formatı tüm seçenekler için aynıdır.

Kolaylık için program gereken girdi verilerini kullanıcının oluşturduğu DATA başlıklı sürekli dosyadan alır. Bu şekilde kullanıcı ana programda hiçbir değişiklik yapmadan girdi verileri dosyasını yeniden yapma, değiştirme ve kontrol etme serbestliğine sahiptir. Farklı isimler kullanarak değişik problemler için birçok girdi dosyası oluşturulabilir. (DATA 1, DATA 2, DATA 3 vb) ve ileride kullanılmak üzere sürekli olarak saklanabilir. Belirli bir veri dosyası örneğin DATA2, gerektiğinde kullanıcı istenen DATA isimli bir dosya oluşturur ve ana programa gereken DATA çağırılarak işletilir.

GİRDİ FORMATI

Veri dosyası aşağıda gösterilen formatta oluşturulmalıdır. Bu format belirli sayıda satır sayısı ve her satıra bir ya da fazla kayıt içerir.

A) Birinci Satır

BAŞLIK (80 karakter uzunluğa kadar alfa sayısal bilgi)

B) İkinci Satır

Kontrol verileri tamsayılar.

Birinci girdi: Tip analizi

0 = Çatlaksız simetrik kesit analizi

-1 = Çatlaksız asimetric kesit analizi

1 = Donatılı kesit analizi

İkinci girdi: Son kaplama düğüm noktası numarası (teksayı)

C) Üçüncü Satır

Malzeme özellikleri: (Gerçel sayılar)

Girdi 1, Yatak katsayısı (kg/cm^3)

2, Kaplama ya da destek modülü (kg/cm^2)

3, Kaplamanın Poisson oranı (0.25 alınabilir)

D) Dördüncü Satır

Çubuk eleman kontrolü

Girdi 1, Çubuk gevşetme iterasyon limiti (tamsayı, başlangıç için 6 alınabilir)

2, Gevşetme parametresi (gerçel sayı, başlangıç için 0.2)

E) Her kaplama düğüm noktası için bir satır kullanılmalıdır.

Düğüm noktası verileri

Girdi 1, Kaplamanın düğüm noktası sayısı (tek tamsayı)

2, x koordinatı (gerçel sayı cm)

3, y " (" " ")

4, Aktif yatay basınç (gerçel sayı kg/cm^2)

5, " düşey " (" " ")

6, Kaplama kalınlığı (" " cm)

7, Enkesit alanı (cm^2 cinsinden gerçel sayı)

8, Atalet momenti (cm^4 " " ")

7 ve 8, girdi 1 de verilen kaplama elemanlarına uygulanacak.

A ve/veya I girdi verisi olarak verilmez ya da sıfır olarak verilirse program bunu birim genişlikli bir dikdörtgen kesit olarak hesaplar.

ÇIKTI FORMATI

KAPLAMA programında üç tip analiz için girdi ve çıktı formatları standarttır.

A) Birinci blok

BAŞLIK: Analizi yapılacak destek türü (bir satır)

B) İkinci blok

Kesit analizinin adı. (bir satır)

C) Üçüncü blok

Kesitteki eleman sayısı (integer tek sayı)

D) Dördüncü blok

Düğüm noktası sayısı (eleman sayısı+1)

E) Beşinci blok

Malzeme özellikleri (üç satır)

1- Kaplama modülü

2- Poisson oranı

3- Yatak katsayısı

F) Altıncı blok

Düğüm koordinatları, sınır şartları, aktif basınçlar ve kesit kalınlıkları

Düğüm noktası sayısı kadar satır ve on tane sütundan oluşur.

G) Yedinci blok

Serbest bırakılan çubuk elemanlar

Yapılan iterasyona eşit sayıda satır ve gevşetilen çubuk elemanların numaraları

H) Sekizinci blok

Maksimum çubuk kuvvetleri, gerilmeler ve kesit özellikleri (dokuz sütun)

I) Dokuzuncu blok

Eleman uç kuvvetleri (yedi sütun)

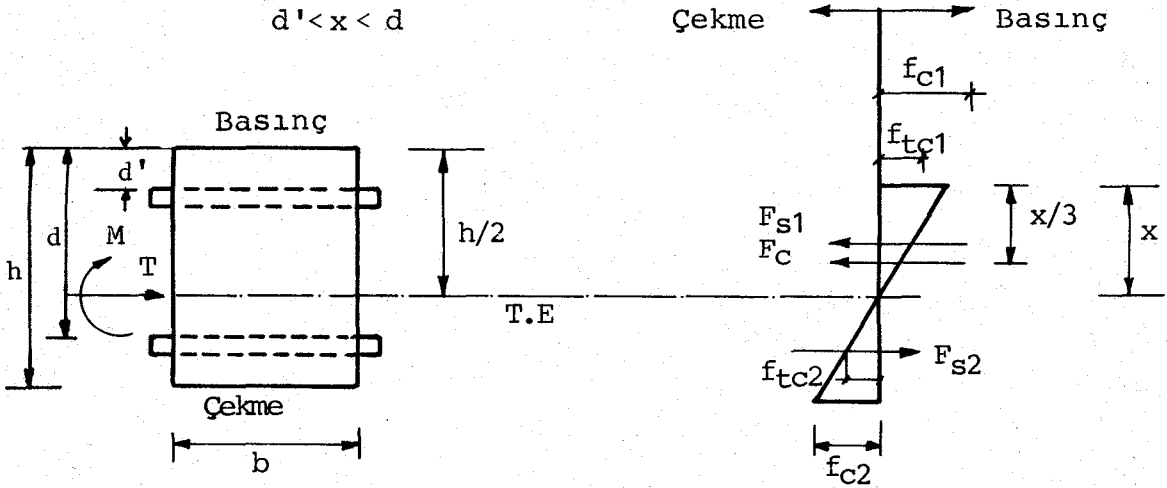
Eleman sayısına eşit sayıda satır.

J) Onuncu blok

Yer değiştirmeler, (dört sütun)

Düğüm noktası sayısına eşit sayıda satır.

EK-2 DONATILI KESİTTE TARAFSIZ EKSEN, KESİT ÖZELLİKLERİ VE GERİLMELERİN HESABI



Şekil-33 Birinci durumda T.E ve gerilmeler

$$f_{tc1} = \frac{f_{s1}}{2N-1} \quad (136)$$

$$f_{tc2} = \frac{f_{s2}}{N} \quad (137)$$

Burada $A_{tc1} = (2N-1)A_{s1}$

$$F_{s1} = f_{s1} \cdot A_{s1} = f_{tc1} \cdot A_{tc1} \quad (138)$$

Böylece $f_{tc1} = \frac{F_{s1}}{(2N-1)}$ olur. (139)

$$A_{tc2} = NA_{s2}$$

$$F_{s2} = f_{s2} \cdot A_{s2} = f_{tc2} \cdot A_{tc2} \quad (140)$$

$$f_{tc2} = \frac{f_{s2}}{N} \quad (141)$$

Düzlem kesitlerin eğilmeden sonra da düzlem kalmaları kabulu ile,

$$\frac{x}{x-d'} = \frac{f_{c1} (2N-1)}{f_{s1}} \quad (142)$$

$$\frac{x}{d-x} = \frac{f_{c1} (N)}{f_{s2}} \quad (143)$$

$$\frac{f_{c1}}{f_{c2}} = \frac{x}{-(h-x)} \quad , \quad f_{c2} = f_{c1} \left(1 - \frac{h}{x}\right)$$

$$\Sigma F_x = 0:$$

$$T = F_{s1} + F_c - F_{s2} \quad (144)$$

$$\Sigma M = 0:$$

$$\begin{aligned} M + T \left(d - \frac{h}{2}\right) &= F_{s1} (d-d') + F_c \left(d - \frac{x}{3}\right) \\ &= [f_{s1} A_{s1}] (d-d') + \left[\frac{b}{2} f_{c1} x\right] \left(d - \frac{x}{3}\right) \end{aligned} \quad (145)$$

142, 143 ve 144 nolu eşitliklerden

$$T = f_{s1} A_{s1} + \frac{b}{2} f_{c1} x - f_{s2} A_{s2} = \left[\frac{(2N-1) A_{s1} (x-d')}{x} + \frac{b}{2} x - \frac{N \cdot A_{s2} (d-x)}{x} \right] f_{c1}$$

$$T \cdot x = \left[(2N-1) A_{s1} (x-d') + \frac{bx^2}{2} - N \cdot A_{s2} (d-x) \right] f_{c1} \quad (146)$$

142, 143 ve 145 nolu eşitliklerden

$$M + T \left(d - \frac{h}{2}\right) = \left[\frac{(2N-1) A_{s1} (x-d') (d-d')}{x} + \frac{bdx}{2} - \frac{bx^2}{6} \right] f_{c1} \quad (147)$$

$$x \left[M + T \left(d - \frac{h}{2}\right) \right] = \left[(2N-1) A_{s1} (x-d') (d-d') + bd \frac{x^2}{2} - \frac{bx^3}{6} \right] f_{c1}$$

146 ve 147 eşitliklerinden

$$\frac{T}{M+T(d-\frac{h}{2})} = \frac{(2N-1)A_{s1} \cdot x - (2N-1)A_{s1} (d') + \frac{bx^2}{2} - N(A_{s2})d + N(A_{s2})x}{(2N-1)A_{s1} [xd - xd' - dd' + (d')^2] + \frac{bdx^2}{2} - \frac{bx^3}{6}}$$

