

YAPI ELEMANLARININ ANALİZİNDE ŞERİT-LEVHA VE KAFES SİSTEM BENZEŞİMİ MODELİ**M. Yaşar KALTAKCI*, Günnur YAVUZ***Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Kampus-KONYA***Geliş /Received: 25.08.2003 Kabul/Accepted: 03.03.2004****THE STRINGER-PANEL MODEL AND STRUT-AND-TIE MODEL IN THE ANALYSIS OF STRUCTURAL MEMBERS****ÖZET**

Bu çalışmada, doğrusal sonlu elemanlar yöntemi ile kafes sistem benzeşimi (strut-and-tie) yöntemi arasında yer alan şerit-levha yöntemi ağırlıklı olarak, kafes sistem benzeşimi yöntemi özet olarak tanıtılmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu yöntem şöyle açıklanabilir: "Çekme donatısı elemanın kenarları civarındaki bir veya daha fazla yoğunlaşmış çekme şeridinden; dağıtma donatısı ise, plak üzerinde ortogonal yönde yerleştirilmiş donatıdan ibarettir." Bu modelde, çekme donatısını içine alan beton blok, şerit olarak; dağıtma donatısını içeren plak ise, levha olarak adlandırılmaktadır. Bu yaklaşım, denge ve şekil değiştirmeler için uygunluk şartlarını dikkate almaktadır.

Anahtar Sözcükler: Şerit-levha modeli, Kafes sistem benzeşim modeli, Kısa konsol, Doğrusal model, Doğrusal olmayan model

ABSTRACT

In this study, the stringer panel model which lies between linear finite element method and the strut-and-tie method and the strut-and-tie method is introduced and comparisons about these methods were made. This method can be explained in this manner: "Tension reinforcement consists of one or more concentrated tension bands near the surfaces of the member, and distributed reinforcement consists of reinforcement which is orthogonally oriented on the plate." In this model, the concrete block which contains tension reinforcement is called the stringer, the plate which contains distributed reinforcement is called the panel. This approximation takes into account equilibrium and compatibility conditions for deformations.

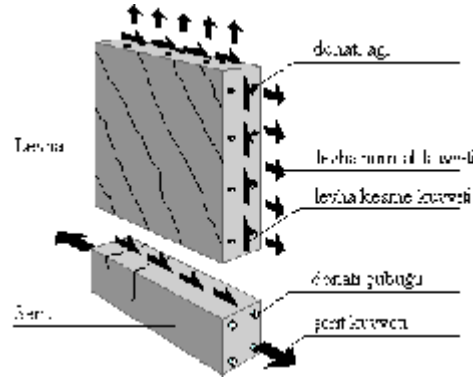
Keywords: Stringer-panel model, Strut-and-tie model, corbel, Linear model, Nonlinear model

1. GİRİŞ

Şerit-levha modeli, betonarme taşıyıcı duvarların tasarımı için geliştirilmiş bir tasarım yöntemidir. Kendi düzleminde yüklü bir eleman şerit ve levha elemanlarından oluşan bir denge sistemiyle modellenmiştir. Şerit elemanlar normal kuvvetleri, levha elemanlar ise doğrusal modelde kesme kuvvetlerini, doğrusal olmayan modelde ise hem kesme kuvvetlerini hem de normal kuvvetleri taşımaktadır (Şekil 1). Bu nedenle, yeni gerilme dağılımında şerit elemanlarındaki gerilmelerde

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: e-mail: mykal@selcuk.edu.tr ; tel: (0332) 223 1997

azalma olmaktadır. Şerit ve levha elemanlarının arayüzeyinde sabit kesme kuvveti mevcuttur. Şerit elemanları esas çekme donatısını ve basınç etkisindeki beton bloğunu, levhalar ise kesme etkisindeki beton bloğunu ve bu bloğun içindeki dağıtma donatısını temsil etmektedir. Şerit-levha modeli kavramı şu gözleme dayanılarak ortaya atılmıştır: Etkili duvar donatısı genellikle kenarlara yakın yerleştirilmiş yoğunlaşmış çekme bantlarından ve yüzeye dağılmış dağıtma donatısından ibarettir. Dağıtma donatısı yapım kolaylığı açısından genellikle ortogonal iki yönde yerleştirilmektedir. Şerit-levha modeli bu donatı düzenine uymakta ve böylece yapı bir ayrık eleman modeline dönüşmektedir [1].



Şekil 1. Betonarme duvar üzerinde şerit ve levha elemanları

2. ŞERİT-LEVHA MODELİ

Karmaşık gerilme dağılımının bulunduğu yapı elemanlarında yükler ve mesnet reaksiyonları yapının düzleminde kuvvet akımının meydana gelişini temsil eden etki çizgilerine sahiptir. Yüksek kirişler, perde duvarlar, ani kesit değişikliğine sahip kesitler, kısa konsollar gibi yapı elemanları bu yaklaşım dikkate alınarak incelenebilir. Bu tür karmaşık gerilme yörüngelerine sahip bölgelerde Bernoulli Navier hipotezi geçerli değildir [2]. Böyle elemanları çözmek için pratikte iki önemli yöntem mevcuttur. Bunlar kafes sistem benzeşimi yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemidir. Şerit-levha yöntemi ise, bu iki yöntemin üstünlüklerinden faydalanıp, sakıncalarını ortadan kaldıracak biçimde geliştirilmiştir.

