

39297

**GÖVDE BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERDE TAŞIMA GÜCÜNÜN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

39297

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Necdet TORUNBALCI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Haziran 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Eylül 1994

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Özkan İŞLER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Müfit YORULMAZ

: Prof. Dr. Sadettin ÖKTEN

T.C. OKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

EYLÜL 1994

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında teşvik ve yardımlarını esirgemeyen sürekli ilgi ve desteğini gördüğüm saygıdeğer Hocam Sayın Prof. Dr. Özkan İŞLER'e, en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Birim hocalarıma, arkadaşlarıma ve bana büyük ölçüde manevi destek sağlayan eşime de teşekkürü bir borç bilirim.



İ Ç İ N D E K İ L E R

NOTASYON LİSTESİ.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1.Konuya Bakış ve Açıklamalar.....	1
1.2.Konu İle İlgili Çalışmalar.....	2
1.2.1.Malzemenin Davranışı İle İlgili Çalışmalar.....	2
1.2.2.Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Betonarme Sistemlerin Hesabı Üzerine Çalışmalar.....	5
1.2.3.Gövde Boşluklu Betonarme Kirişlerle İlgili Çalışmalar.....	7
1.3.Amaç ve Kapsam.....	9
BÖLÜM 2. BETONARMENİN DAVRANIŞI VE LİNEER OLMAYAN ANALİZİ İÇİN BİR ÇÖZÜM YÖNTEMİ	10
2.1.Betonun Davranışı.....	10
2.1.1.Betonun Gerilme-Şekil Değiştirme Bağıntısı ve Tanjant Modülü.....	11
2.1.2.Betonun Göçmesi İle İlgili Kabuller...	12
2.2.Çeliğin Davranışı.....	13
2.2.1.Çeliğin Gerilme Deformasyon Bağıntısı.	13
2.2.2.Çeliğin Akması İle İlgili Kabuller....	14
BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN BETONARME YAPI ELEMANLARINA UYGULANMASI VE BİLGİSAYAR PROGRAMI.....	15
3.1.Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	15
3.2.Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Betonarme Analizi.....	15
3.2.1.Sonlu Eleman Özellikleri.....	16
3.2.1.1.Beton Üçgen Levha Eleman.....	17
3.2.1.2.Beton Dörtgen Levha Eleman....	21
3.2.1.3.Çelik Çubuk Eleman.....	22
3.2.2.Betonarme Yapı Elemanlarının Modellenmesi.....	23
3.2.3.Aderansın Modellenmesi.....	24
3.2.4.Gerilme Alanında Çatlak Etkisinin Modellenmesi.....	26
3.3.Yük Artımı Yöntemi ve Çözüm Tekniği.....	27
3.4.Bilgisayar Programı.....	29

BÖLÜM 4. GÖVDE BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERDE TAŞIMA GÜCÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ.....	32
4.1.Problemin Matematik Modeli.....	32
4.2.Dolu Gövdeli Kiriş İçin Çözüm.....	40
4.3.Birinci Grup Kirişler.....	42
4.4.Kesit Zayıflama Katsayıları.....	72
4.5.İkinci Grup Kirişler.....	76
4.6.Yöntemin Deneysel Çalışma Sonuçlarıyla Karşılaştırılması.....	107
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
5.1.Gövde Boşluklarının Konumu İle İlgili Değerlendirmeler.....	109
5.2.Gövde Boşluklarının Büyüklüğü ve Sayısı İle İlgili Değerlendirmeler.....	111
5.3.Gövde Donatılarının Taşıma Gücüne Etkisi İle İlgili Değerlendirmeler.....	112
5.4.Göçme Yüğü ve Göçme Şekli İle İlgili Değerlendirmeler.....	113
5.5.Genel Çatlak Davranışı.....	114
5.6.Yük-Deplasman Davranışı.....	114
5.7.Son Değerlendirmeler ve Öneriler.....	114
KAYNAKLAR.....	116
EKLER.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	128

NOTASYON LİSTESİ

A_b	: Gövde boşluğu alanı.
$[A]$	: Deplasman fonksiyonlarını belirleyen koordinatlara bağlı dikdörtgen matris.
$[a]$	: Uç deplasmanları sayısına eşit sayıda sabitlerden oluşan kolon matris.
$[A_d]$	: Deplasman fonksiyonlarını belirleyen ve düğüm noktası koordinatlarından oluşan kare matris.
a	: Mesnet ile ilk boşluk arasındaki uzaklık.
a_i	: Deplasman fonksiyonu katsayıları.
b	: Gövde boşluğu boyu, Kiriş genişliği.
d	: Gövde boşluğu yüksekliği, kiriş faydalı yüksekliği.
d_o	: Gövde boşluğu yüksekliği.
d_a	: Gövde boşluğunun kiriş alt kenarına olan uzaklığı
d_u	: Gövde boşluğunun kiriş üst kenarına olan uzaklığı
$[D]$	: Malzeme matrisi.
$[d]$	: Uç deplasmanlar matrisi.
E	: Elastisite modülü.
E_1, E_2	: Asal doğrultulardaki tanjant modülleri.
e_0	: Gövde boşluğu eksantrisitesi
h	: Kiriş yüksekliği.
$[I]$	: Birim matris.
$[K]$	: Eleman rijitlik matrisi.
k	: Dolu gövdeli ve gövde boşluğu içeren kirişlerin göçme yükleri arasındaki oran.
L	: Kiriş açıklığı.
M	: Moment.
P_u	: Göçme yükü.
P_{sey}	: Sonlu elemanlarla elde edilen göçme yükü.

P_{test}	: Deneylerden elde edilen göçme yükü.
p	: Yük parametresi.
P_0	: Dolu gövdeli kiriş göçme yükü.
P_k	: Gövde boşluklu kiriş göçme yükü.
P_i	: Yükler arasındaki sabit oranlar.
$[P]$	: Yükleme matrisi.
q_i	: Sisteme etkiyen yükler.
$[q]$	: Düğüm noktalarına etkiyen dış yüklerden oluşan kolon matrisi.
$[S]$	: Sistem rijitlik matrisi.
$[U]$	: Deplasman fonksiyonlarından oluşan matris.
V	: Kesme kuvveti.
x_k	: Kayma açıklığı.
α	: Asal gerilmelerin oranı, Kesme modülü alıkoyma faktörü
β	: Betonun silindirik basınç mukavemeti.
δ	: Kiriş açıklığı ortasındaki deplasman.
Δ	: Üçgen sonlu eleman alanı.
$[\epsilon]$	: Deformasyon matrisi.
ϵ_1, ϵ_2	: Asal doğrultulardaki deformasyonlar.
$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$	: Deformasyon bileşenleri.
λ	: Gövde donatısız kirişlerde kesit zayıflama katsayısı.
ν_2/ν_1	: Asal doğrultulardaki poisson sabitleri.
σ	: Gerilme.
$[\sigma]$	: Gerilme matrisi.
σ_1, σ_2	: Asal doğrultulardaki gerilmeler.
$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	: Gerilme bileşenleri.

ÖZET

Günümüzde modern binalarda, havalandırma, elektrik su, atık su ve mekanik tesisatlar için kullanılan kanallar ve borular asma tavanlar üzerindeki boşluklarda bulunmaktadır. Kiriş gövdesinde açılacak boşluklar arasından bu tesisat kanallarını geçirmek suretiyle önemli miktarda bir alan kazanılarak daha ekonomik bir çözüm elde edilebilmektedir.

Ancak gövdesinde boşluk bulunan bir kiriş, servis yükleri altında büyük çatlaklar, deformasyonlar ve kiriş rijitliğinin azalması gibi bir takım sorunlar da beraberinde getirmektedir.

Bilindiği gibi boşluklu betonarme kirişlerin taşıma gücünün klasik hesap yöntemleriyle incelenmesi oldukça zor ve karmaşık bir problemdir. Bu tür problemlerde analizin güçlüğü, betonun yapısal özelliği ve yük altındaki davranışının henüz kesin olarak ifade edilememiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle gerek bilimsel çalışmalarda gerekse uygulama projelerinin çözümünde analizin sonlu elemanlar yöntemiyle yapılması büyük üstünlükler sağlamakta ve gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada gövdesinde boşluk açılarak zayıflatılmış tek açıklıklı ve iki tekil simetrik yükü yüklenmiş basit mesnetli betonarme kirişlerin artan yükler altındaki davranışı lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş ve bu kirişlerin taşıma güçleri elde edilmiştir.

Çalışmanın 1. Bölümünde literatürdeki benzer araştırmalar hakkında kısaca bilgi verildikten sonra 2. Bölümde betonarmenin davranışı ve lineer olmayan analizi için esas alınan çözüm yöntemi açıklanmıştır. 3. Bölümde lineer olmayan sonlu elemanlar yönteminin betonarme yapı elemanlarına uygulanması ve kullanılan bilgisayar programı hakkında bilgi verilmiştir. 4. Bölümde çeşitli boşluk konumları ve sayıları için gövde donatısız ve gövde donatılı olmak üzere gözönüne alınan iki grup kiriş sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, gövde boşluğu ve gövde donatısının kirişlerin taşıma gücü üzerindeki etkileri kirişlerde oluşan çatlak durumlarında dikkate alınarak araştırılmıştır.

Çalışmada gövde boşluklu kirişlerin tasarımında oldukça önemli yer tutan boşluk yeri ve boyutlarıyla ilgili öneriler getirilirken bu önerilerin 1. Bölümdeki literatürdeki deney verileriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmaktadır.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE ULTIMATE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH WEB OPENINGS BY NONLINEAR FINITE ELEMENT METHOD

In modern building construction, ducts and pipes for air conditioning, water supply, sewage and other electrical and mechanical services are accommodated in the space above the false ceiling. Passing these ducts through openings in the floor beams eliminates a significant amount of dead space and results in more compact and economical design. Unless proper provisions are made in the design office for these openings, there is a risk that each of the subtrades will knock out holes to suit their installations and possibly weaken the structural frame of the building to a critical degree. Therefore, provision of these passings after a rigorous engineering analysis will not only satisfy a general popular demand but also solve a significant problem.

In this study, behaviour of reinforced concrete beams containing rectangular openings, subjected to two point loads and simply supported at its ends are studied under increasing loads by nonlinear finite element method and effects of the loss of section due to openings on the load-carrying capacity of the beams and the necessary conditions in design are investigated.

In the first chapter, some information is given about previous similar researches. Unfortunately, only a limited amount of research work on this subject has been performed. Among these researches carried out by the experimental and theoretical ones, there is no detailed study concerning the application of finite element method to reinforced concrete beams with web openings.

The behaviour of concrete considered in the analysis, selected mathematical model and the types of analysis all play an important role in obtaining more realistic results by using nonlinear finite element method.

Therefore, investigations concerning the behaviour of materials and nonlinear finite element analysis are also given at the stage of searching literature.

In the second chapter, a method of analysis for the behaviour of reinforced concrete elements and nonlinear analysis is fully explained. Starting from the behaviour of concrete under biaxial loading, stress-strain relations based on the results obtained by Kupfer et al [4],[9], and

formulated by Link is considered. Relations given in dimensionless parameters of Kupfer for orthotropic and nonlinear behaviour of concrete and failure criteria are used.

The deformation responses of reinforcing steel bars are represented by ideal elasto-plastic relationship. This relationship is linear elastic up to yielding, as from this point for the final branch that has been given a slight inclination in order to avoid the numerical instabilities associated with zero stiffness.

In the third chapter, information about the application of nonlinear finite element method to plane reinforced concrete structures and the computer program are provided. Two element types are selected to represent reinforced concrete structures, rectangular elements to simulate concrete and bar elements for steel.

The numerical representation of cracking is based on the smeared crack approach. The smeared crack approach spreads the effect of cracking over a large region where bond slip actually occurs. As a result the assumption of perfect bond is considered to describe adequately the interaction between steel and concrete.

The failure mode in finite elements representing concrete is controlled according to failure envelope curve of Kupfer and the failure is described in three types modes. Separation mode cracking, separation-crushing mode cracking and crushing mode cracking.

The failure mode in bar elements representing steel is controlled according to whether the stresses have reached to yielding point or not.

Under incremental load, the following descriptions concerning the behaviour of the structural system are given.

- *In case separation mode cracking occurs in one or more elements, microcracks have a tendency to propagate.

- *In a certain region, in many neighboring elements, when the separation mode cracking occurs, the cracks in these elements form into greater and continuous cracks.

- *In consequence of cracks growing up gradually, structural system collapses in separation mode cracking.

- *When the crushing mode cracking occurs in an element, the structural system collapses in crushing mode cracking.

*Also in case of separation-crushing mode cracking in an element, structural system collapses in separation-crushing mode cracking.

*As a result of yielding of the bar elements, structural system collapses in yielding mode as well.

The collapse load of the structural system is determined by following up the failure modes, load-deformation and stress-strain curves in critical points of the system.

In addition, since the nonlinear finite element procedure used has already been fully described, this method will be discussed only briefly here. The application to structural analysis requires the use of constitutive laws describing the strength and deformation properties of concrete and steel as well as the consideration of interaction between steel and concrete. According to this,

*A load increment at adequately frequent intervals is selected so as to estimate the approximate collapse load of the structural system.

*In the beginning, concrete is assumed as a linear elastic material, initial elasticity modulus and poisson ratio are adopted and linear elastic analysis of the problem is performed by finite element method.

*In this linear elastic analysis, σ_1 and σ_2 principal stresses and $\alpha = \sigma_1/\sigma_2$ principal stress ratio are calculated from σ_x, σ_y and τ_{xy} .

*By means of the charts prepared according to σ_1/σ_2 principal stress ratio and σ_2 compression stress, tangent modulus and poisson ratio of concrete exhibiting orthotropic behaviour are obtained.

*By means of nodal displacements, the nodal forces of the bar elements are calculated and then the stresses are obtained.

*According to updated characteristics of the materials, the problem is solved again.

*Until the realistic characteristics of the material behaviour calculated for finite elements are attained, the iteration could be made.

*In all finite elements, stresses obtained in every step are added to total stresses which are calculated in the preceding steps.

*By means of the accepted failure criteria, cracking in concrete elements and yielding in steel elements are controlled.

*If separation mode cracking occurs in concrete element, the element is assumed to be cracked and lost strength in one direction.

*If crushing mode cracking occurs in a concrete element and/or yielding in a steel element, it is assumed that the structural system collapses.

*If there is no collapse, load level is increased and analysis is continued up to collapse.

In the fourth chapter, for various of opening locality and numbers, beams with web reinforcement and without web reinforcement are analyzed by nonlinear finite element method and the effects on load-carrying capacity of beams of web openings and web reinforcements are investigated by also considering the crack conditions.

In the numerical procedures, two major group beams are considered. Every one of the groups is extended over three series beams provided loading condition and type of supporting are the same. In these beams carried out both of the group, the location of the openings on the beam is changed on vertical and horizontal direction. Otherwise in every series beam, number of openings on the beam is changed provided that the opening area is kept constant. In other words, provided the total area of the web openings on the beam is fixed. Six openings in first series of beams, four in the second series and two in the third ones are considered and the variation of load-carrying capacity due to web openings is investigated.

The results of this investigation are compared with those of experimental research works. The results of the experiments of Mansur et al [29] are used. The results obtained from this study match well with the results of tests.

In the fifth chapter, the results of the analysis that is obtained by nonlinear finite element method and the effects on load-carrying capacity of web openings and web reinforcements are evaluated.

In this evaluation, important aspects and parameters are considered such as location of web openings, eccentricity of web openings below or above the beam axis, number of web openings, size of web openings, effects of web reinforcement, collapse load, mode of failure, load-deflection behaviour and general cracking behaviour.

The following conclusions may be drawn from the investigation,

- *Openings affect load-carrying capacity of the beams by corrupting stress transfer on beam.

- *The load carrying capacity of the beams containing a few small openings that have the same area is greater than those of beams containing a large opening.

- *The load carrying capacity of the beams decreases significantly as openings are close to the loading point. That is, openings located in a relatively high-moment region give larger deflections and smaller collapse load.

- *Web opening located in high-moment region has influence on loading capacity of the beam and this opening determines collapse load.

- *The ultimate strength of the beams increases in case of reinforcement near the sides of the openings.

- *The load-carrying capacity of the beams increase significantly as the openings are close to the tension zone.

While recommendations concerned in location and size of openings which are important in detailing beams with web openings are given, good agreement between the theoretical and experimental results is concluded.

BÖLÜM 1.GİRİŞ

1.1.KONUYA BAKIŞ VE AÇIKLAMALAR

Modern binalarda, bazı mimari gereksinimlerden dolayı veya tesisat kanallarında sürekliliği sağlamak amacıyla kiriş üzerinde bir takım boşlukların bulunması gerekmektedir. Kiriş gövdesinde açılan bu boşluklar için tasarım sırasında bazı koşullar yerine getirilmedikçe bu boşlukların herbiri yapının taşıyıcı sistemi üzerinde olası bazı olumsuzlukları beraberinde getirecek ve riskli bir durum ortaya çıkartacaktır. Bu nedenle yapıda taşıyıcı sistem bütünlüğü bozulmayacak şekilde bu geçişlerin sağlanması önemli bir problem olarak güncelliğini korumaktadır.

Bu çalışmada betonarme kirişlerde gövde boşluklarının neden olduğu kesit kaybının kiriş taşıma gücü üzerindeki etkileri araştırılmış ve tasarımda gözönüne alınması gereken koşullar saptanmaya çalışılmıştır. Bu konuyla ilgili olarak henüz sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Çoğunluğunu deneysel çalışmaların oluşturduğu bu araştırmalar arasında sonlu elemanlar yönteminin gövde boşluklu betonarme kirişlere uygulanmasıyla ilgili kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması halinde gerçeğe yakın sonuçların elde edilebilmesi için, analizde gözönüne alınan beton davranışının, seçilen matematik modelin ve çözüm tekniğinin önemli bir rolü olmaktadır. Bu nedenle literatür araştırması aşamasında malzemenin davranışı ve sonlu elemanlar yöntemiyle ilgili çalışmalara da yer verilmiştir.

Konu ile ilgili bugüne dek yapılan çalışmalar üç ana başlık halinde verilmeye çalışılmıştır.

1.2. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALARA TOPLU BİR BAKIŞ

1.2.1. Malzemenin Davranışı ile İlgili Çalışmalar.

Betonarmeyi meydana getiren çelik ve beton farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Betonun basınca çeliğin ise çekmeye dayanıklı olması, bu iki malzemenin beraberce kullanılarak hem basınca hem de çekmeye dayanıklı bir kompozit malzemenin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Betonarme çeliğinin davranışı artan yük altında belirli bir limite kadar elastik, akma sınırı denilen bu sınırdan sonra ise plastik bir davranış göstermektedir. Şimdiye kadar çelik üzerinde yapılan çalışmalar bu malzemenin davranışını oldukça gerçekçi bir biçimde ortaya çıkarmıştır.

Tek eksenli basınç halinde betonun davranışı çok sayıda deneysel çalışmada incelenmiştir. Betonun gerilme birim deformasyon eğrisi lineer olmayan bir çok değişkene bağlı olmaktadır. Örneğin çimento ve agrega türü, beton karışımı, deney elemanının boyutları, kür yöntemi, yükleme hızı, sargılı olup olmama durumu ve betonun yaşı beton gerilme deformasyon eğrisinin lineer olmamasını etkileyen değişkenler arasında sayılabilir.

Şimdiye kadar yapılan çalışmaların sonucunda beton için genel bir bünye denklemi ve göçme kriteri vermek mümkün olamamıştır. Ayrıca betonarme bir yapı içindeki betonun davranışı ile donatısız betonun davranışının aynı olmayacağı açıktır.

Kent ve Park [1] yapmış oldukları çalışmada, betonun birim kısalması $\epsilon_c=0,002$ değerine ulaşınca ya da parabol daha sonra düşen bir çizgiden ibaret olan gerilme deformasyon eğrisini elde etmişlerdir. Saenz (2) ise çalışmaları sonucunda beton birim kısalması $\epsilon_c=0.0025$

değerinde maksimum değere ulaşan ve daha sonra düşen bir parabolden oluşan ve her noktada sürekliliğin sağlandığı bir gerilme-deformasyon eğrisi önermiştir.

Tek ve çift eksenli basınç altında betonun davranışı ile ilgili olarak Liu, Nilson ve Slate [3] tarafından yapılan deneysel bir çalışma iki eksenli yükleme halinde beton basınç mukavemetinin tek eksenli yükleme halindeki basınç mukavemetinden daha büyük olduğunu ortaya çıkartmış ve bu durum iki eksenli basınç halinin oluşan mikro çatlakların genişlemesine engel olması ile açıklanmıştır. Bu çalışmada tek ve çift eksenli basınç hali için gerilme-deformasyon bağıntısı verilmektedir.

Kupfer, Hilsdorf ve Rüsch [4] tarafından yapılan bir başka deneysel çalışmada iki eksenli basınç altında beton mukavemetinin tek eksenliye kıyasla % 27 oranında daha fazla olduğu saptanmıştır.

Eşdeğer tek eksenli şekil değiştirme olarak adlandırılan ve iki eksenli gerilme şekil değiştirme bağıntılarının, tek eksenli gerilme şekil değiştirme bağıntısından elde edildiği bir modelin geliştirildiği araştırmada [5] ayrıca beton için artan yükler altında deney sonuçlarından faydalanarak birde bünye denklemi önerilmiştir.

Betonun davranışını saptamaya yönelik bir başka çalışmada [6] iki eksenli gerilme hallerini göz önüne alan ve deney sonuçlarına dayanan , kırık doğru parçalarından oluşan bir bünye denklemi geliştirilmiştir.

Tasuji [7] tarafından yapılan deneylerde beton levhalar iki eksenli bütün gerilme halleri göz önüne alınacak şekilde sabit gerilme oranları için incelenmiş ve iki eksenli basınç ve iki eksenli çekme mukavemetinin tek eksenli basınç ve çekme mukavemetlerine nazaran daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca basınç-çekme halinde basınç

mukavemetinin, çekme gerilmelerinin artması ile azaldığı belirtilmiştir.

Tasuji, Slate ve Nilson [8] tarafından yapılan bir başka çalışmada betonun iki eksenli yükleme altındaki davranışı incelenerek iki eksenli bir göçme kriteri verilmiştir. Göçme sırasında şekil değiştirmelerle gerilmeler arasında bir takım lineer bağıntılar elde edilmiş ayrıca beton için tek eksenli yükleme durumundan hareketle iki eksenli yükleme için asal gerilme oranlarına bağlı bir bünye denklemi önerilmiştir.

Kupfer ve Gerstle [9] daha önce yapmış oldukları deneysel çalışmaların sonuçlarına dayanarak betonun iki eksenli gerilme altındaki şekil değiştirmeleri için sonlu elemanlar yönteminde kullanılmak üzere bir takım ifadeler vermişlerdir.

Link, Schafer ve Mehlhorn [10] daha önce Kupfer ve arkadaşlarının yapmış oldukları deney sonuçlarını [4] esas alarak iki eksenli yükler altında betonun lineer olmayan gerilme-deformasyon bağıntısını matris formunda ifade etmiştir.

Betonun üç eksenli gerilme halindeki davranışını belirlemek üzere bir çok deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bunlar arasında betonun izotrop ve elastoplastik bir malzeme olarak dikkate alındığı bir çalışmada [11] üç eksenli gerilme hali için analitik bir bünye denklemi elde edilmiş, ayrıca iki eksenli gerilme hali içinde matris formunda bir gerilme-deformasyon bağıntısı verilmiştir.

Betonun üç eksenli yükleme altındaki davranışının incelendiği bir diğer çalışmada [12] kısa süreli ve monoton artan yüklerin etkisi altında yapılan deney sonuçlarından faydalanarak bir bünye denklemi ve göçme kriteri elde edilmiştir.

Ottosen [13] tarafından yapılan bir araştırmada kısa süreli yük etkisinde üç eksenli gerilme durumu incelenmiş ve betonun elastisite modülü ve poisson oranları değiştirilerek lineer olmayan bir bünye denklemi geliştirilmiştir.

1.2.2.Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Betonarme Sistemlerin Hesabı Üzerine Çalışmalar.

Sonlu elemanlar yönteminin Betonarmeye ilk uygulanaşı Ngo ve Scordelis tarafından 1967'de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada [14] betonarme kirişlerin dış yükler altındaki davranışı beton ve donatı iki boyutlu üçgen elemanlarla ve lineer elastik olarak modellenerek sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Donatı ve beton arasındaki aderans fiktif yay elemanlarla temsil edilmiş, betonda oluşacak çatlaklar için önceden bir dağılım gözönüne alınmıştır. Bu çalışma daha sonra etriye etkisi ve agrega kilitlenmesi durumlarında göz önüne alacak şekilde geliştirilmiş ve agrega kilitlenmesi yaylarla modellenmiştir [15].

Nilson [16] tarafından yapılan bir çalışmada beton için lineer olmayan bir gerilme-deformasyon eğrisi kullanılmıştır. Yüklemin artımlı olarak gerçekleştirildiği bu çalışmada aderans kaybı içinde lineer olmayan bir bağıntı kullanılmış ve betonda oluşacak çatlakların eleman ayrıtları boyunca oluşacağı kabul edilmiştir. Beton elemanlar arasında meydana gelen çatlaklar, komşu düğüm noktalarının birbirlerinden ayrılması ve yeni bir geometrik durumun ortaya çıkmasıyla tanımlanmıştır.

Beton ve çelik için elastoplastik davranışın kabul edildiği ve üç boyutlu elemanların kullanıldığı bir başka çalışmada [17] donatı beton içerisinde bir tabaka halinde yayılı kabul edilmiş ve malzeme matrisi kompozit tabaka modeline göre yeniden düzenlenmiştir. Elemanlara farklı

büyükölükte artımlarla öükleme yapılmış ve betonun çatlaması durumunda çatlamış kesitte bir miktar kayma rijitliğı bırakılmıştır.

Cedolin, l. ve Dei Poli, S. araştırmalarında [18], daha önce Kupfer ve Liu tarafından yapılmış olan kısa süreli öükleme ve iki eksenli gerilme altında beton davranışının ve aderansın incelendiğı deney sonuçlarından faydalanarak bir sonlu eleman deplasman yöntemi geliştirmişlerdir.

Çalışmada öük artımı yöntemi kullanılmış ve her öük adımında lineer olmayan etkiler ardışık yaklaşımla hesaba katılmıştır. Çatlamanın yayılı kabul edildiğı bu yöntemi daha sonra kesme etkisi ile kırılan betonarme kirişlerin hesabına uygulamışlardır.

İki eksenli ve yön değıştiren öükler altında beton için hem lineer ve ortotrop bir bünye denkleminin hemde lineer olmayan bir bünye denkleminin kullanıldığı iki ayrı çalışmada [19],[20], her öük adımında lineer olmayan etkiler, fark öükler şeklinde, sisteme teğetsel rijitlik matrisleri yardımıyla yeniden uygulanarak bir ardışık yaklaşım yöntemi kullanılmıştır. Her iki çalışmadada beton ve çeliğı tam bir aderansla birbirlerine bağlandığı kabul edilmiş ve betonda oluşacak çatlakların yayılı olduğu düşünölmüştür.

Sonlu elemanlar yönteminin plak hesabına uygulandığı bir çalışmada [21] beton için gerilmeye bağılı ortotrop davranış kabul edilmiş ve belli bir öük seviyesine kadar sabit rijitlik matrisi kullanılmış daha sonra rijitlik matrisleri değıştirilmiştir. Bu çalışmadada yayılı çatlak durumu göz önüne alınmıştır.

Büyüköztürk, O. [22] donatının beton içinde yayılı kabul edildiğı çalışmasında beton için genelleştirilmiş Mohr-colomb davranışına dayanan bir göçme kriterini göz önüne almış ve bu kabulleri sonlu elemanlar yöntemine uygulamıştır.

Son yıllarda yapılan ve betonarme sistemlerin hesabı için iki boyutlu sonlu elemanların kullanıldığı bir başka çalışmada [23] Vecchio ve Collins tarafından önerilen [24] değiştirilmiş basınç alan teorisi esas alınmış ve bu teori esasından saptırılmadan basitleştirilerek genel bir hale getirilmiştir. Basınç alan teorisi, betonun asal gerilme ve asal şekil değiştirme yönlerinin çakışması esasına dayanmaktadır.

1.2.3.Gövde Boşluklu Betonarme Kirişlerle İlgili Çalışmalar

Nasser, Acavalos ve Daniel [25] birebir boyutlarda ve gövdesinde büyük delikler açılmış tek açıklıklı basit mesnetli betonarme kirişleri deneysel olarak incelemişler ve bu tür kirişlerin tasarımı için bazı önerilerde bulunmuşlardır. Gövde deliği içeren bu kirişlerin taşıma güçleri, gövde deliği içermeyen kirişin taşıma gücüyle kıyaslanmıştır. Gövdelerinde büyük delikler içeren bu tür kirişlerin vierendeel kirişlerine benzer davranış gösterdikleri, boşluksuz kirişlerle kıyaslandığında ise yeterince donatılmaları halinde taşıma güçlerinin hemen hemen değişmediği, fakat rijitliklerinin azaldığı belirtilmektedir.

Mansur ve Lee [26], gövdesinde büyük dikdörtgen boşluklar bulunan kirişlerin eğilme ve burulma etkisi altındaki davranışını incelemişler ve göçmenin boşluk köşelerinde meydana gelen mafsallar sonucunda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Gövdesinde küçük dairesel bir boşluk bulunan betonarme kirişlerin eğilme ve burulma momenti etkisi altındaki davranışlarının deneysel ve analitik olarak araştırıldığı bir başka çalışmada [27], eğilme momentinin, kirişin burulma rijidliği üzerindeki yararlı etkisine dikkat çekilmekte ve önerilen çözüm yönteminin oldukça iyi sonuç verdiği, ancak bu yöntemin sadece dairesel boşluklar için

geçerli olduğu, büyük dikdörtgen boşluklu kirişlere uygulanmasının, göçme şeklinin tamamen farklı olması nedeniyle olanaksız olduğu belirtilmektedir.

Göçme yükü analizine dayanan bir yöntemin geliştirildiği ve tekil bir yük etkisinde, gövdesinde büyük bir dikdörtgen boşluk bulunan betonarme kirişlerin taşıma güçlerini belirlemeye yönelik olarak yapılan teorik bir çalışmada [28] kirişin göçme yükü ve boşluk civarındaki kesme kuvveti yayılışının yalnızca kesit özelliklerine değil, boşluk büyüklüğü ve boşluğun kiriş üzerindeki yerinde bağlı olduğu sonucuna varılmaktadır.

Mansur ve arkadaşları bu kez eğilme ve kesme etkisine maruz ve gövdesinde büyük dikdörtgen boşluklar bulunan betonarme kirişlerin tasarımı için bir yöntem önermişler, daha sonra bu yöntemle göre donatılan kirişleri deneysel olarak incelemişler [29] ve boşluk köşelerinin diyagonal çubuklarla takviye edilmesinin çatlak ve sehim kontrolü açısından olumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Burulma, eğilme ve kesme etkisine maruz ve gövdesinde küçük dikdörtgen bir boşluk bulunan betonarme kirişlerin burulma mukavemeti ve göçme modlarının hem teorik hemde deneysel olarak araştırıldığı bir çalışmada [30] kirişler, burulma-eğilme ve kesme-eğilme momenti oranları ile basınç-çekme donatısı oranları değiştirilmek suretiyle deneye tabi tutulmuştur. Burulma ve eğilme ile birlikte kesme etkisinin varlığının kirişin burulma mukavemetini olumsuz etkilediği görülmüştür.

Büyük gövde boşluklu betonarme kirişlerin davranışının teorik olarak incelendiği bir araştırmada yük-deplasman bağıntısı için bir yöntem önerilmiştir [31]. Yöntem boşluk köşelerinde plastik mafsalların oluşması düşüncesinden hareket etmekte ve her bir plastik mafsal oluşumuna karşı gelen deplasmanlar, eğilme etkisi ve boşluk bölgesindeki

vierendeel etkisinin sebep olduğu deplasmanların lineer süperpozisyonu ile hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar daha önce incelenmiş olan tek açıklıklı ve sürekli kirişlerin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Betonarme sürekli kirişlerde gövde boşluklarının kiriş davranışına etkisinin deneysel olarak incelendiği bir başka araştırmada [32] açıklık sayısı, boşluk boyutları ve yeri esas değişkenler olarak belirlenmiş, donatı miktarı ve düzeni sabit tutulmuştur. Sürekli kirişlerin boşluğun iki ucunda meydana gelen plastik mafsallar sonucunda mekanizma durumuna geçerek göçtüğü belirtilmiş, ayrıca boşluk boyunun ve yüksekliğinin artmasının kirişlerde erken çatlama, deplasmanlarda artış ve göçme yükünün azalmasına neden olduğu gözlenmiş ancak göçme yükünün azalmasının göçme modunu değiştirmedeği saptanmıştır.

1.3.AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışmada güdülen amaç betonarmenin lineer olmayan davranışını dikkate alarak çeşitli boyutlarda ve sayıda gövde boşluğu içeren kirişlerin artan yükler altındaki davranışını belirlemek ve tasarımda göz önüne alınması gereken koşulları saptamak olarak ifade edilebilir.

Bu amaçla çalışmanın 2. bölümünde betonarmenin davranışı ve lineer olmayan analizi için esas alınan çözüm yöntemi açıklanmış, 3. bölümde sonlu elemanlar yönteminin betonarme yapı elemanlarına uygulanması ve bilgisayar programı hakkında bilgi verilmiştir. 4. bölümde ise çeşitli boşluk konum ve sayıları için gövde donatılı ve gövde donatısız olarak ele alınan iki grup kiriş sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş ve gövde boşluğu ve gövde donatılarının kiriş taşıma gücü üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

BÖLÜM 2. BETONARMENİN DAVRANIŞI VE LINEER OLMAYAN ANALİZİ

2.1. BETONUN DAVRANIŞI

Beton bir yapı elemanının gerçek davranışı, betonun yapısal özelliği ve yük altındaki davranışının kesin olarak ifade edilememiş olmasından dolayı henüz tam olarak belirlenememiştir. Betonarme yapıların oldukça güç ve karmaşık olan analizinin ardında betonun yük deformasyon bağıntısının lineer olmaması, dolayısıyla iki veya üç eksenli gerilme durumunda gerilme-deformasyon bağıntılarının karışıklığı, yükleme sırasında betonun sürekli olarak çatlaması nedeniyle göçme modunun belirlenmesindeki güçlük ve sünme ve rötire gibi olayların beton davranışını zamanla değiştirmesi önemli rol oynamaktadır.

Bugüne kadar betonun yük-deplasman bağıntısı ve göçme zarfının formunu ve analitik ifadelerini belirlemek üzere bir çok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Halen çok eksenli gerilme durumunda betonun gerilme-deformasyon bağıntılarını ve göçme mekanizmasını daha gerçekçi olarak ifade edebilmek için çalışmalar devam etmektedir.

Uygulamada, yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların ışığı altında genellikle iki boyutlu bir analiz yeterli olmakta ve gerçeğe oldukça yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada beton için iki eksenli gerilme durumundan hareketle Kupfer ve arkadaşları [4],[9] tarafından yapılmış olan deney sonuçlarına dayanarak Link [10] tarafından formüle edilmiş olan gerilme-deformasyon bağıntısı gözönüne alınmıştır. Betonun ortotrop ve lineer olmayan davranışı ve göçme kriteri için ise Kupfer'in boyutsuz diyagramları esas alınarak çıkartılan bağıntılardan yararlanılmıştır [33].

2.1.1. Betonun Gerilme-Deformasyon Bağıntısı ve Tanjant Modülü

İki eksenli gerilme halinde beton için Link tarafından önerilen gerilme-deformasyon bağıntısı kabul edilmiştir. Gerilme analizinde, Link tarafından önerilen bu bağıntı, Kupfer'in iki eksenli yükleme altında yapmış olduğu deney sonuçlarından faydalanılarak düzlem gerilme durumu için ve betonun lineer olmayan davranışını da temsil edecek şekilde oluşturulmuştur.

Beton davranışının formülasyonunda, Kupfer'in verdiği boyutsuz gerilme-deformasyon diyagramları esas alınarak yeni bir eksen takımına göre düzenlenmiş olan diyagramlardan faydalanılmıştır (Ek A, Tablo A.1). Bu durumda sonlu elemanın σ_1 ve σ_2 asal gerilmeleri, asal gerilme oranları ve deformasyonlar cinsinden

$$-\sigma_1/\beta = f_1 (\sigma_1/\sigma_2, \epsilon_1) \quad (2.1)$$

ve

$$-\sigma_2/\beta = f_2 (\sigma_1/\sigma_2, \epsilon_2) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Ayrıca betonun ortotropik özelliğide;

$$-\sigma_2/\beta = f (\sigma_1/\sigma_2, \nu_2/\nu_1) \quad (2.3)$$

bağıntısına göre diyagramlar halinde verilmiştir (Ek A, Tablo A.2)

Link tarafından yapılan

$$\nu_2/\nu_1 \cong E_2/E_1 \quad (2.4)$$

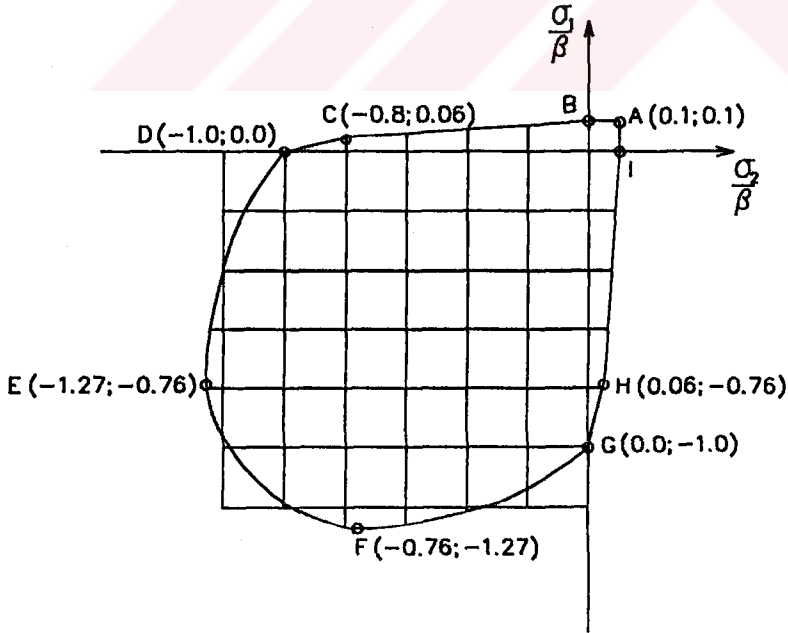
varsayımı betonun ortotropik özelliğini ifade eden yukarıdaki (2.3) bağıntısında göz önüne alınırsa

$$-\sigma_2/\beta = f (\sigma_1/\sigma_2, E_2/E_1) \quad (2.5)$$

bağıntısı sayesinde asal doğrultularda oluşan tanjant modülleride analize dahil edilmiş olmaktadır [33].

2.1.2. Betonun Göçmesi ile İlgili Kabuller

İki eksenli yükleme durumunda betonun göçme kriteri, Kupfer tarafından verilmiş olan ve birden fazla eğriden oluşan göçme zarfı eğrisi ile tarif edilmiştir (Şekil 2.1). Daha sonra bu eğrinin sonlu elemanlarla betonarme sistemlerin analizinde kullanılmak üzere analitik ifadeleri elde edilmiştir [33], (Ek A, Tablo A.3). Belli bir yük seviyesi için elde edilen asal gerilmeler ve bu eğriler yardımıyla elemanlarda göçme kontrolu yapılmaktadır. İki eksenli yükler altında betonun göçmesi elemanda oluşan asal gerilme çiftinin, basınç-basınç, basınç-çekme yada çekme-çekme olması hallerine göre büyük farklılıklar göstermektedir. σ_1 ve σ_2 asal gerilmelerinin çekme veya basınç oluşları beton elemanın farklı modlarda göçmesine yol açmaktadır. Sonuç olarak eleman zorlanma biçimine göre, ayrılma, ezilme-ayrılma veya ezilme kırılması modlarından biri ile göçmektedir.



