

**TEK AÇIKLIKLI DAİRESEL KÂGİR KEMER
KÖPRÜLERİN GÖÇME YÜKLERİNİN
LİMİT ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE
HESAPLANMASI**

Süleyman Nazif ORHAN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU
2010
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEK AÇIKLIKLI DAİRESEL KÂGİR KEMER KÖPRÜLERİN
GÖÇME YÜKLERİNİN LİMİT ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE
HESAPLANMASI**

Süleyman Nazif ORHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2010**

Her hakkı saklıdır

Yrd. Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU danışmanlığında Süleyman Nazif ORHAN tarafından hazırlanan bu çalışma 17/08/2010 tarihinde aşığıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sadri ŞEN

İmza:

ye : Doç. Dr. Sinan HINISLIOĐLU

İmza:

ye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU

İmza:

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ömer AKBULUT

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEK AÇIKLIKLI DAİRESEL KÂĞİR KEMER KÖPRÜLERİN GÖÇME YÜKLERİNİN LİMİT ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE HESAPLANMASI

Süleyman Nazif ORHAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU

Bu çalışmada, kâgir kemer köprülerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanmasında kullanılan mevcut yöntemler incelenmiştir ve tek açıklıklı dairesel kâgir kemer köprülerin göçme yüklerinin rijit-blok analiz yöntemiyle hesaplanmasına yönelik olarak bir algoritma geliştirilmiştir.

Limit analizin alt-sınır teoreminin baz alındığı algoritma, doğrusal programlama tekniklerini kullanmakta ve gerçek göçme yükü değerine alttan yakınsamakta yani emniyetli yük değerini öngörmektedir. Algoritma, Matlab programlama ortamında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki mevcut sonuçlarla uyumlu çıkmıştır.

Ayrıca, kemer yüksekliği, kemer kalınlığı, sürtünme katsayısı ve kemer bloklarının sayısı, parametreler olarak alınarak, tek açıklıklı kâgir kemerlerin değişimsel göçme yükleri değerlendirilmiştir. Kâgir bloklar arasındaki sürtünme katsayısının, kalın kemerlerde göçme mekanizmasını belirlediği ve kemer bloklarının sayısının, kâgir kemerlerin yük taşıma kapasitesi üzerinde neredeyse etkisiz olduğu belirlenmiştir.

2010, 133 sayfa

Anahtar Kelimeler: kâgir kemer köprüler, rijit-blok analiz, göçme yükü, limit analiz, doğrusal programlama

ABSTRACT

MS Thesis

DETERMINATION OF COLLAPSE LOAD OF SINGLE SPAN CIRCULAR MASONRY ARCH BRIDGES BY THE METHODS OF LIMIT ANALYSIS

Süleyman Nazif ORHAN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU

In this study, the available methods of assessing the load carrying capacity of masonry arch bridges are reviewed and an algorithm to assess the collapse load of single span circular masonry arch structures with rigid-block analysis method is developed.

Based on the lower-bound theorem of limit analysis, the algorithm uses techniques of linear programming and converges to the true collapse load from below; *ie.* predicts the safe load. The algorithm is implemented in Matlab programming environment. The results compare well with those available in the literature.

Also, the variational collapse load of single span masonry arches is evaluated, taking arch height, arch thickness, coefficient of friction and number of voussoirs as parameters. It is found that the coefficient of friction between masonry blocks governs the collapse mechanism in the thick arch range and the number of voussoirs is almost ineffective on the load carrying capacity of masonry arches.

2010, 133 pages

Keywords: masonry arch bridges, rigid-block analysis, collapse load, limit analysis, linear programming

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmada, araştırmalarımı yönlendiren ve her türlü destek, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince yaptıkları yardımlardan dolayı, Sayın Yrd. Doç. Dr. Habib UYSAL'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Remzi Şahin'e, Sayın Arş. Gör. Türkay KOTAN'a, Sayın Arş. Gör. Selim ŞENGÜL'e ve yüksek lisans eğitimim boyunca verdiği maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım süresince, göstermiş oldukları büyük sabır ve özveriyle bana destek olan çok kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

Süleyman Nazif ORHAN

Ağustos 2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.1.1. Kâgir yapılar ve yapısal kemer formunun ilk örnekleri	3
1.1.2. Kâgir kemer köprülerin kısa tarihçesi	5
1.1.3. Kâgir kemer köprülerin yapımı ve köprüyü oluşturan kısımlar	9
1.1.4. Başlıca yapısal kemer şekilleri	11
1.1.5. Kâgir kemer köprülerin göçme nedenleri	13
1.2. Amaç ve Kapsam	14
2. KURAMSAL TEMELLER	16
2.1. Kâgir Kemer Köprüler Üzerine Yapılan İlk Çalışmalar	16
2.1.1. Basınç çizgisi	18
2.1.2. Üçte-bir kuralı	21
2.2. Kâgir Kemer Köprülerin Analizinde Kullanılan Yöntemler	22
2.2.1. Mexe metodu	22
2.2.1.a. Açıklık/yükseklik faktörü (F_{sr})	25
2.2.1.b. Profil faktörü (F_p)	26
2.2.1.c. Malzeme faktörü (F_m)	26
2.2.1.d. Derz faktörü (F_j)	27
2.2.1.e. Durum faktörü (F_c)	28
2.2.2. Elastik analiz yöntemi	29
2.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi	30
2.2.4. Ayırık elemanlar yöntemi	32
2.2.5. Limit analiz yöntemi	33

2.2.5.a. Kâgir kemer köprülerin mekanizma metodu ile analizi	36
2.2.6. Rijit-blok analiz yöntemi	41
2.2.7. Kâgir kemerlerin analizi için özel olarak geliştirilmiş programlar	46
2.2.7.a. Ring 2.0 programı	46
2.2.7.b. Archie-M programı	49
2.2.7.c. Interactive Thrust programı	50
2.2.8. Kâgir kemer köprülerin grafiksel analizi (Mery epürü)	51
2.3. Kaynak Özetleri	53
3. MATERYAL ve YÖNTEM	64
3.1. Alt-Sınır Teoremi	64
3.2. Doğrusal Programlama	70
3.3. Rijit-Blok Analizde Alt-Sınır Teoreminin Uygulanması	75
3.4. Kâgir Kemer Köprülerin Rijit-Blok Analiz Metoduyla Analizi	83
3.5. Kâgir Kemer Köprülerin Göçme Yükünün Parametrik Olarak İncelenmesi ..	96
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	99
4.1. Örnek Bir Kemer Köprü'nün Analizi	99
4.2. Prestwood Köprüsü'nün Analizi	103
4.3. Göçme Yükünün Seçilen Parametrelere Göre İrdelenmesi	105
4.3.1. Kemer kalınlığının göçme yükü üzerindeki etkisi	105
4.3.2. Sürtünme katsayısının göçme yükü üzerindeki etkisi	107
4.3.3. Kemer yüksekliğini göçme yükü üzerindeki etkisi	110
4.3.4. Blok sayısının göçme yükü üzerindeki etkisi	112
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR	118
EKLER	122
EK 1	122
ÖZGEÇMİŞ	134

SİMGELER DİZİNİ

α	Göçme Yüğü Faktörü
b	Kemer Kalınlığı
d	Taç Kısımındaki Kemer Kalınlığı
f	Kemer Yüksekliği
F_c	Durum Faktörü
F_d	Derz Derinliği Faktörü
F_j	Derz Faktörü
F_m	Malzeme Faktörü
F_{mo}	Harç Faktörü
F_p	Profil Faktörü
F_w	Derz Genişliği Faktörü
G_b	Kemer Üst Dolgu Malzemesinin Birim Hacim Ağırlığı
G_s	Kemer Malzemesinin Birim Hacim Ağırlığı
h	Taç Kısımın Üzerindeki Dolgu Yüksekliği
H	Kemer Üst Dolgusunun Yüksekliği
k_i	İhlal Faktörü
L	Kemer Açıklığı
M	Moment
M_p	Plastik Moment Kapasitesi
μ	Sürtünme Katsayısı
N	Normal Kuvvet
s	Kemerdeki Blok Sayısı
σ_c	Kemer Malzemesinin Basınç Dayanımı
t	Kesit Derinliği
V	Kesme Kuvveti
w	Köprü Genişliği
W_s	Blok Ağırlığı
X_p	Dış Yüğü Uygulama Noktası
X_{sg}	Blok Ağırlık Merkezi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Giza Piramtileri (Mısır)	4
Şekil 1.2.	Cloaca Maxima’da yer alan kemer şeklinde bir kanal (İtalya)	5
Şekil 1.3.	Romalılar tarafından yapılan su kemeri Pont du Gard (Fransa)	6
Şekil 1.4.	Anji Köprüsü (Çin)	7
Şekil 1.5.	Danhe Köprüsü (Çin)	7
Şekil 1.6.	Cender Suyu Köprüsü	8
Şekil 1.7.	Kemer davranışı a) yeni yapılmış kemer b) oturmuş 3 mafsallı kemer ..	9
Şekil 1.8.	Kagir kemer köprülerin muhtelif kısımları	10
Şekil 1.9.	Başlıca yapısal kemer şekilleri	12
Şekil 2.1.	Zincir eğrisi ve zincirin döndürülmesiyle elde edilen kemerler	17
Şekil 2.2.	Kemerin alt ve üst sınırları arasında kalan bir zincir eğrisi	17
Şekil 2.3.	Bir taş kemerdeki basınç çizgisi	18
Şekil 2.4.	Barlow tarafından modellenen kemer ve basınç çizgileri	19
Şekil 2.5.	Üç mafsallı kemerde basınç çizgisi	20
Şekil 2.6.	Farklı yükleme durumları için kesitin tepkisi	21
Şekil 2.7.	Mexe metodunda dikkate alınan kemer geometrisi	24
Şekil 2.8.	Mexe metodunda kullanılan nomogram	24
Şekil 2.9.	Açıklık/yükseklik faktörü	25
Şekil 2.10.	Yatay yüke maruz (a) çelik kolon, (b) kâgir sütun ve (c) idealleştirilmiş tepki eğrileri	33
Şekil 2.11.	Alt-sınır ve üst-sınır çözümleri arasındaki ilişki	35
Şekil 2.12.	Üç tane plastik mafsallı oluşan kemerde denge durumu	38
Şekil 2.13.	Noktasal bir yük etkisindeki dairesel kemerin çökme mekanizması	38
Şekil 2.14.	Prestwood Köprüsü’nün göçme mekanizması	40
Şekil 2.15.	Rijit bloklardan oluşan kemerin göçme mekanizması	41
Şekil 2.16.	Yer değiştirmemiş bloğun geometrisi	42
Şekil 2.17.	Yer değiştirmiş blokların geometrisi	43
Şekil 2.18.	Bitişik blokların muhtemel hareketleri	44
Şekil 2.19.	Ring 2.0 programında dikkate alınan göçme şekilleri	48

Şekil 2.20. Mery epürü yöntemiyle basınç çizgisinin belirlenmesi	52
Şekil 3.1. Elastik-tam-plastik malzeme davranışı	64
Şekil 3.2. İki farklı noktadan yüklenmiş hiperstatik kiriş	65
Şekil 3.3. Hiperstatik kirişin moment diyagramının oluşturulması	66
Şekil 3.4. Doğrusal programlama yardımıyla analizi yapılan ankastre kiriş	69
Şekil 3.5. Sistemin yalnız dış yükler etkisindeki moment diyagramı	69
Şekil 3.6. Sistemin yalnız r etkisindeki moment diyagramı	69
Şekil 3.7. İdealleştirilmiş kayma modelleri ve derzlerdeki gerçek davranışı	77
Şekil 3.8. Blok ve ara yüzey kuvvetleri	78
Şekil 3.9. Blok ara yüzeyindeki normal kuvvet ve momente bağlı kısıtlayıcılar ...	79
Şekil 3.10. Üç parçalı kemerin geometrisi	81
Şekil 3.11. A bloğunun denge durumu	81
Şekil 3.12. KEMER programında kullanılan genel köprü geometrisi	85
Şekil 3.13. Kemerı oluşturan blokların koordinatları	85
Şekil 3.14. Kemerdeki ilk blok için ara yüzeylerin koordinatları	86
Şekil 3.15. Kemer bloklarının üzerindeki dolgu parçaları	87
Şekil 3.16. Kemerdeki ilk bloğun üzerindeki dolgu parçası	88
Şekil 3.17. Kemerin toplam yüzey alanı	89
Şekil 3.18. Bloğun ağırlık merkezinin koordinatı	89
Şekil 3.19. Kemer bloğunun gerçek konumundaki ağırlık merkezi	91
Şekil 3.20. Birinci bloğun denge durumu için kuvvetler ve mesafeler	92
Şekil 3.21. Analizlerde kullanılan geometrik parametreler	97
Şekil 4.1. Ring 2.0'da $X_p=1.2$ m için köprünün göçme mekanizması	101
Şekil 4.2. Ring 2.0'da $X_p= 2.3$ m için köprünün göçme mekanizması	101
Şekil 4.3. Ring 2.0'da $\sigma_c=2\text{N/mm}^2$ ve $X_p= 1.2$ m için köprünün göçme mekanizması	102
Şekil 4.4. Ring 2.0'da $\sigma_c =2 \text{ N/mm}^2$ ve $X_p= 2.3$ m için köprünün göçme mekanizması	102
Şekil 4.5. Ring 2.0'da $\sigma_c =1\text{N/mm}^2$ ve $X_p= 1.2$ m için köprünün göçme mekanizması	103
Şekil 4.6. Ring 2.0'da $\sigma_c =1\text{N/mm}^2$ ve $X_p= 2.3$ m için köprünün göçme mekanizması	103

Şekil 4.7. Prestwood Köprüsü'nün geometrisi (mm)	104
Şekil 4.8. $s=20$ ve $f/L=0,3$ olduğunda b/L oranının göçme yüküne etkisi	106
Şekil 4.9. $s=90$ ve $f/L=0,4$ olduğunda b/L oranının göçme yüküne etkisi	107
Şekil 4.10. $s=20$ ve $f/L=0,3$ için sürtünme katsayısının göçme yüküne etkisi	108
Şekil 4.11. $s=50$ ve $f/L=0,4$ için sürtünme katsayısının göçme yüküne etkisi	109
Şekil 4.12. $s=20$ ve $\mu=0,4$ olduğunda f/L oranının göçme yüküne etkisi	110
Şekil 4.13. $s=90$ ve $\mu=0,6$ olduğunda f/L oranının göçme yüküne etkisi	111
Şekil 4.14. $\mu=0,4$ ve $f/L=0,3$ olduğunda blok sayısının göçme yüküne etkisi	112
Şekil 4.15. $\mu=0,6$ ve $f/L=0,5$ olduğunda blok sayısının göçme yüküne etkisi	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Kemer malzemesi faktörü (F_b)	26
Çizelge 2.2.	Dolgu malzemesi faktörü (F_f)	27
Çizelge 2.3.	Derz genişliği faktörü (F_w)	28
Çizelge 2.4.	Harç faktörü (F_{mo})	28
Çizelge 2.5.	Derz derinliği faktörü (F_d)	28
Çizelge 3.1.	Matlab programında “linprog” komutu seçenekleri	74
Çizelge 3.2.	Analizlerde sabit alınan parametreler	98
Çizelge 3.3.	Göçme yüküne etkisi araştırılan parametreler ve değerleri	98
Çizelge 4.1.	Örnek kemer köprünün geometrisi ve malzeme özellikleri	99
Çizelge 4.2.	Sonsuz basınç dayanımı durumunda farklı yükleme noktaları için göçme yükü değerlerinin karşılaştırılması	100
Çizelge 4.3.	Farklı basınç dayanımı değerleri için farklı yükleme noktalarında elde edilen göçme yükü değerlerinin karşılaştırılması	101

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Ülkemizdeki yapıların yarıya yakın bir bölümü yığma yapı olup, bu yapıların büyük çoğunluğu kırsal kesimlerde ve şehirlerin çevre mahallelerinde bulunmaktadır. Yığma binalar, ekonomik olmaları ve yerel malzeme ile kolayca inşa edilebilmelerinden dolayı dünyanın pek çok ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de, özellikle kırsal kesimlerde yaygın olarak inşa edilmektedir. Bu durum gelecekte de geçerli olabilir, çünkü ülkemizdeki ekonomik koşullar, yığma yapı malzemelerinin kolay temin edilmesi ve yapının gerektirdiği işçiliğin basitliği yığma yapıyı özellikle konut yapımında cazip kılmaktadır. Yığma yapı denildiğinde sadece günümüzde yapılan yapılar değil tarihi yapıları da dikkate almak gerekir (Sayın 2009).

Binlerce yıllık geçmişe sahip olan tarihi yapılar deprem gibi beklenmedik doğal afetler karşısında zarar görmekte ya da yıkılmaktadırlar. Ancak, tarihi yapıların zarar görmesinin ya da yıkılmasının tek nedeni depremler değildir; yapı malzemelerinin dayanımını yitirmesi, zamana bağlı biçim değiştirmeler, yanlış kullanımın neden olduğu aşırı ve düzensiz yükleme, zemin oturmaları, sel felaketleri, yangınlar, savaşlar ve vandalizm tarihi yapıların yavaş yavaş yok olmasının diğer nedenleridir (Toker ve Ünay 2004).

İnsanlığın ortak kültürel mirası olan tarihi yapıların gelecek nesillere bırakılabilmesi için aslına uygun bir şekilde korunması ve onarılması gerekmektedir. Bunun için de bu yapıların öncelikle mekanik davranışlarının bilinmesi gerekir. Modern betonarme ve çelik yapıların davranışlarını gelişmiş sayısal yöntemlerle ayrıntılı bir şekilde ortaya koymak mümkündür. Çoğu kemer, tonoz, kubbe, vb. eğrisel formda olan yığma yapılarda ise harç vasıtasıyla birbirlerine bağlanan taş veya tuğla blokların sürekli ortam oluşturmaması sebebiyle sayısal yöntemlerle asıl davranışı ortaya koymak pek mümkün olamamaktadır. Bu nedenle tarihi yapıların korunması ve doğru yöntemlerle

onarılabilmesi için yapısal davranışlarının anlaşılması gerekmektedir (Kanıt ve Işık 2007).

Kemer formu ise, yığma yapılarda hem yapısal hem de estetik kaygılara yönelik olarak sıkça kullanılmaktadır. Geniş açıklıkları geçmek için oldukça uygun olan bu form, geometrik biçiminden dolayı genellikle basınç kuvvetlerinin etkisinde kalır. Taş ve tuğla gibi yapı malzemeleri oldukça büyük basınç dayanımına sahip olduklarından, kemer formunun temel yapı malzemeleri olmuşlardır. Zaman içerisinde kullanılan malzeme ve inşaat tekniklerinde önemli bir değişiklik olmamasına rağmen kemer tiplerinde büyük gelişmeler gözlenmiştir. Değişik kültür ve uygarlıklarda, hem işlevsel hem de dekoratif amaçlı çok farklı kemer formları kullanılmıştır (Toker ve Ünay 2004).

Taş kemer köprüler, basit geometrik formlarından dolayı kubbe, tonoz ve kemerlerden oluşan diğer tarihi yapılara oranla daha kolay yorumlanabilen yapısal davranışa sahiptirler. Köprüler, 3-boyutlu yapısal davranış sergileyen diğer yapıların tersine, köprü ana eksen ve yerçekimi doğrultusundaki düşey eksenin oluşturduğu düzlem içerisinde asıl yük aktarma mekanizmasını gerçekleştirirler. Deprem ve sel gibi doğal afetlerin neden olduğu yük etkilerinden dolayı, elbette bu düzleme dik doğrultuda da önemli biçim değiştirme ve iç kuvvetler oluşmaktadır. Ancak kâgir kemer köprülerin geometrik formunu belirleyen yapısal davranış unsurları söz konusu düzlem içerisinde gerçekleşir (Toker ve Ünay 2004).

Yığma taş veya tuğla yapı sistemlerinin gerçek yapısal davranışını anlayabilmek için bu tür hesap yöntemlerine, yapısal davranışın daha kolay ve doğru bir şekilde kontrol edilebildiği, düzlem yapı davranışı sergileyen taş kemer köprü örnekleri ile başlanması daha doğru bir yaklaşımdır (Toker ve Ünay 2004).

1.1.1. Kâgir yapılar ve yapısal kemer formunun ilk örnekleri

Taş, ahşapla birlikte bilinen en eski yapı malzemelerinden biridir. Taşların, harçlı ya da harçsız olarak, üst üste yerleştirilmesi, dayanıklı ve basit yapıların inşasında başarılı bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. İlk kâgir yapılar, büyük ihtimalle harç olarak toprak kullanılmış ya da harçsız bir araya getirilmiş basit doğal taş yığınları iken, zamanla çeşitli aletlerin geliştirilmesiyle taşlar istenilen şekillere getirilerek kullanılabilmiştir. İlerleyen dönemlerde çamur ve kil kullanılarak ilk tuğlaların imali ile birlikte tuğla duvarlar yapılmaya başlanmış ve bunlarda harç olarak çamur kullanılmıştır. Bu basit yöntem, özellikle Nil ve Mezopotamya vadisinde, binlerce yıl boyunca konutların inşasında kullanılmıştır (Crocı 1998).

Bilinen en eski kâgir yapılardan biri İsrail’de Hullen Gölü yakınlarında yapılan arkeolojik kazılarda bulunan M.Ö. 9000-8000 yıllarından kalma taş evlerdir (Lourenço 1996). En eski kâgir yapılara başka bir örnek de M.Ö. 8000’li yıllarda yapılmış olan Jericho Duvarları’dır. Askeri savunma amacıyla yapılan bu duvarlarda kireçtaşı kullanılmış ve derzler toprakla doldurulmuştur. Yine aynı bölgede, M.Ö. 3000’lerden kalma tuğladan yapılmış duvarlar bulunmuştur (Crocı 1998).

Günümüze kadar ayakta kalmayı başarmış en eski kâgir yapılar ise, konutlara nazaran daha iyi malzeme ve işçiliğin kullanıldığı dini yapılardır. Bu tip yapılara bir örnek olan piramitler, en kararlı yapı formlarından birine sahiptirler. Yerleşim yerlerine nazaran daha az iç boşlukları olan ve gerilmelerin çok küçük olduğu bu yapılar, kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine uygun olacak formda yapılmışlardır. Bu piramitlerden en ünlüleri, Şekil 1.1’de görülen, M.Ö. 2800-2000 yılları arasında yapılan Mısır’daki Giza Piramitleri’dir. Dünyanın yedi harikasından, ayakta kalmayı başaran tek yapı olan bu piramitlerden biri, 20. yüzyıla kadar, yaklaşık 140 m olan yüksekliğiyle dünyanın en yüksek yapısıydı (Oliveira 2003).



Şekil 1.1. Giza Piramtileri (Mısır)

İlerleyen dönemlerde, kâgir yapıların inşasında yapısal davranışa önem verilmeye başlanmıştır ve duvarların arasında yer alan boşlukların üzerindeki blokların, taş lentolarla desteklenmesi gibi uygulamalar geliştirilmiştir. Uzun açıklıkların geçilebilmesi için, kolonların sıklaştırılması da yapısal bir ihtiyaç olmuştur. Büyük taş bloklar, hem düşük çekme mukavemetleri hem de taşınmalarındaki zorluklar sebebiyle, büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılamamıştır. Bu nedenle, doğrusal yapı elemanları yerine kemer şeklindeki eğrisel yapı elemanlarının kullanılmaya başlanması, önemli bir yapısal ilerleme olmuştur. Kemerlerin geliştirilmesiyle, duvarlardaki büyük taşlardan ya da dayanımı zayıf ahşaptan yapılan lentolar yerini taş veya tuğla kemerlere bırakmıştır. Kemerlerde yalnızca basınç gerilmeleri meydana geleceğinden, kullanılan malzemenin çekme dayanımı da önemli değildir. Ayrıca, kemerlerin en kesit alanları da, genellikle, burkulma oluşmasını önleyebilecek boyutlardadır (Oliveira 2003).

Kemer formundaki ilk kâgir yapı elemanlarına, Mezopotamya’da ki M.Ö. 3000’li yıllardan kalma yer altı mezarlarında rastlanmıştır. Bu bölgedeki bir Sümer kenti olan Nuffar’da M.Ö. 2900-2700 yıllarından kalma, oval kemer şeklinde ve bir metreden az açıklıklı yer altı su kanalları bulunmuştur. Aynı dönemlerde, Mısırlıların da Sümerliler kadar kemer formunun sunduğu yapısal imkânların farkında olduğu belirlenmiştir. M.Ö. 2560-2420 yıllarında tuğlanın, M.Ö. 2372-2266 yıllarında ise kesme taş kullanımının

yapısal bir moda haline geldiği Mısır'da, M.Ö. 13. yüzyıldan kalma konsol ve kemer formunun birleşimi şeklinde bir kemer bulunmuştur. Bu bölgedeki taşlar, büyük açıklıkları geçebilmek için yeterli kalitede olmasına rağmen taş kemerler fazla dikkate alınmamış ve kemerlerin gelişmesinde önemli bir ilerleme olmamıştır (Swift 1951).

Yapısal kemer formu Mısır ve Mezopotamya'da bulunmuş olsa da esas gelişimi Roma döneminde olmuştur. Roma dönemindeki kemer kullanımının ilk örnekleri adak taşı kanallarının üzerindeki kemer geçitlerdir. Bu kanallar dünyanın en eski kanalizasyon sistemlerinden biri olan ve M.Ö. 27-M.S. 17 yılları arasında yapılan Cloaca Maxima'nın temellerini oluşturmaktadır (Şekil 1.2). Sonraki dönemlerde de Romalılar, kemer formunu geliştirerek birçok su kemeri ve köprüler yapmışlardır (Swift 1951).



Şekil 1.2. Cloaca Maxima'da yer alan kemer şeklinde bir kanal (İtalya)

1.1.2. Kâgir kemer köprülerin kısa tarihçesi

Kompleks bir yapı formuna sahip en eski taş kemer köprü, muhtemelen, M.Ö. 9. asırda yapılmış olan, İzmir'deki Melez Çayı üzerindeki tek açıklıklı köprüdür. Mezopotamya ve Mısır'da basit formlarda kemer köprüler yapılmış olsa da, Romalılar en önemli kemer köprü inşacıları olmuşlardır. Romalıların kemer köprü yapımına getirdikleri

yenililerden bazıları, puzolanı keşfedip yoğun biçimde kullanmaları ve yarım-daire şeklindeki kemer formunu mükemmele yakın şekilde geliştirip uygulamalarıdır. Puzolanı, kireç, su ve kumla karıştırarak, suyla teması halinde bozunmayacak bir harç elde etmişlerdir. Bu bağlayıcı, kemer köprülerin yapımında harç olarak kullanılmıştır (Özer 2006).

Romalıların yapmış olduğu, en etkileyici su kemerlerinden biri olan “Pont du Gard”, Şekil 1.3’de görülmektedir. Fransa’nın güneyinde yer alan ve M.Ö. 19 yılı civarlarında yapıldığı düşünülen bu kemer, yaklaşık 275 m uzunluğunda ve 49 m yüksekliğinde olup üç katlı olarak yapılmıştır. En alt katta 6, orta katta 11 ve en üst katta 35 tane kemer bulunan bu yapı, tamamen harç kullanılmadan inşa edilmiştir (Anonymous 2010a).



Şekil 1.3. Romalılar tarafından yapılan su kemeri Pont du Gard (Fransa)

Çin’de ise kemer formunun yapılarda kullanımı yaklaşık 5000 yıl öncesine dayanmaktadır (Ng 1999). Bununla birlikte, Çin’de ki en eski köprü M.S. 581-618 yılları arasında yapıldığı düşünülen Anji Köprüsü’dür (Şekil 1.4). Basık kemer formundaki bu tek açıklıklı köprü, 37.02 m uzunluğunda ve 7.23 m yüksekliğindedir (Anonymous 2010b).



Şekil 1.4. Anji Köprüsü (Çin)

Çin’de günümüzde de kâgir kemer köprüler yapılmaktadır. Örneğin, 2000 yılında tamamlanan Danhe Köprüsü (Şekil 1.5) 146 m açıklığa sahiptir ve dünyadaki en büyük açıklığa sahip, tek açıklıklı kâgir kemer köprüdür (Anonymous 2010c).



Şekil 1.5. Danhe Köprüsü (Çin)

Kemer köprü yapımındaki gelişmeler, 18. yüzyılın ortalarına kadar, sadece mimari zarafet kaygılarına bağlı uygulamalarla sınırlı kalmıştır. 18. yüzyılda ise, bu dönemin en

önemli mühendislerinden biri olan Perronet, kemer ayaklarının genişliğinin azaltıldığı, çok basık kemerler kullanarak, köprüler yapmıştır. 19. yüzyılda ise, özellikle demiryollarının gelişmesi nedeniyle kâgir köprülerin ve büyük viyadüklerin sayısı artmıştır. 20. yüzyılın başında tamamlanan Lüksemburg'daki, 84 m açıklıklı Adolphe Köprüsü'nün yapımcısı Sejourne, kâgir kemer köprüler tekniğinin yeni bir atılım yapmasını sağlamıştır. Kâgir köprülerin yapımı, yüksek maliyetleri nedeniyle 20. yüzyılın ortalarında terk edilmiştir (Begimgil 1997; Özer 2006).

Türkiye'de ise çeşitli boyut, tarz ve açıklıklarda inşa edilmiş çok sayıda kâgir kemer köprü bulunmaktadır. Hititler zamanından Osmanlı İmparatorluğu dönemine kadar 1266 tane köprü yapılmıştır (Bayraktar vd 2010). Cender Suyu Köprüsü (Şekil 1.6), Karamağara Köprüsü ve Justinianus Köprüsü, Türkiye'deki Roma döneminden kalan köprülerden bazılarıdır.



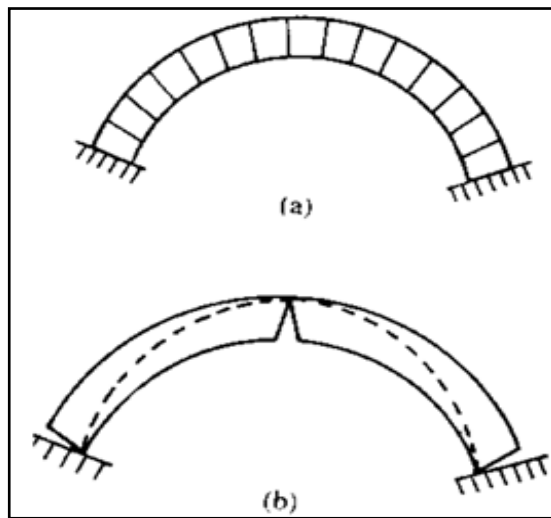
Şekil 1.6. Cender Suyu Köprüsü

Çoğunluğu sivri kemerli olan Selçuklu köprüleri ise, kesme taş işçiliğindeki incelikleriyle öne çıkmaktadır. Ancak yine de, köprü mimarisinin Türkiye'deki en güzel örnekleri, 16. yüzyılda inşa edilen, Mimar Sinan eserleridir (Ural vd 2007). Mimar Sinan'ın eserlerinin üzerine adını yazmaması birtakım karışıklıklara neden olsa da, mimari ve yapısal benzerlikler üzerinde yapılan çalışmalar, büyük ustanın 11 köprü inşa

ettiğini göstermektedir. Silivri Köprüsü dışında, bütün köprülerinde sivri kemeri tercih eden Sinan, ayak formları için ise suyun şiddetini dikkate alarak değişik uygulamalar yapmıştır (Toker ve Ünay 2004).

1.1.3. Kâgir kemer köprülerin yapımı ve köprüyü oluşturan kısımlar

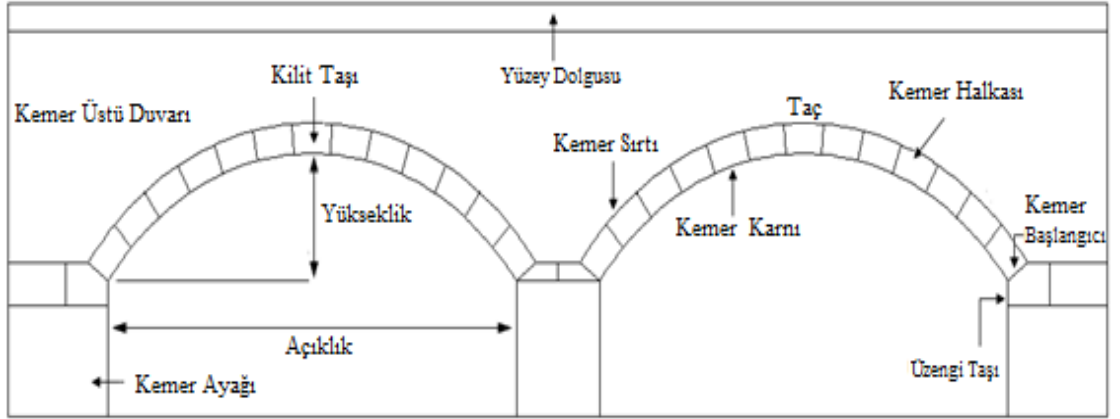
Kâgir kemer köprülerin yapımında, öncelikle kemerin oturacağı mesnetler yani kemer ayakları inşa edilir. Sonra, düz ya da kama şeklindeki biçimlendirilmiş kemer taşları, iskelenin üzerine, kemer ayaklarından itibaren her iki taraftan yerleştirilmeye başlanır. Taşların arasında harç kullanılabileceği gibi harçsız olarak da yerleştirilebilirler. Son taş olan kilit taşı yerine yerleştirilene kadar bu yapı ayakta durmadığı için, iskele geçici bir destek olarak kullanılır. Destek kaldırıldığında, kemer mesnetleri itmeye başlar. Mesnetler kaçınılmaz olarak bu itkiye biraz yol verir ve kemer bu hareketle beraber hafifçe yayılır ve açılır. Aşağıda bir kemerin mesnetlerinin izin vermesiyle, genişlemiş olan açıklığa yerleşmesi abartılı bir çizimle gösterilmiştir (Şekil 1.7). Kemer taşlarının, mukavemet gösteremeyen ara yüzeylerden ayrılmasıyla birlikte kemer çatlar ve üç mafsallı kemer formu oluşur. Bu üç mafsallı kemer çok iyi bir kararlılığa sahiptir. Bu şekilde kemer çevre şartlarına makul bir cevap vermiş olur (Dabanlı 2008; Heyman 1999b).



Şekil 1.7. Kemer davranışı a) yeni yapılmış kemer b) oturmuş 3 mafsallı kemer

Kemerin yapımı tamamlandıktan sonra, kemerin üst dolgu malzemesini muhafaza edecek olan kemer üstü duvarları inşa edilir. Bu duvarlarda, genelde büyük moloz taşlar kullanılmaktadır. Son olarak, genelde büyük boyutlu taşların kullanıldığı yol dolgu malzemesinin, kemer üst duvarları arasına yerleştirilmesiyle köprünün yapımı tamamlanmış olur (Özer 2006).

Kâgir kemer köprülerin muhtelif kısımlarına verilen isimler ise, Şekil 1.8’de gösterilen iki açıklıklı bir kemer üzerinde gösterilmiştir ve aşağıda basitçe açıklanmıştır.



Şekil 1.8. Kâgir kemer köprülerin muhtelif kısımları

- Üzengi taşı, kemer örmeye başlarken konan ilk taşıdır.
- Kemer karnı, kemer taşlarının kemer boşluğuna bakan yüzlerinin meydana getirdiği satıhtır.
- Kemer sırtı, kemer taşlarının dış yüzlerinin teşkil ettiği yüzeydir.
- Kemer açıklığı, kemerin üzengi noktaları arasındaki yatay açıklıktır.
- Kemer genişliği, kemerin duvar kalınlığına devam eden genişliktir.
- Kemer kalınlığı, kemer karnı ile kemer sırtı arasındaki mesafedir. Yani kemer taşlarının cepheden görünen kalınlığıdır.
- Kemerin yüksekliği, kemerin üst noktasının, yani taç kısmının, üzengi çizgisinden olan yüksekliğidir.
- Taç ya da takye, kemerin en yüksek noktasıdır.

- Kemer ayağı, kemerin üzerine oturduğu, yüklerin temele aktarılmasını sağlayan ve kemeri destekleyen kısımlardır
- Kilit taşı, taç kısma konan ve kemeri bağlayan son taştır (Güngör 1967; Anonymous 2010d).

1.1.4. Başlıca yapısal kemer şekilleri

Farklı şekillerde yapılabilen kemerler, kemer sırtı ya da kemer karnının eğrilğine bağlı olarak isimlendirilirler. Yaygın olarak karşılaşılan kemer formları, yarım daire (beşik) kemer, basık kemer, sivri kemer, düz kemer ve at nalı kemer olarak sıralanabilir. Kemerlerin yük taşıma kapasiteleri de biçimlerine bağlı olarak değişmektedir.