Kafes sistem benzeşimi yöntemi betonarme yapıların tasarımı ve boyutlandırılmasında geniş kullanım alanı olan ve genelleştirilmiş kafes kiriş benzeşimi olarak da bilinen bir yaklaşımdır. Bu model yaklaşımı kolay ve gerçekçi olmakla birlikte, kuvvetlerin yapı içinde izlediği yol dikkatle düşünülmeli ve yük ile mesnet arasındaki kuvvet aktarım yolunu doğru olarak gösterecek bir denge sistemi seçilmelidir. Kafes sistem benzeşimi yöntemi, esas olarak plastisite teorisine dayandığı için yapının yeterli sünekliğe sahip olup olmadığı hakkında şüphelerin mevcut olması ve kuvvet akımının dikkate alınabileceği birkaç model içinden hangisinin en iyisi olduğunu belirlenmesi gerektiğinden bu yöntemle ilgili deneysel çalışmalar halen devam etmektedir [3]. Şerit-levha modeli ile kafes sistem benzeşimi modeli karşılaştırıldığında yeni modelin şu üstünlükleri vardır:

- Boşluklu büyük taşıyıcı duvarların kafes sistem benzeşimi modeli, şerit-levha modelinden daha karmaşıktır.
- Bütün yük kombinasyonları için sadece bir model belirlemek yeterli olmaktadır.
- Şerit ve levha elemanlarının oluşturulmasında çok az seçenek olduğu için basınç ve çekme elemanlarının en gerçekçi ve doğru eğimini belirlemede yapıldığı gibi fazla çaba harcamaya gerek yoktur.

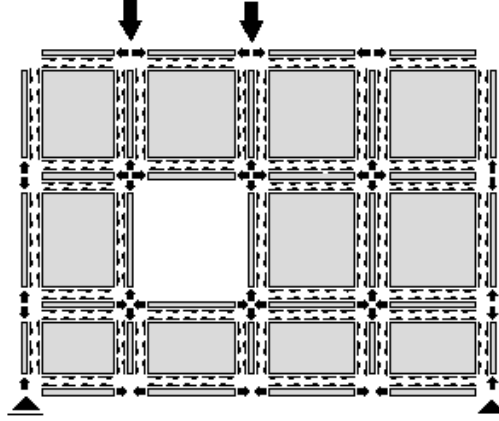
Yapı Elemanlarının Analizinde Şerit-Levha ve Kafes...

Sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırıldığında ise aşağıdaki üstünlükleri görülmektedir:

- Bu modelle, doğrusal sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan miktardan daha az donatı miktarı hesaplanmaktadır. Çünkü doğrusal sonlu elemanlar modeli ile donatı hesaplarken büyük kuvvet kolu kullanılmaktadır.
- Bu model, normal bir PC yardımıyla hesaplanabilmektedir.
- Tasarımcı için, sonlu elemanlar paket programındaki gibi özel bir eğitime gerek yoktur.

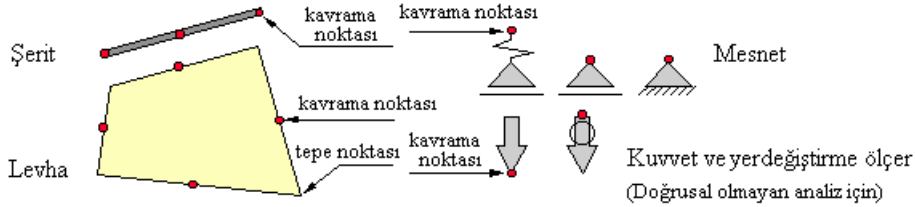
3. ŞERİT-LEVHA MODELİNİN BİLEŞENLERİ

Şekil 2’de tekil yük etkisi altındaki boşluklu bir yüksek kirişte oluşturulan şerit-levha modeli görülmektedir [4]. Burada, şerit ve levha elemanları arasında mükemmel bir denge vardır. Model, donatıların yerleşimi bakımından kafes sistem benzeşimi yöntemine benzemektedir. Şerit ve levha elemanları düğümlerle birbirlerine bağlandıkları için, model, şekil değiştirme uygunluk şartlarını (bütün ortak yerdeğiştirmelerin eşitliği) da dikkate almaktadır.



Şekil 2. Boşluklu bir yüksek kirişte oluşturulan şerit-levha modeli

Bir levha elemanı, komşu şerit elemanlarını birbirine bağlayabilen 4 adet düğüm noktasına; bir şerit elemanı ise, diğer şerit, levha, mesnet veya kuvvetleri bağlayabilen 3 adet düğüm noktasına sahiptir (Şekil 3).

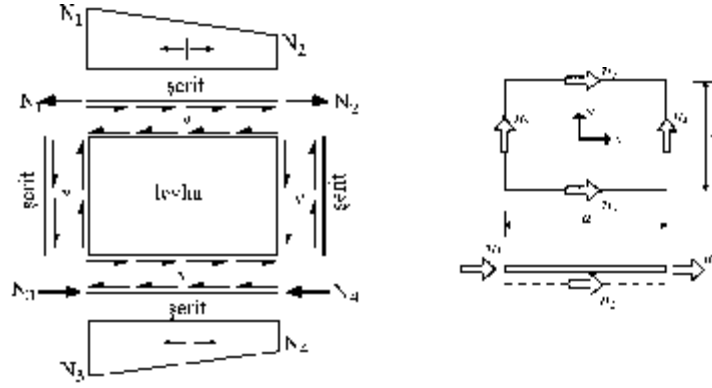


Şekil 3. Şerit-levha modelinin bileşenleri [4]

Şerit-levha modeli, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz için kullanılabilir. Doğrusal modelde, şerit elemanları bütün normal gerilmeleri, levhalar ise kenarlarda sadece kesme gerilmelerini taşımaktadır. Model elemanlarının malzeme davranışı doğrusal elastiktir. Hiçbir normal kuvvet levhalar vasıtasıyla taşınmaz. Kesme kuvveti levhalardan şerit elemanlarına aktarılmaktadır ve böylece şerit elemanlarında doğrusal değişimli

normal kuvvet etkisi meydana getirmektedir. Şerit elemanının serbestlik dereceleri, elemanını iki ucundaki aksenal yer değiştirmelerdir. Buradaki ilave aksenal serbestlik derecesine, kesme levhası ve şerit arasındaki ara yüzey kuvveti eklenmektedir. Normal kuvvet için 2 parametreyle birleştirilen ve 2 genelleştirilmiş şekil değiştirme ile sonuçlanan bir rijit cisim yer değiştirmesine sahip şerit elemanında istenilen doğrusal kuvvet dağılımının elde edilmesi için 3 serbestlik derecesi gereklidir [3].