Burada

$$y = (2N-1)A_{s1}, \quad s = (d - \frac{h}{2})$$

alınarak

$$\begin{aligned} \frac{T}{M+T(d-\frac{h}{2})} &= \frac{y \cdot x - y \cdot d' + \frac{bx^2}{2} - N \cdot A_{s2} \cdot d + N \cdot A_{s2} \cdot x}{y(x \cdot d) - y(x \cdot d') - y(dd') + y(d')^2 + \frac{bdx^2}{2} - \frac{bx^3}{6}} \\ T \cdot y \cdot x \cdot d - T y x d' - T y (d d') + T y (d')^2 + T \left(\frac{bdx^2}{2} \right) - T \frac{bx^3}{6} \\ &= M y x - M y d' + M \frac{bx^3}{2} - M \cdot N \cdot A_{s2} \cdot d + M \cdot N \cdot A_{s2} \cdot x \\ &+ T s y \cdot x - T s y d' + T s \frac{bx^2}{2} - T \cdot s \cdot N \cdot A_{s2} \cdot d + T s \cdot N \cdot A_{s2} \cdot x \\ &x^3 \left(-\frac{Tb}{6} \right) - x^2 \left(\frac{b}{2} \right) (M+T \cdot s - T \cdot d) + x (T y d - T y d' - M y - M \cdot N \cdot A_{s2} - T s y - T s N \cdot A_{s2}) \\ &= -M y d' - M \cdot N \cdot A_{s2} \cdot d - T s y d' - T s N \cdot A_{s2} \cdot d + T y d d' - T y (d')^2 \end{aligned}$$

Bu işlemler düzenlenirse

$$x^3 + px^2 + qx = -r$$

$$p = \frac{\left(\frac{b}{2}\right) (M+Ts-Td)}{T\left(\frac{b}{6}\right)} = 3\left(\frac{M}{T}\right) + s-d = 3\left(e - \frac{h}{2}\right)$$

$$g = \frac{T y d - T y d' - M y - M \cdot N \cdot A_{s2} - T s y - T s N \cdot A_{s2}}{-T\left(\frac{b}{6}\right)}$$

$$= -\frac{6}{b} \left[y \left(-d' - e + \frac{h}{2} \right) - N(A_{s2}) \left(e + d - \frac{h}{2} \right) \right]$$

$$r = \frac{d [M \cdot N \cdot A_{s2} + T \cdot s \cdot N \cdot A_{s2}] + d' (My + T \cdot s \cdot y) + Ty [d'^2 - d'd]}{-T \left(\frac{b}{6}\right)}$$

$$= \frac{6}{b} \left[d \cdot N \cdot A_{s2} \left(e + d - \frac{h}{2}\right) + d' \cdot y \left(e - \frac{h}{2} + d'\right) \right]$$

Birinci durumda kesit özellikleri

KESİT	A (cm ²)	y (cm)	Ay (cm ³)	ℓ = (z-y) cm	I _O (cm ⁴)	Aℓ ² (cm ⁴)
Beton	bx	x/2	bx ² /2	(z - $\frac{x}{2}$)	bx ³ /12	bx(z - $\frac{x}{2}$) ²
A _{s1}	(2N-1)A _{s1}	d'	(2N-1)As1d'	(z-d')	0	(2N-1)A _{s1} (z-d') ²
A _{s2}	$\frac{(N)A_{s2}}{\Sigma A}$	d	$\frac{N \cdot A_{s2} \cdot d}{\Sigma Ay}$	d-z	$\frac{0}{\Sigma I_O}$	$\frac{N \cdot A_{s2} (d-z)^2}{\Sigma A \ell^2}$

$$z = \frac{\Sigma Ay}{\Sigma A} \quad \text{Kesitin geometrik merkezi}$$

$$A_{\text{toplam}} = \Sigma A$$

$$I_{\text{toplam}} = \Sigma I_O + \Sigma A \ell^2$$

Birinci durumda gerilmeler:

146 nolu eşitlikten f_{c1} bulunur.

$$f_{c2} = f_{c1} \left(1 - \frac{h}{x}\right)$$

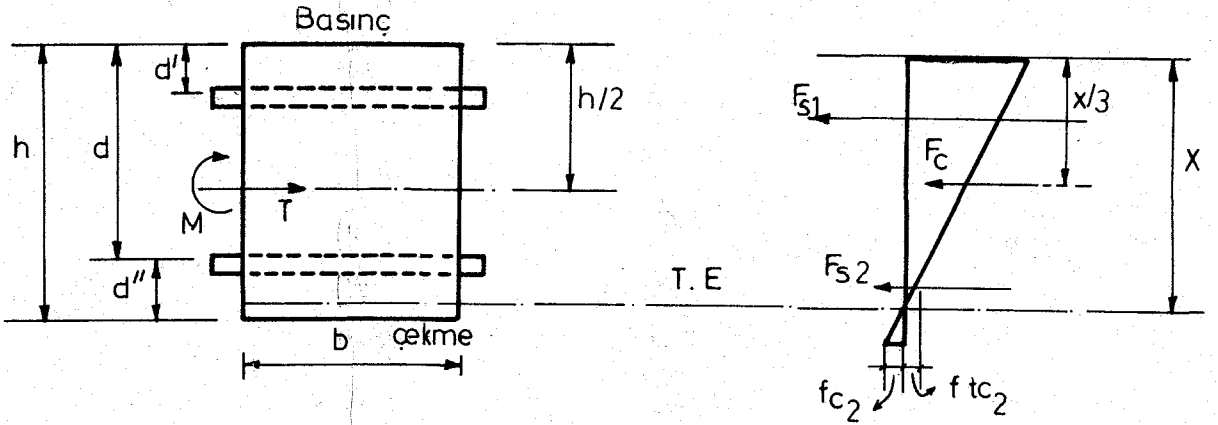
142 nolu eşitlikten f_{s1}

143 " " $-f_{s2}$ hesaplanır.

$$f_{tc1} = \frac{f_{s1}}{2N-1}, \quad f_{tc2} = \frac{f_{s2}}{2N-1}$$

F_{s1} birinci durumdaki gibidir.

$$F_{s2} = f_{s2} \cdot A_{s2} = f_{tc2} \cdot A_{tc2} \quad \text{burada } A_{tc2} = (2N-1)A_{s2}$$



Şekil-34 ikinci durumda T.E ve gerilmeler

Düzlem kesitlerin eğilmeden sonrada düzlem kalacakları varsayımı ile,

$$\frac{x}{x-d'} = \frac{f_{c1} (2N-1)}{f_{s1}} \quad (148)$$

$$\frac{x}{x-d} = \frac{f_{c1} (2N-1)}{f_{s2}} \quad (149)$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\begin{aligned} T &= F_{s1} + F_c + F_{s2} \\ &= f_{s1} \cdot A_{s1} + \frac{b}{2} f_{c1} \cdot x + f_{s2} \cdot A_{s2} \end{aligned} \quad (150)$$

$$\Sigma M = 0 \quad (\text{Tarafsız eksenle göre})$$

$$\begin{aligned} M + T(x - \frac{h}{2}) &= F_{s1}(x-d') + F_c(\frac{2}{3}x) + F_{s2}(x-d) \\ &= [f_{s1} \cdot A_{s1}](x-d') + \frac{bx^2}{3} f_{c1} + [f_{s2} \cdot A_{s2}](x-d) \end{aligned} \quad (151)$$

148, 149 ve 150 bağıntılarının

$$\begin{aligned} T &= f_{s1} \cdot A_{s1} + \frac{b}{2} f_{s2} \cdot A_{s2} \\ T \cdot x &= [(2N-1)A_{s1}(x-d') + \frac{bx^2}{2}(2N-1)A_{s2}(x-d)]f_{c1} \end{aligned} \quad (152)$$

147, 148 ve 150 den

$$M + T(x - \frac{h}{2}) \left| \frac{(2N-1)A_{s1} (x-d') (x-d)}{x} + \frac{bx^2}{3} + \frac{(2N-1)A_{s2} (x-d) (x-d)}{x} \right| f_{c1}$$

$$Y = (2N-1)A_{s1} \quad \text{yazarak}$$

$$w = (2N-1)A_{s2}$$

$$x \left[M + T(x - \frac{h}{2}) \right] = \left[Yx^2 - 2Yd'x + Y(d')^2 + \frac{bx^2}{3} + wx^2 - 2wdx + wd^2 \right] f_{c1} \quad (153)$$

143 ve 144 den

$$\frac{x[T]}{x \left[M + T(x - \frac{h}{2}) \right]} = \frac{\left[Y(x-d') + \frac{bx^2}{2} + w(x-d) \right] f_{c1}}{\left[Yx^2 - 2Yd'x + Y(d')^2 + \frac{bx^3}{3} + wx^2 - 2wdx + wd^2 \right] f_{c1}}$$

$$\begin{aligned} & x^3 \left(-\frac{Tb}{6} \right) + x^2 \left[(Y+w)T - M\frac{b}{2} - YT - wT + \left(\frac{bh}{4}\right)T \right] \\ & - \left[(2Yd' + 2wd)T + M(Y+w) - (Yd')T - (wd)T - \left(\frac{h}{2}\right)(w+Y)T \right] \\ & = -MYd' - Mwd + T\left(\frac{h}{2}\right)Yd' + T\left(\frac{h}{2}\right)wd - TY(d')^2 - Tw(d)^2 \end{aligned}$$

Yukarıdaki eşitliği şöyle bir polinom şeklinde yazabiliriz.

