

BÜYÜK BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN STATİK-BETONARME ANALİZİ

Hasan ELÇİ(*)

ÖZET

Sıhhi tesisat, pis su tesisatı, elektrik ve telefon kabloları, kalorifer boruları ve havalandırma kanalları gibi tesisatın tavandan geçirilişi sırasında kiriş gövdelerinde boşluk bırakılması ihtiyacı, yapı mühendislerinin sık karşılaştığı sorunlardandır. Eğer bu tür tesisatın yapının bütünlüğünü bozmadan, kiriş gövdesinde boşluklar bırakılarak geçirilmesi sağlanabilirse, tavan yüksekliğinden azami şekilde faydalanılır. Ayrıca bu tür tesisatın kiriş etrafında dolaştırılmasından doğacak maliyet artışı ve akışkan borularındaki yersel yük kayıpları da önlenir. Bu çalışmada, kiriş gövdesinde büyük boşluklar bırakılması halinde, statik-betonarme hesabın nasıl yapılması gerektiği açıklanmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kiriş, Gövde Boşlukları, Kullanılabilirlik

1. GİRİŞ

Kiriş gövdelerinde bırakılan boşlukları boyutlarına göre, küçük ve büyük boşluklar olmak üzere başlıca iki grupta inceleyebiliriz. Eğer boşluğun en büyük boyutu, kiriş toplam yüksekliğinin yarısından daha büyük değilse, bu tür boşluklara küçük boşluklar denir. Boşluğun en büyük boyutunun kiriş toplam yüksekliğinin yarısından fazla olduğu boşluklara ise büyük boşluklar denir.

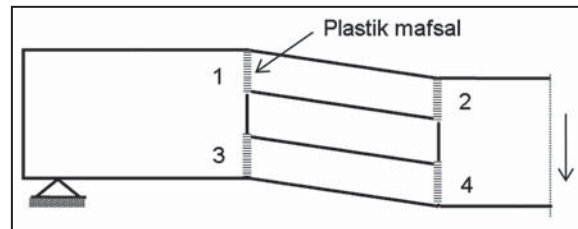
Gövdelerinde küçük boşluklar bulunan betonarme kirişlerin analitik çözümüne ilişkin yapılan çalışmalar sonucu, bu tür betonarme kirişlerin dizaynında önemli bir problemle karşılaşmadığı görülmüştür [1, 2, 3, 4]. Boşluk çevresine yerleştirilecek donatı miktarının, boşluklu kesitteki basınç veya çekme donatısının fazla olanına eşit olması yeterlidir. Böylece, ilk olarak çekme veya basınç donatısı akar, boşluk civarındaki donatının akması ise daha sonra olur.

Betonarme kirişlerin gövdesinde büyük boşluk veya boşluklar bulunması halinde, boşluk civarına yerleştirilecek donatının hesapla bulunması gerekmektedir. Bu yüzden, bu tür kirişlerin dizaynı için bundan önce yapılmış olan teorik ve deneysel çalışmalar esas alınarak, bir analitik çözüm yöntemi uygulanmıştır [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Bu çalışmaların kısa bir özeti aşağıda verilmiştir.

Mansur ve diğerleri tarafından yapılan deneysel çalışmada, her birinin gövdesinde büyük dikdörtgen boşluklar bulunan 8 adet betonarme sürekli kiriş test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucu gövdesinde büyük bir boşluk bulunan betonarme kirişin genel davranışı incelenmiş, boşluğun kiriş deplasmanlarına olan etkisi şekillerle gösterilmiştir. Ayrıca, göçme modu ve plastik mafsalları oluşum sırası verilmiştir. Gövde boşluğun yerinin (mesnede olan mesafe) ve boyutlarının göçme yüküne etkisi araştırılmıştır [9].

Mansur, Tan ve Lee tarafından yapılan bir çalışmada ise göçme modları ve boşluğun alt ve üst başlık elemanları tarafından taşınacak kesme kuvvetleri araştırılmıştır. Üzerinde tekil yük bulunan büyük boşluklu bir betonarme kirişin taşıyabileceği en büyük tekil yükün şiddetinin analitik olarak elde edilmesi için bir yöntem önerilmiştir [6].