Doğrusal olmayan modelde, duvar(levha) davranışının doğru olarak tanımlanabilmesi için sadece kesme gerilmelerinin yeterli olmadığı kanıtlanmıştır.



Şekil 4. Şerit ve levha elemanları üzerindeki kuvvetler ve elemanların serbestlik dereceleri [3]

Bundan dolayı, doğrusal olmayan analizde, levhalar hem kesme gerilmelerini hem de normal gerilmeleri taşımaktadır. Malzeme davranışı için değiştirilmiş basınç alan teorisi(MCFT) kullanılmaktadır. Buna göre, membran gerilmeleri için beton çatlayabilir ve ezilebilir, donatı ise akabilir ve daha sonra kopabilir. Daha gerçekçi olan bu versiyon, betonun çatlamaya başladıktan sonra kuvvet dağılımının bu etkiyle önemli derecede artması ve elemandaki genişlemenin dikkate alınması için levha elemanının kenarlarına dik serbestlik derecelerinin olması gerekliliği ile dağıtma donatısının sadece kesme dayanımına değil aynı zamanda malzemenin normal kuvvet dayanımına da katkı yapması nedenlerinden dolayı geliştirilmiştir. Bu dayanımı dikkate almanın en etkili yolu, levha kenarlarında normal kuvvetleri de hesaba katmaktır. Buna göre bir şerit elemanı üzerindeki gerilme dağılımı, uzunluğu boyunca doğrusaldır [1].

4. ŞERİT-LEVHA MODELİNİN BELİRLENMESİ

Şerit-levha modelinde, normal kuvvet yatay ve dikey şerit elemanları tarafından karşılanmakta olup; bunlar arasındaki dikdörtgen alanlar ise kesme kuvvetlerinin aktarılması için levha elemanlarıyla doldurulmaktadır. Şerit elemanları, donatıların olduğu bölgelerde, mesnetler üzerinde, tekil yüklerin altında ve boşluklar civarında oluşturulmaktadır. Bu tanımlamaya göre şerit-levha modelindeki donatı düzeni kafes sistem benzeşimi modelindeki donatı yerleşimiyle benzerlik göstermektedir. Modele göre betonarme yapı elemanları için tasarım yöntemi aşağıdaki adımları takip etmektedir:

1. Tecrübe ve önsözler kullanılarak şekil ve boyutlar seçilir.
2. Bütün yük durumları ve yük kombinasyonları belirlenir.
3. Bütün yük kombinasyonları için bir doğrusal analiz gerçekleştirilir.
4. Donatı seçilir ve şerit elemanlarının boyutları belirlenir.
5. Şerit donatısının akmadığı kabul edilerek her yük kombinasyonu için bir doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilir.

Yapı Elemanlarının Analizinde Şerit-Levha ve Kafes...

6. Donatı, elde edilen gerilme durumuna göre yeniden düzenlenir.
7. Tasarımın kontrolü için gerçek malzeme davranışıyla ve en etkili yük kombinasyonu ile analiz yapılır (simülasyon).
8. Donatı detaylandırılır.

5. ŞERİT VE LEVHA ELEMANLARININ DAYANIKLILIK ŞARTI

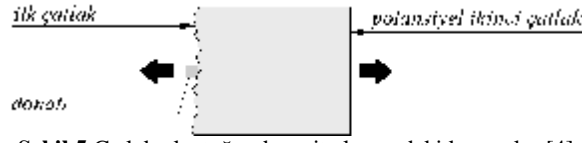
Şerit-levha modelinde doğrusal olmayan analizi gerçekleştirmek için şu kabuller yapılmıştır:

5.1. Şerit Elemanı

Bir şerit elemanında, ilk çatlakta donatıdaki kuvvet, ikinci bir çatlak ortaya çıkaracak kuvvetten daha büyük olmalıdır (Şekil 5).

$$A_s f_y > A_c f_{cr} + A_s s_s \quad (1)$$

Burada, f_y çeliğin akma gerilmesi, s_s potansiyel ikinci çatlaktaki donatıda oluşan gerilme ve f_{cr} betonun çatlama dayanımıdır. A_s ve A_c sırasıyla donatı ve net beton kesit alanıdır.



Şekil 5. Çatlak oluştuğunda şerit elemandaki kuvvetler [4]

İkinci çatlak ortaya çıkmadan önce, donatıdaki e_s şekil değiştirmesi, betondaki e_c şekil değiştirmesine yaklaşık eşit kabul edilebilir:

$$e_s = e_c \quad (2)$$

Bundan dolayı, çatlamanın başlangıcında

$$\frac{s_s}{E_s} = \frac{f_{cr}}{E_c} \quad (3)$$

dir. Burada E_s ve E_c sırasıyla donatı ve betonun elastisite modülüdür. Bu bağıntı aşağıdaki eşitsizlikte yerine konduğunda, minimum donatı oranı kolaylıkla belirlenir.

$$r = \frac{A_s}{A} > \frac{E_c f_{cr}}{E_c (f_y + f_{cr}) - E_s f_{cr}} = r_{\min} \quad (4)$$