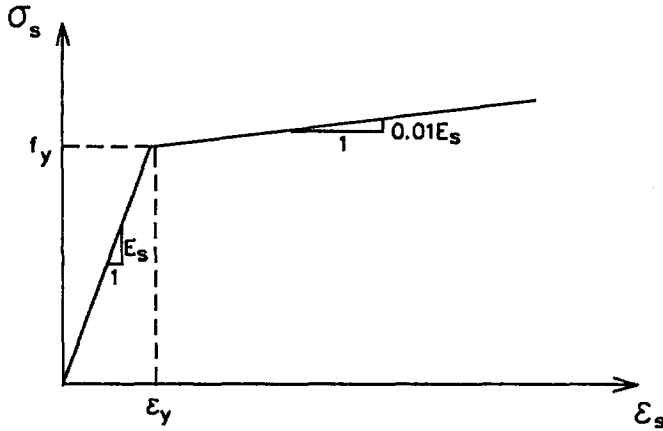
Şekil 2.1. İki Eksenli Gerilme Durumunda Betonun Göçme Zarfı

2.2.ÇELİĞİN DAVRANIŞI

Betonarme bir yapı elemanının davranışı, betonun yapısal özelliği ve yük altındaki davranışının yanında, çeliğin davranışı ile de çok yakından ilgilidir. Bugüne kadar çeliğin davranışını belirlemek üzere bir çok teorik ve deneysel çalışma yapılmış ve bu çalışma sonuçlarının oldukça uyum içinde olduğu görülmüştür. Çeliğin mekanik özelliklerini belirlemek üzere yapılan deney sonuçları betondaki kadar dağılım göstermemektedir. Dolayısıyla çeliğin hem basınç hemde çekme durumuna ait gerilme-deformasyon bağıntısı ve akma durumu betona nazaran daha gerçekçi olarak ifade edilebilmiştir.

2.2.1.Çeliğin Gerilme-Deformasyon Bağıntısı

Bu çalışmada hem basınç hemde çekme etkisi altında bulunan çelik için ideal elastoplastik davranış kabul edilmiştir. Çelik gibi sünek karakter gösteren malzemelerin davranışına büyük ölçüde uyan bu model, taşıma gücü ve limit analiz gibi yöntemlerin ideal malzemesidir. Çelik için gerilme-deformasyon diyagramı akmanın başlamasına kadar lineer elastik bu noktadan sonra ise hesaplarda karşılaşılan güçlükleri önlemek yani artımlı yöntemi uygulayabilmek için, küçük bir eğimle yükselen doğru şeklinde modellenmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2.Çeliğin Gerilme-Deformasyon Bağıntısı

2.2.2.Çeliğin Akması ile İlgili Kabuller

Çelik elemanların herhangi birinde eksenel deformasyon akma sınırını aşıyor ise o eleman için elastiklik modülü başlangıç E değerinden $0.01E$ gibi küçük bir değere indirilmekte ve analize devam edilmektedir. Esas donatıda çubuk kuvvetlerinden yararlanılarak hesaplanan birim uzamalar, çelik için kabul edilen en büyük birim uzama değeri olan $\epsilon_{max}=0.01$ sınırını aştığı zaman yapı elemanının göçtüğü kabul edilmektedir.



BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN BETONARME YAPI ELEMANLARINA UYGULANMASI VE BİLGİSAYAR PROGRAMI

3.1.SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde özellikle bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir hesap yöntemidir. Çubuk sistemler ve sürekli ortamlara uygulanabilen bu yöntemde, yapı elemanı veya yapı sistemi birbiriyle sadece düğüm noktalarında bağlı sonlu elemanlara bölünmüş olarak kabul edilmektedir. Çerçeve sistemlerden oluşan yapılarda elemanlar tek boyutlu yani çubuk eleman olarak seçilmekte, sürekli ortamlardan oluşan levha, plak, kabuk gibi yapıların analizinde ise ortam iki veya üç boyutlu üçgen ve/veya dörtgen sonlu elemanlara ayrılmaktadır. Yöntem uyarınca her sonlu elemanın rijitlik matrisi önce elemanın yerel koordinatlarına göre hesaplanır, sonra bütün elemanlar için bulunan rijitlik matrisleri tüm sistemin rijitlik matrislerini elde etmek üzere sistem koordinatlarına göre dönüştürülür. Tüm yapının rijitlik matrisi böylece elde edildikten sonra düğüm noktalarındaki kuvvetler ile yerdeğiştirmeler arasındaki bağıntıya geçilebilir. Çözüm deplasman veya kuvvet yöntemlerinden birisi ile yapılabilir.

Bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar programı deplasman yöntemine göre çözüm yapmakta yani önce bilinmeyen olarak seçilen deplasmanlar elde edilmekte sonra bu deplasmanlardan hareketle uç kuvvetler belirlenmekte ve daha sonrada gerilme bileşenleri bulunmaktadır.

3.2.SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BETONARME ANALİZİ

Betonarme yapı elemanlarının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi betonarmeye özgü bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Örneğin, yapı sisteminin tek

boyutlu elemanlarla idealize edilmesi yetersiz kalmakta, sistemi iki veya üç boyutlu olarak modelleme gereği ortaya çıkmaktadır. Betonarmenin homojen bir malzeme olmaması dolayısıyla iki farklı davranış gösteren beton ve donatının birlikte modellenmesi gerekmektedir. Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin lineer olmaması hesapları olumsuz yönde etkilemekte ve güçleştirmektedir. Betonarmeye özgü aderans, aderans sıyrılması, agreganın kilitlenmesi ve kaldıraç etkisi gibi etkilerin modellenmesi çok basit şekillerde mümkün olabilmektedir. Artan yük altında oluşan çatlaklar beton sonlu eleman özelliklerini sürekli olarak değiştirmekte ve bu da analizi güçleştirmektedir. Son olarak da betonarmenin davranışı rötrenin ve sünmeden ötürü zamana bağlı olarak değişmektedir.

Bütün bu sorunlar betonarme yapı elemanlarının gerçekçi bir şekilde modellenmesi sayesinde en aza indirgenebilmekte, sonlu elemanlar yöntemi ve bilgisayar kullanılarak betonarmenin gerçek davranışına oldukça yakın sonuçlar elde edilmektedir. Betonarme yapıların sonlu elemanlarla analizi hakkında halen çalışmalar yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Birinci bölümde bu çalışmalar hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

3.2.1. Sonlu Eleman Özellikleri

Sonlu elemanlar yönteminin betonarme kirişlere uygulanışında beton için üçgen ve dörtgen elemanlar, donatı için ise çubuk elemanlar kullanılmıştır. Bu bölümde çubuk, üçgen ve dörtgen elemanlara ait karakteristik bilgilere kısaca yer verilecek ve düzlem gerilme durumu için betonun lineer olmayan davranışının çalışmada göz önüne alınış şekli açıklanacaktır.

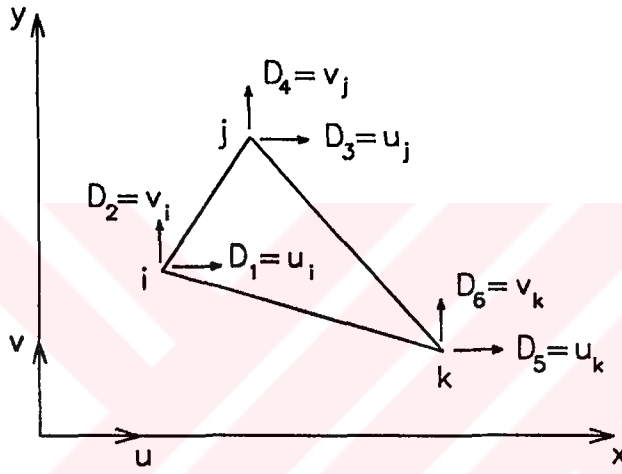
3.2.1.1. Beton Üçgen Levha Eleman

Üçgen elemanda düzlem gerilme haline ait uç deplasman matrisi

$$[d]=[D_1 \ D_2 \quad D_6]^T \quad (3.1)$$

$$[d]=[u_i \ v_i \ u_j \ v_j \ u_k \ v_k] \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir.



Şekil 3.1 Üçgen eleman uç deplasmanları

Deplasman fonksiyonu ise

$$[U]=[A].[a] \quad (3.3)$$

matris formundadır. Burada

$$[U]=[u \ v]^T \quad (3.4)$$

olmak üzere u ve v deplasmanları

$$u=a_1x+a_2y+a_3 \quad (3.5)$$

$$v=a_4x+a_5y+a_6 \quad (3.6)$$

şeklinde x ve y 'nin lineer polinomu olarak ifade edilebilir.

$[a]$ matrisi uç deplasman sayısına eşit sayıdaki sabitlerden oluşan kolon matristir. Üçgen eleman için

$$[a]=[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_6]^T \quad (3.7)$$

dir.

$[A]$ matrisi deplasman fonksiyonlarını belirleyen koordinatlara bağlı dikdörtgen matris olmak üzere

$$[A]=\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

formunda ifade edilebilir.

$[A]$ matrisinde düğüm noktalarının koordinatları yerleştirilerek, düğüm noktaları yerdeğiştirmelerinden oluşan $[d]$ matrisi

$$[d]=[A_d].[a] \quad (3.9)$$

şeklinde bulunur. Eşitliğin her iki tarafı $[A_d]^{-1}$ ile çarpılarak

$$[a]=[A_d]^{-1}.[d] \quad (3.10)$$

elde edilir. Bu eşitlik de(3.3) bağıntısında yerine konursa eleman içindeki deplasman bileşenlerini uç deplasmanlarına bağlayan

$$[u]=[A].[A_d]^{-1}.[d] \quad (3.11)$$

matris bağıntısı bulunur.

Deformasyon ve uç deplasmanları arasındaki bağıntı

$$[\epsilon] = [\partial] \cdot [u] = [\partial] \cdot [A] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [d] = [\partial A] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [d] \quad (3.12)$$

olarak ifade edilebilir. Burada

$$[\epsilon] = [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy}] = [\partial u / \partial x \ \partial v / \partial y \ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x] \quad (3.13)$$

ve

$$\begin{aligned} [\partial A] = [\partial] \cdot [A] &= \begin{bmatrix} \partial / \partial x & 0 \\ 0 & \partial / \partial y \\ \partial / \partial y & \partial / \partial x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14) \end{aligned}$$

İç kuvvetler ve uç deplasmanları arasındaki bağıntı da

$$[\sigma] = [D] \cdot [\epsilon] = [D] \cdot [\partial A] \cdot [A_d]^{-1} \cdot [d] \quad (3.15)$$

şeklindedir. Burada da

$$[\sigma] = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}]^T \quad (3.16)$$

dır. Lineer elastik malzeme ve düzlem gerilme hali için

$$[D] = E / (1 - \nu) \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu) / 2 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

şeklindedir.

Bu çalışmada gerilme analizinde link tarafından önerilen ve Kupfer'in yapmış olduğu çalışmalara dayanan malzeme matrisi gözönüne alınmıştır. Bu matris düzlem

gerilme durumu için ve betonun lineer olmayan davranışını tanımlayacak şekilde oluşturulmuştur.
(EK A, Şekil A.1).

Üçgen eleman rijitlik matrisini elde etmek üzere virtüel iş teoremi uygulanırsa

Denge durumu ve Virtüel şekil değiştirme durumu için

$$[P]=[K].[d] \quad (3.18)$$

$$[d]=[I] \quad (3.19)$$

$$[\epsilon]=[\partial A].[A_d]^{-1}.[I] \quad (3.20)$$

yazılabilir.

Dış kuvvetlerin işi ve Deformasyon işi

$$[I]^T.[P]=[K].[d] \quad (3.21)$$

$$\int_V [[\partial A].[A_d]^{-1}]^T.[D].[\partial A].[A_d]^{-1}[d] dv \quad (3.22)$$

dir.

Bu iki iş birbirine eşitlenirse, simetrik olan Birim deplasman (Rijitlik) matrisini veren ifade

$$[K]=\int_V [[A_d]^{-1}]^T.[\partial A]^T.[D].[\partial A].[A_d]^{-1} dv \quad (3.24)$$

olarak bulunur.Buradada sürekli ortam kalınlığını $t=1$ olarak ve elemanın iç bölgesini integre ederek

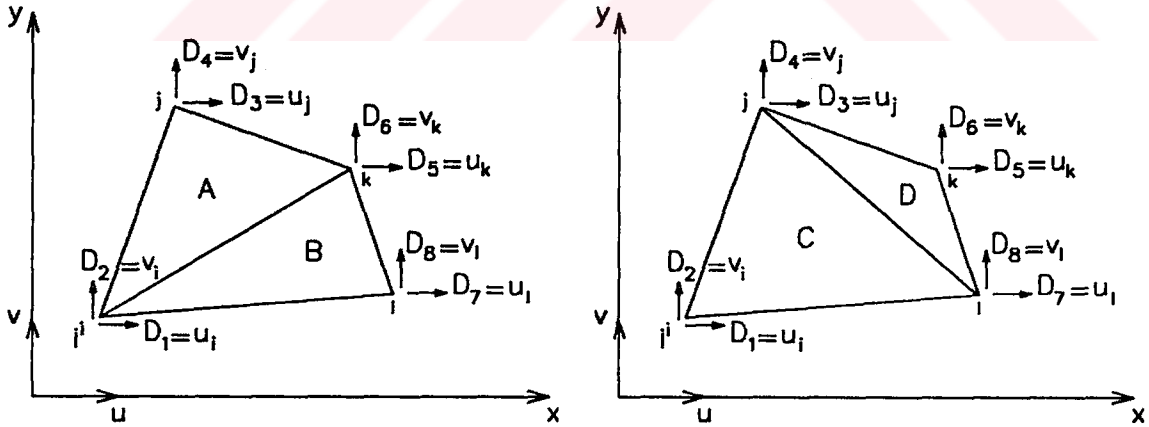
$$[K]=[[A_d]^{-1}]^T.[\partial A]^T.[D].[\partial A].[A_d]^{-1}.\Delta \quad (3.25)$$

formülü elde edilir.Burada Δ üçgen elemanın alanıdır.

3.2.1.2. Beton Dörtgen Levha Eleman

Dörtgen eleman rijitlik matrislerinin elde edilmesinde üçgen eleman rijitlik matrislerinden faydalanılmıştır. Şekil 3.2a 'da görülen dörtgen elemanın rijitlik matrisi A ve B üçgen elemanlarına ait rijitlik matrislerinin aynı numaralı satır ve sütunlarına ait alt matrislerin toplanması ile elde edilmiştir. Sonra aynı işlem şekil 3.2b deki C ve D üçgenleri içinde yapılmış ve bulunan bu iki rijitlik matrisinin ortalaması alınarak dörtgen eleman rijitlik matrisi elde edilmiştir.

Gerilme alanının elde edilişinde dörtgen elemanların merkezinde ilgili A,B,C ve D üçgenlerine ait gerilmelerin ortalaması alınmıştır [34].



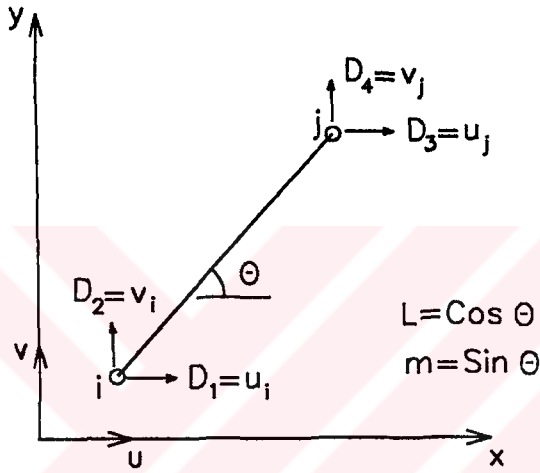
a) A ve B Alt Üçgenleri

b) C ve D Alt Üçgenleri

Şekil 3.2. Dörtgen Elemanın Alt Üçgenleri ve Uç Deplasmanları

3.2.1.3.Çelik Çubuk Eleman

Çubuk elemanların sadece eksenleri doğrultusunda kuvvet taşıdıkları kabul edilmiş ve eksene dik doğrultudaki rijitliklerinin çok büyük olduğu göz önüne alınmıştır.



Şekil 3.3. Çubuk Eleman Uç Deplasmanları

Çubuk eleman uç deplasman matrisi

$$[d] = [u_i \ v_i \ u_j \ v_j] \quad (3.26)$$

şeklindedir.

Çubuğun genel koordinatlardaki rijitlik matrisi ise

$$[K] = EA/L \begin{bmatrix} L^2 & Lm & -L^2 & -Lm \\ & m^2 & -Lm & -m^2 \\ & & L^2 & Lm \\ & & & m^2 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

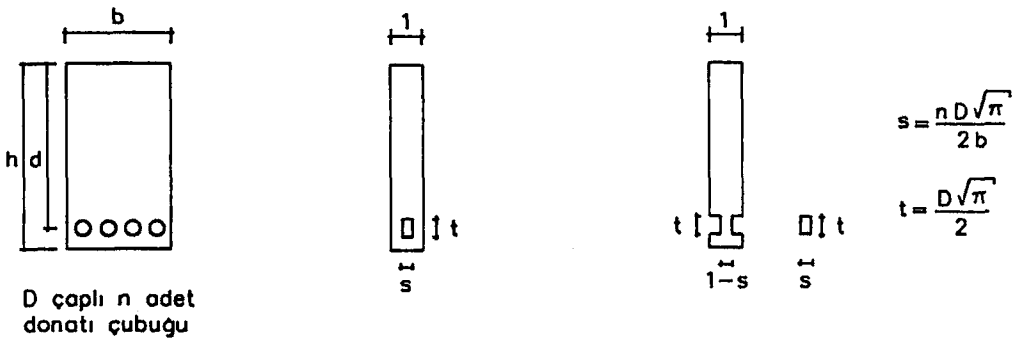
formundadır.

3.2.2. Betonarme Yapı Elemanlarının Modellenmesi

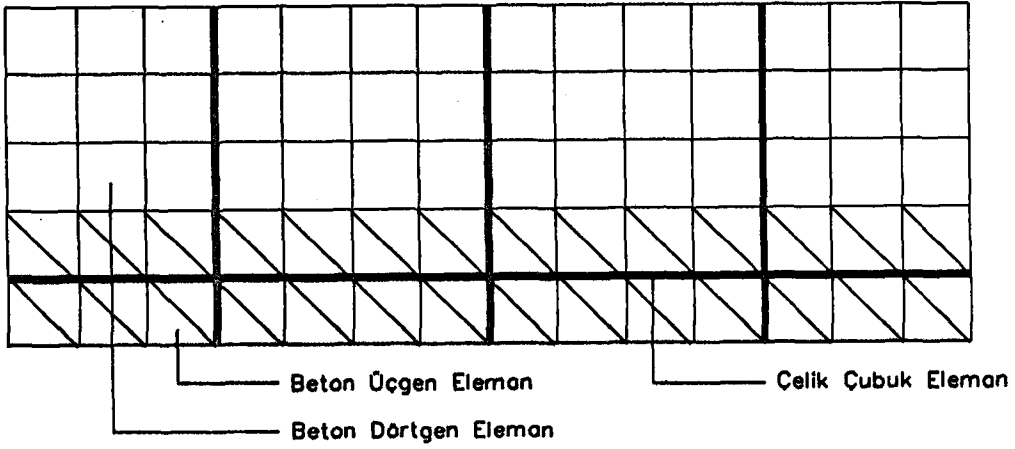
Bu çalışmada sonlu elemanlar yönteminin betonarme kirişlere uygulanışında donatı için çubuk elemanlar, beton için ise üçgen ve dörtgen elemanlar kullanılmıştır.

Gerçek bir betonarme kesit içinde beton ve donatının uygun şekilde modellenenebilmesi için donatının eleman genişliği doğrultusunda üniform olarak yerleştirildiği kabul edilmekte ve kiriş genişliğinin yükseklik ve boyu yanında küçük olması nedeniyle bu doğrultudaki gerilmeler ihmal edilmektedir. Bu durumda sonlu eleman modeli için, kiriş genişliği 1 birim olarak alınmakta ve donatı çubuklarının alanı bir kare kesit olarak düşünülmektedir (Şekil 3.4).

Betonarme için sonlu eleman ağı (Şekil 3.5) de gösterilmektedir. Burada çubuk eleman olarak modellenen donatı çeliğin düğüm noktaları, bulunduğu yerdeki beton eleman düğüm noktaları ile üst üste düşmektedir.



a) Betonarme Kesit b) Birim Kesit c) Beton ve Çelik Model
Şekil 3.4. Betonarme Kesitte Beton ve Donatının Modellenmesi



Şekil 3.5.Betonarme için Sonlu Eleman Ağı

3.2.3.Aderansın Modellenmesi

Sonlu elemanlar yönteminin betonarmeye uygulanışında beton ve donatının ortaklaşa çalışmasını sağlayan aderansın modellenmeside gerekmektedir.Bilindiği gibi aderans, betonun çatlamasından sonra önem kazanarak, gerilmelerin aktarılmasını sağlamaktadır. Yük arttıkça hem çatlaklar oluşmakta hemde betonla çelik arasındaki aderansta kayıplar meydana gelmektedir. Yük aktarılması sırasında beton ile çelik çubuğun temas yüzeyinde herhangi bir yerde meydana gelen kayma gerilmesi kayma arasındaki bağıntıyı elde etmek üzere deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen bağıntılar beton ve çelikle ilgili bir takım karakteristiklere bağlıdır. Bu nedenle aderans gerilmesi-kayma ilişkisi ancak ortalama anlamda hesaba katılabilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin betonarme elemanlara uygulanışında aderansın modellenmesi çeşitli şekillerde olabilmektedir. Yapılan ilk çalışmalarda aderans ve aderans sıyrılmasının modellenenebilmesi için ek bir sonlu eleman kullanılmıştır. Çelikle beton arasında bağlantıyı sağlayan

bu eleman boyutları sıfır olan bir yatay ve birde düşey yaydan oluşmaktadır. Donatı eksenini boyunca mevcut bütün düğüm noktalarında, donatı, her iki yandaki bu yay elemanlarla beton elemanlara bağlanmaktadır. Burada yay elemanların rijitlik matrislerinin elde edilmesinde gerekli olan yatay ve düşey yay sabitlerinin hesaplanması bir çok etkene bağlı olmaktadır. Aderans donatı çubuğu boyunca oluştuğundan yatay yay sabitinin hesaplanması daha da bir önem arz etmektedir. Bu yay katsayılarının hesaplanmasında bir çok araştırmaya konu olmuştur. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalara dayanarak çeşitli aderans sıyrılması denklemleri verilmiştir. Örneğin Bresler ve Bertero'nun [35] yapmış olduğu deneylere dayanarak Nilson'un [16] vermiş olduğu denklem ve Yankelovsky [36] tarafından önerilen denklem bunlar arasında sayılabilir. Ancak bütün bu değerler yardımıyla yapılan çalışmalar birbirinde oldukça farklı sonuçları da beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla aderansın bu şekilde bir takım değişken katsayılar yardımıyla hesaplara uygulanması da ortalama anlamda olmaktadır. Ayrıca betonarme kirişlerin sonlu elemanlarla incelenmesini konu alan çalışmalarda bu tür aderans modeli sadece kiriş ana donatılarında kullanılmış, basınç donatısı, gövde donatısı ve etriyelerde aderans genellikle ihmal edilmiştir. Zaten gözönüne alınan yapı elemanında gerçeğe oldukça yakın davranışın elde edilebilmesi için oldukça küçük boyutlu olarak seçilen beton sonlu elemanların yanında, bütün çubuk elemanlarında yaylarla beton elemanlara bağlanması bilinmeyen sayısını oldukça artırmakta ve çözümü güçleştirmektedir.

Bu çalışmada betonun çatlamasının sayısal olarak tanımlanması yayılı çatlak yaklaşımı ile yapılmaktadır [37],[38]. Yayılı çatlak yaklaşımının kullanılması sonucunda yerel çatlak etkisi belirli bir bölgeye yayılmış olmaktadır, yani aderansın meydana geldiği bölgeden çok uzaklara bu etki donatı uzunluğu boyunca yayılmaktadır. Böyle bir yaklaşımın göz önüne alınması sonucunda beton ve

çelik arasındaki etkileşimin çok detaylı olarak modellenmesi gerekmemektedir.

3.2.4. Gerilme Alanında Çatlak Etkisinin Modellenmesi

Beton çatlamasının yayılı çatlak yaklaşımına göre modellenmesi betonarme elemanların sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde bir takım kriterlerin hesaba dahil edilmesi suretiyle yapılmaktadır. Bu kriterlere aşağıda kısaca değinilmiştir.

Gerilmenin artması halinde maksimum mukavemetin altındaki gerilme seviyeleri için betonun mikro düzeyde çatladığı bilinmektedir. Bu olay genellikle lineer olmama sebebi olarak kabul edilir. Deformasyon üzerindeki bu etki çalışmada kullanılan bünye modeli ile açıklanmaktadır. Mikro çatlakların birleşmesi veya büyük çatlakların oluşması sonucunda maksimum gerilme seviyesine ulaşılmaktadır. Basınç gerilmesi altında bu tür çatlakların oluşması sonucunda yük taşıma kapasitesinin tamamı veya tamamına yakınının tükenmesi söz konusu olmaktadır. Malzemenin bu davranışı yayılı çatlak davranışının formülasyonunda betona sıfır elastisite modülü vermek suretiyle tanımlanmaktadır.

Diğer yandan en azından asal çekme gerilmelerinden birine maruz gerilme durumunda büyük çatlaklar, maksimum asal çekme gerilmesine dik düzlemde meydana gelmektedir. Bu nedenle betonun maksimum asal çekme gerilmesi doğrultusunda yük taşıma kapasitesinin tamamı veya tamamına yakınını kaybettiği kabul edilir. Malzemenin bu davranışıda çatlak düzlemine dik doğrultudaki rijitliğin sıfır alınması suretiyle tanımlanmaktadır. Büyük çatlakların bulunduğu düzlemdeki malzeme özellikleri betonun iki eksenli gerilme altındaki bünye denkleminde değerlendirilmektedir.

Çatlamanın meydana gelmesinden sonraki yük adımlarında çatlamış bölgedeki asal gerilme doğrultuları genellikle çatlak doğrultuları ile üst üste düşmemektedir. Bu nedenle çatlak yüzeyler arasında bir miktar kuvvet transferi olduğu düşünülür. Bu durum, çatlamamış beton kesme modülünün α gibi bir katsayıyla ($0 \leq \alpha \leq 1$) çarpılarak azaltılması suretiyle göz önüne alınmaktadır. Bu oran genellikle sabittir ve kesme modülü alıkoyma faktörü olarak anılmaktadır.

Çatlamış yüzeyler boyunca normal basınç kuvvetinin transferi genellikle çatlamış ve çatlamamış beton malzeme özelliklerinin aynı kaldığının kabul edilmesiyle tanımlanmaktadır. Diğer yandan çekme kuvveti transferinin çatlak yüzeyler boyunca oluşmadığı düşünülerek çatlak yüzeye dik doğrultuda sıfır rijitlik gözönüne alınmaktadır.

3.3.YÜK ARTIMI YÖNTEMİ VE ÇÖZÜM TEKNİĞİ

Sonlu elemanlar yöntemiyle betonarmenin lineer olmayan davranışının incelendiği bu çalışmada, lineer olmama durumu lineer olmayan bünye denklemleri ve artan yükler altında ortaya çıkan çatlaklar nedeniyle sistem rijitliğinin azalması şeklinde analize dahil edilmiştir.

Sisteme etkiyen yüklerin aralarındaki oranlar sabit kalacak şekilde arttığı kabul edilerek yük artımı yöntemi uygulanmıştır. Yükler arasındaki sabit oranlar $p_1, p_2, \dots, p_n$ ile gösterilirse p yük parametresi belli olduğuna göre sisteme etkiyen yükler $q_1=p_1.p$, $q_2=p_2.p$, , $q_n=p_n.p$ şeklinde bulunmaktadır.

Yük parametresinin başlangıç değeri için sistem lineer teoriye göre hesaplanmaktadır. Birinci adımda eleman rijitlik matrislerinin hesabında malzeme için lineer bünye denklemi gözönüne alınmakta ve her bir eleman için eleman

rijitlik matrisleri hesaplanmaktadır. Sonra eleman rijitlik matrislerinin üst üste toplanmasıyla sistem rijitlik matrisi elde edilmektedir. Düşüm noktalarına etkiyen dış yüklerden oluşan kolon matris $[q]$ ile gösterilirse $[S].[d]=[q]$ denge denklemi çözülerek yer değiştirmeler elde edilmektedir. Daha sonra beton elemanlar için $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ gerilmeleri ve bu gerilmelerden hareketle asal gerilmeler ve bunların oranları hesaplanmakta, bulunan bu değerler ve Bölüm 2 'de verilmiş olan bağıntılar yardımıyla ortotrop davranış gösteren betonun tanjant modülleri ve poisson oranları bulunmaktadır. Bundan sonraki yük adımlarında problem yeni malzeme özelliklerine göre çözülmekte ve her yük adımı için betonun elastik ve ortotrop bir malzeme gibi davrandığı ve gerilme-deformasyon bağıntısının lineer olmadığı varsayılmıştır.

Betonu temsil eden sonlu elemanlarda göçme kontrolü Şekil 2.1 'de verilen Kupfer'in göçme kriteri eğrisine göre kontrol edilmiş ve elemanlardaki göçme durumları ayrılma kırılması, ayrılma-ezilme kırılması ve ezilme kırılması olmak üzere üç ayrı modda tarif edilmiştir.

Donatıyı temsil eden çubuk sonlu elemanlarda ise uç yerdeğiştirmeleri bilindiğine göre bunlara ait uç kuvvetlerine geçilmektedir. Uç kuvvetlerinden hareketle gerilmeler hesaplanmaktadır. Çubuk elemanlarda göçme kontrolü her yük adımıyla elde edilen gerilmelerin akma gerilmesine ulaşp ulaşmadığının tahkik edilmesiyle yapılmıştır.

Artan yükler altında sistem davranışıyla ilgili olarak şu tanımlamalar yapılmıştır.

* Bir veya birkaç elemanda ayrılma kırılmalarının görülmesiyle betonda kılcal çatlakların başladığı,

* Belirli bir bölgede bir çok komşu elemanda ayrılma kırılmalarının görülmesi halinde, bu komşu elemanlardaki çatlakların birleşerek büyük ve sürekli çatlakları oluşturduğu,

* Giderek büyüyen bu çatlaklar nedeniyle sistemin nihayet ayrılma kırılması modunda göçtüğü,

* Bir tek elemanda ezilme kırılmasının görülmesiyle sistemin ezilme modunda göçtüğü,

* Bir elemanda ezilme-ayrılma kırılmasının görülmesiyle sistemin ayrılarak ezilmekte olduğu,

* Çubuk elemanlarda akma meydana gelmesi sonucunda sistemin akma modunda göçtüğü varsayılmıştır.

Sistemin göçme yükünün belirlenmesi problemin matematik modelini temsil eden sonlu eleman ağı üzerinde yukarıdaki tanımlamalar çerçevesinde elemanların göçme modları ve kritik görülen noktalardaki yük-deplasman ve gerilme-deformasyon eğrileri izlenmek suretiyle yapılmıştır.

3.4.BİLGİSAYAR PROGRAMI

Bu bölümde lineer olmayan sonlu elemanlar programının çözüm algoritması açıklanmış ve programla ilgili bilgilere kısaca yer verilmiştir. Ayrıca çalışmanın ekler bölümünde ana program akış diyagramı verilmiştir (Ek.B).

Betonarme yapı elemanlarının sonlu elemanlar yöntemiyle analizinin yapıldığı bilgisayar programının çözüm algoritması aşağıda verilmiştir.

* Betonarme elemanın yaklaşık göçme yükü tahmin edilerek yeterince sık bir yük artımı seçilir.

* Başlangıçta beton lineer elastik kabul edilerek E ve ν değerlerine göre problemin sonlu elemanlar yöntemiyle lineer elastik bir zm yapılır.

* zm sonucunda beton elemanlar için bulunan σ_x, σ_y ve τ_{xy} gerilmelerinden hareketle σ_1 ve σ_2 asal gerilmeleri ve $\alpha = \sigma_1 / \sigma_2$ asal gerilme oranları hesaplanır.

* σ_1 / σ_2 asal gerilme oranları ve σ_2 basınç gerilmesine göre düzenlenen abaklar yardımıyla ortotrop davranış gösteren betonun tanjant modülleri ve poisson oranları bulunur.

* ubuk elemanlar için bulunmuş olan uç deplasmanlarından hareketle uç kuvvetleri hesaplanır. Daha sonra çubuk elemanlardaki gerilmeler elde edilir.

* Elde edilen yeni malzeme özelliklerine göre problem tekrar üzülür.

* Sonlu elemanlar için hesaplanan malzeme özellikleri sabit bir değere ulaşıncaya kadar iterasyon yapılabilir.

* Tüm sonlu elemanlarda her adımda elde edilen gerilmeler bir önceki adımda hesaplanan toplam gerilmelere ilave edilir.

* Sistemin zm belirli bir yük seviyesi için elde edilmiştir. Gz önüne alınan göçme kriteri yardımıyla beton elemanlarda kırılma, elik elemanlarda akma kontrolu yapılır.

* Beton elemanlarda ayrılma kırılması varsa bu elemanların çatladığı ve bir doğrultuda mukavemetlerini yitirdikleri kabul edilir. Beton elemanlardan birinde

ezilme kırılması olduğunda veya ana donatı çubuğunda akma meydana geldiğinde sistemin göçme yüküne ulaştığı kabul edilir.

* Sistemde göçme yoksa yük seviyesi artırılarak sistem göçme yüküne ulaşincaya kadar analize devam edilir.



BÖLÜM 4. GÖVDE BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERDE TAŞIMA GÜCÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Bu bölümde gövdesinde boşluk açılarak taşıma gücü zayıflatılmış tek açıklıklı ve iki tekil simetrik yüklerle yüklenmiş basit mesnetli betonarme kirişlerin artan yükler altındaki davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş ve bu kirişlerin taşıma güçleri elde edilmiştir.

Bilindiği gibi değişken kesitli ve/veya boşluklu betonarme kirişlerin taşıma gücünün klasik hesap yöntemleriyle incelenmesi oldukça zor ve karmaşık bir problemdir. Bu tür problemlerde analizin güçlüğü, betonun yapısal özelliği ve yük altındaki davranışının henüz kesin olarak ifade edilememiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle gerek bilimsel çalışmalarda gerekse uygulama projelerinin çözümünde analizin sonlu elemanlar yöntemiyle yapılması büyük üstünlükler sağlamakta ve gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Sayısal çözümler, iki ana grup kiriş gözönüne alınmak suretiyle yapılmıştır. Birinci grup kirişlerde sadece ana donatı olması haline göre, İkinci grup kirişlerde ise ana donatının yanısıra özellikle boşluk çevresinde gövde donatılarının bulunması durumuna göre çözüm yapılmıştır. Herbir grupta dörtgen formdaki gövde boşluklarının kiriş üzerindeki toplam alanı sabit tutulmak suretiyle konum ve sayıları değiştirilerek kirişlerin artan yükler altındaki davranışları saptanmıştır.

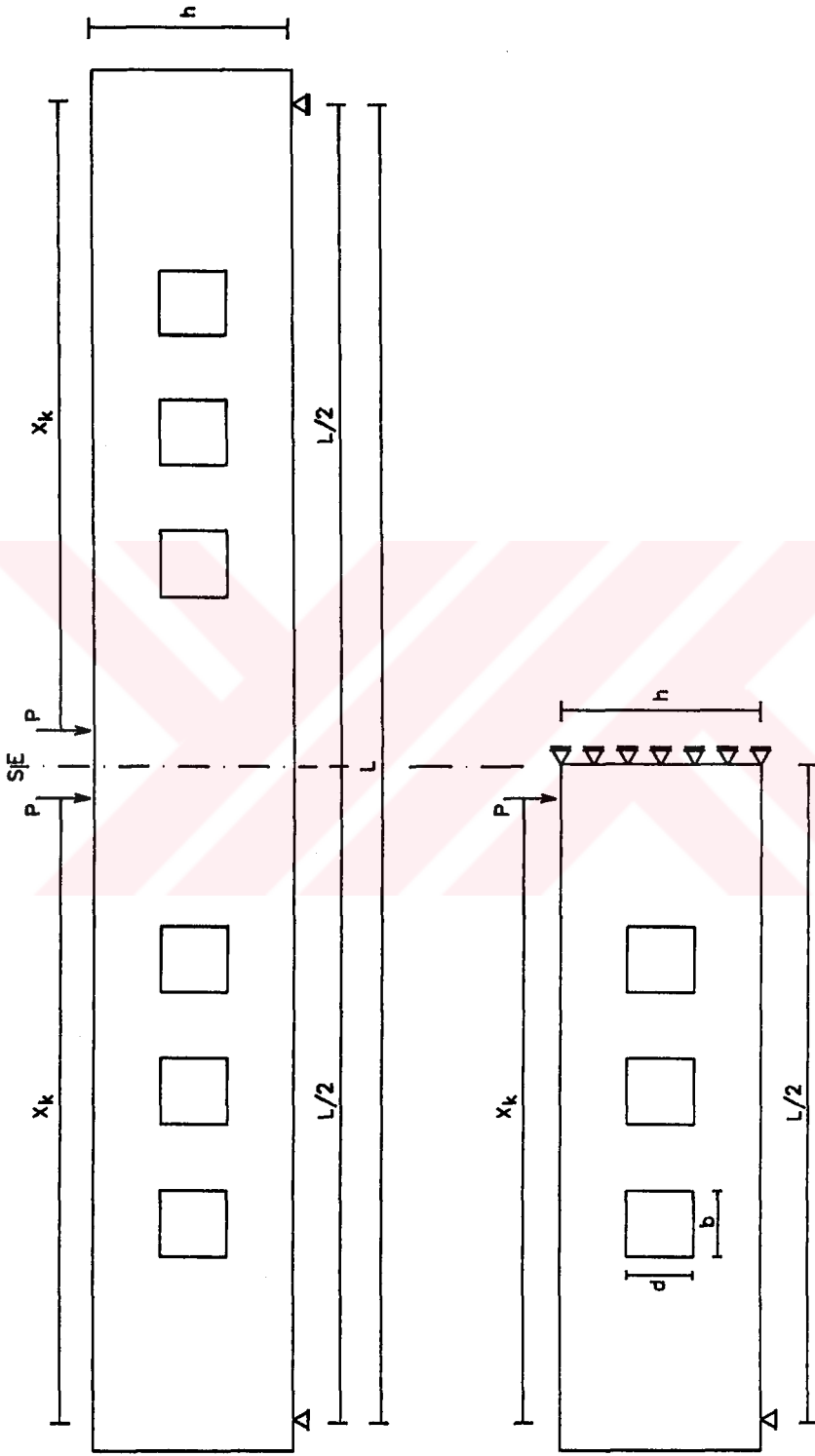
4.1.PROBLEMİN MATEMATİK MODELİ

Çalışmada gözönüne alınan betonarme kirişlerin geometrisi, yükleme şekli ve mesnet şartlarının uygun olması nedeniyle hesaplarda, sistemin yarısının dikkate alınması yeterli görülmüştür (Şekil 4.1). Bu durumda

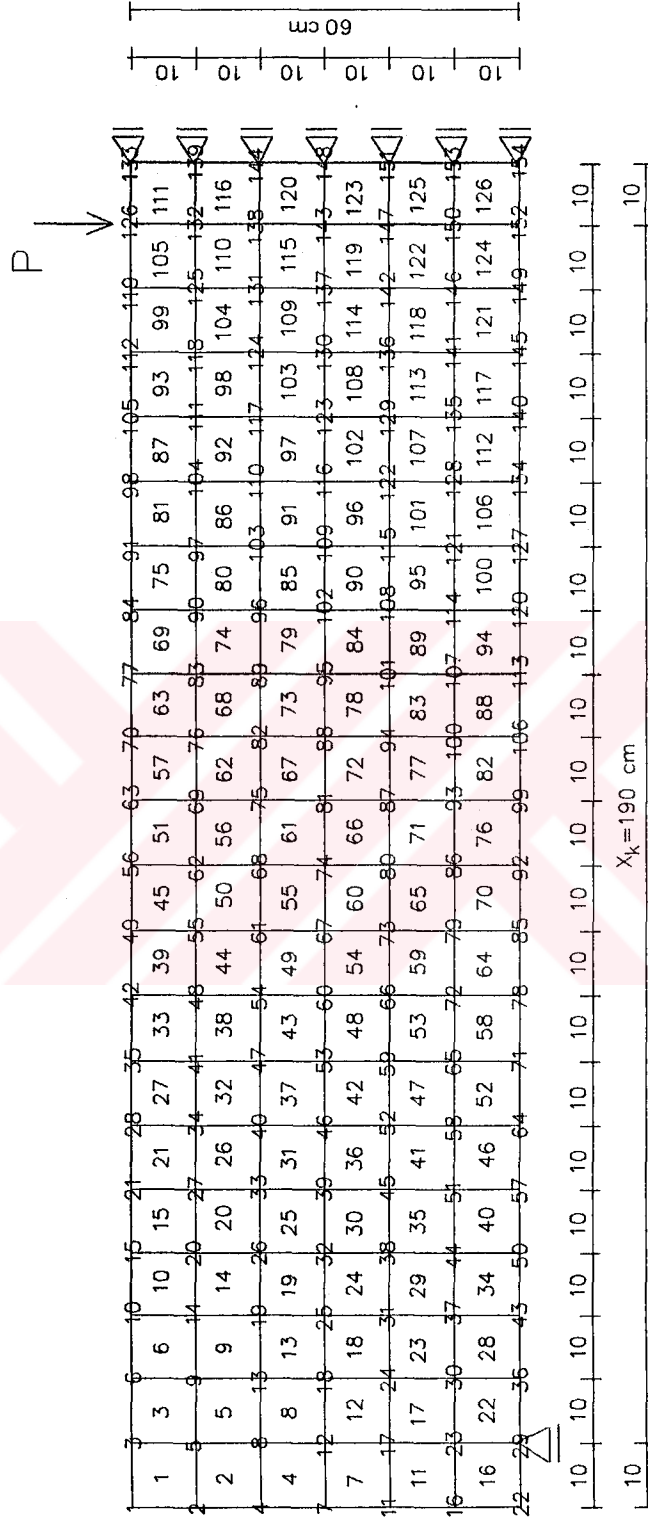
analizde esas alınan yarım kiriş için uygun bir sonlu eleman ağı seçilmiş ve bu sonlu eleman ağında beton üçgen ve dörtgen elemanlarla, donatılar ise çubuk elemanlarla temsil edilmişlerdir. Sonlu eleman ağının ve sonlu eleman büyüklüklerinin saptanmasında kiriş geometrisi ve boyutlarının yanı sıra, beton ve donatı etkileşiminde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Bu nedenle özellikle beton eleman boyutlarının belirlenmesinde, yerel çatlak etkisinin belirli bir bölgeye yayılmasına olanak sağlayacak şekilde bir düzenlemeye gidilmiş ve beton eleman boyutları kabul edilen bir alt limitin üstünde kalacak şekilde saptanmıştır [37],[38].