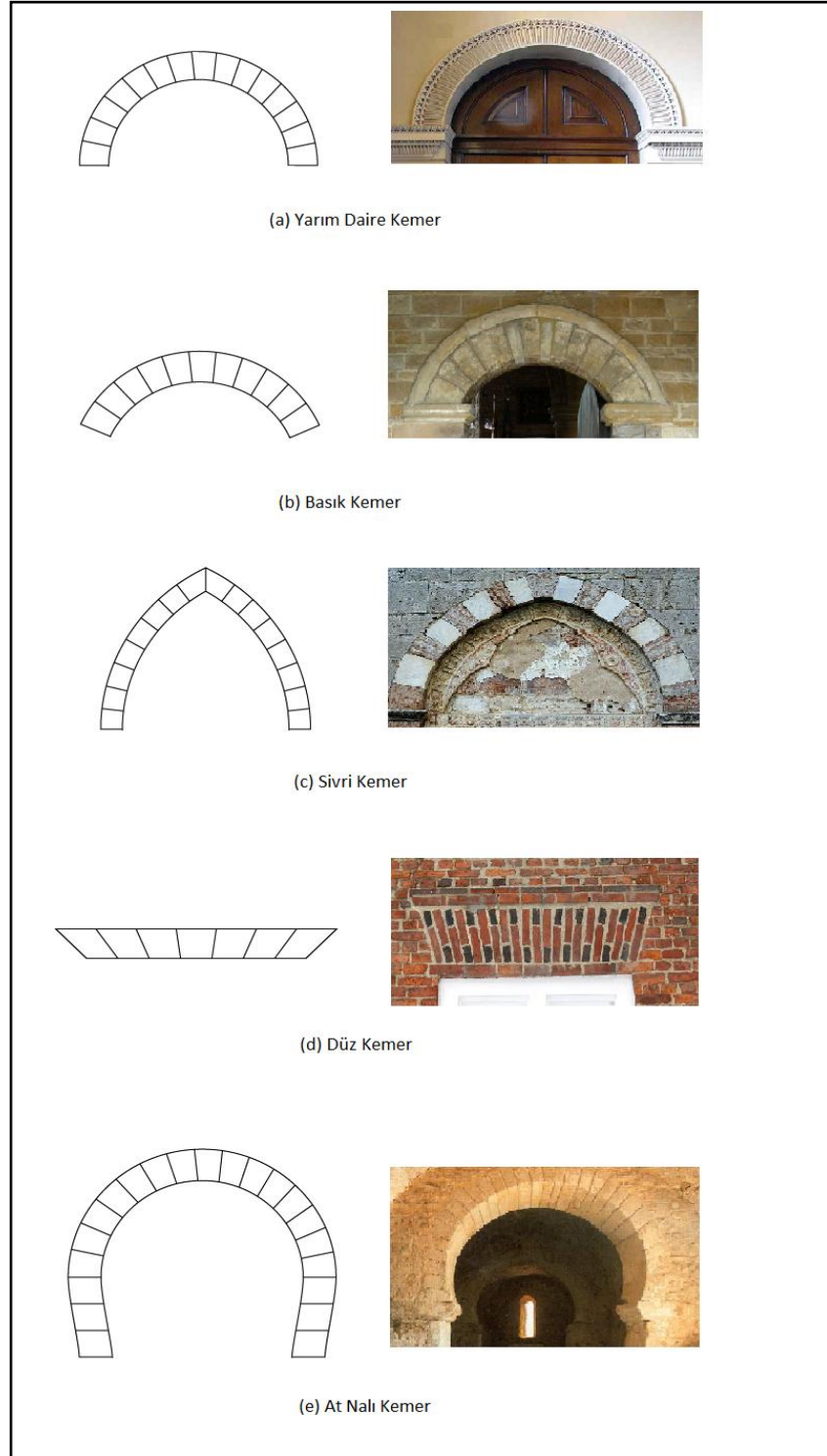
Yarım daire kemerler, çoğunlukla Romalılar tarafından tercih edilmiştir ve küçük duvar açıklıkları ve bina cephelerinden ziyade, yük taşıyıcı elemanlar olarak kullanılmışlardır (Şekil 1.9a).

Basık kemerler, tam yarım daire olmayan yani, yarım dairesel kemerlere nazaran daha az dairesel olan kemerlerdir. Yarım daire kemerlerden daha güçlü olmalarına rağmen, mesnetlere büyük baskı uyguladıklarından güçlü kemer ayaklarına ihtiyaç vardır (Şekil 1.9b).

Sivri kemerler, iki eğrinin, kemerin taç kısmında keskin bir açıyla birleşmesi ile oluşurlar. Açıklığa nazaran, sehimi çok olan sivri kemerlerin itme kuvvetleri düşeye yakındır ve bu nedenle taşıma güçleri yüksektir. Gotik kemer olarak da bilinen bu form Selçuklu döneminde de en fazla kullanılan kemer şeklidir (Şekil 1.9c).

Düz kemerlerde, kemerin alt kısmı düzdür fakat derzler bir merkez istikametindedir. Genellikle, açıklığı iki metreden az olan pencere ya da kapı boşluklarının üzerinde kullanılırlar. Dairesel kemerlerin aksine çatlak ve sehimlerin oluşması daha kolaydır (Şekil 1.9d).

At nalı kemerler ise, kemer eğrisinin, kemer ayaklarına doğru birbirine yaklaşacak şekilde dönmesiyle elde edilir (Şekil 1.9e) (Özer 2006; Kara 2009).



Şekil 1.9. Başlıca yapısal kemer şekilleri

1.1.5. Kâgir kemer köprülerin göçme nedenleri

Kâgir kemer köprülerin yıkılması farklı sebeplerden olabilmektedir. Literatürde, kâgir kemer köprülerin göçmesinin, beş farklı göçme şekli ile gerçekleşebileceği belirtilmiştir. Bu göçme şekilleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- **Mekanizma:** Bu göçme şekli, yapıda oluşan plastik mafsallar sonucunda meydana gelmektedir. Dış yüklerin etkisindeki sistemde, bloklarda ya da blok ara yüzeylerinde meydana gelen açılmalar sonucunda, bu noktalarda plastik mafsallar oluşacaktır. Bu mafsalların sayısı dörde ulaştığında, sistemin denge durumu bozulacak ve bir göçme mekanizması oluşacaktır. Kâgir kemer köprüler çoğunlukla bu şekilde göçmektedirler (Özer 2006).

- **Vurgu burkulması:** Bu durumda, sistemdeki plastik mafsalların oluşumu tamamlanmadan kemer geometrisinde hızlı bir değişim meydana gelir ve yükleme altında burkulma oluşur. Kemer, büyük bir eksenel basınç etkisi altındaki kabuk bir eleman gibi düşünülebilir (Özer 2006).

- **Kayma:** Bu duruma dolgu malzemesi kullanılmamış ve eksenel bir yük etkisi altındaki kemerlerde meydana gelen zımbalama göçmesi örnek verilebilir. Bu durumun iyi inşa edilmiş ve korunmuş köprülerde meydana gelmesi zordur ancak harcın yok olup blokların ayrıştığı durumlarda basınç etkisiyle oluşabilir. Bu şekilde göçmüş, bazı kemer köprülere rastlanmıştır (Özer 2006). Ayrıca, çok kalın kemerlerde de bu durum meydana gelebilmektedir (Foraboschi 2004).

- **Ezilme (basınç):** Kâgir kemerlerin bu şekilde göçmesi pek mümkün olmamakla birlikte, aşırı düz kemerlerde, düşük kalitede malzemenin kullanıldığı ve de simetrik olarak yüklenmiş kemerlerde bu duruma rastlanabilir (Foraboschi 2004). Ayrıca, basınç çizgisinin kemer ayaklarına daha dik bir yol izlediği kısa, tıknaz kemerlerde de meydana gelebilmektedir (Özer 2006).

▪ **Boyuna çatlak oluşumu:** Kemere uygulanan yükler genelde, kemer genişliğinin belirli bir bölümünden etkir. Yükün kemer genişliği boyunca etkimesi durumunda ise genişlik boyunca çataklalar meydana gelebilir. Ancak bu çatlakların kemerin göçmesine sebep olması çok nadirdir ve bu durum kemerlerin 2-boyutlu olarak modellenmesinin mümkün olabildiğini göstermektedir (Özer 2006).

1.2. Amaç ve Kapsam

Bilinen ilk örneği M.Ö. 9. yüzyıla dayanan ve 20. yüzyıla kadar yapımına yoğun biçimde devam edilen kâgir kemer köprülerin inşası, yüksek maliyetleri ile birlikte giderek gelişen inşaat teknoloji ve yeni yapı malzemelerinin tercih edilmesi nedeniyle günümüzde oldukça azalmıştır. Ancak, ülkemizde ve dünyada hala kullanılmaya devam edilen ve tarihi eser niteliğinde birçok kâgir kemer köprü mevcuttur. Bu köprülerin korunması ve uygun biçimde yenileme çalışmalarının yapılabilmesi, köprülerin kullanılabilirliğinin devamı ve kültürel mirasın korunması açısından oldukça önemlidir.

Gerekli koruma önlemlerinin alınabilmesi için ise öncelikle köprülerin yapısal analizinin, gerçek davranışlarına en uygun biçimde yapılması gerekmektedir. Ancak, bu yapıların analizinde karşılaşılan bazı temel sorunlar mevcuttur. Bu sorunlar aşağıda sıralanmıştır.

- Geometrik boyutlarla ilgili veri eksikliği,
- Oldukça büyük kesit boyutlarına sahip yapı elemanlarının dışarıdan görünmeyen iç bölümlerinin malzeme özellikleri,
- Yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesindeki güçlükler,
- Ayrıntılı laboratuvar analizlerinin yüksek maliyeti,
- Yapım tekniğinden ve doğal malzeme kullanımından kaynaklanan veri çeşitliliği,
- Yapım süresinin çok uzun olması nedeniyle aynı eleman kesiti içinde bile değişebilen malzeme özellikleri,
- Yapım sürecinin ve sırasının tam olarak bilinmemesi,

- Yapıdaki mevcut hasarın neden olduğu genel stabilitenin ve dayanım sürekliliğinin tam olarak saptanamaması,
- Çağdaş yapı malzemesi, yapısal analiz, tasarım ve yük şartnamelerinin uygulanamaması (Toker ve Ünay 2004).

Kâgir kemer köprülerin analizinde karşılaşılan bu problemler, araştırmacıları farklı analiz yöntemleri kullanmaya ve yeni yöntemler geliştirmeye zorlamıştır.

Bu çalışmada da, öncelikle yapısal kemer formunun davranışını belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar ve günümüzde kâgir kemer köprülerin analizi için kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Sonra, tek açıklıklı kâgir kemer köprülerin göçme yükünün, rijit-blok analiz metoduyla hesaplanması amacıyla bir algoritma geliştirilmiştir. MATLAB dilinde kodlanan ve “KEMER” adı verilen bu programın özellikleri ve bu programla yapılan bazı uygulamalar bu çalışma dâhilinde sunulmuştur. Son olarak, kemer kalınlığı, kemer yüksekliği, kemerdeki blok sayısı ve bloklar arasındaki sürtünme katsayısının, tek açıklıklı kâgir kemer köprülerin göçme yükü üzerindeki etkisi, RING 2.0 programı ile yapılan analizlerle araştırılmıştır.

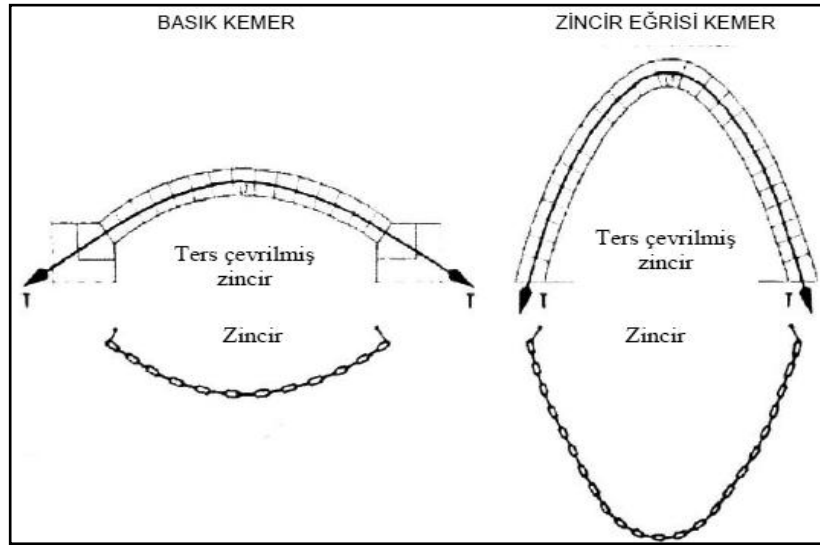
2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, kâgir kemer köprülerin yapısal davranışını anlamaya yönelik olarak yapılan ilk çalışmalar ve günümüzde bu yapıların analizinde kullanılan yöntemler anlatılacaktır. Ayrıca, kâgir kemer köprülerin daha iyi modellenenebilmesi ve mevcut analiz yöntemlerine yeni yaklaşımlar getirmek ve yeni yöntemler geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan çıkarılan sonuçlara yer verilecektir.

2.1. Kâgir Kemer Köprüler Üzerine Yapılan İlk Çalışmalar

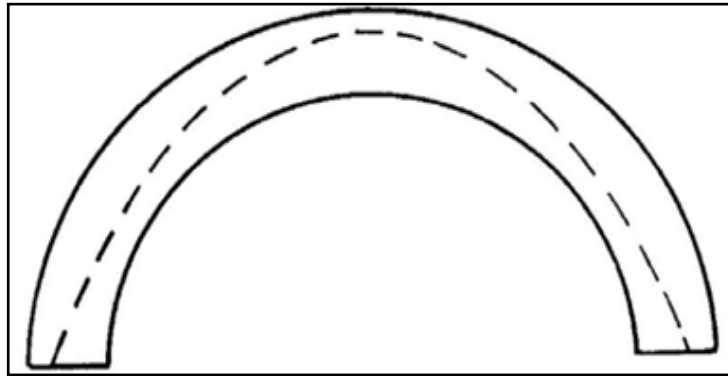
Kâgir kemerler üzerine ilk bilimsel çalışmalar Robert Hooke (1635-1703) tarafından yapılmıştır (Ng 1999). Asılı bir zincirle, bir kemerin dengesinin benzer problemler olduğu düşüncesinden hareketle, asılmış bir zincirin çevrilmesiyle rijit bir kemer oluşacağını belirtmiştir. Zincirde oluşan çekme gerilmelerine karşın, kemerde basınç gerilmeleri oluşacak, ancak iç kuvvetlerin mutlak değerleri aynı olacaktır (Huerta 2005).

Bu düşünceler ile geometrik olarak doğru kemer şeklini elde etmek üzere yaygın olarak zincir eğrisine başvurulmuştur. İki ucundan tutularak serbest bırakılan zincir, kendi ağırlığı altında bütün kesitlerde çekme oluşacak şekilde bir geometri kazanır. Bu şeklin ters çevrilmiş halinde inşa edilecek olan kemerde hiç çekme gerilmesi görülmeyecektir. Böylece tamamen basınca çalışan bir kemer elde edilmiş olur (Şekil 2.1) (Dabanlı 2008).



Şekil 2.1. Zincir eğrisi ve zincirin döndürülmesiyle elde edilen kemerler

Birkaç yıl sonra İngiliz matematikçi Gregory (1697), zincir eğrisinin gerçek kemer formu olduğunu ve bir kemerin ayakta kalabilmesinin, kemer kalınlığının bir zincir eğrisini ihtiva etmesiyle mümkün olacağını söylemiştir (Şekil 2.2) (Huerta 2005).



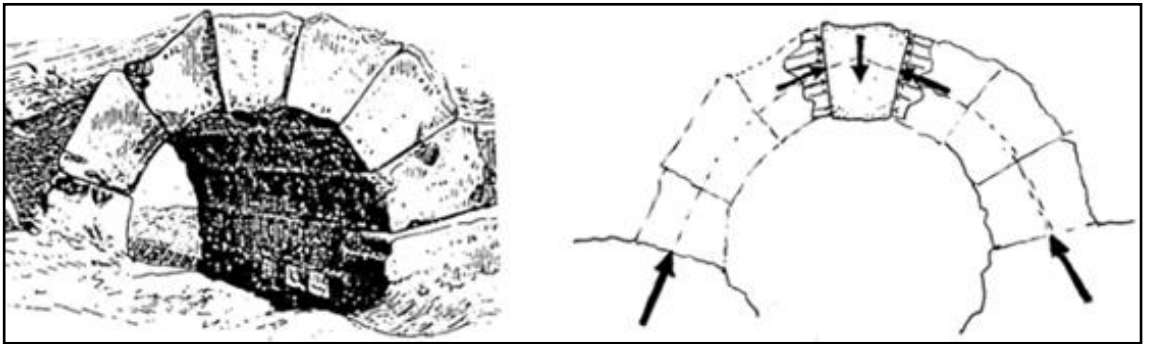
Şekil 2.2. Kemerin alt ve üst sınırları arasında kalan bir zincir eğrisi

Hooke ve Gregory'nin bu görüşlerini gerçek bir yapının analizinde kullanan ilk kişi Poleni (1748) olmuştur. Roma'daki St. Peter kilisesinin kubbesini inceleyen Poleni, bu yöntemle kubbenin güvenli olduğu sonucuna varmıştır (Block 2005). Asılı zincir modelleri taş kemerlerin davranışını belirlemek için 18. yüzyılın sonuna kadar kullanılmıştır (Huerta 2005).

1729 yılında Couplet taş kemerlerin göçme mekanizmasını ve basınç çizgisi kavramlarını ortaya koyan ilk kişi olmuştur (Ng 1999). Basınç çizgisi, kemerin içinde basınç kuvvetlerinin bileşkesinin kemer boyunca izlediği yolu temsil eden teorik bir çizgidir (Block 2005). Kâgir kemerlerin analizinde kullanılan önemli parametrelerden biri olan basınç çizgisi kavramının ve basınç çizgisiyle ilgili bir kural olan üçte-bir kuralının detaylı olarak açıklanması faydalı olacaktır.

2.1.1. Basınç çizgisi

Şekil 2.3'deki taş kemerin kilit taşının denge durumu düşünülürse, her derzde belirli bir gerilme dağılımı olacaktır. Bu gerilmelerin bileşkesi bir basınç kuvveti olacaktır ve bu iki derzdeki basınç kuvveti kilit taşını dengede tutacaktır. Kemer başlangıcına kadar her bir taş için aynı denge durumu geçerlidir. Burada ise kemer ayakları, kendilerine etkileyen basınç kuvvetine mukavemet göstermelidirler ve bu nedenle yeterli boyutlarda olmaları gerekir. Bu basınç kuvvetlerinin etkiye noktalarının birleştirilmesiyle oluşan yörünge basınç çizgisidir. Bu çizginin formu kemerin geometrisine, uygulanan yüklere ve derz yüzeylerine bağlıdır. Bu kavram ilk olarak 1835 yılında Moseley tarafından formüle edilmiştir (Huerta 2001).



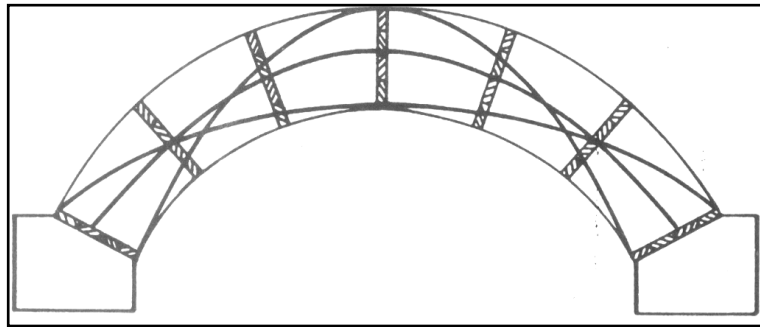
Şekil 2.3. Bir taş kemerdeki basınç çizgisi

Kemerler gibi tamamen basınca çalışan bir yapının dengede olabilmesi için basınç çizgisinin kemer kesitinin içinde kalması gereklidir (Block 2005). Basınç çizgisinin

geometrisi, belirli bir yükleme durumu için bu yükleri taşıyabilecek ideal kemerin gerçek şeklidir. Şekil 2.2’de görülen yarım daire şeklindeki kemer dikkate alınır, kemer kalınlığı sonsuz sayıda zincir eğrisi (ya da basınç çizgisi) içerebilir (Özer 2006).

Kemerin içinde kalan her bir basınç çizgisi muhtemel çözüm olabilir. Fakat bu çözüm, mutlak sonuç değildir. Kemer hiperstatik olduğundan denge denklemleri iç kuvvetlerin hesaplanmasında yeterli değildir. Doğru çözümü elde etmek için gerçek basınç çizgisi belirlenmelidir. Buna yönelik ilk çalışmaları yine Moseley (1843) yapmıştır ve gerçek basınç kuvvetinin minimum olan olması gerektiğini söylemiştir (Huerta 2001).

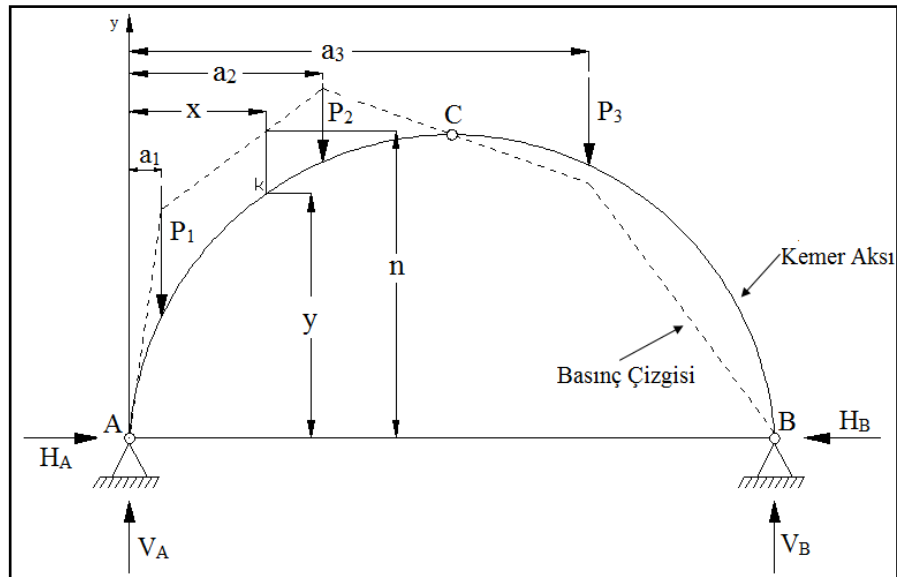
1846 yılında ise W.H. Barlow, basınç çizgisinin yerini belirlemek amacıyla 6 adet kesme taştan oluşmuş bir kemer modellemiştir. Taşların arasına ise 4 parçadan oluşan ve elle yerlerinden çıkarılabilen küçük ahşap parçalar yerleştirmiştir (Şekil 2.4). Dört parçadan oluşan ahşap elemanların üç tanesi kaldırılmış, böylece, kuvvetler yalnızca kalan parça tarafından iletileceğinden, basınç çizgisi ortaya çıkmıştır. Farklı konumlarda ortaya çıkan basınç çizgileri Barlow tarafından çizilmiştir. Kemerin taç kısmında, kemer sırtına değen en dik eğri Barlow tarafından “direnme çizgisi”, aynı kısımda kemer karnına değen en basık eğri ise “baskı çizgisi” olarak adlandırılmıştır. Bu iki çizginin, ayaklara iletilen basınç kuvvetinin yatay bileşeninin, asgari ve azami sınırlarını ifade ettiği, bunların da kemerin mesnetleri olan kemer ayaklarında, sırasıyla ayrılma ve yaklaşma şeklindeki küçük yer değiştirmelere tekabül ettiği belirtilmiştir (Heyman 1999a).



Şekil 2.4. Barlow tarafından modellenen kemer ve basınç çizgileri

Villarceau (1853) ise yaptığı çalışmalar sonucunda basınç çizgisinin kemerin orta çizgisiyle çakışması gerektiğini öne sürmüştür. Başka bir muhtemel yöntem ise plastik mafsalların oluşmasıyla kemerin izostatik hale gelmesi ve denge denklemleriyle basınç çizgisinin pozisyonunun belirlenmesidir (Huerta 2001).

Bu son yöntemin uygulanışı, Şekil 2.5’de görülen üç mafsallı ve yalnızca düşey yüklere maruz bir kemer için açıklanmıştır.



Şekil 2.5. Üç mafsallı kemerde basınç çizgisi

A, B ve C noktalarında plastik mafsalların oluştuğu kemerin basınç çizgisinin, kemer aksının k noktasındaki ordinatı hesaplanmak istenmektedir. Bunun için öncelikle mesnet tepkileri hesaplanmalıdır. Sonra k noktasının solunda kalan bütün kuvvetlerin dengesinden aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$M_k = V_A \cdot (x) - H_A \cdot (n) - P_1 \cdot (x - a_1) = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$n = \frac{V_A \cdot (x) - P_1 \cdot (x - a_1)}{H_A} \dots\dots\dots (2.2)$$

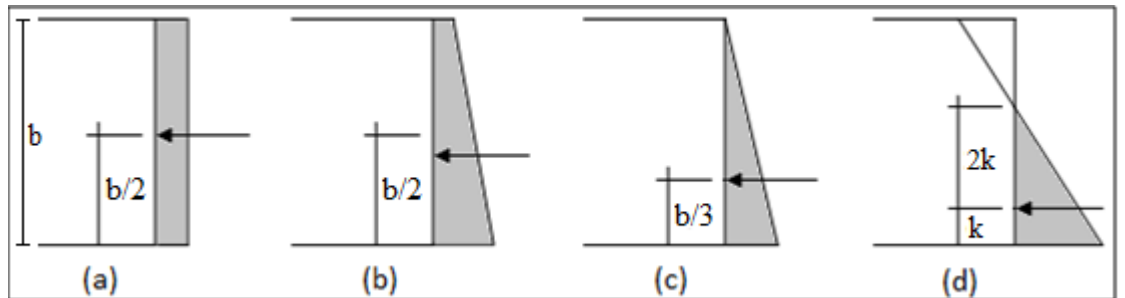
Burada y , kemer aksının ordinatı ve n ise, bulunmak istenen basınç çizgisinin k noktasındaki ordinatıdır (Atımtay 1989).

2.1.2. Üçte-bir kuralı

“Kemerdeki blokların arasında çekme gerilmelerinin oluşmaması için basınç çizgisi, kesit yüksekliğinin orta kısmında kalan üçte-bir bölgesi içerisinde kalmalıdır” şeklinde özetlenebilecek olan üçte-bir kuralı aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Basınç çizgisi kemerin içinde simetrik olarak yerleşmeyecektir. Bazı noktalarda kesitin ortasından geçerken bazı yerlerde de kesitin kenarlarına yaklaşacaktır. Eğer gerilme dağılımının doğrusal olduğu kabul edilirse, kesitin tepkisi de basınç kuvvetinin pozisyonuna göre önemli ölçüde değişecektir (Özer 2006). Kesitte ne tür gerilmeler oluşacağını ortaya koyan bu kural, “üçte-bir kuralı” olarak adlandırılmıştır.

Normal kuvvetin etkiye noktası yani basınç çizgisini geçtiği yer, kesitteki moment ifadesinin normal kuvvet değerine bölünmesiyle yani, normal kuvvetin dışmerkezliğinin hesaplanmasıyla belirlenebilir (Bjurström and Lasell 2009).



Şekil 2.6. Farklı yükleme durumları için kesitin tepkisi

Şekil 2.6’da gösterilen b uzunluğundaki kesitin dört farklı yüklü durumu için tepkileri aşağıdaki gibi açıklanabilir.

- a)** Normal kuvvet $b/2$ noktasından etkirse $\sigma_{\text{maks.}}$ ve $\sigma_{\text{min.}}$ birbirine eşittir ve tüm kesit basınç etkisindedir.
- b)** Normal kuvvet $b/2$ ve $b/3$ aralığında ise kesit yine tamamen basınç etkisi altındadır ancak $\sigma_{\text{maks.}}$ ve $\sigma_{\text{min.}}$ birbirine eşit değildir.
- c)** Normal kuvvet $b/3$ noktasından etkirse kesit tamamen basınç etkisindedir ve $\sigma_{\text{min.}}$ sıfırdır.
- d)** Normal kuvvet $(0 < k < b/3)$ aralığındaki k mesafesinde etkirse, kesitte çekme gerilmeleri meydana gelir. Bununla birlikte, kesit uzunluğunun $(3 \times k)$ ’lık bölümü basınç etkisindedir.

Taşların çekme dayanımı olmadığı kabulünden dolayı, normal kuvvet, kesitin başlangıcı ile $1/3$ ’ü arasındaki bölgeden etkirse malzemede çatlaklar oluşabileceği düşünülebilir (Özer 2006). Ancak, oluşacak gerilmelerin genelde küçük olması ve yapılan kabulün aksine taşların belirli bir çekme dayanımı olması dikkate alınır, bu yöntemin aşırı koruyucu olduğu görülmüştür. Bu nedenle analizlerde genellikle, normal kuvvetin etkiye bölgesini, en kesit sınırları olarak belirleyen yani basınç çizgisinin kemer sınırları dışına çıkmaması şartını getiren yaklaşım tercih edilmektedir (Bjurström and Lasell 2009).

2.2. Kâgir Kemer Köprülerin Analizinde Kullanılan Yöntemler

2.2.1. Mexe metodu

Mexe (Military Engineering Experimental Establishment) metodu, II. Dünya Savaşı süresince, kemer köprülerin tankların geçişi için uygunluğunu belirlemek amacıyla İngiltere’de geliştirilmeye başlanmıştır (Thavalingam *et al.* 2001). Pippard’ın,

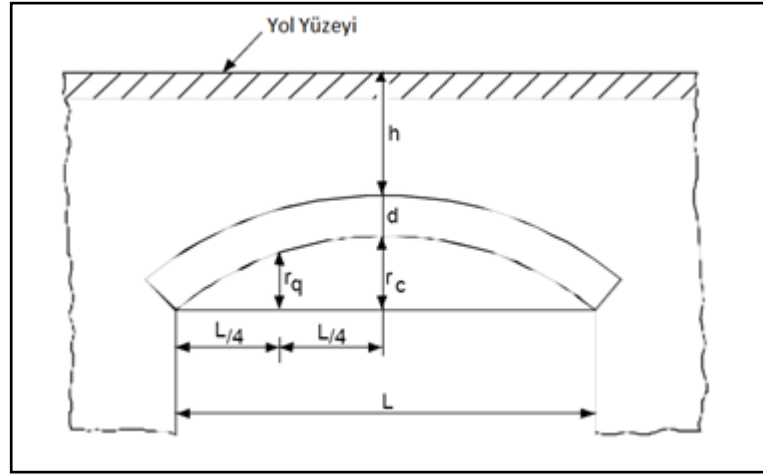
kemerlerin elastik analizi teorilerine ve yapılan bir dizi deneysel çalışmaya dayanmaktadır (Ng 1999).

Bu metodun geliştirilmesinde yapılan temel kabuller aşağıda verilmiştir.

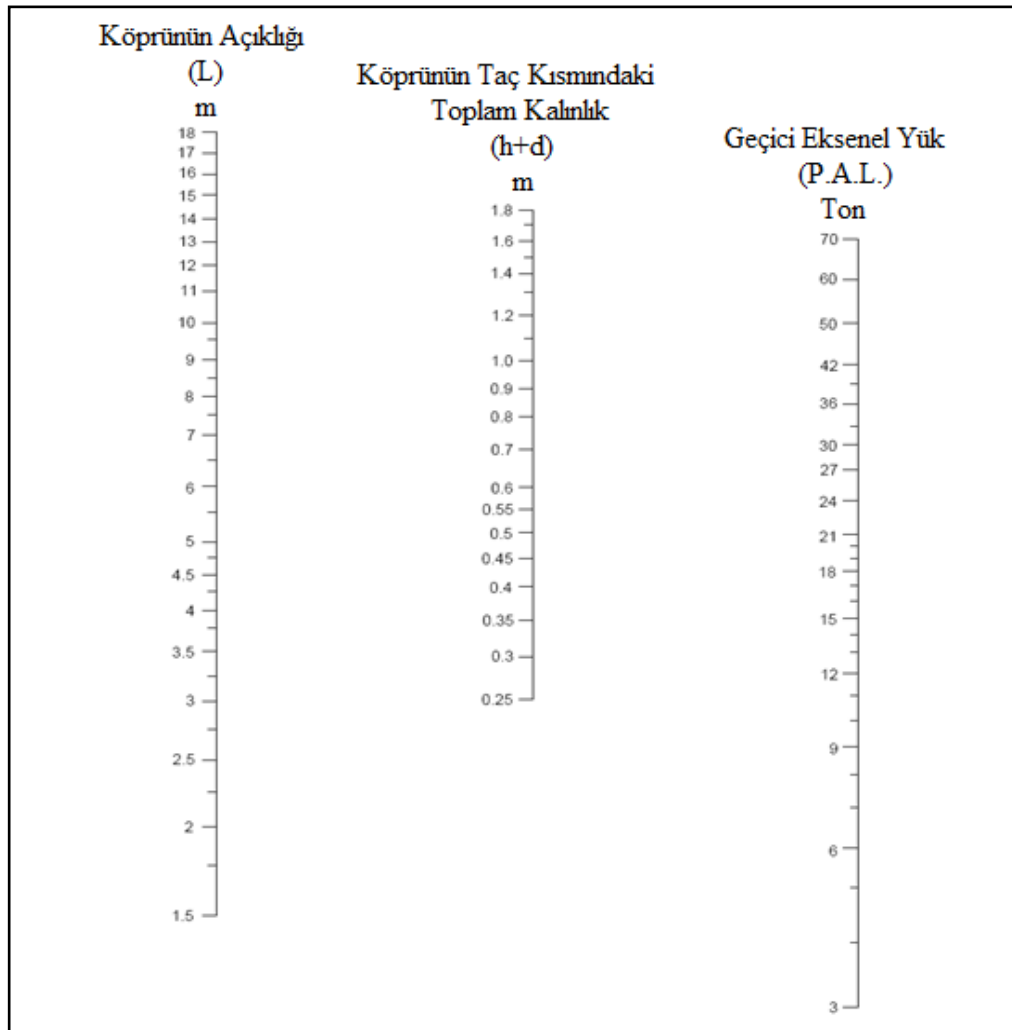
- Kemer paraboliktir.
- Kemer, her iki uçtan kemer ayaklarına mafsallanmıştır.
- Kemerin açıklık/yükseklik oranı dörttür.
- Kemer taç kısmından genişliği boyunca çizgisel olarak yüklenmiştir.
- Kemerde kullanılan malzemenin birim hacim ağırlığı 21.97 kN/m^3 'dür.
- Kemerde meydana gelebilecek en büyük basınç ve çekme gerilmeleri sırasıyla, 1.4 MPa ve 0.7 MPa 'dır (Ng 1999; Anonymous 2001).

Yapılan kabuller doğrultusunda bir nomogram geliştirilmiştir. Bu nomogram yardımıyla kemer için geçici bir göçme yükü değeri belirlenmektedir. Sonra bu değer, kemerin geometrisine, fiziki durumuna ve kullanılan malzemenin özelliklerine bağlı olarak belirlenmiş katsayılarla çarpılarak modifiye edilmekte ve istenilen göçme yükü değeri elde edilmektedir (Ng 1999). Bu yöntemle açıklığı en fazla 18 m olan ve taç kısmının kalınlığı ile buranın üzerindeki dolgunun kalınlığının toplamı 0.25-1.8 m arasında olan köprülerin göçme yükü değerleri hesaplanabilmektedir.

Bu yöntemde dikkate alınan kemer geometrisi Şekil 2.7'de ve kullanılan nomogram ise Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Mexe metodunda dikkate alınan kemer geometrisi



Şekil 2.8. Mexe metodunda kullanılan nomogram

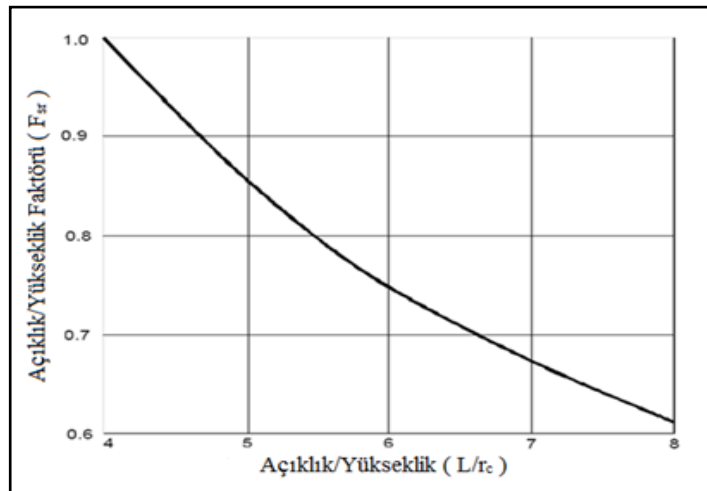
Şekil 2.8’de gösterilen nomogramda, kemerin açıklığı (L) ve kemerin kalınlığı ile taç kısmının üzerindeki dolgu yüksekliğinin toplamı ($h+d$) kullanılarak nihai olmayan göçme yükü değeri hesaplanır. Geçici göçme yükünün (PAL) hesabında kullanılan formül aşağıda verilmiştir.

$$PAL = \frac{740 \cdot (d + h)^2}{L^{1.3}} (\text{ton}) \dots\dots\dots (2.3)$$

Bulunan geçici göçme yükü değeri aşağıda açıklanan faktörlere bağlı olarak modifiye edilir (Anonymous 2001).

2.2.1.a. Açıklık/yükseklik faktörü (F_{sr})

Düz kemerler, daha dik kemerlere nazaran çok güçlü olmadığından göçme yükü hesabında bir düzeltme yapılmalıdır. Açıklık/yükseklik oranının 4 ya da daha düşük olduğu durumların ideal dayanımı sağlayacağı düşünülmüş ve bu durumlarda katsayı 1 olarak kabul edilmiştir. Açıklık/yükseklik oranının dörtten büyük olduğu durumlarda ise Şekil 2.9’da verilen katsayılar kullanılmalıdır (Anonymous 2001).



Şekil 2.9. Açıklık/yükseklik faktörü

2.2.1.b. Profil faktörü (F_p)

Elipitik kemerler, benzer açıklık/yükseklik oranına ve kalınlığa sahip dairesel ve parabolik kemerler kadar güçlü değildirler. Bu nedenle ideal kemer formu parabolik ve kemerin çeyrek açıklığındaki yüksekliğinin (r_q), taç kısmındaki yüksekliğe (r_c) oranı $r_q / r_c = 0.75$ olarak kabul edilmiştir. Profil katsayısı F_p , r_q / r_c oranının 0.75 ya da daha az olması durumunda 1 olarak alınırken, 0.75'den büyük olması halinde aşağıdaki formülle hesaplanır (Anonymous 2001).

$$F_p = 2.3 \left[\frac{r_c - r_q}{r_c} \right]^{0.6} \dots\dots\dots (2.4)$$

2.2.1.c. Malzeme faktörü (F_m)

Malzeme faktörünün hesaplanmasında, Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de sırasıyla verilen kemerde ve dolguda kullanılan malzemeye göre belirlenmiş katsayılar kullanılır.