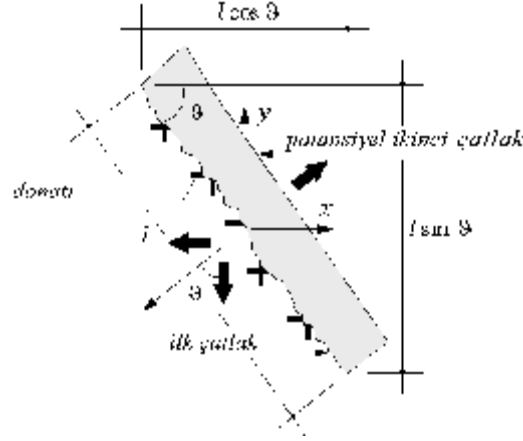
Uygulamada genellikle $r_{\min} \approx \frac{f_{cr}}{f_y}$ olarak alınmakta ve bu değer gerçek değerden yaklaşık olarak %3 kadar küçük olmaktadır.

5.2. Levha Elemanı

Bir levha elemanında, ilk çatlakta donatıdaki kuvvet, ikinci bir çatlak ortaya çıkaracak kuvvetten daha büyük olmalıdır (Şekil 6). Burada x ve y yönlerinde bir ρ donatı oranı kabul edilmekte ve dengeleme çatlakla dik olarak dikkate alınmaktadır.

$$A_{sx} f_y \sin q + A_{sy} f_y \cos q > A_c f_{cr} + A_{sx} s_{sx} \sin q + A_{sy} s_{sy} \cos q \quad (5)$$

Burada $A_{sx} = r / \sin q.t$, x yönündeki donatı alanı; $A_{sy} = r / \cos q.t$, y yönündeki donatı alanı ve $A_c = (1-r).l.t$ çatlaktaki beton alanıdır. Çatlak uzunluğu l ve duvar kalınlığı t 'dir. Bu formüller denge bağıntılarında yerine konulduğunda aşağıdaki sonuçlar bulunmaktadır:

$$r.f_y > (1-r)f_{cr} + r(s_{sx} \sin^2 q + s_{sy} \cos^2 q) \quad (6)$$


Şekil 6. Çatlak oluştuğunda levha elemanındaki kuvvetler [4]

Sadece çatlama öncesi, çelikteki şekil değiştirme betondaki şekil değiştirmeye eşittir.

$$r.f_y > (1-r)f_{cr} + rE_s(e_{sx} \sin^2 q + e_{sy} \cos^2 q) \quad (7)$$

En büyük asal şekil değiştirme e_1 , e_{xx} ve e_{yy} 'nin her ikisinden de daha büyük olduğu için, yukarıdaki bağıntı şöyle yazılabilir.

$$r.f_y > (1-r)f_{cr} + rE_s e_1 \quad (8)$$

Sadece çatlama öncesi bu şekil değiştirme değeri aşağıdaki gibidir.

$$e_1 = e_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_c} \quad (9)$$

Bu formülle eşitsizlik aşağıdaki şekilde sadeleştirilebilir.

$$r > \frac{E_c f_{cr}}{E_c (f_y + f_{cr}) - E_s f_{cr}} \quad (10)$$

Bu sonuç, şerit elemanı için bulunan sonuçla uygunluk göstermektedir. Çatlak genişliklerinin kontrol edilmesi için, betonun çekme etkisi altında olduğu yerde minimum donatı kullanılmalıdır. Pratikte kullanılan şartnamelerde bu bölgelerde de minimum donatı kullanılması tavsiye edilmektedir.

6. KAFES SİSTEM BENZEŞİMİ (STRUT-AND-TIE) MODELİ

Kafes kiriş modelleri, günümüzde, eğilme, kesme ve burulma etkisi altındaki çatlama betonarme kesitler için akılcı ve uygun bir yöntem olarak düşünülmektedir. Kafes sistem benzeşimi modeli yapıda, statik veya geometrik süreksizliklerin bulunduğu, tekil yükler, çerçeve köşeleri, kısa konsollar, ani kesit değişikliğinin olduğu bölgeler, boşluklar, delikler gibi gerilme yığılmasının ve karışık gerilme dağılımının meydana geldiği "D" bölgelerindeki iç kuvvet dağılımını dikkate

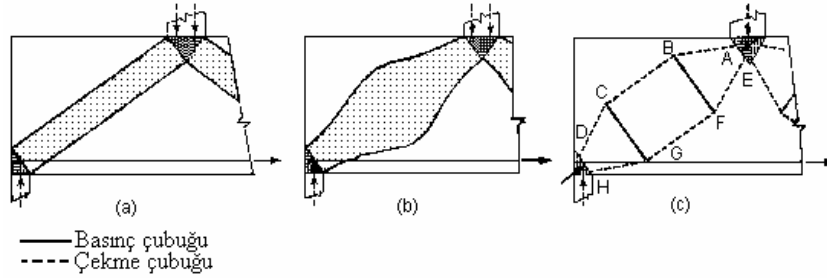
almaktadır. Kuvvet dağılımının düzgün olduğu bölgelere B bölgeleri denilmektedir (Saint Vénant prensibi). Bireysel B ve D bölgelerindeki çekme gerilmeleri, betonun çekme dayanımını aşarsa, bu bölgelerdeki iç kuvvetler aşağıdaki yöntemle göre belirlenir ve hesaplanır:

1. Kafes sistem benzeşimi modeli elastik gerilmelere göre belirlenir. Basınç ve çekme çubukları, bileşke gerilme alanlarını temsil eden düz çizgiler olarak gösterilmekte olup, gerilme alanlarının yani eğrilerin yoğunlaştığı bölgeler düğümleri belirlemektedir.
2. Dengeyi sağlayan basınç ve çekme kuvvetleri hesaplanır, bunlar iç kuvvetlerdir.
3. Çatlak genişliği sınırları ve iç kuvvetlere göre model elemanları boyutlandırılır.
4. Sonuçta birkaç model ortaya çıkacağından en uygun çözüm için en küçük yerdeğişiklikler ve model çubuklarına sahip olan çözüm seçilir.