Analizde göz önüne alınan betonarme kirişin sonlu eleman ağının kurulmasında yukarıda açıklanan faktörler dikkate alınarak sayısal çözümlerde kullanılacak tipik bir sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Betonarme kiriş için beton ve çelik sonlu elemanlar sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

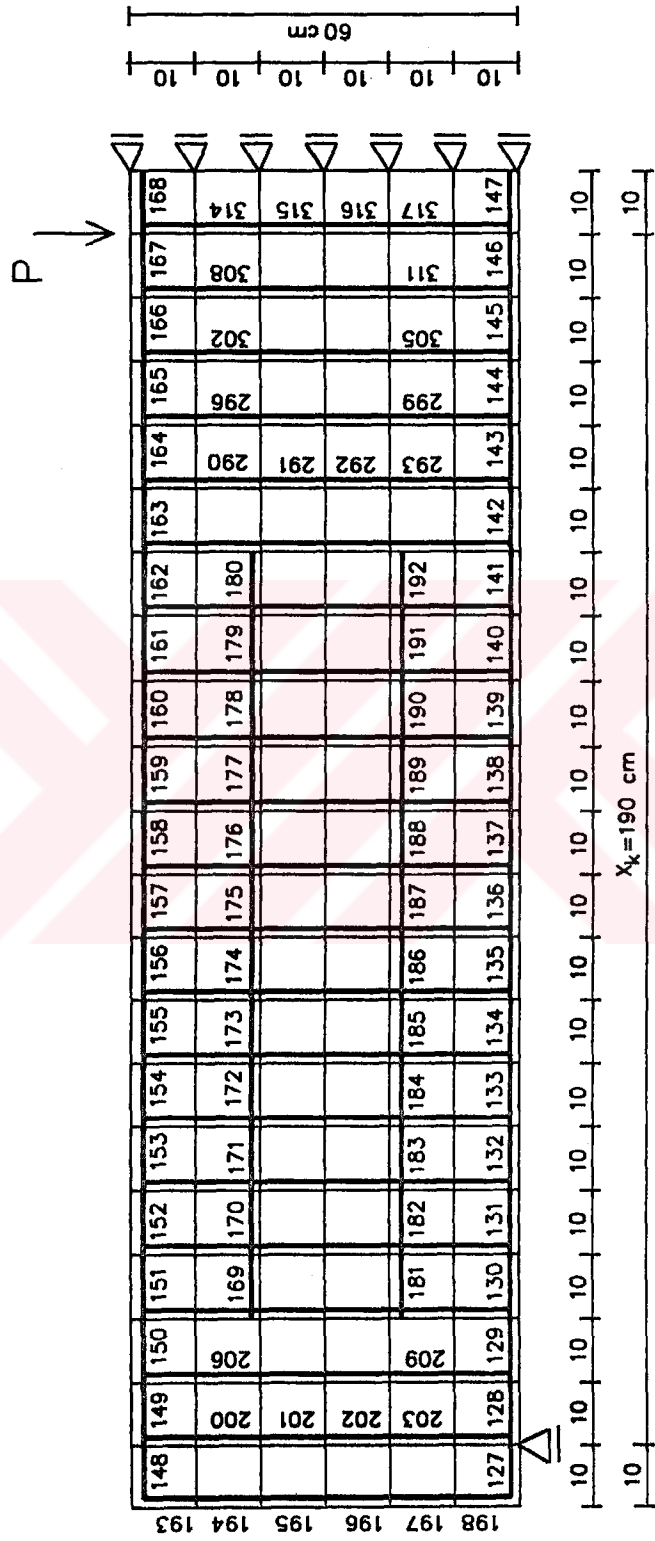
Sayısal çözümlerde iki ana grup kiriş göz önüne alınmıştır. Her bir grupta yükleme durumu ve mesnetlenme biçimi aynı olmak koşuluyla üç seri kirişden oluşmaktadır. Her iki grubu oluşturan bu kirişlerde, kiriş gövdesinde bulunan başlukların konumu, mesnet ile yük arasındaki bölgede yatay ve düşey doğrultuda değiştirilmek suretiyle incelenmişlerdir. Ayrıca her seri kirişte gövdedeki boşluk alanı sabit kalmak üzere boşluk sayısı değiştirilerek çözüm yapılmıştır. Yani dörtgen formdaki gövde boşluklarının kiriş üzerindeki toplam alanı sabit tutularak, birinci seri kirişlerde 6 adet, ikinci seri kirişlerde 4 adet ve üçüncü seri kirişlerde 2 adet boşluk göz önüne alınmış ve gövde boşluklarının kirişlerin taşıma gücünde meydana getirdikleri değişim incelenmiştir. Analizde kullanılan yarım kiriş modeli esas alınarak her bir seri kiriş için gövde boşluklarının konumu ve sayısı Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



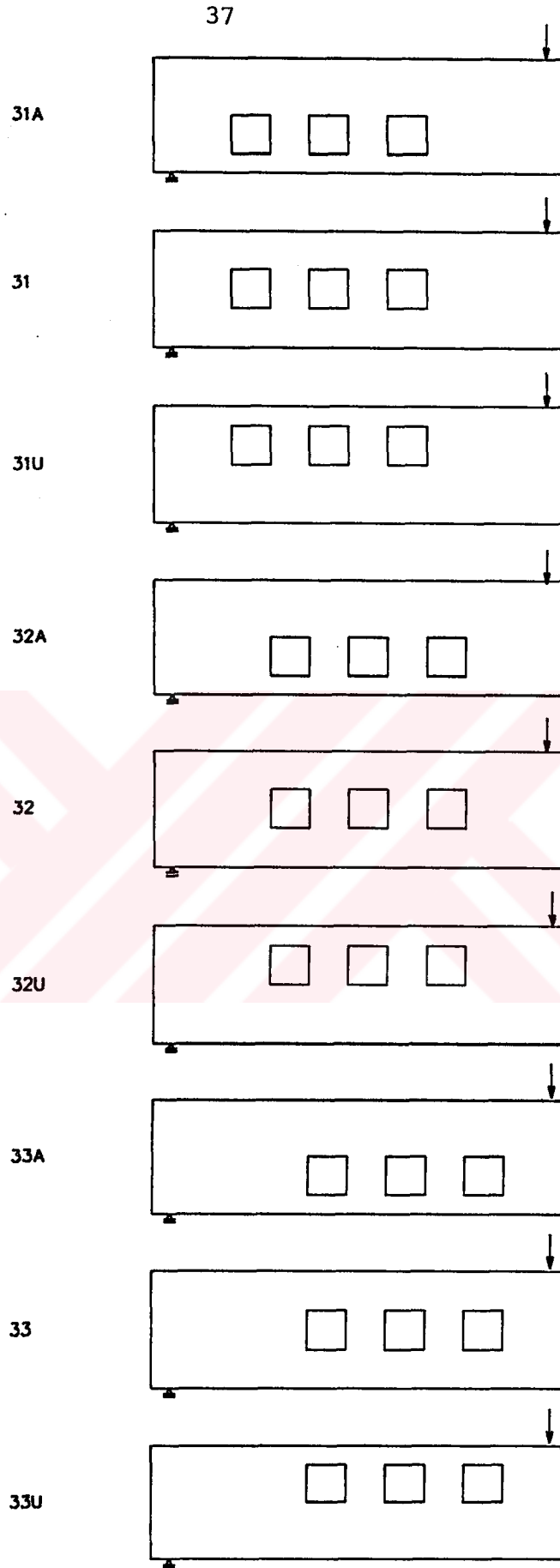
Şekil 4.1 Tipik Bir Betonarme Kiriş ve Analizde gözönüne Alınan Yarım Kiriş Modeli



Şekil 4.2 Analizde Gözönüne Alınan Beton Sonlu Elemanlar

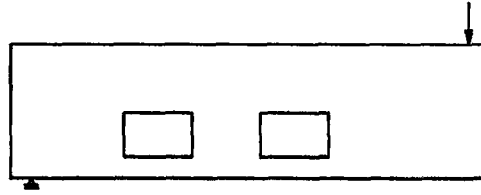


Şekil 4.3 Analizde Gözönüne Alınan Çubuk Sonlu Elemanlar

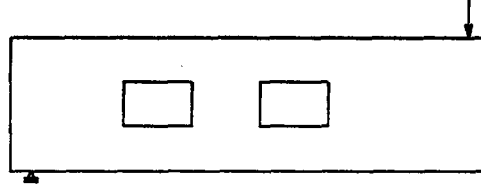


Şekil 4.4 Birinci Seri Kirişler

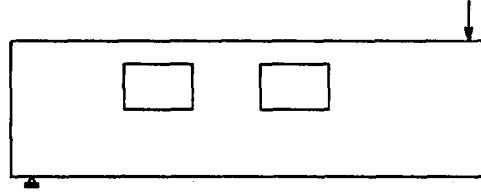
21A



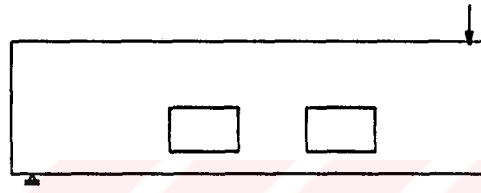
21



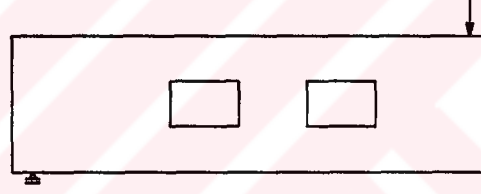
21U



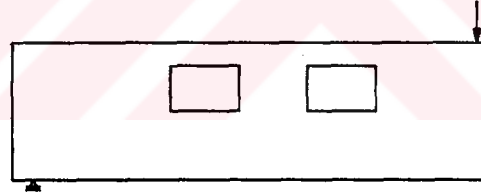
22A



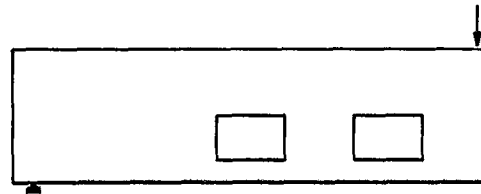
22



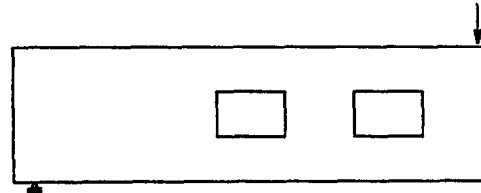
22U



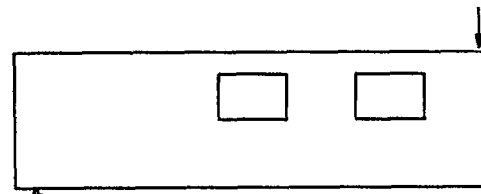
23A



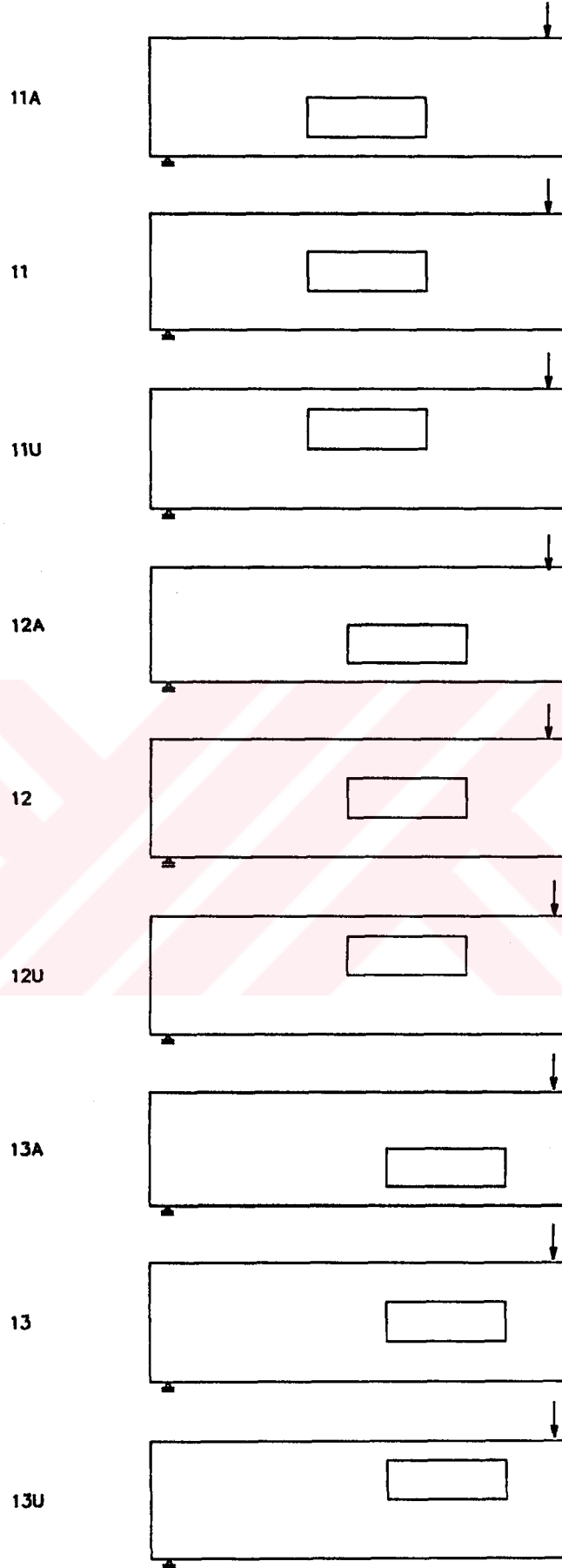
23



23U



Şekil 4.5 İkinci Seri kirişler

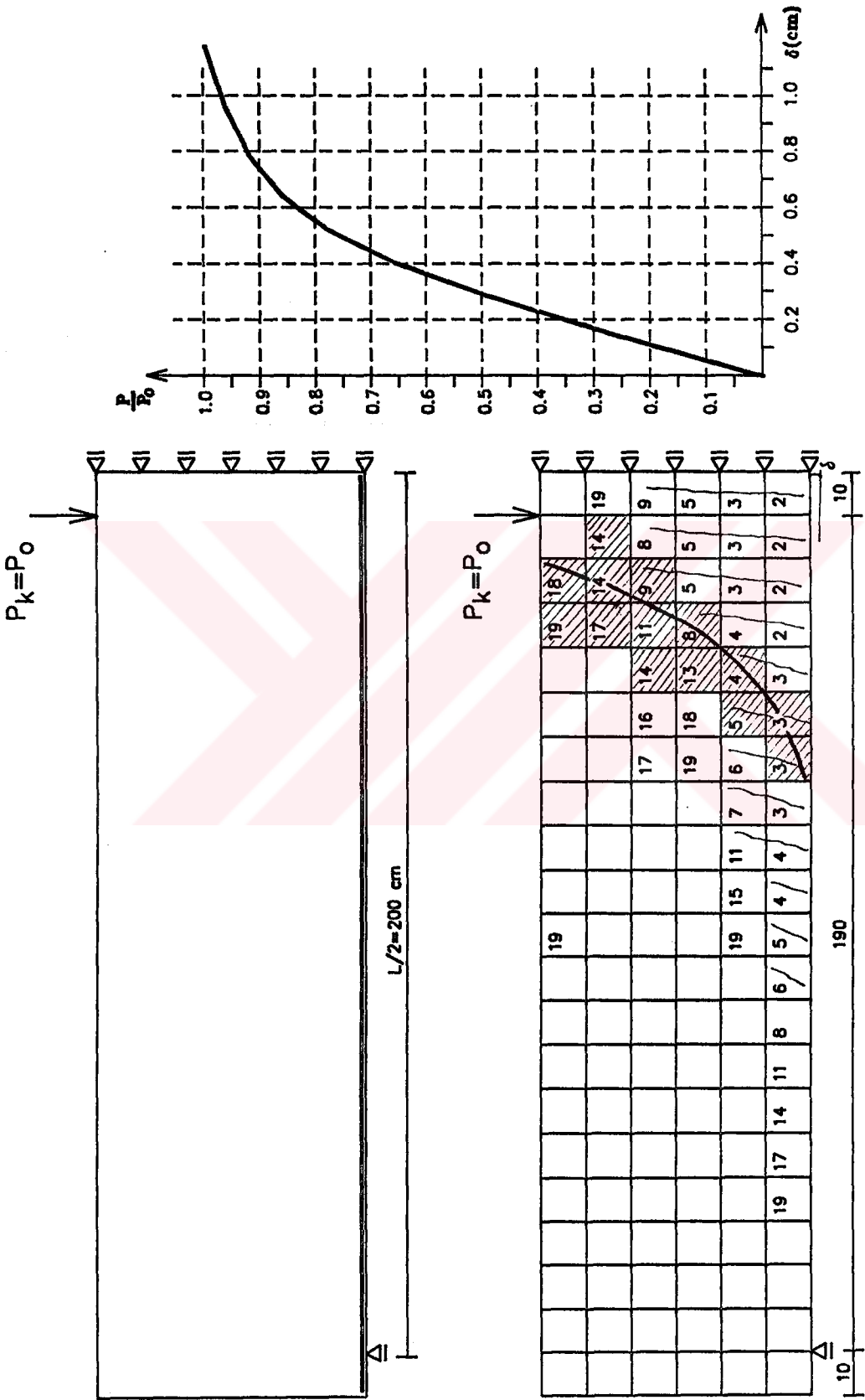


Şekil 4.6 Üçüncü Seri Kirişler

4.2. DOLU GÖVDELİ KİRİŞ İÇİN ÇÖZÜM

Analizde öncelikle, gövdesinde herhangi bir boşluk olmayan ve gövde donatısında içermeyen betonarme bir kirişin göçme yükü sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmıştır. Dolu gövdeli kirişe ait bu çözüm, bundan sonra incelenecek kirişlere ait göçme yüklerine bir referans olması bakımından önem taşımaktadır.

Analizde betonarme kirişte sadece esas donatı olduğu varsayılmış ve buna göre kirişin davranışı, artan yükler altında göçme yüküne kadar incelenmiştir. Esas donatı alanı tüm kirişlerde 4 Φ 18 olarak seçilmiştir. Yine tüm kirişlerde malzeme BS25/BÇIII olarak gözönüne alınmıştır. Artan yük altında beton elemanlarda meydana gelen ayrılma kırılmaları ve ezilme kırılmaları, çelik elemanlarda meydana gelen akmalar her bir yük seviyesi için saptanmış ve kirişe ait bu çözüm sonuçları sonlu eleman ağı üzerine işlenmiştir (Şekil 4.7). Burada bir elemanın ayrılma kırılmasına uğrayarak göçmesi betondaki çatlama olayına karşı gelmektedir. Böylece her yük adımıyla ayrılma kırılmasına uğrayarak çatlayan elemanlar izlenmek suretiyle betonun plastik davranışında analizde göz önüne alınmış olmaktadır. Sonlu eleman ağı üzerinde eğilme çatlakları ince çizgilerle, göçme durumunu veren çatlaklar ise kalın çizgilerle gösterilmiştir. Ayrıca açıklık ortasındaki bir noktaya ait deplasmanlar her yük adımı için belirlenerek kirişin artan yükler altındaki yük-deplasman bağıntıları elde edilmiştir.



Şekil 4.7 Boşluksuz Kiriş

4.3. BİRİNCİ GRUP KİRİŞLER

Birinci grup kirişlerde, kiriş gövdesindeki boşluklar çevresinde gövde donatısı olmaması hali için problem sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş, gövde boşluklarının sayısı ve konumuna göre üç ayrı seri kiriş ele alınarak bunlara ait göçme yükleri elde edilmiştir. Her üç seri kirişte de esas donatının bulunduğu, delik civarında gövde donatısının olmadığı ve delik şeklinin dörtgen biçimde olduğu kabul edilmiştir.

Birinci seri kirişlerde gövde boşlukları kare formda ve delik boyutları kiriş yüksekliğine bağlı olarak

$$b=D/3 , d=D/3$$

oranında seçilmiştir. Analizde esas alınan yarım kiriş modeli için toplam boşluk alanı $A_b=D^2/3$ olmak üzere birinci seri kirişlerde üç adet boşluk göz önüne alınmış ve bu boşluklar arasında $D/3$ kadar bir uzaklık olduğu varsayılmıştır. Kare formdaki bu üç adet boşluğun konumu mesnet ile yükün uygulandığı nokta arasında yatay ve düşey doğrultuda değiştirilerek 9 ayrı durum dikkate alınmıştır (Şekil 4.4). Böylece boşlukların mesnet veya yükün uygulandığı noktaya ve kirişin çekme veya basınç bölgelerine yakın olması durumları için ayrı ayrı çözümler yapılmıştır. Birinci seri kirişler için elde edilen çözümler Şekil 4.8 ile Şekil 4.16 arasında verilmiştir.

İkinci seri kirişlerde gövde boşlukları dikdörtgen formda ve delik boyutları kiriş yüksekliğine bağlı olarak

$$b=D/2 , d=D/3$$

oranında seçilmiştir. Analizde göz önüne alınan yarım kiriş modeli için toplam boşluk alanı $A_b=D^2/3$ olmak üzere ikinci seri kirişlerde iki adet boşluk göz önüne alınmış ve bu boşluklar arasında $D/2$ kadar bir uzaklık olduğu varsayılmıştır. Dikdörtgen formdaki bu iki adet boşluğun konumu mesnet ile yükün uygulandığı nokta arasında yatay ve düşey doğrultuda değiştirilerek, birinci seri kirişlerde

olduğu gibi 9 ayrı durum dikkate alınmıştır (Şekil 4.5). Böylece ikinci seri kirişlerde boşlukların mesnet veya yükün uygulandığı noktaya ve kirişin çekme veya basınç bölgelerine yakın olması durumları için ayrı ayrı çözümler elde edilmiştir. İkinci seri kirişler için elde edilen çözümler Şekil 4.17 ile Şekil 4.25 arasında gösterilmiştir.

Üçüncü seri kirişlerde gövde boşlukları dikdörtgen formda ve delik boyutları kiriş yüksekliğine bağlı olarak

$$b=D, \quad d=D/3$$

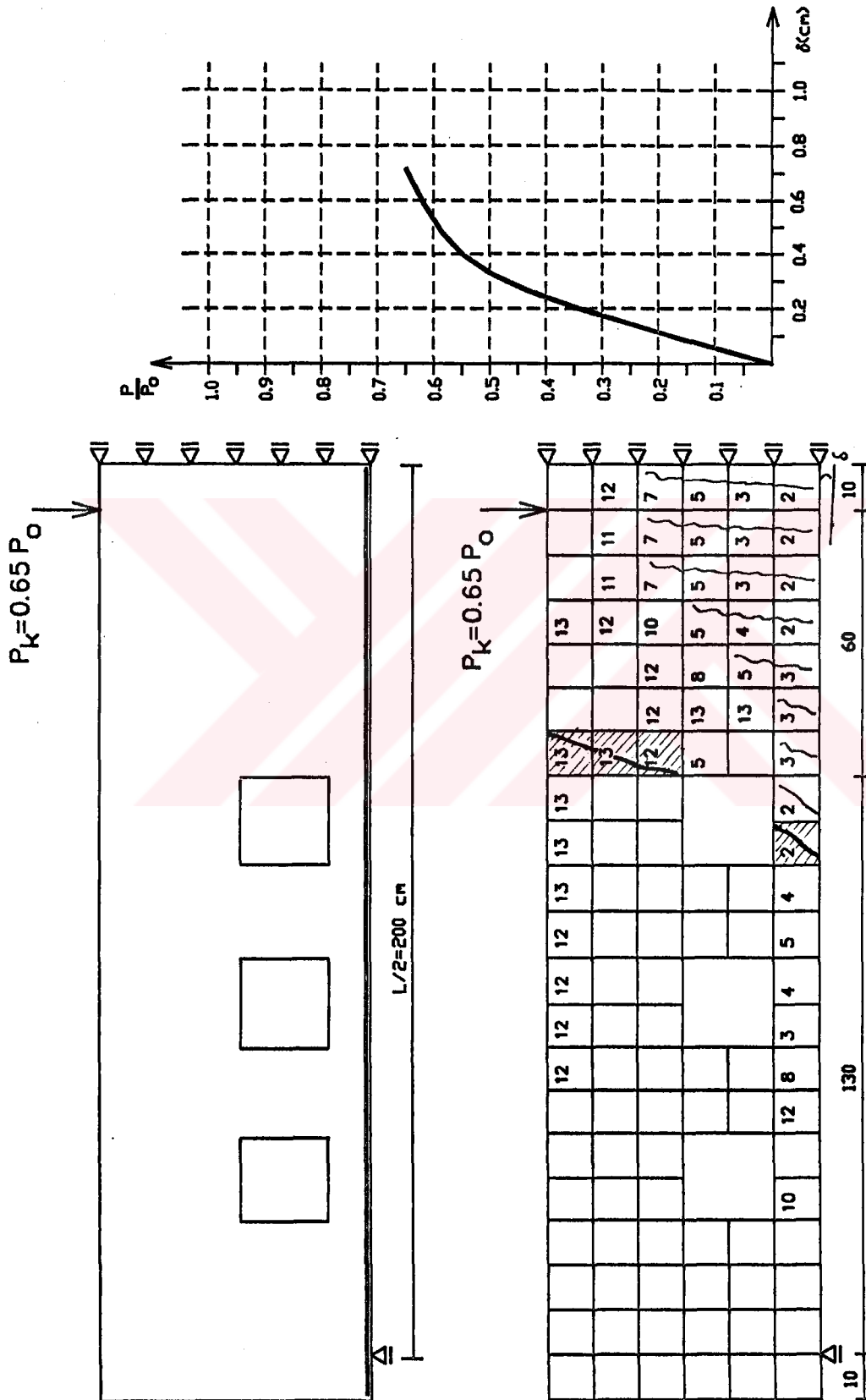
oranında seçilmiştir. Analizde göz önüne alınan yarım kiriş modeli için boşluk alanı $A_b=D^2/3$ olmak üzere üçüncü seri kirişlerde bir adet boşluk göz önüne alınmıştır. Dikdörtgen formdaki bu boşluğun konumu mesnet ile yükün uygulandığı nokta arasında yatay ve düşey doğrultuda değiştirilerek daha önceki serilerdekine benzer biçimde yine 9 ayrı durum göz önüne alınmıştır (Şekil 4.6). Benzer şekilde üçüncü seri kirişlerde boşlukların çeşitli durumları için ayrı ayrı çözümler yapılmış ve üçüncü seri kirişler için elde edilen bu çözümler ise Şekil 4.26 ile Şekil 4.34 arasında gösterilmiştir.

Birinci grup kirişlerle ilgili çözümlerde analizin her adımında sonlu elemanların tümünde kontroller yapılmış, beton elemanların kırılma, çelik elemanların ise akma durumları sonlu eleman ağı üzerine işlenmiştir. Bu işleme, 3.bölümde ayrıntılı olarak değinilen ve artan yükler altında sistemin davranışıyla ilgili yapılan tanımlar dikkate alınarak, kirişler göçme yüküne ulaşınca kadar devam edilmiştir. Ayrıca her kiriş için yük-deplasman diyagramları da çizilmiştir. Bu kirişlere ait göçme yükleri

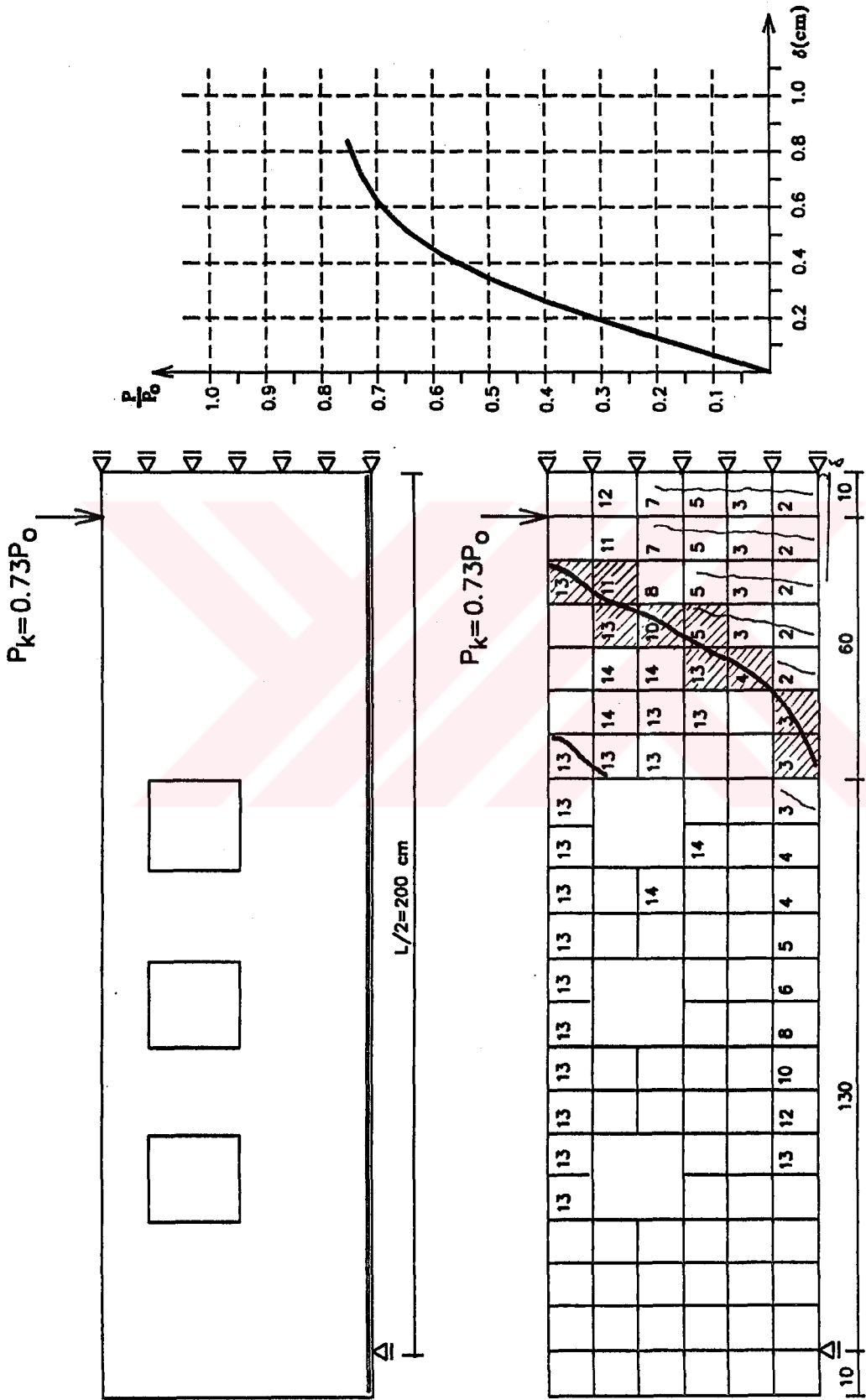
$$P_k=k.P_0 \quad (4.1)$$

şeklinde verilmiştir. Buradaki k katsayısı dolu gövdeli ve gövdesinde boşluk bulunan kirişler için elde edilen göçme yükleri arasındaki oranı göstermektedir.

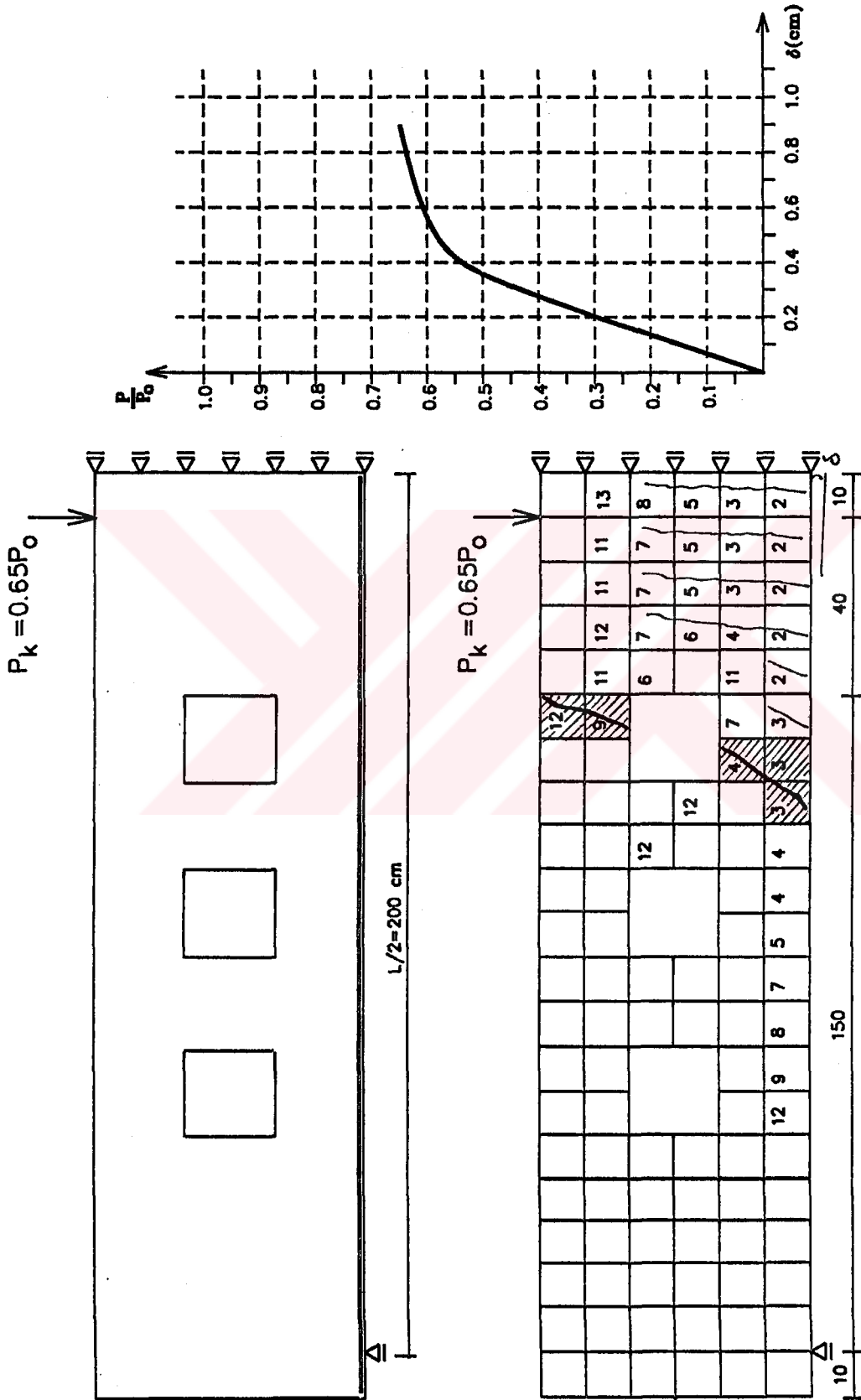
Birinci grup kirişlerle ilgili sonuçlar Tablo 4.1 'de topluca gösterilmiştir.