Çizelge 2.1. Kemer malzemesi faktörü (F_b)

Kemer Gövdesinde Kullanılan Malzeme	Gövde Malzemesi Faktörü (F_b)
Rastgele ya da düzenli kullanılmış granit ve <i>whinstone</i> ile kireçtaşı haricinde ki büyük boyutlu, sıralı kullanılmış taş veya tuğla	1.5
Kesme taş olarak kullanılabilen silisli kumtaşı	1.4
Beton veya çifte pişmiş tuğla ve benzer boyutlu, kireçtaşı hariç, taş veya tuğla	1.2
İyi durumdaki, rastgele ya da düzenli kullanılmış kireçtaşı, kesme taş olarak kullanılabilen kalkerli kumtaşı, iyi durumdaki taş, tuğla ve yapı tuğlası	1.0
Kötü durumdaki her çeşit tuğla ve taş	0.7

Çizelge 2.2. Dolgu malzemesi faktörü (F_f)

Dolgu	Dolgu Faktörü (F_f)
Beton	1.0
Kil muhteva etmeyen, harç haline getirilmiş materyaller	0.9
İyi sıkıştırılmış malzemeler	0.7
Zayıf malzemeler	0.5

Bu çizelgelerden alınan katsayılar kullanılarak malzeme faktörü aşağıdaki formülle hesaplanır (Anonymous 2001).

$$F_m = \frac{(F_b.d) + (F_f.h)}{d + h} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.2.1.d. Derz faktörü (F_j)

Derzlerin boyutu ve durumu, kemerlerin dayanımı ve kararlılığı üzerinde oldukça etkilidir. Kemerlerin çoğunluğunda harç olarak kireç kullanılmıştır. Bu malzeme, çimentodan daha yumuşak ve daha az dayanımlıdır ancak iyi bir yük dağılımı ve kemerin hareket ve oturmalarında esneklik sağlar. Derz faktörü, sırasıyla Çizelge 2.3, Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5’de gösterilen, derzin genişliğine, kullanılan harç malzemesine ve derzin derinliğine bağlı olarak belirlenen katsayılar kullanılarak aşağıdaki formülden hesaplanır (Anonymous 2001).

$$F_j = F_w + F_{mo} + F_d \dots\dots\dots (2.6)$$

Çizelge 2.3. Derz genişliği faktörü (F_w)

Derz Genişliği	Genişlik Faktörü (F_w)
Genişliği 6 mm'ye kadar olan derzler	1.0
Genişliği 6 mm ile 12.5 mm arasında olan derzler	0.9
Genişliği 12.5 mm'nin üzerinde olan derzler	0.8

Çizelge 2.4. Harç faktörü (F_{mo})

Derz Durumu	Harç Faktörü (F_{mo})
İyi durumdaki harç	1.0
Gevşek veya ufalanabilen harç	0.9

Çizelge 2.5. Derz derinliği faktörü (F_d)

Derzin Yapısı	Derinlik Faktörü (F_d)
Kenardan itibaren 12.5 mm'ye kadar yetersiz doldurulmuş derzler	0.9
12.5 mm'den gövde kalınlığının onda birine kadar yetersiz doldurulmuş derzler	0.8
Gövde kalınlığının onda birinden daha fazla mesafede yetersiz doldurulmuş derzler	Mühendisin takdirinde

2.2.1.e. Durum faktörü (F_c)

Yapıda yapılan gözlemler sonucunda, kemerin genel durumu dikkate alınarak, yapıdaki biçim değiştirmelere ve çatlaklara bağlı olarak mühendis tarafından değerine karar verilen 0.3-1.0 arasında alınması gereken katsayıdır (Anonymous 2001).

Nomogramdan elde edilen geçici göçme yükü yukarıda açıklanan katsayılarla çarpılarak nihai göçme yükü belirlenir. Büyük ölçekli testler, Mexe metoduyla belirlenen göçme yükü değerlerinin, özellikle 12 m'den büyük açıklılara sahip köprülerde, test sonuçlarının oldukça altında çıktığını göstermiştir. Bununla birlikte, bu yöntemde

mühendisin kararına bırakılan faktörler bulunmakta ve kemerin göçme şekli dikkate alınmamaktadır. Ayrıca, kemerdeki yer değiştirmeler ve gerilmeler hakkında da bilgi edinilmemesine rağmen, kolay ve çabuk kullanımı nedeniyle Mexe metodu yaygın biçimde kullanılmaktadır (Özer 2006; Anonymous 2001).

2.2.2. Elastik analiz yöntemi

Poncelet (1852), kâgir kemer köprülerin analizlerinde, elastik analizin kullanılabileceği fikrini öneren ilk kişi olmuştur. Fakat taş, heterojen ve anizotropik bir malzeme olduğundan, homojen ve izotropik olarak kabul edilmesine, başlangıçta mühendisler karşı çıkmışlardır. Buna rağmen Saavedra (1860) ve Castigliano (1879) elastik analizi kemer köprüler üzerinde kullanmışlardır (Huerta 2001).

Taş kemer analizlerinde elastik yaklaşımı derinlemesine inceleyen ilk kişi ise Winkler (1879) olmuştur. Farklı analiz yöntemlerini karşılaştırmış ve en iyi seçeneğin elastik analiz olduğunu söylemiştir. 19. asrın sonunda, malzeme her ne kadar düzensiz, anizotrop ve süreksiz olsa da, mühendisler arasında elastik analizin taş kemerler için en iyi yöntem olduğu fikri yaygınlaşmıştır (Huerta 2001).

Elastik analiz üzerine çalışan ve 1936-1938 tarihleri arasında model kemerler üzerinde bir dizi deney yapan Pippard, belirli yüklemeler altında taş kemerlerin elastik davranış gösterdiği sonucuna varmıştır. Ayrıca kemer köprülerin göçmesinin, taşlardaki çatlakların sonucu olarak oluşan plastik mafsallar nedeniyle olduğunu ispatlamıştır. Şekil değiştirme enerjisi metoduyla, kemer halkasını homojen doğrusal-elastik malzeme olarak kabul ederek, kemerin göçme yükünü hesaplayacak bazı denklemleri türetmiştir. Analizlerini yaparken iki farklı durumu dikkate almıştır. Birincisinde, üçte-bir kuralına uygun olarak kemerde hiç çekme gerilmesi oluşmayacak şekilde göçme yükü değerlerini belirlemiştir. İkincisinde ise, kemerde bir miktar çekme gerilmesine izin verecek şekilde, basınç çizgisini, kemer gövdesiyle sınırlandırarak göçme yükünü hesaplamış ve bu durumun kullanımının da güvenilir olduğunu belirtmiştir (Ng 1999).

Göçme yükü analizini, kemerin açıklığına, yüksekliğine, kalınlığına, taç kısmın üzerindeki dolgu derinliğine ve yük şekline bağlı olarak bulan Pippard, dolgunun kemer üzerindeki yanal etkisini dikkate almamıştır (Ng 1999).

Elastik analiz yöntemi, kemer ayaklarında meydana gelecek küçük açılmaların, bu ayaklara mafsallanmış olan kemer gövdesindeki taşların arasında üç tane plastik mafsall oluşturacağı ve bunlarında kemeri izostatik hale getireceği varsayımına dayanmaktadır. Hesaplamalar, iki taraftan mafsallanmış eksen ve yükün taç kısmının üzerinde etkideği parabolik kemer kabulleriyle yapılır. Virtüel iş yöntemiyle kemer ayaklarındaki, yatay basınç kuvveti, eğilme momenti ve şekil değiştirme enerjisi hesaplanır ve bunlar yardımıyla yapının göçmesine neden olacak yük belirlenir (Hughes and Blackler 1997).

Yapılan kabullerden en tartışmalı olanı, kemerin taç kısmından yapılan yüklemedir. Çünkü genel kabule göre kemerin en zayıf olduğu durum bu yükleme durumu değildir. Bununla birlikte taş, harç ve dolgu malzemesi bu metodun yaptığı kabulün aksine elastik davranış göstermeyecektir. Ayrıca kullanılan taşların çekme mukavemetleri yok kabul edilebilecek kadar küçüktür ve bu nedenle, aşırı yükleme durumunda çatlaklar oluşacaktır ki, malzeme davranışı doğrusal-elastik olarak kabul edildiğinden bu durum dikkate alınmamıştır (Özer 2006).

2.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemini, kemer köprülerin analizinde ilk kullananlar Towler, Sawko ve Rouf (1981-1985) olmuştur. Liverpool Üniversitesi'nde, büyük ölçekli model kemerler üzerinde göçme analizleri yapmış ve sonuçları, kendi sonlu elemanlar programlarının doğruluğunu teyit etmekte kullanmışlardır. Malzemenin doğrusal olmayan davranış göstereceği kabul edilmiş ve kemerin üzerindeki dolgu analize dâhil edilmemiş, sadece düşey yükler olarak kemere etki ettirilmiştir. Model kemerlerde buna uygun olarak dolgu olmadan yapılmış böylece hesaplamada dikkate alınmayan dolgunun, kemer üzerindeki yanal rijitleştirici etkisi modellerde de oluşmamıştır.

Göçme yükü değerlerinde ve yük-deplasman eğrilerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir (Ng 1999).

Bu yöntemde, kemere uygulanan yükler sonucu her bir parçada meydana gelen tepkiler belirlenir. Bu değerler, gerilme bölgelerinin ve biçim değiştirmelerin belirlenmesinde kullanılır. Gerilmeler çekme bölgelerinin, biçim değiştirmeler de vurgu burkulması şeklindeki göçmeye neden olabilecek geometri değişimlerinin bulunmasında kullanılır. Yük değerleri ve uygulama noktaları değiştirilerek analizler tekrarlanır. Bu şekilde yapılan tekrarlı ve artırımlı çözüm yöntemi günümüzde oldukça yaygın olan sonlu elemanlar analizi yazılımlarıyla yapılabilir (Özer 2006).

Bu yöntemde kemerler bir boyutlu, iki boyutlu ya da üç boyutlu olarak modellenebilir ancak göçme mekanizması ve büyük yer değiştirmeler ile çatlak oluşumlarının simülasyonu kolay değildir. Hassas ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek, oldukça detaylı bir modellemeyle mümkün olabilir. Fakat bu amaçla kullanılacak parametreler kemer köprüler için oldukça belirsizdir. Çoğunluğu yüzyıllar önce yapılan kemer köprülerde kullanılan taş, harç ve dolgu malzemesinin, yoğunluk, basınç ve çekme dayanımı, kayma mukavemeti açısı, elastisite modülü gibi birçok mekanik özelliği homojen değildir ve ölçülmesi çok zordur. Bunun yanında, çok açıklıklı kemerlerde bitişik kemerlerin birbirleri üzerindeki etkisinin bulunması ve matematik modellenmesi çok güçtür. Ayrıca kemerdeki, taşlarla-harç ve kemerle-dolgu malzemesi arasındaki ilişkide diğer bir kesin olmayan olgudur. Kemerin dayanımı üzerinde oldukça etkili olan bu değişkenlerin belirlenmesi çok zordur (Özer 2006).

Sonlu elemanlar yöntemi ancak malzeme özelliklerinin çok iyi olarak bilindiği durumlarda uygun bir yük-şekil değiştirme modeli oluşturabildiğinden, kemer köprülerin analizinde bu yöntem kullanılacaksa, gerekli malzeme testleri yapılmalıdır. Başka bir ifadeyle, malzeme özellikleri çok iyi bilinen köprüler sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilebilirler (Ng *et al.* 1999).

2.2.4. Ayırık elemanlar yöntemi

Ayrık elemanlar metodu, ilk olarak Cundall (1971) tarafından, eklemeli kaya kütleleri üzerine yapılan çalışmalar için ortaya konmuştur. Sonraki dönemlerde, detaylı derz araştırmaları gerektiren mühendislik alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem ayrıca kâgir yapı analizlerinde kullanılmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir (Oliveira 2003).

Bu yöntemde yapı, münferit blokların yani ayırık elemanların birleşimi şeklinde düşünülür. Elemanların her biri, birbirinden bağımsız şekilde hareket edebilir ya da deforme olabilir. Blokların birbirine temasıyla kuvvetler bloktan bloğa aktarılırken, gerilme ve biçim değişimleri oluşacaktır. Yüklerden dolayı meydana gelecek yer değiştirmelerin belirlenmesinde kullanılan birçok farklı yöntem vardır. Bu farklı yöntemler kullanılarak, ayırık elemanlar metodu için çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir. Bunların en yaygın olanları, UDEC ve DDA yazılımlarıdır (Toth *et al.* 2009).

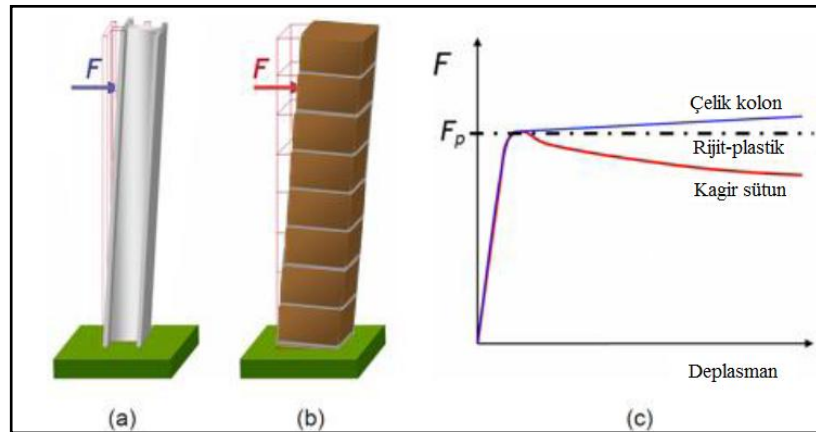
Ayrık elemanlar yöntemi yazılımları genel olarak eklemeli kaya kütleleri, taş yapılar vb. süreksizlikler içeren ortamların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarını modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Süreksiz olan ortam birbirinden ayrı bloklar ile modellenmekte, ancak bloklar, aralarındaki süreksizliklerin mekanik özellikleri dolayısıyla birbirleri ile etkileşim içinde olmaktadır. Bu yazılımlardan biri olan UDEC her bir bloğu sonlu farklar ağı ile modelleyebilmekte dolayısıyla blokların kendi içyapılarında meydana gelen biçim değiştirmeleri de belirleyebilmektedir. UDEC, bloklardan oluşan sistemlerde büyük çaplı hareketlerin ve bunlara bağlı biçim değiştirmelerin hesaplanabilmesi için uygun olan Lagrange Yaklaşımı'nı kullanmaktadır. Ayırık elemanlar modellerinin en önemli dezavantajı ise yöntemin üç boyutlu bir yapının tamamına uygulanmasındaki güçlülüktür. Böyle bir uygulama ciddi bir hacimde geometrik veri girişi ve hesaplama gerektirecektir (Kanit ve Işık 2006).

2.2.5. Limit analiz yöntemleri

Limit analizde amaç, yapının taşıyabileceği en büyük (limit) yük değerinin belirlenmesidir. Bu yöntemde kullanılan plastik davranış kabulüne göre, malzeme sünek davranış göstermelidir. Yapının limit yük değeri ise, göçme anında hesaplanan yük değeri olacaktır (Oliveira 2003).

Kemer köprüler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, kemerlerin davranışının sünek olarak kabul edilebileceğini göstermiştir. Böylece, çoğunlukla çelik yapıların analizinde kullanılan bu yöntemin, kemer köprüler gibi kâgir yapılarda da, belirli kabuller doğrultusunda kullanılabileceğini ilk belirtenler Kooharian (1952) ve Heyman (1966) olmuştur (Gilbert 2007).

Limit analiz teorisinin, neden kâgir kemer köprülerin analizinde kullanımının uygun olduğu, Şekil 2.10'da gösterilen çelik kolon ve blokların zayıf bir şekilde birbirine bağlandığı kâgir sütunun, yatay yüklemeye karşı tepkilerine bağlı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.10. Yatay yüke maruz (a) çelik kolon, (b) kâgir sütun ve (c) idealleştirilmiş tepki eğrileri

- Çelik kolonun çekme ve basınç dayanımları, kolona belirli bir plastik moment kapasitesi (M_p) sağlarken, kâgir sütunun çekme dayanımı olmadığından, çelik kolonla karşılaştırılabilecek bir moment kapasitesi yoktur.
- Bununla birlikte, kâgir sütunun kalınlığı ve kendi ağırlığı, devrilmeye karşı bir dayanım göstereceğinden, sütunun, yüksekliğine bağlı olarak değişen bir moment kapasitesine sahip olduğu kavramsal olarak düşünülebilir (moment kapasitesi, belirli bir en-kesitteki normal kuvvetin, sütun kalınlığının yarısıyla çarpımına eşittir) .
- Ayrıca, kâgir sütunda büyük yer değiştirmeler meydana gelmemekte ve belirli bir en-kesitteki devrilmeye karşı gösterilen direnç sabit kalmaktadır.

Bu nedenlerle, kâgir sütunun tepkisinin, sünek davranış gösterdiği düşünülebilir. Bu da limit analiz teorisinin kullanılabilirliğinin önemli bir göstergesidir (Anonymous 2009b).

Limit analiz teorisine göre, sağlanması gereken üç temel şart aşağıda verilmiştir.

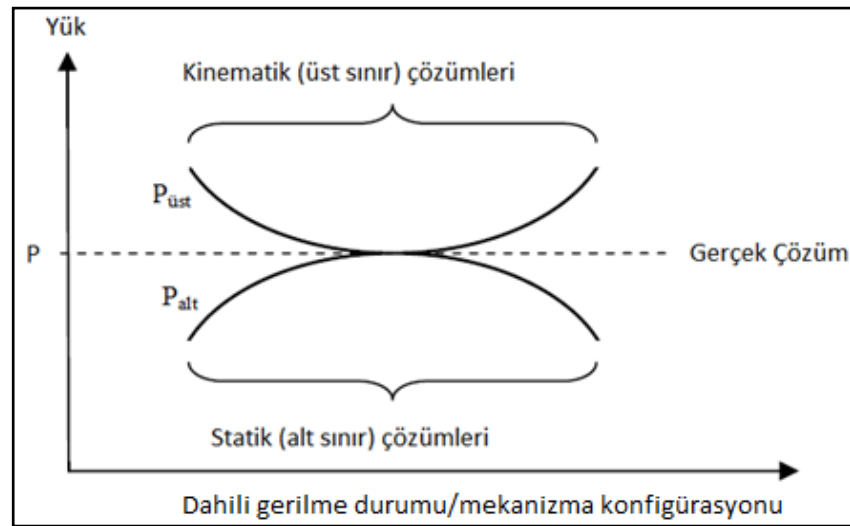
- **Denge Şartı:** İç ve dış kuvvetler arasında bir denge durumu olmalıdır.
- **Mekanizma Şartı:** Yapıda bir göçme mekanizması oluşturacak, yeterli sayıda plastik mafsallı oluşmalıdır.
- **Akma Şartı:** Malzemede oluşan gerilmeler, her noktada malzeme dayanımına eşit ya da daha küçük olmalıdır. Yani, malzemenin kesme, çekme ve ezilme dayanımları aşılmamalıdır (Gilbert 2007).

Limit analizin, bu temel şartların sağlanmasına bağlı olan üç temel teoremi vardır;

- **Alt-Sınır Teoremi (Statik Teorem):** Bu teoreme göre, statik denge kriteri ve akma kriterini sağlayacak şekilde hesaplanan göçme yükü değeri, yapının gerçek göçme yüküne eşit ya da bu yükten daha küçük olacaktır. Yapıdaki, olası bütün akma şartlarına bağlı olarak hesaplanan göçme yüklerinden en büyüğü yapının göçme yükü olarak kabul edilir.

- **Üst-Sınır Teoremi (Kinematik Teorem):** Bu teoreme göre, denge kriteri ve mekanizma kriterlerini sağlayan göçme yükü değeri, gerçek göçme yüküne eşit ya da bu yükten daha büyüktür. Yapının, muhtemel bütün göçme mekanizmalarından hesaplanan göçme yüklerinden en küçüğü, yapının göçme yükü değeri olarak kabul edilir. Her bir göçme yükü, belirli bir göçme mekanizması için dış yüklerin yaptığı virtüel işin, iç kuvvetlerin yaptığı virtüel işe eşit olması kabulünden hesaplanır. Bu yöntem “Mekanizma Metodu” olarak da adlandırılmaktadır.
- **Teklik Teoremi:** Hem statik teorem hem de kinematik teoremin şartlarının sağlandığı durumlarda hesaplanan göçme yükü, yapının gerçek göçme yükü değeri olacaktır. Yani denge, akma ve mekanizma şartlarının hepsinin sağlanması durumunda, yapının gerçek göçme yükü hesaplanmış olacaktır (Wong 2009).

Üst-sınır ve alt-sınır çözümleri arasındaki ilişki Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Alt-sınır ve üst-sınır çözümleri arasındaki ilişki

Limit analizin temelini oluşturan, denge, akma ve mekanizma şartları, kâgir kemerlerin bu yöntemle analiz edilmesinde de geçerlidir. Ancak, kâgir kemerlerin belirli bir plastik

moment kapasitesi olmadığından, bu şartların kontrolü basınç çizgisi kullanılarak yapılabilmektedir (Anonymous 2009b).

Bu üç şartın kâgir kemerler için basınç çizgisi kullanılarak nasıl sağlanabileceği Özer (2006) tarafından aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

- Denge şartının sağlanması için, gerçek basınç çizgisinin yeri belirlenebilmelidir.
- Akma şartı ise basınç çizgisini tamamen yapı sınırlarının, yani kemer kalınlığının, içinde kalmasıyla sağlanacaktır.
- Son olarak, mekanizma şartının sağlanması için, yapının göçmesi bir “mekanizma göçmesi” şeklinde olmalıdır. Yani yapı, basınç çizgisinin kemer karnı ve kemer sırtına temas ettiği yeterli sayıda ki noktalarda oluşan plastik mafsallar nedeniyle göçmelidir.

Alt-sınır teoremi için denge ve akma şartlarının sağlanması yeterliyken, mekanizma metodu için denge ve mekanizma şartları sağlanmalıdır (Gilbert 2007).

2.2.5.a. Kâgir kemer köprülerin mekanizma metodu ile analizi

Limit analizin, alt-sınır teoremi ve üst-sınır teoremi olmak üzere iki temel teoremi vardır. “Kinematik Metot” ya da “Mekanizma Metodu” olarak da adlandırılan yöntem ise üst-sınır teoreminin bir uygulamasıdır. Bu metot, yapıda plastik mafsalların oluşmasıyla sistemi göçmeye götürecek bir mekanizmanın oluşmasına ve virtüel iş metoduyla, bu durumdan göçme yükünün hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu şekilde bulunacak göçme yükü değerleri, gerçek göçme yüküne eşit ya da daha üstünde bir değer olacaktır. Bu nedenle, öncelikle bütün muhtemel göçme mekanizmaları ortaya konmalı, sonra her bir mekanizma için göçme yükleri hesaplanmalı ve bunlardan en küçüğü göçme yükü değeri olarak kabul edilmelidir (Wong 2009).

Mekanizma metodunun, kâgir kemer köprülerin analizinde kullanılması Jacques Heyman'ın 1966-1996 yıllarında yaptığı çalışmalara dayanmaktadır (Ng 1999). Metodun uygulanmasında Heyman'ın yaptığı başlıca kabuller aşağıda verilmiştir.

- Taşların çekme dayanımı yoktur.
- Taşların basınç dayanımları sonsuzdur.
- Kemer taşları arasında, kayma meydana gelmemektedir.

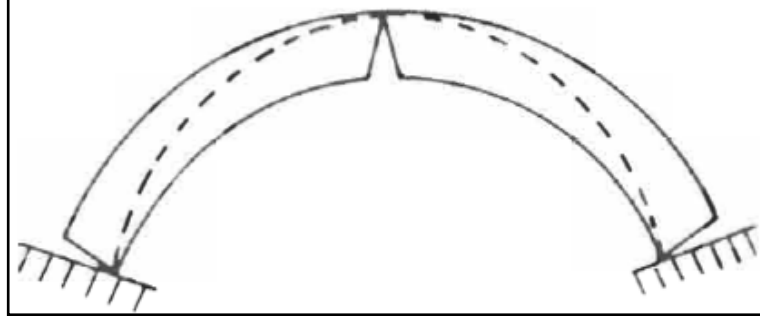
Heyman (1999b), birinci kabulün, taşların belirli bir çekme dayanımı olduğundan, oldukça ihtiyatlı durduğunu ancak taşların arasındaki harcın zayıflığı dikkate alındığında, bu kabulün çokta yersiz olmadığını söylemiştir.

İkinci kabulün ise, ortalama gerilmeler söz konusu olduğunda yaklaşık olarak doğru olduğunu belirten Heyman (1999b), taşlardaki çatlama ve yüzey döküntülerinin basınç gerilmelerindeki artışın kanıtı olacağını söylemiş ancak bu tehlikeli durumun bölgesel bir olay olduğunu ve yapının tamamının çökmesine neden olmayacağını ifade etmiştir.

Üçüncü kabul için ise, Heyman (1999b), bazen münferit kaymaların gözlemlendiğini fakat genelde, yapının önemli ölçüde şeklini koruduğunu ve taşlar üzerindeki çok küçük basınç gerilmelerinin, kayma ve kohezyon kaybı riskini ortadan kaldırdığını söylemiştir.

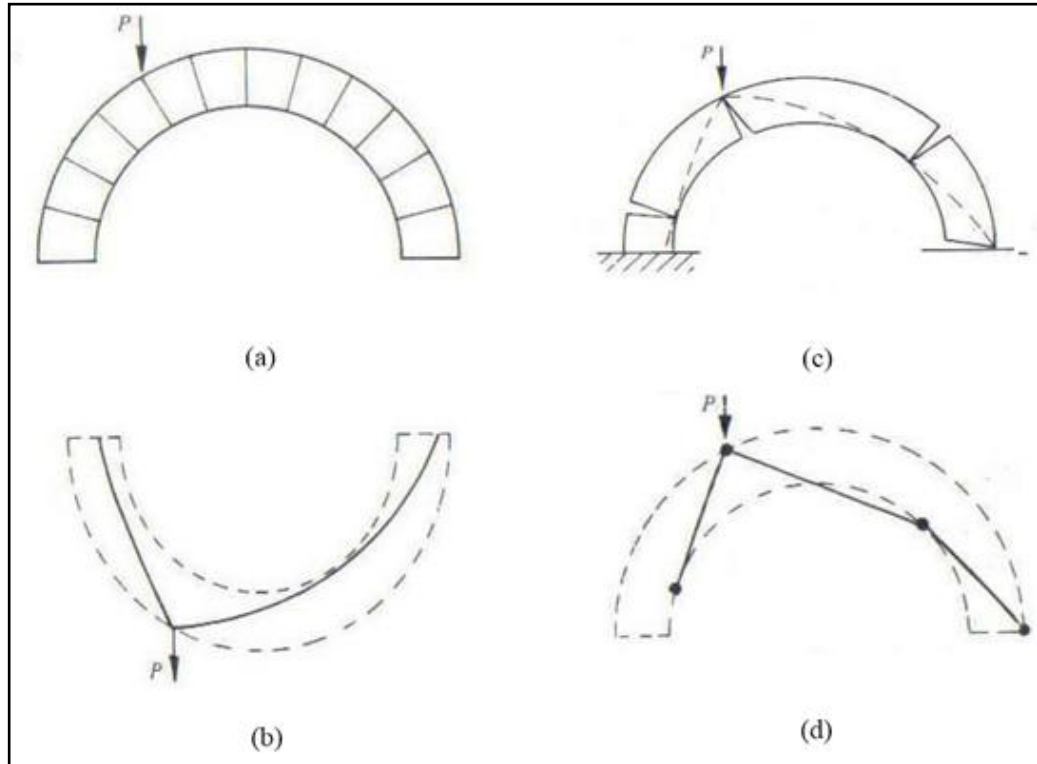
Yapılan bu kabullere bağlı olarak, kemer taşlarında kayma olmayacaktır ve taşlarda biçim değiştirme meydana gelmeyecektir. Fakat taşlar, kemer karnı ya da kemer sırtındaki bağlantı noktalarının etrafında, plastik mafsallar varmış gibi dönebilirler. Bu nedenle kemer geometrisinde değişimler olacaktır. Bu şekilde çatlakların oluşması kaçınılmazdır ve bu durum göçme başlangıcının işaretidir. Şekil 2.12'de, mesnetlerde ve taç kısmında birer plastik mafsallın olduğu kemerin denge durumu gösterilmiştir. Kemerde oluşan üç tane mafsallı yapıyı izostatik hale getirmiştir ve iç kuvvetler, denge denklemleriyle bulunarak basınç çizgisinin yeri belirlenmiştir. Kemerin taç kısmı dikkate alınırsa, basınç çizgisinin, kuvvetlerin iletilebileceği tek nokta olarak kalan,

kemer sırtından geçtiği görülebilir. Benzer şekilde mesnetlerdeki mafsal noktalarında, basınç çizgisi kemer karnından geçmektedir (Heyman 1999b).



Şekil 2.12. Üç tane plastik mafsal oluşan kemerde denge durumu

Kemerde dört ya da beş tane plastik mafsalın oluşması durumda ise yapının göçmesine neden olabilecek bir göçme mekanizma oluşacaktır (Ng 1999). “Mekanizma” adı verilen bu göçme şekli, Şekil 2.13’e bağlı olarak açıklanmıştır.

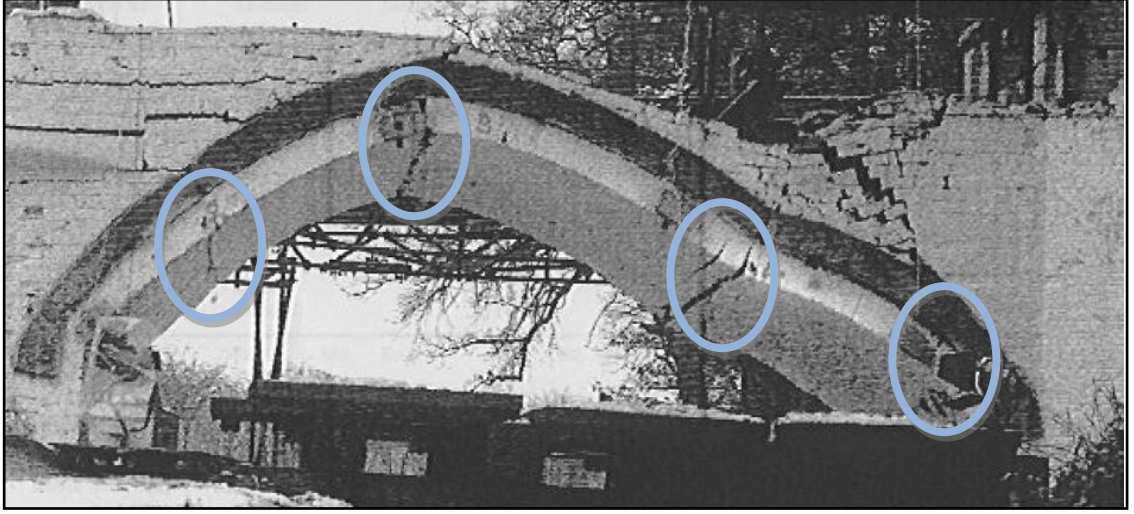


Şekil 2.13. Noktasal bir yük etkisindeki daireSEL kemerin çökme mekanizması

Kendi ağırlığına ilaveten noktasal bir yük uygulanmış dairesel kemer Şekil 2.13a'da gösterilmiştir. Hooke'un asılı zincir teoremi kemere uygulandığında, Şekil 2.13b'de görülen deforme olmuş zincir eğrisi şekli elde edilecektir. Uygulanan P yükü arttırıldıkça, ters çevrilmiş zincirin, yani basınç çizgisinin, kemerin içine rahatça yerleşmesi giderek zorlaşacaktır ve P yükünün belirli bir değerinde kemer sınırlarına ulaşacaktır. Şekil 2.13c'de gösterilen bu limit durumda, basınç çizgisi, kemer karnında ya da kemer sırtında, toplam dört noktada kesit sınırlarına değecektir. Basınç çizgisinin geçtiği bu dört noktanın her birinde plastik mafsallar oluşacak (Şekil 2.13d) ve bu mafsallar bir göçme mekanizması meydana getireceklerdir. Gerçekte, kemerin göçmesi, basınç çizgisinin kemerin sınırları içerisinde kalmasının mümkün olmadığı anda gerçekleşecektir (Heyman 1999b).

Aslında mafsallar, muhtemelen kemerin en zayıf bölümünde yani derzlerde oluşacaktır. Ancak, limit analizde kemer homojen ve tek parça olarak kabul edildiğinden, kemer karnı ya da kemer sırtındaki herhangi bir noktada mafsal oluşabilir. Yani malzemenin dayanımı mafsal oluşma ihtimalini etkilemeyecektir (Özer 2006).

Gerçek bir kemerde oluşan plastik mafsallar Şekil 2.14'de görülmektedir. İngiltere'de ki tek açıklıklı Prestwood Köprüsü, gerçek bir kemerin davranışının incelenmesi amacıyla TRL (British Transport Research Laboratory) tarafından desteklenen bir testle yıkılmıştır. 6550 mm açıklığındaki kemere, çeyrek açıklıkta 30 cm genişliğinde giderek artan bir yük uygulanmıştır. Kemerin göçmesine neden olan mafsal oluşumları açıkça görülebilmektedir (Cavicci and Gambarotta 2004).



Şekil 2.14. Prestwood Köprüsü'nün göçme mekanizması

Mekanizm metodu ile kemerlerin göçme yükünün belirlenmesinde, öncelikle, verilen yükleme durumu için muhtemel mafsallık noktaları belirlenmelidir. İzostatik hale gelen sistemde mesnet tepkileri, iç kuvvetler ve sisteme etkiyen P yükü hesaplanır. Bilinmeyenlerin elde edilmesiyle gerçek basınç çizgisinin yeri çizilebilir. Basınç çizgisi, kemerin herhangi bir noktasında kemer sınırlarının dışına çıkıyorsa yanlış mafsallık noktaları seçilmiş demektir. Bulunan yük değeri dikkate alınmaz farklı mesnet noktaları için çözüm tekrarlanır. Basınç çizgisinin kemer sınırları içinde kaldığı her bir farklı mesnet noktaları için yapılan çözümlerden elde edilen P değerlerinden en küçüğü kemerin göçme yükü olarak kabul edilir (Özer 2006).

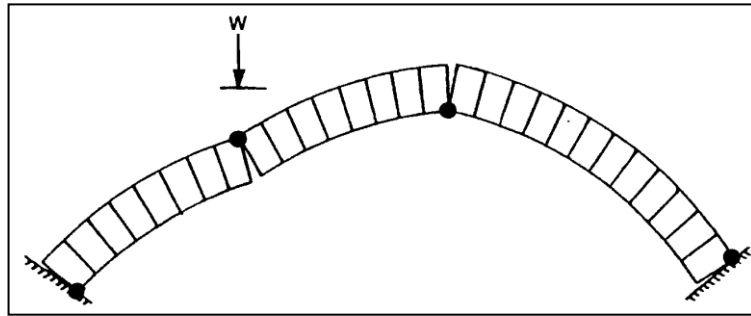
Mekanizma metodu, kâgir kemerlerin analizi için güçlü bir yöntem olsa da, bazı önemli kısıtlamaları ve eksikleri vardır;

- Kemerde meydana gelecek yer değiştirmeler belirlenemez.
- Kemer yekpare kabul edildiğinden, çok-kemerli köprülerde oluşabilecek, kemerler arasındaki kayma ve açılmalar dikkate alınamayacaktır.
- Kemerin göçmesi, mafsalların oluşumuna bağlıdır. Kemerde gerçekleşebilecek diğer göçme şekilleri belirlenemez (Özer 2006).

2.2.6. Rijit-blok analiz yöntemi

Bu yöntem, rijit bloklardan oluştuğu kabulü yapılan bir kemerin, limit analizin iki temel teoremi olan mekanizma teoremi veya statik teorem kullanılarak, doğrusal programlama yardımıyla analizinin yapılmasıdır. Kâgir kemerler için rijit-blok analiz denklemlerini ortaya koyan ilk kişi Livesley (1978) olmuştur. Livesley, geliştirdiği rijit-blok analizinde statik teoremi kullanırken, Gilbert ve Melbourne (1994) mekanizma metodu temelli bir rijit-blok analiz uygulaması geliştirmişlerdir (Oliveira 2003; Gilbert and Melbourne 1994).

Gilbert ve Melbourne (1994) tarafından geliştirilen rijit-blok analiz metodu Şekil 2.15'e bağlı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.15. Rijit bloklardan oluşan kemerin göçme mekanizması

Şekil 2.15'de gösterilen göçme durumundaki, tek açıklıklı ve rijit-bloklardan oluşmuş kemer için, mekanizma yaklaşımının aşağıda verilen geleneksel kabulleri yapılmıştır.

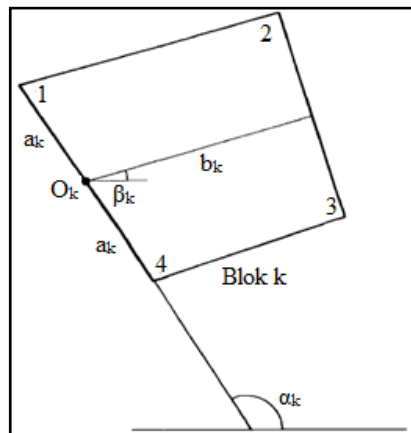
- a)** Bloklar arasındaki kaymadan dolayı göçme meydana gelmeyecektir.
- b)** Kemer taşlarının çekme dayanımı yoktur.
- c)** Kemer taşlarının basınç dayanımı sonsuzdur.
- d)** Taşlarda meydana gelecek gerilmeler çok küçük olduğundan, kemer geometrisinin bütününe meydana gelecek değişimler ihmal edilebilir.
- e)** Bloklar, başlangıçta, birbirleriyle mükemmel şekilde uyumludurlar.

Yapılan bu kabuller doğrultusunda, kemerin göçmesi ancak yeterli sayıda plastik mafsalın oluşmasıyla gerçekleşebilir. Dış yükün (W) uygulama noktasındaki birim düşey yer değiştirme dikkate alınır, w_j ağırlığındaki belirli bir j bloğu, δv_j düşey deplasmanını yapacaktır. Virtüel iş prensibi kullanılırsa, yapılan işin denklemi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\sum_{j=1}^n w_j \cdot \delta v_j + W = 0 \dots\dots\dots (2.7)$$

Yukarıdaki eşitlikte öncelikli olarak $\delta v_1, \delta v_2, \dots, \delta v_n$ değişkenleri için, kinematik olarak uygun çözüm setleri bulunmalıdır. Bunun için deforme olmuş (virtüel olarak) kemerin hareketlerinden elde edilen geometrik kısıtlayıcılar kullanılmaktadır. Bu şekilde bulunan uygun çözüm setlerinin, virtüel iş denkleminde yerine konmasıyla bulunacak olan W değerleri, gerçek göçme yükünün üst sınırı olacaktır, dolayısıyla bu değerlerin en küçüğü (W_{min}), kemerin göçme yükü olarak kabul edilir. Bu değerin bulunmasında doğrusal programlama teknikleri kullanılabilmektedir (Gilbert and Melbourne 1994).