7. KAFES SİSTEM BENZEŞİMİ (STRUT-AND-TIE) MODELİNİN BİLEŞENLERİ

Kafes sistem benzeşimi modelinde, basınç çubukları, bu çubuğun doğrultusunda basıncın hakim olduğu beton gerilme alanlarını temsil etmektedir. Buna uygun olarak normalde çekme çubukları, bir veya birkaç tabaka çekme donatısını göstermektedir. Bununla birlikte, modelin çekme çubukları, bazen beton çekme gerilmesi alanları anlamına da gelmektedir. Bu durum, donatının kolaylıkla yerleştirilemediği bölgelerde kullanılabilir. Buna örnek olarak, etriyesiz levhalar, spiral veya enine yönde donatısız çubuk ankrajları gösterilebilir. Modelin geometrisinin, elastik gerilme dağılımına göre belirlenmesi, aynı zamanda bir güvenlik gereksinimidir; çünkü betonun çekme dayanımı basınç dayanımına göre çok küçüktür.

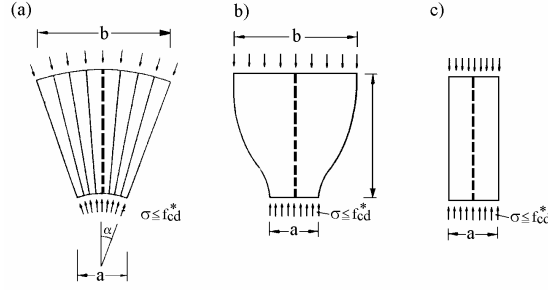
Basınç çubukları, çoğunlukla prizmatik veya düzgün şekilli daralan elemanlar olarak idealize edilmektedir. Bu elemanlar çoğunlukla, uzunlukları boyunca kesitlerinde değişiklik göstermektedirler. Çubuğun yarı uzunluğundaki boyutu, uçlarındakinden daha geniştir (Şekil 7). Genişliği değişen strut/basınç çubukları, bazen, Şekil 7.b'de gösterildiği gibi şişe şekilli olup, Şekil 7.c'deki gibi "bölgesel kafes giriş modelleri" kullanılarak idealize edilmektedir [5].



Şekil 7. Basınç çubukları

Bütün basınç gerilmesi alanları tiplerini içine almak için, üç farklı durum yeterli olmaktadır [6].

- a. Yelpeze şekilli gerilme alanları (Şekil 8.a), ihmal edilebilir eğrilikleri olan bir gerilme alanı idealizasyonudur. Burada enine gerilmeler meydana gelmez.
- b. Şişe şekilli gerilme alanı (Şekil 8.b), genişleyen gerilme yörüngelerine sahiptir ve önemli miktarda enine gerilmeler meydana getirir. Bu gerilmeler, şişe boğazı kısmında basınç ve daha ileride çekme gerilmelerinin davranışa etkin olduğu bölgelerdir. Enine çekme, boyuna çatlaklara sebep olabilir ve erken kırılmayı başlatabilir. Bundan dolayı, gerilme alanı, enine doğrultuda donatılmalı veya çubuğun kırılma yükü belirlenirken enine çekme dikkate alınmalıdır.
- c. Prizmatik veya paralel gerilme alanı (Şekil 8.c), önceki iki gerilme alanının sıklıkla kullanılan özel bir halidir.



Şekil 8. Temel basınç alanları

Bütün gerilme alanları türlerinin pratik olarak boyutlandırılması için, aşağıdaki basitleştirilmiş dizayn dayanım değerleri f_{cd}^* önerilmektedir ([2] ve [6]):

$$f_{cd}^* = 1.0 \times f_{cd} \Rightarrow \text{Karışık olmayan ve tek eksenli gerilme durumu için,}$$

$$f_{cd}^* = 0.8 \times f_{cd} \Rightarrow \text{Basınç gerilmelerine paralel çatlakları olan basınç gerilmesi alanları için,}$$

$$f_{cd}^* = 0.6 \times f_{cd} \Rightarrow \text{Büyük çatlakları olan basınç gerilmesi alanları için,}$$

$$f_{cd}^* = 0.4 \times f_{cd} \Rightarrow \text{Olağanüstü çatlakları olan bölgeler için (Sadece [2]'de önerilmiştir).}$$

Burada f_{cd} şartnamelere uygun olarak, tek eksenli basınç için beton basınç hesap dayanımını göstermektedir. Bu değer karakteristik basınç dayanımının belirli bir emniyet katsayısına bölünmesiyle bulunmuştur.

Kafes sistem benzeşimi modelinin ikinci asal bileşeni çekme çubuklarıdır. Bu çubuklar 2 düğüm arasındaki doğrusal veya bir boyutlu elemanlardır. Bu elemanlar aynı doğrultuda $A_s f_y \geq T_n$ şartıyla hesaplanmış bir veya birkaç donatı sırasını temsil etmektedir.