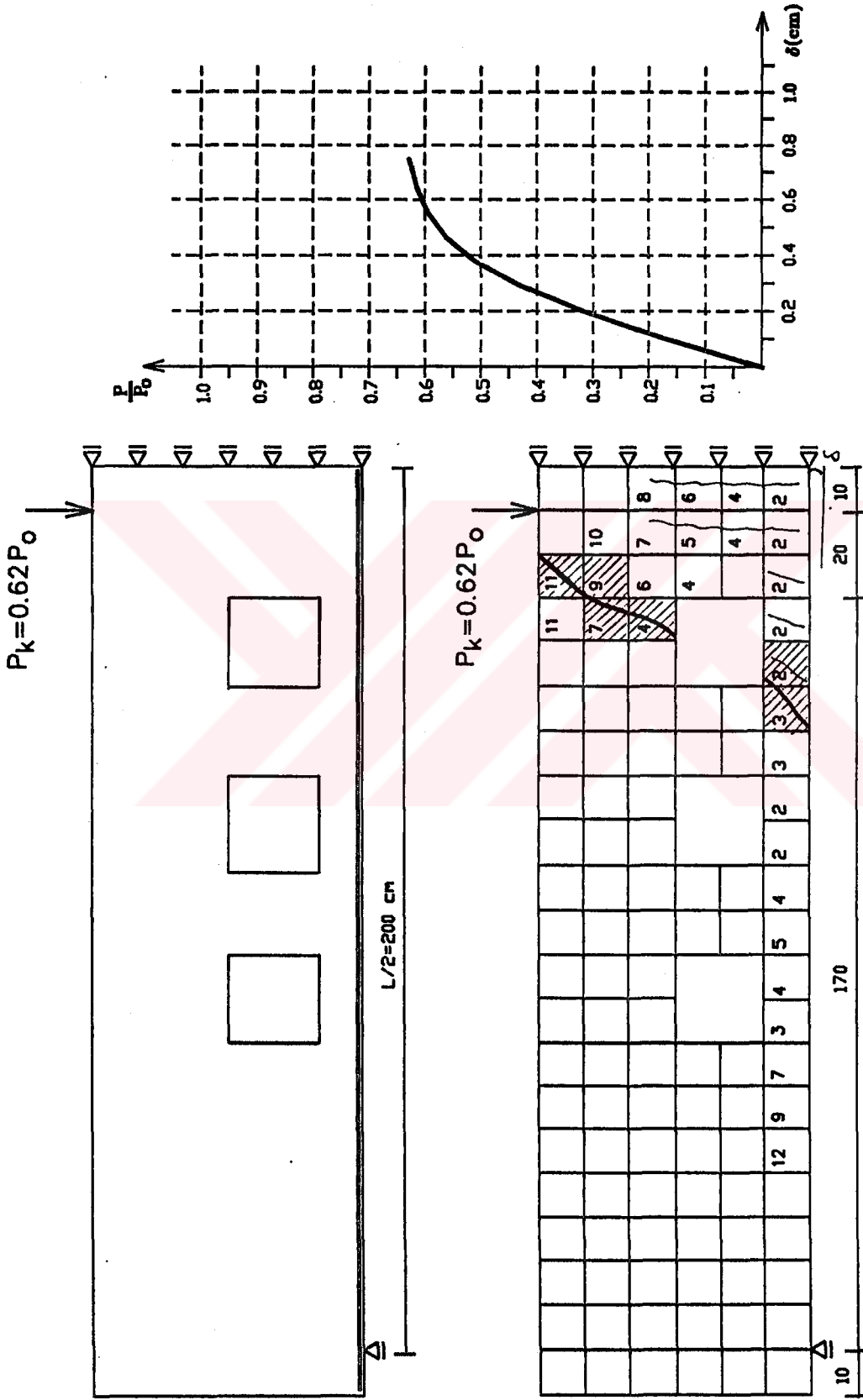
Şekil 4.8. Kiriş No 0.31A



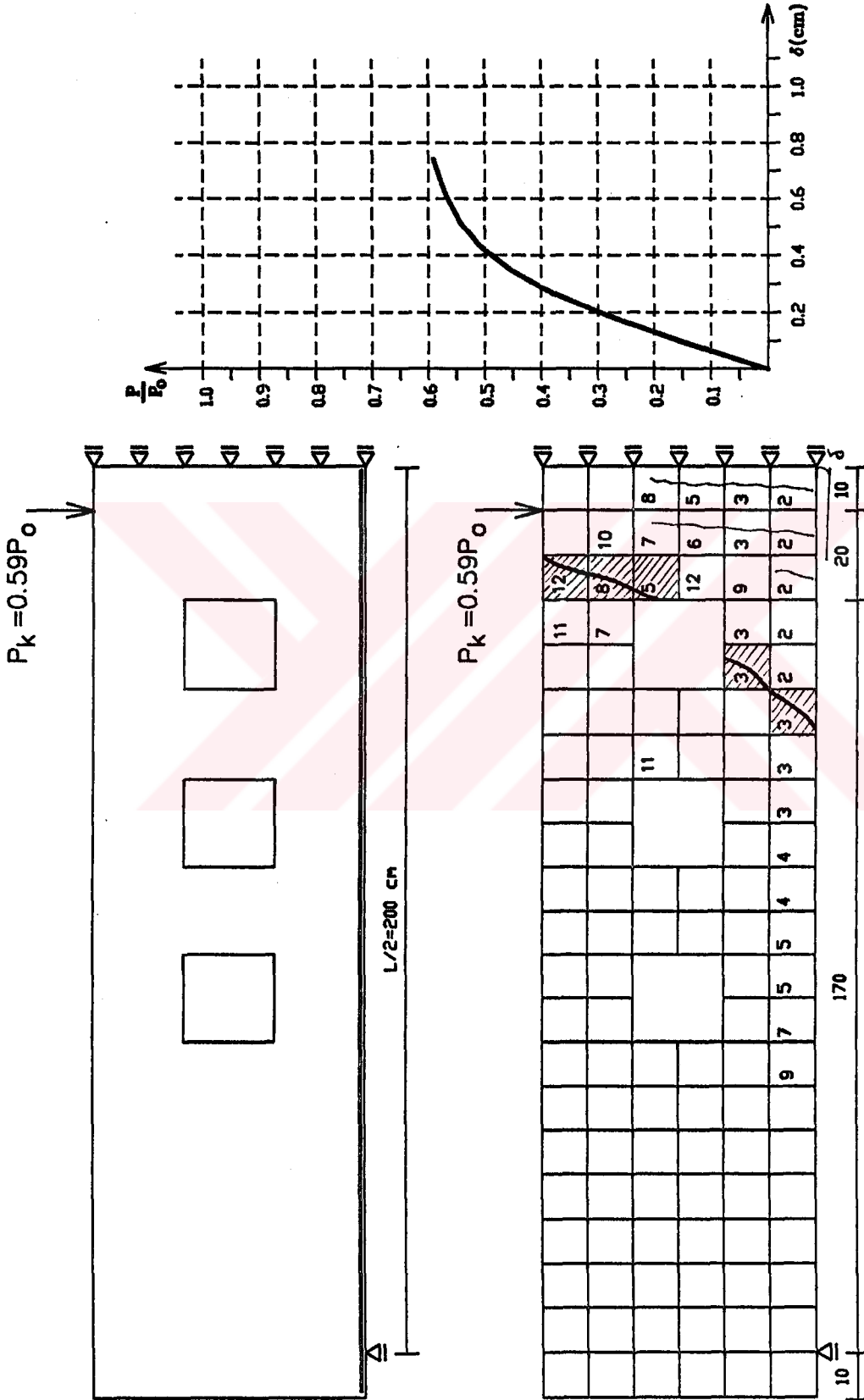
Şekil 4.10. Kiriş No 0.31U



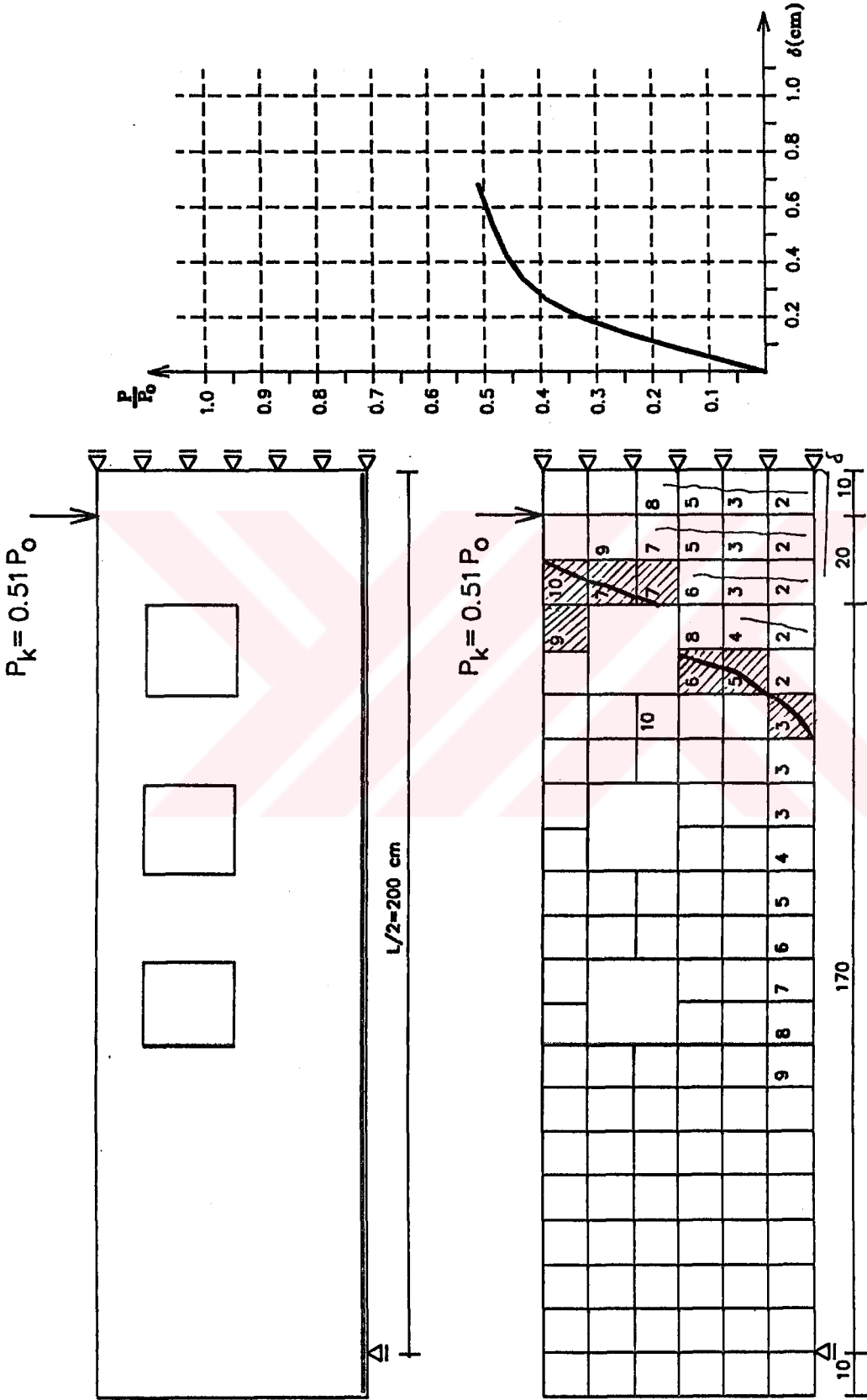
Şekil 4.12. Kiriş No 0.32



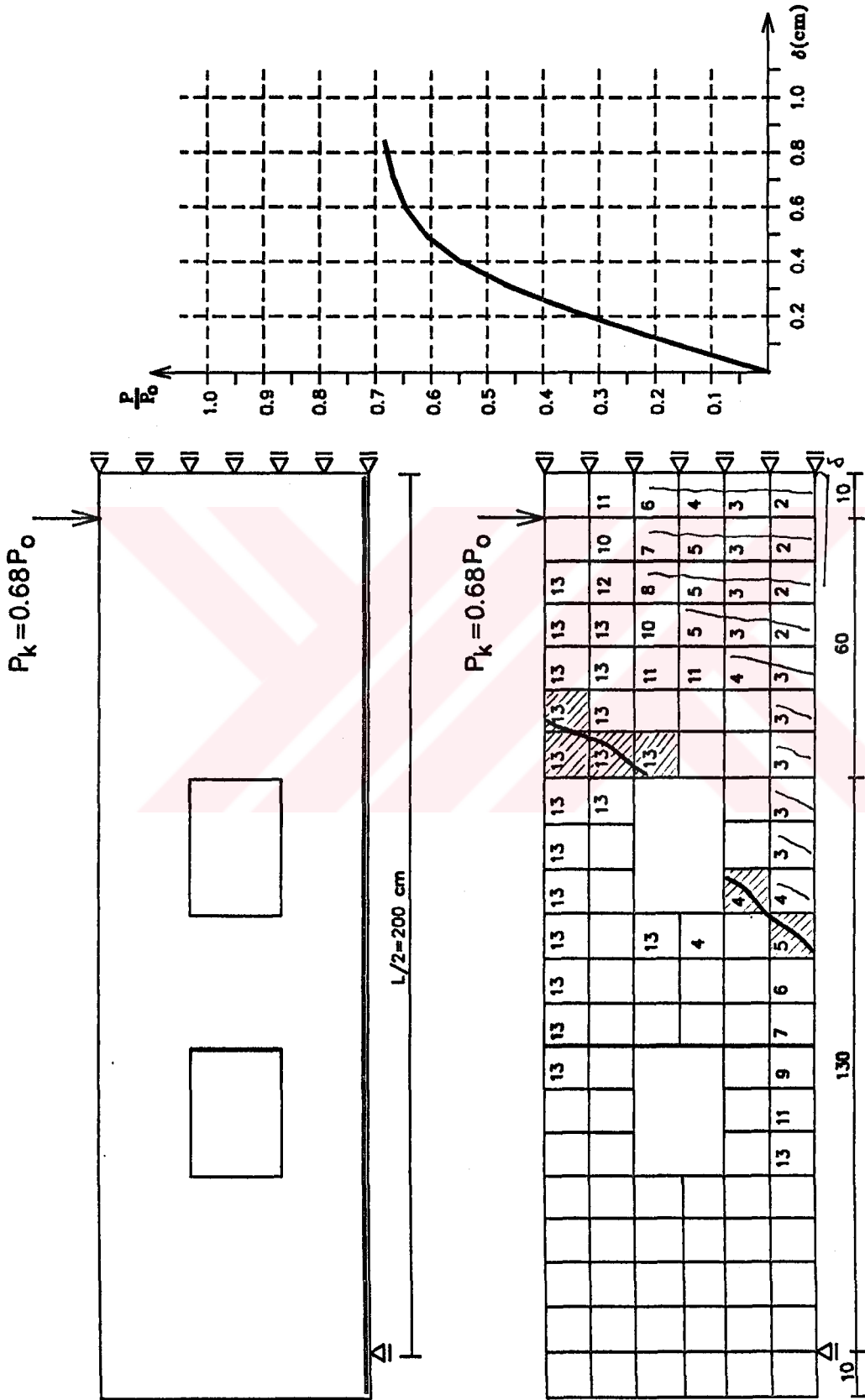
Şekil 4.14. Kiriş No 0.33A



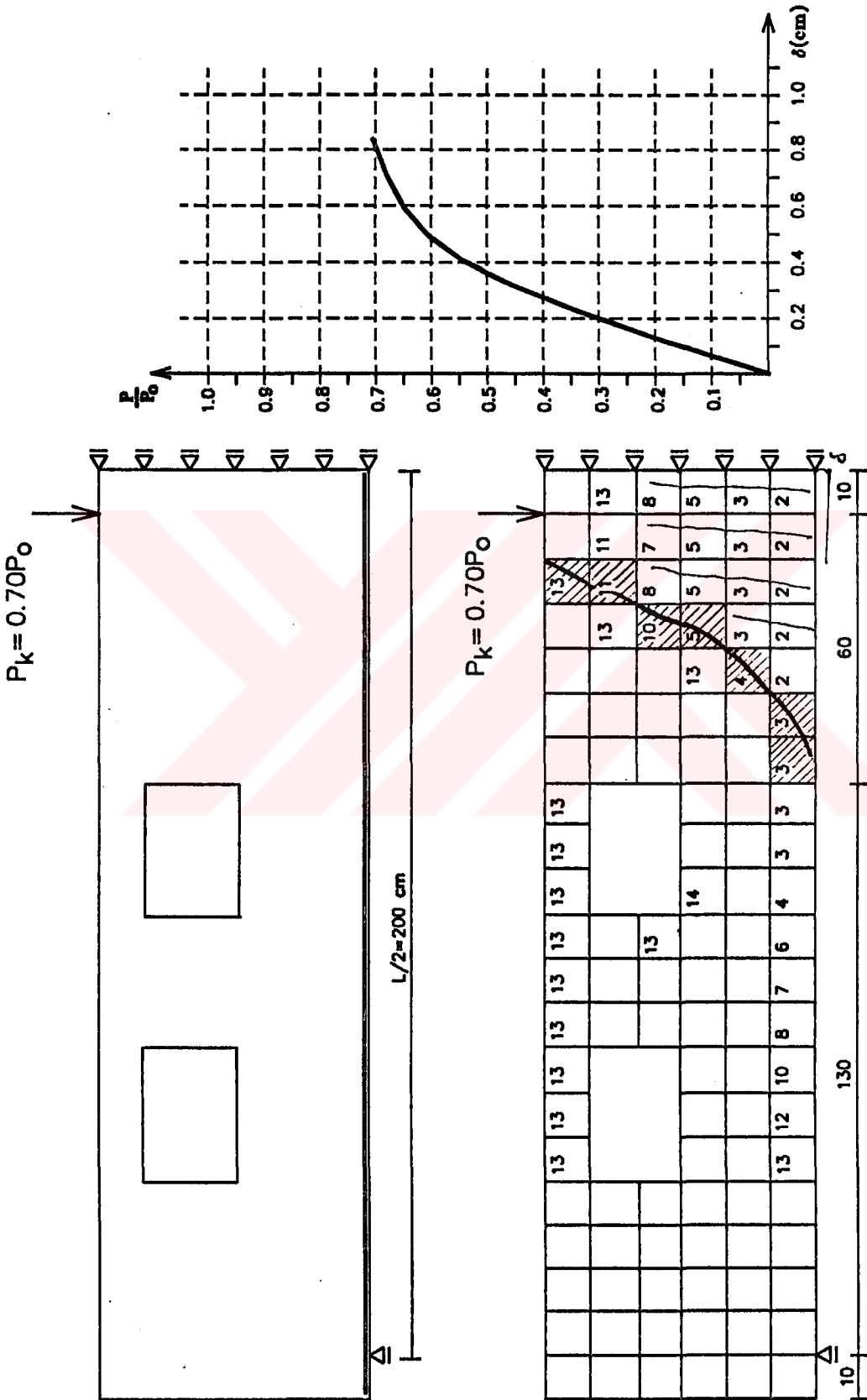
Şekil 4.15. Kiriş No 0.33



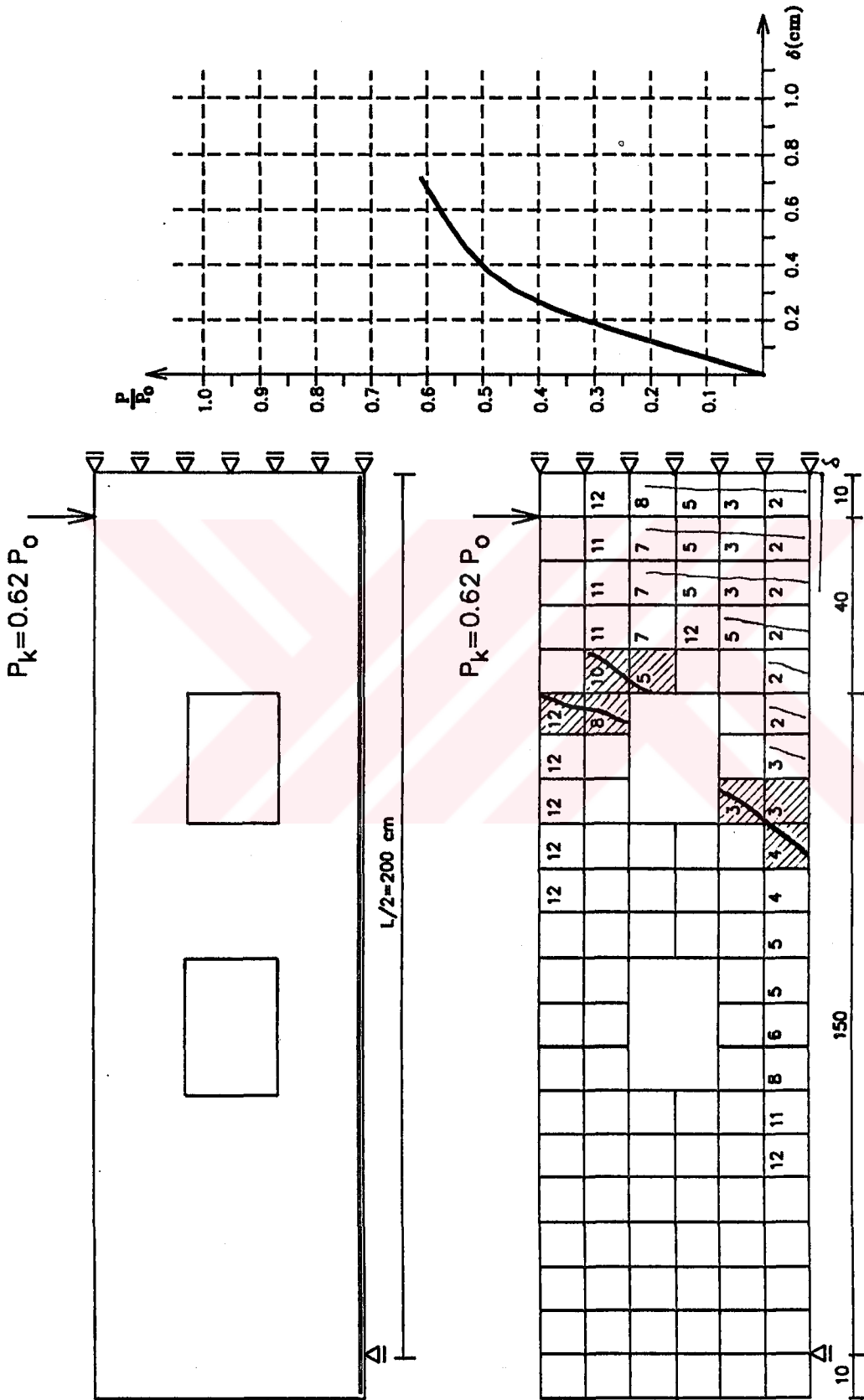
Şekil 4.16. Kiriş No 0.33U



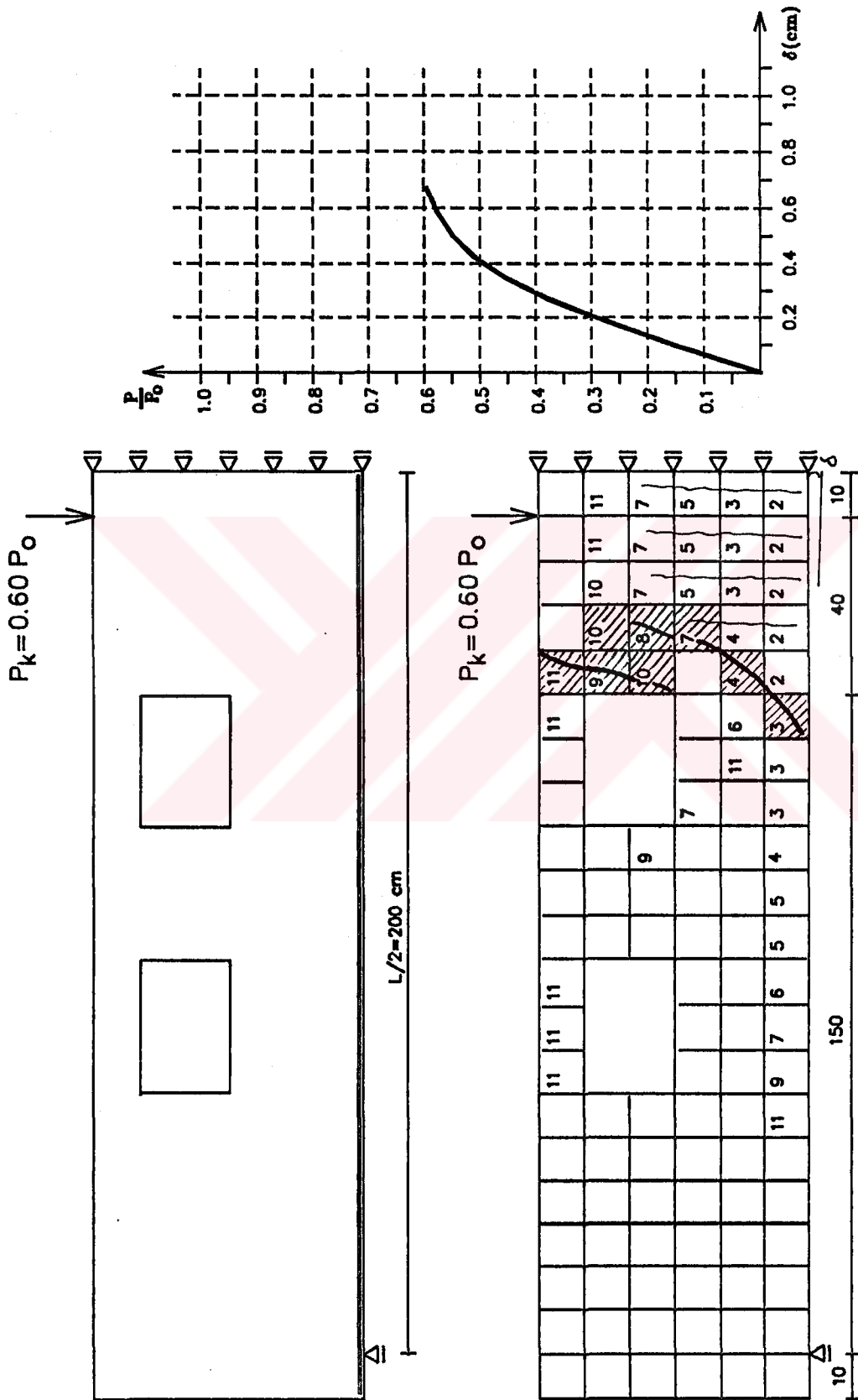
Şekil 4.18. Kiriş No 0.21



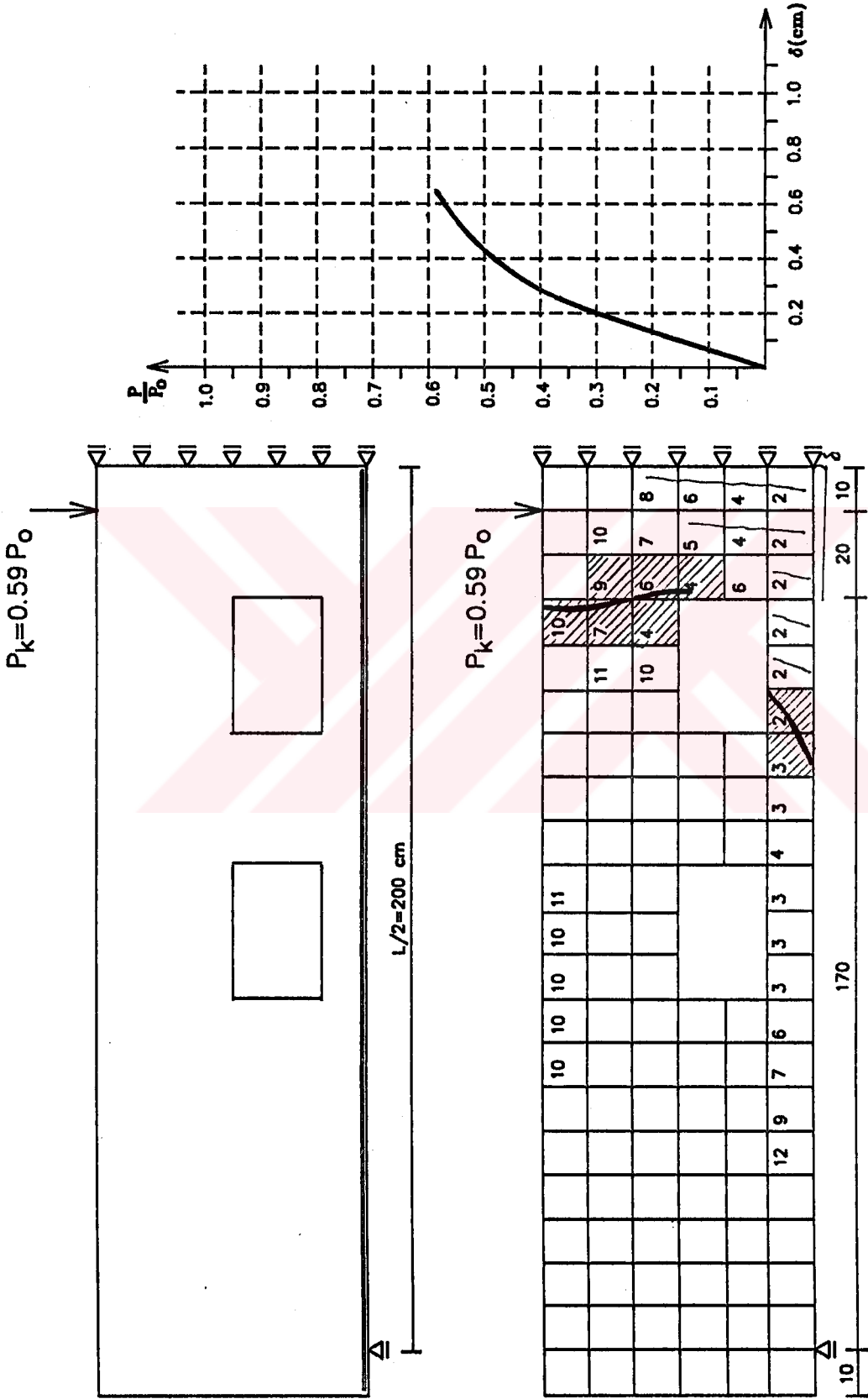
Şekil 4.19. Kiriş No 0.21U



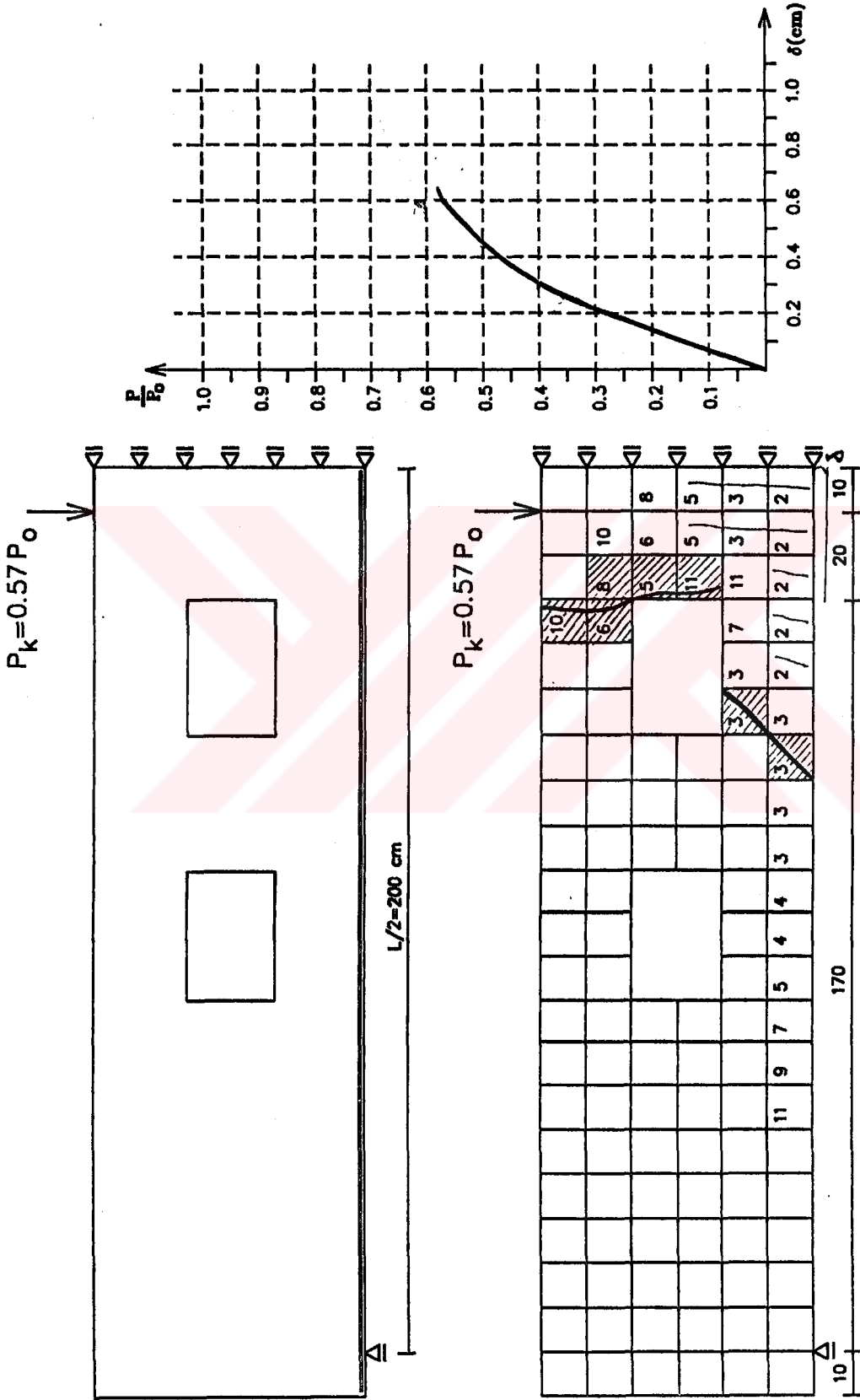
Şekil 4.21. Kiriş No 0.22



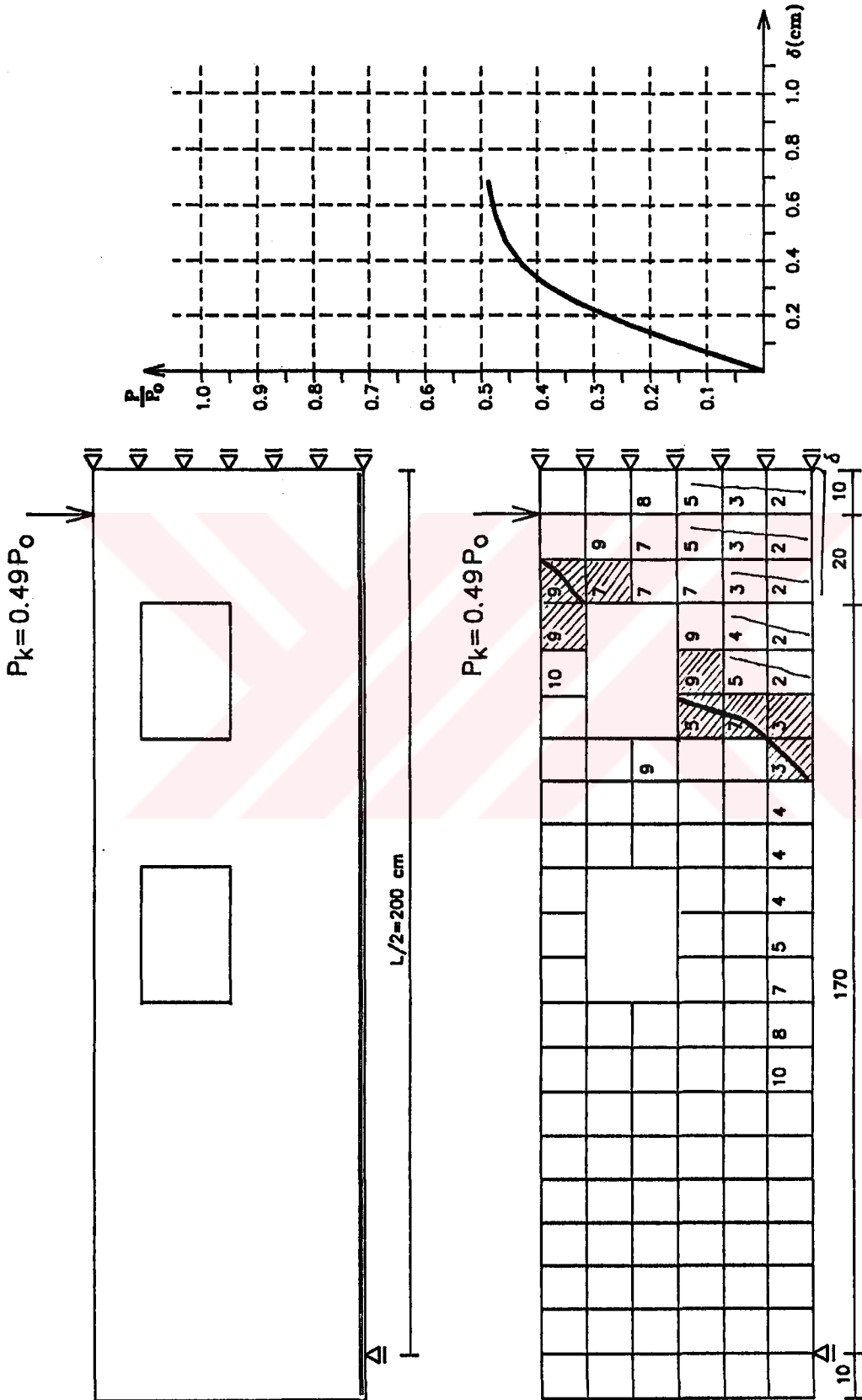
Şekil 4.22. Kiriş No 0.22U



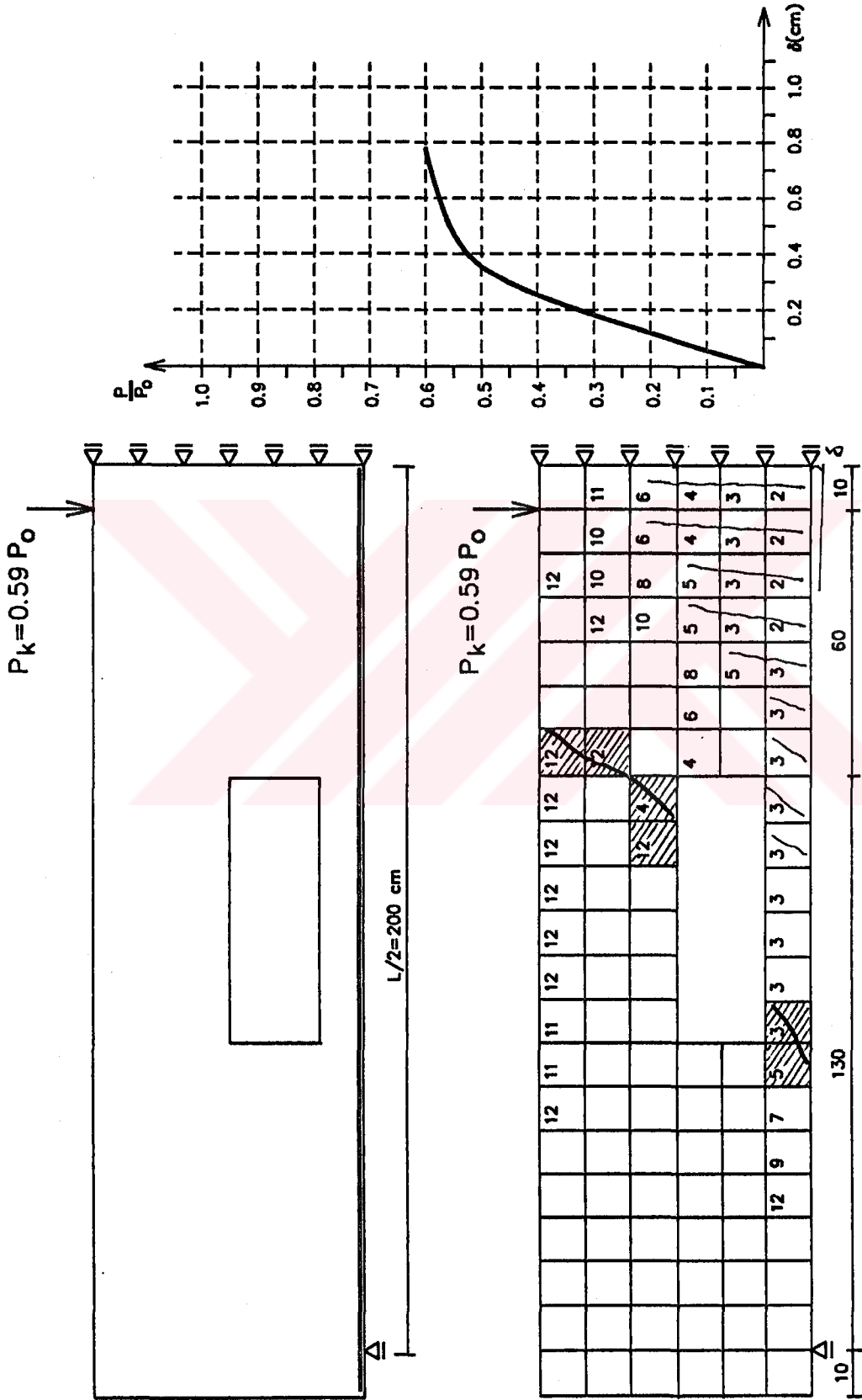
Şekil 4.23. Kiriş No 0.23A



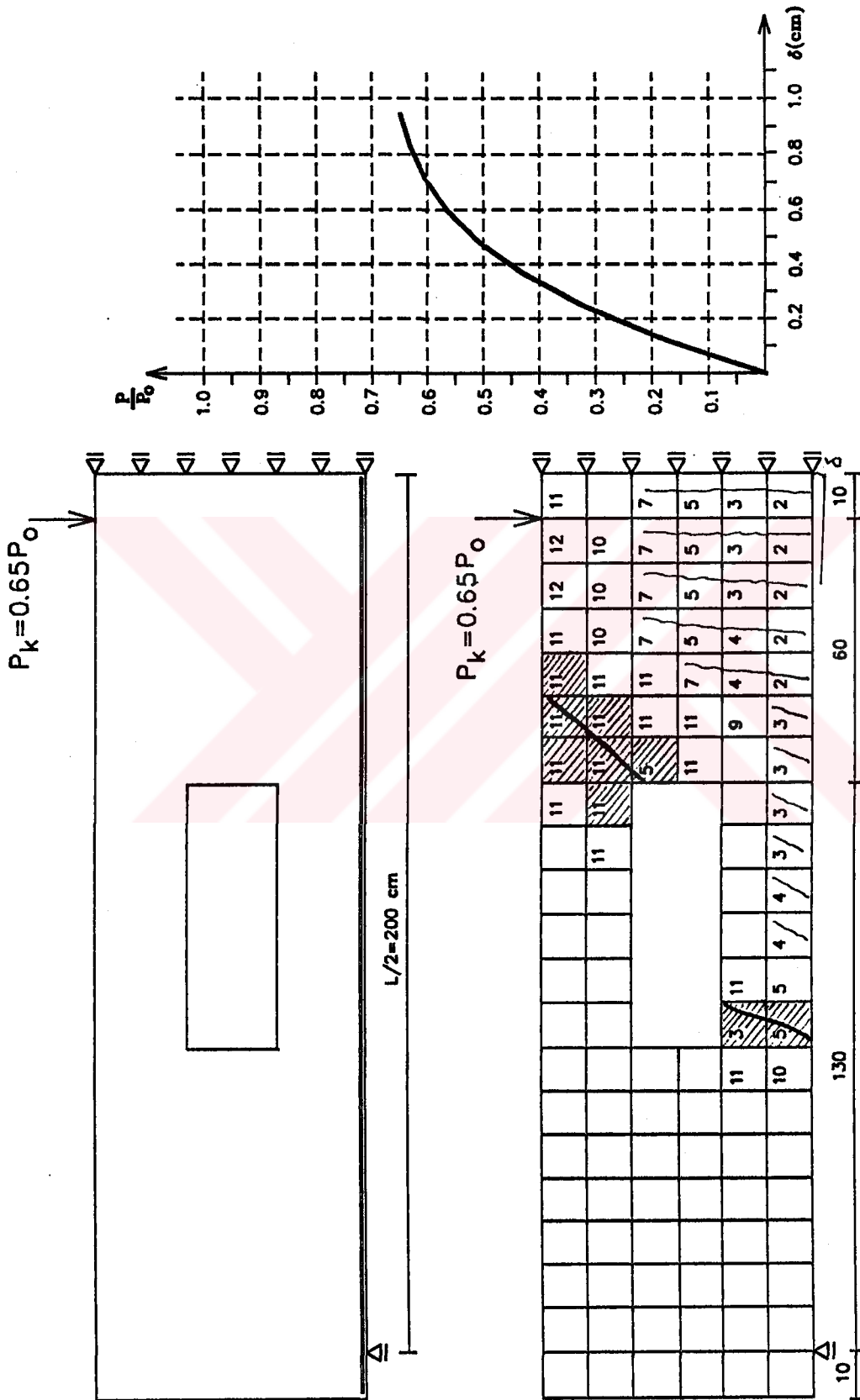
Şekil 4.24. Kiriş No 0.23



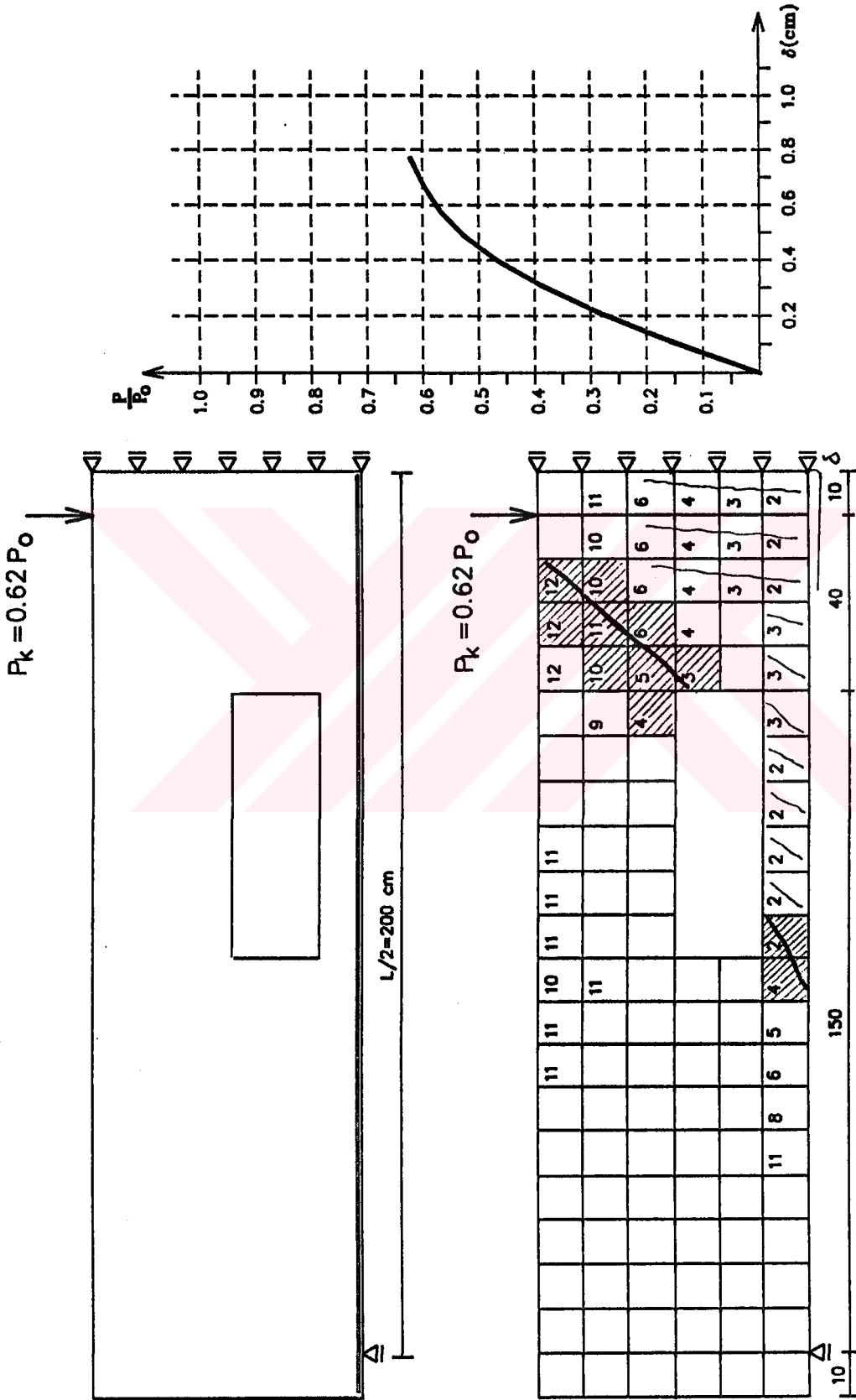
Şekil 4.25. Kiriş No 0.23U



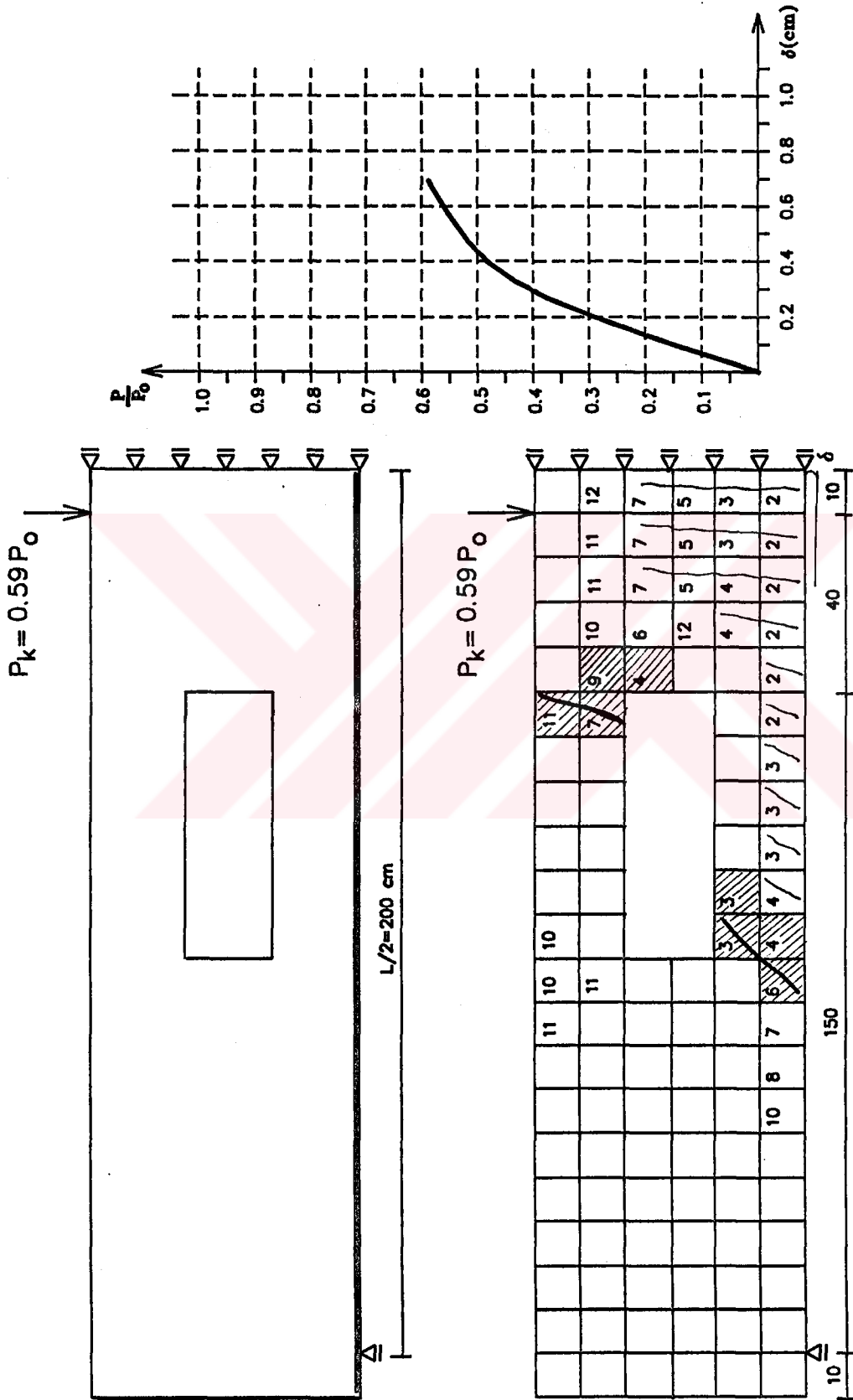
Şekil 4.26. Kiriş No 0.11A



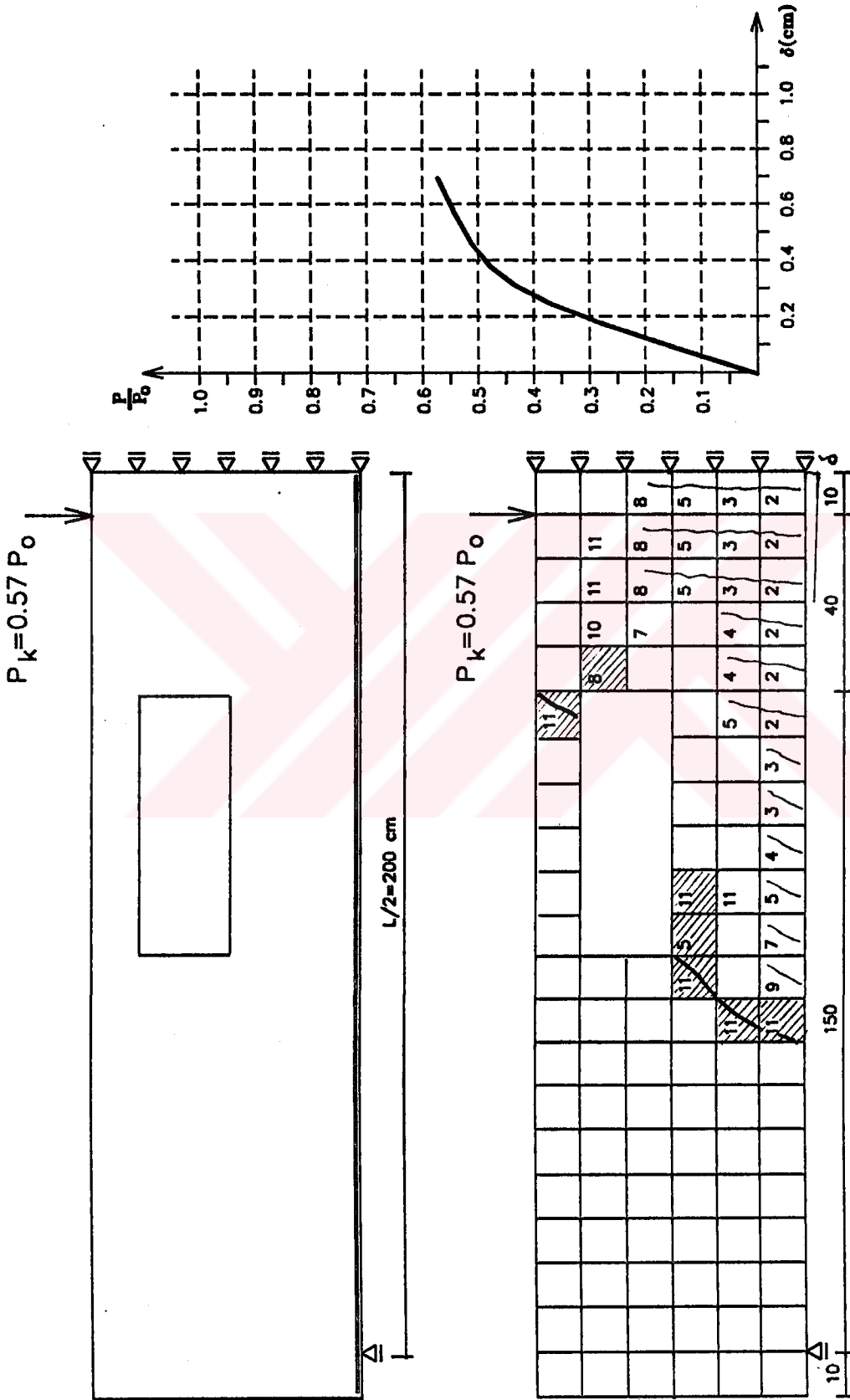
Şekil 4.27. Kiriş No 0.11



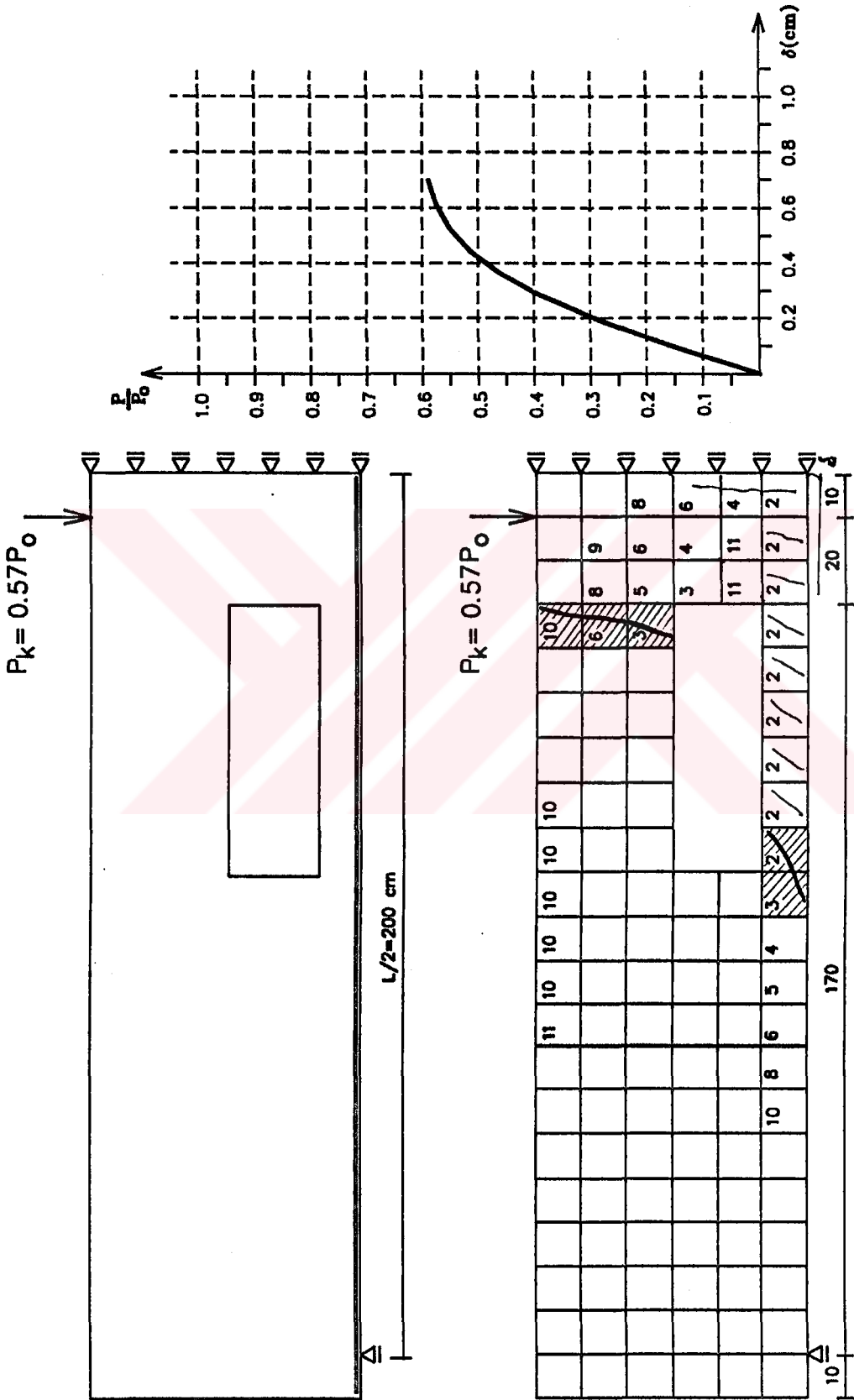
Şekil 4.29. Kiriş No 0.12A



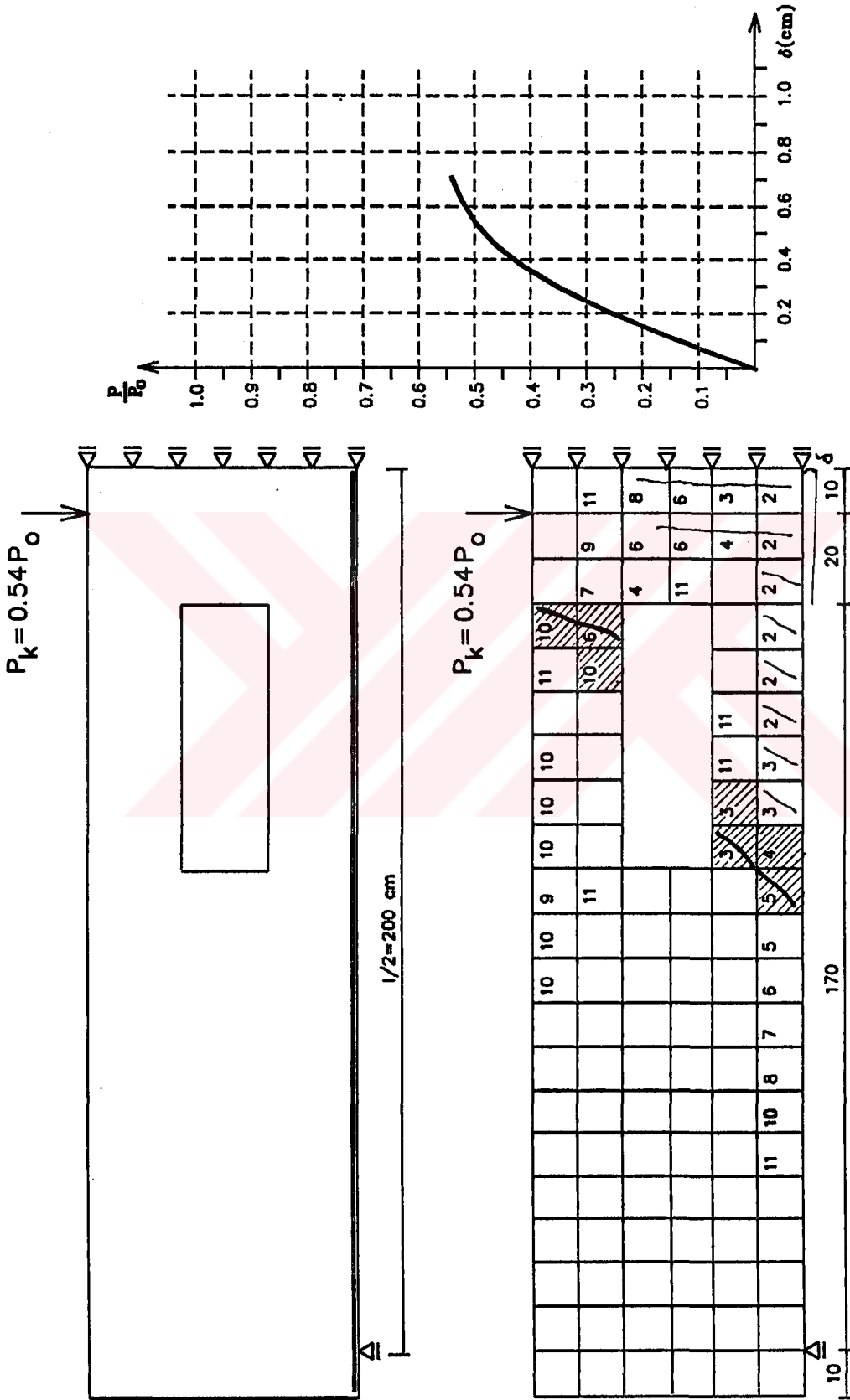
Şekil 4.30. Kiriş No 0.12



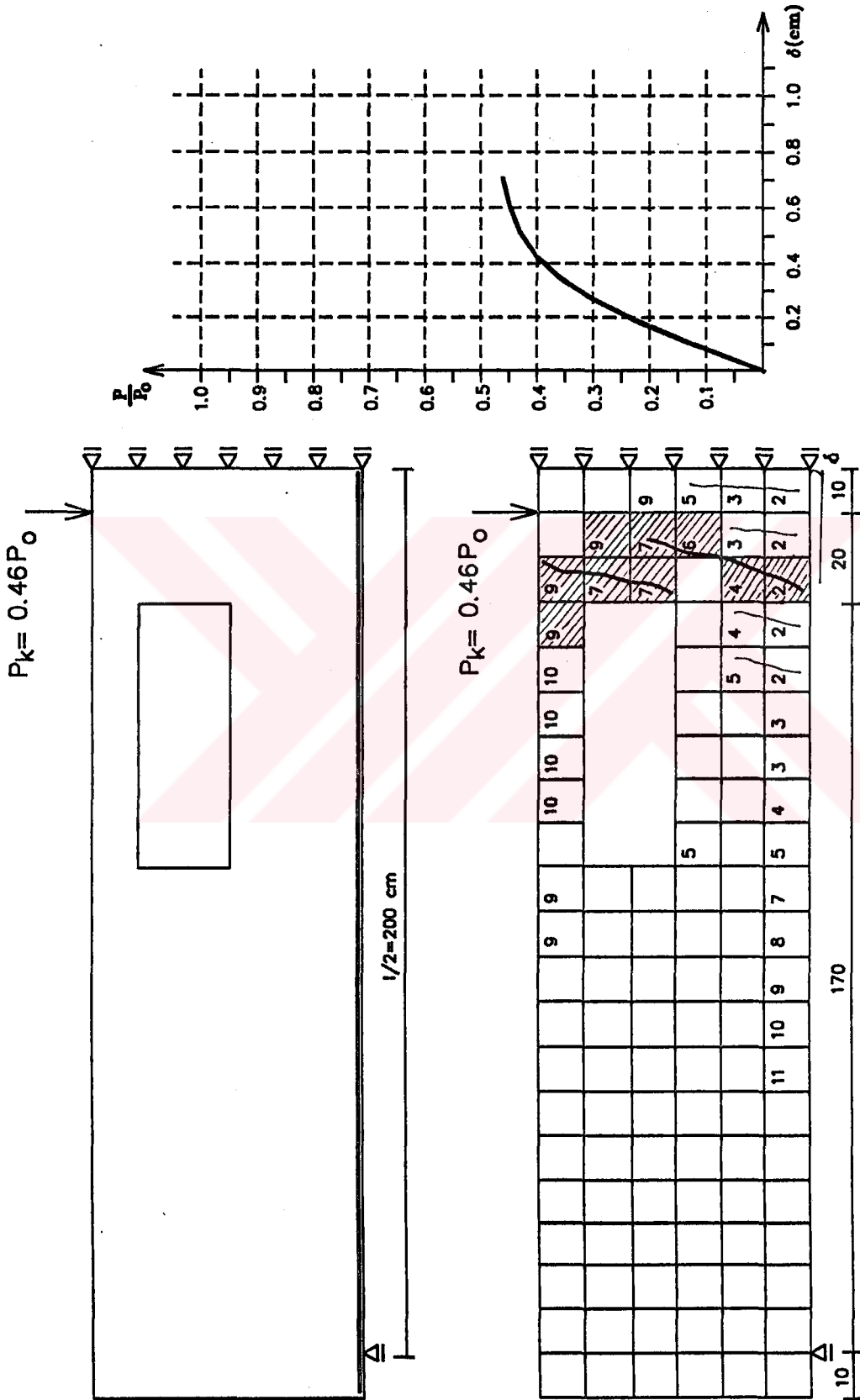
Şekil 4.31. Kiriş No 0.12U



Şekil 4.32. Kiriş No 0.13A



Şekil 4.33. Kiriş No 0.13



Şekil 4.34. Kiriş No 0.13U

Tablo 4.1. Birinci Grup Kirişlerde Göçme Yükleri

BİRİNCİ GRUP KİRİŞLER									
SERİ NO	KİRİŞ NO	X _k (cm)	b (cm)	d _o (cm)	d _a (cm)	d _u (cm)	e _o (cm)	a+b/2 (cm)	P _u (t)
1	O.31A	190	20	20	10	30	-10	120	24.12
	O.31	190	20	20	20	20	0	120	25.90
	O.31U	190	20	20	30	10	10	120	27.01
	O.32A	190	20	20	10	30	-10	140	25.16
	O.32	190	20	20	20	20	0	140	24.05
	O.32U	190	20	20	30	10	10	140	22.90
	O.33A	190	20	20	10	30	-10	160	22.94
	O.33	190	20	20	20	20	0	160	21.83
	O.33U	190	20	20	30	10	10	160	18.87
2	O.21A	190	30	20	10	30	-10	115	22.94
	O.21	190	30	20	20	20	0	115	25.16
	O.21U	190	30	20	30	10	10	115	25.90
	O.22A	190	30	20	10	30	-10	135	24.10
	O.22	190	30	20	20	20	0	135	22.90
	O.22U	190	30	20	30	10	10	135	22.20
	O.23A	190	30	20	10	30	-10	155	21.80
	O.23	190	30	20	20	20	0	155	21.10
	O.23U	190	30	20	30	10	10	155	18.13
3	O.11A	190	60	20	10	30	-10	100	21.85
	O.11	190	60	20	20	20	0	100	24.05
	O.11U	190	60	20	30	10	10	100	25.16
	O.12A	190	60	20	10	30	-10	120	22.94
	O.12	190	60	20	20	20	0	120	21.83
	O.12U	190	60	20	30	10	10	120	21.09
	O.13A	190	60	20	10	30	-10	140	21.20
	O.13	190	60	20	20	20	0	140	19.85