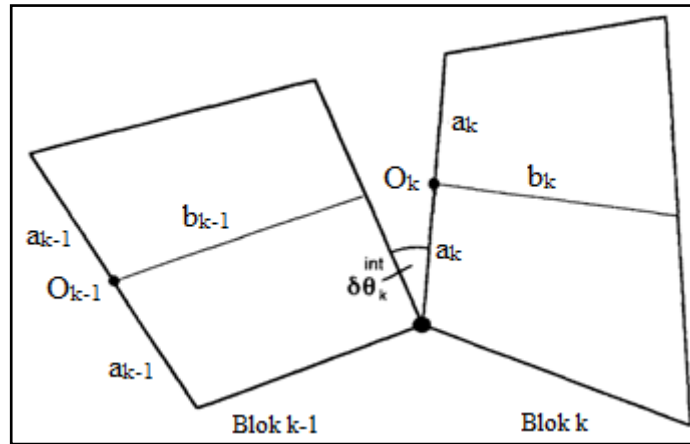
Analizde kullanılacak geometrik kısıtlayıcıların elde edilmesi Şekil 2.16'ya bağlı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.16. Yer değiştirmemiş bloğun geometrisi

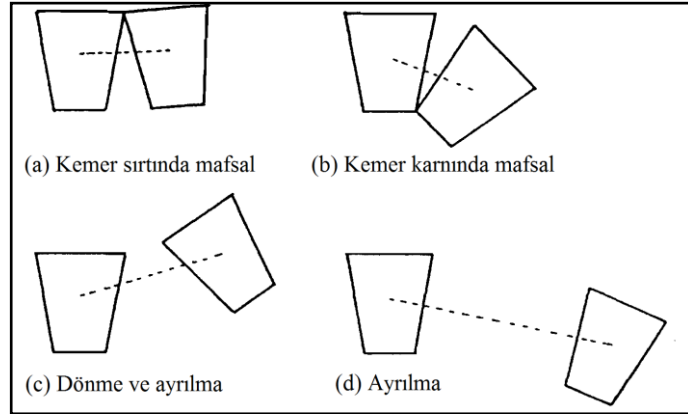
Bitişik iki bloğun başlangıçtaki, deforme olmamış, Şekil 2.16’da gösterilen geometrileri dikkate alınsın. Ara yüzeylerdeki çizgilerin orta noktaları, her bir bloğun lokal merkezi olarak tanımlanabilir. Polar koordinatlar kullanılırsa, O_k ’nın O_{k-1} ’e göre bağıl konumu $[b_k, \beta_k]$ olarak tanımlanabilir. Benzer şekilde, bloğun ağırlık merkezi k , O_k ’ya bağlı olarak $[c_k, \Gamma_k]$ şeklinde tanımlanır.

Kemerde meydana gelecek küçük bir (virtüel) yer değiştirme, kemer karnı ve ya kemer sırtında bir kaç mafsallın oluşmasına neden olur. Şekil 2.17’de görülen, bitişik durumdaki $k-1$ ve k blokları arasında, kemer karnında ki mafsallın oluştuğu noktada meydana gelen açılma $\delta\theta_k^{\text{int}}$ şeklinde gösterilebilir. Benzer şekilde, mafsallın kemer sırtında oluşması durumunda bu açılma $\delta\theta_k^{\text{eks}}$ şeklinde gösterilebilir ve $\delta\theta_k^{\text{int}}, \delta\theta_k^{\text{eks}} \geq 0$ olmalıdır (Gilbert and Melbourne 1994).



Şekil 2.17. Yer değiştirmiş blokların geometrisi

Bu bitişik bloklar, birbirlerine bağlı olarak çeşitli şekillerde hareket edebilirler (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Bitişik blokların muhtemel hareketleri

Blokların geometrisinden, O_{k-1} noktasının O_k noktasına göre düşey deplasmanının ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\delta v_k = b_{k-1}(\sin(\beta_{k-1} + \delta\phi_{k-1}) - \sin \beta_{k-1}) + 2a_k \sin\left(\frac{\delta\theta_k^{eks} + \delta\theta_k^{int}}{2}\right) \cos\left(a_k + \frac{\delta\theta_k^{eks} - \delta\theta_k^{int}}{2} + \delta\phi_{k-1}\right) \dots\dots\dots (2.8)$$

Burada, $\delta\phi_k = \sum_{l=1}^k (\delta\theta_l^{eks} - \delta\theta_l^{int})$ şeklindedir.

Denklem 2.8'den hareketle, O_j noktasının, O_o noktasına göre düşey deplasmanı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\delta v_j = \sum_{k=1}^j \left\{ b_{k-1}(\sin(\beta_{k-1} + \delta\phi_{k-1}) - \sin \beta_{k-1}) + 2a_k \sin\left(\frac{\delta\theta_k^{eks} + \delta\theta_k^{int}}{2}\right) \cos\left(a_k + \frac{\delta\theta_k^{eks} - \delta\theta_k^{int}}{2} + \delta\phi_{k-1}\right) \right\} \dots\dots\dots (2.9)$$

Bu ifadedeki ihmal edilebilir küçük değerler çıkarılırsa denklem aşağıdaki şekilde sadeleştirilebilir.

$$\delta v_j = \sum_{k=1}^j \left\{ a_k (\delta \theta_k^{eks} + \delta \theta_k^{int}) \cos(a_k) + b_{k-1} \delta \phi_{k-1} \cos \beta_{k-1} \right\} \dots \dots \dots (2.10)$$

Benzer şekilde O_j noktasının, O_o noktasına göre yatay deplasmanı aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$\delta h_j = \sum_{k=1}^j \left\{ a_k (\delta \theta_k^{eks} + \delta \theta_k^{int}) \sin(a_k) + b_{k-1} \delta \phi_{k-1} \sin \beta_{k-1} \right\} \dots \dots \dots (2.11)$$

Sonuç olarak, Denklem 2.7’de verilen virtüel iş ifadesi, geometrik kısıtlayıcılar kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\sum_{j=1}^n w_j (\delta v_j + c_j \delta \phi_j \cos \Gamma_j) + W = 0 \dots \dots \dots (2.12)$$

Ayrıca, kemer ayaklarında yani mesnetlerde deplasman oluşmayacağı kabulüyle, tek açıklıklı bir kemer için aşağıdaki sınır şartları analize eklenir.

$$\left. \begin{array}{l} \delta v_{n+1} = 0 \\ \delta h_{n+1} = 0 \\ \sum_{k=1}^{n+1} (\delta \theta_k^{eks} - \delta \theta_k^{int}) = 0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (2.13)$$

Analiz sonucunda elde edilecek W değerleri, doğrusal programlama yardımıyla minimize edilerek, kemerin göçme yükü değeri olan W_{min} elde edilmektedir (Gilbert and Melbourne 1994). Ancak, göçme yükü için uygun bir çözümün bulunamadığı iki durum söz konusudur.

a) Bütün kısıtlayıcıları sağlayan, problem değişkenlerinin bir değer kombinasyonu olmayabilir. Bu nedenle uygun bir çözüm bulunamaz. Bu durum, kemerin geometrik olarak kilitli olduğunu yani kemerin bir mafsal mekanizması ile göçmeyeceğini gösterir. Bu duruma, düz kalın kemerlerde rastlanabilir.

b) W için çözüm sınırlandırılmamış olabilir. Bu durum kemerin kendi ağırlığı altında kararsız bir durumda olduğunu gösterir. Çok ince, dairesel kemerlerde bu durumla karşılaşılabilir (Gilbert 2001).

Geliştirilen bu analiz metoduna daha sonra, çok halkalı köprülerde oluşabilecek kemerler arasındaki ayrılma, kemer üst dolgusunun kemer üzerindeki etkisi, kemer malzemesinin basınç dayanımının yapılan kabulün aksine, sonsuz olmaması nedeniyle oluşabilecek malzeme ezilmesi ve yine başlangıçta yapılan, blokların arasında kayma olmayacağı kabulü yerine, kemerde kayma nedeniyle göçme oluşabileceği durumu dikkate alınarak analize yeni kısıtlayıcılar eklenerek yöntem geliştirilmiştir (Gilbert and Melbourne 1994).

2.2.7. Kâgir kemerlerin analizi için özel olarak geliştirilmiş programlar

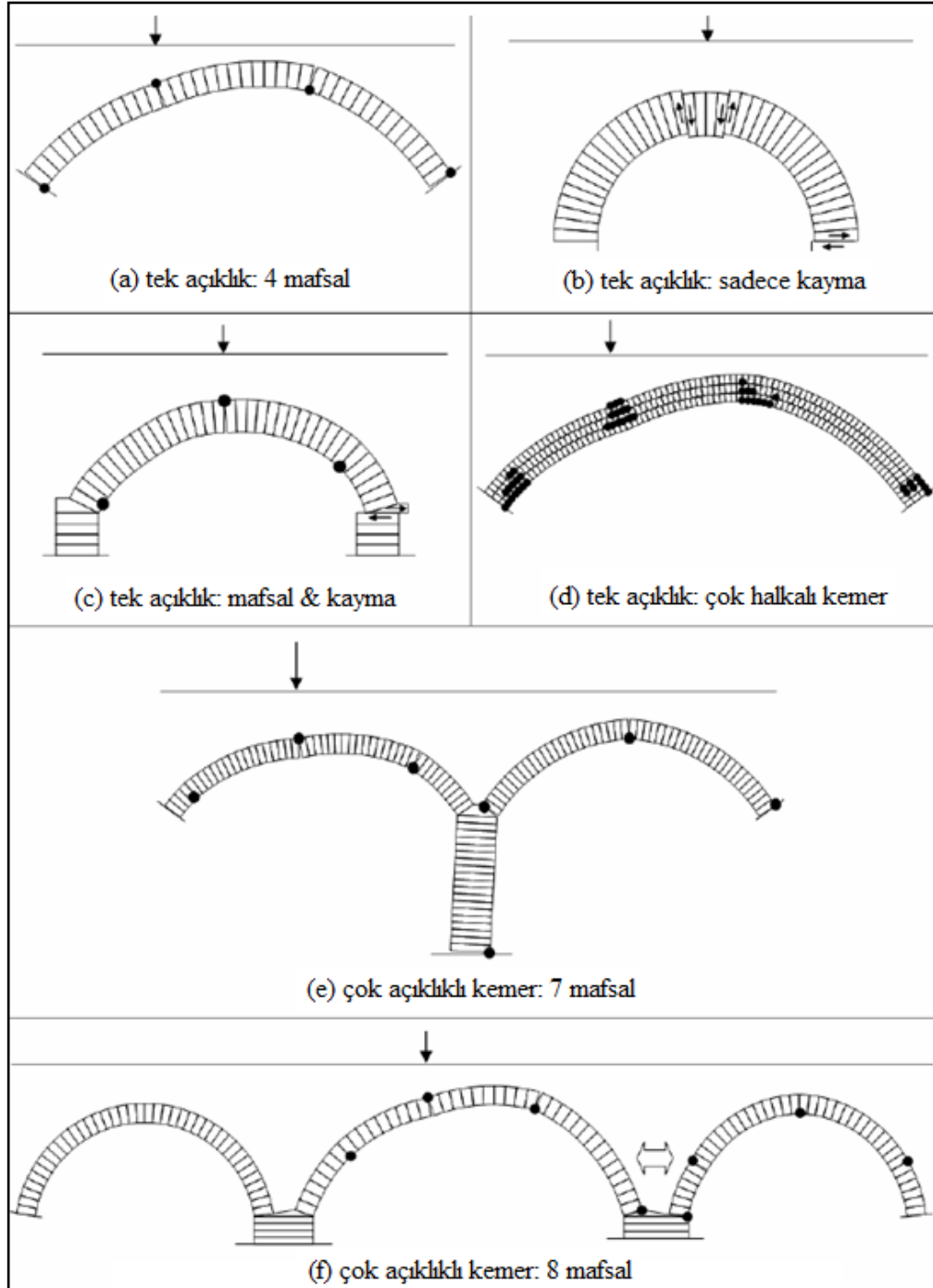
2.2.7.a. Ring 2.0 programı

Ring 2.0, tek ve çok açıklıklı kâgir kemerler köprülerin nihai yük taşıma kapasitelerinin belirlenebilmesi için geliştirilmiş bir programdır. Ring 2.0, 2001 yılından bu yana çeşitli versiyonları yayınlanan programın son sürümüdür (Anonymous 2009a). Program kemer köprüünün rijit bloklardan oluşmuş olduğu kabulüyle, limit analiz yöntemlerini kullanarak göçme yükünü hesaplamaktadır (Anonymous 2009b).

Modellemenin iki boyutlu olarak yapılabildiği programın genel kullanım özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Kemer şekli, kemerin açıklığı ve yüksekliği girilerek, basık kemer olarak ya da blokların koordinatları girilmek suretiyle kullanıcı tarafından da tanımlanabilmektedir.
- Köprüler, çok açıklıklı olarak ve çok halkalı kemerler muhteva eder şekilde modellenebilmektedir. Kemer halkaları farklı kalınlıklarda olabilir ve farklı sayıda bloklardan oluşabilir. Açıklıkların arasındaki kemer ayakları ve her bir açıklıktaki kemerler farklı boyutlarda dizayn edilebilir.
- Programın dikkate aldığı göçme şekilleri, kayma, plastik mafsall oluşumu ve malzeme ezilmesidir. Burada kayma, bloklar arasında olabileceği gibi kemer halkaları arasında da olabilmektedir. Kayma göçmesinin ve malzeme ezilmesinin olup olmayacağı kullanıcının tercihinine bırakılmıştır. Eğer kayma dikkate alınacaksa, bloklar arasındaki ve eğer köprü çok halkalıysa, kemer halkaları arasındaki sürtünme katsayısı değeri belirtilmelidir. Eğer malzemenin basınç dayanımı sonsuz kabul edilirse, ezilme oluşmayacaktır. Fakat ezilme durumu dikkate alınacaksa, belirli bir basınç dayanımı değeri girilmelidir.

Programda belirlenebilen göçme modelleri Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Ring 2.0 programında dikkate alınan göçme şekilleri

- Üst dolgunun, kemer üzerindeki yatay pasif basınç etkisi, istenirse analize dâhil edilebilmektedir. Ayrıca dolgunun, dış yükü kemer üzerine dağıtma etkisi, Boussinesq yaklaşımıyla ya da üniform olarak modellenebileceği gibi dolgunu etkisi dikkate alınmadan doğrudan kemere etki ettirilebilir.
- Uygulanacak dış yükler, programın veritabanında tanımlanmış olan araç yüklerinden seçilebileceği gibi kullanıcı tarafından da yeni yükler eklenebilmektedir. Aynı anda farklı yükler sisteme uygulanabilmektedir.
- Yapılan analiz sonucunda, program sistemin göçme yükü faktörünü verecektir. Göçme yükü yerine göçme yükü faktörünün kullanılması, sisteme birden fazla yükün etkimesi durumunda daha kullanışlı olduğundan tercih edilmiştir. Örneğin, köprüye 1 kN değerinde tekil bir yük uygulanması durumunda, göçme yükü faktörü 154 olarak hesaplanmışsa, kemerin göçme yükü 154 kN'dur. Eğer aynı yük 10 kN olarak uygulanırsa göçme yükü faktörü 15.4 olarak bulunacaktır (Anonymous 2009b).

2.2.7.b. Archie-M programı

Archie-M programı, kemer köprülerin mekanizma metoduyla analizi üzerine çalışan, W.J. Harvey ve E.W. Smith tarafından geliştirilmiştir. Program belirli bir yükleme durumu için kemerin basınç çizgisinin yerini belirlemektedir. Kemerin basınçtaki akma dayanımı belirlenir ve basınç kuvveti, akma dayanımına bölünerek kemerdeki basınç bölgesi bulunur. Bu basınç bölgesine bağlı olarak kemerin gerçek kalınlığı belirlenebilir. Program ayrıca, basınç çizgisini belirlerken, dolgu-kemer etkileşimini de dikkate almaktadır. Böylece, yükün dolgudan kemere dağılım açısı ve pasif basınç dağılımı tanımlanabilir. Ayrıca çok açıklıklı viyadük ve kemerlerinde analizi yapılabilmektedir (Ng 1999).

Program, sınırlı malzeme dayanımı kabulü ile üç plastik mafsala sahip bir kemer kullanır ve mafsalları yükleme durumuna göre en uygun yerlere koyar. Yüklemeye bağlı

olarak basınç çizgisini yerinin belirler ve basınç çizgisi kemer sınırlarının içindeyse sistem dengede demektir. Basınç çizgisinin, kemerin kenarına dokunduğu noktada dördüncü mafsallık meydana gelecektir ve kemerin göçmesine sebep olacak mekanizma oluşacaktır. Dördüncü mafsallığın meydana gelmesine sebep olan yük değeri, yükün uygulama noktası için, kemerin yük taşıma kapasitesidir. Kemerdeki her bir parçadaki basınç bölgesini ve iç kuvvetleri belirler. Ayrıca, Archie-M, yükü otomatik olarak dördüncü mafsallık oluşturacak kritik noktaya yerleştirir (Bjurström and Lasell 2009).

En fazla 100 açıklıklı bir köprünün analizini yapabilen programda, aşağıda sıralanan şekillerde kemerler tanımlanabilmektedir.

- Dairesel Kemer
- Eliptik Kemer
- Üç Merkezli (sepetkulpu) Kemer
- Sivri Kemer
- Düz Kemer
- Gerçek Yay Şeklinde Kemer

Bu program, kolay kullanımı nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Fakat sadece belirli bir noktadan etkiyen, belirli bir yük değeri için analiz yapabilmektedir. Ayrıca, analizden önce, belirli bir zemin basınç etkisi tanımlanmalıdır ki, bu, analizin doğruluğunun, girilen bu basınç etkisinin doğru olmasına bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle programın, gerçekçi olmayan zemin modellemesi sebebiyle, doğru olmayan sonuçlar verebileceği kabul edilmiştir (Ng 1999).

2.2.7.c. Interactive Thrust programı

John A. Ochsendorf önderliğindeki bir araştırma grubu tarafından 2005 yılında MIT’de (Massachusetts Institute of Technology), kâğıt yapıların gerçek zamanlı analizlerinin yapılabilmesine yönelik olarak geliştirilmeye başlanmıştır. Philippe Block tarafından

2005 yılında yapılmış olan yüksek lisans tezine dayanan çalışmalar sonucunda, kâgir yapılardaki basınç çizgisinin, çevrimiçi etkileşimli grafiksel analizler şeklinde belirlenmesini sağlayan bir program geliştirilmiştir (Kurrer 2008).

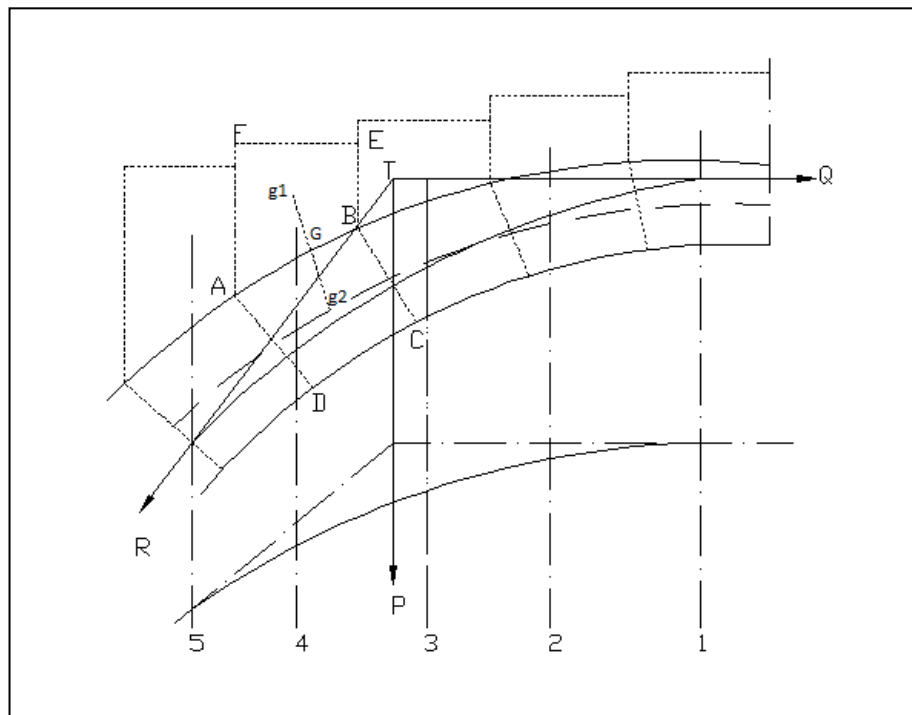
Geliştirilen bu yapısal analiz programı ile kâgirdeki iç kuvvetleri ve muhtemel göçme şekillerini görselleştirecek olan basınç çizgisi belirlenebilmektedir. Modeller parametrik olarak, yapının geometrisi ile muhtemel denge durumları arasındaki ilişkiyi gerçek zamanlı olarak gösterecek şekilde oluşturulmuştur. Yapının göçme analizleri, limit analizin statik ve kinematik metotlarının birleştirilmesiyle yapılmaktadır. Kontrol noktaları yardımıyla, kullanıcı bazı geometrik parametreleri değiştirebilmekte veya yapıda deplasmanlar oluşturabilmektedir. Yapının bu değişikliklere tepkisi eş zamanlı olarak görülebilmektedir. Java uygulaması olarak geliştirilen bu programa internet üzerinden ücretsiz olarak ulaşılabilir (Block *et al.* 2006).

2.2.8. Kâgir kemer köprülerin grafiksel analizi (Mery epürü)

19. yüzyılda Fransız mühendis Mery tarafından geliştirilmiştir. Normal yapılarda uygulanan bu yöntem, sadece verilen yükleme durumu için kâgirde çekme olmayacağını ispatlamaktadır. Bu çizimin kademeleri Şekil 2.20'ye bağlı olarak aşağıda açıklanmıştır.

- Kemer ekseni çizilir,
- Kemer ABCD gibi bir takım bloklara ayrılır,
- Sabit ve hareketli dış yüklere tekabül eden EF yük çizgisi, kemer malzemesi yoğunluğu esas alınarak, ABEF yük alanı kemer alanı ile aynı birime dönüştürmek suretiyle çizilir.
- AFEBDC elemanlarının (G) ağırlık merkezleri, ABEF'nin merkezi (g_1) ve ABCD'nin merkezi (g_2) kombine edilerek bulunur.
- Geçici bir O kutup merkezi ile $G_1, G_2, \dots, G_5$ kuvvetlerine ait kuvvetler poligonu çizilir.

- Kemer ve verilmiş dış yüklerin ağırlık merkezi T'nin düşey yardımcı ip poligonu ile çizilir.
- P bileşkesinin, anahtar üst çekirdek noktası Q ve üzengi alt çekirdek noktası R'den geçen TQ ve TR bileşenleri çizilir. Simetri sebebi nedeniyle TQ yataydadır.
- G_5 'in ucundan TR'ye paralel çizilir ve Q'dan başlamak suretiyle çizilecek kemerdeki basınç eğrisinin O' kutbu elde edilir.



Şekil 2.20. Mery epürü yöntemiyle basınç çizgisinin belirlenmesi

Epür, göz önüne alınacak her yük durumu için çizilmelidir. Bu metot bilhassa, zati ağırlığın hareketli yüke nazaran fazla olduğu, orta açıklıklı köprüler için geçerlidir (Celasun 1974).

2. 3. Kaynak Özetleri

Livesley (1978), rijit-plastik yapısal çerçeveler için geliştirilmiş bir analiz tekniğini, rijit bloklardan oluşan yapılara, göçme yüklerinin hesaplaması amacıyla uygulamıştır. Yöntem, blokların denge şartına ve blok ara yüzeylerindeki göçme kriterlerinden elde edilen doğrusal kısıtlayıcılara bağlı olarak, göçme yükü faktörünü maksimize edilmesine dayandırılmıştır. Yöntemin uygulanması iki farklı şekilde yapılmış, ilkinde, kayma durumunda ara yüzeylerdeki kesme kuvveti, normal kuvvetten bağımsız olarak sınırlandırılmış, ikincisinde ise Coulomb sürtünme kanunu dikkate alınmıştır. Ayrıca malzemenin ezilme ihtimali de analize dâhil edilmiştir. İlk kabule göre yapılan analizlerden beklenen sonuçlar elde edilmiş, ikinci kabulde yapılan analizlerde ise, alt-sınır teoremi kullanılsa bile, gerçek göçme yükünün üzerinde değerler elde edilebileceği görülmüştür.

Clemente *et al.* (1995), Heyman'ın taş kemerlerin dayanımının tamamen geometrik bir problem olduğu fikrinden yola çıkarak, ölü yüklerin etkisi altındaki kemerlerin sahip olabileceği en küçük kalınlığı ve dış yüklerin de eklenmesiyle oluşacak göçme mekanizmasını ve göçme yükü değerini, kemerin geometrisine bağlı olarak ortaya koymuşlardır. Dairesel ve parabolik kemerler üzerinde yapılan çalışmada, her iki kemer şekli için de gerekli en küçük kemer kalınlığının, kemerin taç kısmı üzerindeki dolgu yüksekliği arttıkça azaldığı, dolgunun birim hacim ağırlığının kemerin birim hacim ağırlığına oranı arttıkça arttığı belirlenmiştir. Öte yandan, kemer yüksekliğindeki artışın, parabolik kemerde, dairesele nazaran gerekli kalınlığı daha belirgin şekilde arttırdığı görülmüştür. Bütün karşılaştırmalarda dairesele geometrinin parabolden daha küçük kalınlık gerektirdiği gözlenmiş ve dairesele şeklin ölü yükler altında daha iyi performans gösterdiği söylenmiştir. Kemerlere hareketli bir yük uygulandığında ise göçme yükü değerinin, kemer yüksekliği arttıkça küçüldüğü, kemer kalınlığı ve birim hacim ağırlıkları arasındaki oran arttıkça büyüdüğü belirlenmiştir. Bu durumlarda da dairesele kemer parabolik kemerden daha fazla yük taşımaktadır.

Çok halkalı tuğla kemerlerin göçme şekillerinin, tek halkalı kemerlere nazaran oldukça farklı olduğunu söyleyen Melbourne and Gilbert (1995), halkalar arasındaki ayrışmalardan kaynaklanan bu durumu araştırmak için model kemerler üzerinde deneyler yapmışlardır. Farklı boyutlarda, toplam yedi adet, iki halkalı olarak yapılmış basık kemer, göçme testine tabi tutulmuş ve sonuçlar rijit-blok analiz ve Mexe metoduyla yapılan çözümlerle karşılaştırılmıştır. Halkalar arasındaki ayrışmanın modellenebilmesi için bazı kemerlerde, halkalar arasında harç, bazılarında ise sadece nemli kum kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Halkaları arasında harç kullanılmayan kemerlerin göçme yükleri, halka ayrılması olmayan kemerlere nazaran oldukça düşük bulunmuştur.
- Bütün kemerler plastik mafsal mekanizmasının oluşmasıyla çökmüşlerdir.
- Halkaların arasındaki yüzeyin, sürtünmesiz olduğu kabulü yapılan rijit-blok analiz metodundan elde edilen sonuçlar, bütün kemerlerde, gerçek göçme yüklerinden daha küçük çıkmıştır.
- Mexe metodundan bulunan göçme yük değerleri ise gerçek değerlerden yüksek çıkmıştır. Bu nedenle, halka ayrılması olabilecek kemerlerin analizi için uygun bir yöntem olmadığı söylenmiştir.
- Yatay dolgu basıncının kemerlerin taşıma gücünü arttırdığı gözlenmiştir.
- Çok halkalı kemer köprülerin analizinde, halka ayrılması ihtimalini dikkate almayan analiz metotlarının kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir.

Melbourne *et al.* (1997), çok açıklıklı, tuğla kâgir kemerlerin göçme şekillerini, deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. Bu amaçla inşa edilen, eşit açıklıklı, büyük ölçekli üç model köprünün göçme analizi yapılmış ve sonuçlar, köprülerin rijit-plastik metodun üst-sınır yaklaşımıyla yapılan çözümleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Bütün kemerler plastik mafsal mekanizmasıyla göçmüştür.
- Çok açıklıklı köprülerin göçme yükleri, bu köprülerin açıklıklarıyla aynı özelliklerde yapılmış tek açıklıklı köprülerin göçme yükleriyle kıyaslanmıştır. Tek açıklıklı kemerlerin göçme yükleri daha büyük çıkmıştır.

- Köprülerin kritik yükleme pozisyonu, çok açıklıklı kemerlerde, açıklıkların taç kısımlarının civarı olarak bulunmuştur. Tek açıklıklı kemerler de ise bu yer, açıklığın çeyreğidir.
- Dolgunun kemerler üzerindeki yatay basınç etkisinin, köprünün taşıma gücünü arttırdığı belirlenmiştir. Fakat bu etki tek açıklıklı kemerler de olduğu kadar büyük değildir.
- Rijit-blok analiz tekniğinin, çok açıklıklı kemerlerin analizi için oldukça kullanışlı olduğu söylenmiştir.

Peng and Fairfield (1997), tek açıklıklı kemer köprülerin en uygun tasarımı için mekanizma metoduyla genetik algoritmayı birleştiren bir program yazmışlardır. Taşların arasında kayma olmayacağı, taşların basınç dayanımının sonsuz olduğu ve harcın çekme dayanımının olmadığı kabulleri yapılan programda, muhtemel mafsall oluşum noktalarının bulunmasında genetik algoritma kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmalarının mevcut köprülerin onarımında ve yeni köprülerin tasarımında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Boothby (1998), dolgu köprülerin araç yükleri altındaki davranışlarını deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. Beş farklı köprü için, kemer karnına yerleştirilen LVDT'ler (linear variable differential transformer) yardımıyla, farklı araç yükleri altında oluşan yer değiştirmeler ölçülmüştür. Sonra bu köprülerden dört tanesi ANSYS programıyla analiz edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda kemerin yüklere tepkisinin doğrusallığının, kemerin kapasitesinin önemli bir ölçüsü olduğu, doğrusal olmayan tepkilerin harç ya da taşlardaki hasarlardan kaynaklandığı, kemer üstü duvarlarının ve kemer üst dolgusunun rijitleştirici etkisinin kemer davranışında çok etkili olduğu söylenmiştir. Program sonuçları gerçek yer değiştirme değerlerine oldukça yakın çıkmıştır.

Hughes and Pritchard (1998), kâgir bir kemer köprüde, ölü yüklerin ve hareketli yüklerin etkisi altında meydana gelen gerilmeleri, deneysel ve analitik olarak araştırmışlardır. Öncelikle, kaya kütlelerinin içinde oluşan gerilmelerin bulunması için

geliştirilen bir yöntem olan “yassı veren deneyi”, köprüye uygulanmış ve gerilmeler belirlenmiştir. Daha sonra, elastik çatlama temeline dayanan bir analiz yöntemiyle köprü incelenmiştir. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın çıktığından, bu analiz yönteminin, kemer köprülerde ki gerilme dağılımı araştırmalarında kullanımının güvenilir olduğu söylenmiştir.

Frunzio *et al.* (2001), İtalya’da Roma İmparatorluğu döneminden kalan Pont St. Martin Köprüsünü üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir. Kemer üstü duvarları ve kemer üst dolgusu da analize dahil edilmiş ve kemerin sadece ölü yükler etkisindeki analizi ANSYS programıyla yapılarak, kemerin güvenlik faktörü hesaplanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen, yer değiştirme ve gerilme dağılımı verilerinin kemerlerin muhtemel yenileme çalışmaları için önemli olduğu ancak, doğru bir analiz için gerekli olan, malzemelerin mekanik özelliklerinin, tarihi yapılarda belirlenmesinin zor olduğu belirtilmiştir. Yapıda hesaplanan en büyük gerilme değeri, taş ve dolgu malzemesinin dayanımlarından oldukça küçük çıkmıştır. Bu durum kederde malzeme dayanımına bağlı bir göçmenin olmayacağını göstergesi olarak kabul edilmiştir.

Thavalingam *et al.* (2001), sonlu elemanlar, ayrıık elemanlar ve süreksiz deformasyon analizi yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla Edinburgh Üniversitesi’nde deneysel olarak analiz edilmiş yarım daire şeklindeki kemeri, deplasman kontrollü yükleme prosedürü dikkate alınarak, sırasıyla bu metotları kullanan DIANA FE, PFC ve DDA yazılımlarıyla incelemişlerdir. Elde edilen göçme yükleri, deneysel göçme yükünün, sırasıyla %128, %112 ve %84’ü civarında hesaplanmıştır. Sonuç olarak her üç analiz metodunun sağlam ve gerçekçi göçme yükü değerleri verdiği belirtilmiştir. Ayrıca dolgu ve dolgu-kemer ilişkisinin modellenmesinin ve analize dahil edilmesinin önemli olduğu söylenmiştir.

Ng and Fairfield (2002), kemer köprülerin analizine yönelik olarak mekanizma metoduyla Monte Carlo Simülasyonunu birleştiren bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemle, TRL tarafından göçme testi yapılan ve göçme yükü 296 kN/m olarak bulunan

Barlae Köprüsü'nü bu yöntemle ve de Archie-M, Ctap ve Mafea programlarıyla analiz ederek sonuçları karşılaştırmışlardır. Geliştirdikleri yöntemle, kemerin göçme yükünü 265 kN/m yani, gerçek göçme yükünden yaklaşık %10 daha küçük olarak bulmuşlardır. Analizde kullanılan diğer programlar sırasıyla, 216, 232 ve 165 kN/m olarak göçme yüklerini hesaplamışlardır. Ayrıca, göçme yükünü etkileyen en önemli parametreler olarak gösterdikleri, kemerin üstündeki pasif dolgu basıncını, dolgunun kesme mukavemeti açısını, dış yükün dağılım açısını ve malzeme yoğunluğunu da bu yöntemle inceleyerek, göçme yükünü önemli derecede etkilediklerini ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak geliştirdikleri yöntemin gerçekçi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Ng and Fairfield (2003), mekanizma metodunda, göçme başlangıcındaki kemerin deforme olmuş şeklinin dikkate alınmadığını, fakat bu andaki kemer profilinin özgün formdan oldukça farklı olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum kemer sırtındaki yatay dolgu basıncı dağılımını etkilediğinden, mekanizma metodunu modifiye etmek için sehime bağlı basınç değişimini içeren bir algoritma geliştirmişlerdir. İngiltere'de deneysel olarak incelenmiş olan Bargower Köprüsü bu programla analiz edilerek, kemer deformasyonunun, dolgudaki nihai pasif ve aktif sapmaların, dış yükün dağılım açısının, malzeme yoğunluğu ve dolgunun kayma mukavemeti açısının göçme yükü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kemer deformasyonunun dolgunun yatay basıncını ve kemerin kapasitesini etkilediği, dolgunun nihai pasif sehiminin azaldıkça göçme yükü kapasitesinin arttığı, nihai aktif sehimin etkisinin ise çok küçük olduğu söylenmiştir. Hem dolgunun hem de kemerin birim hacim ağırlığının göçme yükünü etkilediği fakat dolgu ağırlığının büyüklüğü nedeniyle daha etkili olduğu ve her ikisinin de arttıkça göçme yükü kapasitesinin arttığı, dolgunun kayma mukavemeti açısının ve dış yükün dağılım açısının da büyüdükçe göçme yükü değerinin arttığı belirtilmiştir.

Kemer üst dolgusu ve kemer üst duvarlarının, kâgir kemer köprülerin davranışını oldukça etkilediğini ve yük taşıma kapasitesini arttırdığını söyleyen Cavicchi and Gambarotta (2004), bu durumu kanıtlamak için tek açıklıklı ve çok açıklıklı iki kemer köprü üzerinde bu etkileri araştırmışlardır. Kullanılan tek açıklıklı köprü, TRL tarafından deneysel olarak analiz edilmiş gerçek bir köprü olan Prestwood Köprüsü'dür.

Çok açıklıklı köprüde ise, kemerler ve kemer ayakları elastik, çekme dayanımı olmayan ve basınç altında sünek davranış gösterecek malzemeden yapıldığı kabulüyle modellenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde, dolgu direncinin göçme yükü değerini arttırdığı ve dolgu malzemesinin kohezyonu ile iç sürtünme açısının değeri arttıkça kemerin yük taşıma kapasitesinin arttığı gözlenmiştir.

Toker ve Ünay (2004), geometrik olarak Mostar Köprüsü'ne benzeyen bir prototip kemeri sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. SAP2000 programıyla, doğrusal-elastik analiz yöntemiyle yapılan analiz sonucunda kemerdeki gerilme dağılımını belirlemişlerdir. Kemerin deprem analizinde özellikle, kemer yüksekliğinin orta bölgesinde ve yan duvarlarda en büyük gerilme değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak, kemerli yapılardaki kritik bölgelerin belirlenmesi amacıyla ilk önce doğrusal-elastik analizin kullanılabileceği, daha sonra özel modelleme teknikleriyle geometrik düzensizlikler dikkate alınarak, deprem altındaki davranışlarının incelenebileceği söylenmiştir.

Ural (2005), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Trabzon'da bulunan Coşandere köprüsü'nün yapısal davranışını incelemiştir. Köprü, SAP2000 programıyla 3-boyutlu (solid) elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Malzeme özelliklerinin belirsizliği nedeniyle, literatür taramasından elde edilen ve yaygın olarak kullanılan malzeme özelliklerinin kullanıldığı söylenmiştir. İlk olarak, köprünün kendi ağırlığından dolayı meydana gelecek, gerilme ve şekil değiştirmelerin bulunması amacıyla statik analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda, yapının kendi ağırlığından kaynaklanan en büyük gerilmeleri güvenle taşıdığı belirlenmiştir. En büyük gerilemeler kemerin tabana yaklaştığı kenar kısımlarda oluşmuştur. Sonra, elde edilen modele 1940-Elcentro depreminin ivme kaydı eklenerek, kemerin doğrusal-elastik deprem davranışı incelenmiştir. Bu analizin sonucunda, en büyük gerilmelerin, kemer yüksekliğinin orta bölgelerinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, en büyük gerilmelerin olduğu bölgelerin daha detaylı olarak modellenmesinin ve malzemelerin doğrusal olmayan durumları için de analizlerin yapılmasının yerinde olacağı vurgulanmıştır.