$$\begin{aligned} & x^3 + px^2 + gx = -r \\ & p = \frac{(Y+w)T - M(b/2) - YT - wT + \left(\frac{bh}{4}\right)T}{-T(b/6)} = 3 \left(e - \frac{h}{2} \right) \\ & \qquad \qquad \qquad e = \frac{M}{T} \\ & g = \frac{-T(2Yd' + 2wd) - M(Y+w) + T(Yd') + T(wd) + T(h/2)(w+Y)}{-T(b/6)} \\ & = \frac{6}{b} \left[Y(d' + e - \frac{h}{2}) + w(d + e - \frac{h}{2}) \right] \\ & r = \frac{M(Yd' + wd) - T(h/2)(Yd' + wd) + T(Yd'^2 + wd^2)}{-T(b/6)} \\ & = -\frac{6}{b} \left[d'Y(e + d' - \frac{h}{2}) + dw(e + d - \frac{h}{2}) \right] \end{aligned}$$

ikinci durum için kesit özellikleri

$$z = \frac{\Sigma Ay}{\Sigma A}$$

ΣA : Toplam alan

$\Sigma I_o + A\ell^2$: Toplam atalet momenti

KESİT	A (cm ²)	y (cm)	Ay (cm ³)	(z-y) (cm)	I _O (cm ⁴)	Aℓ ² (cm ⁴)
Beton	bx	x/2	bx ² /2	(z-x/2)	bx ³ /12	bx(z-x/2) ²
A _{s1}	(2N-1)A _{s1}	d'	(2N-1)A _{s1} d'	(z-d')	0	(2N-1)A _{s1} (z-d') ²
A _{s2}	<u>(2N-1)A_{s2}</u>	d	<u>(2N-1)A_{s2}d</u>	(d-z)	<u>0</u>	<u>(2N-1)A_{s2}(d-z)²</u>
	ΣA		ΣAy		ΣI_o	$\Sigma A\ell^2$

Gerilmeler,

(152) nolu eşitlikten f_{c1} bulunur.

$$f_{c2} = f_{c1} (1-h/2) \quad (154)$$

(148) den f_{s1} ve (140) dan f_{s2} hesaplanır.

Üçüncü durum (Tarafsız eksenin kesit dışında olması hali)

$$x \geq h$$

Bu durumda durum iki için bulunan kesit özellikleri $x=h$ yazılarak hesaplanabilir.

Gerilmeler

$$f_{c1} = \frac{T}{\Sigma A} + \frac{M(z)}{I_{\text{toplam}}} \quad (155)$$

burada $z=h/2$

$$f_{c2} = \frac{T}{\Sigma A} - \frac{M(z)}{I_{\text{toplam}}} \quad (156)$$

$$f_{s1} = \left[\frac{T}{\Sigma A} + \frac{M(z-d')}{I_{\text{toplam}}} \right] (2N-1) \quad (157)$$

$$f_{s2} = \left[\frac{T}{\Sigma A} - \frac{M(d-z)}{I_{\text{toplam}}} \right] (2N-1) \quad (158)$$

EK-3 : PROGRAMIN LİSTESİ

```

C *****
C * CAİRESFEL TÇNFİ KAPLAMALARININ SONLU ELEMANLAR YONTEMİ İLE *
C * PROJELENDİRİLMESİ *
C *****
COMMON/PAPAM/
1 HED(20),NUMEL,NUMNP,NFQ,NUMSPR
COMMON/MATARG/
1 E(10),G(10)
COMMON/ELFARG/
1 SF(6),LM(6),SA(6,6),ASA(6,6),T(3,3),
2 NRK,NEL,NI,NJ,
3 S(6,6),RF(6),JK(3)
COMMON
1 MBAND,NN,NUMBLK,NPSTP(200),SP(40,3),BCF(600),
2 PC(600),X(200),Y(200),KODE(200),SFT(40,6),
3 CBAX(200),CCAY(200),CCAAZ(200)
COMMON/TFN/NNELM(100)
COMMON/ SFC/
1 NUMLNP,SN,CIS,CES,KMI,KLX,NSPI,SPCL,
2 AIS(200),AES(200),TL(200),F(200,6),SNA(200)
3 CİMENSİCK XE(200),YE(200), PHX(200),PVY(200),RB(600)
C
C RU PROGRAM İÇİN NN 3 ÜN KATI OLMALI VE BCYUTLANDIRILMIŞ A MATRİSİNİN
C KOLON SAYISINA ESİT OLMALIDIR
C(2)=C.CC
C(3)=C.CC
C(4)=0.CC
NN=15
C *****
C * KONTROL VERİLERİNİN OKUNUP BASTIRILMASI *
C *****
1 REAC(1,100) HEC
WRITE(3,2100) HEC
2100 FORMAT(1000,1X,20A40)
1020 FORMAT(215)
IF(KMI.EQ.0) WRITE(3,2015)
IF(KMI.EQ.1) WRITE(3,2020)
IF(KMI.EQ.-1) WRITE(3,2021)
2015 FORMAT(1000,1X,'CATLAKSIZ SİMETRİK KESİT ANALİZİ')
2020 FORMAT(1000,1X,'BETONARME KESİT ANALİZİ')
2021 FORMAT(1000,1X,'CATLAKSIZ ASİMETRİK KESİT ANALİZİ')
READ(1,1002) E(2),F(1),G(1)
READ(1,1007) NIT,ACT
NUMEL=NUMLNP
NUMNP=NUMLNP+1
NUMMAT=4
E(3)=1.000
E(4)=1.0E-20
NUMETP=NUMEL
NUMSPR=C
NUMFI=C
KCL=0
WRITE(3,2000) NUMEL,NUMNP
IF((NUMEL.EQ.0).OR.(NUMNP.EQ.0).OR.(NUMMAT.EQ.0).OR.(NUMETP.EQ.0))
*GC TC 3
CC TC 3
2 WRITE(3,2012)
SICP
3 CCATINLE
WRITE(3,2007) NIT,ACT
*****
* MALZEME ÇZELLİĞİ VERİLERİNİN YAZILMASI *
*****
WRITE(3,2001) E(1),G(1),E(2)
2001 FORMAT(2X,'KAPLAMA MODÜLÜ=',F12.0,/, ' PİSSON CRANI=',F12.3, /2X,
*YATAK KATSAYISI=',F12.0)
F(2)=2.049*E(1)
F(1)=2.049*F(1)
DO 10 I=1,NUMMAT
10 G(N)=0.5*E(N)/(1.000+G(N))
*****
C KAPLAMA DÜĞÜM NOKTALARI VERİLERİNİN OKUNMASI
*****
C DO 40 I=1,NUMLNP,2
C READ(1,1004) N, X(N),Y(N),PHX(N),PVY(N),TL(N),CCAY(N),CCAAZ(N)
C IF(COAY(N).EQ.0.) GO TO 9
C CCAY(N)=CCAY(N)/6.452
9 CONTINUE
C IF(COAZ(N).EQ.0.) GO TO 8
C CCAZ(N)=CCAZ(N)/41.623
8 CONTINUE
C X(N)=X(N)/30.48
C Y(N)=Y(N)/30.48
C PHX(N)=PHX(N)/0.488
C PVY(N)=PVY(N)/0.488
C TL(N)=TL(N)/30.48
C CCAX(N)=1.00412/F(1)
C IF(ABS(TL(N)).LT.1.0E-50) GO TO 1*0
C COAY(N)=COAY(N)/144.000
C CCAZ(N)=CCAZ(N)/23736.000
C IF(I.EC.1) GO TO 40
C IF(ABS(COAY(N-2)).GT.1.0E-50).AND.(ABS(CCAZ(N-2)).GT.1.0E-50))
*GC TC 40
CCAY(N-2)=(TL(N)+TL(N-2))/2.000
CCAZ(N-2)=COAY(N-2)**3/12.000
40 CONTINUE
C
C ÇELİK PROFİL PARAMETRELERİNİN OKUNMASI
*****
C NMLEL=NUMLNP-2
C IF(KMI.EQ.0) GC TC 15
C IF(KMI.EQ.-1) GO TO 20
C READ(1,1022) NSPI,SPCL,RLX
C 1022 FORMAT(15,2F10.3)
C WRITE(3,2022) NSPI,SPCL,RLX
C 2022 FORMAT(1000,2X)
C *KESİT ÇZELLİKLERİ İÇİN İTERASYON LİMİTİ=,16, /2X,
C *YAKLAŞIM PARAMETRESİ =,F10.3, 2X,
C *GEVŞEME PARAMETRESİ =,F10.3)
C READ(1,1024) NPS,SN,DES,DIS
C 1024 FORMAT(15,3F10.3)
C WRITE(3,2024) NPS,SN,DES, DIS
C 2024 FORMAT(1000,2X)