	O.13U	190	60	20	30	10	10	140	17.02

4.4. KESİT ZAYIFLAMA KATSAYILARI

Birinci grup kirişlerin, gövde boşluklarının şekli ve bu boşlukların kiriş üzerinde bulundukları yer bakımından karşılaştırılmalarına olanak sağlaması için taşıma gücündeki değişimi gösteren bölgesel zayıflama katsayıları tanımlanmıştır. Bu katsayılar, kirişlerin göçme yüklerinden yararlanılarak saptanmıştır. Birinci grup kirişlere ait göçme yükleri bir k katsayısına bağlı olarak verilmişti. Bu katsayı dolu gövdeli ve gövde boşluğu içeren kirişler için bulunan göçme yükleri arasındaki oranı göstermektedir. Bu oranı ifade eden (4.1) formülünden hareketle,

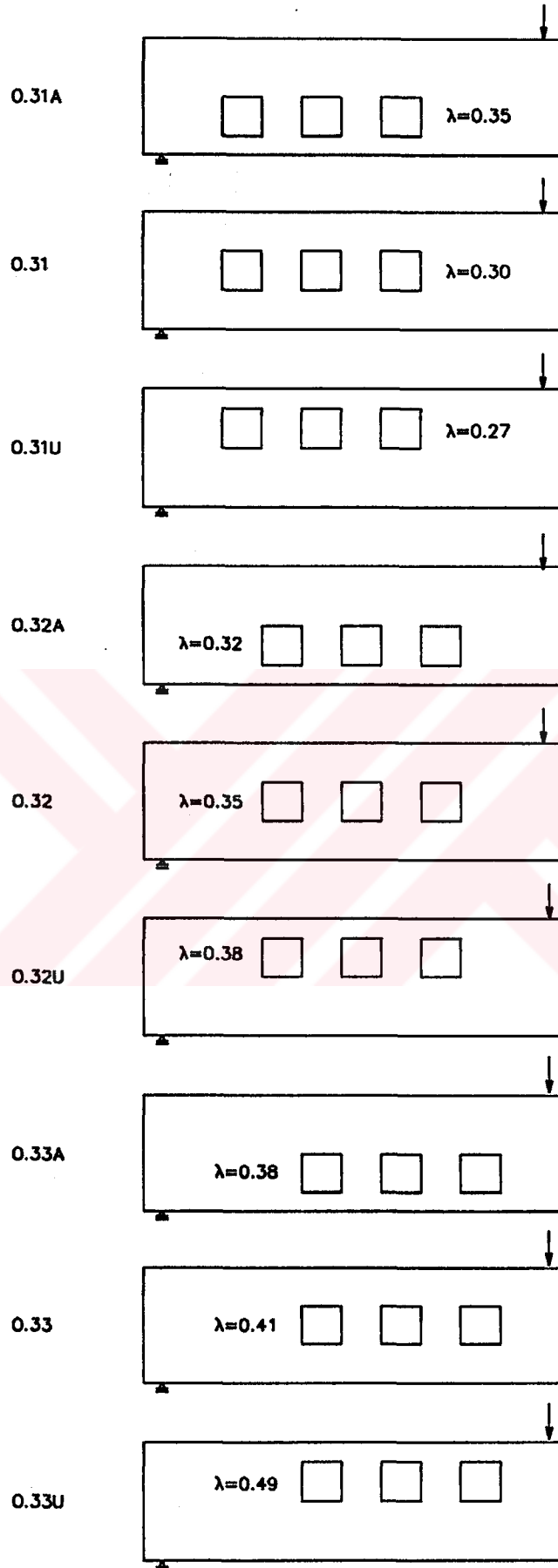
$$k = P_k / P_0, \quad k < 1 \quad (4.2)$$

yazılabilir. Buna göre kirişin kesit zayıflama katsayısı

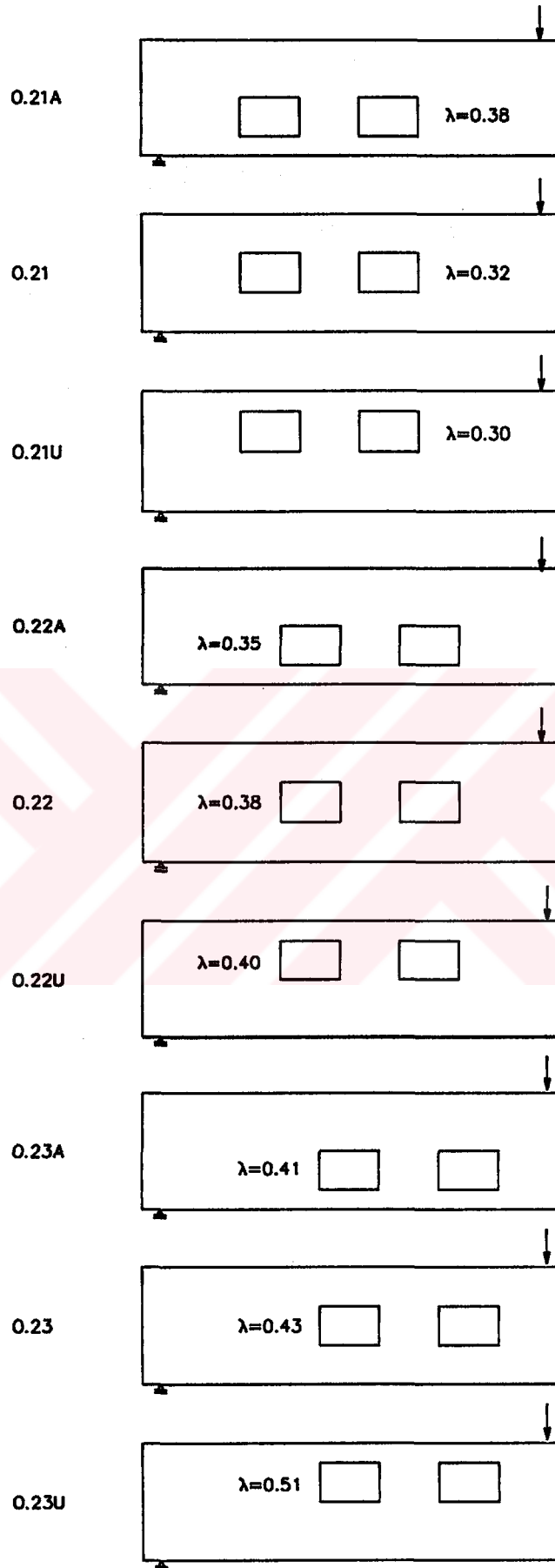
$$\lambda = 1 - k \quad (4.3)$$

olarak tanımlanmıştır.

Gövde donatısı içermeyen birinci grup kirişlere ait kesit zayıflama katsayıları Şekil 4.35 ile Şekil 4.37 arasında topluca gösterilmiştir.



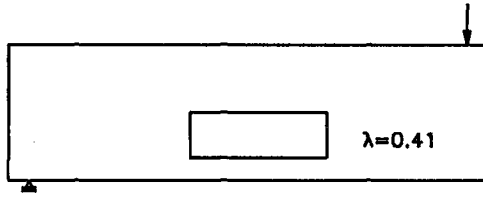
Şekil 4.35 Birinci Seri Kirişlerde Kesit Zayıflama Katsayıları



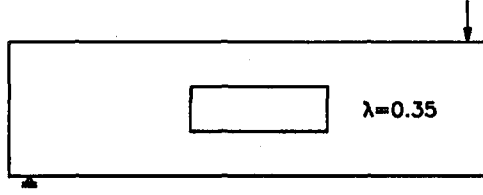
Şekil 4.36 İkinci Seri Kirişlerde Kesit Zayıflama Katsayıları

75

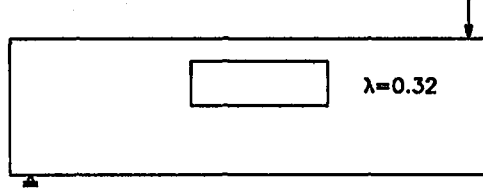
0.11A



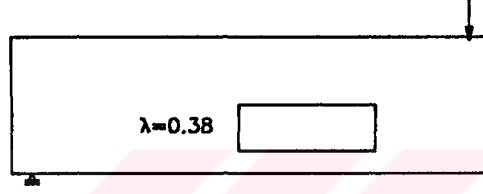
0.11



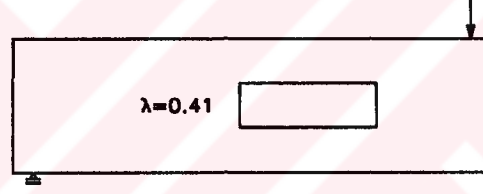
0.11U



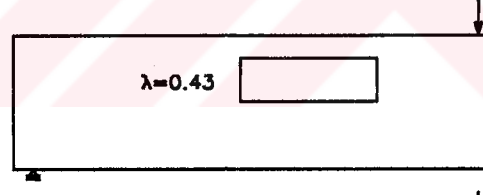
0.12A



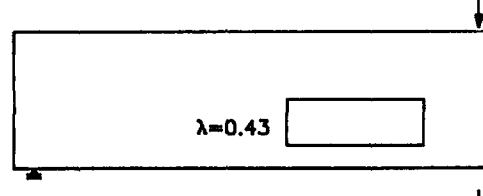
0.12



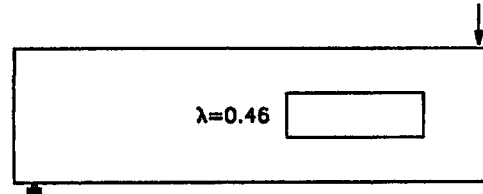
0.12U



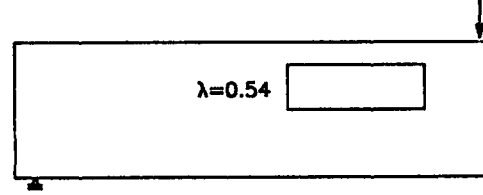
0.13A



0.13



0.13U



Şekil 4.37 Üçüncü Seri Kirişlerde Kesit Zayıflama Katsayıları

4.5. İKİNCİ GRUP KİRİŞLER

Gövdelerinde boşluk bulunan kirişlerin taşıma gücü, bilindiği gibi kiriş gövdelerinde, özellikle boşluk civarında yerleştirilmiş olan donatıların düzenleniş şekli ve donatı alanıyla yakından ilgilidir. Bu kısımda gözönüne alınan ikinci grup kiriş çözümleri, gövde donatılarının kirişlerin taşıma gücüne yapmış olduğu katkıyı belirlemek amacıyla yapılmıştır. Uygulamada en yaygın donatı yerleştirme düzenine göre gövde boşlukları donatılmış, boşlukların üst ve alt kenarları boyunca yerleştirilen gövde donatıları yanında boşluklar civarında etriye sıklaştırması yapılmıştır. Bu grupta göz önüne alınan montaj donatısı ve gövde boşluğu çevresine yerleştirilen gövde donatıları 2 ϕ 12, gövde boşluğu civarında etriyeler ϕ 8/10, diğer kısımlarda ϕ 8/20 olarak seçilmiştir.