Cavicchi and Gambarotta (2006), kemer köprülerin analizi için dolgu ve kemer arasındaki etkileşimin dikkate alındığı iki-boyutlu bir sonlu elemanlar yöntemi ortaya koymuşlardır. Limit analizin üst-sınır teoremini temel alan bu yöntemde, kemer ve kemer ayakları çekme dayanımı olmayan ve basınç altında sünek davranış gösteren kâgir malzeme, dolgu ise yapışkan-sürtünmeli bir malzeme olarak modellenmiştir. Dolgu bölgesi üçgen, kemer ise iki-düğümlü doğrusal parçalara ayrılmıştır. Göçme yükünün belirlenmesinde doğrusal programlama kullanılmıştır. Yöntemin doğruluğunun belirlenebilmesi için tek açıklıklı Prestwood köprüsü analiz edilmiş ve göçme yükü değeri ile göçme mekanizması, gerçek sonuçlara yakın çıkmıştır. Dolgu ve kemer arasındaki ilişkinin göçme üzerindeki etkisini ise üç-açıklıklı bir köprü üzerinde incelenmiştir. Yükün uygulandığı noktanın altında lokal göçme oluşmaması için, düzlemsel gerilme yaklaşımının sınırlandırılması ve dolgunun daha iyi analiz edilmesi gerektiği söylenmiştir.

Chen *et al.* (2006), kemer yüzeyine yakın bölgelerde kullanılan çelik çubuklarla güçlendirilmiş kemerlerin analizi için mekanizma metodunu modifiye etmişlerdir. Yöntem, sadece dört mafsal mekanizma ile göçen ve kemer halkalarındaki ayrılma nedeniyle olabilecek zamansız göçmelerin minimize edilmesi amacıyla güçlendirilmiş kemerler için geliştirilmiştir. Mekanizma metodunun genel kabullerine bağlı kalınarak, kemerin virtüel iş denklemi, çelik elemanların dört mafsalın olduğu noktalarda yapığı toplam virtüel işe eşitlenmiştir. Deneysel amaçlarla güçlendirilerek analiz edilmiş bazı köprülerin göçme yükleri, bu metotla hesaplanan göçme yükleriyle karşılaştırılmış ve aralarında makul bir korelasyon olduğu bulunmuştur.

Drosopoulos *et al.* (2006), tek açıklıklı bir kemerin göçme yükünü belirlemek için, tek taraflı sürtünme ara yüzeylerinin tanımlandığı bir sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır. Kemer gövdesinde, eksen çizgisine dik olarak konumlanmış belirli sayıda ara yüzey tanımlanmıştır. Ara yüzeylerde “Coloumb Sürtünme Kanunu” dikkate alınmıştır. İlk olarak dolgusuz bir kemer, bu yöntemle ve mekanizma metoduyla analiz edilmiş ve göçme yükü değerleri birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Sonra kemer-kemer üst dolgusu etkileşiminin dikkate alındığı bir kemer köprü analiz edilmiş ve yine

çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşımın üstünlüğünün, mevcut yöntemin kullanılabildiği klasik yapısal analiz yazılımlarının, kemer köprü analizlerinde kullanılabilmesinin olduğu söylenmiştir.

Kanıt ve Işık (2006), farklı geometrilere sahip model tuğla kemerlerin deneysel analizleri ile bilgisayar modeli analizlerini karşılaştırarak, çeşitli sayısal analiz yöntemlerinin yığma yapıların analizine uygunluğunu araştırmışlardır. 85 santimetre açıklıklı dairesel, sepetkulpu ve sivri kemer şeklindeki kemerler açıklıkları boyunca düzgün yayılı yük ile yüklenip göçme yükleri, yük-şekil değiştirme ilişkileri belirlenmiş daha sonra kemerler ayırık elemanlar yöntemini kullanan Flac3D ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan Udec programlarıyla analiz edilmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, dairesel kemerin 18 ton, sepetkulpu kemerin 22 ton ve sivri kemerin 21 ton yük taşıdığı buna karşın daire kemer aksında gözlenen çekme yenilmesi alanının diğer iki kemere göre oldukça az olduğu gözlemlenmiş ve daire şekline en ideal kemer biçimi denebileceği belirtilmiştir. Ayırık elemanlar yönteminin sonuçlarının, sonlu elemanlar yönteminin sonuçlarından daha gerçekçi olduğu tespit edilmiştir.

Audenaert *et al.* (2007), tek açıklıklı kemerler için temel denge denklemlerine dayanan ve elasto-plastik malzeme modellemesi içeren iki boyutlu bir analitik model geliştirmişlerdir. Bu modelin, kemerdeki kritik yükleme noktasını, en büyük güvenli yük değerini ve plastik mafsalların oluşma noktalarını belirlemenin yanında diğer iki boyutlu modellerden farklı olarak en kesitteki normal gerilme dağılımını ve kemer ayaklarındaki yer değiştirmeleri de hesapladığı belirtilmiştir. Bu yüzden, geliştirdikleri yöntemi basit iki boyutlu plastik analiz yöntemleriyle daha kompleks sonlu elemanlar yaklaşımının arasında bir çözüm yöntemi olarak göstermişlerdir.. Ayrıca bu modelden elde edilen sonuçlar RING ve ANSYS programlarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre en yüksek göçme yükü değerlerini RING verirken en düşük değerler ANSYS analizlerinden elde edilmiştir. Bu modelin sonuçları diğer iki programdan elde edilen değerlerin arasında çıktığından, sağlıklı ve emniyetli olarak gösterilmiştir.

Gürer vd. (2007), Rize’de bulunan tek açıklıklı tarihi iki kemer köprüyü, sonlu elemanlar yöntemiyle statik açıdan incelemiş ve gerilme analizlerini yapmışlardır. Bir boyutlu çözümleme yapan bir sonlu elemanlar programı olan Franc2d programı ile yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kemer Köprülerin kritik noktası olan kilit taşı bölgesine uygulanan tekil yüklerden dolayı, en yüksek gerilmelerin bu kısımlarda yoğunlaştığı görülmüştür.
- Köprülerdeki gerilmelerin genelde kesitin hemen hemen her bölgesinde basınç gerilmeleri olduğu görülmüştür.
- Gerilmelere baktığımızda en çok zorlanan kesitler, kemerin kilit taşı denilen ve tekil yüklemenin yapıldığı bölgeler olmuştur.
- Kesitin zayıf olduğu açıklıklardaki yer değiştirmeler diğerlerine nazaran daha önemli boyutlardadır.

Taş kemer köprülerin analizinde kullanılan mevcut yöntemlerin, kemerlerin nihai yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde güvenilir sonuçlar verdiğini, fakat köprünün uzun süreli davranışının ve kalan kullanım ömrünün belirlenmesinde yetersiz kaldıklarını belirten Melbourne *et al.* (2007) yeni bir analiz stratejisi geliştirmişlerdir. Mekanizma, kemer halkalarının ayrılması, ezilme ve kayma gibi bütün göçme şekillerine bağlı olarak göçme yükü belirlenmiş ayrıca devirli yüklemeye bağlı olarak oluşan uzun süreli yorulma davranışı da dikkate alınmıştır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve kemer davranışının modellenmesinde model kemerlerin laboratuvar analizleri önemli yer tuttuğundan, uygulanabilirliğin bu laboratuvar çalışmalarına dayandığı söylenmiştir.

Audenaert *et al.* (2007), tek açıklıklı kemerlerin davranışını tanımlamak için elasto-plastik bir modelden faydalanmışlardır. Analizlerde temel denge denklemlerinin kemerin her noktası için sağlanması şartı kullanılmış ve kemer ayaklarında sınır şartları olarak, dönme ile düşey ve yatay deplasman oluşmadığı kabul edilmiştir. Kemerin göçme şekli olarak, kemerlerde en fazla görüldüğünü belirttikleri mafsal mekanizmasını dikkate almışlardır. Malzemenin davranışının, gerilmeler basınç dayanımına ulaştığında plastik, basınç ve çekme dayanımları arasındayken doğrusal elastik olduğu, taşların

arasında kayma olmayacağı, taşların çekme dayanımının olmadığı, basınç dayanımının ise sonsuz olduğu kabul edilmiştir. Farklı yüklemelere maruz iki dairesel kemer analiz edilmiş ve sonuçlar rijit-plastik yaklaşımı kullanan RING programının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Mevcut metotla bulunan göçme yüklerinin daha düşük değerlerde olduğu belirlenmiş ve bu durum malzemenin elastik davranışının etkisi olarak gösterilmiştir. Yöntemin parametrik çalışmalar için de uygun olduğu söylenmiştir.

Cavicchi and Gambarotta (2007), daha önce üst-sınır teoremini kullanarak geliştirdikleri sonlu elemanlar uygulamasının (Cavicchi and Gambarotta 2006), bir benzerini tamamen aynı kabullere bağlı olarak, alt-sınır teoremini kullanarak geliştirmişlerdir. Önceki yöntemle analizi yapılan tek-açıklıklı ve üç-açıklıklı iki köprü, bu yeni yöntemle de analiz edilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak göçme yükü $P=228$ kN olarak bulunan tek açıklıklı köprü için üst-sınır teoremiyle bulunan göçme yükü $P=254$ kN iken, alt-sınır teoremi analizinde $P=209$ kN olarak bulunmuştur. Üç-açıklıklı kemerde ise üst-sınır ve alt-sınır analiz sonuçları, sırasıyla 1809 kN ve 1495 kN olarak bulunmuştur. Ayrıca, iki yaklaşımda da, kemerlerin göçme durumlarının birbirine oldukça benzer olduğu söylenmiştir.

Betti *et al.* (2008), kâgir kemer köprülerin göçme yüklerinin hesaplanmasında, iki farklı doğrusal olmayan sonlu elemanlar yaklaşımını uygulayıp bu modelleri karşılaştırmışlardır. İlk modelde, yapı, kemer eksenine dik belirli sayıda ara yüzeye ayrılmıştır. İkinci yaklaşımda ise kemer gövdesi, basitleştirilmiş iki-boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Her iki modelde de kemerin üzerindeki dolgunun etkisi dikkate alınmıştır. Bu yöntemlerle, deneysel analizleri yapılan gerçek kemer köprüler analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen göçme yükü değerleri, gerçek değerlere oldukça yakın çıkmış ve iki modelinde kemer köprü analizlerinde güvenle kullanılabileceği söylenmiştir.

Elmalich and Rabinovitch (2009), dıştan lifli polimer malzemelerle (FRP) güçlendirilmiş, dairesel ve yekpare olduğu kabul edilen kemerlerin gerilme analizleri için bir sonlu elemanlar formülasyonu geliştirmişlerdir. Bu formülasyonda, virtüel-iş

prensibi ile kemer ve kompozit malzeme için Bernoulli-Euler kiriş teorisi kullanılmıştır. Ayrıca, kemer, yapıştırıcı tabaka ve kompozit malzemenin arasındaki uyumluluğu karşılayan, yüksek mertebede kinematik yaklaşımlar dikkate alınmıştır. Yapılan analizler, deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve bulunan yaklaşık sonuçlar doğrultusunda, yöntemin bu tip yapıların analizlerinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Toth *et al.* (2009), dolgu malzemesinin çok açıklıklı bir kemer köprüünün mekanik davranışı üzerindeki etkisini, ayrık elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır. Deneysel analizi yapılmış tek açıklıklı bir köprü, aynı özelliklerde üç açıklıklı olarak UDEC programı kullanılarak modellenmiş, köprüünün asıl dolgu malzemesi yerine ayrı ayrı iki çeşit kum ve iki çeşit kil kullanılmıştır. Ortadaki kemer üzerine uygulanan farklı yükleme durumları için kullanılan malzemeye bağlı olarak, kemerdeki eksenel gerilme ve yer değiştirmeler ile dolgu malzemesinin sürtünme açısının, rijitliğinin ve kohezyonun yük taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Buna göre, dolgunun rijitliği arttıkça kemerdeki gerilmelerin küçülüp daha üniform hale geldiği, kohezyon, hacimsel basınç modülü ve sürtünme açısı değerlerinin büyüdükçe yük taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca sistem RING 2.0 programıyla da analiz edilerek her iki programın yaklaşık sonuçlar verdikleri belirlenmiştir.

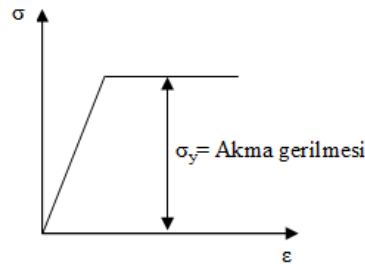
Bayraktar vd. (2010), Rize’de bulunan iki açıklıklı bir kemer köprüünün dinamik karakteristiklerini, sonlu elemanlar yöntemiyle ve titreşim testiyle araştırmışlardır. Sayısal çözümleme, ANSYS programıyla 3-boyutlu sonlu elemanlar analizi olarak yapılmıştır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zorluğuna dikkat çekilerek, literatürdeki benzer çalışmalar incelenerek malzeme özellikleri belirlenmiştir. Yapının doğal frekansının, analitik ve deneysel sonuçlarının arasında çıkan, ortalama %18’lik değer farklılığı, sayısal çözümde yapılan değişikliklerle %7’ye kadar indirilmiştir. Bu amaçla, akıntıdan dolayı köprü yan duvarlarında birikmiş olan kum ve taş gibi maddelerin rijitliği arttırıcı etkisi dikkate alınarak, sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle, kâgir kemer köprülerin göçme yükünün tayini için alt-sınır teoreminin kullanıldığı rijit-blok analiz yönteminin bir doğrusal programlama problemine nasıl indirgeneceği gösterilecektir. Bu amaçla, alt-sınır teoremi ve bu teoremin çelik kirişlerin analizinde kullanımı ile alt-sınır teoreminin nasıl doğrusal programlama problemi haline getirildiği anlatılacak ve doğrusal programlama hakkında genel bilgiler verilecektir. Sonra rijit-blok analiz yöntemi, bir örnek üzerinde açıklanacak ve bu yöntem kullanılarak hazırlanmış olan ve “KEMER” adı verilen analiz programının esasları anlatılacaktır. Son olarak, kâgir kemer köprülerin göçme yükü üzerindeki etkisi araştırılan parametrelere yönelik olarak yapılan çalışma anlatılacaktır.

3.1. Alt-Sınır Teoremi

Elastik analiz, bir yapının tasarlandığı yükler altındaki performansının incelenmesinde önemli bir yöntemdir. Bununla birlikte, yükün, yapının bazı noktalarında akma oluşturacak kadar büyümesi durumunda, yapıda elastik-plastik deformasyonlar oluşacaktır. Yükün daha da artmasıyla, tamamen plastik duruma ulaşılacak, yeterli sayıda plastik mafsalin oluşmasıyla yapıda göçme mekanizması meydana gelecektir, ardından yükteki en küçük bir artış sistemin göçmesine neden olacaktır. Limit analizin amacı da, yapının taşıyabileceği bu en büyük yük değerinin belirlenmesidir. Özellikle çelik yapıların tasarımında kullanılan bu yöntem, elastik-tam-plastik malzeme davranışı (Şekil 3.1) kabulüne dayanmaktadır (Ghali 1989).



Şekil.3.1. Elastik-tam-plastik malzeme davranışı

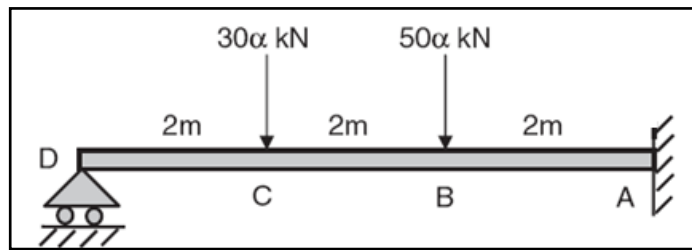
Limit analiz teorisine göre, sağlanması gereken üç temel şart aşağıda verilmiştir.

- Denge Şartı: İç ve dış kuvvetler arasında bir denge durumu olmalıdır.
- Mekanizma Şartı: Yapıda bir göçme mekanizması oluşturacak, yeterli sayıda plastik mafsall oluşmalıdır.
- Akma Şartı: Kesitte meydana gelecek eğilme momenti değerleri, kesitin her bir noktasında, sistemin eğilme momenti kapasitesinden küçük olmalıdır (Wong 2009).

Limit analizin, bu şartlara bağlı olarak geliştirilmiş, üç temel teoreminden biri olan alt-sınır teoremi kullanılarak yapılan analizlerde denge ve akma şartlarının sağlanması gerekmektedir (Gilbert 2007).

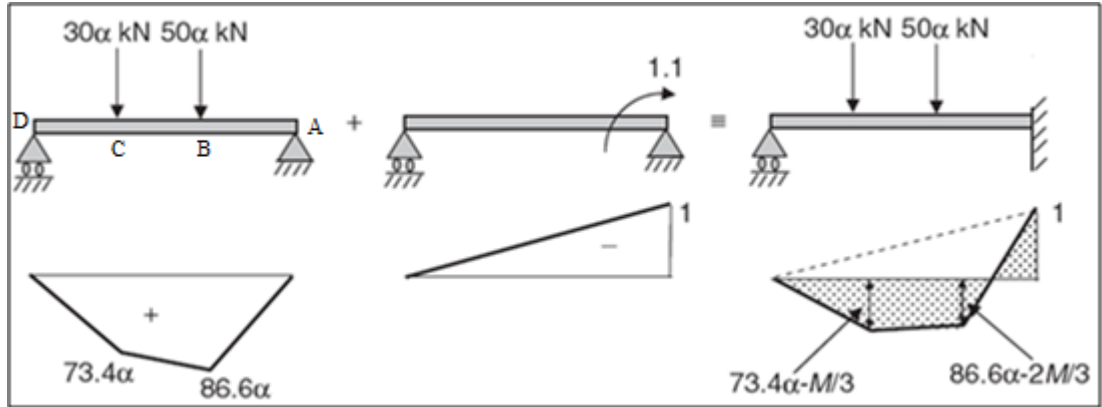
Denge kriteri, iç ve dış kuvvetlerin, statik denge denklemlerini sağlamasıdır. Akma kriteri ise yapının herhangi bir kesitindeki eğilme momentinin, kesitin plastik moment kapasitesinden küçük olması şartıdır (Heyman 2008).

Bu teoremlerle, çelik bir konsol kirişin göçme yükü faktörünün hesaplanması Şekil.3.2'ye bağlı olarak aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.2. İki farklı noktadan yüklenmiş hiperstatik kiriş

Plastik moment kapasitesi M_p olan, Şekil 3.2'deki konsol kirişin göçme yükü faktörü α , alt-sınır teoremi ile hesaplanmak istenmektedir. Bunun için öncelikle sistemin eğilme momenti diyagramı elde edilmelidir. Sistem 1. dereceden hiperstatik olduğundan, sistemin moment diyagramı Şekil 3.3'de gösterilen şekilde belirlenebilir.



Şekil 3.3. Hiperstatik kirişin moment diyagramının oluşturulması

Mevcut sistemin göçmesi için, iki tane plastik mafsallın oluşması gerekmektedir. Bunun için iki muhtemel durum vardır. Bunların biri, mafsalların A ve B noktalarında oluşması, diğeri ise A ve C noktalarında oluşması durumudur.

İlk olarak, plastik mafsalların A ve B noktalarında olduğu düşünölsün. $M = M_p$ olacağından B noktasında moment ifadesinden, göçme yükü katsayısı,

$$M_p = 86.6\alpha - \frac{2}{3}M_p \Rightarrow \alpha = \frac{M_p}{52}$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerin gerçek yük katsayısı olup olmadığının belirlenmesi için C noktasındaki moment değeri M_C kontrol edilmelidir.

$$M_C = 73.4\alpha - \frac{1}{3}M_p = 73.4 \times \frac{M_p}{52} - \frac{1}{3}M_p = 1.08M_p$$

C noktasında bulunan moment değeri, plastik moment kapasitesinden büyük olduğu için akma şartı ihlal edilmiştir. Bu nedenle mevcut göçme mekanizması ve göçme yükü

katsayısı doğru değildir. Plastik mafsalların A ve C noktalarında olması durumunda ise, C noktasındaki moment ifadesinden, göçme yükü katsayısı,

$$M_p = 73.4\alpha - \frac{1}{3}M_p \Rightarrow \alpha = \frac{M_p}{55}$$

olarak hesaplanır. Bu katsayı değeriyle, B noktasındaki moment M_B hesaplanırsa,

$$M_B = 86.6\alpha - \frac{2}{3}M_p = 86.6 \times \frac{M_p}{55} - \frac{2}{3}M_p = 0.67M_p$$

olarak bulunur. B noktasındaki moment, kirişin plastik moment kapasitesinden küçük olduğu için akma şartı sağlanmış demektir. Bulunan “ α ” değeri sistemin göçme yükü katsayısıdır (Wong 2009).

Limit analiz teoremlerinin tamamı, çeşitli kısıtlayıcılar altında göçme yükünü ya da göçme yükü katsayısını en büyük ya da en küçük yapmayı amaçlar. Alt-sınır teoreminde de amaç, yük faktörünün, denge ve akma şartlarına uygunluk için gerekli kısıtlayıcılara bağlı olarak en büyük değerini bulmaktır. Bu durumda hedef fonksiyon doğrusaldır ve kısıtlayıcılarda doğrusal olduğu zaman (akma şartı doğrusal olmayan gerilme bileşkeleri içerirse, bunlar uygun bir şekilde doğrusal parçalara ayrılabilir), problem bir doğrusal programlama problemi haline gelecektir ve böylece göçme yükü değeri doğrusal programlama ile bulunabilir. Fakat bulunan değer göçme yükünün nihai alt sınırı olmayabilir. Örneğin, akma şartının sadece yapının belirli kesitlerinde kontrol edilmesi bazı kritik kesitleri, hesaplamanın dışında bırakabilir. Benzer şekilde, doğrusal olmayan akma yüzeyi, doğrusal hale getirilirken, plastik bölgenin dayanımının, dolayısıyla da göçme yükünün daha küçük değerlerde çıkması muhtemeldir (Loi 2009).

Çelik kiriş ve çerçeveler için alt-sınır teoreminin, doğrusal programlama problemi şeklinde nasıl ifade edileceğinin adımları aşağıda verilmiştir (Loi 2009).

- Yapıdaki kritik bölgeler belirlenir ve seçilen her bir kritik bölgedeki eğilme momenti için denge denklemleri elde edilir.

Bütün kritik kesitlerdeki moment değeri,

$$m = \alpha \cdot B_0 \cdot f + B_1 \cdot x \dots\dots\dots (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

m ; Bütün kritik kesitlerdeki eğilme momentlerinin toplamı

f ; Verilen yük vektörü

α ; Hesaplanmak istenen yük faktörü

x ; Birim yüklemelerin vektörü

B_0 ve B_1 ; Sırasıyla, temel ve birim yükleme matrisleridir.

- Kritik kesitlerde kontrol edilecek akma kriterleri belirlenir. İşlemi basitleştirme amacıyla akma kriteri olarak, kesitlerdeki moment ifadelerinin, negatif veya pozitif olsun, kesitin plastik moment kapasitesi olan M_p ' yi aşmaması şartı kısıtlayıcı olarak kullanılır.

$$-M_p \leq m \leq M_p \dots\dots\dots (3.2)$$

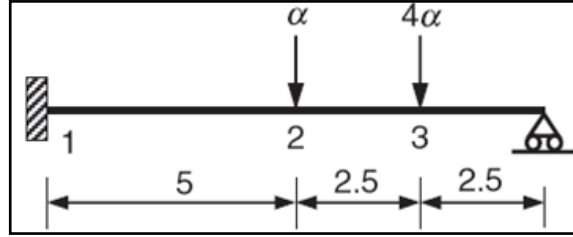
- Doğrusal programlama problemi, Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'ye bağlı olarak, göçme yükü katsayısı α 'nın en büyük yapılması problemi haline gelir.

maks. α

kısıtlayıcılar; $m = \alpha \cdot B_0 \cdot f + B_1 \cdot x$

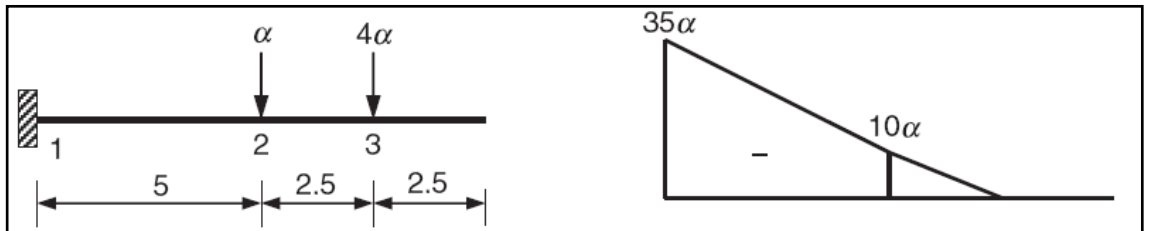
$$-M_p \leq m \leq M_p$$

Bu doğrusal programlama yönteminin uygulaması, Şekil 3.4’de gösterilen, plastik moment kapasitesi $M_p=10$ olan kirişin göçme yükü katsayısının bulunmasına yönelik olarak yapılmıştır.



Şekil 3.4. Doğrusal programlama yardımıyla analizi yapılan ankastre kiriş

Sistem 1. dereceden hiperstatik olduğundan, moment diyagramının elde edilmesi için, öncelikle hareketli mesnet kaldırılarak, dış yükler etkisindeki izostatik temel sistemin moment diyagramı belirlenir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Sistemin yalnız dış yükler etkisindeki moment diyagramı

Sonra, sadece hareketli mesnedin düşey tepkisi r ’nin etkisindeki izostatik sistem için moment diyagramı belirlenir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Sistemin yalnız r etkisindeki moment diyagramı

Elde edilen moment diyagramlarından, Denklem 3.1'deki denge durumu, kritik noktalar olarak kabul edilmiş 1, 2 ve 3 noktaları için (Şekil 3.4), aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -35 \\ -10 \\ 0 \end{bmatrix} \alpha + \begin{bmatrix} 10 \\ 5 \\ 2.5 \end{bmatrix} r \dots\dots\dots (3.3)$$

Kritik kesitler için, akma şartı matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} -10 \\ -10 \\ -10 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.4)$$

Bulunan matris değerleri kullanılarak, problem aşağıdaki gibi bir doğrusal programlama formatına dönüştürülebilir. (Loi 2009).

- Hedef fonksiyon: maks α
- Değişkenler: α, r
- 1.Kısıtlayıcı: $-35\alpha + 10r \leq 10$
- 2.Kısıtlayıcı: $-35\alpha + 10r \geq -10$
- 3.Kısıtlayıcı: $-10\alpha + 5r \leq 10$
- 4.Kısıtlayıcı: $-10\alpha + 5r \geq -10$
- 5.Kısıtlayıcı: $2.5r \leq 10$
- 6.Kısıtlayıcı: $2.5r \geq -10$

3.2. Doğrusal Programlama

Hedef fonksiyonu ve kısıtlayıcıları, tasarım değişkenlerinin doğrusal formatında verilen optimizasyon problemleri, doğrusal programlama problemi olarak adlandırılır. Her ne

kadar çoğu mühendislik optimizasyon problemleri, doğrusal olmayan denklemler vasıtasıyla tanımlansalar da, limit analiz gibi problemler doğrusal olarak tanımlanır. Ayrıca, bazı doğrusal olmayan optimizasyon problemleri, doğrusal programlama problemlerine dönüştürülerek çözüm yapılır. Çoğunlukla, finans ve ekonomi alanlarında uygulamaları olsa bile, yukarıda verilen nedenlerden dolayı mühendislik alanında da kullanımı yaygındır (Kaymaz 2006).

Doğrusal programlama probleminin genel formu iki şekilde verilebilir.

1) Skalar Form

Hedef fonksiyon;

$$\min. f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \dots \dots \dots (3.5)$$

Kısıtlayıcılar;

$$\left. \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (3.6)$$

2) Matris Formu

Hedef fonksiyon;

$$\min. f(x) = c^T x \dots \dots \dots (3.7)$$

Kısıtlayıcılar;

$$\left. \begin{array}{l} ax = b \\ x \geq 0, b \geq 0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (3.8)$$

Denklem 3.7 ve Denklem 3.8’de yer alana matris ve vektörler aşağıda açık bir şekilde verilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}} \right\} \dots\dots\dots (3.9)$$

Doğrusal programlamanın genel özellikleri şöyledir;

- Hedef fonksiyon en küçük yapılacak optimizasyon problemi tipindedir
- Bütün kısıtlayıcı fonksiyonları, eşitlik kısıtlayıcı tipindedir
- Bütün tasarım değişkenleri pozitiftir
- $b \geq 0$ olmalıdır. Bu şartın sağlanmaması durumunda kısıtlayıcı -1 ile çarpılır
- Eğer problemde eşitsizlik kısıtlayıcısı ya da sınırsız değişkenler var ise, bu ifadeler çeşitli yöntemlerle istenilen formata dönüştürülür (Kaymaz 2006).

Optimizasyon problemlerinin çözümünde, mevcut matematiksel metotların yanı sıra Matlab’ deki hazır kütüphanelerin kullanımı ile de çözümlemeler yapılabilir. Doğrusal programlama için Matlab’ de “linprog” komutu kullanılmaktadır.

Matlab’ de kullanılan doğrusal programlama probleminin formu aşağıda verilmiştir.

$$\left. \begin{array}{l} \min_x f^T * x \\ A * x \leq b \\ A_{eq} * x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.10)$$

Yukarıdaki ifadeler içinde f, x, b, beq, lb ve ub değişkenleri vektör, A ve A_{eq} değişkenleri ise birer matristir. Büyük boyutlu optimizasyon problemleri için Mehrotra Algoritması’nın değişik bir versiyonu olan “linear interior point solver” metodu

kullanılır. Orta büyüklükteki sistemler için ise, Simplex Metodu'nun değişik bir uygulaması olan İzdüşüm Metodu kullanılır (Arifoğlu 2005).

Aşağıda “linprog” komutunun uygulanış biçimleri gösterilmiştir

`x = linprog(f,A,b)`

`x = linprog(f,A,b,Aeq,beq)`

`x = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub)`

`x = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub,x0)`

`x = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub,x0,options)`

`x = linprog(problem)`

`[x,fval] = linprog(...)`

`[x,fval,exitflag] = linprog(...)`

`[x,fval,exitflag,output] = linprog(...)`

`[x,fval,exitflag,output,lambda] = linprog(...)`

Burada temel kullanım benzer olmakla birlikte, optimizasyon problemi ile alakalı ne tür bir bilgi girişi yapılacağı ve optimum çözüm elde edildiğinde ne tür sonuçların, komut tanımlanmada eşitliğin sağ tarafında verilen değişkenlere atanacağı tanımlanır. Dolayısıyla, komutta ilgili değişkenlerin mutlaka tanımlı olması gerekir. Bu nedenle Çizelge 3.1’de “linprog” komutunun alacağı parametrelerin detaylı açıklaması verilmiştir (Kaymaz 2006).

Çizelge 3.1. Matlab programında “linprog” komutu seçenekleri

Parametre	Anlamı
Girdi Parametreleri	
f	Hedef fonksiyonu içeren vektör.
A,b	Doğrusal eşitsizlik kısıtlayıcı fonksiyonun katsayıları . ($A*x \leq b$)
Aeq,beq	Doğrusal eşitlik kısıtlayıcı fonksiyonun katsayıları. ($Aeq*x = beq$)
lb	Dizayn değişkenlerin alt sınırıdır.
ub	Dizayn değişkenlerin üst sınırıdır.
x0	Tasarım değişkenlerinin başlangıç değerleridir.
options	Optimizasyon algoritmasını kontrol eden seçeneklerdir.
Çıktı Parametreleri	
x	Optimum tasarım değişkenlerinin atandığı vektör.
fval	Optimum noktada hedef fonksiyonun değeridir.
exitflag	Seçilen algoritmanın sonuca yakınsayıp yakınsamadığını belirtir. Eğer sıfırdan büyükse uygun bir çözüm bulunmuştur.
output	Optimizasyon çözümü hakkında daha detaylı bilgi verir.
lambda	Lamda değerlerini çıkışta boyut olarak çıkarır.

Bu fonksiyonların kullanımıyla Şekil 3.4’de verilen örneğin çözümünün, “linprog” komutu ile Matlab’de nasıl kodlanacağı aşağıda açıklanmıştır.

Öncelikle, hedef fonksiyonu içeren f vektörü tanımlanmalıdır. Problemde tanımlanan α ve r değişkenlerinden, α , yani göçme yükü katsayısı en büyük yapılmak istenirken, r değişkenin aldığı değer önemli değildir. Doğrusal programlamada amaç, hedef fonksiyonu en küçük yapmak olduğundan, en büyük değere ulaşmak için a değişkeninin katsayısı -1 olarak alınırken, r değişkenin katsayısı ise 0 olacaktır.

Eşitsizlik kısıtlayıcılarının öncelikle, $A*x \leq b$ şeklindeki forma getirilmeleri gerekir. Daha sonra A ve b matrisleri oluşturulur.

- 1.Kısıtlayıcı: $-35\alpha + 10r \leq 10$
- 2.Kısıtlayıcı: $-35\alpha + 10r \geq -10 \Rightarrow 35\alpha - 10r \leq 10$
- 3.Kısıtlayıcı: $-10\alpha + 5r \leq 10$
- 4.Kısıtlayıcı: $-10\alpha + 5r \geq -10 \Rightarrow 10\alpha - 5r \leq 10$
- 5.Kısıtlayıcı: $2.5r \leq 10$
- 6.Kısıtlayıcı: $2.5r \geq -10 \Rightarrow -2.5r \leq 10$

Son olarak doğrusal programlama komutu istenilen biçimde oluşturulur. En basit formda oluşturulmuş program kodu aşağıda verilmiştir.

```
f=[-1;0];
A=[-35 10
35 -10
-10 5
10 -5
0 2.5
0 -2.5];
b=[10;10;10;10;10;10];
x = linprog(f,A,b)
```

3.3. Rijit-Blok Analizde Alt-Sınır Teoreminin Uygulanması

İlk olarak Livesley'in kâgir kemerlerin analizi için geliştirdiği, alt-sınır teoreminin kullanıldığı rijit-blok analiz yönteminin benzeri bir uygulama, Ring 2.0 programı için geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Anonymous 2009b).

Yöntem basitçe, belirli sayıda bloktan oluşan sistemde, denge ve akma kısıtlayıcılarına bağlı olarak, doğrusal programlama yardımıyla göçme yükü faktörünün en büyük yapılmasını amaçlamaktadır (Anonymous 2009b).

Kâgir yapıların analizinde kullanılan akma kriterleri, çelik ve betonarme yapılarda kullanılanlardan farklılık göstermektedir. Çelik ve betonarme olarak imal edilmiş çerçeve yapılarda, eğilme momenti diyagramları, akma kriterinin kontrolünde

kullanılabilmektedir. Kâgir yapılarda ise, mukavemet momenti, normal kuvvetin büyüklüğüne ve kesitin kalınlığına bağlı olarak, yapı boyunca farklı değerler alabilmektedir. Bu nedenle, kesitin plastik moment kapasitesi yerine farklı kavramlar, akma kriterleri olarak, analizde dikkate alınmaktadır. Bu durumdan dolayı akma kriteri olarak, malzemede oluşan gerilmelerin, her noktada malzeme dayanımına eşit ya da daha küçük olmalısı şartı kullanılır. Yani, malzemenin kesme, çekme ve ezilme dayanımları aşılmamalıdır (Gilbert 2007).

Kemerlerde kullanılan malzemenin basınç dayanımının sonsuz olup olmadığı kabulüne bağlı olarak akma kısıtlayıcıları değişmektedir. İlk olarak taşların basınç dayanımı sonsuz kabul edilirse, sistemde s adet blok ve c adet ara yüzey olmak üzere, problem aşağıdaki gibi olacaktır (Anonymous 2009b; Gilbert 2007).

Hedef fonksiyon; maks. α

Denge kısıtlayıcıları; $B.q - \alpha.f_L = f_D \dots\dots\dots (3.11)$

Akma kısıtlayıcıları;

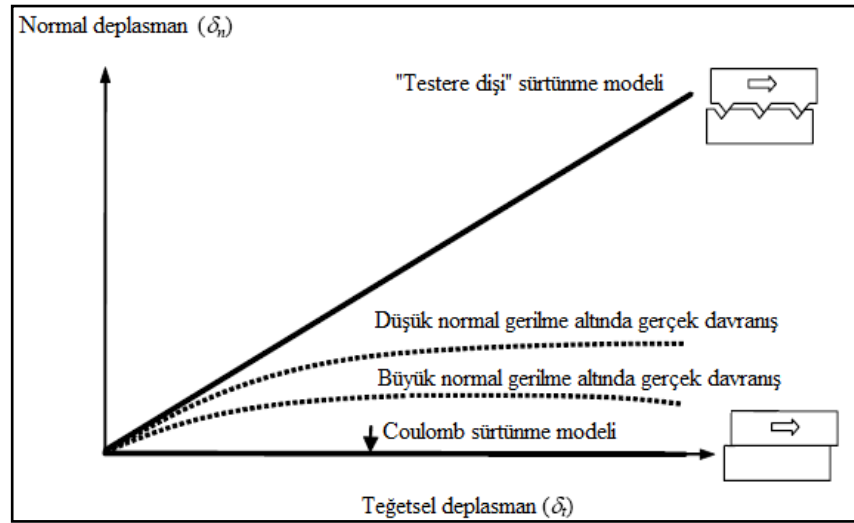
a) Çekme gerilmesi oluşmaması şartı;

Bunun için kesitteki, basınç kuvvetinin dışmerkezliği hesaplanır ($e=M/N$) ve basınç çizgisinin kesitin sınırları içinde kalıp kalmadığı kontrol edilir. Eğer basınç çizgisi kesitin sınırları içindeyse, yani $|e| \leq (b/2)$ şartı sağlanıyorsa, akma kriterlerinden ilki sağlanmış demektir. Bu şart aşağıdaki gibi eşitsizlik kısıtlayıcıları formunda ifade edilebilir (Gilbert 2007).

$$\left. \begin{array}{l} M_i \leq 0.5N_i.b_i \\ M_i \geq -0.5N_i.b_i \end{array} \right\} (i=1,2,\dots,c) \dots\dots\dots (3.12)$$

b) Kayma kısıtlayıcıları;

Kemer bloklarının arasındaki kaymadan dolayı meydana gelen kayma göçmesi, çoğu analiz metodundan farklı olarak, bu yöntemde dikkate alınmıştır. Bu amaçla, bloklar arasındaki sürtünmeyi tanımlamak için “testere dişi” sürtünme modeli kullanılmıştır. Bu modele göre, bloklar arasında kaymaya eşlik eden açılmalar meydana gelecektir. Bu modelin kullanılmasının esas üstünlüğü, genel analiz programının doğrusal karakterinin korunmuş olmasıdır. Başka bir sürtünme modeli olan, bloklar arası açılmanın kaymayla birlikte oluşmadığı kabulü yapılan, Coulomb modeli ise limit analiz yönteminde kullanımının problemlili olması nedeniyle tercih edilmemiştir. Sözü edilen bu iki sürtünme modeli ve derzlerdeki gerçek kayma davranışı Şekil 3.7’de gösterilmiştir (Anonymous 2009b; Gilbert 2007).