```

```

1*CELIK ELEMAN SAYISI=,16,/,2X,
2*MODEL DRANI=,F10.3,/,2X,
3*CELIK DISYUZUNUN EXTRADOSA UZAKLIGI=,F10.3,/,2X,
4*CELIK ICYUZUNUN INTRADOSA UZAKLIGI=,F10.3,/,
DES=DES/12.CCC
DIS=DIS/12.000
DC 16 I=1,NUMLEL,2
AES(I)=C.CCC
AIS(I)=9.000
16 CONTINUE
WRITE(3,2025)
DC 14 I=1,NFS
READ(1,1022) K,AES(K),AIS(K)
WRITE(3,2026) K,AES(K),AIS(K)
AIS(K)=AIS(K)/6.452
AES(K)=AES(K)/6.452
AIS(K)=AIS(K)/144.000
AES(K)=AES(K)/144.000
14 CONTINUE
2025 FORMAT(///,/,2X,
1*CELIK ALANLARI(CM**2) , ,/,2X,
2*ELEMAN DISYUZ ICYUZ,/)
2026 FORMAT(1X,15,2F15.2)
GC TC 15
2027 WRITE(3,2027)
2027 FORMAT(///,/,2X,
*KESIT MOCULU(CM**3) , ,/,2X,
*ELEMAN DISYUZ ICYUZ,/)
DIS=0.CCC
DES=0.C00
DC 22 I=1,NUMLEL,2
READ(1,1022) K,AES(K),AIS(K)
WRITE(3,2026) K,AES(K),AIS(K)
AES(K)=AES(K)/1728.000
AIS(K)=AIS(K)/1728.000
AES(K)=AES(K)/16.387
AIS(K)=AIS(K)/16.387
22 CONTINUE
15 CONTINUE
C
C
C BIRINCI CUBUK ELEMAN VE DUGUMUN GEOMETRISI
IF(ABS(X(1)-X(NUMLNP)).GT.1.0E-50) GC TC 42
KCL=1
XE(1)=X(1)
YE(1)=Y(1)-TL(1)/2.000
X(2)=X(1)
Y(2)=Y(1)-1.000
KCDE(1)=101
IF(ABS(Y(1)-Y(NUMLNP)).GT.1.0E-50) GC TO 44
KCDE(1)=C0C
GC TC 44
42 VIL=((X(3)-X(1))*2+(Y(3)-Y(1))*2)**0.5
VIX=(X(3)-X(1))/VIL
VIY=(Y(3)-Y(1))/VIL
XE(1)=X(1)+VIX*TL(1)/2.000
YE(1)=Y(1)-VIY*TL(1)/2.000
X(2)=X(1)+VIX
Y(2)=Y(1)-VIY
KCDE(1)=11C
44 CONTINUE
C
C
C SONUNCU CUBUK ELEMAN VE DUGUMUN GEOMETRISI
IF(ABS(Y(1)-Y(NUMLNP)).GT.1.0E-50) GO TO 41
IF(ABS(X(1)-X(NUMLNP)).GT.1.0E-50) GC TC 43
KCL=2
XE(NUMLNP)=XE(1)
YE(NUMLNP)=YE(1)
KCDE(NUMLNP)=C0C0
GC TC 45
43 VIL=((X(NUMLNP)-X(NUMLNP-2))*2+(Y(NUMLNP)-Y(NUMLNP-2))*2)**0.5
VIX=(X(NUMLNP)-X(NUMLNP-2))/VIL
VIY=(Y(NUMLNP)-Y(NUMLNP-2))/VIL
XE(NUMLNP)=X(NUMLNP)+VIX*TL(NUMLNP)/2.000
YE(NUMLNP)=Y(NUMLNP)-VIY*TL(NUMLNP)/2.000
X(NUMLNP)=X(NUMLNP)+VIX
Y(NUMLNP)=Y(NUMLNP)-VIY
KCDE(NUMLNP)=11C
GC TO 45
41 XE(NUMLNP)=X(NUMLNP)
YE(NUMLNP)=Y(NUMLNP)+TL(NUMLNP)/2.000
X(NUMLNP)=X(NUMLNP)
Y(NUMLNP)=Y(NUMLNP)+1.000
KCDE(NUMLNP)=101
C
C
C KAPLAMA DUGUM NOKTALARI NORMAL VEKTORUNUN BULUNMASI
45 IM4=NUMLNP-4
DC 46 I=1,IM4,2
IP4=1+4
IP3=1+3
IP2=1+2
VIL=((X(IP2)-X(I))*2+Y(IP2)-Y(I))*2)**0.5
V3L=((X(IP4)-X(IP2))*2+Y(IP4)-Y(IP2))*2)**0.5
V1X=(X(IP2)-X(I))/VIL
V1Y=(Y(IP2)-Y(I))/VIL
V3X=(X(IP4)-X(IP2))/V3L
V3Y=(Y(IP4)-Y(IP2))/V3L
VTL=((V1X+V3X)**2+(V1Y+V3Y)**2)**0.5
VIX=(V1X+V3X)/VTL
VTY=(V1Y+V3Y)/VTL
C
C
C KAPLAMA EXTRADOSA VE CUBUK ELEMANLAR SONUNUN KOORDINATLARI
XE(IP2)=X(IP2)+VTY*TL(IP2)/2.000
YE(IP2)=Y(IP2)-VIX*TL(IP2)/2.000
X(IP3)=X(IP2)+VTX
Y(IP3)=Y(IP2)-VTX
46 CONTINUE
*****
* AKTIF PASINLARIN DUGUM KUVVETLERINE DENESTGURLMESI KAPLAMA DUGUM *
* LERINE YCKLENMESI *
*****
CO 47 I=1,IM4,2
IP4=1+4
IP3=1+3
IP2=1+2
AXE=(XE(IP4)-XE(I))/2.C00
AXE=ABS(AXE)

```

```

AYE=(YF(IP4)-YF(I))/2.000
AYE=ABS(AYE)
N=IP2
BB(3*N-2)=AYE*PHX(N)
PP(3*N-1)=AYE*PVY(N)
BB(3*N)=0.000
KCDE(N)=0.000
COAX(IP3)=(((XE(IP2)-XE(I))**2+(YF(IP2)-Y(I))**2)**0.5+((XE(IP4)-
*XE(IP2))**2+(YF(IP4)-YF(IP2))**2)**0.5)*F(2)/2.000
CCAY(IP3)=C.CCC
COAZ(IP3)=1.000

```

47 CONTINUE

BİRİNCİ VE SONUNCU KAPLAMA DÜĞÜMLERİNDEKİ SINIR SARTLARI

```

AXE=(YF(3)-YF(1))/2.000
AXE=ABS(AXE)
AYE=(YF(3)-YF(1))/2.000
AYE=ABS(AYE)
BB(1)=AYE*PHX(1)
BB(2)=AYE*PVY(1)
IF(KOCE(1).EC.110) BB(2)=0.000
IF(KGL.LE.1) BB(1)=0.00
BB(3)=C.CCC
COAX(2)=((AXE**2+AYE**2)**0.5)*F(2)
CCAAZ(2)=1.000
AXE=(XF(NUMLNP)-XE(NUMLNP-2))/2.000
AXE=ABS(AXE)
CCAY(2)=0.000
AYE=(YF(NUMLNP)-YF(NUMLNP-2))/2.000
AYE=ABS(AYE)
BB(3*NUMLNP-2)=AYE*PHX(NUMLNP)
IF(KOL.LE.1)BB(3*NUMLNP-2)=0.000
BB(3*NUMLNP-1)=AYE*PVY(NUMLNP)
BB(3*NUMLNP)=0.000
COAX(NUMEL)=((AXE**2+AYE**2)**0.5)*E(2)
CCAY(NUMEL)=C.CCC
COAZ(NUMEL)=1.000

```

TAM ÇUBUK ELEMANLAR İÇİN SINIR SARTLARI

```

DC 48 I=2,NUMAF,2
KCC(1)=110
BB(3*I-2)=C.CCC
BB(3*I-1)=C.CCC
BB(3*I)=0.000

```

4E CONTINUE

```

DD 5C I=1,NUMAP

```

NPSTP(I)=0

5C CCNTIALF

DÜĞÜM NOKTALARI İÇİN VERİLERİN YAZILMASI

```

CO216 K=2,NUMNP,2

```

```

PHX(K)=0.0

```

```

PVY(K)=0.0

```

```

WRITE(3,2005)

```

```

CC 215 K=1,NUMNP

```

```

X(K)=30.48*X(K)

```

```

Y(K)=30.48*Y(K)

```

```

PHX(K)=PHX(K)+0.488

```

```

PVY(K)=PVY(K)+0.488

```

```

TL(K)=TL(K)+30.48

```

```

BB(3*K-2)=BB(3*K-2)+14.88

```

```

BB(3*K-1)=BB(3*K-1)+14.88

```

```

BB(3*K)=BB(3*K)+14.88

```

215 WRITE(3,2006) K,KOPE(K),X(K),Y(K),BB(3*K-2),BB(3*K-1),BB(3*K),

```

*PHX(K),PVY(K),TL(K)

```

```

DC 214 K=1,NUMNP

```

```

BB(3*K-2)=BB(3*K-2)/14.88

```

```

BB(3*K-1)=BB(3*K-1)/14.88

```

```

BB(3*K)=BB(3*K)/14.88

```

```

X(K)=X(K)/30.48

```

```

Y(K)=Y(K)/30.48

```

```

PHX(K)=PHX(K)-0.488

```

```

PVY(K)=PVY(K)-0.488

```

214 TL(K)=TL(K)-30.48

```

DD 52 I=1,NUMLEL,2

```

```

TL(I)=(TL(I)+TL(I+2))/2.000

```

52 CCNTIALF

TAM KESİTKOL=3 DE DÜĞÜM NOKTALARININ YENİDEN NUMARALANIRILMASI

IF(KCL.NF.3) GOTO 58

```

BB(1)=BB(1)+BB(3*NUMLNP-2)

```

```

BB(2)=BB(2)+BB(3*NUMLNP-1)

```

```

COAX(2)=COAX(2)+CCAX(NUMEL)

```

```

NUMAP=NUMLNP-1

```

```

NUMEL=NUMNF

```

```

MP=NUMNF/2+1

```

```

MPM2=MP-2

```

```

MPM1=MP-1

```

```

MPM=MP

```

```

NMPM1=NUMNF-1

```

```

CC 88 N=1,NUMAP

```

```

XE(N)=X(N)

```

```

YE(N)=Y(N)

```

```

BC(3*N)=BB(3*N)

```

```

BC(3*N-1)=BB(3*N-1)

```

```

BC(3*N-2)=BB(3*N-2)

```

88 CONTINUE

```

CC 5C N=1,MPM2,2

```

```

I1=2*N-1

```

```

X(I1)=XE(N)

```

```

Y(I1)=YE(N)

```

```

BB(3*I1-2)=BC(3*N-2)

```

```

BB(3*I1-1)=BC(3*N-1)

```

```

BB(3*I1)=BC(3*N)

```

5C CCNTIALF

```

CC 52 N=MP,NMPM1,2

```

```

I2=NMPM1+2*(MP-N)