Yine aynı araştırmacılar, gövdesinde büyük dikdörtgen boşluk bulunan, eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisindeki betonarme kirişler için deneysel çalışmalarla desteklenmiş bir analitik çözüm yöntemi önermişlerdir. Mekanizma durumu olarak, boşluğun altında ve üstünde bulunan başlık ele-



Şekil 1 - Kabul Edilen Göçme Modu

(*) Y. Doç. Dr., Balıkesir Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir

manlarının her iki uçlarında olmak üzere, 4 mafsallın oluşması kabul edilmiştir (Şekil 1). Akma kriteri olarak, aksenal normal kuvvet-eğilme momenti karşılıklı etki diyagramları kullanılmıştır [7].

Tan, Mansur, Huang ve Lee tarafından yapılan çalışmalarda, gövdesinde büyük boşluklar bulunan betonarme kirişlerin dizaynı için bir analitik çözüm yöntemi önerilmiştir [8,12].

Bir başka çalışmada ise, gövdesinde büyük boşluklar bulunan T kesitli betonarme kirişlerle ilgili deneysel çalışmalar esas alınarak analitik çözüm yöntemi önerilmiştir [5,8]. Önerilen yöntem bu çalışmada da kullanılmıştır.

Betonarme bir elemanın hesabı, aşağıdaki sıraya göre yapılabilir.

- 1) Yapısal Çözümleme: Yapının maksimum yüklerden dolayı kesit tesirlerinin belirlenmesi. Bu aşamada, bütün elverişsiz yükleme durumları göz önüne alınır, eğilme momenti ve kesme kuvveti diyagramları buna göre belirlenir.
- 2) Mukavemet Boyutlandırması: Eğilme ve kesmeye maruz kritik kesitlerin donatılarının belirlenmesi.
- 3) Kullanılabilirlik Boyutlandırması: Yapının, işletme yükleri altında tüm işlevlerini yerine getirmesini sağlayacak boyutların belirlenmesi.

2. YÖNTEM

Gövdesinde büyük bir boşluk veya boşluklar bulunan betonarme kirişlerin dizaynı için, Tan ve Mansur tarafından önerilen dizayn yöntemi, TS 500'de verilen sınırlar da göz önüne alınarak, aşağıda verilmiştir [8,13].

2.1. Yapısal Çözümleme

İzostatik kirişlerde kesit tesirleri statik olarak belirlenebilir. Sürekli kirişlerde ise Rijitlik Matrisi Metodu kullanılan hesap yöntemlerinden biridir. Bu metoda göre, gövdesinde bir boşluk bulunan eleman, dolu kısım için brüt kesit ve boşluklu kısım için ise eşdeğer kesit alınarak, farklı kesit özelliklerine sahip bir kiriş gibi düşünülür. Böylece problem, her boşluk için iki ilave düğüm noktasının eklendiği sıradan bir sürekli kiriş analizine indirgenmiş olur. Bundan sonra yapılacak olan ise, eleman rijitliklerinin belirlenmesidir.

Kiriş Parçalarının Rijitliği: Kirişlerin rijitliği brüt beton kesitine göre hesaplanır.

Boşluklu kesitin eşdeğer eğilme rijitliği $(EI)_{eq}$ hesaplanırken, brüt beton kesitin atalet momentinden, boşluk kısmının atalet momenti çıkarılmalıdır.

Boşluklu kesitin eşdeğer kayma rijitliği $(GA)_{eq}$;

$$(GA)_{eq} = \frac{12E_c(I_{gt} + I_{gb})}{\ell_e^2} \quad (1)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada;

I_{gt} : boşluğun üstünde kalan kesitin atalet momenti,

I_{gb} : boşluğun altında kalan kesitin atalet momenti,

ℓ_e : boşluk etkili uzunluğudur.

Boşluk etkili uzunluğu ampirik olarak;

$$\ell_e = \frac{\ell_o}{1 - \left(\frac{d_o}{D}\right)^{1.5}} \quad (2)$$

bağıntısından hesaplanır. Bu bağıntıda;

ℓ_o : boşluğun gerçek uzunluğu,

d_o : boşluğun yüksekliği,

D: kiriş toplam yüksekliğidir.