İkinci grup kirişlerde, yukarıda değinildiği üzere kiriş gövdesindeki boşluklar çevresinde gövde donatısı olması hali için problem sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş, gövde boşluklarının sayısı ve konumuna göre, birinci grup kirişlerde olduğu gibi yine üç ayrı seri kiriş ele alınarak bunlara ait göçme yükleri elde edilmiştir. Her üç seri kirişdede, esas donatının yanı sıra, delik civarında gövde donatılarının bulunduğu ve delik şeklinin dörtgen biçimde olduğu kabul edilmiştir.

Birinci seri kirişlerde, daha önce çözümü yapılan birinci grup kirişlerde olduğu gibi gövde boşlukları kare formda ve delik boyutları kiriş yüksekliğine bağlı olarak

$$b=D/3, d=D/3$$

oranında seçilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında esas alınan yarım kiriş modeli için toplam boşluk alanı $A_b=D^2/3$ olmak üzere birinci seri kirişlerde üç adet boşluk göz önüne alınmış ve bu boşluklar arasında $D/3$ kadar bir uzaklık olduğu varsayılmıştır. Kare formdaki bu üç adet boşluğun konumu mesnet ile yükün uygulandığı nokta

arasında yatay ve düşey doğrultuda değiştirilerek ve boşluklar arasındaki bölgede yatay ve düşey doğrultuda gövde donatıları yerleştirilerek 9 ayrı durum dikkate alınmıştır (Şekil 4.4). Böylece boşlukların mesnet veya yükün uygulandığı noktaya ve kirişin çekme veya basınç bölgelerine yakın olması ve boşluk çevresinin donatılarla takviye edilerek güçlendirilmesi durumları için ayrı ayrı çözümler yapılmıştır. Birinci seri kirişler için elde edilen çözümler Şekil 4.38 ile Şekil 4.46 arasında verilmiştir.

İkinci seri kirişlerde, daha önce çözümü yapılan birinci grup ikinci seri kirişlerde olduğu gibi gövde boşlukları dikdörtgen formda ve delik boyutları kiriş yüksekliğine bağlı olarak

$$b=D/2, d=D/3$$

oranında seçilmiştir. Analizde göz önüne alınan yarım kiriş modeli için toplam boşluk alanı $A_b=D^2/3$ olmak üzere ikinci seri kirişlerde iki adet boşluk göz önüne alınmış ve bu boşluklar arasında $D/2$ kadar bir uzaklık olduğu varsayılmıştır. Dikdörtgen formdaki bu iki adet boşluğun konumu mesnet ile yükün uygulandığı nokta arasında yatay ve düşey doğrultuda değiştirilerek ve boşluklar arasındaki bölgeye yatay ve düşey doğrultuda gövde donatıları yerleştirilerek, birinci seri kirişlerde olduğu gibi 9 ayrı durum dikkate alınmıştır (Şekil 4.5). Böylece ikinci seri kirişlerde boşlukların mesnet veya yükün uygulandığı noktaya ve kirişin çekme veya basınç bölgelerine yakın olması ve boşluk çevresinin donatılarla takviye edilerek güçlendirilmesi durumları için ayrı ayrı çözümler elde edilmiştir. İkinci seri kirişler için elde edilen çözümler Şekil 4.47 ile Şekil 4.55 arasında gösterilmiştir.

Üçüncü seri kirişlerde, daha önce çözümü yapılan birinci grup üçüncü seri kirişlerde olduğu gibi gövde boşlukları dikdörtgen formda ve delik boyutları kiriş yüksekliğine bağlı olarak

$$b=D, d=D/3$$

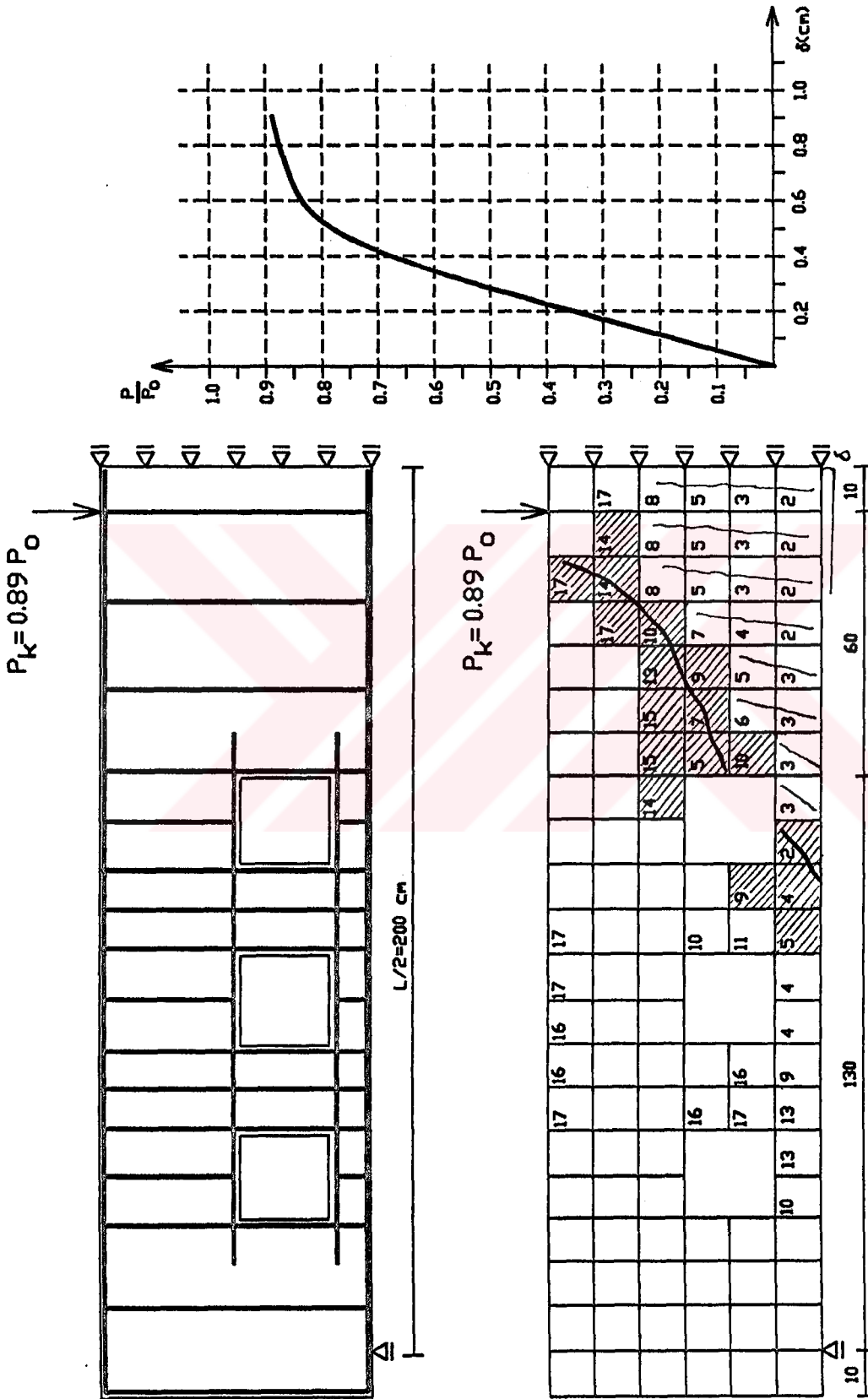
oranında seçilmiştir. Analizde göz önüne alınan yarım kiriş modeli için boşluk alanı $A_b=D^2/3$ olmak üzere üçüncü seri kirişlerde bir adet boşluk göz önüne alınmıştır. Dikdörtgen formdaki bu boşluğun konumu mesnet ile yükün uygulandığı nokta arasında yatay ve düşey doğrultuda değiştirilerek ve çevresi donatılarla güçlendirilerek daha önceki serilerdekine benzer biçimde yine 9 ayrı durum göz önüne alınmıştır (Şekil 4.6). Benzer şekilde üçüncü seri kirişlerde boşlukların çeşitli durumları için ayrı ayrı çözümler yapılmış ve üçüncü seri kirişler için elde edilen bu çözümler ise Şekil 4.56 ile Şekil 4.64 arasında gösterilmiştir.

İkinci grup kirişlerle ilgili çözümlerde analizin her adımında sonlu elemanların tümünde kontroller yapılmış, beton elemanların kırılma, çelik elemanların ise akma durumları sonlu eleman açısı üzerine işlenmiştir. Bu işleme, artan yükler altında sistemin davranışıyla ilgili yapılan tanımlar göz önünde bulundurularak, kirişler göçme yüküne ulaşınca kadar devam edilmiştir. Ayrıca her kiriş için yük-deplasman diyagramları da çizilmiştir. Bu kirişlere ait göçme yükleri

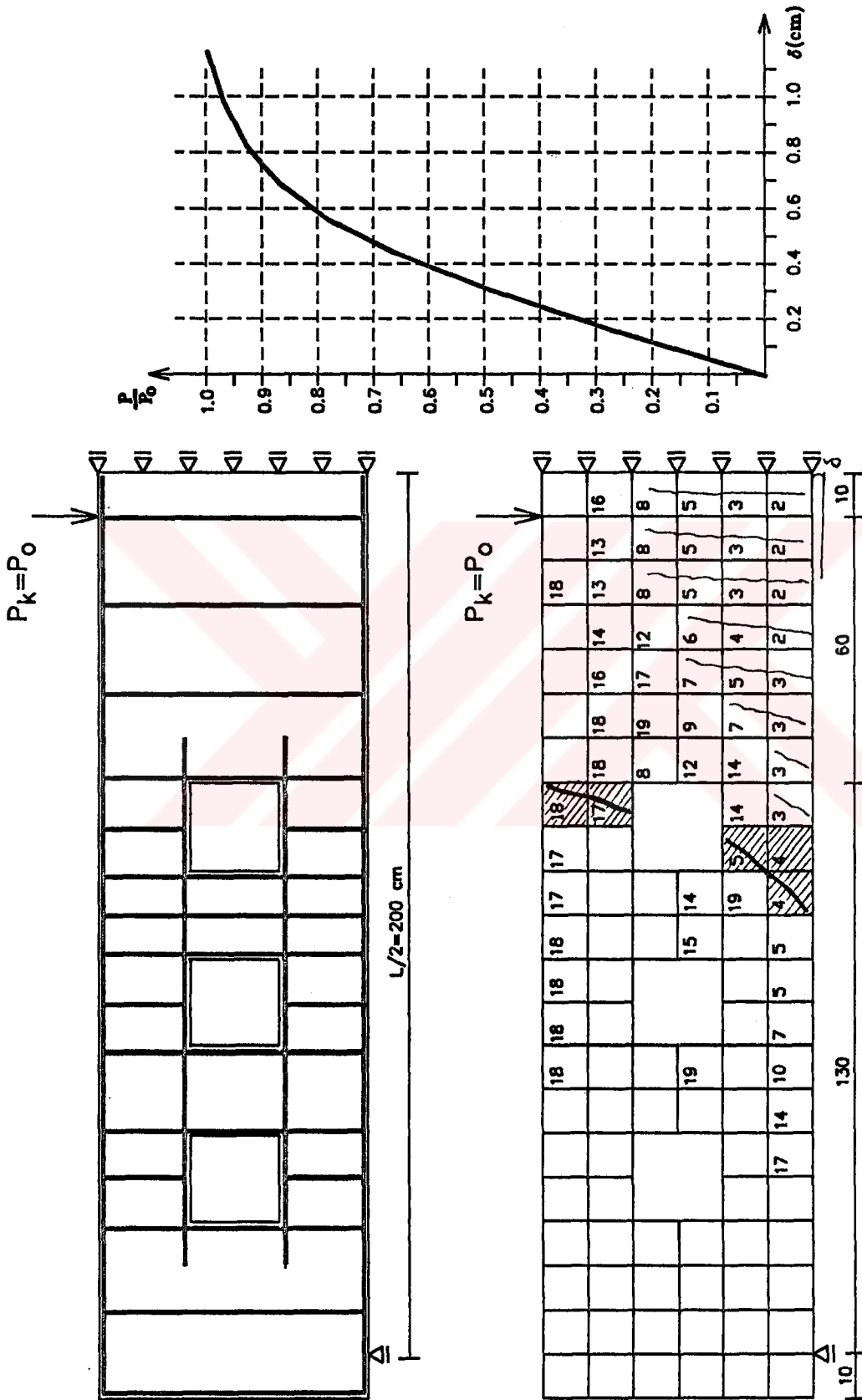
$$P_k=k.P_0 \quad (4.4)$$

şeklinde verilmiştir. Buradaki k katsayısı, gövde donatısı bulunmayan dolu gövdeli kirişle, gövdesinde boşluk ve gövde donatısı bulunan kirişler için elde edilen göçme yükleri arasındaki oranı göstermektedir.

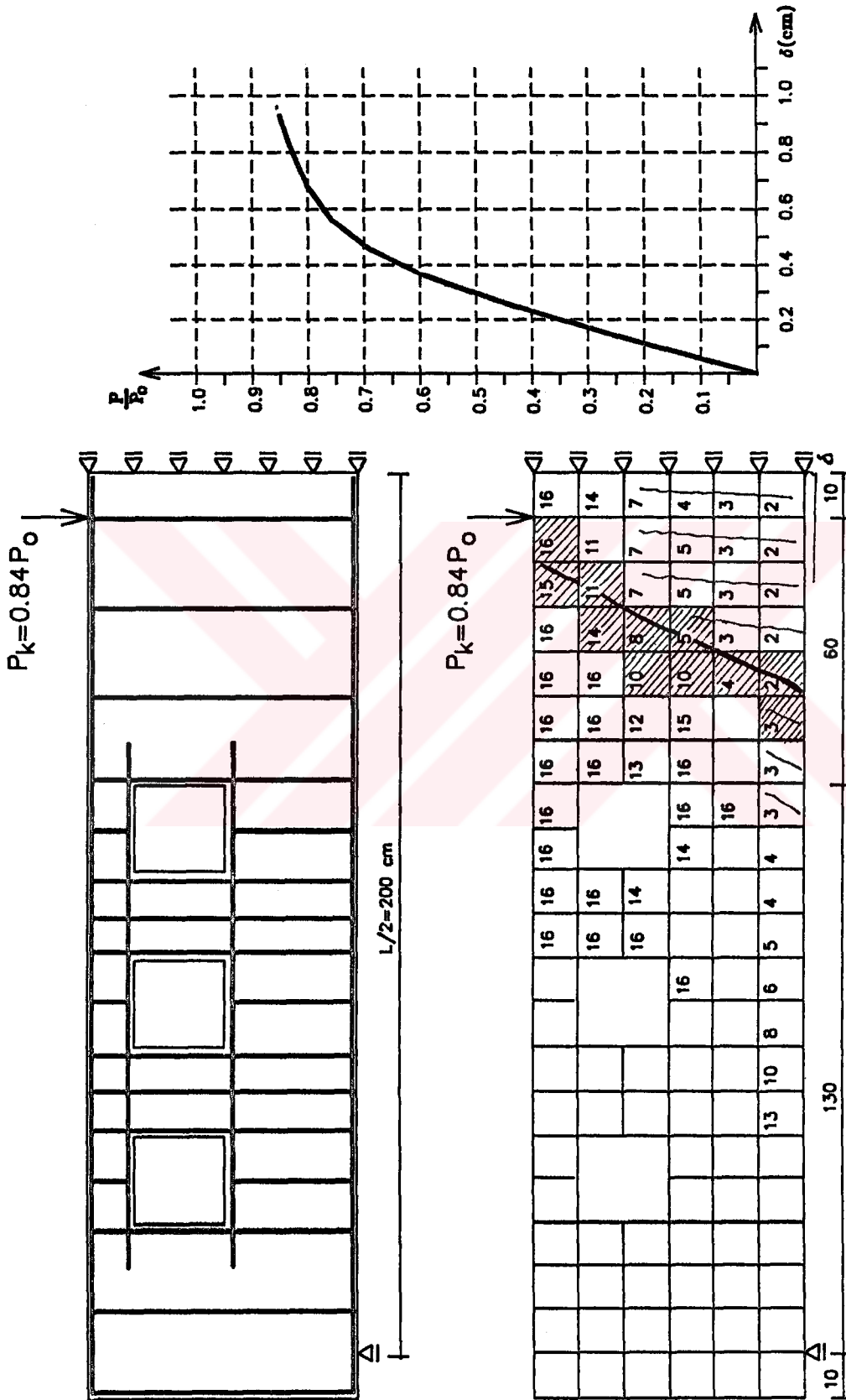
İkinci grup kirişlerle ilgili sonuçlar Tablo 4.2 'de topluca gösterilmiştir.