```

```

X(I2)=XE(N)

```

```

Y(I2)=YE(N)

```

```

BB(3*I2-2)=BC(3*N-2)

```

```

BB(3*I2-1)=BC(3*N-1)

```

```

BB(3*I2)=BC(3*N)

```

52 CONTINUE

```

DC 54 N=2,MPM1,2

```

```

I3=2*(N-1)

```

```

X(I3)=XF(N)

```

```

Y(I3)=YF(N)
54 CONTINUE
DO 56 N=MPP1,NUMAP,2
I4=NUMAP+2*(MPP1-N)
X(I4)=XF(N)
Y(I4)=YF(N)
96 CONTINUE
98 CONTINUE
C
C KESIT (PROFIL) ÖZELLİKLERİ İTERASYONU İÇİN GİRİŞ NOKTASI
100 CALL SFCPR
IF((KMI.GE.NSPI).OR.(KMI.LE.0)) GO TO 140
KMI=KMI+1
105 IT=C
DO 12 I=2,NUMEL,2
ANELM(I)=0
12 CONTINUE
ANELM(NUMEL)=0
C
C TEM İTERASYONU İÇİN GİRİŞ NOKTASI
110 CONTINUE
IT=IT+1
DO 35 I=1,NUMAP
BC(3*I-2)=PB(3*I-2)
BC(3*I-1)=BB(3*I-1)
BC(3*I)=BB(3*I)
35 CONTINUE
C
C HER ELEMAN İÇİN KATILGIN OLUSTURULMASI
REWIND 6
REWIND 7
CALL ELSTIF(KOL)
C
C ELEMAN KATILIKLARININ BLOK HALİNDE YAPI KATILIGINA EKLENMESİ
CALL STIFF
C
C YER DEĞİŞTİRMELERİN BULUNMASI
REWIND 7
CALL BANSCL
C
C ELEMAN ÜÇ KUVVETLERİNİN VE YAPI REAKSİYONLARININ HESABI
CALL FORCE(NELM,RCT,KOL)
IF (NELM.EQ.C) GO TO 100
IF (IT.GE.NIT) GO TO 120
120 WRITE(3,200E)
GO TO 3000
C
C *****
C * YER DEĞİŞTİRMELERİN VE KUVVETLERİN YAZILMASI *
C *****
140 WRITE(3,FCC2)
DO 145 I=1,NEL
F(I,1)=F(I,1)*453.4
F(I,2)=F(I,2)*453.4
F(I,4)=F(I,4)*453.4
F(I,5)=F(I,5)*453.4
F(I,3)=F(I,3)*13815.63
F(I,6)=F(I,6)*13815.63
WRITE(3,RCC3) I,(F(I,J),J=1,6)
145 CONTINUE
WRITE(3,POGC)
IF(KCL.EQ.3) GO TO 160
DO 146 M=1,NUMAP
BC(3*M-2)=BC(3*M-2)*14.88
BC(3*M-1)=BC(3*M-1)*14.88
WRITE(3,80C1) M,BC(3*M-2),BC(3*M-1),BC(3*M)
BC(3*M-2)=BC(3*M-2)/14.88
146 BC(3*M-1)=BC(3*M-1)/14.88
GO TO 3000
160 DO 162 N=1,MPP2,2
I1=2*N-1
BB(3*N-2)=BC(3*I1-2)
BB(3*N-1)=BC(3*I1-1)
BB(3*N)=BC(3*I1)
162 CONTINUE
DO 164 N=MP,NUMP,2
I2=N*MP+2*(MP-N)
BB(3*N-2)=BC(3*I2-2)
BB(3*N-1)=BC(3*I2-1)
BB(3*N)=BC(3*I2)
164 CONTINUE
DO 166 N=2,MPP1,2
BB(3*N)=BC(3*(N-1))
166 CONTINUE
DO 168 N=MPP1,NUMAP,2
BB(3*N)=BC(3*NUMAP+6*(MPP1-N))
168 CONTINUE
DO 167 N=1,NUMAP
BB(3*N-2)=BB(3*N-2)*14.88
BB(3*N-1)=BB(3*N-1)*14.88
WRITE(3,80C1) N,BB(3*N-2),BB(3*N-1),BB(3*N)
BB(3*N-2)=BB(3*N-2)/14.88
BB(3*N-1)=BB(3*N-1)/14.88
167 GO TO 3000
150 WRITE(3,2013) N
2013 FORMAT(1//,'I3,DÜĞÜM NOKTASINDAKI KAPLAMA KALINLIĞI SIFIR OLARAK
* BELİRTİLMİŞ *')
GO TO 3000
C
1000 FORMAT(2CA4)
1002 FORMAT(3F1C.3)
1004 FORMAT(15,7F1C.0)
1007 FORMAT(15,F1C.C)
2000 FORMAT(///2X,'ELEMAN SAYISI=',I3,/,2X,'DÜĞÜM NOKTASI SAYISI=',I4
/,///)
2005 FORMAT(///15X,'DÜĞÜM KOORDİNATLARI',15X,'SİNİR ŞARTLARI',5X,
*AKTİF BASINÇLAR, KALINLIKLAR',/,2X,
* DÜĞÜM KORDU',7X,1HX, 11X,1HY,11X,1HZ,11X,1HX,11X,
*1HY)
2006 FORMAT(1X,14,15,FF12.3)
2007 FORMAT(
12X,'MAX. İTERASYON SAYISI=',I5,/,
22X,'GÜŞETME PARAMETRESİ=',F6.2////)
2008 FORMAT('YAPILAN MAX.İTERASYON SAYISI_YAKINSAK DEĞİL')

```

```

2012 FORMAT(' PROBLEM TAMAMLANDI VEYA KONTROL KARTI HATASI')
8000 FORMAT(////,1X,
1 'EKLEMYFR',10X,'X-YER.DEG.',16X,'Y-YER.DEG.',27X,'Z-CCNYESI',
//)
8001 FORMAT(1H,14,3F25.5)
8002 FORMAT(////,3CX,'ELEMEN UC KUVVETLERI',//,
1 1X,'ELEMEN',5X,'EKSENEL 1',4X,'KESME 1',5X,'MCMFNT 1',3X,'FKSENEL
* J',2X,'KESME J',5X,'MCMFNT J',//)
8003 FORMAT(1H,15,2X,6F12.3)
3000 STOP
ENC
SUBROUTINE ELSTIF(KOL)
COMMON/PARAM/HED(20),NUMEL,NUMMP,NEQ,ALMSPR
COMMON/MATARG/EL10,C(10)
COMMON/ELEARG/SF(6),LM(6),SA(6,6),ASA(6,6),T(3,3),NPLK,NFL,NI,NJ,
*S(6,6),RF(6),JK(3)
COMMON
1 MBAND,NN,NUMBLK, NPSTP(200),SP(40,3),BCF(600),
2 PC(600),X(200),Y(200),KODE(200),SFT(40,6),
3 CCAX(200),CCAY(200),COAZ(200)
COMMON/TF/NEFL(100)
DIMENSION ICISP(6)

C
C
C SINGELNDRIME
NEC=3*NUMMP
NUMBLK=(NEC-1)/NN+1
MBAND=C
INEL=C
KC=1
MP=NUMMP/3+1
MFM=MP-2
NN=NUMBLK*NN
DO 5 I=1,NN
5 BCF(I)=0.000

C
C
C DO 10 I=1,6
S(I,1)=0.000
S(4,1)=0.000
S(1,4)=0.000
T(3,2)=1.000
CC 20 I=1,2
T(3,1)=0.000
T(1,3)=0.000

C
C
C UYGULANAN CATLAK KUVVETLERININ BCF DE DEDPLANMASI YERDEGISTIRME
SINIR SARTLARINA KARSIKILIK SATIRLARIN SIFIRA FSITLAMESI
CC 70 N=1,NUMMP
KC=100
I=2*N-2
KK=KODE(N)
DO 70 K=1,3
IF(KK-KD) 40,50,50
40 BCF(I)=BC(I)
GC TC 70
50 BCF(I)=0.000
KK=KK-KC
I=I+1
70 KC=KC/10

C
C
C ELEMEN VERILERININ OLUSTURULUP YAZILMASI
L=C
400 KKK=0
INC=1
ASIJ=4.000
ASJI=4.000
ACIJ=0.000
INEL=INFL+1
IF((INFL.EC.NUMFL).AND.(KOL.NE.3)) GO TO 303
IF(KC.EQ.1) GO TO 301
IF(KC.EQ.2) GO TO 302
301 INI=INFL
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.LI.MP)) INI=2*INEL-1
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.GE.MP)) INI=NUMMP+2*(MP-INEL)-1
INJ=INFL+2
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.LI.MP)) INJ=2*(INEL+2)-1
I=NUMMP+2*(MP2-INEL)-1
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.GE.MPM2)) INJ=IABS(I11)
IMAT=1
INFLK=C000C
KC=2
GC TC 304
302 INI=INEL-1
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.LI.MP)) INI=2*(INEL-1)-1
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.GE.MP)) INI=NUMMP+2*(MP-INEL)+1
INJ=INFL
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.LI.MP)) INJ=2*(INEL-1)
IF((KOL.EC.3).AND.(INEL.GE.MP)) INJ=NUMMP+2*(MP-INEL)+2
IF(INELM(INEL).EQ.C) IMAT=3
IF(INELM(INEL).EQ.INEL) IMAT=4
INFLK=C0100C
KC=L
GC TC 304
303 INI=NUMMP-1
INJ=NUMMP
IF(INELM(INEL).EQ.C) IMAT=3
IF(INELM(INEL).EQ.INEL) IMAT=4
INFLK=C01000
304 IMFIX=C
INEL=INEL
401 L=L+1
KKK=KKK+1
ML=INEL-L
IF(ML) 402,403,404
402 WRITE(3,4003) INEL
STOP

C
403 NEL=INFL
NI =INI
NJ =INJ
MATIYP=IMAT
MELIYP=INEL
MFIK =IMFIX
NELYCI=INFLK
SIJ=ASIJ
SJI=ASJI
CIJ=ACIJ