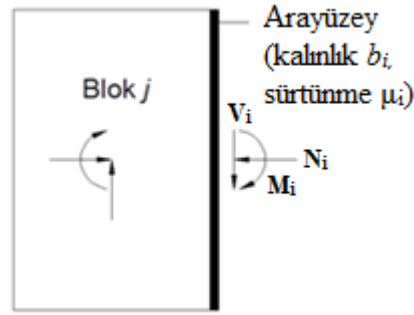


Şekil 3.7. İdealleştirilmiş kayma modelleri ve derzlerdeki gerçek davranışı

Yapılan sürtünme modeline bağlı olarak, kayma kısıtlayıcıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\left. \begin{array}{l} V_i \leq \mu_i \cdot N_i \\ V_i \geq -\mu_i \cdot N_i \end{array} \right\} (i = 1, 2, \dots, c) \dots\dots\dots (3.13)$$

Burada, α göçme yükü faktörü, B doğrultu kosinüslerini içeren $(3s \times 3c)$ boyutundaki denge matrisi, b bloğun kalınlığı, μ bloklar arasındaki sürtünme katsayısı, q ve f ise sırasıyla, temas yüzeylerindeki kuvvetlerin ve blok yüklerinin vektörleridir. Ayrıca $q^T = \{N_1, V_1, M_1, N_2, V_2, M_2 \dots N_c, V_c, M_c\}$ şeklindedir ve de f_D ve f_L sırasıyla ölü ve dış yüklerin vektörleri olmak üzere $f = f_D + \alpha \cdot f_L$ biçimindedir. Bu ifadeler Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Blok ve ara yüzey kuvvetleri

Bu şekilde oluşturulan doğrusal programlama probleminde, ara yüzeylerdeki kuvvetler, yani N_i , V_i , M_i ve hesaplanmak istenen göçme yükü faktörü α , problemin değişkenleridir. Burada, $(N_i \geq 0)$ olmalıdır ve V_i , M_i ise kısıtlanmamış serbest değişkenlerdir.

Çekme oluşmaması şartı için verilen kısıtlayıcılar yalnızca taşların basınç dayanımının sonsuz olduğu kabulü yapılırsa geçerlidir. Taşların basınç dayanımı sonsuz değilse taşlarda ezilme tahkiki yapılmalıdır ve çekme kısıtlayıcıları yerine ezilme kısıtlayıcıları kullanılmalıdır. Ezilme tahkikiinde, kesitte meydana gelebilecek en büyük basınç gerilmesi değerinin, malzemenin basınç dayanımından küçük olması şartı kullanılır. Bu şart, kesitteki normal kuvvet ve moment değeri dikkate alınır, aşağıdaki eşitsizlikle ifade edilebilir (Anonymous 2009b).

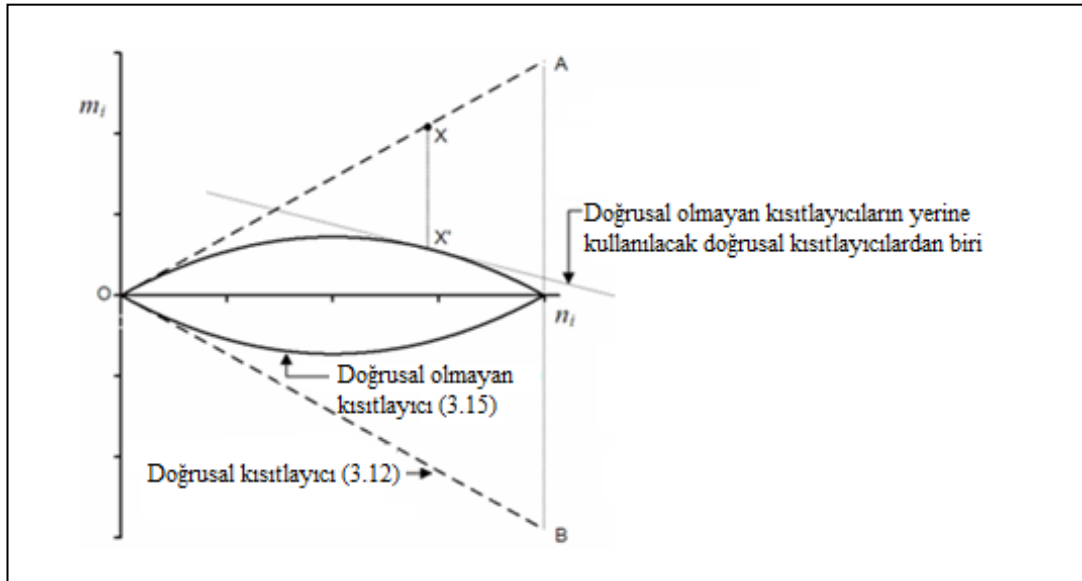
$$\overline{M} + 2\overline{N}(1 + \overline{N}) \leq 0 \dots\dots\dots (3.14)$$

Burada $\bar{N} = N / N_p$, $\bar{M} = M / M_p$ ve $N_p = b.t.\sigma_c$, $M_p = 1/(4.b.t^2.\sigma_c)$ şeklindedir ve b , t , σ_c ise sırasıyla, kesitin kalınlığı, derinliği ve malzemenin basınç dayanımıdır (Cavicchi and Gambarotta 2007).

Bu durumda, Denklem 3.14'den hareketle, çekme oluşmaması kısıtlayıcılarının yerini alacak ezilme kısıtlayıcıları, aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\left. \begin{aligned} M_i &\leq N_i \left(0.5b_i - \frac{N_i}{2\sigma_c t} \right) \\ M_i &\geq -N_i \left(0.5b_i - \frac{N_i}{2\sigma_c t} \right) \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, c \dots\dots\dots (3.15)$$

Bununla birlikte, verilen ezilme kısıtlayıcıları doğrusal değildir. Doğrusal programlamanın kullanılabilmesi için bu kısıtlayıcıların, doğrusal kısıtlayıcıların bir serisi şekline getirilmesi gereklidir. Bunun için geliştirilen algoritma Şekil 3.9'a bağlı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.9. Blok ara yüzeyindeki normal kuvvet ve momente bağlı kısıtlayıcılar

1. Başlangıçta her bir ara yüzey için, çekme oluşmaması kısıtlayıcıları (OA ve OB) ve ezilme kısıtlayıcılarından elde edilen, N_i 'nin en büyük değerini sınırlandıran AB doğrusal kısıtlayıcıları kullanılır. Doğrusal programlama kullanılarak bu kısıtlayıcılara bağlı bir çözüm değeri elde edilir.
2. Her bir ara yüzey için, son çözümden elde edilen N_i ve M_i değerleri ezilme kısıtlayıcılarında yerine konarak, kısıtlayıcıların sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Eğer kısıtlayıcılardan biri ihlal edilmişse, ihlal faktörü k_i hesaplanır.

$$k_i = \frac{|M_i|}{N_i \left(0.5b_i - \frac{N_i}{2\sigma_c t} \right)} \dots\dots\dots (3.16)$$

3. Eğer $k_i > 1$ olursa, bu durumun geçerli olduğu her bir ara yüzey için, doğrusal bir kısıtlayıcı eklenir. Bunun için, N_i değerleri kullanılarak hesaplanan M_i değerleri dikkate alınır, doğrusal olmayan ezilme kısıtlayıcısına bu noktalardan teğetler çizilir ve bu teğetlerin denklemleri doğrusal kısıtlayıcı olarak, ezilme kısıtlayıcılarının yerine kullanılır. Şekil 3.9'da belirli bir N_i değerine karşılık gelen ve Denklem 3.15 kullanılarak hesaplanan M_i değeri ile bu noktadan çizilen teğet yani doğrusal kısıtlayıcı gösterilmiştir.

Eklenen yeni doğrusal kısıtlayıcılar ile yeniden bir çözüm yapılarak 3. adımdan itibaren yapılan işlemler, $k_i < 1 + tol$ şartı sağlanan kadar tekrarlanır. Burada tol , uygun küçük bir değer olarak alınır (Anonymous 2009b).

X yönündeki kuvvetlerin dengesi:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow -V_1 + V_2 \sin 30 - N_2 \cos 30 = 0 \Rightarrow -V_1 + \frac{V_2}{2} - N_2 \frac{\sqrt{3}}{2} = 0$$

Y yönündeki kuvvetlerin dengesi:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -N_1 + V_2 \cos 30 + N_2 \sin 30 + \alpha + 1 = 0 \Rightarrow -N_1 + V_2 \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{N_2}{2} + \alpha = -1$$

Bloğun merkezi dikkate alınarak momentlerin dengesi:

$$\begin{aligned} \sum M_o = 0 &\Rightarrow -V_1 \cdot y - N_1 \cdot x - M_1 - V_2 \cdot y + N_2 \cdot x + M_2 = 0 \\ &\Rightarrow -4.662V_1 - 2.674N_1 - M_1 - 4.662V_2 + 2.674N_2 + M_2 = 0 \end{aligned}$$

Benzer şekilde B ve C blokları içinde denge denklemleri elde edilir. Sonra akma kısıtlayıcıları oluşturulmalıdır. 1 numaralı ilk ara yüzey için akma kısıtlayıcıları aşağıdaki gibi olacaktır.

Kemer kalınlığının 1.5 birim olduğu dikkate alınarak, çekme oluşmaması şartı için kısıtlayıcılar:

$$\begin{aligned} M_1 &\leq 0.5N_1 \times 1.5 \\ &\Rightarrow -0.5N_1 \times 1.5 + M_1 \leq 0 \\ M_1 &\geq -0.5N_1 \times 1.5 \\ &\Rightarrow -0.5N_1 \times 1.5 - M_1 \leq 0 \end{aligned}$$

Kayma kısıtlayıcıları:

$$\begin{aligned} V_1 &\leq 0.6 \times N_1 \\ &\Rightarrow V_1 - 0.6 \times N_1 \leq 0 \\ V_1 &\geq -0.6 \times N_1 \\ &\Rightarrow -V_1 - 0.6 \times N_1 \leq 0 \end{aligned}$$

Benzer şekilde 2, 3 ve 4 numaralı ara yüzeyler için de kısıtlayıcılar elde edilir. Bütün sistem için denge ve akma kısıtlayıcıları belirlendikten sonra, doğrusal programlama yardımıyla göçme yükü faktörü α , maksimize edilerek istenilen çözüme ulaşılır (Anonymous 2009b).

3.4. Kâgir Kemer Köprülerin Rijit-Blok Analiz Metoduyla Analizi

Bu bölümde, alt-sınır teoreminin kullanıldığı rijit-blok analiz yöntemiyle, tek açıklıklı kâgir kemer köprülerin göçme yükünü bulmaya yönelik olarak yapılan çalışma anlatılacaktır.

Matlab kullanılarak geliştirilen ve “KEMER” adı verilen programın içerdiği algoritmanın temel adımları aşağıda sıralanmış ve ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

1. Analizde ihtiyaç duyulan verilerin girilmesi
2. Kemer geometrisini oluşturulması
3. Ölü yüklerin ve etkime noktalarının belirlenmesi
4. Denge kısıtlayıcılarını ihtiva eden matrisin oluşturulması
5. Akma kısıtlayıcılarını ihtiva eden matrisin oluşturulması
6. Doğrusal programlama ile göçme yükünün belirlenmesi

1) Veri girişi

Oluşturulan program, ilk olarak analiz için gerekli olan verilerin girilmesini istemektedir. İhtiyaç duyulan bu değerler aşağıda verilmiştir.

a) Köprü geometrisinin oluşturulması için gerekli parametreler

- Kemer açıklığı (L)
- Kemer yüksekliği (f)
- Kemer üst dolgusunun yüksekliği (H)

- Kemerin kalınlığı (b)
- Köprünün genişliği (w)
- Kemerin içerdığı blok sayısı (s)

b) Ölü yüklerin belirlenmesi için gerekli parametreler ve dış yükün uygulanma noktası

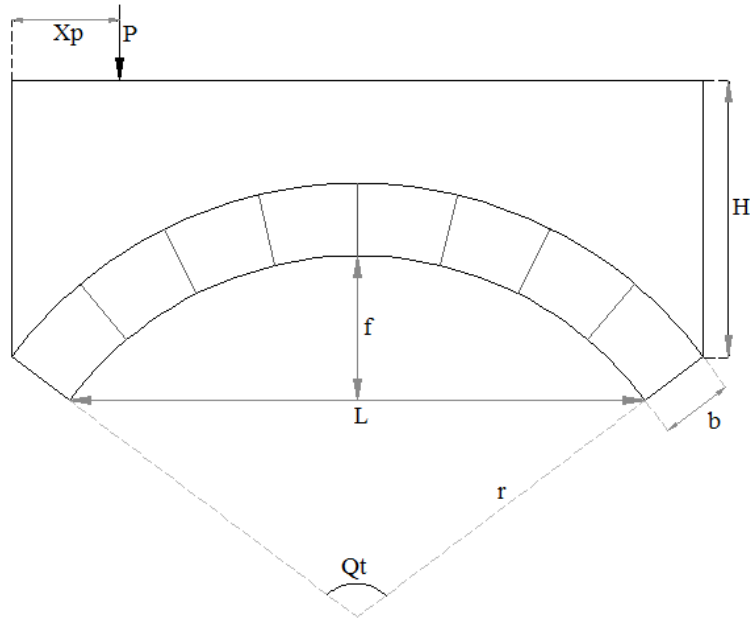
- Kemerde kullanılan malzemenin (taş, tuğla vb.) birim hacim ağırlığı (G_s)
- Kemer üst dolgusunda kullanılan malzemenin birim hacim ağırlığı (G_b)
- Dış yükün uygulama noktası (X_p)

c) Akma kısıtlayıcıları için gerekli parametreler

- Bloklar arasındaki sürtünme katsayısı (μ)
- Kemerde kullanılan malzemenin basınç dayanımı (σ_c)

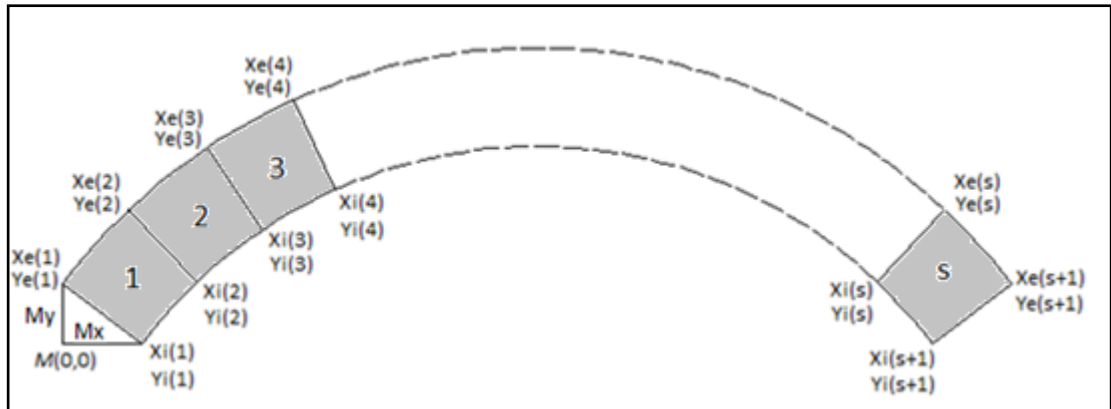
2) Kemer geometrisinin oluşturulması

Veri girişi yapıldıktan sonra, program öncelikle analizde kullanılacak geometrik parametreleri belirlemektedir. Kemerin şeklinin “dairesel kemer” olduğu kabulü yapılmıştır. Bu nedenle öncelikle iç yayın (kemer karnının) merkezi belirlenmekte ve daire yayının yarıçapı (r) ve merkezden yaya bakan toplam açı (Q_i) hesaplanmaktadır. Köprünün genel geometrisi Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. KEMER programında kullanılan genel köprü geometrisi

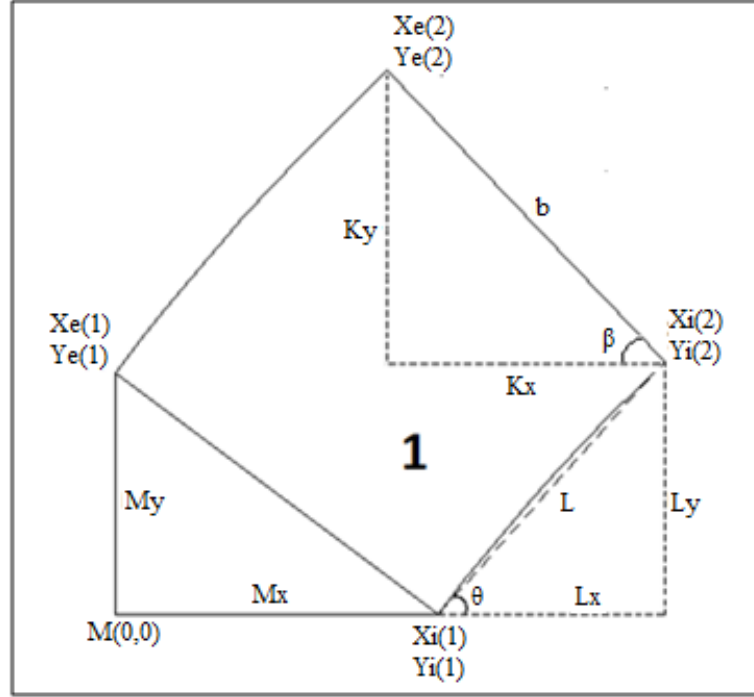
Sonra her bir ara yüzeyin kemer karnı ve kemer sırtına temas ettiği noktaların koordinatları tespit edilmektedir.



Şekil 3.13. Kemer oluşturulan blokların koordinatları

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi koordinat ekseninin merkezi olarak $M(0,0)$ noktası kabul edilmiştir. Dolayısıyla $Xe(1)=0$ ve $Yi(1)=0$ olacaktır. İlk ara yüzeyin diğer koordinatları olan $Xi(1)$ ve $Ye(1)$ ise, Mx ve My mesafeleri hesaplanarak belirlenir.

Diğer ara yüzeylerin koordinatlarının nasıl hesaplandığı Şekil 3.14'e bağlı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3.14. Kemerdeki ilk blok için ara yüzeylerin koordinatları

Kemer karnı yani iç yay dikkate alınır, bloğun başlangıç ve bitiş noktalarını birleştiren doğrunun (L) uzunluğu ve bu doğrunun yatayla yaptığı açı (θ) hesaplanır. Sonra L_x ve L_y uzunlukları hesaplanarak ikinci ara yüzeyin koordinatları aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$X_i(2) = X_i(1) + L_x$$

$$Y_i(2) = Y_i(1) + L_y$$

Dış yaydaki, yani kemer sırtındaki koordinatlar için ise öncelikle (β) açısı belirlenir. Kemer kalınlığını gösteren (b) değeri bilindiğinden K_x ve K_y uzunlukları hesaplanır ve bu değerler, mevcut ara yüzeyin iç yaydaki koordinatlarına eklenerek ya da çıkarılarak dış koordinatlar bulunmuş olur.

$$Xe(2) = Xi(2) - Kx$$

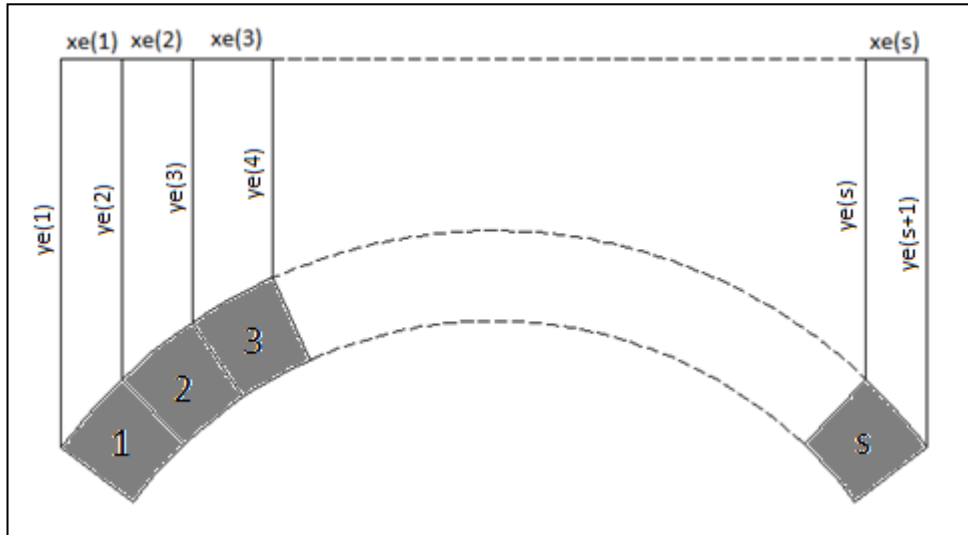
$$Ye(2) = Yi(2) + Ky$$

Blokların her biri için benzer işlemler yapılarak koordinat vektörleri oluşturulur.

$$\left. \begin{aligned} Xe &= [Xe(1), Xe(2), \dots, Xe(s+1)] \\ Ye &= [Ye(1), Ye(2), \dots, Ye(s+1)] \\ Xi &= [Xi(1), Xi(2), \dots, Xi(s+1)] \\ Yi &= [Yi(1), Yi(2), \dots, Yi(s+1)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.17)$$

3) Dolgu parçalarının alanlarının hesaplanması

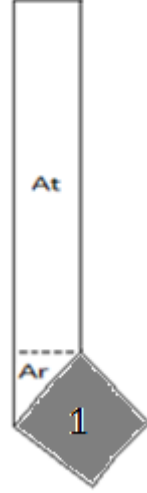
Kemer köprüünün üzerine ölü yük olarak etkiyecek olan dolgu ağırlığının belirlenebilmesi için her bir bloğun üzerinde kalan dolgu ağırlığı ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şekil 3.15). Dolgu ağırlığının hesaplanabilmesi için öncelikle, blok üzerindeki dolgu parçasının alanı ve ağırlık merkezi hesaplanmalıdır.



Şekil 3.15. Kemer bloklarının üzerindeki dolgu parçaları

Dolgu parçalarının alanlarının hesaplanabilmesi için öncelikle, $xe(i)$ için $i=1,2,\dots,s$ ve $ye(i)$ için $i=1,2,\dots,s+1$ olmak üzere, $xe(i)$ ve $ye(i)$ uzunlukları hesaplanmıştır. Sonra,

dolgu parçalarının her birinin yamuk şeklinde olduğu kabulüyle alanları ve ağırlık merkezleri hesaplanmıştır (Şekil 3.16).

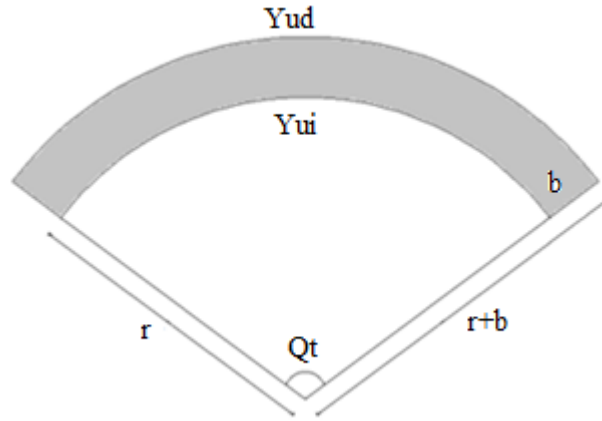


Şekil 3.16. Kemerdeki ilk bloğun üzerindeki dolgu parçası

Her bir parça dikdörtgen ve üçgen parçalara ayrılmıştır. Dikdörtgen parçanın alanı (A_t) ve üçgen parçanın alanı (A_r) ve bu parçaların ağırlık merkezlerinin apsisi, hesaplanmış ve bu değerlerden yamuk dolgu parçasının toplam ağırlığı ve ağırlık merkezi koordinatları bulunmuştur.

4) Blokların alanlarının ve ağırlık merkezlerinin hesaplanması

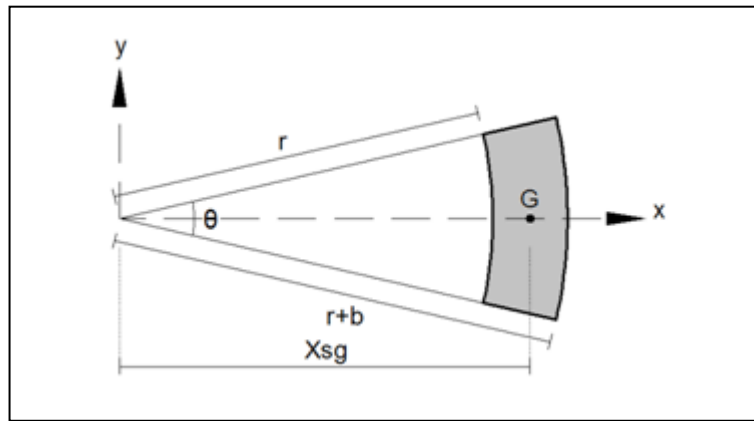
Kemerdeki her bir bloğun alanı, kemerin eşit parçalara ayrıldığı kabulünden dolayı birbirine eşit olacaktır. Bu nedenle kemerin toplam alanı hesaplanmış ve blok sayısına bölünmüştür (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Kemerin toplam yüzey alanı

Öncelikle, dış yayın ve iç yayın uzunlukları olan Y_{ud} ve Y_{ui} hesaplanmaktadır. Sonra büyük daire diliminin alanından, küçük daire diliminin alanı çıkarılarak kemerin toplam alanı A_k hesaplanır. Bu değer toplam blok sayısına bölünerek, her bir bloğun alanı olan A_s bulunur.

Blokların ağırlık merkezlerinin bulunması ise Şekil 3.18'ye bağlı olarak aşağıda anlatılmıştır.



Şekil 3.18. Bloğun ağırlık merkezinin koordinatı

Bloklar, kemerin merkezi dikkate alınarak daire dilimleri şeklinde parçalar haline getirilmiştir. Sonra yayların orta noktası, x eksenineyle çakışacak şekilde döndürülmüş daire dilimleri yardımıyla, bloğun ağırlık merkezinin apsisi (X_{sg}) hesaplanır. Bunun için büyük ve küçük daire dilimlerinin alanları ve ağırlık merkezlerinin koordinatları hesaplanır ve bu değerler kullanılarak (X_{sg}) değeri bulunur.

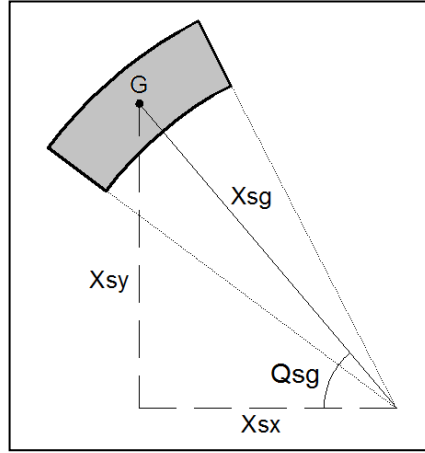
$$\left. \begin{aligned} A_{yd} &= \left(\frac{\theta}{2} \right) (r+b)^2 \\ A_{yi} &= \left(\frac{\theta}{2} \right) (r)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\left. \begin{aligned} X_{yd} &= \frac{2.\sin(\theta/2).(r+b)}{3(\theta/2)} \\ X_{yi} &= \frac{2.\sin(\theta/2).(r)}{3(\theta/2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$X_{sg} = \frac{(A_{yd}.X_{yd}) - (A_{yi}.X_{yi})}{(A_{yd} - A_{yi})} \dots\dots\dots (3.20)$$

Yukarıdaki formüllerde, A_{yd} ve A_{yi} sırasıyla, büyük daire diliminin ve küçük dilimin alanlarını, X_{yd} ve X_{yi} , büyük ve küçük daire dilimlerinin ağırlık merkezlerinin x koordinatlarını, X_{sg} ise kemer bloğunun ağırlık merkezinin, x eksenindeki uzunluğudur.

Bloğun gerçek konumundaki ağırlık merkezinin koordinatları ise, bloğun ağırlık merkeziyle, dairenin merkezini birleştiren doğrunun yatayla yaptığı açı Q_{sg} , hesaplanmakta ve buradan bulunan X_{sy} ve X_{sx} uzunlukları ve kemer karnı koordinatları kullanılarak her bir blok için belirlenmektedir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Kemer bloğunun gerçek konumundaki ağırlık merkezi

5) Ölü yüklerin hesaplanması

Geometrik parametreler belirlendikten sonra, blokların ve dolgu parçalarının ağırlıkları hesaplanmaktadır. Bütün blokların ağırlıkları birbirine eşittir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Ws = As.w.Gs \dots\dots\dots (3.21)$$

Burada, Ws , blok ağırlığı, As blokların alanı, w , kemer genişliği ve Gs ise kemerde kullanılan malzemenin birim hacim ağırlığıdır.

Blokların üstünde kalan alanlar farklı olduğundan, kemer dolgu parçalarının ağırlıkları da farklı olacaktır. Yamuk şeklinde olduğu kabul edilen dolgu bloklarının ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

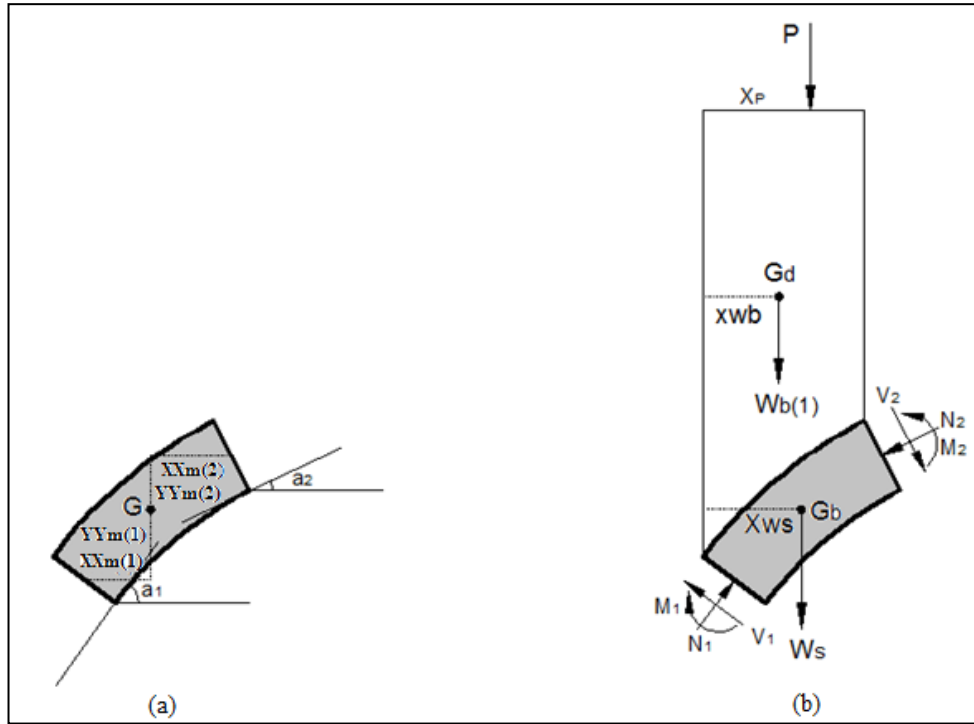
$$Wb(i) = (At + Ar).w.Gb \dots\dots\dots (3.22)$$

Burada $i = 1, 2, \dots, s$ olmak üzere, Ar ve At sırasıyla, dolgu parçasını oluşturan üçgen ve dikdörtgen kısımların alanı, w , kemer genişliği ve Gb , dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığıdır.

Her bir blok için, bloğun ve bloğun üstündeki dolgu parçasının ağırlığı, bloğa hesaplanan ağırlık merkezlerinden ölü yük olarak etki ettirilmiştir.

6) Denge kısıtlayıcılarının oluşturulması

Rijit-blok analiz metodunun alt-sınır teoremi kullanılarak uygulanmasında, sağlanması gereken iki koşuldan ilki denge şartıdır. Bu nedenle her bir bloğun dengesi dikkate alınarak denge kısıtlayıcılarını içeren matris oluşturulmuştur. Şekil 3.20’de gösterilen bloğun dengede olması için, statik denge eşitlikleri sağlanmalıdır.



Şekil 3.20. Birinci bloğun denge durumu için kuvvetler ve mesafeler

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow N_1 \cos(\alpha_1) - V_1 \sin(\alpha_1) - N_2 \cos(\alpha_2) + V_2 \sin(\alpha_2) = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow -N_1 \sin(\alpha_1) - V_1 \cos(\alpha_1) + N_2 \sin(\alpha_2) + V_2 \cos(\alpha_2) + W_b(1) + W_s + P = 0$$

$$\begin{aligned} \sum M_o = 0 \Rightarrow & Wb(1)(Xws - xwb) - V_1 \sin(a_1)(YYm(1)) - V_1 \cos(a_1)(XXm(1)) + N_1 \cos(a_1)(YYm(1)) \\ & - N_1 \sin(a_1)(XXm(1)) - V_2 \cos(a_2)(XXm(2)) - V_2 \sin(a_2)(YYm(2)) \\ & + N_2 \cos(a_2)(YYm(2)) - N_2 \sin(a_2)(XXm(2)) - M_1 + M_2 + P(Xws(1) - Xp) = 0 \end{aligned}$$

Yukarıdaki denge denklemlerinde bilinmeyenler, birinci ve ikinci ara yüzlerde yer alan, kesme kuvvetleri (V_1 ve V_2), normal kuvvetler (N_1 ve N_2), momentler (M_1 ve M_2) ve de uygulanan dış yük olan (P) değeridir. Hesaplanmak istenen bu değerlerin katsayıları, doğrusal programlamada kullanılacak matrislere atanmaktadır. Benzer şekilde, sistemdeki her bir blok için aynı işlemler yapılarak, katsayılar matrise eklenir ve böylece denge şartından gelen ve Denklem 3.10'da gösterilen $A_{eq} \cdot x = beq$ eşitlik kısıtlayıcısı elde edilir.

7) Akma kısıtlayıcılarının oluşturulması

Denge şartı sisteme uygulandıktan sonra, her bir ara yüzeye akma kriterleri uygulanır. Bu işlemde, Bölüm 3.4'de bahsedildiği gibi malzemenin basınç dayanımının sonsuz olup olmamasına bağlı olarak iki farklı durum vardır.

Basınç dayanımının sonsuz olması halinde dikkate alınan akma kriterleri, kayma kriteri ve çekme gerilmesi oluşmaması kriteridir.

Kayma kriteri, Şekil 3.20b'de görülen birinci ara yüzey dikkate alınır, blokların ara yüzeylerindeki sürtünme katsayısı μ olmak üzere, kayma kriteri ve bu kriterin Matlab programındaki doğrusal programlama prosedürüne uygun hale getirilmiş hali aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$\left. \begin{array}{l} V_1 \leq \mu \cdot N_1 \\ V_1 \geq -\mu \cdot N_1 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} V_1 - \mu \cdot N_1 \leq 0 \\ -V_1 - \mu \cdot N_1 \leq 0 \end{array}$$

Doğrusal programda kullanılacak, bu iki kısıtlayıcıdan elde edilecek matrisler aşağıdaki gibidir.

$$Ak = \begin{Bmatrix} V_1 \\ N_1 \\ M_1 \\ P \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & -\mu & 0 & 0 \\ -1 & -\mu & 0 & 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3.23)$$

$$bt = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3.24)$$

Bu matrisler diğer ara yüzeyler için de geçerlidir.

Çekme oluşmaması kriteri ise, kemer kalınlığı b , olmak üzere ilk ara yüzey için aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} M_i \leq 0.5N_i.b \\ M_i \geq -0.5N_i.b \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} M_i - 0.5N_i.b \leq 0 \\ -M_i - 0.5N_i.b \leq 0 \end{Bmatrix}$$

$$At = \begin{Bmatrix} V_1 \\ N_1 \\ M_1 \\ P_1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 & -0.5b & 1 & 0 \\ 0 & -0.5b & -1 & 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3.25)$$

$$bt = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3.26)$$

Denge kriterinden ve akma kriterlerinden elde edilen eşitlik ve eşitsizlik kısıtlayıcılarının matrisleri, ayrı matrisler altında birleştirilir ve doğrusal programlama formatına uygun hale getirilerek analiz yapılır.

Basınç dayanımı sonsuz olmaması halinde Bölüm 3.4’de anlatılan yöntem uygulanmaktadır. İlk olarak, basınç dayanımının sonsuz olduğu durum için geçerli yöntemle analiz yapılarak sistem için bir çözüm bulunur. Sonra elde edilen çözümden, her bir ara yüzey için ezilme şartının kontrolü yapılır ve sağlanmıyorsa, k katsayısının değerine bağlı olarak sisteme yeni bir doğrusal kısıtlayıcı eklenir. Eklenen kısıtlayıcılar, $k_i > 1$ şartının sağlandığı her noktada, ezilme kriterine çizilen teğetin denklemdir.

Bu yeni doğrusal kısıtlayıcıların bulunması için, öncelikle Denklem 3.15’deki ifadelerden N_i değerine karşılık gelen M_i değerleri hesaplanır ve bu noktalardan geçen teğetlerin denklemi belirlenir.

Bir $y(x)$ parabolüne, x_1 bir noktasından çizilen teğetin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$y - y_1 = m(x - x_1) \dots\dots\dots (3.27)$$

Burada, y_1 , x_1 değerine karşılık gelen y değeri ve m ise teğetin eğimidir yani denklemin x_1 noktasındaki türevidir.