Düğüm bölgeleri, kuvvetlerin yönünün ani olarak değiştiği bölgeler olarak belirlenebilir. Betonarme bir yapıda kuvvetin yönündeki bu değişim, genellikle belirli bir uzunluk ve genişlikte meydana gelmektedir [2]. Kafes sistem benzeşimi modeli, bir boyutlu gerilme alanlarını gösteren çubuklardan oluşmaktadır. Bu elemanların birleşim bölgesi olan düğümler ise taşıma kapasitesinin kontrol edilmesinin gerektiği “iki-boyutlu” gerilme alanlarından oluşmaktadır. Düğümler, basınç ve çekme elemanlarının temsil ettiği gerilme alanlarının kesişimi ve yük uygulanan bölgenin uzunluğuyla sınırlanır [7]. Düğüm bölgeleri belirlenirken şu hususlara dikkat edilmesi gerekir:

- Düğümde birleşen basınç kuvvetleri ve donatıdaki çekme kuvveti birbirini dengeleyebilmeli ve şekil değiştirmeleri kabul edilebilir sınırlarda olmalıdır. Bundan dolayı, düğümlerde ankrajı yapılan donatı, zıt gerilme alanlarının genişliklerine ve kuvvetlerin büyüklüğüne göre belirlenen bir “u” yüksekliğine yayılmalıdır. Enine çekme gerilmelerini düşük seviyede tutmak için, yeterli miktarda donatı kullanılmalıdır.
- Düğüm bölgesi sınırlarındaki ortalama basınç gerilmelerinin aşağıdaki değerlerden küçük olup olmadığı kontrol edilmelidir.

$$f_{cd}^* = 1.1 \times f_{cd} \Rightarrow \text{Sadece basınç çubuklarının karşılaştığı düğümlerde,}$$

$$f_{cd}^* = 0.8 \times f_{cd} \Rightarrow \text{Çekme çubuklarının (donatı) mevcut olduğu, kenetlenmenin dayanımda hesaba katılmasının gerektiği düğümlerde.}$$

- Çekme çubuklarının düğümde emniyetli bir biçimde ankrajı yapılmalı, çubukların ankraj uzunlukları, şartnameye uygun seçilmelidir. Ankraj, düğümün içinde ve ilerisinde yapılmalı, ankraj, enine basınç gerilmesi yörüngelerinin, donatı çubuğuyla karşılaştığı yerde başlayıp diğer düğüm bölgesinin bitimine kadar devam etmelidir.

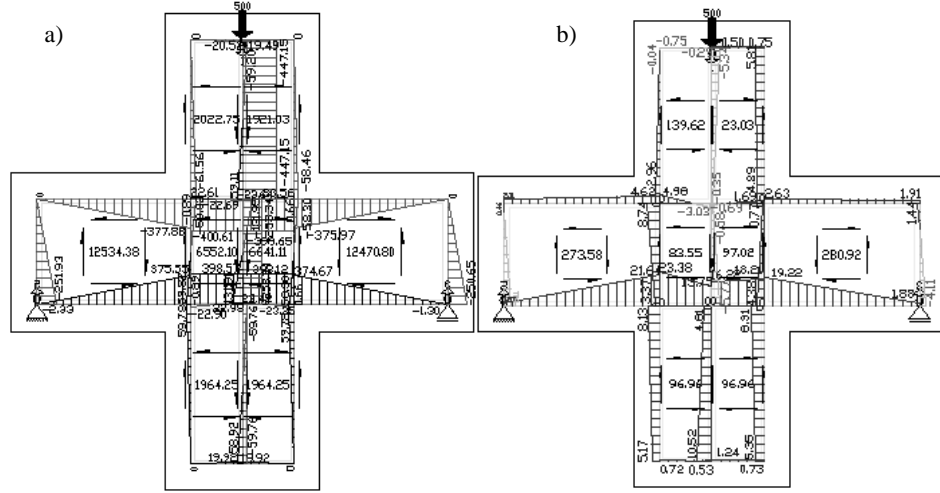
Yapı Elemanlarının Analizinde Şerit-Levha ve Kafes...

- d. Düğüm alanı kenarlarındaki ortalama beton basınç gerilmeleri, ilgili "C" basınç kuvvetine dik kesit üzerinde hesaplanmalıdır. Düğüm bölgesi kenarındaki ortalama basınç gerilmesi s_c şu şekilde bulunur (a düğüm uzunluğu, b düğüm genişliğidir):

$$A_{ci} = a_i \times b \quad ; \quad s_c = \frac{C_i}{A_{ci}} \quad (11)$$

8. MODELLERİN BETONARME KISA KONSOLLARA UYGULANMASI

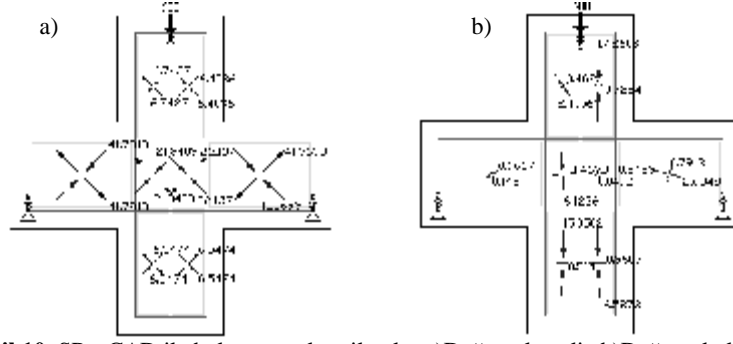
300 mm genişliği olan bir kısa konsol, şerit-levha modeli ve SAP2000'de belirlenen gerilme yörüngeleri kullanılarak belirlenen kafes sistem benzeşimi modeli kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 9). Kısa konsolun beton sınıfı C20, donatı sınıfı S420 olarak seçilmiştir. Şerit-levha modeli kullanılarak yapılan çözümde iç kuvvetleri hesaplamak için AutoCAD altında çalışan SPanCAD yazılımı kullanılmıştır [8]. Doğrusal çözümleme sonucunda bulunan şerit ve levha kuvvetleri Şekil 9.a'da görülmektedir. Buradan elde edilen çekme kuvvetlerine göre donatı hesaplanıp yerleştirildikten sonra doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir (Şekil 9.b). Yük altındaki yer değiştirmeleri karşılaştırmak için, çözümde 2 adet yerdeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Şekil 9'da doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarından kuvvetlerin yeniden dağılımı görülmektedir. Simülasyon yapılarak elemanın hangi yük altında göçeceği de belirlenmektedir.