```

```

C      GC TC 405
404  NEL=INEL-ML
      NI      =IN+KKK*INCR
      NJ      =JN+KKK*INCR
      MATTYP=IMAT
      MELTYF=IMELT
      MFIX   =IFIX
      NELKOD=INEK
      SIJ    =BSIJ
      SJI    =BSJI
      CIJ    =BCIJ
405  CONTINUE
C      NI VE NJ NIN ENBOYUK SAYISALDEGERININ BULUNMASI VE BANT GENISLIGI
      NIN BELIRLENMESI
C      IF(NJ-NI) 71,72,73
71  NL=NJ
      NG=NI
      GC TC 74
72  WRITE(3,4004) NEL
      STCP
73  NL=NI
      NG=NJ
74  MM=3*(1+NG-NL)
      IF(MM-GT.NA) GC TC 77
      IF(MM-GT.MBAND) MBAND=MM
      GC TC 78
77  WRITE(3,4006) NEL
      STCP
C      78  AX=COAX(MELTYF)
      AY=COAY(MELTYF)
      AAZ=CCAAZ(MELTYF)
C      DX=X(INJ)-X(NI)
      DY=Y(INJ)-Y(NI)
      DL=SQRT(DX*DX+DY*DY)
      IF(DL) 75,75,76
75  WRITE(3,4005) NEL
      STCP
76  COSA=CX/DL
      SINA=CY/DL
C      MAKASLANMA HAREKETLERININ HESAPTA DIKKATE ALINMASI
C      SHF=C.CCC
      IF(ABS(AY).GT.1.0E-50) SHF=6.0*(MATTYP)*AAZ/(G(MATTYP)*AY*DL*CL)
      CCM=E(MATTYP)*AAZ/CL
      SHEF=0.5*(2.00+SHF)/(1.00+2.00*SHF)
      CCM=CCM*SHEF
      SIJ=SIJ*CCM
      SJI=SJI*CCM
      CIJ=(CIJ-0.5*SHF)/(1.00+0.5*SHF)
      CJI=CJI*SIJ/SJI
C      DG 80 I=1,6
80  SF(I)=0.000
C      IF(MFIX.EQ.C) GC TC 100
C      DC 9C I=1,6
90  SF(I)=SFT(MFIX,I)
100 CONTINUE
C      GENELDEN YFRELE KCCRDINAT DONGUSUMCUNU YAPILMASI
C      T(1,1)=COSA
      T(1,2)=SINA
      T(2,1)=SINA
      T(2,2)=COSA
C      ELEMAN KATILIGININ YFREL KOORDINATLAR CINSINCEN OLUSTURULMASI
C      S(1,1)=AX*(MATTYP)/CL
      S(4,1)=-S(1,1)
      S(3,2)=SIJ*(1-CO+CIJ)/DL
      S(6,2)=SJI*(1-CO+CJI)/DL
      S(2,2)=(S(3,2)+S(6,2))/DL
      S(5,2)=-S(2,2)
      S(3,3)=SIJ
      S(6,3)=CIJ*SIJ
      S(5,3)=-S(3,3)+S(6,3)/DL
      S(4,4)=S(1,1)
      S(5,5)=-S(5,2)
      S(6,5)=-S(6,2)
      S(6,6)=SJI
      CO 11C I=1,5
      M=I+1
      DO 110J=N,6
110  S(I,J)=S(J,I)
C      BILINEN SIFIR UC KUVVETLERININ KATILIKLARI VE ELEMAN SABIT UC
      KUVVETLERI ICIN TAYANLANMASI
      IF(NELKOD.EQ.C) GC TC 145
      KK=NELKOD
      KC=LCGCCC
      DO 140 I=1,6
120  IF(KK-KD) 140,120,120
      S11=S(I,I)
      SFI=SF(I)
      DC 125 N=1,6
125  SA(1,N)=S(1,N)
      CC 13C N=1,6
      CCF=S(M,I)/S11
      SF(N)=SF(N)-CCF*SFI
      CC 13C N=1,6
130  S(M,N)=S(M,N)-CCF*SA(1,N)
      KK=KK-KC
140  KC=KC/IC
C      ELEMAN UC KUVVETLERI(YERELVE CATLAK HAREKETLERINI GLOBL)
      TLISKILENDIRME SA(6,6) NIN FLDE EDILMESI
C      DO 15C I=1,6
145  DC 150 J=1,3
      SA(I,J)=C.10
      SA(I,J+2)=C.CC
      DO 15C K=1,3

```

```
IF (ABS(T(K,J)),LT,1.0E-50) GO TO 150
SA(I,J)=SA(I,J)+S(I,K)*T(K,J)
SA(I,J+3)=SA(I,J+3)+S(I,K+3)*T(K,J)
150 CONTINUE
```

C
C
C

ELEMAN KATILIKLARI ASA(6,6)VE SABIT UC KUVVETLERININ RF(6) GENEL KORDINATLARLA FLCE EDILMESI

```
CC16C I=1,3
CC16C J=1,6
ASA(I,J)=0.00
ASA(I+3,J)=0.00
DC16C K=1,3
IF (ABS(T(K,I)),LT,1.0E-50) GO TO 160
ASA(I+3,J)=ASA(I+3,J)+T(K,I)*SA(K+3,J)
ASA(I,J)=ASA(I,J)+T(K,I)*SA(K,J)
160 CONTINUE
```

160

```
DC16C I=1,3
RF(I)=0.00
RF(I+3)=0.00
DC16C J=1,3
IF (ABS(T(J,I)),LT,1.0E-50) GO TO 165
RF(I)=RF(I)-T(J,I)*SF(J)
RF(I+3)=RF(I+3)-T(J,I)*SF(J+3)
165 CONTINUE
```

165

C
C
C

ELEMAN ICIN YEREL KONUM MATRISININ OLUSTURULMASI

```
CC17C M=1,3
J=M-3
LM(M)=3*N1+J
17C LM(M+3)=3*N1+J
```

17C

C
C
C

GENEL KATILIKLAR VE SINIR SARTLARININ BILINEN CATLAK HAREKETLERI VE SABIT UC KUVVETLERI ICIN DUZELTILMESI

```
JK(1)=KODF(N1)
JK(2)=KODF(NJ)
CC178 N=1,2
KC=100
KK=JK(N)
CC178 M=1,2
I=3*(N-1)+M
IF (KK-KD) 176,177,177
176 ICISP(I)=0
GC TC 178
177 ICISP(I)=1
KK=KK-KC
178 KC=KC/10
CC240 N=1,2
KC=100
KK=JK(N)
CC240 M=1,3
I=3*(N-1)+M
II=LM(I)
IF (KK-KD) 180,190,190
```

176

177

178

C
C
C

SABIT UC KUVVETLERI

180

```
BCF(II)=BCF(II)+RF(I)
GO TC 240
```

C
C
C

YER DEGISTIRME SINIR SARTLARI

190

```
CISP=BC(II)
DC22C K=1,6
JJ=LM(K)
IF (JJ-II) 200,210,200
20C CONTINUE
IF (ICISP(K),EQ,1) GO TC 220
BCF(JJ)=BCF(JJ)-ASA(K,I)*DISP
GO TC 230
```

20C

210

22C

23C

24C

C
C
C

ELEMAN BILGILERININ TEYPI DE DEPOLANMASI

```
NBLK=3*(NL-1)/AN+1
WRITE(6) (SF(I),I=1,50)
WRITE(6) (SF(I),I=51,97)
IF (NUMFL-NFL) 402,500,260
260 CONTINUE
IF (ML) 402,270,401
27C IN=INJ
JN=INJ
```

260

27C

```
IMAT=IMAT
IMEL=IMEL
IFIX=IFIX
INEK=INFLK
INCR=INC
BSIJ=ASIJ
BSJI=ASJI
BCIJ=ACIJ
GC TC 400
```

500

```
RETURN
4003 FORMAT(' ELEMAN KART HATASI ELEMAN SAYISI=',I6)
4004 FORMAT(' ELEMAN ICIN DUGUM NOKTASI NUMARALARI=',I5)
4005 FORMAT(' ELEMAN',I5,'UZUNLUGU SIFIR ISLEM DURDURULDU')
4006 FORMAT(' DUGUM NOKTASI FARKI ASILAN UYE',I5,' ISLEM DURDURULDU')
ENC
```

```
SUBROUTINE STIFF
COMMON/PARAM/HED(20),NUMFL,NUMNP,NEC,NUMSFR
COMMON/FL=ARG/SF(6),LM(6),SA(6,6),ASA(6,6),T(3,3),NBLK,NFL,NI,NJ,
*S(6,6),RF(6),JK(3)
COMMON
```

1

```
MBAND,NN,NUMBLK,NPSTP(200),SP(40,3),BCF(600),P(30),A(30,15)
```

C
C
C

SIMGELFAKTIRME *****

```
NN2=2*NN
NNF=NN/3
DC10 I=1,NN2
CC10 J=1,NGAND
10 A(I,J)=0.000
```

10

C
C

BLCKLARDA DENGE DENKLEMLERININ OLUSTURULMASI,BIRINCI ELEMAN

KATILIKLARININ, YAPI KATILIGINA EKLENMESI

```

DO 50 NB=1, NUMPLK
REWIND 6
NBN=NN*(NB-1)
NBB=NN*(NB-1)
DO 30 N=1, NUMEL
READ(6) (SF(I), I=1, 50)
READ(6) (SF(I), I=51, 97)
IF (NBLY.NE.NB) GO TO 30
DO 20 I=1, 6
II=LM(I)
IJ=II-1
DO 20 J=1, 6
JJ=LM(J)-II+1
IF (JJ.LE.0) GO TO 20
A(IJ, JJ)=A(IJ, JJ)+ASA(I, J)
20 CONTINUE
30 CONTINUE