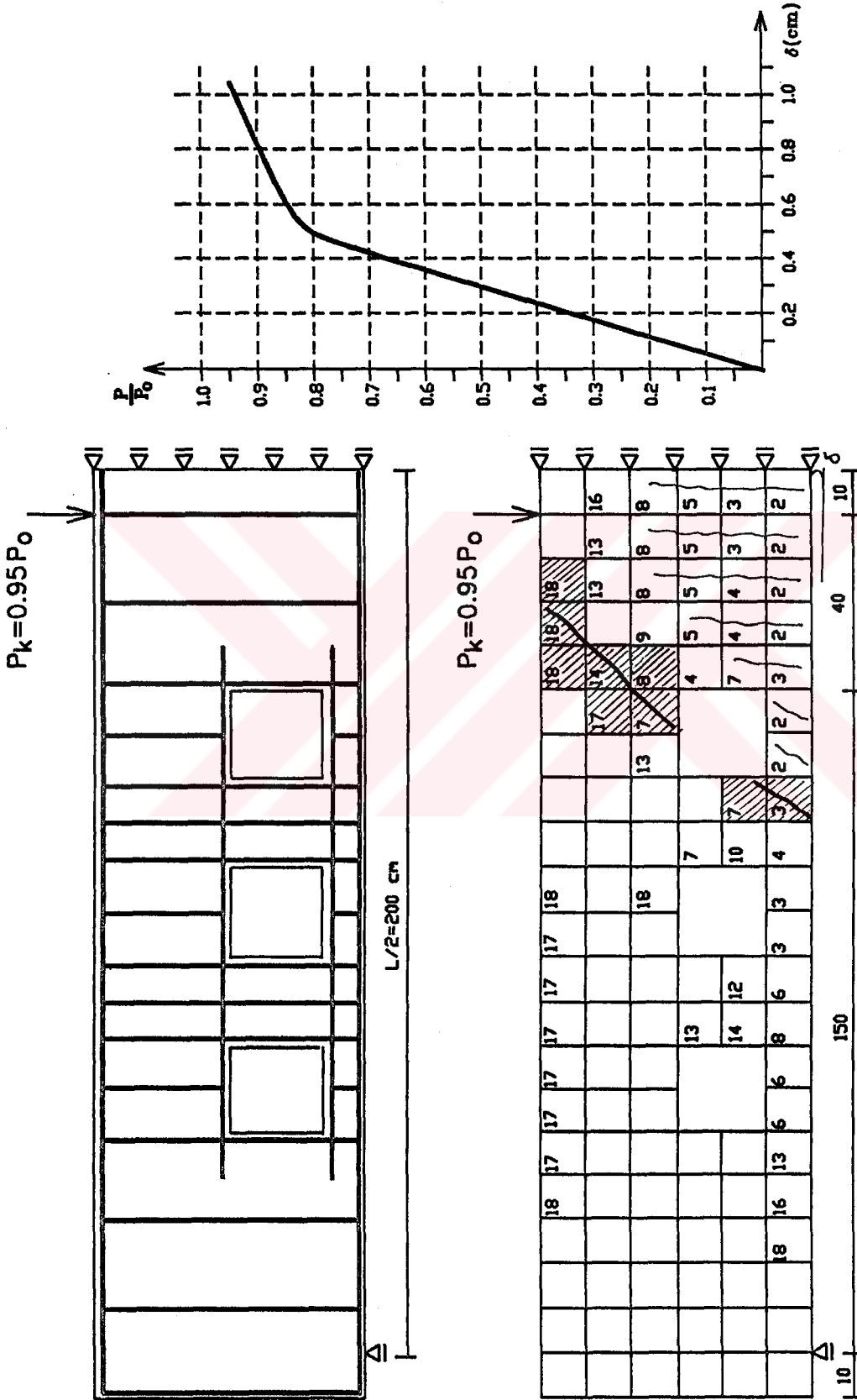
Şekil 4.38. Kiriş No I.31A



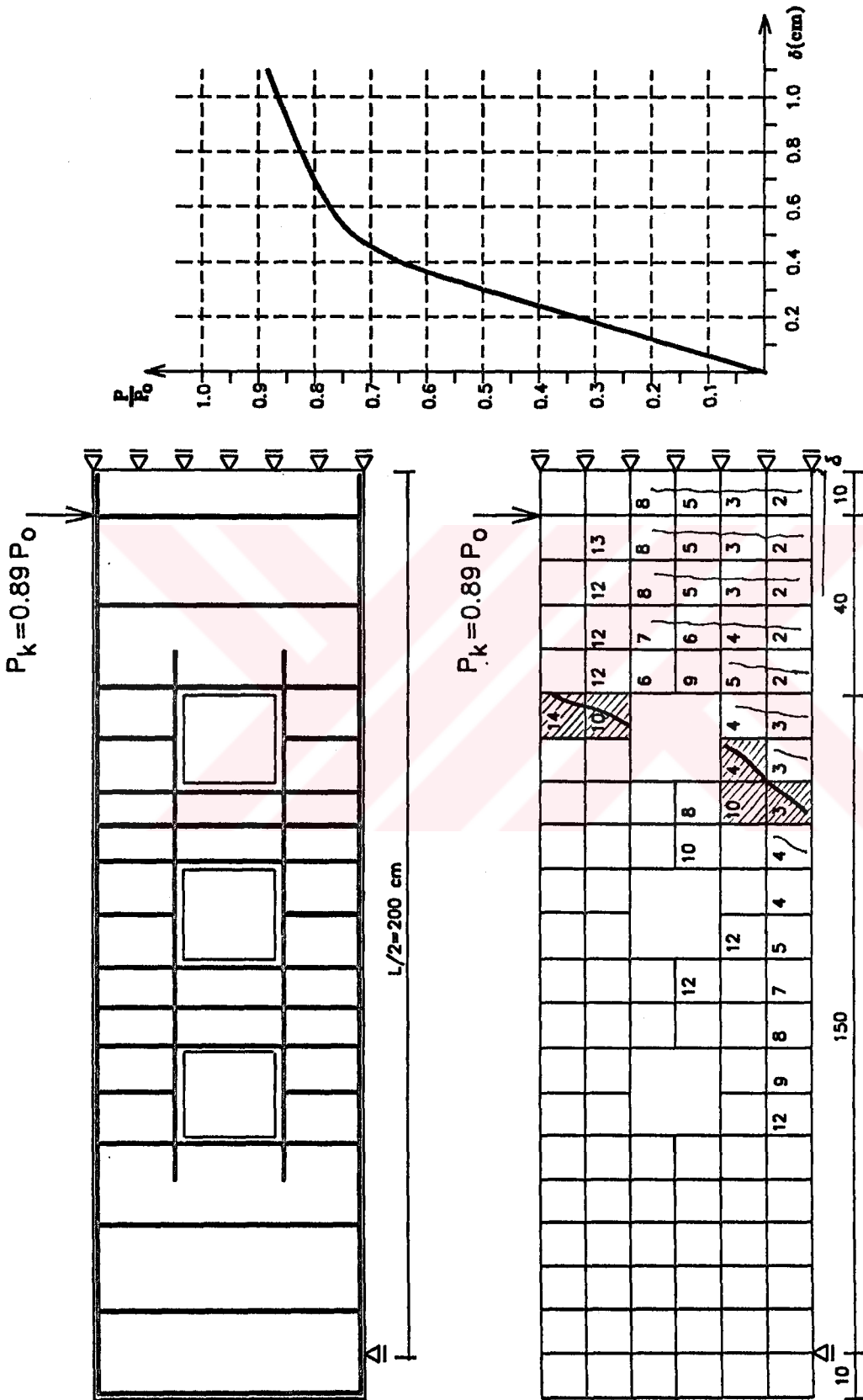
Şekil 4.39. Kiriş No I.31



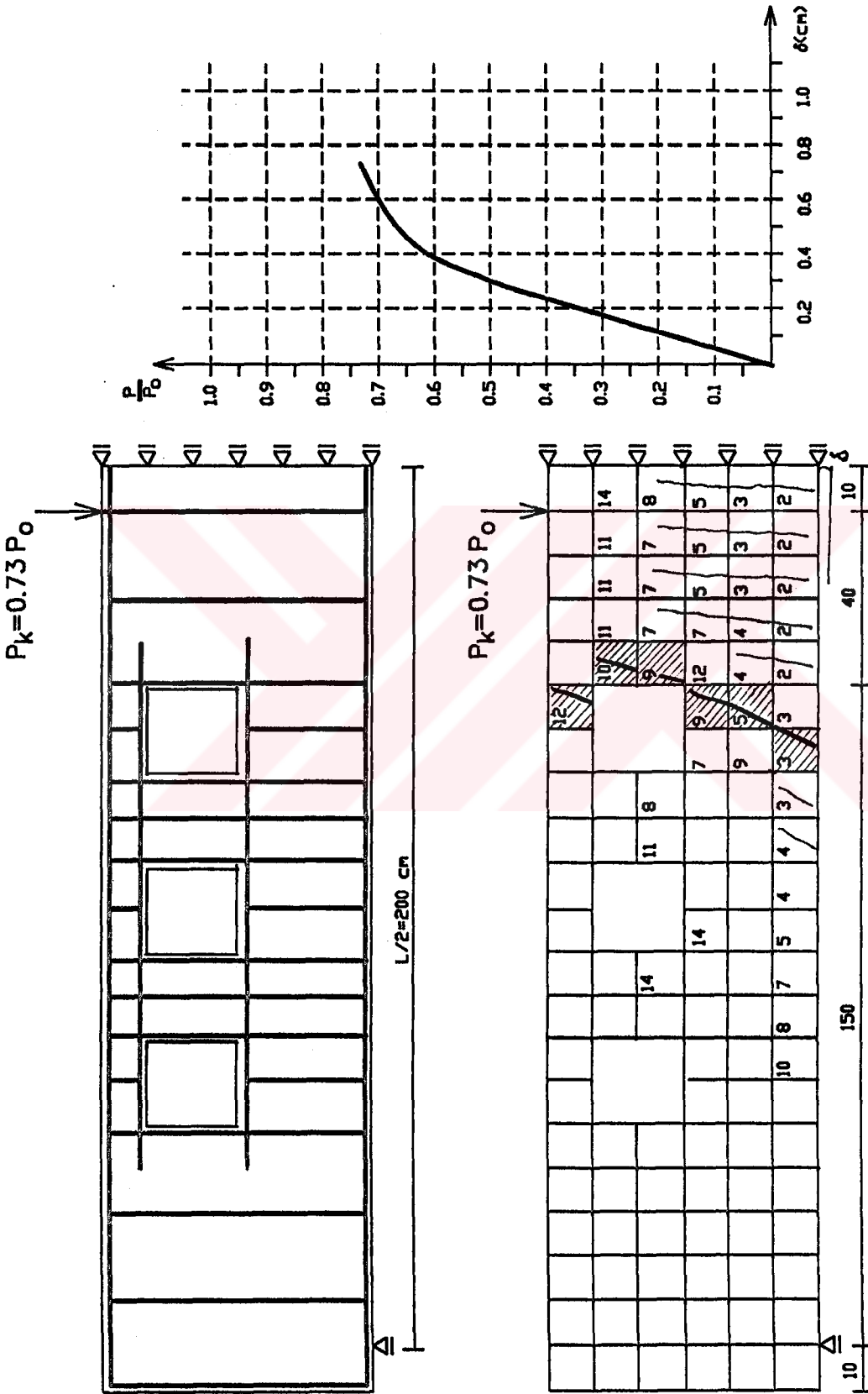
Şekil 4.40. Kiriş No I.31U



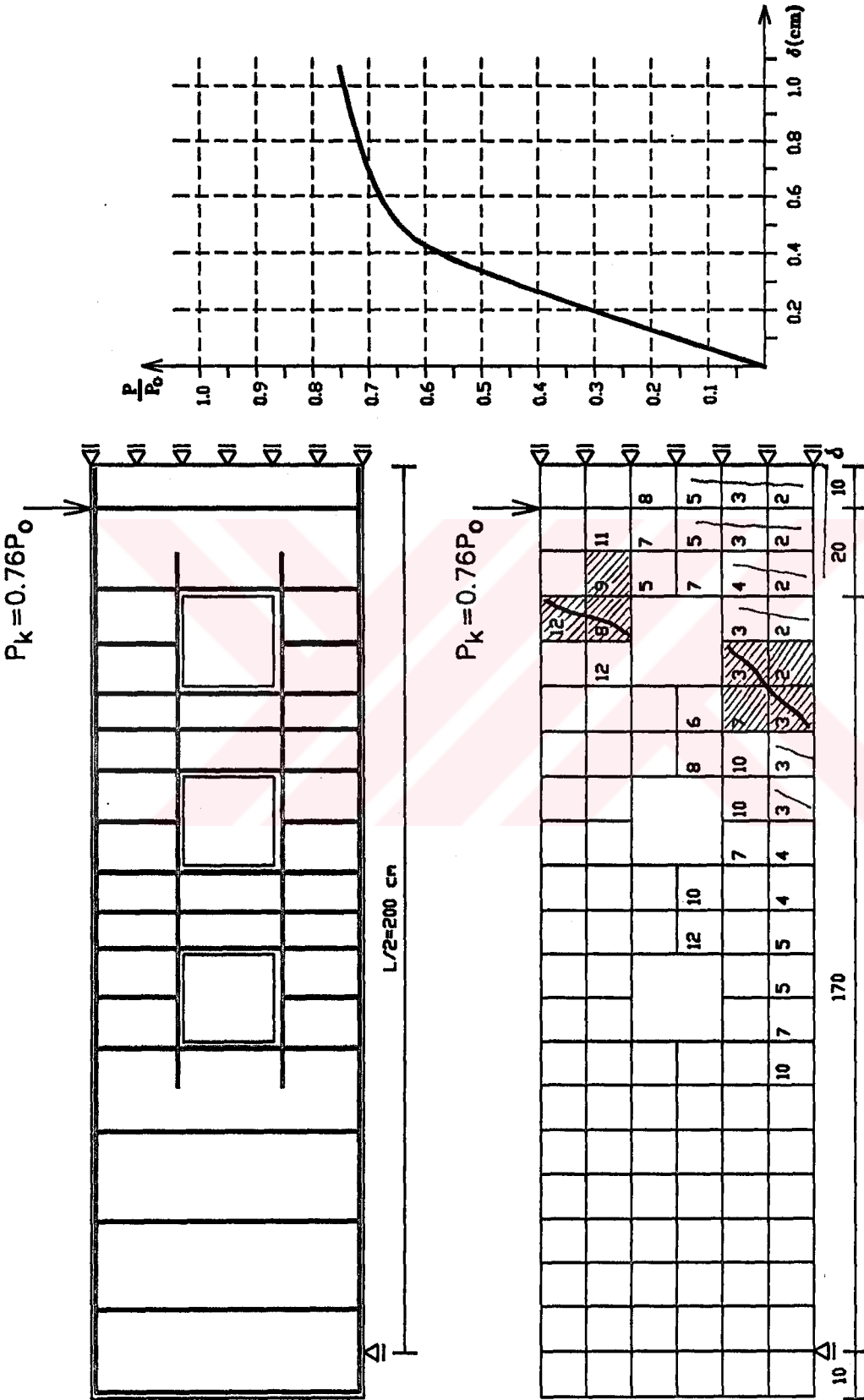
Şekil 4.41. Kiriş No I.32A



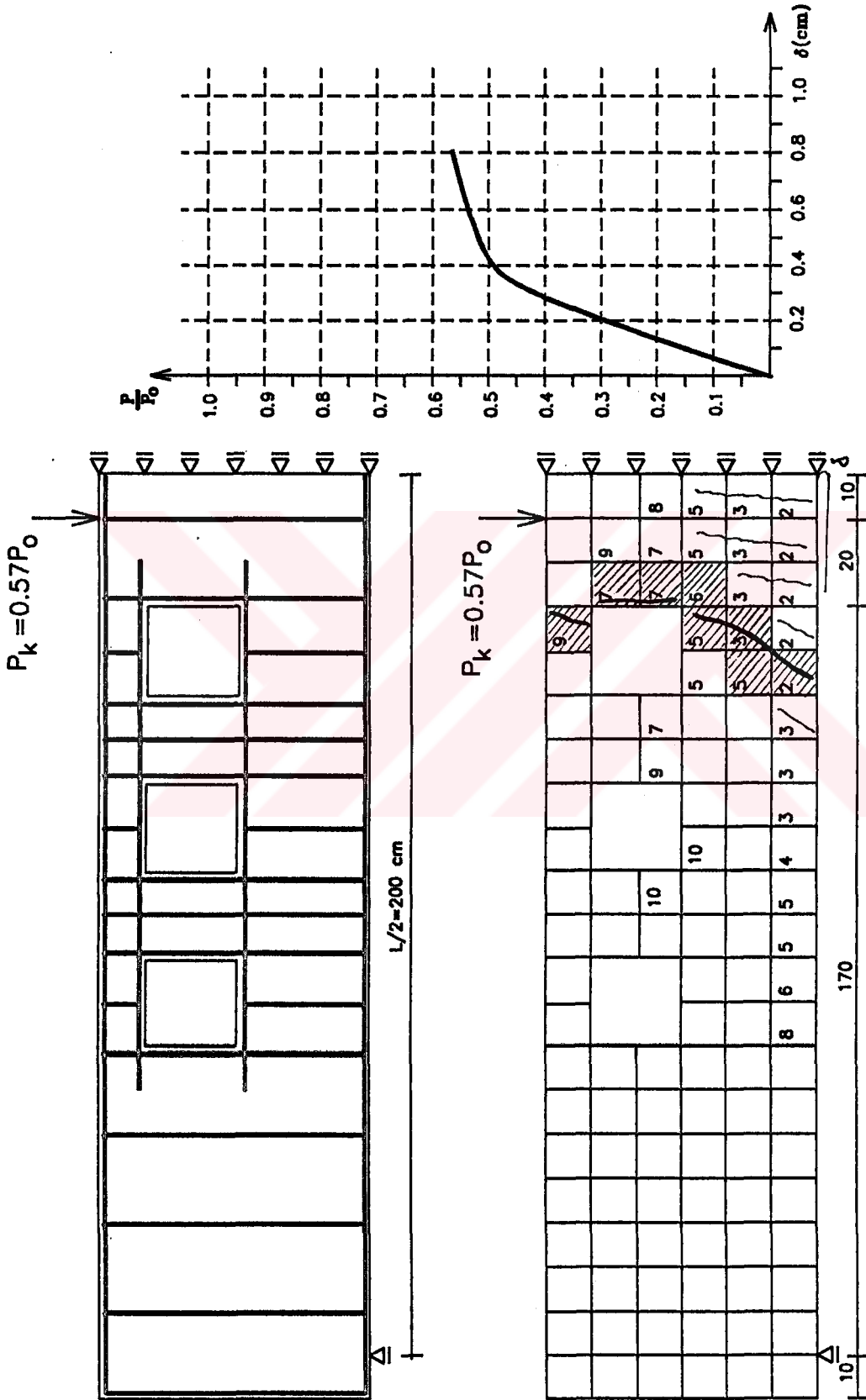
Şekil 4.42. Kiriş No I.32



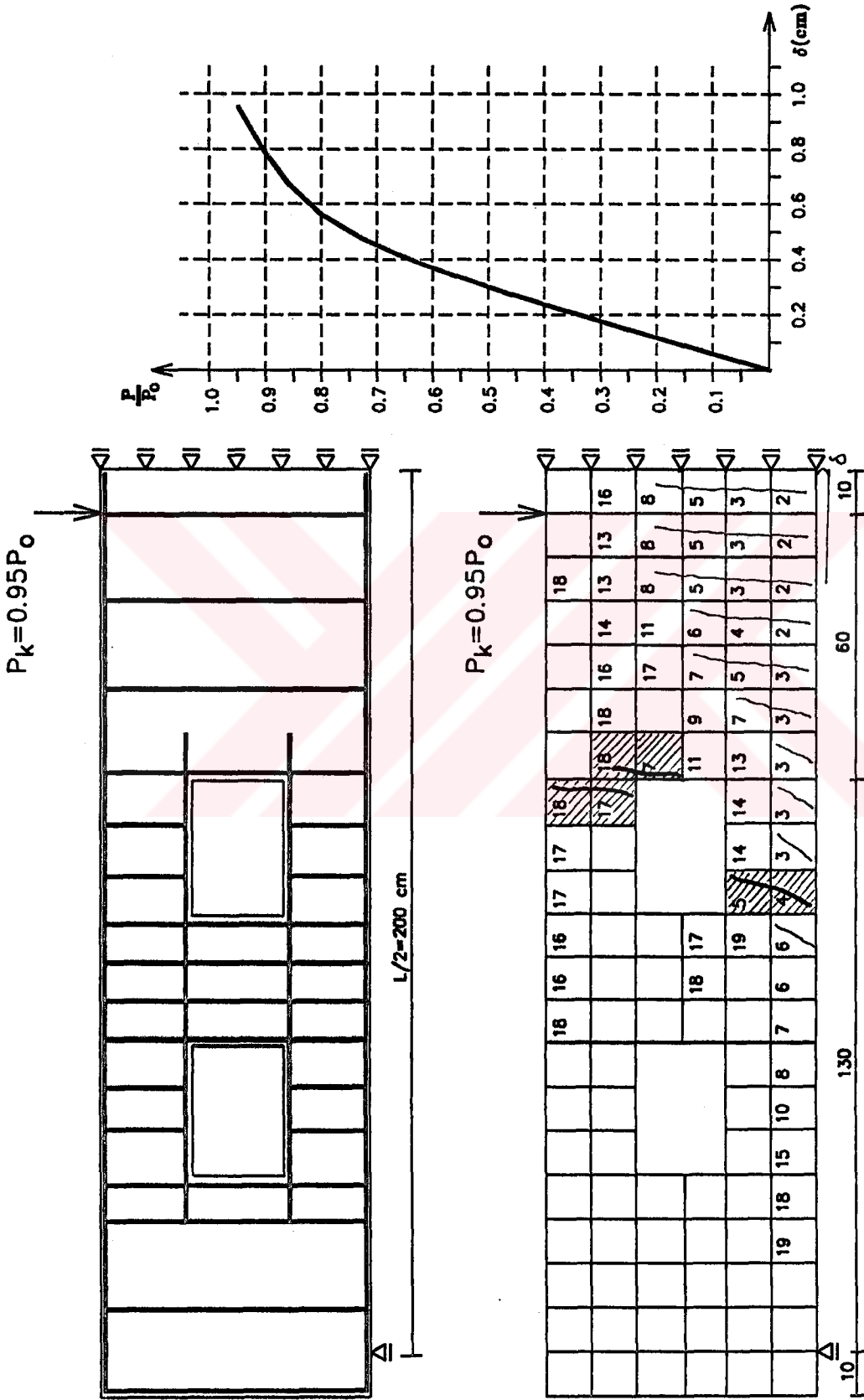
Şekil 4.43. Kiriş No I.32U



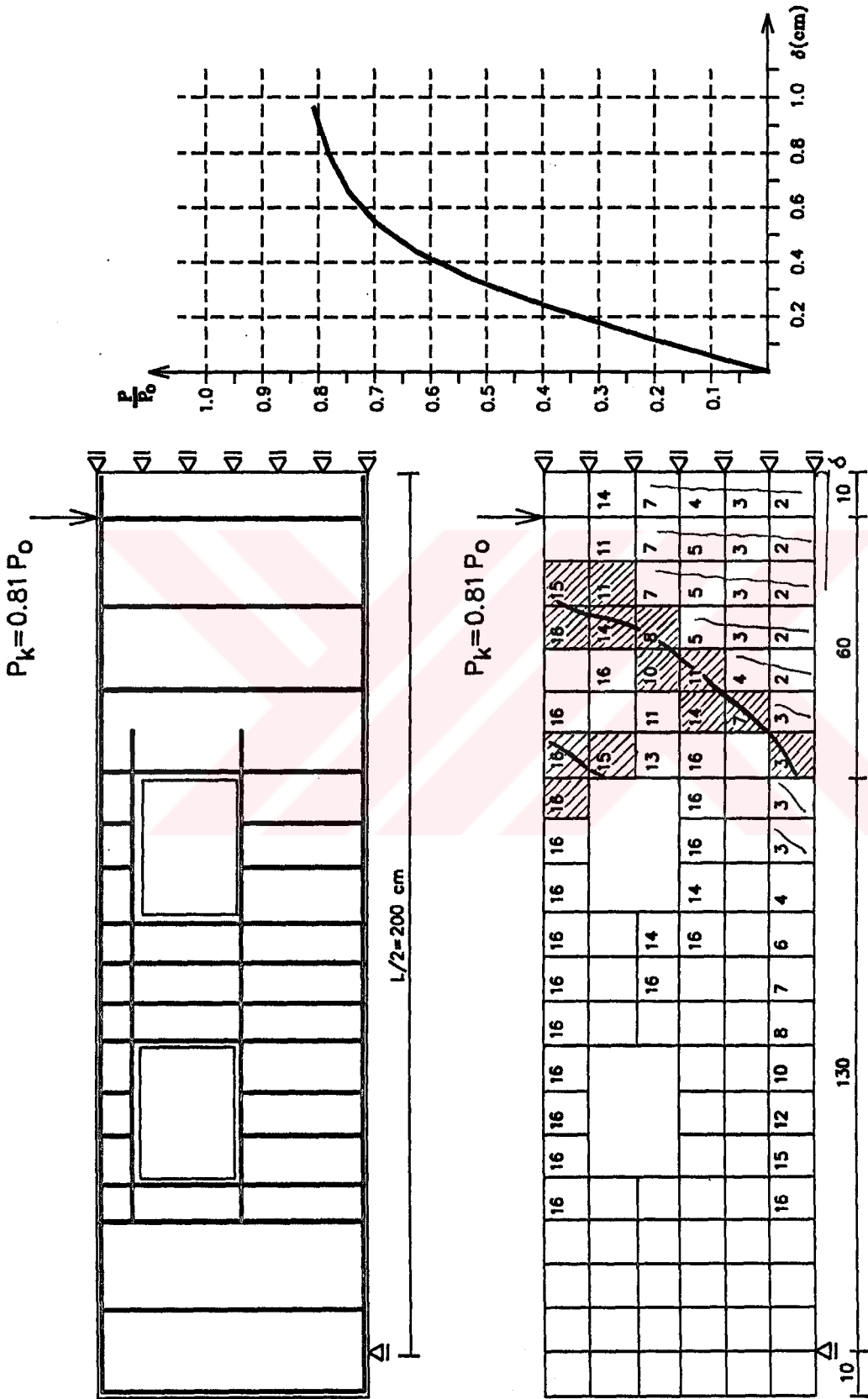
Şekil 4.45. Kiriş No 1.33



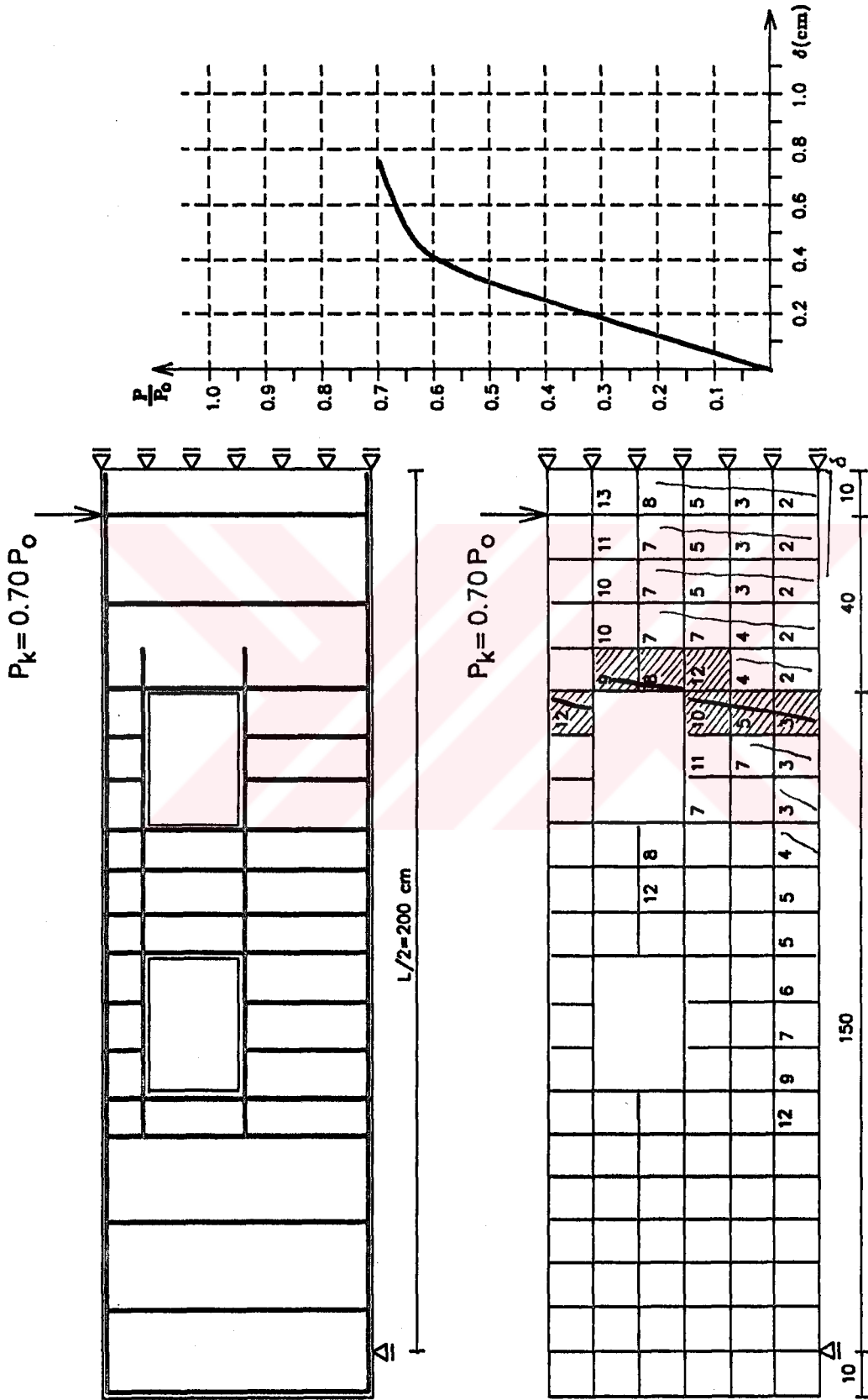
Şekil 4.46. Kiriş No I.33U



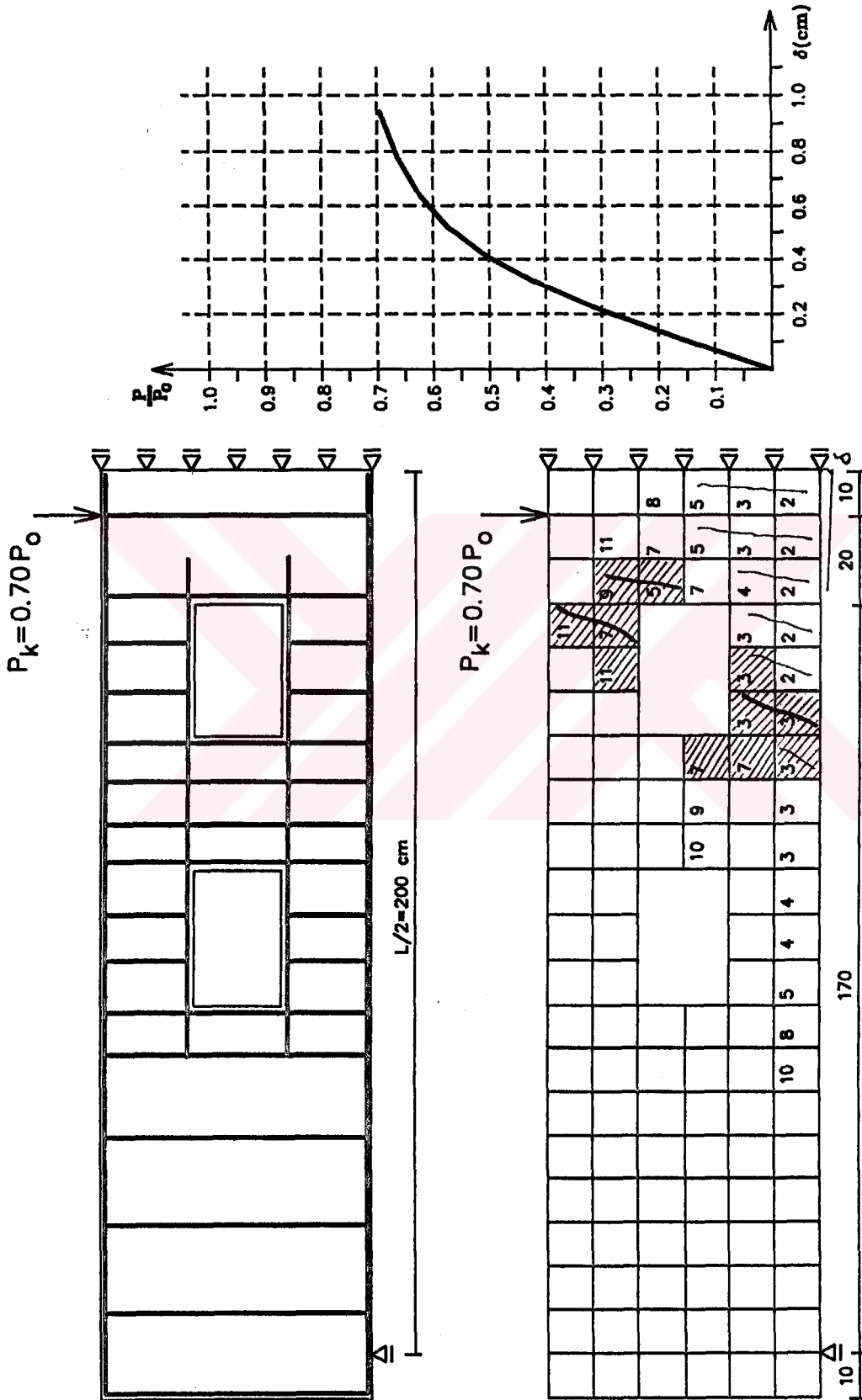
Şekil 4.48. Kiriş No I.21



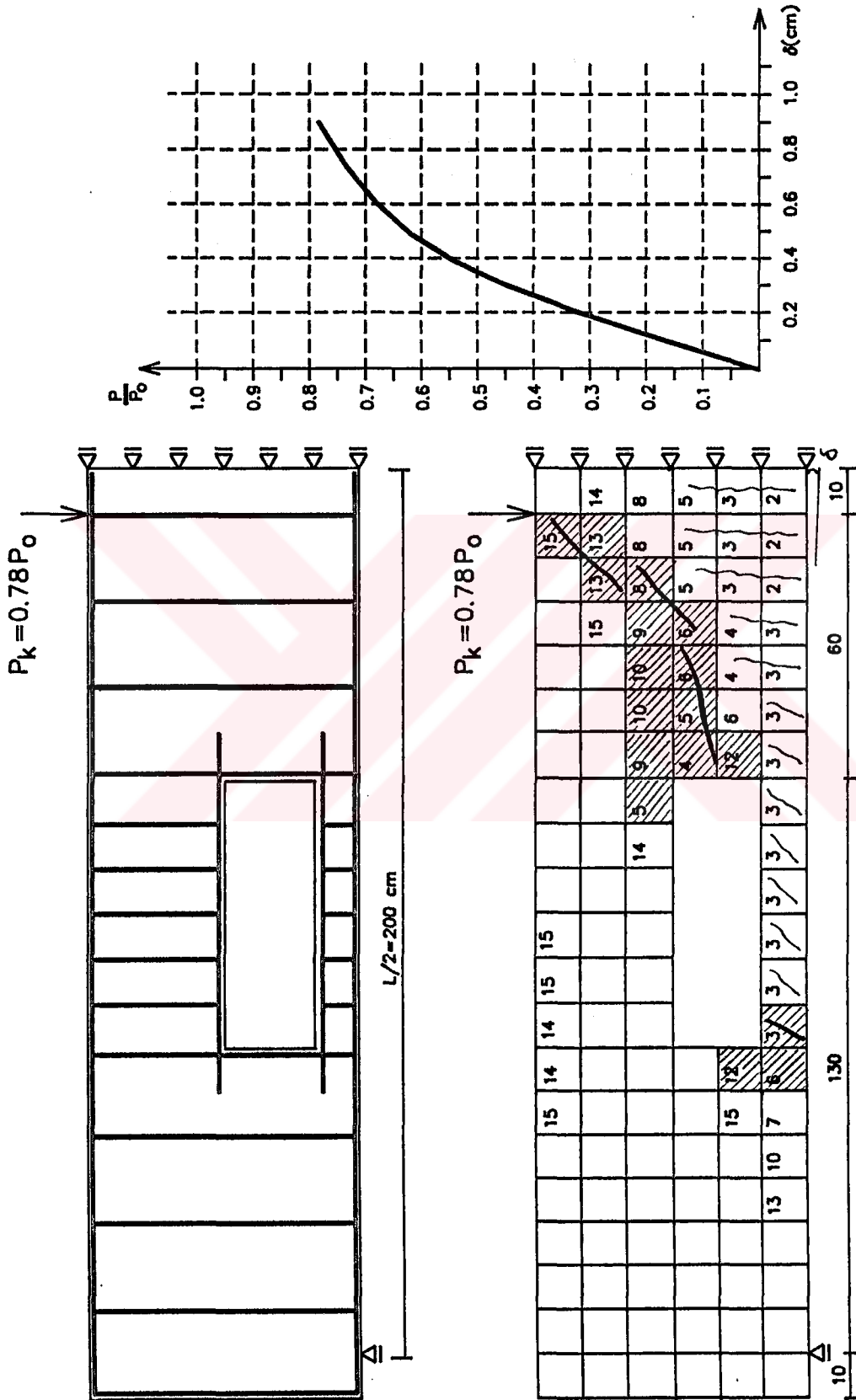
Şekil 4.49. Kiriş No I.21U



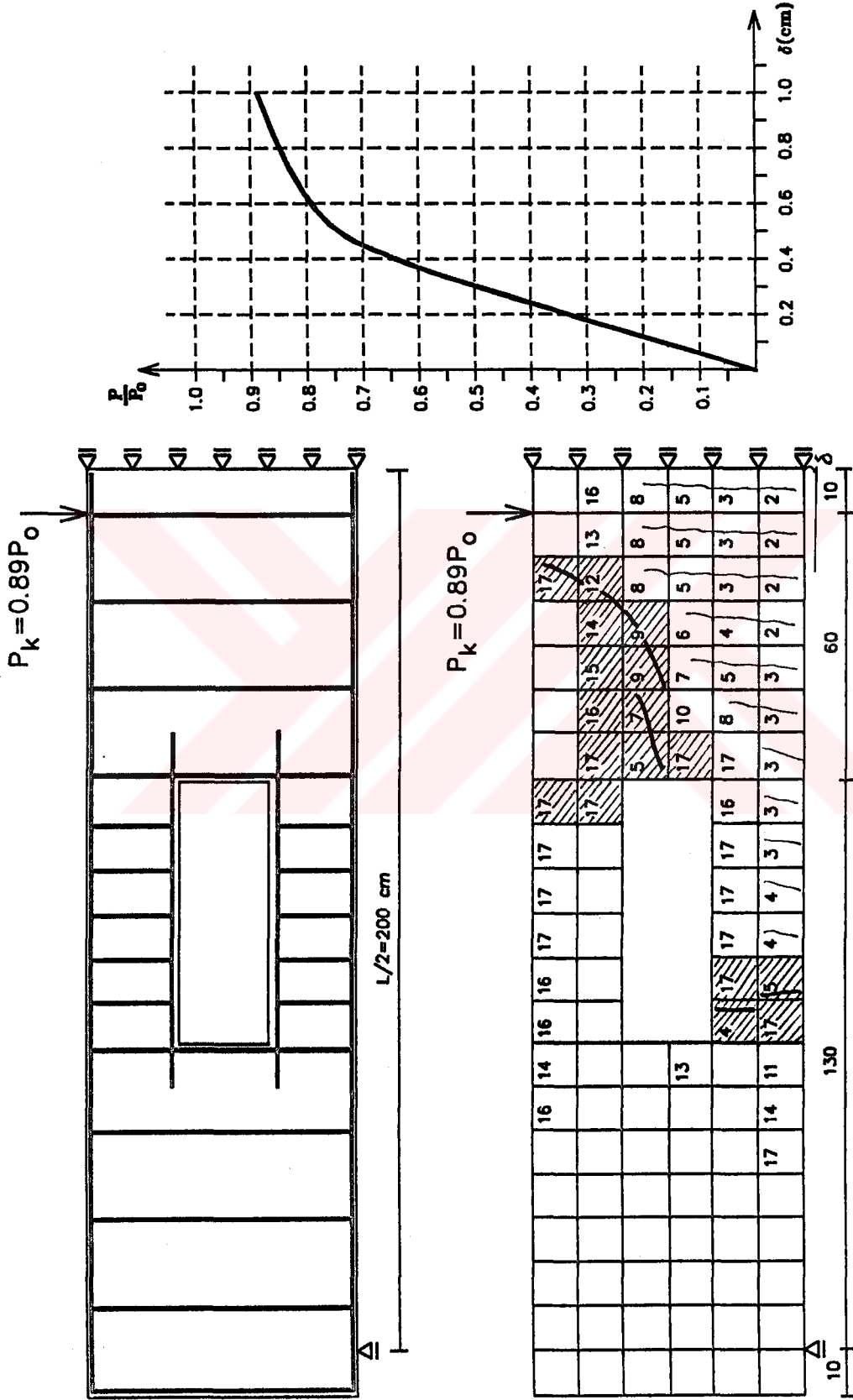
Şekil 4.52. Kiriş No I.22U



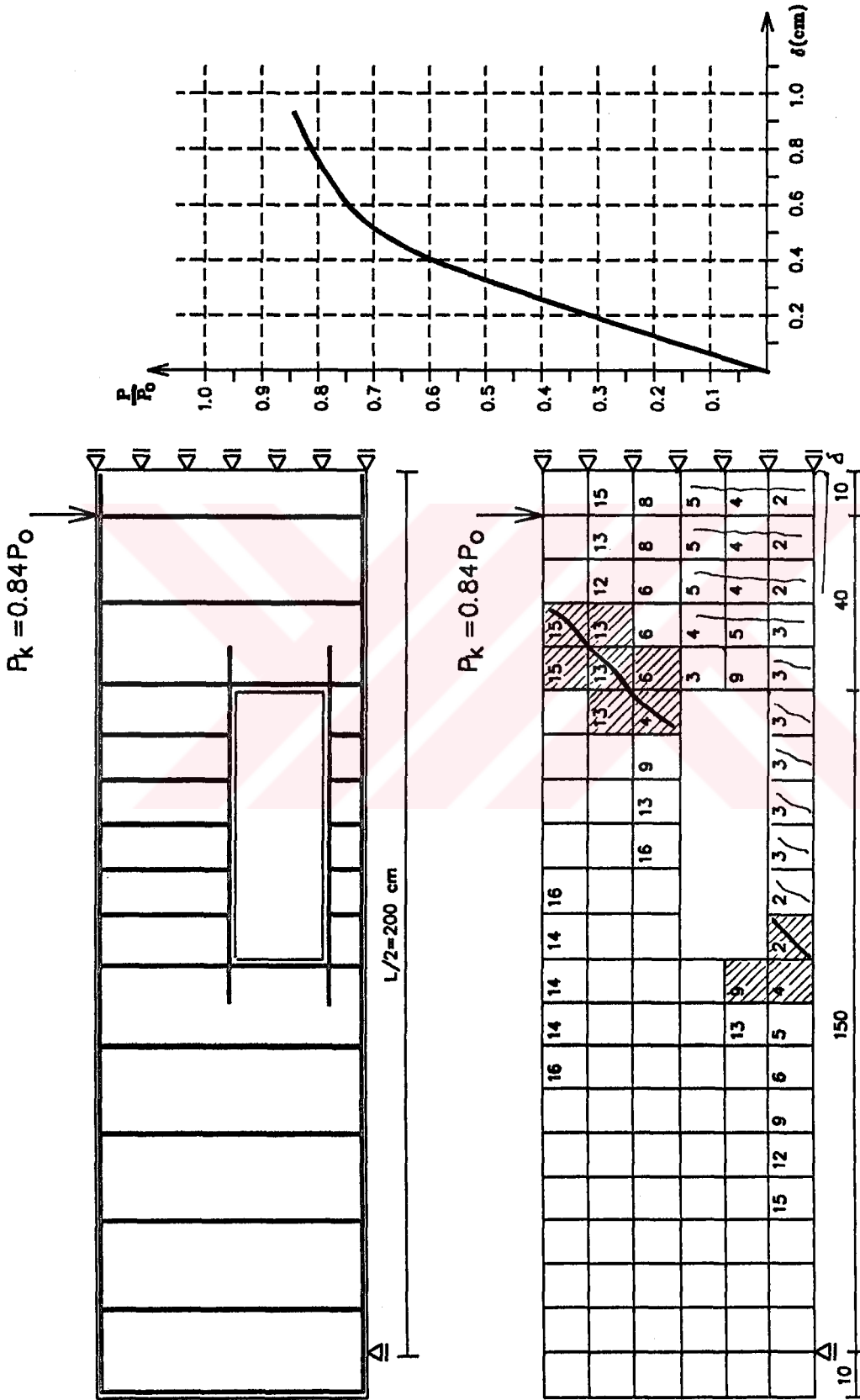
Şekil 4.54. Kiriş No I.23

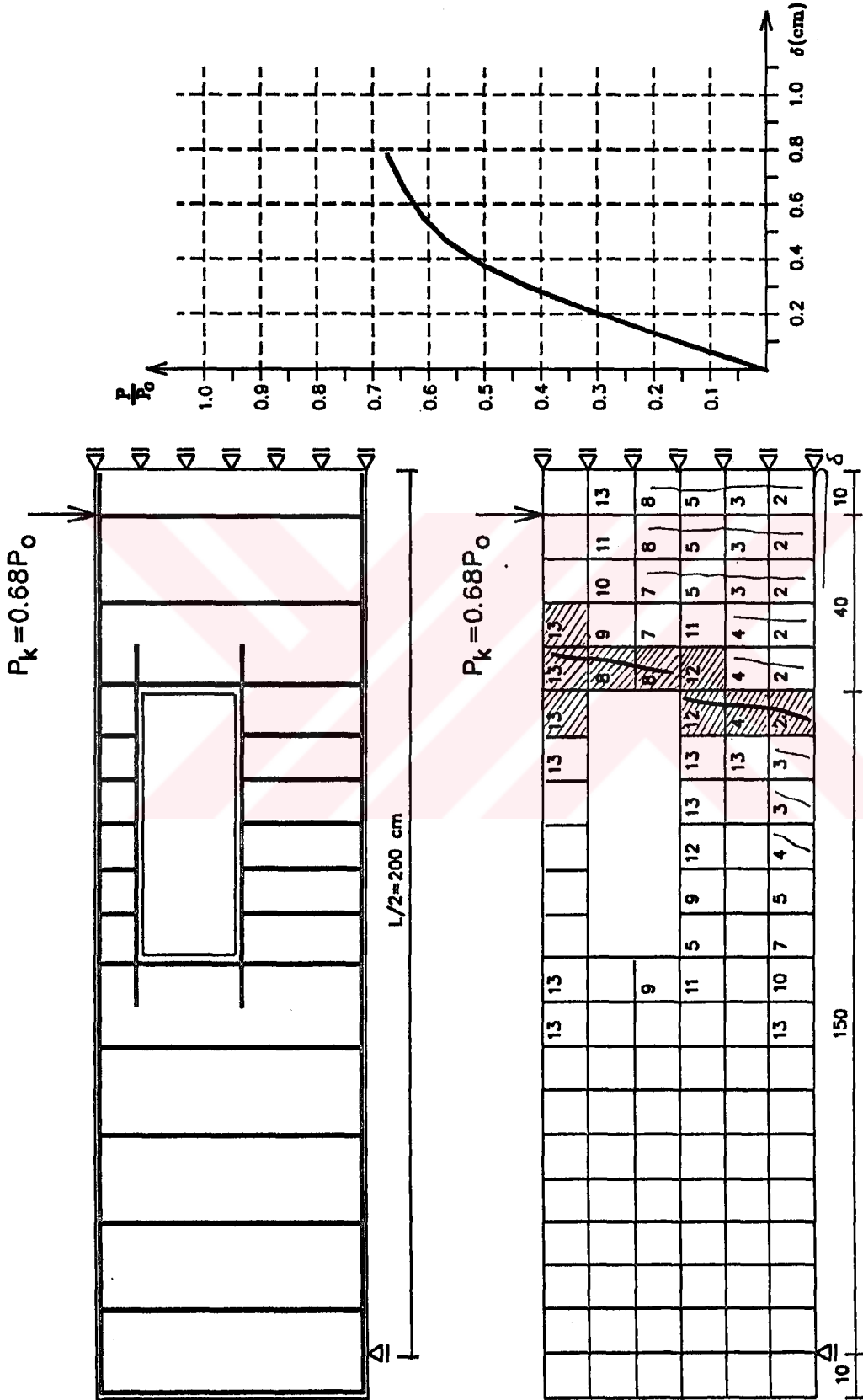


Şekil 4.56. Kiriş No I.11A

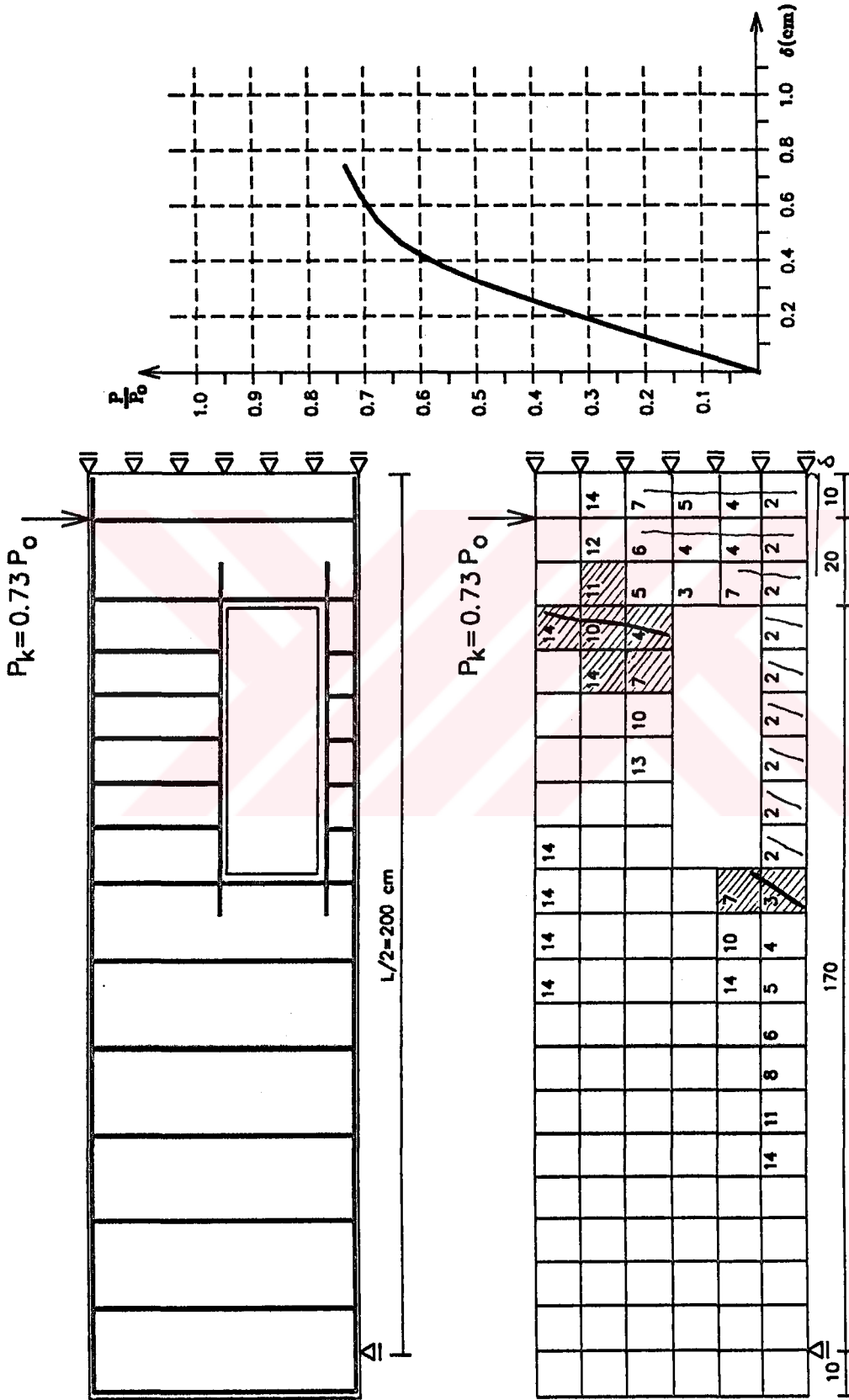


Şekil 4.57. Kiriş No. I.11

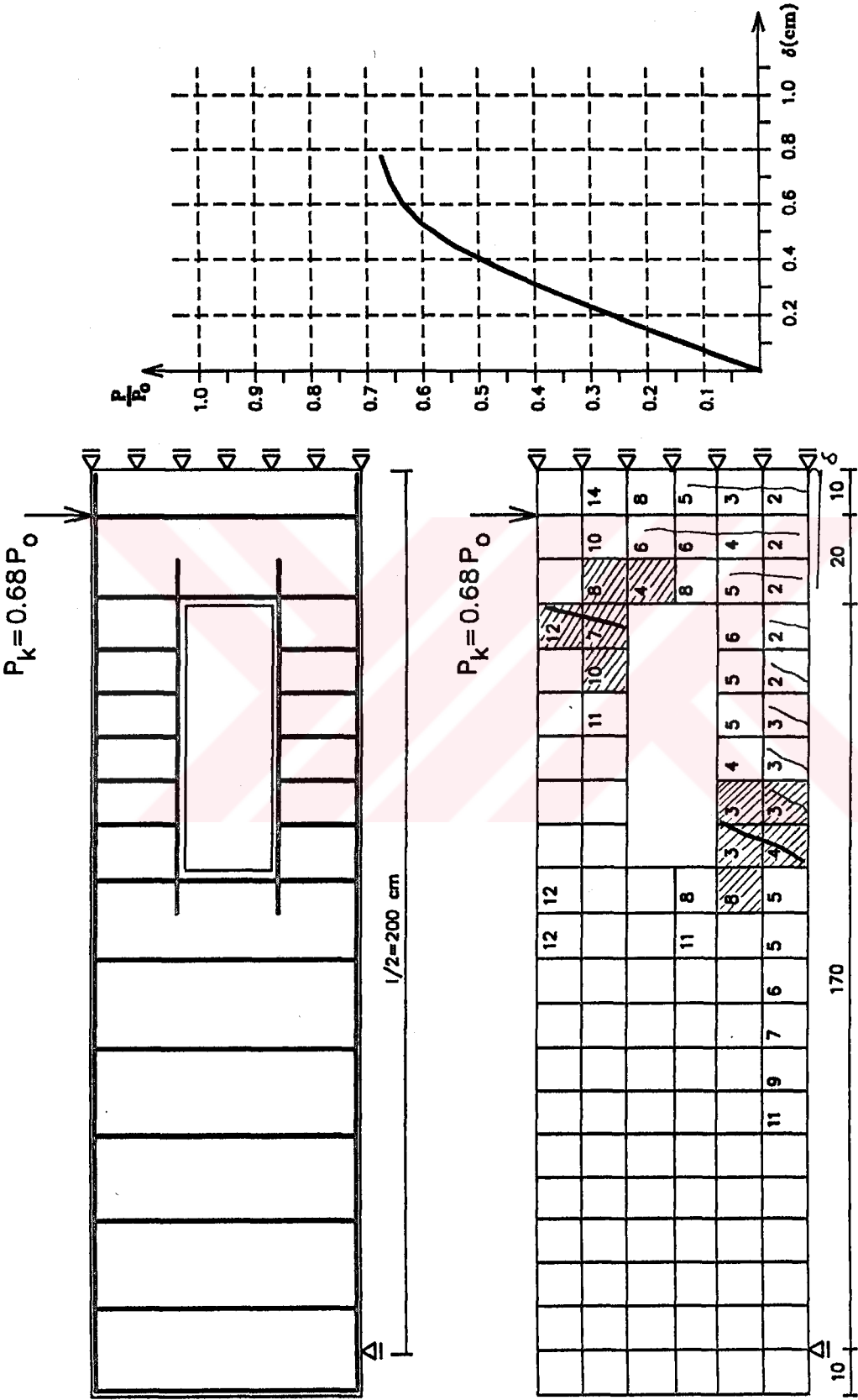




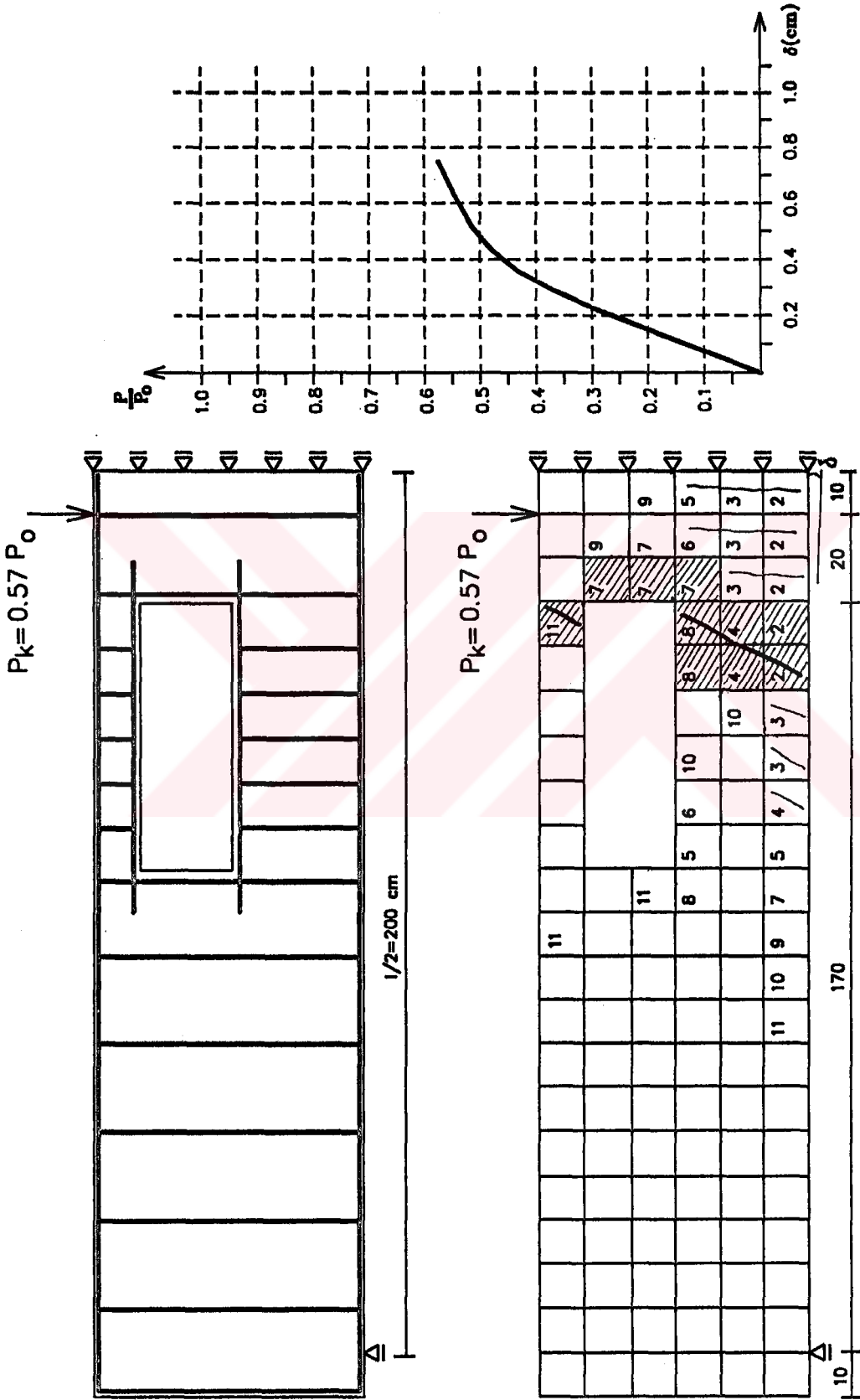
Şekil 4.61. Kiriş No I.12U



Şekil 4.62. Kiriş No I.13A



Şekil 4.63. Kiriş No I.13



Şekil 4.64. Kiriş No I.13U

Tablo 4.2. İkinci Grup Kirişlerde Göçme Yükleri

İKİNCİ GRUP KİRİŞLER									
SERİ NO	KİRİŞ NO	Xk (cm)	b (cm)	do (cm)	da (cm)	du (cm)	eo (cm)	a+b/2 (cm)	Pu (t)
1	I.31A	190	20	20	10	30	-10	120	32.95
	I.31	190	20	20	20	20	0	120	37.00
	I.31U	190	20	20	30	10	10	120	31.10
	I.32A	190	20	20	10	30	-10	140	35.15
	I.32	190	20	20	20	20	0	140	32.90
	I.32U	190	20	20	30	10	10	140	27.01
	I.33A	190	20	20	10	30	-10	160	31.08
	I.33	190	20	20	20	20	0	160	28.12
	I.33U	190	20	20	30	10	10	160	21.09
2	I.21A	190	30	20	10	30	-10	115	31.10
	I.21	190	30	20	20	20	0	115	35.20
	I.21U	190	30	20	30	10	10	115	29.97
	I.22A	190	30	20	10	30	-10	135	32.95
	I.22	190	30	20	20	20	0	135	31.15
	I.22U	190	30	20	30	10	10	135	25.90
	I.23A	190	30	20	10	30	-10	155	28.90
	I.23	190	30	20	20	20	0	155	25.85
	I.23U	190	30	20	30	10	10	155	21.83
3	I.11A	190	60	20	10	30	-10	100	28.86
	I.11	190	60	20	20	20	0	100	32.93
	I.11U	190	60	20	30	10	10	100	28.12
	I.12A	190	60	20	10	30	-10	120	30.95
	I.12	190	60	20	20	20	0	120	28.80
	I.12U	190	60	20	30	10	10	120	25.16
	I.13A	190	60	20	10	30	-10	140	27.01
	I.13	190	60	20	20	20	0	140	25.16
	I.13U	190	60	20	30	10	10	140	21.09

4.6. YÖNTEMİN DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmada kullanılan yöntemin daha önce yapılmış olan deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak, elde edilen sonuçların gerçek duruma yakınlığının belirlenmesi amacıyla Mansur, Tan ve Lee 'nin [29] yapmış olduğu deney sonuçlarından faydalanılmıştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan kirişler, üçüncü seri kirişlere yükleme şekli, boşluğun yeri ve donatı düzeni bakımından benzetilmektedir. Bu amaçla deneylerde kullanılan kirişler uygun bir sonlu eleman ağı seçilerek, yük artımı yöntemiyle tekrar çözülmüşlerdir. Gövde boşluğunun ve yükün uygulandığı noktanın simetrik olmaması nedeniyle sonlu elemanlarla yapılan çözümlerde kirişin tamamı dikkate alınmıştır.