Eğilme Momenti ve Kesme Kuvveti Diyagramları:

Kiriş için, bütün elverişsiz yük kombinasyonları göz önüne alınarak statik hesap yapılır. Kayma deformasyonlarının kolayca göz önüne alınabilmesi nedeniyle, Rijitlik Matrisi Metodu kullanarak bilgisayarla çözüm yapılabilir [12,14,15,16].

2.2. Mukavemet Boyutlandırması

Kirişin her kesitindeki eğilme momenti ve kesme kuvvetlerinin hesabından sonra, boşluksuz kısım için bilinen betonarme kesit hesabı yapılır. Boşluklu kısımda ise, boşluğun altında ve üstünde bulunan başlık elemanlarının davranışı önem kazanır. Boşluğun ortasındaki kiriş momenti, başlık elemanlarının ağırlık merkezleri arasındaki mesafeye bölünerek, üst ve alt başlığa etki eden aksenal normal kuvvetler (N_t ve N_b) hesaplanır. Boşluğun ortasında hesaplanan kesme kuvveti, başlık elemanlarına rijitlikleri oranında dağıtılır. Böyle bir varsayım, uygulanan kesme kuvveti dağılımının hem gerçekçi olarak hesaplanmasını sağlar hem de hesapları kolaylaştırır. Daha sonra başlık elemanlarının uç momentleri statik olarak hesaplanır. Önerilen metodun özeti aşağıda verilmiştir.

Başlık Elemanlarındaki Kuvvetler ve Momentler:

Eğilme momenti ve kesme kuvveti diyagramlarından, boşluğun ortasındaki dizayn eğilme momenti M_m ve kesme kuvveti V_m hesaplanır. Daha sonra sırasıyla üst ve alt başlık elemanına etki eden N_t ve N_b aksenal normal kuvvetleri;

$$N_t = \frac{M_m}{z} \quad (3)$$

$$N_b = -N_t \quad (4)$$

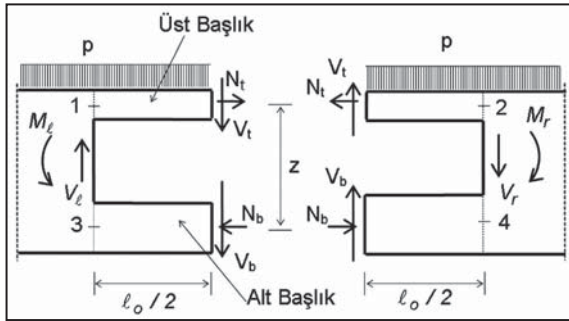
bağıntılarından hesaplanır. Burada z , alt ve üst başlık elemanlarının ağırlık merkezleri arasındaki mesafedir.

Uygulanan kesme kuvvetinin alt ve üst başlık elemanlarına dağılımı ise;

$$V_t = V_m \left(\frac{I_{gt}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) \quad (5)$$

$$V_b = V_m \left(\frac{I_{gb}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) \quad (6)$$

bağıntıları yardımıyla yapılır. Burada I_{gt} ve I_{gb} , sırasıyla üst ve alt başlık elemanlarının atalet momentleridir.



Şekil 2 - Boşluklu Kısımın Serbest Cisim Diyagramı

Başlık elemanlarının uçlarındaki momentler Şekil 2'den faydalanarak,

$$M_1 = -\frac{p\ell_o^2}{8} - \frac{V_t\ell_o}{2} \quad (7)$$

$$M_2 = -\frac{p\ell_o^2}{8} + \frac{V_t\ell_o}{2} \quad (8)$$

$$M_3 = -\frac{V_b\ell_o}{2} \quad (9)$$

$$M_4 = \frac{V_b\ell_o}{2} \quad (10)$$

olarak hesaplanır.

Burada p , üst başlığa etki eden düzgün yayılı yükü; M , eğilme momentini; 1, 2, 3 ve 4 indisleri ise Şekil 2'de görülen kesitleri göstermektedir.