```

ELASTIK TEMEL KATILIGININ YAPI KATILIGINA EKLENMESI

```

IF (NUMSPR.EC.0) GO TO 37
DO 36 J=1, NN
I=J+NBA
IF (I.GT.NUMPLK) GO TO 37
MSPR=NPSTP(I)
IF (MSPR.EC.0) GO TO 36
DO 35 K=1, 3
KJ=3*(J-1)+K
35 A(KJ, I)=A(KJ, I)+SP(MSPR, K)
36 CONTINUE

```

DENKLEM BLOKUNUN TEYBE DEPCLANMASI

```

37 JF=3*NN+1
JL=JF+NN-1
WRITE(7) (BCF(J), J=JF, JL), ((A(K, M), M=1, MBAND), K=1, NN)
IF (NB.FC.NUMPLK) GO TO 60

```

KOMSU BLOKL ETKILEYEN DEYIMLERIN KAYDIRIMASI

```

DO 40 K=1, NN
KK=K+NN
DO 40 M=1, MBAND
A(K, M)=A(KK, M)
40 A(KK, M)=0.00
50 CONTINUE
60 RETURN
END
SUBROUTINE BANSOL
COMMON

```

```

1 MM, NN, NUMPLK, NPSTP(200), SP(40, 3), RF(600),
2 B(30), A(30, 15)

```

```

NL=NN+1
NH=NN+NN
NB=0
GO TO 150

```

```

* * * * *
* DENKLEM SAYISININ BLOKLARLA AZALTILMASI *
* * * * *

```

DENKLEM BLOKLARINI KAYDIRILMASI

```

100 NB=NB+1
DO 125 N=1, NN
NM=NN+N
B(N)=B(NM)
B(NM)=0.00
DO 125 M=1, MM
A(N, M)=A(NM, M)
125 A(NM, M)=0.000

```

SONRAKI DENKLEM BLOKLARININ CEKIRGECE OKUNMASI

```

150 IF (NUMPLK-NB) 150, 200, 150
READ(7) (B(N), N=NL, NH), ((A(N, M), M=1, MM), N=NL, NH)
IF (NB) 200, 100, 200

```

DENKLEM BLOKLARININ AZALTILMASI

```

200 DO 300 N=1, NN
IF (A(N, 1)) 225, 300, 225
B(N)=B(N)/A(N, 1)
DO 275 L=2, MM
IF (A(N, L)) 230, 275, 230
230 C=A(N, L)/A(N, 1)
I=N+L-1
J=0
DO 250 K=L, MM
J=J+1
250 A(I, J)=A(I, J)-C*A(N, K)
B(I)=B(I)-A(N, L)*B(N)
A(N, L)=C
275 CONTINUE
300 CONTINUE

```

AZALTILMIS DENKLEM BLOKLARININ TEYPI E YAZILMASI

```

375 IF (NUMPLK-NB) 375, 400, 375
WRITE(6) (B(N), (A(N, M), M=2, MM), N=1, NN)
GO TO 100

```

DENKLEMLERIN YENIDEN YERINE KONULMASI

```

400 DO 450 M=1, NN
N=NN+1-M
DO 425 K=2, MM
L=N+K-1
425 B(N)=B(N)-A(N, K)*B(L)
NM=N+NN
B(NM)=B(N)
A(NM, NP)=B(N)
NB=NB-1
475 IF (NB) 475, 500, 475
BACKSPACE 2
READ(6) (B(N), (A(N, M), M=2, MM), N=1, NN)
BACKSPACE 2

```



```

GC TC 400
C
C
C BILINMEYENLERIN B DIZILIMINE KOYULMASI
50C K=0
DC 600 NR=1,NUMPLK
DC 600 N=1,NN
NM=N+NN
K=K+1
60C BIK)=A(NM,AE)
RETURN
ENC
SUBROUTINE FORCE(NELM,RCT,KOL)
COMMON/PARAM/
* HED(20),NUMEL,NUMNP,NEQ,NUMSFR
* COMMON/VELEARG/
* SF(6),LM(6),SA(6,6),ASA(6,6),T(3,3),NELK,NEL,NI,NJ,
* S(6,6),RF(6),SPF(3)
COMMON
* MM,NN,NUMBLK, NPSTP(200),SP(40,3),RE(600),R(30),A(30,15)
COMMON/TEN/ANELM(100)
COMMON/SEC/
* NUMLNP,SN,DIS,CES,KMI,RLX,NSPI,SPCL,
* AIS(200),AFS(200),TL(200),F(200,6),SNA(200)
DIMENSION RRF(100),KP(100)

```

```

C
C
C SIMGLENDIRME
KC=1
RFM1=0.00
NELM=C
DO 10 N=1,NEC
C
C
C GVE UC KUVVETLERININ BULUNMASI VE YAZILMASI

```

```

10 RE(N)=0.00
DO 30 N=1,NUMEL
READ(6) (SF(I),I=1,50)
READ(6) (SF(I),I=51,97)
DC 25 I=1,6
RF(I)=0.00
DO 20 J=1,6
JJ=LM(J)
20 RF(I)=RF(I)+SA(I,J)*B(JJ)
25 RF(I)=RF(I)+SF(I)
DC 22 I=1,6
F(NEL,I)=RF(I)
22 CONTINUE

```

```

C
C
C MAX. ÇEKME ALAN ÇUBUK ELEMANININ BULUNMASI
IF((KC.EQ.1).AND.(NEL.NE.NUMEL)) GO TO 26
RRF(NEL)=RF(I)
IF((KCL.EQ.1).AND.(NEL.EQ.2)) RRF(NEL)=2.00*RRF(NEL)
IF((KCL.LE.1).AND.(NEL.EQ.NUMEL)) RRF(NEL)=2.00*RRF(NEL)
KC=1
IF((RRF(NEL)-RFM1.LT.0.000) GO TO 26
GO TO 26
26 RFM1=RRF(NEL)
NELM=NEL
GO TO 26
28 KC=2
25 CONTINUE
30 CONTINUE

```

```

C
C
C ÇEKME ALAN ÇUBUK ELEMANLAR İÇİN KONTROL
IF(NELM.EQ.C) GO TO 36
HRRF=(1.00-RCT)*RRF(NELM)
DC 35 I=2,NUMEL,2
IF(NELM(I).EQ.I) GO TO 35
IF((HRRF(I)-HRRF.LE.0.00) NNELM(I)=I
35 CONTINUE
IF((HRRF(NUMEL)-HRRF.LE.0.00) NNELM(NUMEL)=NUMEL
IF(NELM(NUMEL).EQ.NUMEL) GO TO 36
36 CONTINUE
DO 37 I=2,NUMEL,2
IF((HRRF(I).LE.-0.0005) GO TO 38
37 CONTINUE
IF((HRRF(NUMEL).LE.-0.0005) GO TO 38
NELM=C
38 CONTINUE
IF(NELM.NE.C) GO TO 50
C
C
C SERBEST BIRAKILAN ÇUBUK ELEMANLARIN KONTROLU

```

```

DO 45 I=2,NUMEL,2
IF((NNELM(I).GT.0).AND.(HRRF(I).GT.0.00)) WRITE(3,8004)
45 CONTINUE
IF(NELM(NUMEL).GT.0).AND.(HRRF(NUMEL).GT.0.00) WRITE(3,8004)
50 CONTINUE
IF(NELM.EQ.C) GO TO 64
WRITE(3,4000)
KP(1)=C
N=1
DO 61 I=2,NUMEL,2
IF(NNELM(I).EQ.I) GO TO 60
GO TO 61
60 KP(IN)=I
N=N+1
61 CONTINUE
IF((NNELM(NUMEL).EQ.NUMEL).AND.(KCL.NE.3)) GO TO 62
IF(N.EQ.2) N=N-1
GO TO 63
62 KP(IN)=NUMEL
63 WRITE(3,4001) (KP(I),I=1,N)
64 CONTINUE
8CC4 FORMAT(' HATA HASINCTA SERBEST BIRAKILAN ÇUBUK ELEMAN
*GEVŞİME PARAMETRESİNİN AZALTILMASI')
4000 FORMAT(2X,'SERBEST BIRAKILAN ÇUBUK ELEMANLAR')
4CC1 FORMAT(10I6)
RETURN
ENC
SUBROUTINE SECPR
COMMON
1 MBAND,NN,NUMBLK,NPSTP(200),SP(40,3),BCF(600),
2 BC(600),X(200),Y(200),KODF(200),SFT(40,6),
3 COAX(200),CGAY(200),CGAAZ(200)
COMMON/SEC/
1 NUMLNP,SN,DIS,CES,KMI,RLX,NSPI,SPCL,
2 AIS(200),AFS(200),TL(200),F(200,6),SNA(200)

```

```

DIMENSION FC1(200),FC2(200),FS1(200),FS2(200),NT(200),SMP(200),
*SNA(200)
E=1.0
NUMLEL=NUMLEL-2
DO 900 I=1,NUMLEL,2
AS1=0.00
AS2=C.CC

```

```

C
C
C SECRP ICIN MAX. MOMENT KULLANARAK ELFMAN KUVVETLERININ BULUNMASI

```

```

ST=F(I,1)
SM3=(F(I,3)**2)**0.5
SM6=(F(I,6)**2)**0.5
IF((SM3-SM6).GE.C.C) GO TO 150
SM=-F(I,6)
SMP(I)=SM
GO TO 160
150 SM=F(I,3)
SMP(I)=SM
160 IF(ST.EQ.0.0) ST=1.0E-10
IF(KMI.EQ.0) GO TO 750