Deney sonuçlarıyla sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Ancak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar genel olarak deney sonuçlarından daha yüksek olmaktadır. Deneylerde kirişler sadece gövde donatılı olarak gözönüne alındığı için gövde donatısız çözümlerin karşılaştırılması yapılamamıştır.

Literatürde, bu çalışmada gözönüne alınan ve gövdesinde birden çok boşluk bulunan, birinci ve ikinci grup kirişlere benzer kirişlerin deneysel veya analitik olarak incelendiği bir başka çalışmaya rastlanamadığı için bu tür kirişlerin karşılaştırılması yapılamamıştır. Ancak bir sonraki bölümde değinileceği üzere, genel olarak kirişlerin göçme yükleri üzerinde yüke en yakın gövde boşluğu belirleyici bir rol oynamaktadır.

Mansur, Tan ve Lee 'nin deneylerinde kullandıkları kirişlerle ilgili özellikler ve elde edilen sonuçlar ile aynı kirişlerin lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçları Tablo 4.3 'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Deney Sonuçları ile Karşılaştırma

MANSUR , TAN VE LEE [29] DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRMA													
KıRıŞ NO	Xk (cm)	b (cm)	do (cm)	da (cm)	du (cm)	eo (cm)	a+b/2 (cm)	Ptest (t)	Psey (t)	Ptest/Psey	δ test (cm)	δ sey (cm)	δ test / δ sey
R1	200	40	18	11	11	0	100	22.39	23.55	0.95	0.66	0.75	0.88
R2	200	60	18	11	11	0	100	18.25	20.50	0.89	0.67	0.81	0.83
R3	200	80	18	11	11	0	100	14.41	16.75	0.86	0.71	0.88	0.80
R4	200	100	18	11	11	0	100	13.34	15.15	0.88	0.73	0.91	0.80
R5	200	120	18	11	11	0	100	10.41	11.45	0.91	0.84	0.93	0.90
R6	200	80	14	13	13	0	100	18.00	20.45	0.88	0.73	0.85	0.86
R7	200	80	22	9	9	0	100	10.29	12.00	0.86	0.68	0.81	0.84
R8	200	80	18	10	12	-1	100	15.93	17.15	0.93	0.63	0.78	0.81
R9	200	80	18	9	13	-2	100	17.40	19.30	0.90	0.70	0.84	0.83
R10	200	80	18	11	11	0	80	17.74	19.20	0.92	0.81	1.02	0.79
R11	200	80	18	11	11	0	100	13.35	17.35	0.77	0.69	0.91	0.76
R12	200	80	18	11	11	0	120	15.43	16.40	0.94	0.68	0.85	0.80

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde çalışmada göz önüne alınan betonarme kirişlerin lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen çözümleri değerlendirilmiş, gövde boşlukları ve gövde donatılarının taşıma gücü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu değerlendirmede; gövde boşluklarının konumu, yani mesnet ile uygulanan tekil yük arasındaki bölgedeki yeri, gövde boşluklarının eksantrisitesi yani boşluğun kiriş ekseninin aşağısında veya yukarısında bulunması durumu, gövde boşluklarının sayısı, gövde boşluklarının büyüklüğü, gövde donatılarının taşıma gücüne etkisi, kirişlerin göçme yükü ve göçme şekli, yük-deplasman davranışı ve genel olarak kirişlerdeki çatlak davranışı gibi hususlar göz önüne alınmıştır.

5.1. GÖVDE BOŞLUKLARININ KONUMU İLE İLGİLİ DEĞERLENDİRMELER

Kiriş üzerindeki gövde boşlukları, mesnet ve uygulanan tekil yük arasındaki bölgede yatay ve düşey doğrultuda farklı konumlarda olabilmektedir. Dolayısıyla gövde boşlukları maksimum ve minimum momentler arasındaki bölgede bulunmaktadır. Momentin büyük olduğu kesite rastlayan gövde boşluğu, bu bölgede kiriş rijitliğinin az olması nedeniyle, kiriş taşıma gücü üzerinde önemli bir rol oynamakta ve göçme yükünü bu gövde boşluğu belirlemektedir. Tüm kirişlerde, kirişin sol mesneti ile ilk gövde boşluğu arasındaki uzaklık a , herbir gövde boşluğunun boyu ve boşluklar arasındaki uzaklık b ile gösterilirse, birinci seri kirişler için gövde boşluğunun ortasındaki moment $M=P[a+(9/2)b]$, ikinci seri kirişlerde $M=P[a+(5/2)b]$ ve üçüncü seri kirişlerde $M=P[a+(1/2)b]$ ve kesme kuvveti $V=P$ olmaktadır. Bu durumda boşluğun ortasında moment ve kesme kuvveti arasındaki oran, birinci, ikinci ve üçüncü seri kirişlerde sırasıyla $M/V=a+9/2b$, $M/V=a+5/2b$ ve $M/V=a+1/2b$

dir. Genel olarak kirişlerde gövde boşluğu ortasındaki moment kesme kuvveti oranı arttıkça kiriş taşıma gücü azalmaktadır. Gövde boşluğunun bulunduğu kesitteki kiriş rijitliğindeki azalma bu kesitlerde gerilme yığılmalarına yol açmakta ve deformasyonlarda artmaya sebep olmaktadır.

Gövde boşluğunun kiriş alt veya üst kenarlarına olan uzaklığı da kiriş taşıma gücü üzerinde önemli rol oynamaktadır. Gövde boşluklarının eksantrisitesi kiriş eksenine göre aşağıya doğru arttıkça kiriş taşıma gücü artmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Boşluğun altında kalan kısım eksenel çekme altında olduğu için bu bölgede bulunan çekme donatıları mukavemeti olumlu yönde artırmaktadır. Bu özellikle ikinci grup kirişlerde yani gövde boşluklarının alt ve üst kenarlarının yatay donatılarla takviye edildiği kirişlerde daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer yandan boşluğun üstünde kalan kısım eksenel basınç gerilmelerine maruz kalmakta ve bu gerilmeler beton tarafından önemli ölçüde karşılanmaktadır. Bu nedenle gövde boşluklarının üst tarafında kalan kesit alanı ne kadar büyük olursa kiriş mukavemeti o ölçüde olumlu yönde etkilenmektedir. Sonuç olarak gövde boşluğunun kiriş ekseninin altında olması bir yapım gereği olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak bu durum, gövde boşluğunun altında kalan bölgenin yeterince donatılması ve pas payı koşuluna dikkat edilmesi gibi pratikte önem arzeden bir takım güçlükleride beraberinde getirmektedir.

Gövde boşluklarının konumu ilk çatlama yükü üzerinde etkili olmamakta, kirişlerin çekme bölgesinde ortaya çıkan eğilme çatlakları yüke en yakın boşluk çevresine doğru yayılmaktadır. Boşlukların kirişin ortasında bulunması, kiriş ekseninin alt veya üstünde bulunması haline göre çatlak gelişimi açısından olumlu olmaktadır.

Gövde boşluklarının konumu yük-deplasman davranışını da yakından ilgilendirmektedir. Tekil yükün uygulandığı kesite yakın bölgede bulunan boşluklar kirişlerde meydana gelen deplasmanların büyümesine neden olmakta özellikle gövde boşluklarının çevresinin yatay ve düşey donatılarla güçlendirilmediği birinci grup kirişlerde kiriş ortasında oluşan deplasmanlar dolu gövdeli kiriş deplasmanlarına oranla oldukça büyük değerler almaktadır.

Gövde boşluğunun konumu göçme şeklini de değiştirmekte, dolayısıyla göçme yükünü etkilemektedir. Birinci grup kirişlerde delik çevresi donatı ile güçlendirilmediği için, göçme, yüke yakın olan boşlukların uçlarında plastik mafsalların oluşması ile kirişin mekanizma durumuna geçmesiyle meydana gelmektedir. İkinci grup kirişlerde göçme yine boşluk köşelerinde ortaya çıkan çatlaklar sonucunda oluşmakta fakat göçme yükü birinci grup kirişlerdekine kıyasla daha büyük olmaktadır. Yatay donatılarla ve etriyelerle takviye edilen bu kirişlerin göçme yükleri ilk önce çözümü yapılmış olan gövdesinde boşluk içermeyen kirişin göçme yüküne oldukça yaklaşmaktadır.

5.2. GÖVDE BOŞLUKLARININ BÜYÜKLÜĞÜ VE SAYISI İLE İLGİLİ DEĞERLENDİRMELER

Gövde boşlukları için daha öncede belirtildiği gibi, her bir seri kirişde boşluk alanı sabit kalmak üzere boşluk sayısı değiştirilerek bir düzenleme yapılmıştır. Yani dörtgen formdaki gövde boşluklarının kiriş üzerindeki toplam alanı sabit tutularak, birinci seri kirişlerde 6 adet, ikinci seri kirişlerde 4 adet ve üçüncü seri kirişlerde 2 adet boşluk göz önüne alınmış ve gövde boşluklarının kirişlerin taşıma gücünde meydana getirdikleri değişim incelenmiştir. Yapılan analiz sonucunda aynı boşluk alanına sahip fakat farklı sayıda boşluk içeren kirişlerin davranışı gözlenmiş ve analizde

göz önüne alınan yarım kiriş modeli için büyük boşluklu kirişlerin, küçük boşluklu kirişlere nazaran daha zayıf olduğu ve daha küçük göçme yüklerinde göçtükleri saptanmıştır. Uygulanan yükün farklı seviyelerinde, boşluk civarındaki gerilmeler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda boşlukların alt ve üst kenarlarında büyük gerilme yığılmaları olduğu ve bu gerilmelerin boşluklar arasındaki kısımlarda o kısmın rijitliği ile orantılı olarak azaldığı saptanmış dolayısıyla küçük gövde boşluklarının ard arda sıralandığı kirişlerin oldukça iyi bir davranış gösterdiği görülmüştür. Uygulanan yük mesnetlere boşluklar arasında kalan kısımlardan geçerek iletilmekte ve böylece boşlukların olumsuz etkisi en aza inmektedir. Özellikle ikinci grup kirişlerin çözümündende görüldüğü gibi gövde boşluklarının çevresinin yeterli olarak donatılması koşuluyla kiriş taşıma gücü dolu gövdeli kiriş taşıma gücüne oldukça yaklaşmaktadır. Sonuç olarak gerekli olan boşluk alanının uygulamadaki güçlüğe rağmen büyük bir boşluk yerine küçük fakat birkaç boşluk bırakılarak yapılması kiriş dayanımının artırılması bakımından daha olumlu sonuçlar doğurmaktadır.

5.3. GÖVDE DONATILARININ TAŞIMA GÜCÜNE ETKİSİ İLE İLGİLİ DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada göz önüne alınan birinci grup kirişlerde yalnızca esas donatının bulunması durumunda gövde boşluklarının kiriş taşıma gücü üzerindeki etkileri incelenmiş, ikinci grup kirişlerde ise boşlukların çevresi yatay gövde donatıları ve etriyelerle takviye edilerek gövde donatılarının taşıma gücüne katkısı araştırılmıştır. İkinci grup kirişlerin tümünde yatay gövde donatısı oranı sabit tutulmuş ve gövde boşluklarının bulunduğu bölgede etriyeler kirişin diğer yerlerine göre daha sık yerleştirilmiştir. Bilindiği gibi gövde donatıları kiriş gövdesinde ortaya çıkan çatlakları kontrol etmektedir. Gövde donatıları boşluklu kirişlerde daha da bir önem

kazanmakta ve boşluk çevresindeki gerilme yığılmalarından dolayı ortaya çıkan çatlak gelişimini kontrol etmektedir. Birinci ve ikinci grup kiriş çözümlerinin değerlendirilmesi sonucunda gövde donatılarının kiriş taşıma gücüne önemli ölçüde katkıda bulundukları ve bu katkının özellikle birinci seri kirişlerde oldukça yüksek olduğu, kiriş taşıma gücünün hemen hemen dolu gövdeli kiriş seviyesine ulaştığı görülmüştür. Sadece gövde boşluğu civarında kalan bir donatı takviyesinin fazla bir yarar sağlamadığı görülerek çalışmaya esas çözümlerde yatay donatılar kiriş boyunca düzenlenmiştir. Kayma donatılarının özellikle gerilme yığılmalarının yoğun olduğu boşlukların alt ve üst kısımlarında sıklaştırılması yeterli olmaktadır.

5.4. GÖÇME YÜKÜ VE GÖÇME ŞEKLİ İLE İLGİLİ DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada göz önüne alınan her iki grupta da hemen hemen tüm kirişler aynı şekilde göçmektedir. Genellikle boşluğun yüke yakın olan ve momentin büyük olduğu kesiminde ortaya çıkan çatlaklar sonucunda göçme meydana gelmektedir. Birinci ve ikinci seri kirişlerde çatlaklar boşluklar arasındaki bölgelerde bir yayılma gösterse de genel olarak göçme şeklini yüke en yakın boşluk belirlemekte ve kiriş bu boşluk civarından göçmektedir. Doğal olarak büyük moment bölgesinde kalan ve boşluk boyutlarının küçük olduğu kirişlerde göçme daha ileri yük seviyelerinde gerçekleşmekte fakat göçme şekli diğer kirişlerle benzerlik göstermektedir. Yine gövde donatılarının etkisiyle ikinci grup kirişlerde bu bölgelerdeki çatlak oluşumu daha ileri yük seviyelerinde ortaya çıkmaya başlasa da göçme şekli her iki grup içinde aynı olmakta, kirişler boşluk köşelerinde oluşan plastik mafsallar neticesinde mekanizma durumuna geçerek göçmektedirler. Gövde boşluklarının kiriş ekseninin üstünde olması durumunda, boşlukların üstünde kalan bölgenin aksenal basınç kuvveti altında olmasından dolayı bu kısımlarda ezilme daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.

5.5. GENEL ÇATLAK DAVRANIŞI

İlk çatlaklar tüm kirişlerde boşluğun konumu, sayısı veya donatı durumuna bağlı olmaksızın kirişlerin çekme bölgelerinde oluşmakta ve daha ileri yük seviyelerinde yüke en yakın boşluklar arasında yoğunlaşmaktadır. Yük arttıkça çatlaklar kirişlerin basınç bölgelerine ve mesnet kesitine doğru bir yayılım göstermektedir. Birinci ve ikinci seri kirişlerde, eksenel basınca maruz kalan boşluk üstündeki bölgelerde çatlaklar, boşluk boyunun küçük olması nedeniyle hızlı bir şekilde yayılmakta fakat boşluk boyunun en büyük olduğu üçüncü seri kirişlerde üst kısmın orta yarısı göçme sırasında genellikle çatlamadan kalmaktadır.

5.6. YÜK-DEPLASMAN DAVRANIŞI

Bu çalışmada çözümü yapılan kirişlerin tümünde yük-deplasman eğrileri çizilmiştir. Genel olarak her bir eğrinin eğimi yük arttıkça azalmakta ve göçme yüküne yaklaşıldıkça yatay bir duruma gelmektedir. Maksimum deplasmanlar kirişlerin ortasında oluşmaktadır. Ancak momentin büyük olduğu kesimlerde yer alan boşlukların ucundaki deplasmanlarda hemen hemen kiriş ortasındaki deplasmanlara eşit değerler almaktadır. Kiriş deplasmanları üzerinde boşluk eksantrisitesinin etkisi, boşluk boyuna nazaran daha önemsiz kalmaktadır. Bütün kirişlerde deplasmanlar servis yükleri altında izin verilen sınırlar içerisinde kalmaktadır.

5.7. SON DEĞERLENDİRMELER

Gövde boşluklu betonarme kirişlerde taşıma gücünün, lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

* Boşluklar kiriş gövdesindeki gerilme akışını bozarak sistemin taşıma gücünü etkilemektedir.

* Büyük bir boşluk yerine aynı alana sahip çok sayıda boşluk bırakılan kirişlerin taşıma gücü diğerlerine nazaran daha yüksek olmaktadır.

* Kirişlerde taşıma gücü, boşluklar yükün etkidiği noktaya yaklaştıkça önemli ölçüde azalmaktadır.

* Gövdesinde birden fazla boşluk bulunan kirişlerde, momentin büyük olduğu kesite rastlayan gövde boşluğu, kiriş taşıma gücü üzerinde önemli bir rol oynamakta ve göçme yükünü bu gövde boşluğu belirlemektedir.

* Boşluk kenarlarının donatı ile takviye edilmesi halinde kiriş taşıma gücü artmaktadır.

* Gövde boşluklarının kirişin çekme bölgesine yakın olarak düzenlenmesi durumunda kiriş taşıma gücü, boşlukların kirişin basınç bölgesine yakın düzenlenmesi durumuna göre artmaktadır.

Bu çalışmada gözönüne alınan kirişlerde gövde boşluğunun yüksekliği, kiriş yüksekliğinin üçte biri oranında olmak üzere sabit tutulmuştur. Bu oran değiştirilmek suretiyle problem tekrar gözden geçirilebilir.

Ayrıca yükleme durumu değiştirilerek örneğin yayılı yük hali için problemi ele almak, kiriş davranışını bir de bu düzeyde incelemek yine ileride yapılacak çalışmalar için önerilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] KENT, D.C., PARK, R., "Flexural Members with Confined Concrete", Journal of Structural division, ASCE, Vol. 97, ST7, 1971.
- [2] SAENZ, L.P., "Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve for Concrete", ACI, Vol. 61, No. 9, 1964.
- [3] LIU, T.C., NILSON, A.H., SLATE, F.O., "Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression", ACI Journal Proceedings, Vol. 69, No. 5, 1972, pp. 291-295.
- [4] KUPFER, H., HILSDORF, H.K., RUSCH, H., "Behaviour of Concrete under Biaxial Stress", ACI Journal, Vol. 66, No. 8, 1969.
- [5] DARWIN, D., PECKNOLD, D.A. "Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM2, 1977, pp. 229-241.
- [6] ROMSTAD, K.M., TAYLOR, M.A., HERMANN, L.R., "Numerical Biaxial Characterization for Concrete", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM5, 1974, pp. 935-948
- [7] TASUJI, M.E., "The Behaviour of Plain Concrete subject to Biaxial Stress", Research Report No. 360, Dept. of Structural Engineering, Cornell Uni., New-York, 1976.
- [8] TASUJI, M.E., SLATE, F.O., NILSON, A.H., "Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loading", ACI Journal, Vol. 75, No. 7, 1978, pp. 306-312.
- [9] KUPFER, H., GERSTLE, K., "Behaviour of Concrete under Biaxial Stress", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 99, No. EM4, 1973, pp. 853-866.
- [10] LINK, J., SCHAFER, H., MEHLHORN, G., "Zweiachsiges Bruch- und Verformungsverhalten von Beton", Beton- und Stahlbetonbau, 9/1974, S. 207-214.
- [11] CHEN, A.C., CHEN, W.F., "Constitutive Relations for Concrete", Journal of The Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 101, No. EM4, 1975, pp. 465-481.

- [12] CEDOLIN, L., CRUTZEN, R.J., DEI POLI, S., "Triaxial Stress-Strain Relationship for concrete", Journal of The Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM3, 1977, pp.423-439.
- [13] OTTOSEN, N.S., "Constitutive Model for Short-time loading of Concrete", Journal of The Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.105, No.EM1, 1979, pp.127-141.
- [14] NGO, D., SCORDELIS, A.C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete beams", ACI Journal, Vol.64, No.3, 1967, pp.152-163.
- [15] SCORDELIS, A.C., NGO, D., FRANKLIN, H.A., "Finite Element Study of Reinforced Concrete Beams with Diagonal Tension Cracks", Proceedings, Symposium on Shear in Reinforced Concrete, ACI Publication SP-42, 1974.
- [16] NILSON, A.H., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by The Finite Element Method", ACI Journal, Vol.65, No.9, 1968, pp.757-766.
- [17] SUIDAN, M., SCHNOBRICH, W.C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete", Journal of The Structural Division, ASCE, Vol.99, No.ST10, 1973, pp.2109-2122.
- [18] CEDOLIN, L., DEI POLI, S., "Finite Element Studies of Shear-critical R/C Beams", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM3, 1977, pp.395-410.
- [19] DARWIN, D., PECKNOLD, D.A., "Analysis of RC Shear Panels under cyclic Loading", Journal of The Structural Division, ASCE, Vol.102, No.ST2, 1976, pp.2543-2563.
- [20] DARWIN, D., PECKNOLD, D.A., "Analysis of Cyclic Loading of Plane RC Structures", Computers and Structures, Vol.7, No.1, 1977, pp.137-147.
- [21] LINK, J., SCHAFER, H., MEHLORN, G., "Zur Wirklichkeitsnahen Berechnung von stahlbetonplatten Mit der Finite-Element Methode", Beton und Stahlbetonbau, Heft.11, 1975, pp.265-273.
- [22] BÜYÜKÖZTÜRK, O., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures", Computers and Structures, Vol.7, No.1, 1977, pp.149-156.

- [23] VECCHIO, F.J., COLLINS, M.P., "Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", ACI Journal proceedings, Vol.83, No.2, 1986, pp.219-231.
- [24] STEVENS, N.J., UZUMERI, S.M., COLLINS, M.P., WILL, G.T., "Constitutive Model for reinforced concrete Finite Element Analysis", ACI Structural Journal, Vol.88, No.1, 1991, pp.49-59.
- [25] NASSER, K.W., ACAVALOS, A., DANIEL, H.R., "Behaviour and Design of Large Openings in Reinforced Concrete Beams", ACI Journal proceedings Vol.64, No.1, 1967, pp.25-33.
- [26] MANSUR, M.A., LEE, S.L., "Behaviour and Design of Reinforced Concrete Beams with Large Openings under Combined Bending and Torsion", Proceedings Asian Regional Conference on Tall Buildings and Urban Habitat, The Institution of Engineers, Malaysia, 1982, pp.4.19-4.26.
- [27] MANSUR, M.A., PARAMASIVAM, P., "Reinforced Concrete Beams with Small Opening in Bending and Torsion", ACI Journal, Vol.81, No.2, 1984, pp.180-185.
- [28] MANSUR, M.A., TAN, K.H., LEE, S.L., "Collapse Loads of R/C Beams with Large Openings" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.110, No.11, 1984, pp.2602-2618.
- [29] MANSUR, M.A., TAN, K.H., LEE, S.L., "Design Method for Reinforced Concrete Beams with large openings" ACI Journal, Vol.82, No.4, 1985, pp.517-524.
- [30] HASNAT, A., AKHTARUZZAMAN, A.A., "Beams with Small Rectangular Opening under Torsion, Bending and Shear" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.113, No.10, 1987, pp.2253-2270.
- [31] MANSUR, M.A., TAN, K.H., LEE, Y.F., LEE, S.L., "Piecewise Linear Behaviour of RC Beams with Opening", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.117, No.6, 1991, pp.1607-1621.
- [32] MANSUR, M.A., LEE, Y.F., TAN, K.H., LEE, S.L., "Tests on RC Continuous Beams with Opening", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.117, No.6, 1991, pp.1593-1606.
- [33] İŞLER, Ö., "Öngerilmeli Beton Kirişlerde Kablo Kılıfı Nedeni ile Tabliyede Oluşan Enine Kesit Kaybının Taşıma Gücüne Etkisi", Doktora Tezi, İ.T.Ü.Mimarlık Fakültesi, 1978.

- [34] ÇAKIROĞLU, A., ÖZDEN, E., ÖZMEN, G., "Yapı Sistemlerinin Hesabı için Matris Metodları ve Elektronik Hesap Makinası Programları", Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, 1974, pp.283-284
- [35] BRESLER, B., BERTERO, V.V., "Influence of Load History on Cracking in Reinforced Concrete", S.E.S.M. Report, University of California, Berkeley, 1966.
- [36] YANKELEVSKY, D.Z., "New Finite Element for Bond Slip Analysis", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.7, 1985, pp.1533-1542.
- [37] PHILLIPS, D.V., ZIENKIEWICZ, O.C., "Finite Element Non-Linear Analysis of Concrete Structures", Proceedings of The Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol 61, Mar., 1976, pp.59-88.
- [38] ARGYRIS, J.H., FAUST, G., WILLIAM, K., "Limit Load Analysis of Thick-Walled Concrete Structures, A Finite Element Approach to Fracture", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.8, 1976, pp.215-243.



EK A

Tablo A.1. İki Eksenli Yükler Altında Betonun
Gerilme-Deformasyon Eğrilerinin
Analitik İfadeleri

$[-\sigma_2 / \beta]$	$[\sigma_1 / \sigma_2] (=X)$	$\%0[-\varepsilon_2] (=y)$
0.10	$X \leq 1.0$	$y = 0.0875$
0.20	$X \leq 1.0$	$y = 0.1750$
0.30	$X \leq 1.0$	$y = 0.2700$
0.40	$X < 0$	$y = 0.35 + 3.75x^2$
0.40	$0 < X \leq 1.0$	$y = 0.35 - 0.02(x-1.0)$
0.50	$X \leq 0.10$	$y = 0.44 + 3.75x^2$
0.50	$0.10 < X \leq 1.0$	$y = 0.44 - 0.02(x-1.0)$
0.60	$X \leq 0.20$	$y = 0.56 + 2.83(x-0.2)^2$
0.60	$0.20 < X \leq 1.0$	$y = 0.56 - 0.025(x-1.0)$
0.70	$X \leq 0.20$	$y = 0.70 + 2.83(x-0.2)^2$
0.70	$0.20 < X \leq 1.0$	$y = 0.70 - 0.025(x-1.0)$
0.80	$X \leq 0.30$	$y = 0.85 + 3.12(x-0.3)^2$
0.80	$0.30 < X \leq 1.0$	$y = 0.85 - 0.043(x-1.0)$
0.90	$X \leq 0.30$	$y = 1.10 + 3.12(x-0.3)^2$
0.90	$0.30 < X \leq 1.0$	$y = 1.10 - 0.043(x-1.0)$
1.00	$X \leq 0.52$	$y = 2.20 - 1.06x^{(1/2)}$
1.00	$0.52 < X \leq 1.0$	$y = 1.35 - 0.04(x-1.0)$
1.10	$X \leq 0.52$	$y = 1.80 + 7.75(x-0.52)^2$
1.10	$0.52 < X \leq 1.0$	$y = 1.8 - 0.04(x-1.0)$
1.20	$X \leq 0.30$	$y = 2.78$
1.20	$0.30 < X \leq 1.0$	$y = 2.10 + 1.44(x-1.0)^2$

Tablo A.2. Betonun Ortotropik Özelliğini Veren
Eğrilerin Analitik İfadeleri

$[-\sigma_2/\beta]$	$[\sigma_1/\sigma_2] (=X)$	$\nu_2/\nu_1=E_2/E_1 (=y)$
$0 \leq -\sigma_2/\beta \leq 1.3$	$0.30 \leq \sigma_1/\sigma_2 \leq 1.0$	$y = 1.0$
0.20	$X \leq 0.30$	$y = 1.0$
0.30	$X \leq 0.10$	$y = 1.0 + 2.22(x-0.10)^2$
0.30	$0.10 < x \leq 0.30$	$y = 1.0$
0.40	$X \leq 0.10$	$y = 1.0 + 4.44(x-0.10)^2$
0.40	$0.10 < x \leq 0.30$	$y = 1.0$
0.50	$X \leq 0.10$	$y = 1.0 + 5.97(x-0.10)^2$
0.50	$0.10 < x \leq 0.30$	$y = 1.0$
0.60	$X \leq 0.10$	$y = 1.0 + 7.50(x-0.10)^2$
0.60	$0.10 < x \leq 0.30$	$y = 1.0$
0.70	$X \leq 0.10$	$y = 1.0 + 12.64(x-0.10)^2$
0.70	$0.10 < x \leq 0.30$	$y = 1.0$
0.80	$X \leq 0.10$	$y = 1.0 + 27.78(x-0.10)^2$
0.80	$0.10 < x \leq 0.30$	$y = 1.0$
0.90	$x \leq 0.30$	$y = 1.0 + 22.22(x-0.20)^2$
0.90	$0.20 < x \leq 0.30$	$y = 1.0$
1.00	$x \leq 0.30$	$y = 1.0 + 22.22(x-0.30)^2$
1.10	$x \leq 0.30$	$y = 1.0 + 41.50(x-0.30)^2$
1.20	$x \leq 0.30$	$y = 1.0 + 91.30(x-0.30)^2$

Tablo A.3. Betonun Göçme Durumunu Veren
Eğrilerin Analitik İfadeleri

EĞRİLER	$x = [\sigma_2 / \beta]$	$y = [\sigma_1 / \beta]$
AB	$(0.00) < X < (0.10)$	$y = 0.10$
BC	$(-0.80) < X < (0.00)$	$y = 0.05x + 0.10$
CD	$(-1.00) < X < (-0.80)$	$y = 0.30(x + 1.00)$
DE	$(-1.27) < X < (-1.00)$	$y = [- 3.16 x^2 - 5.08 x - 1.358]^{(1/2)} - 0.76$
EF	$(-1.27) < X < (-0.76)$	$y = - [- x^2 - 1.52 x - 0.317]^{(1/2)} - 0.76$
FG	$(-0.76) < X < (0.00)$	$y = - [- 0.315 x^2 - .48 x + 0.04]^{(1/2)} - 0.80$
GH	$(0.00) < X < (0.06)$	$y = 10.0 x / 3 - 1.0$
HI	$(0.06) < X < (0.10)$	$y = 20.0 (x - 0.10)$
IA	$X = (0.10)$	$(0.00) < y < (0.10)$

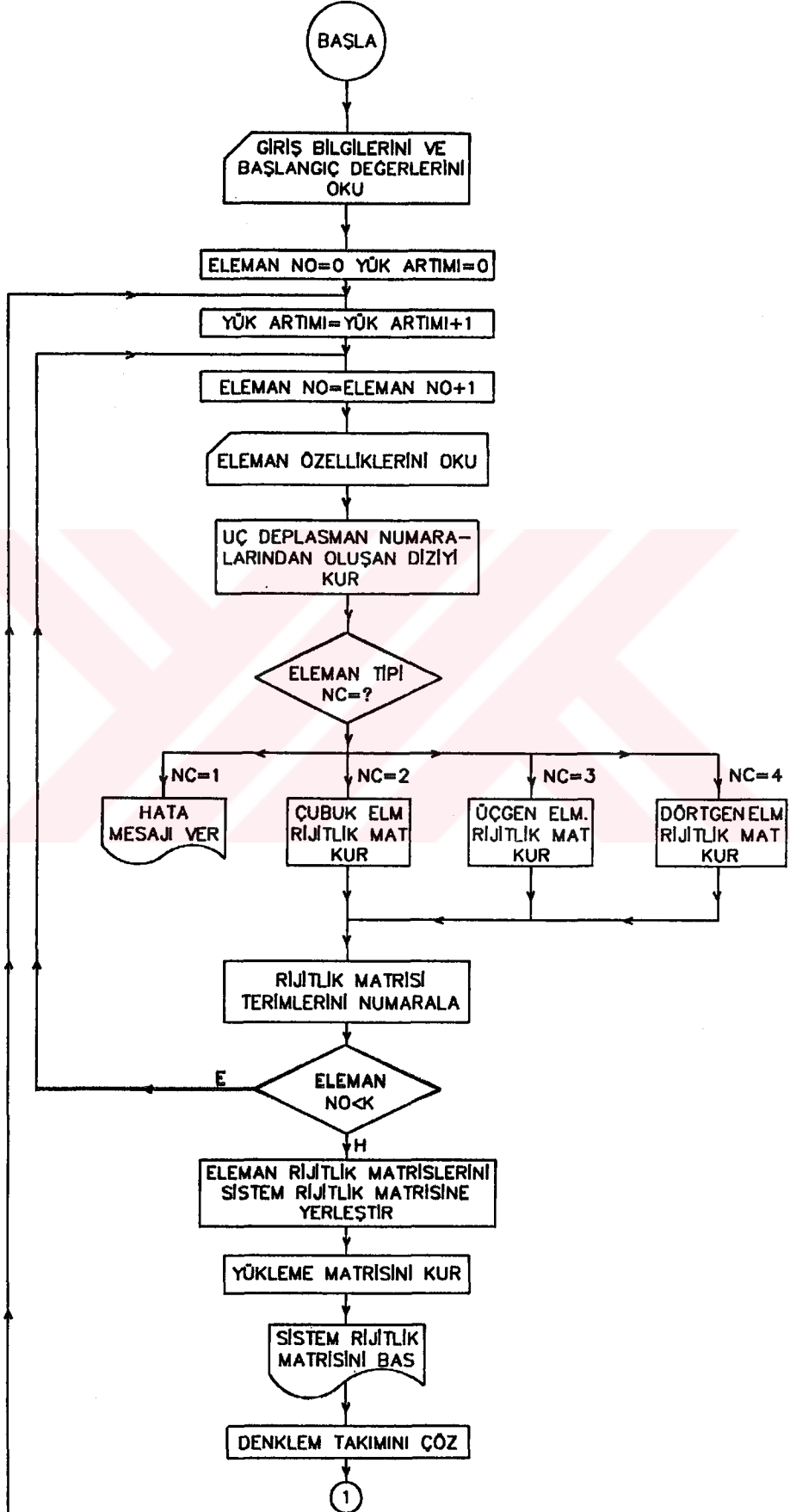
$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2 \nu_2^2} \frac{1}{\begin{bmatrix} 1 + 2\nu_1^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \\ 2 - \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} - \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \\ -1 + \nu_1^2 - \nu_2^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + 2\nu_1^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \\ 2 - \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} - \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \\ -1 + \nu_1^2 - \nu_2^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \\ \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \\ \sin \alpha \cos^3 \alpha \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \nu_2^2 \left[1 + 2\nu_1^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \right] - \left[2 - \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} - \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \right] \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \\ \left[1 + 2\nu_1^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \right] \left[\frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \sin^2 \alpha + \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \cos^2 \alpha \right] \\ \left[1 + \nu_1^2 - \nu_2^2 - \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \right] \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -1 + \nu_1^2 - \nu_2^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \\ 1 + \nu_1^2 - \nu_2^2 - \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \\ -1 + \nu_1^2 - \nu_2^2 + \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos^3 \alpha \\ \sin^3 \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos^3 \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 - \nu_1^2 \nu_2^2 \\ 2 - \frac{\nu_1^2}{\nu_2^2} - \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2} \end{bmatrix} \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ 2\epsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

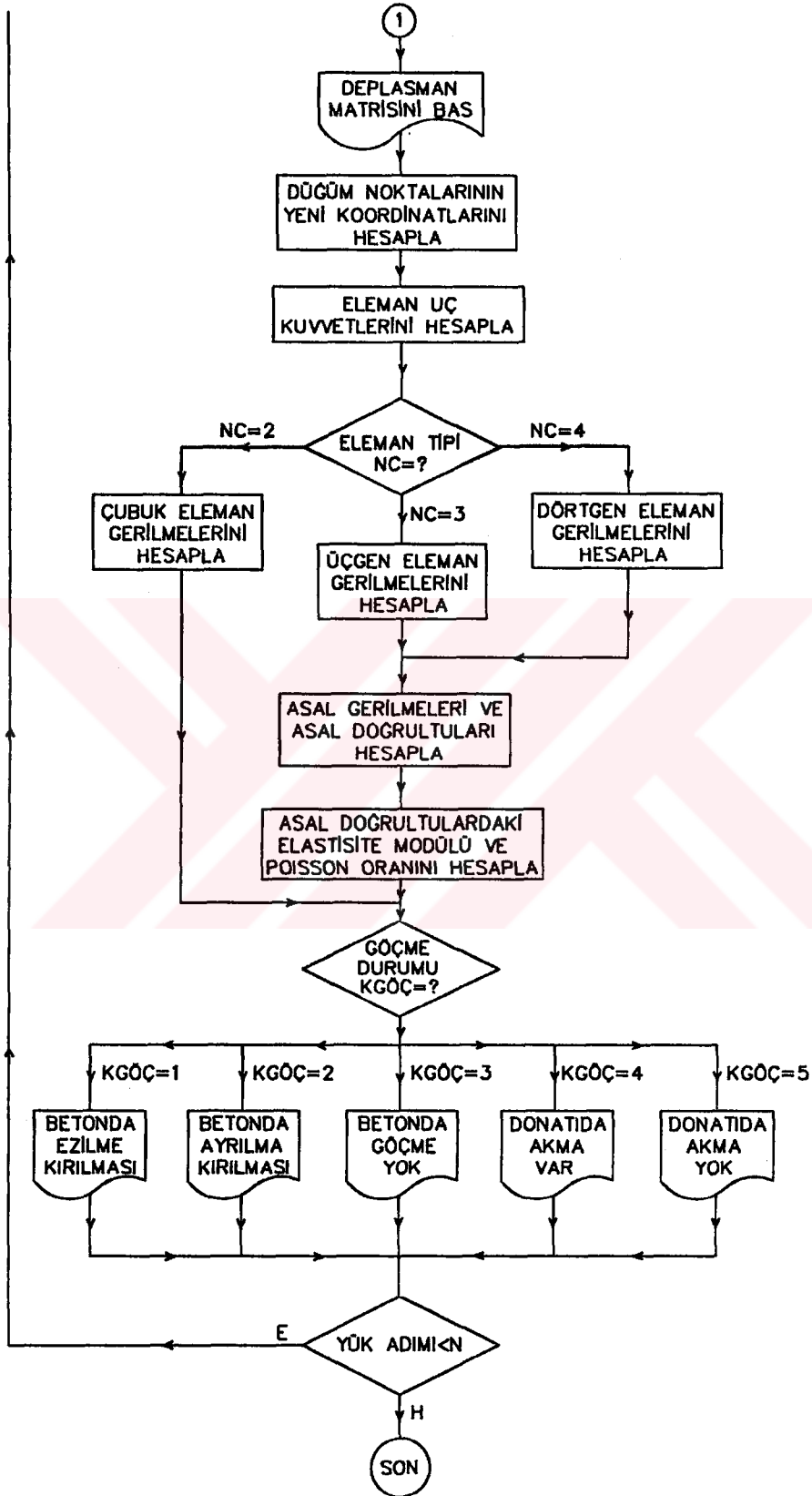
Şekil A.1. Düzlem Gerilme Durumu için Link'in Gerilme-Deformasyon Matrisi



EK B

ANA PROGRAM AKIŞ DİYAGRAMI





ÖZGEÇMİŞ

Necdet Torunbalcı, 1962 yılında İstanbul'da doğdu. Orta öğreniminden sonra 1980 yılında girdiği Y.T.Ü Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 1984 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği programında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 1986 yılında İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi, Yapı Statiği ve Betonarme Birimine Araştırma Görevlisi olarak girdi. 1987 yılında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı ve aynı yıl Yedek Subay olarak Deniz Harp Okuluna atandı. 1989 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Mühendisliği programında Doktora öğrenimine başladı. Halen adı geçen birimde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.