Denklem 3.15’deki ilk eşitsizlik dikkate alınırsa, N_1 noktasından geçecek teğetin denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$M - M_1 = m(N - N_1) \Rightarrow M - m.N = M_1 - m.N_1 \dots\dots\dots (3.28)$$

Bu ifadeden elde edilecek eşitsizlik kısıtlayıcısı aşağıdaki gibidir.

$$M - m.N \leq M_1 - m.N_1 \dots\dots\dots (3.29)$$

$$Ae = \begin{Bmatrix} V_1 \\ N_1 \\ M_1 \\ P \end{Bmatrix} \{0 \quad -m \quad 1 \quad 0\} \dots\dots\dots (3.30)$$

$$be = \{M_1 - m.N_1\} \dots\dots\dots (3.31)$$

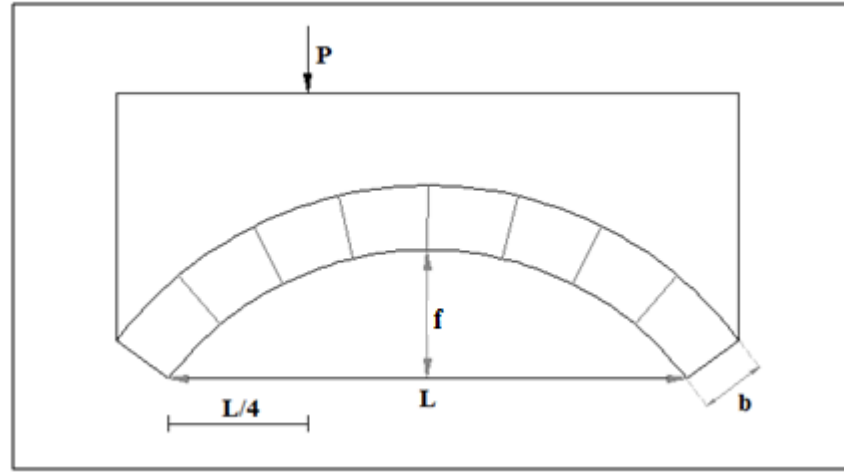
Benzer şekilde ezilme şartının ikinci ifadesinden de elde edilen kısıtlayıcı programa eklenir ve aynı işlemler ara yüzeylerin tamamında yapılan kontrollerle tekrarlanır. Programa eklenen yeni kısıtlayıcılar ile analiz tekrar yapılır ve bulunan yeni çözüm değerleri için de ezilme kısıtlayıcılarının kontrolünden itibaren yapılan işlemler tekrarlanır. Her bir ara yüzey için $k_i < 1 + tol$ şartı sağlanana kadar analiz tekrarlanmakta ve bu şart sağlandığında analiz sona erdirilmekte ve bu noktada hesaplanan P değeri sistemin göçme yükü olarak kabul edilmektedir.

3.5. Kâgir Kemer Köprülerin Göçme Yükünün Parametrik Olarak İncelenmesi

Bir kâgir kemerin göçme yükünü belirleyen parametreler, kemerin açıklığı ve yüksekliği, kemer kalınlığı, kemer üst dolgusunun yüksekliği, yükün konumu gibi köprünün geometrik özellikleri ve bloklar arasındaki sürtünme katsayısı, dolgu ve kemer malzemelerinin basınç dayanımları ve birim hacim ağırlıkları, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı ve kohezyonu gibi malzeme özellikleridir.

Bu bölümde, söz konusu parametrelerden kemer kalınlığı (b), kemer yüksekliği (f), kemeri oluşturan blok adedi (s) ve bloklar arasındaki sürtünme katsayısının (μ), tek

açıklıklı taş kemer köprülerin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, bu dört parametre haricindeki diğer özellikleri aynı olacak şekilde köprüler modellenmiş, her bir parametre için üç farklı değer dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Analizlerde Ring 2.0 programı kullanılmış ve köprüler, literatürde en kritik yükleme noktası olarak kabul edilen açıklığın çeyreğinden noktasal yük ile yüklenmiş ve göçme yükü değerleri belirlenmiştir. Dolgunun kemer üzerindeki yatay pasif basınç etkisi analizlerde dikkate alınmış ayrıca dolgu üzerinden etkiyen yük Boussinesq eşitliği ile kemer üzerine uygulanmıştır.



Şekil 3.21. Analizlerde kullanılan geometrik parametreler

Analiz edilen köprülerin ortak geometrik ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Analizlerde sabit alınan parametreler

Köprülerin Genel Ortak Özellikleri	Değer
Köprünün genişliği	2500 mm
Kemerin açıklığı (L)	5000 mm
Kemer üst dolgusunun yüksekliği	3500 mm
Kemer taşlarının birim hacim ağırlığı	24 kN/m ³
Kemer taşlarının basınç dayanımı	35 N/mm ²
Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı	18 kN/m ³
Yükün konumu	L/4

Göçme yükü üzerindeki etkisi araştırılan parametrelerden, kemer kalınlığı ve kemer yüksekliği, sayısal değerleri yerine, kemer açıklığına oranları hesaplanarak boyutsuz parametreler olarak değerlendirilmiştir. Köprünün taşıma gücü üzerindeki etkisi araştırılan parametreler için kullanılan değerler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Göçme yüküne etkisi araştırılan parametreler ve değerleri

Değişken Değerler		1. Değer		2. Değer		3. Değer	
Kemer kalınlığı (b) (mm)	b/L	300	0,06	450	0,09	700	0,14
Kemer yüksekliği (f) (mm)	f/L	1500	0,3	2000	0,4	2500	0,5
Blok sayısı (s)		20		50		90	
Bloklar arasındaki sürtünme katsayısı		0,4		0,5		0,6	

Bu farklı değerler dikkate alınarak yapılan toplam 81 analiz sonucunda elde edilen göçme yükü değerleri ve köprülerin göçme mekanizmaları EK 1’de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda göçme yükü değerleri ve göçme mekanizmaları dikkate alınarak belirlenen dört parametrenin köprülerin davranışı üzerindeki etkileri Bölüm 4.3’de verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, Kemer programından elde edilen sonuçların güvenilirliğini araştırmak amacıyla, ilk olarak boyutları keyfi olarak seçilmiş bir kemer köprünün, farklı yükleme durumları altında ve farklı malzeme özelliklerine sahip olması durumunda göçme yükleri Kemer programıyla hesaplanmış ve sonuçlar Ring 2.0 programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonra, TRL tarafından deneysel olarak göçme testi yapılmış olan İngiltere'deki Prestwood Köprüsü, geliştirilen Kemer programıyla analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak, seçilen parametrelerin göçme yükü üzerindeki etkisinin belirlenmesi için yapılan analizlerin sonuçları verilmiştir.

4.1. Örnek Bir Kemer Köprü'nün Analizi

İlk olarak geometrisi ve malzeme özellikleri keyfi olarak seçilmiş bir kemer köprü, geliştirilen Kemer programı ve Ring 2.0 programıyla analiz edilmiştir. Analizi yapılan kemer köprü'nün genel özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Örnek kemer köprü'nün geometrisi ve malzeme özellikleri

Köprü Geometrisi ve Malzeme Özellikleri	Kemer	Ring 2.0
Kemerin Açıklığı (L)	4 m	4000 mm
Kemerin Yüksekliği (f)	1 m	1000 mm
Kemer Üst Dolgusunun Yüksekliği (H)	2.2 m	2500 mm
Kemer Kalınlığı (b)	0.5 m	500 mm
Köprü'nün Genişliği (w)	2 m	2000 mm
Kemer Malzemesinin Birim Hacim Ağırlığı (Gs)	25 kN/m ³	25 kN/m ³
Dolgu Malzemesinin Birim Hacim Ağırlığı (Gb)	20 kN/m ³	20 kN/m ³
Kemeri Oluşturan Blok Adedi (s)	20	20
Temas Yüzeylerindeki Sürtünme Katsayısı (μ)	0.4	0.4

Kemer üst dolgusunun yüksekliğindeki farklılık, Ring 2.0 programında bu değerin kemer karnının başlangıcından, Kemer programında ise, kemer sırtının başlangıç noktasından itibaren alınmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan çalışmada kemer üst dolgusunun, dış yükün kemer üzerindeki dağılımına etkisi dikkate alınmadığından bu etki Ring 2.0 programında da analize dahil edilmemiştir. Ayrıca Ring 2.0, sistem göçme yükü katsayısını hesapladığından, dış yük olarak $1kN$ büyüklüğünde tekil bir yük tanımlanmış ve analizde bu yük değeri kullanılmıştır. Analizler ilk olarak, kemer bloklarının basınç dayanımlarının sonsuz olduğu kabulüyle sonra, farklı basınç dayanımına sahip olmaları durumunda yapılmıştır.

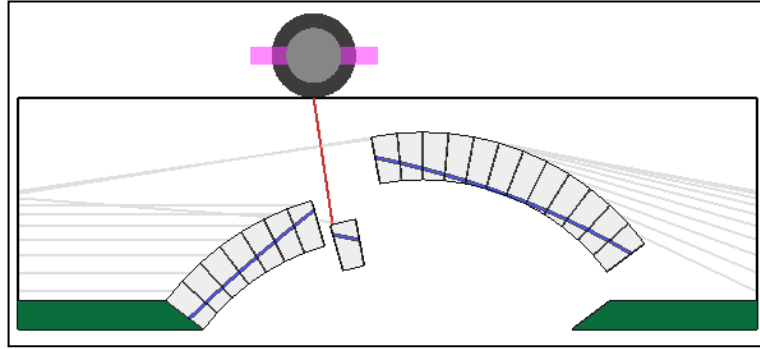
a) Blokların basınç dayanımının sonsuz olması durumu

İlk analizler, kemer malzemesinin basınç dayanımının sonsuz olduğu kabulüyle, yükün farklı noktalardan uygulanması ile yapılmıştır. Yükün uygulama noktasının programlarda farklı gözükmemesinin (Çizelge 4.2) nedeni, koordinat merkezlerinin farklı noktalar olarak alınmasından kaynaklanmaktadır. Ring 2.0, yatay eksenin başlangıcı olarak kemer karnının ilk noktasını, Kemer ise kemer sırtının ilk noktasını dikkate almaktadır. Dış yükün farklı noktalardan uygulanmasıyla elde edilen göçme yükü değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

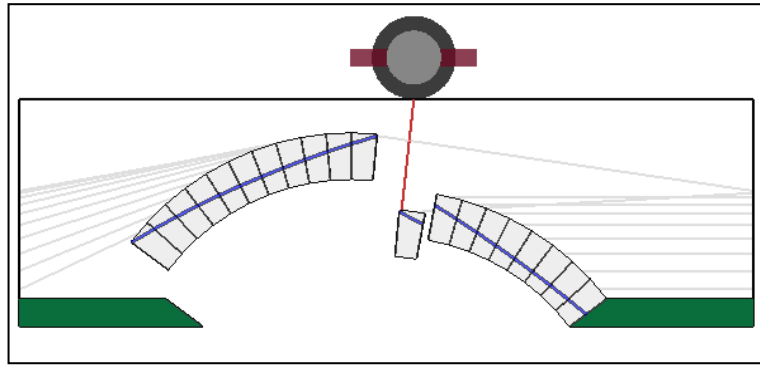
Çizelge 4.2. Sonsuz basınç dayanımı durumunda farklı yükleme noktaları için göçme yükü değerlerinin karşılaştırılması

P Yükünün Tesir Noktaları	Yük Koordinatları		Göçme Yükü Değerleri (kN)	
	Ring 2.0	Kemer	Ring 2.0	Kemer
Xp	1200 mm	1.6 m	525.125	525.3753
	2300 mm	2.7 m	614.041	614.3312

Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi her iki yükleme durumunda da göçme yükü değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Ring 2.0 analizlerinde, her iki yük durumu içinde köprünün “kayma mekanizması” ile göçtüğü görülmüştür.



Şekil 4.1. Ring 2.0’da $X_p = 1.2$ m için örnek köprünün göçme mekanizması



Şekil 4.2. Ring 2.0’da $X_p = 2.3$ m için örnek köprünün göçme mekanizması

b) Blokların farklı basınç dayanımlarının olması durumu

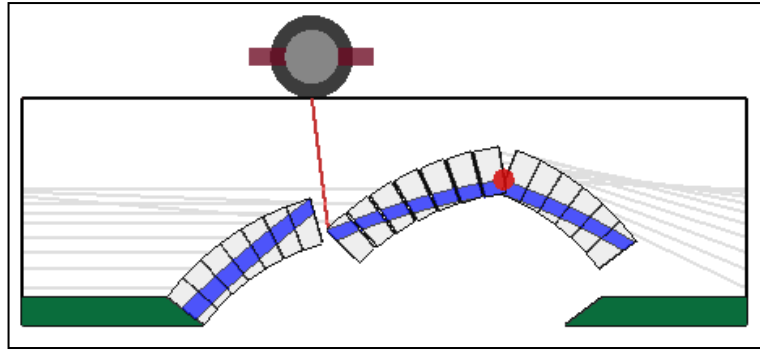
Aynı kemerin analizi, blokların farklı basınç dayanımı değerlerine sahip olması durumu dikkate alınarak yapıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı basınç dayanımı değerleri için farklı yükleme noktalarında elde edilen göçme yükü değerlerinin karşılaştırılması

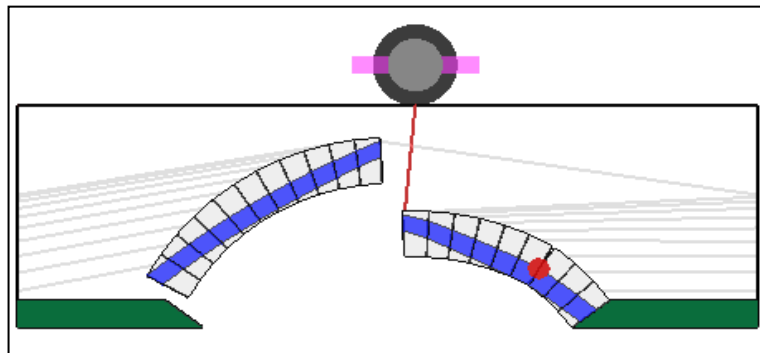
Basınç Dayanımı (σ_c)		Yük Koordinatları		Göçme Yüğü Değerleri (kN)	
Ring 2.0	Kemer	Ring 2.0	Kemer	Ring 2.0	Kemer
2 N/mm ²	2000 kN/m ²	1200 mm	1.6 m	470.454	525.3753
		2300 mm	2.7 m	582.588	614.3312
1 N/mm ²	1000 kN/m ²	1200 mm	1.6 m	305.74	347.9384
		2300 mm	2.7 m	356.851	382.2001

Görüldüğü gibi, basınç dayanımının 2 N/mm^2 olması durumunda, programın göçme yükü değerleri, dayanımın sonsuz olması durumunda bulunan değerlerle aynı çıkmıştır. Ring 2.0 analizinde ise, dayanımın sonsuz olması durumunda bulunan değerlere nazaran daha küçük değerler elde edilmiştir. İlk yükleme durumundan elde edilen göçme yükü, Ring 2.0'dan elde edilen değerden yaklaşık %11.25 daha büyüktür. İkinci yükleme durumunda ise yaklaşık %5.45 daha büyük göçme yükü değeri hesaplanmıştır.

Ring 2.0 analizinde kemerlerin göçmesi, kayma mekanizması ile birlikte bir tane plastik mafsallın oluşması sonucunda olmuştur (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).

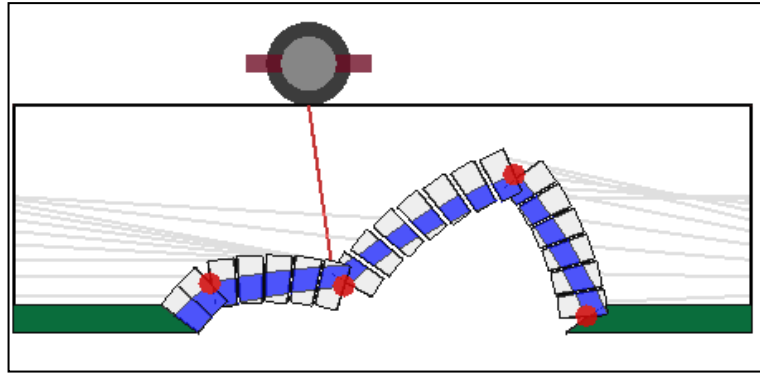


Şekil 4.3. Ring 2.0'da $\sigma_c = 2 \text{ N/mm}^2$ ve $X_p = 1.2 \text{ m}$ için köprünün göçme mekanizması

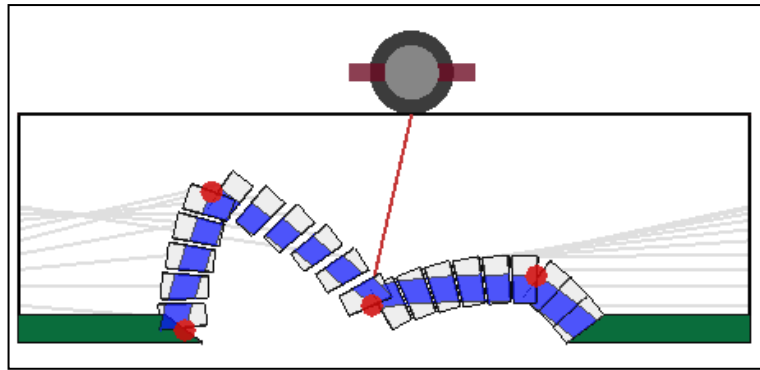


Şekil 4.4. Ring 2.0'da $\sigma_c = 2 \text{ N/mm}^2$ ve $X_p = 2.3 \text{ m}$ için köprünün göçme mekanizması

Basınç dayanımının 1N/mm^2 olması durumunda ise kemerin yük taşıma kapasitesinde önemli bir azalma olmuştur. Birinci ve ikinci yükleme durumları için Kemer programından elde edilen sonuçlar, Ring 2.0 sonuçlarından, sırasıyla, %13.8 ve %7.11 daha büyük çıkmıştır. Ring 2.0 analizlerinde kemerlerin dört tane plastik mafsallın oluşması sonucunda göçtüğü görülmüştür (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).



Şekil 4.5. Ring 2.0'da $\sigma_c = 1\text{N/mm}^2$ ve $X_p = 1.2\text{m}$ için köprünün göçme mekanizması

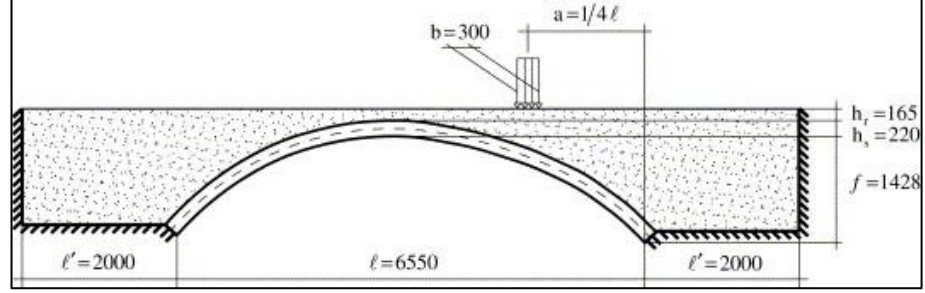


Şekil 4.6. Ring 2.0'da $\sigma_c = 1\text{N/mm}^2$ ve $X_p = 2.3\text{m}$ için köprünün göçme mekanizması

4.2. Prestwood Köprüsü'nün Analizi

İngiltere'de ki tek açıklıklı, genişliği 3.8 m olan Prestwood Köprüsü'nün, deneysel araştırmalar amacıyla, TRL tarafından göçme testi yapılmış ve göçme yükü 228 kN

olarak bulunmuştur. Mafsal mekanizmasıyla göçtüğü belirlenen köprünün genel geometrisi Şekil 4.7’de gösterilmiştir (Cavicchi and Gambarotta 2005).



Şekil 4.7. Prestwood Köprüsü'nün geometrisi (mm)

Kemerin üzerindeki dolgu malzemesinin ve kemerde kullanılan malzemenin birim hacim ağırlığının 20 kN/m^3 , kemer malzemesinin basınç dayanımının ise 4.5 MPa olduğu belirtilmiştir (Cavicchi and Gambarotta 2005).

Söz konusu köprünün, Kemer programıyla modellenmesinde yukarıda verilen değerler kullanılmış, tek farklılık kemer açıklığının çeyreğinden etkiyen 300 mm genişliğindeki yük yerine, aynı noktadan tekil bir yükün uygulanması olmuştur. Ayrıca analiz için gerekli olan, bloklar arasındaki sürtünme katsayısı ve kemeri oluşturan blok adedi, sırasıyla 1 ve 20 olarak alınmıştır. Burada blok adedi tamamen keyfi bir tercih olup, sürtünme katsayısı, kemerin mafsal mekanizması ile göçtüğü bilindiğinden, bloklar arasında kayma oluşmaması için büyük bir değer olarak alınmıştır.

Yapılan analiz sonucunda, kemerin göçme yükü $P=252.065 \text{ kN}$ olarak bulunmuştur. Bu değer, gerçek göçme yükü değerinden yaklaşık %10.56 daha büyük bir değerdir. Göçme yükleri arasındaki bu farkın aşağıdaki nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Öncelikle, geliştirilen Kemer programında, kemer üst dolgusunun kemer üzerindeki yatay basınç etkisi dikkate alınmamıştır. Literatürde bu etkinin, köprünün yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir.

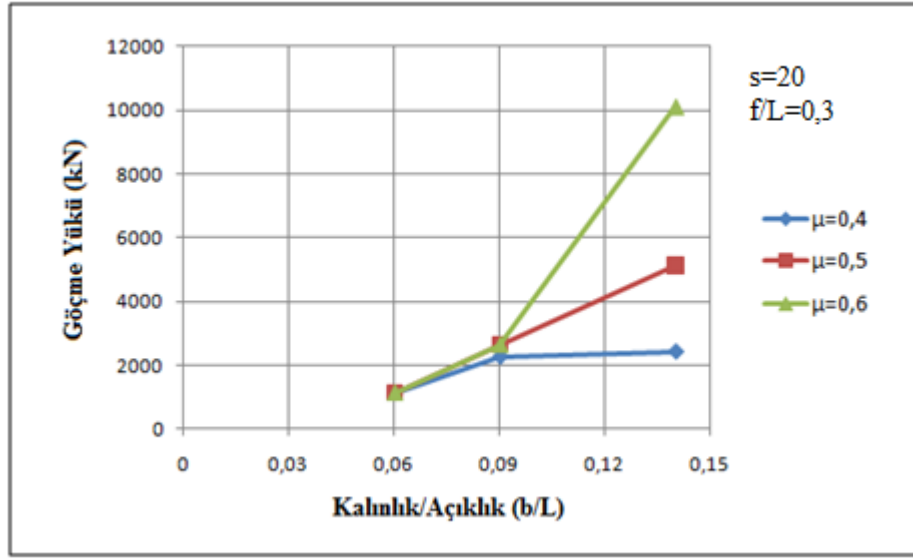
- Kemer programında, üst dolgunun yüzeyinden uygulanan yük, kemer üzerine aynı doğrultuda etki ettirilmiş, dolgunun yükü kemer üzerine dağıtıcı etkisi dikkate alınmamıştır. Bu durumun, hesaplanan göçme yükü değerinin etkilediği bilinmektedir.
- Gerçekte kemere uygulanan 30 cm genişliğindeki ve kemer genişliği boyunca etkiyen yük yerine, 2-boyutlu olarak yapılan analizde noktasal bir yük uygulanmıştır.

4.3. Göçme Yükünün Seçilen Parametrelere Göre İrdelenmesi

Kemer kalınlığı (b), kemer yüksekliği (f), bloklar arasındaki sürtünme katsayısı (μ) ve blok sayısının (s), köprünün göçme yüküne etkileri yapılan analizlere bağlı olarak aşağıda verilmiştir.

4.3.1. Kemer kalınlığının göçme yükü üzerindeki etkisi

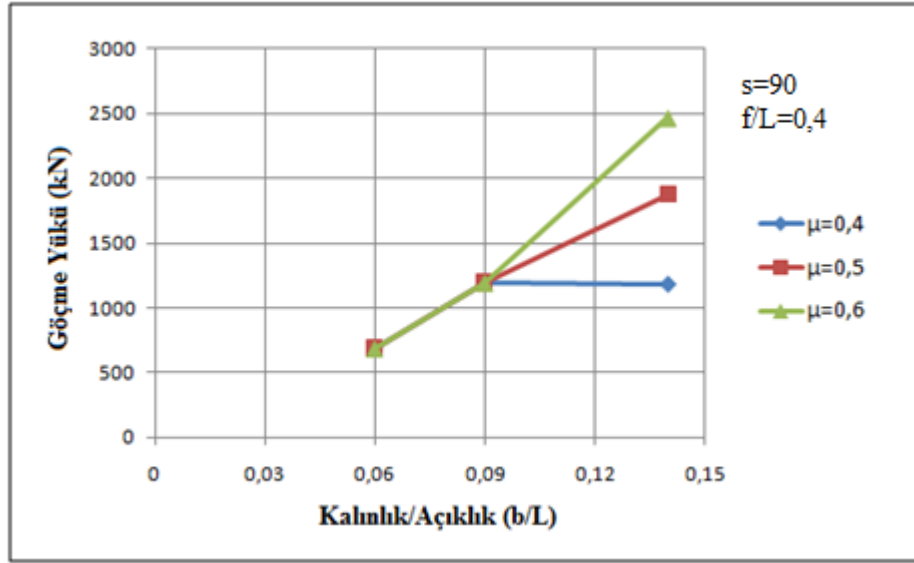
Kemer kalınlığının dolayısıyla b/L oranının artışının kemerin göçme yükünü bazı durumlarda arttırdığı bazı durumlarda ise azalttığı görülmüştür. Örneğin, $f/L=0,3$ ve blok sayısı 20 iken farklı sürtünme katsayısı değerleri için kemer kalınlığının, Şekil 4.8'de görüldüğü üzere, göçme yükünü arttırdığı belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı değeri 0,4 alındığında, b/L oranı 0,06 iken köprünün 4 mafsal mekanizması ile göçtüğü, b/L oranı 0,09 olduğunda, köprünün 3 tane mafsal ile birlikte kemerin sağ mesnetten kayarak ayrılması sonucunda, b/L oranı 0,14 olduğunda ise göçmenin bloklar arasında oluşan kayma nedeniyle olduğu görülmüştür (EK 1). Göçme yükleri ise, sırasıyla, 1129,18 kN, 2270,81 kN ve 2429,79 kN olarak bulunmuştur.



Şekil 4.8. $s=20$ ve $f/L=0,3$ olduğunda b/L oranının göçme yüküne etkisi

Sürtünme katsayısı 0,5 alındığında, b/L oranı 0,06'dan 0,09'a yükseltildiğinde, göçme yükü 1129,18 kN'dan 2637,01 kN'a yükselmiş, ancak her iki durumda da köprü, 4 mafsal mekanizması ile göçmüştür. b/L oranı 0,14 olduğunda ise kemerde 2 mafsal oluşumuyla birlikte kayma göçmesi meydana gelmiş ve göçme yükü değeri 5125,72 kN olmuştur. Sürtünme katsayısının 0,6 olması durumunda ise, b/L oranının ilk iki değeri için köprü, sürtünme katsayısının 0,5 olduğu durumla aynı değerler elde edilmiş, b/L oranı 0,14 olduğunda ise göçme yükü 10124,2 kN'a yükselmiş ve köprünün 3 mafsal oluşumuyla birlikte kayma nedeniyle göçtüğü belirlenmiştir.

f/L oranı 0,4, blok sayısı 90 ve sürtünme katsayısı 0,4 olduğunda ise, b/L oranı 0,06'dan 0,09'a yükseldiğinde göçme yükü 685,375 kN'dan 1192,45 kN'a yükselmiş, bu oran 0,14 olduğunda göçme yükü 1177,23 kN değerine düşmüştür (Şekil 4.9). Kemer kalınlığının ilk iki değerinde göçme, 4 mafsal mekanizması ile son durumda ise kayma nedeniyle olmuştur. Sürtünme katsayısının 0,5 ve 0,6 olduğu durumlarda ise, b/L oranı 0,06 ve 0,09 olduğunda göçmeler 4 mafsal mekanizmasıyla gerçekleşmiş, b/L oranı 0,14 olduğunda ise köprü kayma mekanizması ile göçmüştür ve b/L oranı arttıkça göçme yükünün de arttığı belirlenmiştir.



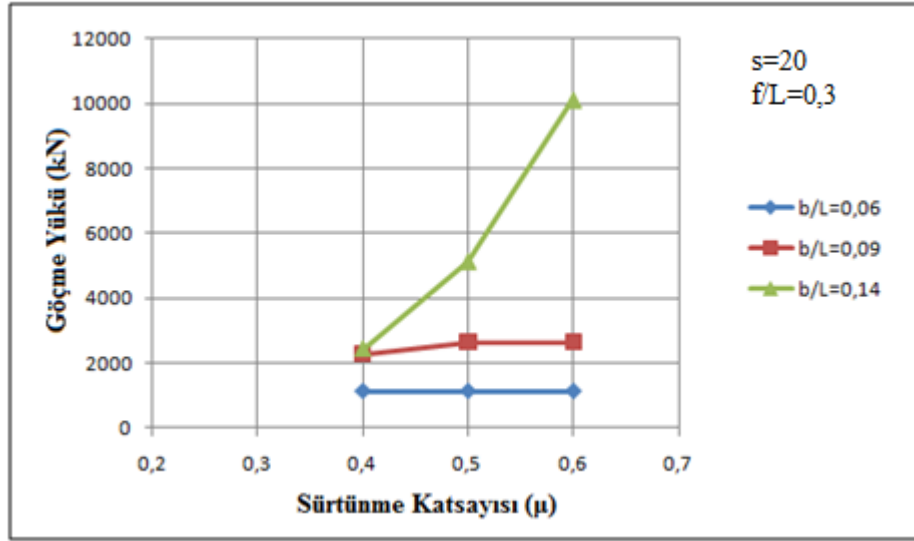
Şekil 4.9. $s=90$ ve $f/L=0,4$ olduğunda b/L oranının göçme yüküne etkisi

Sonuç olarak, bloklar arasındaki sürtünmenin yeterli olduğu durumlarda, kemer kalınlığının artmasının köprünün taşıma gücünü arttıracak, ancak sürtünme katsayısının küçük olması durumunda, kayma nedeniyle göçme daha kolay meydana gelebileceği için, taşıma kapasitesini azaltacağı görülmüştür. Ayrıca kemer kalınlığındaki artışla beraber, mafsall oluşumuyla kaymanın birlikte meydana gelmesi sonucu oluşan göçme durumu ya da yalnızca kayma temelli göçme şekli artmaktadır.

4.3.2. Sürtünme katsayısının göçme yükü üzerindeki etkisi

Bloklar arasındaki sürtünme katsayısının kemerin göçme şeklini, kemer kalınlığı ile birlikte, önemli ölçüde etkilediği ve bu göçme şekline bağlı olarak, sürtünme katsayısının artışının köprünün yük taşıma kapasitesini arttırabildiği gibi etkisiz kaldığı da görülmüştür.

Blok sayısı 20 ve f/L oranı 0,3 olduğunda, farklı b/L oranları için sürtünme katsayısının göçme yükü üzerindeki etkisi Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



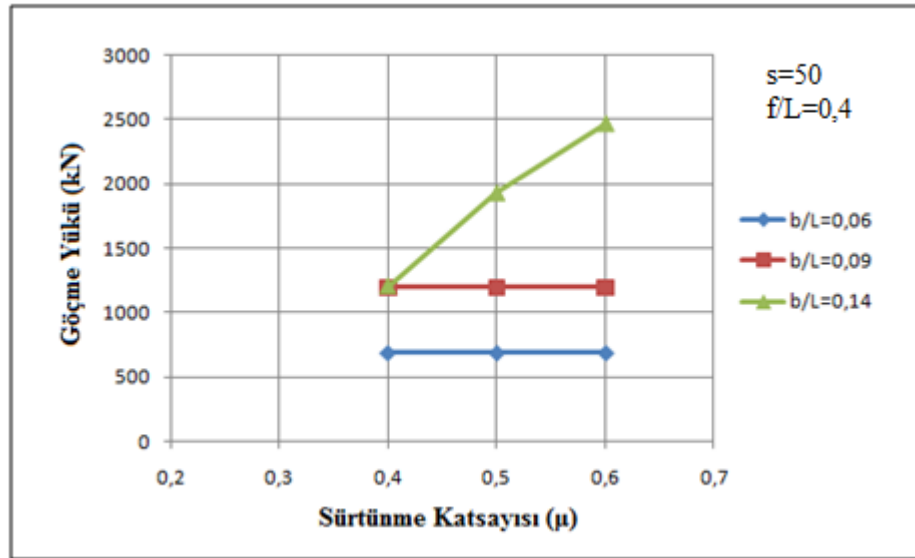
Şekil 4.10. $s=20$ ve $f/L=0,3$ için sürtünme katsayısının göçme yüküne etkisi

b/L oranı 0,06 olduğunda, üç farklı sürtünme katsayısı için köprünün göçme yükü 1129,18 kN değerinde sabit kalmış ve her üç durumda da köprünün 4 mafsal mekanizması ile göçtüğü görülmüştür. b/L oranı 0,09, sürtünme katsayısı 0,4 olduğunda köprü 3 mafsal oluşumu ile birlikte kayma mekanizması ile göçmüş ve göçme yükü 2270,81 kN olarak bulunmuştur. Sürtünme katsayısı 0,5 olduğunda ise, göçme yükü 2637,01 kN'a yükselmiş ve bu durumda kemer 4 mafsal mekanizması ile göçmüştür. Sürtünme katsayısı 0,6 olduğunda aynı göçme şekli görülmüş ve göçme yükü sabit kalmıştır.

b/L oranı 0,14 iken, sürtünme katsayısı 0,4 olduğunda köprü, tamamen kayma mekanizması ile göçmüş ve göçme yükü 2459,79 kN olarak bulunmuştur. Sürtünme katsayısı 0,5 olduğunda, göçme 2 mafsal oluşumuyla birlikte kayma nedeniyle meydana gelmiş ve göçme yükü 5125,72 kN'a yükselmiş, 0,6 olduğunda ise 3 mafsalla birlikte kayma nedeniyle göçme oluşmuş ve göçme yükü değeri 10124,2 kN olarak bulunmuştur.

Blok sayısı 50 ve f/L oranı 0,4 olduğunda ise, b/L oranının 0,06 ve 0,09 olduğu durumlarda, sürtünme katsayısının değişiminin kemerin göçme şeklini (4 mafsal

mekanizması) ve göçme yükü değerini etkilemediği görülmüştür. b/L oranının 0,14 olması halinde ise, sürtünme katsayısı 0,4 iken, köprü kayma mekanizması ile göçmüş ve göçme yükü 1204,9 kN olarak bulunmuştur. Sürtünme katsayısı 0,5 olduğunda, kemerin göçme şeklinde bir değişiklik olmamasına rağmen, sürtünme katsayısındaki artış bloklar arasındaki kaymayı zorlaştırmış ve göçme yükü değeri 1928,3 kN'a yükselmiştir. Sürtünme katsayısı 0,6 alındığında ise, bu değer bloklar arasındaki kaymayı engellemiş ve köprü 4 mafsallı mekanizması ile göçmüş, göçme yükü ise 2468,26 kN'a çıkmıştır (Şekil 4.11).

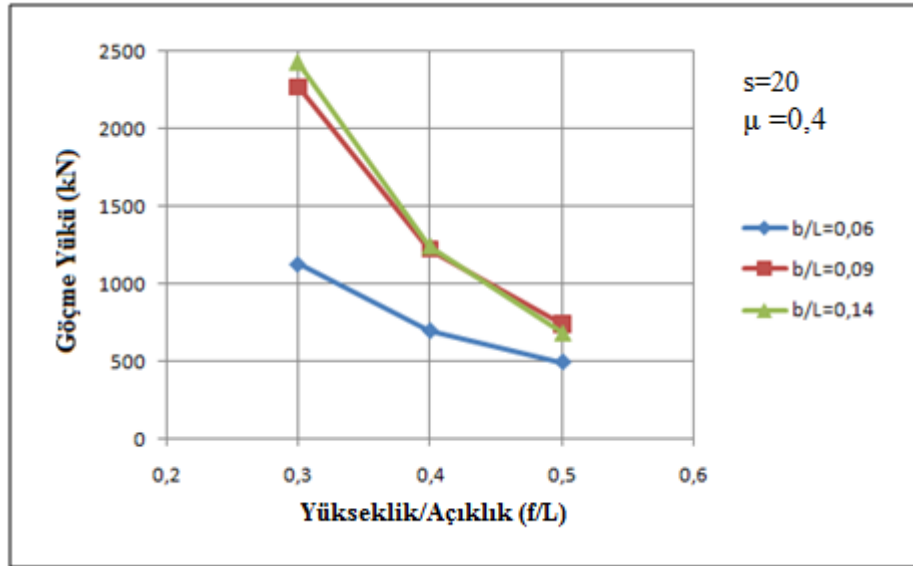


Şekil 4.11. $s=50$ ve $f/L=0,4$ için sürtünme katsayısının göçme yüküne etkisi

Yapılan diğer analizlerde de, köprü davranışında, verilen örneklerdekine benzer durumlar olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bloklar arasındaki sürtünme katsayısının düşük olması durumunda, köprüde kayma göçmesi meydana gelebilmekte bu da yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Belirli bir sürtünme katsayısı ile analiz edilen köprü, 4 mafsallı mekanizması ile göçüyorsa, sürtünme katsayısında ki artış göçme yükünü etkilemeyecektir. Kayma göçmesi söz konusu olduğunda ise, sürtünme katsayısının artırılmasıyla daha büyük göçme yükü değerleri elde edildiği, ayrıca bu değerlerin yeterli seviyeye getirilmesiyle, bloklar arasındaki kayma engellenerek 4 mafsallı mekanizması ile göçme meydana geldiği görülmüştür.