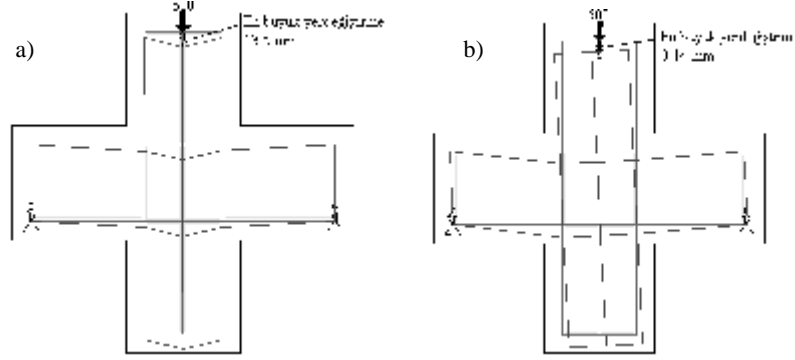
Şekil 9. SPanCAD ile bulunan gerilmeler a)Doğrusal analiz b)Doğrusal olmayan çözümleme (Yük birimi kN)

Tablo 1. Şerit-levha modeli, kafes sistem benzeşim (strut-and-tie) modeli ve TS500 ile hesaplanan donatı alanları

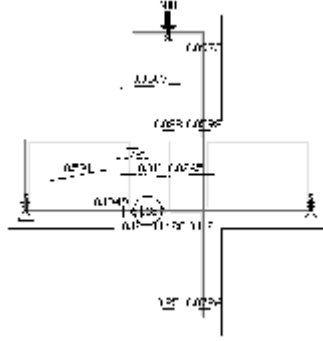
Model	Şerit-levha	Kafes Kiriş Benzeşimi	TS500
Çekme Donatısı Alanı: A_{st}	892 mm^2	685 mm^2	$A_{st} = \frac{M_d}{f_{yd} \times j \times d} = \frac{250000 \times 250}{365 \times 0.8 \times 270} = 793 \text{ mm}^2$



Şekil 10. SPanCAD ile bulunan asal gerilmeler a)Doğrusal analiz b)Doğrusal olmayan analiz



Şekil 11. SPanCAD ile bulunan yerdeğiştirmeler a)Doğrusal analiz b)Doğrusal olmayan analiz



Şekil 12. SPanCAD ile yapılan doğrusal olmayan analiz sonucu bulunan çatlak genişlikleri

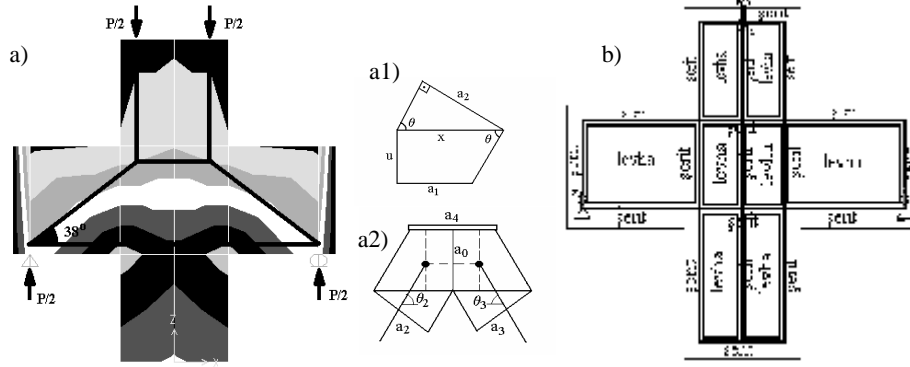
$$A_{st} = \frac{F_s}{f_{yd}} \Rightarrow A_{st} = \frac{398510}{365} \Rightarrow A_{st} = 892 \text{ mm}^2$$

miktarında çekme donatısı şerit-levha modeli kullanılarak bulunan kuvvet değerine göre, levhalardaki donatı ise o levhadaki kuvvete göre belirlenmiştir. Aşağıda bu modele göre gereken dağıtma donatısı toplam alanı görülmektedir.

Yapı Elemanlarının Analizinde Şerit-Levha ve Kafes...

$$A_{st} = \frac{F_s}{f_{yd}} \Rightarrow A_{st} = \frac{1253439}{365} \Rightarrow A_{st} = 3434 \text{ mm}^2$$

Şekil 10'da doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonucu bulunan asal gerilmeler ve doğrultuları, Şekil 11'de doğrusal ve doğrusal olmayan analizle maksimum yerdeğiştirme yeri ve büyüklüğü belirlenmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi doğrusal olmayan analizde yerdeğiştirme daha küçüktür ve simetrik değildir. Şekil 12'de ise doğrusal olmayan analiz sonucunda ortaya çıkan çatlakların yeri ve genişliği görülmektedir. Kısa konsol için oluşturulan kafes sistem benzeşimi modeli ve modelin düğüm boyutları Şekil 13'de görülmektedir.