```

```

C
C
C CELIGIN CEKME VE BASING PARAMETRELERININ TANIMLANMASI

```

```

IF(AIS(I).EQ.0.0) GO TO 110
IF(SM.GT.0.00) GO TO 100
AS1=AIS(I)
CP=DIS
C=TL(I)-DPS
100 AS2=AIS(I)
CP=CES
C=TL(I)-DIS
110 IF((AFS(I).EQ.0.0).AND.(AIS(I).EQ.0.0)) GO TO 750
IF(SM.GT.0.0) GO TO 120
AS2=AFS(I)
CP=DIS
D=TL(I)-DPS
GO TO 130
120 AS1=AFS(I)
CP=CES
D=TL(I)-DIS
130 CONTINUE
SM=(SM**2)**0.5
IF(KMI.EQ.-1) GO TO 770

```

```

C
C
C DURUM 1 TARAFSIZ EKSEN DONATILAR ARASINDA

```

```

K=1
E=SM/ST
HTL=TL(I)/2.00
YC=(2.0*SN-1.0)*AS1
YT=SM*AS2
YA=YC*(E+DP+HTL)
YB=YT*(E+C+HTL)
P=3.0*(E-HTL)
Q=(YA+YB)*6.0/B
R=(D*YB+CP*YA)*(-6.0)/B
IF(AS1.EQ.0.0) GO TO 210
XI=CP
GO TO 220
210 XI=0.00
220 IF(AS2.EQ.0.0) GO TO 230
XF=E
GO TO 240
230 XF=TL(I)
240 GO TO 300

```

```

C
C
C DURUM 1 KESIT CZFLIKLERI

```

```

250 COAY(I)=B*SNA(I)+YC+YT
SAY=B*SNA(I)**2/2.0+YC+DP+YT*D
Z=SAY/COAY(I)
COAZ(I)=B*SNA(I)**3/12.0+B*SNA(I)*(Z-SNA(I)/2.0)**2+YC*(Z-DP)**2
+YT*(C-Z)**2

```

```

C
C
C DURUM 1 GERILMELER

```

```

V1=SNA(I)-CP
V2=D-SNA(I)
V3=YC*V1+B*SNA(I)**2/2.0-YT*V2
FC1(I)=(ST+SNA(I))/V3/144.0
FC2(I)=FC1(I)*1.0-TL(I)/SNA(I)
IF((KMI.GE.1).AND.(FC2(I).LT.0.0).AND.(AS2.NE.0.0)) FC2(I)=0.0
FS1(I)=V1*FC1(I)**2.0*SN-1.0/SNA(I)
IF(AS1.EQ.0.0) FS1(I)=0.0
FS2(I)=-V2*FC1(I)*SN/SNA(I)
IF(AS2.EQ.0.0) FS2(I)=0.0
SNA(I)=SNA(I)
GO TO 800

```

```

C
C
C TARAFSIZ EKSEN FONKSIYONUNUN KOKLERININ BULUNMASI

```

```

300 XX=XI
CEL=(XF-XI)/100.0
DO 320 A=1,101
FF=XX**2+P*XX**2+Q*XX+R
IF(N.EQ.1) GO TO 310
IF((FO.LT.0.0).AND.(FF.GE.0.0)) GO TO 330
IF((FO.GT.0.0).AND.(FF.LE.0.0)) GO TO 330
310 FC=FF
XX=XX+DEL
320 CONTINUE
IF(K-1) 400,400,700

```

```

C
C
C TE ICIN GEVSETME YONTEMI

```

```

330 IF(KMI.EQ.1) SNA(I)=TL(I)/2.0
SNAC=SNA(I)
SNA(I)=XX-CEL+CEL*FO/(FO-FF)
SNA(I)=SNAC+RLX*(SNA(I)-SNAC)
IF(K-1) 250,250,450

```

```

C
C
C DURUM 2 TARAFSIZ EKSEN KESIT KENARI ILE DONATI ARASINDA

```

```

400 K=2
IF(AS2.EQ.C.C) GO TO 700
Yb=(2.0*SA-1.0)*AS2
Yb=(E+C+HTL)*Yb

```

```
R=(D*YB+DP*YA)*(-E.C)/E
X1=C
XF=TL(1)
GC TO 30C
```

```
DURUM 2 KESIT CZELLIKLRFI
```

```
450 COAY(1)=B*SNA(1)+YC+YW
SAY=B*SNA(1)**2/2.0+YC+DP+YW*D
Z=SAY/COAY(1)
COAAZ(1)=B*SNA(1)**3/12.0+P*SNA(1)*(Z-SNA(1)/2.0)**2+YC*(Z-DF)**2+
1Y*(C-Z)**2
IF(K.EC.3) GC TO 71C
```

```
DURUM 2 GERILMFLER
```

```
V1=SNA(1)-CP
V2=SNA(1)-C
V3=YC+V1+B*SNA(1)**2/2.0+YW*V2
FC1(1)=(ST*SNA(1)/V3)/144.0
FC2(1)=(ST*FC1(1)*IL.0-TL(1))/SNA(1)
IF((KMI.EC.1).AND.(FC2(1).LT.0.0).AND.(AS2.NE.0.0)) FC2(1)=0.00
FS1(1)=(V1+FC1(1)*(2*SN-1.0))/SNA(1)
IF(AS1.EC.C.C) FS1(1)=0.0
FS2(1)=(V2+FC1(1)*(2.0*SN-1.0))/SNA(1)
IF(AS2.EC.0.0) FS2(1)=0.0
SNAX(1)=SNA(1)
GC TO 60C
```

```
DURUM 3 TE KESIT CISINDA
```

```
70C K=3
IF(KMI.EC.1) SNA(1)=TL(1)
SNA0=SNA(1)
SNA(1)=TL(1)
GC TO 45C
71C SMI=SM/COAAZ(1)
TA=ST/COAY(1)
FC1(1)=(TA+SMI*Z)/144.C
FC2(1)=(TA-SMI*Z)/144.C
IF((KMI.EC.1).AND.(FC2(1).LT.0.0).AND.(AS2.NE.0.0)) FC2(1)=0.00
FS1(1)=(TA+SMI*(Z-CP))*(2.0*SN-1.0)/144.C
IF(AS1.EC.C.C) FS1(1)=0.0
FS2(1)=(TA-SMI*(Z-Z))*(2.0*SN-1.0)/144.C
IF(AS2.EC.0.0) FS2(1)=C.0
GC TO 78C
```

```
DURUM C CELIKSIZ
```

```
75C K=0
IF(KMI.EC.0) SM=(SM**2)**0.5
SNA(1)=TL(1)/2.C
FC1(1)=(ST/COAY(1)+(SM/COAAZ(1))*SNA(1))/144.0
FC2(1)=(ST/COAY(1)-(SM/COAAZ(1))*SNA(1))/144.0
FS1(1)=0.0
FS2(1)=0.0
NT(1)=1
GC TO 78C
```

```
DURUM 1 ASIMETRIK KESIT
```

```
77C K=-1
FC1(1)=(ST/COAY(1)+SM/AS1)/144.0
FC2(1)=(ST/COAY(1)-SM/AS2)/144.0
FS1(1)=0.0
FS2(1)=0.0
GC TO 78C
```

```
DURUM 3 SIFIR VE BIR ICIN TE NIN HESAPLANMASI
```

```
78C IF(FC1(1)-FC2(1).EC.0.0) GC TO 79C
SNAX(1)=TL(1)*FC1(1)/(FC1(1)-FC2(1))
IF(SNAX(1).GT.83.3334) GC TO 79C
GC TO 79C
79C SNAX(1)=P3.3334
755 IF(K) SCC,900,800
```

```
TE NIN YAKINSAKLIGI ICIN TEST
```

```
80C TEST=(SNA(1)-SNA0)/SNAC
TEST=(TEST**2)**0.5
NT(1)=C
IF((TEST.LF.SPCL) NT(1)=1
90C CONTINUE
IF(KMI.LE.C) GC TO 91C
IF(NSPI.EC.1) GC TO 93C
DC 91C N=1,NUMLEL,2
IF(NT(N).EC.0) GC TO 92C
91C CONTINUE
KMI=NSPI
WRITE(3,2003)
GC TO 45C
92C IF(KMI.EC.ASPI) GC TO 93C
GC TO 59C
93C WRITE(3,2000)
99C WRITE(3,2001)
DC 99C I=1,NUMLEL,2
SNAX(1)=SNAX(1)+12.0
COAAZ(1)=COAAZ(1)+20736.0
COAY(1)=COAY(1)+144.0
COAAZ(1)=COAAZ(1)+41.623
COAY(1)=COAY(1)+6.452
BIR=0.488
F(1,1)=F(1,1)+453.4
SMP(1)=SMP(1)+13819.63
FC1(1)=FC1(1)+BIR
FC2(1)=FC2(1)+BIR
FS1(1)=FS1(1)+BIR
FS2(1)=FS2(1)+BIR
SNAX(1)=SNAX(1)+2.54
WRITE(3,2002) I,F(1,1),SMP(1),FC1(1),FC2(1),FS1(1),FS2(1),COAY(1),
1,COAAZ(1),SNAX(1)
F(1,1)=F(1,1)/453.4
SMP(1)=SMP(1)/13819.63
FC1(1)=FC1(1)/BIR
FC2(1)=FC2(1)/BIR
FS1(1)=FS1(1)/BIR
FS2(1)=FS2(1)/BIR
SNAX(1)=SNAX(1)/2.54
COAAZ(1)=COAAZ(1)/41.623
```