4.3.3. Kemer yüksekliğini göçme yükü üzerindeki etkisi

Kemer yüksekliğinin değişimi köprünün göçme yükünü önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan analizlerde, kemer yüksekliğindeki artışın köprünün yük taşıma kapasitesini azalttığı görülmüştür. Örneğin, blok sayısı 20 ve sürtünme katsayısı 0,4 olduğunda, b/L oranının farklı değerleri için, f/L oranının göçme yüküne etkisi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



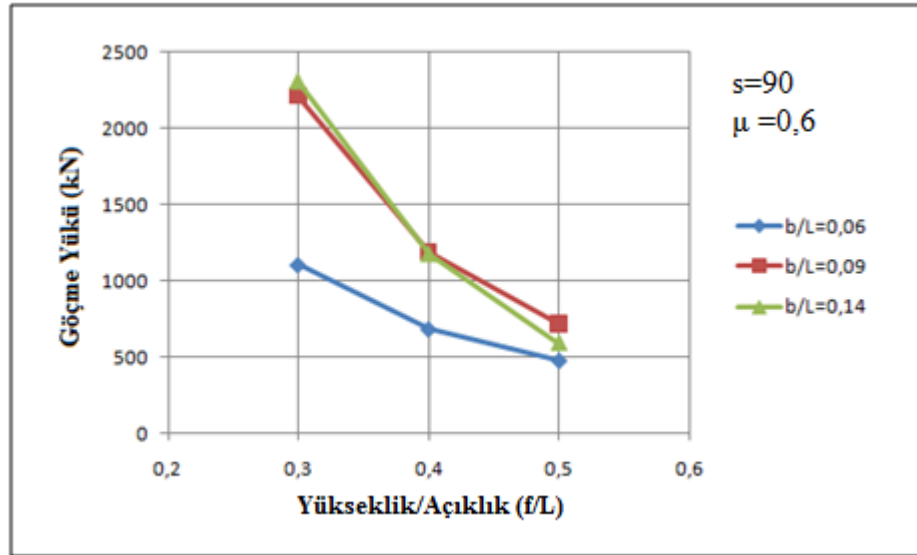
Şekil 4.12. $s=20$ ve $\mu=0,4$ olduğunda f/L oranının göçme yüküne etkisi

b/L oranı 0,06 alındığında, f/L oranının 0,3, 0,4 ve 0,5 olması durumlarında göçme yükü, sırasıyla, 1129,18 kN, 698,669 kN ve 494,884 kN olarak bulunmuş ve köprü her üç durumda da 4 mafsal mekanizması ile göçmüştür.

b/L oranı 0,09 ve f/L oranı 0,3 olduğunda ise köprü 3 mafsal oluşumu ile birlikte kayma nedeniyle göçmüş ve göçme yükü 2270,81 kN olarak bulunmuştur. f/L oranı 0,4'e yükseltildiğinde göçme 4 mafsal mekanizması ile gerçekleşmiş ve göçme yükü 1223,8 kN'a düşmüştür. f/L oranı 0,5 olduğunda ise, göçme tekrar 3 mafsal oluşumu ve kaymanın birlikte gerçekleşmesiyle olmuş ve göçme yükü 743,21 kN'a düşmüştür.

b/L oranı 0,14 ve f/L oranı 0,3 olduğunda, köprü kayma mekanizması ile göçmüş ve göçme yükü 2429,79 kN olarak bulunmuştur. f/L oranı 0,4'e çıkarıldığında sistemin göçmesi yine kayma mekanizması ile olmuş ancak göçme yükü 1243,62 kN'a düşmüştür. f/L oranı 0,5 olduğunda ise göçme 2 mafsallı oluşumu ile kaymanın birlikte gerçekleşmesi sonucunda olmuş ve göçme yükü 682,873 kN'a düşmüştür.

Blok sayısının 90 ve sürtünme katsayısının 0,6 olarak alınmasıyla yapılan analizlerde elde edilen sonuçla Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



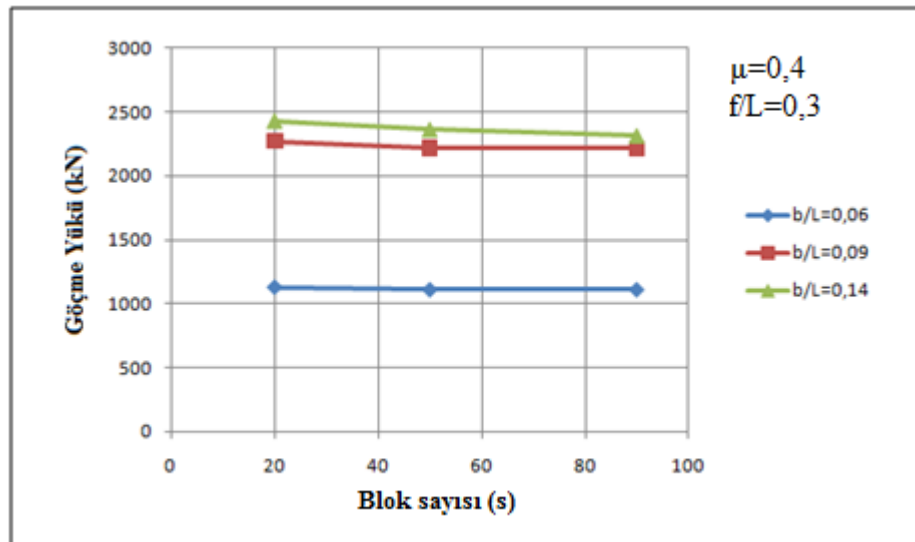
Şekil 4.13. $s=90$ ve $\mu=0,6$ olduğunda f/L oranının göçme yüküne etkisi

b/L oranının 0,06 ve 0,09 olması durumunda, f/L oranındaki artış sonucunda, mafsallı oluşum noktalarında farklılık olmakla beraber, bütün göçmelerin 4 mafsallı mekanizması ile gerçekleştiği belirlenmiş ve göçme yükü değerlerinde azalma görülmüştür. b/L oranı 0,14 olduğunda ise, f/L oranı 0,3 iken göçme 3 mafsallı oluşumuyla beraber kayma nedeniyle meydana gelmiş ve göçme yükü 9560,27 kN olarak bulunmuştur. f/L oranı 0,4'e yükseldiğinde ise göçme 4 mafsallı mekanizması gerçekleşmiş ve göçme yükü 2464,99 kN'a düşmüştür. f/L oranının 0,5 değerine çıkarılmasıyla göçme yükü 1045,78 kN'a düşmüş ve bu durumda da, mafsallı oluşum noktaları farklı olmakla beraber, göçme 4 mafsallı mekanizması ile gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak kemer yüksekliğindeki artışın, kemerin yük taşıma kapasitesini azalttığı ve farklı göçme şekillerine neden olduğu görülmüştür.

4.3.4. Blok sayısının göçme yükü üzerindeki etkisi

Blok sayısındaki değişimin, kemerin göçme şeklini etkilemediği ve göçme yükü üzerindeki etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısının 0,4 ve f/L oranının 0,3 olduğu kabulüyle, farklı b/L oranları için, blok sayısı ile göçme yükü arasındaki ilişki Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. $\mu=0,4$ ve $f/L=0,3$ olduğunda blok sayısının göçme yüküne etkisi

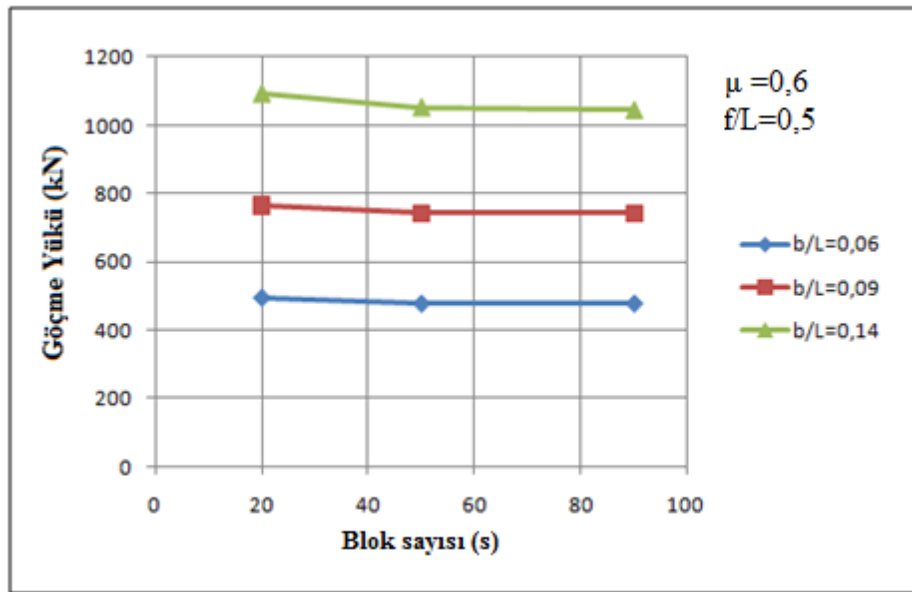
b/L oranı 0,06 olduğunda, farklı blok sayıları kullanılarak yapılan analizlerde, mafsal oluşum noktaları farklı olmakla beraber, köprü her seferinde 4 mafsal mekanizması ile göçmüştür. Göçme yükü için ise, blok sayısı 20, 50 ve 90 iken, sırasıyla, 1129,18 kN, 1108,12 kN ve 1107,93 kN değerleri elde edilmiştir.

b/L oranı 0,09 alındığında, farklı blok sayıları için, köprünün 3 mafsal oluşumu ile birlikte kayma nedeniyle göçtüğü görülmüştür. Blok sayısı 20 olduğunda elde edilen

2270,81 kN'luk göçme yükü, blok sayısı 50'ye çıkarıldığında 2218,1 kN'a, blok sayısı 90 olduğunda ise 2214,41 kN'a düşmüştür.

b/L oranı 0,14 olduğunda ise, farklı blok sayıları için, göçmenin kayma mekanizması ile gerçekleştiği görülmüştür. Göçme yükü ise, blok sayısı 20, 50 ve 90 olduğunda, sırasıyla, 2429,79 kN, 2361,82 kN, 2312,53 kN olarak bulunmuştur.

Sürtünme katsayısı 0,6 ve f/L oranı 0,5 alınması durumunda elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. $\mu=0,6$ ve $f/L=0,5$ olduğunda blok sayısının göçme yüküne etkisi

b/L oranı 0,06 olduğunda, blok sayısının 20, 50 ve 90 değerleri için, köprünün göçmesi 4 mafsallı mekanizması ile olmuş ve göçme yükleri, sırasıyla, 494,884 kN, 478,21 kN ve 478,412 kN olmuştur.

b/L oranının 0,09 olduğunda, farklı blok sayıları için, göçmeler 4 mafsallı mekanizması ile gerçekleşmiş ve göçme yükleri, 764,094 kN, 742,065 kN ve 742,31 kN olarak bulunmuştur.

b/L oranının 0,14 olması halinde ise, göçmeler 4 mafsal mekanizması ile gerçekleşmiş ve göçme yükleri, 1093,15 kN, 1052,76 kN ve 1045,78 kN olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak, blok sayısındaki değişimin köprünün göçme mekanizmasını etkilemediği, blok sayısındaki artışın, köprünün yük taşıma kapasitesinde çoğunlukla küçük azalmalara neden olduğu, bazı durumlarda ise küçük artışlar meydana getirdiği görülmüştür.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, kâgir kemer köprülerin analizinde kullanılan yöntemler incelenmiş ve tek açıklıklı kemer köprülerin göçme yükünün hesaplanması için limit analizin alt-sınır teoreminin kullanıldığı rijit-blok analiz yöntemiyle bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca, kemer kalınlığı, kemer blokları arasındaki sürtünme katsayısı, kemer yüksekliği ve blok sayısının tek açıklıklı kâgir kemer köprülerin yük taşıma kapasiteleri üzerindeki etkisi Ring 2.0 programı kullanılarak incelenmiştir.

Literatürde kâgir kemer köprülerin analizi için birçok farklı yöntemin kullanıldığı ancak genel kabul gören kesin bir yöntem olmadığı için farklı yaklaşımların denenmeye devam ettiği görülmüştür. Bu amaçla, yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi maddeler halinde özetlenebilir.

- Kâgir kemer köprülerin analizinde, genelde sonlu elemanlar yöntemi yazılımlarının tercih edildiği ve farklı modelleme teknikleriyle daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışıldığı görülmüştür. Ayrıca, farklı analiz yöntemlerinin verileri, deneysel analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmakta ve en uygun yöntem belirlenmeye çalışılmaktadır.
- Limit analiz yönteminin, özellikle de üst-sınır teoreminin kullanımı konusunda da çalışmaların yaygın olduğu belirlenmiştir.
- Malzeme davranışının daha iyi modellenebilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle, kemer üst dolgusuyla kemer arasındaki ilişkinin ve dolgu malzemesinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi özelliklerinin daha gerçekçi bir şekilde modellenerek, dolgunun kemerin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Ayrıca, kemer üstü duvarlarının, köprünün taşıma gücü üzerindeki etkisi de incelenmektedir.
- Kemer oluşturan bloklar arasındaki sürtünme davranışı, farklı sürtünme modelleri kullanılarak gerçeğe en yakın hale getirilmeye çalışılmaktadır.
- Çok açıklıklı kemer köprülerde, genellikle açıklıklardaki kemerlerin birbirleri üzerindeki etkileri ve kemer ayaklarının davranışı incelenmektedir. Ayrıca çok açıklıklı kemerlerin göçme mekanizmaları araştırılmaktadır.

- Üst üste binmiş kemerlerden oluşan çok halkalı kemerlerde ise, kemerler arasındaki ilişki ve meydana gelebilecek ayrışmalar daha iyi bir şekilde modellenmeye çalışılmaktadır.

Literatürde yer alan bu araştırma konuları, özellikle deneysel çalışmamalarla incelenerek, problemlere farklı yaklaşımlar getirilebilir ve özgün modeller ortaya konabilir.

Çalışma kapsamında geliştirilen ve Kemer adı verilen programla yapılan analizlerden elde edilen sonuçların, programın oluşturulmasında yapılan kabuller de dikkate alındığında, gerçek değerlere kabul edilebilir yakınlıkta çıktığı düşünülmektedir. Bu çalışmayla temeli oluşturulan bu programın, aşağıda sıralanan eklemeler ve değişikliklerle geliştirilmesi mümkündür.

- Sadece dairesel olduğu kabul edilen kemer geometrisi yerine farklı kemer şekilleri de modellenebilir. Ayrıca köprünün geometrik olarak daha serbest bir şekilde modellenebilmesi sağlanabilir.
- Kemerin üzerine sadece ölü yük olarak etkiyen kemer üst dolgusunun kemer üzerindeki yatay basınç etkisi, dış yükü kemer üzerine dağıtma özelliği ve kemerle arasındaki sürtünme durumu analize dâhil edilebilir. Yükün kemer üzerine dağıtılmasında farklı yaklaşımlar (üniform, boussinesq vb.) kullanılabilir.
- Noktasal olarak etkiyen yük yerine farklı yükler tanımlanabilir ve aynı anda birden fazla yük uygulanabilir.
- Bloklar arasındaki sürtünme davranışı farklı modeller kullanılarak tanımlanabilir.
- Doğrusal olmayan ezilme kısıtlayıcılarının doğrusallaştırılmasında farklı yöntemler kullanılabilir.
- Kemer ayakları modellenerek analize dâhil edilebilir. Ayrıca, çok açıklıklı ve çok halkalı kemer köprülerin analizi yapılabilecek şekilde program geliştirilebilir.

Kâgir kemer köprülerin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılan parametrelerden, kemer kalınlığındaki artış sonucunda, sürtünme katsayısı değerine de bağlı olarak, köprünün yük taşıma kapasitesinde artış meydana gelebileceği gibi azalma olabileceği de belirlenmiştir. Sürtünme katsayısındaki artışın ise, köprünün göçme şekline bağlı olarak, göçme yükünü arttırabildiği gibi etkisiz kalabileceği de görülmüş, kemer yüksekliğindeki artışın köprünün göçme yükünü azalttığı, blok sayısındaki değişimin ise göçme yükü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Kemer kalınlığı arttıkça, sürtünme katsayısının etkisinin arttığı görülmüştür. Bu durumun, kalın kemerlerde mafsall oluşumunun zorlaşması nedeniyle, kayma göçmesinin meydana gelme ihtimalinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, mafsall mekanizması ile göçme durumunda, kemer, kayma mekanizması durumuna nazaran daha sünek bir davranış göstereceğinden, göçmenin mafsall mekanizması ile gerçekleşmesi daha tercih edilebilir bir durum olarak gözükmektedir.

KAYNAKLAR

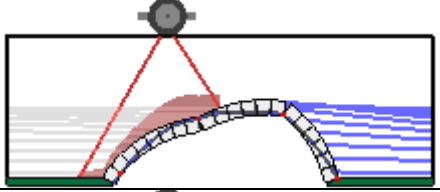
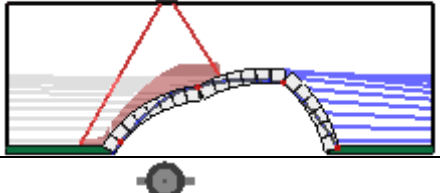
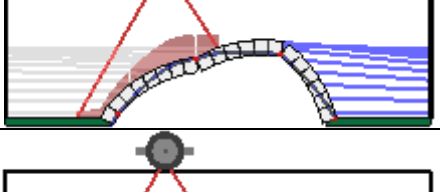
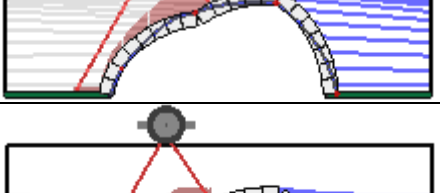
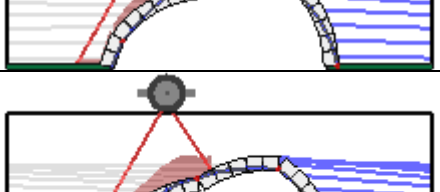
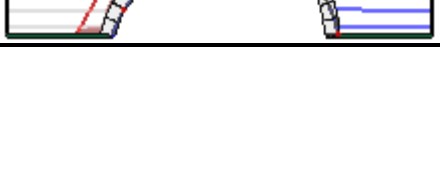
- Anonymous, 2001. Department of Transport: Departmental Advice Note BA 16/97. The Assessment of the Highway Bridges and Structures, Volume 3, Section 4, Part 4, London.
- Anonymous, 2009a. Ring 2.0 Program Reference.
- Anonymous, 2009b. Ring 2.0 Theory and Modelling Guide, version 2.0h.
- Anonymous, 2010a. http://en.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard (10.05.2010).
- Anonymous, 2010b. Anji Bridge-The Oldest Extant Bridge in China, http://211.147.20.24/library/2008-01/16/content_39004.htm (10.05.2010).
- Anonymous. 2010c. List of longest masonry arch bridge spans, http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_longest_masonry_arch_bridge_spans (10.05.2010).
- Anonymous, 2010d. http://en.wikipedia.org/wiki/Arch_bridge (10.05.2010).
- Arifoğlu, U., 2005. Matlab 7.04 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları. Alfa Yayınları, 1088 s, İstanbul, Türkiye.
- Atımtay, Ergin., 1989. Yapı Sistemleri Cilt 1, 210 s, Ankara.
- Audenaert, A., Peremans, H., Reniers, G., 2007. An analytical model to determine the ultimate load on masonry arch bridges. J. Eng. Math., 59 (2007), 323-336.
- Audenaert, A., Fanning, P., Sobczak, L., Peremans, H., 2007. 2-D Analysis of arch bridges using an elasto-plastic material model. Engineering Structures, 30 (2008), 845-855.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Birinci, F., Sevim, B., Türker, T., 2010. Finite-element analysis and vibration testing of a two-span masonry arch bridge. Journal of Performance of Constructed Facilities, 24 (1), 46-52.
- Begingil, M., 1997. Donatısız kemer köprülerin tasarımı, Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi, İzmir.
- Betti, M., Drosopoulos, G.A., Stavroulakis, G.E., 2008. Two non-linear finite element models developed for the assessment of failure of masonry arches. C.R. Mecanique, 336 (2008), 42-53.
- Bjuström, H., Lasell, J., 2009. Capacity Assessment of A Single Span Arch Bridge with Backfill- A Case Study of Glomman Bridge. MS Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- Block, P., 2005. Equilibrium Systems Studies in Masonry Structures. MS Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- Block, P., Ciblac, T., Ochsendorf, J., 2006. Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. Computers and Structures, 84 (2006), 1841-1852.
- Boothby, T.E., 1998. Service load response of masonry arch bridges. Journal of Structural Engineering, 124 (1), 17-23.
- Cavicchi, A., Gambarotta, L., 2004. Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction. Engineering Structures, 27 (2005), 605-615.
- Cavicchi, A., Gambarotta, L., 2006. Two-dimensional finite element upper bound limit analysis of masonry bridges. Computers and Structures, 84 (2006), 2316-2328.
- Cavicchi, A., Gambarotta, L., 2007. Lower bound limit analysis of masonry bridges including arch-fill interaction. Engineering Structures, 29 (2007), 3002-3014.

- Celasun, H., 1974. Betonarme Köprüler ve Hesap Metotları. Çağlayan Kitabevi, 459 s, İstanbul.
- Chen, Y., Ashour, A.F., Garrity, S.W., 2006. Modified four-hinge mechanism analysis for masonry arches strengthened with near-surface reinforcement. *Engineering Structures*, 29 (2007), 1864-1871.
- Clemente, P., Occhiuzzi, A., Raithel, A., 1995. Limit Behavior Of Stone Arch Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 121 (7), 1045-1050.
- Croci, G., 1998. The Conservation and Structural Restoration of the Architectural Heritage. Computational Mechanics Publications, 272 p, Southampton, UK.
- Dabanlı, Ö., 2008. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Drosopoulos, G.A., Stavroulakis, G.E., Massalas, C.V., 2006. Limit analysis of a single span masonry bridge with unilateral frictional contact interfaces. *Engineering Structures*, 28 (2006), 1864-1873.
- Elmalich, D., Rabinovitch, O., 2009. Masonry and monolithic circular arches strengthened with composite materials – A finite element model. *Computers and Structures*, 87 (2009), 521-533.
- Foraboschi, P., 2004. Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymerstrips. *Journal of Composites for Construction*, 8 (3), 191-202.
- Frunzio, G., Monaco, M., Gesualdo, A., 2001. 3D f.e.m. analysis of a roman arch bridge. *Historical Constructions*, Guimaraes.
- Ghali, A., 1989. *Structural Analysis: A Unified Classical and Matrix Approach*. Chapman and Hill, 870 p, London.
- Gilbert, M., Melbourne, C., 1994. Rigid-block analysis of masonry structures. *The Structural Engineer*, 72 (21), 356-361.
- Gilbert, M., 2001. Ring: A 2D rigid-block analysis program for masonry arch bridges, Third International Arch Bridges Conference, Paris.
- Gilbert, M., 2007. Limit analysis applied to masonry arch bridges: state-of-the- art and recent developments. The 5th International Conference on Arch Bridges, Madeira.
- Güngör, İ.H., 1967. *Kagir Yapı Cilt 1. Yazarın Kendi Teknik Yayını*, 212 s, İstanbul.
- Gürer, C., Akbulut, H., Çetin, S., 2007. Tek açıklıklı kemer sistemli rize köprülerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya.
- Heyman, J., 1999a. *The Science of Structural Engineering*. Imperial College Press, 108 p, London.
- Heyman, J., 1999b. *The Stone Skeleton, Structural Engineering of Masonry Architecture*. Cambridge University Press, 160 p, Cambridge, UK.
- Heyman, J., 2008. *Basic Structural Theory*. Cambridge University Press, 134 p, New York.
- Hughes, T.G., Blackler, M.J., 1997. A review of the UK masonry arch assessment methods. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers: Structure and Buildings*, 122 (3), 305-315.
- Hughes, T.G., Pritchard, R., 1998. In situ measurement of dead and live load stresses in a masonry arch. *Engineering Structures*, 20 (1-2), 5-13.
- Huerta, S., 2001. *Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach*. Historical Constructions, Guimaraes.

- Huerta, S., 2005. The use of simple models in the teaching of the essentials of masonry arch behaviour. *Theory and Practice of Construction: Knowledge, Means, Models*, Ravenna.
- Kara, H.G., 2009. Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistemleri, Güvenliğinin İncelenmesi, Onarımı ve Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kanıt, R. and Işık N.S., 2006. Tuğla kemerlerin deneysel davranışı ve bilgisayar modeli analizleri. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 22 (1), 13-20.
- Kaymaz, İ., 2006. Optimizasyon teknikleri dersi ders notları. Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Kurrer, K.E., 2008. *The History of the Theory of Structures, From Arch Analysis to Computational Mechanics*. Ernst&Sohn A Wiley Company, 848 p, Germany.
- Livesley, R.K., 1978. Limit analysis of structures formed from rigid blocks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 12 (12), 1853-1871.
- Loi, F.T., 2009. Limit Analysis by Linear Programming. *Plastic Analysis and Design of Steel Structures*, Ed: M. Bill Wong. Elsevier Ltd, Oxford, UK, 163-193.
- Lourenço, P.B., 1996. *Computational Strategies for Masonry Structures*. Ph.D. Thesis, Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Melbourne, C., Gilbert, M., 1995. The behaviour of multiring brickwork arch bridges. *The Structural Engineer*, 73 (3), 39-47.
- Melbourne, C., Gilbert, M., Wagstaff, M., 1997. The collapse behaviour of multispan brickwork arch bridges. *The Structural Engineer*, 75 (17), 297-305.
- Melbourne, C., Wang, J., Tomor, A., 2007. A new masonry arch bridge assessment strategy (SMART). *Arch'07- 5th International Conference on Arch Bridges*, Madeira.
- Ng, K.H., 1999. *Analysis of Masonry Arch Bridges*. Ph.D. Thesis, Napier University, Edinburgh.
- Ng, K.H., Fairfield, C.A., Sibbald, A., 1999. Finite element analysis of masonry arch bridges. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers: Structure and Buildings*, 134 (2), 119-127.
- Ng, K.H. and Fairfield C.A., 2002. Monte carlo simulation for arch bridge assessment. *Construction and Building Materials*, 16 (2002), 271-280.
- Ng, K.H. and Fairfield C.A., 2003. Modifying the mechanism method of masonry arch bridge analysis. *Construction and Building Materials*, 18 (2004), 91-97.
- Oliveira, D.V.C., 2003. *Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures Under Cyclic Loading*. Ph.D. Thesis, Universidade do Minho, Portugal.
- Özer, O., 2006. *Assessment of Masonry Arch Bridges by Mechanism Method*. MS Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.
- Peng, D.M., Fairfield, C.A., 1997. Optimal design of arch bridges by integrating genetic algorithms and the mechanism method. *Engineering Structures*, 21 (1999), 75-82.
- Sayın, E., 2009. *Yığma Yapıların Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Swift, E.H., 1951. *Roman Sources of Christian Art*. Columbia University Press, 248p, New York.

- Thavalingam, A., Bicanic, N., Robinson, J.I., Ponniah, D.A., 2001. Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges. *Computers and Structures*, 79 (2001), 1821-1830.
- Toker, S., Ünay, A.İ., 2004. Mathematical modelling and finite element analysis of masonry arch bridges. *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17 (2), 129-139.
- Toth, A.R., Orban, Z., Bagi, K., 2009. Discrete element analysis of a stone masonry arch. *Mechanics Research Communications*, 36 (2009), 469-480.
- Ural, A., 2005. Tarihi kemer köprülerin sonlu elemanlar metoduyla analizi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Ural, A., Oruç, Ş., Doğangün, A., Tuluk, Ö.İ., 2007. Turkish historical arch bridges and their deteriorations and failures. *Engineering Failure Analysis*, 15 (2008), 43-53.
- Wong, M.B., 2009. *Plastic Analysis and Design of Steel Structures*. Elsevier Ltd, 246 p, Oxford, UK.

EKLER**EK 1****Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 1-12)**

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,06	20	0,3	0,4	1129,18	
0,06	20	0,3	0,5	1129,18	
0,06	20	0,3	0,6	1129,18	
0,06	20	0,4	0,4	698,669	
0,06	20	0,4	0,5	698,669	
0,06	20	0,4	0,6	698,669	

Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 2-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,06	20	0,5	0,4	494,884	
0,06	20	0,5	0,5	494,884	
0,06	20	0,5	0,6	494,884	
0,06	50	0,3	0,4	1108,12	
0,06	50	0,3	0,5	1108,12	
0,06	50	0,3	0,6	1108,12	
0,06	50	0,4	0,4	686,447	

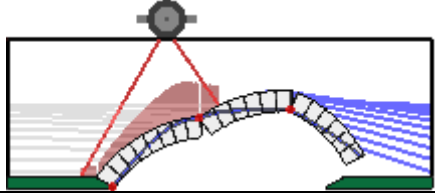
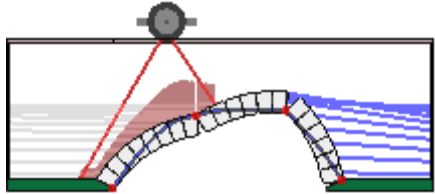
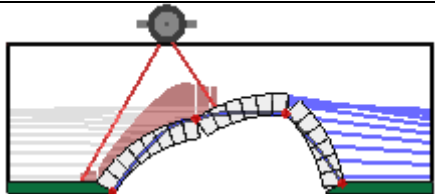
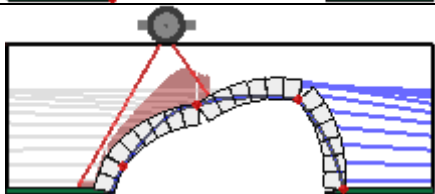
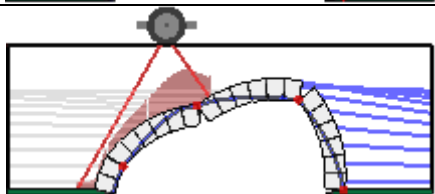
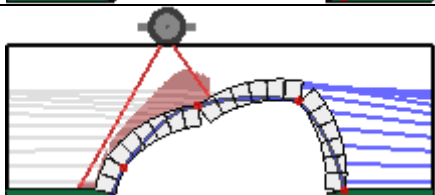
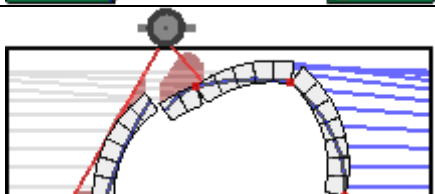
Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 3-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,06	50	0,4	0,5	686,447	
0,06	50	0,4	0,6	686,447	
0,06	50	0,5	0,4	478,21	
0,06	50	0,5	0,5	478,21	
0,06	50	0,5	0,6	478,21	
0,06	90	0,3	0,4	1107,93	
0,06	90	0,3	0,5	1107,93	

Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 4-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,06	90	0,3	0,6	1107,93	
0,06	90	0,4	0,4	685,375	
0,06	90	0,4	0,5	685,375	
0,06	90	0,4	0,6	685,375	
0,06	90	0,5	0,4	478,412	
0,06	90	0,5	0,5	478,412	
0,06	90	0,5	0,6	478,412	

Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 5-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,09	20	0,3	0,4	2270,81	
0,09	20	0,3	0,5	2637,01	
0,09	20	0,3	0,6	2637,01	
0,09	20	0,4	0,4	1223,8	
0,09	20	0,4	0,5	1223,8	
0,09	20	0,4	0,6	1223,8	
0,09	20	0,5	0,4	743,21	

Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 6-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,09	20	0,5	0,5	764,094	
0,09	20	0,5	0,6	764,094	
0,09	50	0,3	0,4	2218,1	
0,09	50	0,3	0,5	2537,17	
0,09	50	0,3	0,6	2537,17	
0,09	50	0,4	0,4	1192,9	
0,09	50	0,4	0,5	1192,9	

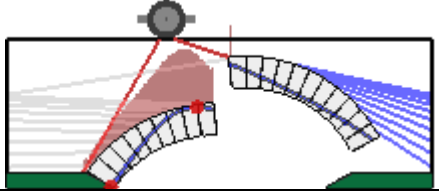
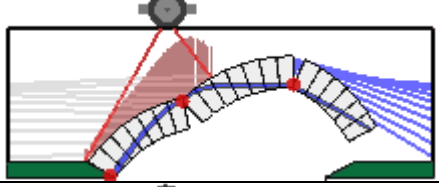
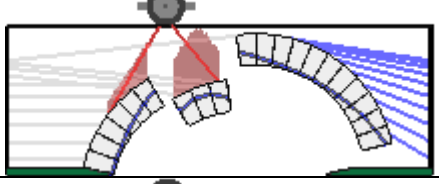
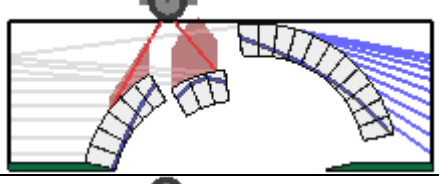
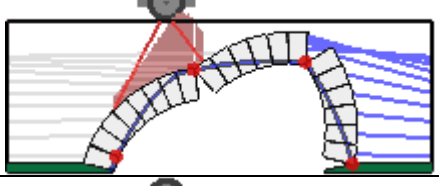
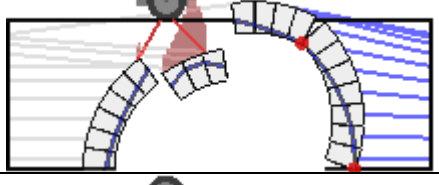
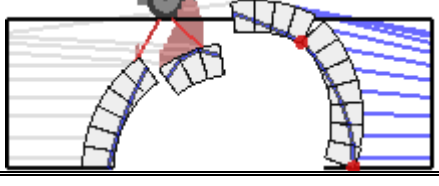
Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 7-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,09	50	0,4	0,6	1192,9	
0,09	50	0,5	0,4	723,382	
0,09	50	0,5	0,5	742,065	
0,09	50	0,5	0,6	742,065	
0,09	90	0,3	0,4	2214,41	
0,09	90	0,3	0,5	2532,09	
0,09	90	0,3	0,6	2532,09	

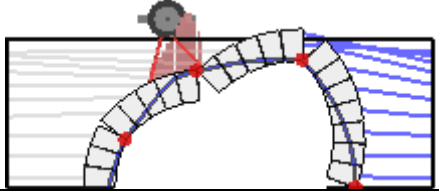
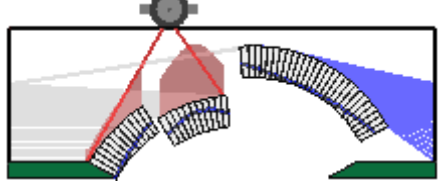
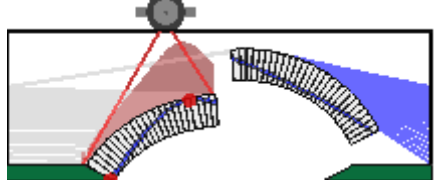
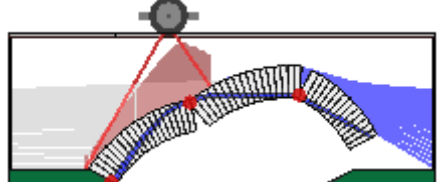
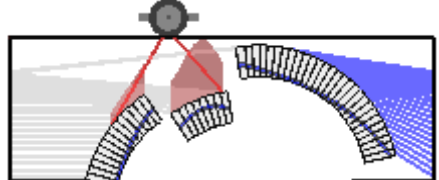
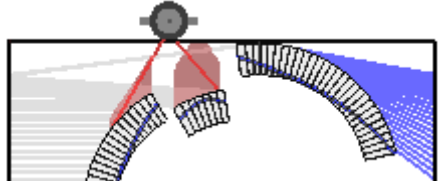
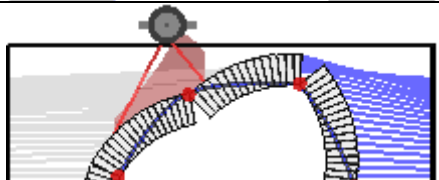
Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 8-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,09	90	0,4	0,4	1192,45	
0,09	90	0,4	0,5	1192,45	
0,09	90	0,4	0,6	1192,45	
0,09	90	0,5	0,4	719,686	
0,09	90	0,5	0,5	742,31	
0,09	90	0,5	0,6	742,31	
0,14	20	0,3	0,4	2429,79	

Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 9-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,14	20	0,3	0,5	5125,72	
0,14	20	0,3	0,6	10124,2	
0,14	20	0,4	0,4	1243,62	
0,14	20	0,4	0,5	2002,57	
0,14	20	0,4	0,6	2571,89	
0,14	20	0,5	0,4	682,873	
0,14	20	0,5	0,5	977,65	

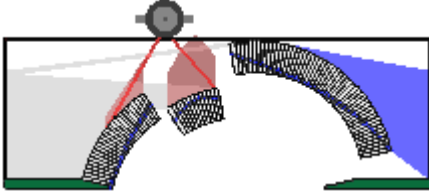
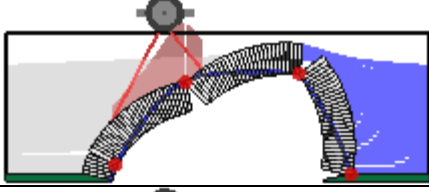
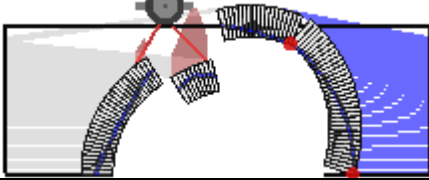
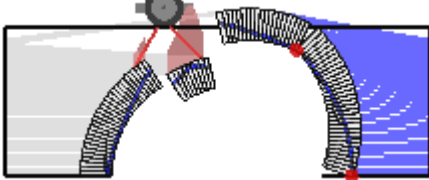
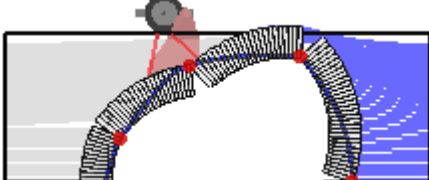
Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 10-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,14	20	0,5	0,6	1093,15	
0,14	50	0,3	0,4	2361,82	
0,14	50	0,3	0,5	4834,95	
0,14	50	0,3	0,6	9608,77	
0,14	50	0,4	0,4	1204,09	
0,14	50	0,4	0,5	1928,3	
0,14	50	0,4	0,6	2468,26	

Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 11-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,14	50	0,5	0,4	588,559	
0,14	50	0,5	0,5	828,644	
0,14	50	0,5	0,6	1053,76	
0,14	90	0,3	0,4	2312,53	
0,14	90	0,3	0,5	4667,21	
0,14	90	0,3	0,6	9560,27	
0,14	90	0,4	0,4	1177,23	

Farklı Parametreler için Analiz Sonuçları ve Göçme Mekanizmaları (Kısım 12-12)

b/L	Blok Sayısı	f/L	Sürtünme Katsayısı	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Şekli
0,14	90	0,4	0,5	1877,03	
0,14	90	0,4	0,6	2464,99	
0,14	90	0,5	0,4	592,572	
0,14	90	0,5	0,5	833,685	
0,14	90	0,5	0,6	1045,78	

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2003 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2007 yılında mezun oldu. 2007-2008 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

2007 yılından bu yana Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.