Şekil 13. a)SAP2000 ile bulunan gerilme yörüngelerine göre belirlenen kafes sistem benzeşimi modeli ve düğümler ("a1)N6 ve a2)N2 düğüm tipi" [6] b)Sistemin şerit-levha modeli

θ açısı SAP2000'den bulunan gerilme yörüngelerine göre 38° olarak bulunmuştur. Buna göre belirlenen model ile düğümlerin dengesinden çubuk kuvvetleri hesaplanmıştır [9].

$$C_1=250 \text{ kN}, C_2=406 \text{ kN}, C_3=406 \text{ kN}, C_4=320 \text{ kN}, F_s=320 \text{ kN}$$

1 Düğümü (N6 Düğüm tipi [6])

$$A_{st} = \frac{F_s}{f_{yd}} \Rightarrow A_{st} = \frac{320000}{365} \Rightarrow A_{st} = 685 \text{ mm}^2$$

$$u = 80.0 \text{ mm}; \frac{80}{x} = \tan 38 \Rightarrow x = a_1 = 102 \text{ mm}; a_2 = (100 + 80) \sin 60 \Rightarrow a_2 = 127 \text{ mm}$$

$$s_{c1} = \frac{C_1}{a_1 \times t} = \frac{250000}{100 \times 300} = 8.33 \text{ N / mm}^2 < 0.8 \times 13.333 = 10.66 \text{ N / mm}^2$$

$$s_{c2} = \frac{C_2}{a_2 \times t} = \frac{406000}{127.28 \times 300} = 10.63 \text{ N / mm}^2 < 0.8 \times 13.333 = 10.66 \text{ N / mm}^2$$

2 Düğümü (N2 Düğüm tipi [6])

$$a_o = a_4 \cos q_2 \sin q_2 = a_4 \cos q_3 \sin q_3 \Rightarrow a_o = 300 \text{ mm} \Rightarrow a_o = 300 \times \cos 38 \times \sin 38 \Rightarrow a_o = 145 \text{ mm}$$

$$s_{c0} = \frac{C_4}{a_o \times t} = \frac{320000}{145 \times 300} = 7.36 \text{ N / mm}^2 < 1.1 \times 13.333 = 14.66 \text{ N / mm}^2$$

$$s_{c2} = s_{c3} = \frac{C_2}{a_2 \times t} = \frac{406000}{127.28 \times 300} = 10.63 \text{ N / mm}^2 < 1.1 \times 13.333 = 14.66 \text{ N / mm}^2$$

$$s_{c4} = \frac{F_u}{a_4 \times t} = \frac{500000}{300 \times 300} = 5.55 \text{ N / mm}^2 < 1.1 \times 13.333 = 14.66 \text{ N / mm}^2$$

9. SONUÇ

Bu çalışmada, esas olarak doğrusal olmayan modellerin hesap yöntemine uygulanmasıyla ilgili bir yöntem olan şerit-levha modeli tanıtılmış ve model grafiksel bir programla tamamlanmıştır. Bu modelde, şerit elemanlardaki yoğunlaşmış donatı ve basınç etkisindeki betonun doğrusal davrandığı kabul edilirken çekme etkisindeki betonun çatlamasından dolayı rijitlikte değişim olmaktadır. Levha elemanlardaki beton ve minimum dağıtma donatısının her ikisi de doğrusal olmayan davranmaktadır. Kuvvetlerin yeniden dağılımı doğrusal olmayan analizle hesaplanabilmekte ve donatı buna uygun olarak yeniden düzenlenmektedir. Tasarımda, doğrusal olmayan model kullanılmasının üstünlüğü daha güvenilir bir hesaplama güvenliği daha belirli bir yapı elde etmektir. Bu modelde tüm yük kombinasyonları ve kullanılabilirlik ve taşıma gücü limit durumları için sadece bir model belirlemek yeterli olmaktadır. Kafes sistem benzeşimi modeliyle çekme donatısının oldukça kolay belirlenmesine karşılık; kısa konsol gövdesinde kullanılacak donatı, şerit-levha modelinde daha açık bir biçimde belirlenmektedir. TS500 ve kafes sistem benzeşimi yönteminden bulunan çekme donatısı alanları birbirine çok yakındır(%1 fark). Betonarmede doğrusal olmayan modellerin kullanılması ile gerçeğe daha yakın bir davranış ve buna bağlı olarak gerilme uyumunu dikkate alan bir hesap yöntemi kullanılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Hoogenboom P.C.J., Blauwendraad, J., Computer Aided Design of Structural Concrete, *7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 1, Seoul, Korea, (19-21 August 1997).
- [2] Schlaich J., Schafer, K., Jennewein, M., Toward a Consistent Design of Structural Concrete, *PCI Journal*, 32, 3, (1987), 74-150.
- [3] Blauwendraad J., Hoogenboom P.C.J., Stringer Panel Model for Structural Concrete Design, *ACI Structural Journal*, 93, (1996), 295-305.
- [4] Hoogenboom P.C.J., Discrete Elements and Nonlinearity in Design of Structural Concrete Walls, Dissertation, *Delft University of Technology*, The Netherlands (1998).
- [5] MacGregor, J.G. "Reinforced Concrete Mechanics and Design", *Prentice-Hall International Inc.*, New Jersey, USA 1997.
- [6] Schlaich, J., Schafer, J., Design and Detailing of Structural Concrete using Strut-and-Tie Models, *Structural Engineer*, 69,6, 113-125, (1991).
- [7] Schlaich, M., Anagnostou, G., Stress Fields for Nodes of Strut and Tie Models, *Journal of Structural Engineering*, 116, 1, (January 1990), 13-23.
- [8] SpanCAD Software for Design of Structural Concrete Walls, Discontinuities and Box-Shaped Structures, Development Team: J. Blauwendraad, L. Lourenço, M. Zajdel, R. Lintelo, C. Casbergen, O. Heeres, S. Ender, P. Hoogenboom, (1999).
- [9] Yavuz, G., Betonarme Kısa Konsolların Davranışlarının Deneysel Olarak ve Kafes Sistem/Strut-and-Tie Modellemesiyle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, Türkiye(1999).