Basınç Başlığının Stabilitesi: Eğer incelenen kesit bir tablalı kiriş ise, basınç elemanının kapasite ve özelliklerini belirleyen çalışan tabla genişliği TS 500'de verilen üst sınırı aşmamalıdır.

Boşluklu kısım pozitif eğilmeye maruz kaldığında (örneğin, bir sürekli kirişin orta bölgesinde ise), üst

başlık elemanı döşemenin devamı ile sınırlandırılacak ve böylece TS 500'de belirtildiği şekilde, yanal ötelenmesi engellenmiş bir eleman olarak kabul edilecektir. Narinlik etkisi, (11) bağıntısının sağlandığı durumlarda ihmal edilecektir [13].

$$\frac{\ell_e}{i} \leq 34 - 12 \frac{M_b}{M_1} \leq 40 \quad (11)$$

Burada;

ℓ_e : basınç elemanının etkili uzunluğu,

i : atalet yarıçapı

olarak tanımlanmıştır. M_1 ve M_2 değerleri, işaretleriyle birlikte, sırasıyla M_1 ve M_2 olarak ($M_1 \leq M_2$) alınabilir. Atalet yarıçapı ise;

$$i = \sqrt{\frac{I_{gt}}{A_{ct}}} \quad (12)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada I_{gt} , basınç başlığının atalet momenti, A_{ct} ise basınç başlığının enkesit alanıdır.

Boşluklu kısım negatif eğilmeye maruz kaldığında (örneğin, bir sürekli kirişin mesnedine yakın bir bölgede ise), basınca maruz kalan alt başlık elemanı, yanal ötelenmeye karşı engellenmemiş bir eleman olarak kabul edilir. Bu durumda narinlik etkisinin ihmal edilebilmesi için;

$$\frac{\ell_e}{i} < 22 \quad (13)$$

bağıntısının sağlanması gerekir. (11) ve (13) bağıntılarının sağlanamaması halinde, basınç başlığının dizaynı için TS 500'de verilen moment büyütme metodu kullanılabilir. Ancak başlık elemanları yeniden boyutlandırılarak narinlik etkisinin ihmal edilmesi daha uygundur [8].

Başlık Elemanlarının Boyuna Donatı Hesabı:

Boşluklu kesite bitişik dolu kesitin boyuna donatıları, boşluk boyunca devam ettirilmelidir. Başlık elemanlarına etki eden eğilme momenti ve normal kuvvet için gerekli ek donatı, her bir başlık elemanı için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Ancak çoğu zaman, başlık elemanlarını simetrik donatılı olarak yapmak uygun olmaktadır. Boyuna donatılar bu şekilde belirlendikten sonra, başlık elemanları için eğilme momenti-normal kuvvet karşılıklı etki diyagramları çizilir. Eğer her bir elverişsiz yükleme hali için başlık elemanlarında hesaplanan kesit tesirleri, bu karşılıklı etki diyagramının içinde kalıyorsa sağlanan donatı yeterlidir. Aksi takdirde donatıda değişikliğe gidilmelidir. Üst başlık elemanının eğilme kapasitesi, üzerine doğrudan uygulanacak herhangi bir dış yükü de karşılamaya yetecek kadar olmalıdır.

Başlık Elemanlarında Kayma Donatısı Hesabı:

Üst ve alt başlık elemanlarında taşınan kesme kuvvetleri sırasıyla (5) ve (6) bağıntılarında verilmiştir. Bu kuvvetler bilindiğine göre kayma donatısı, kirişlerdeki benzer şekilde hesaplanabilir. Ancak TS 500'e göre, başlık elemanlarındaki eksenel kuvvetler dizaynda göz önüne alınmalıdır. Buna göre;

$$V_{cr} = 0.65 \times f_{ctd} \times b_w \times d \times \left[1 + \gamma \frac{N_d}{A_c} \right] \quad (14)$$

bağıntısı ile hesaplanan V_{cr} kritik kesme kuvveti değeri, başlık elemanına etki eden kesme kuvvetine eşit veya daha büyük olmalıdır. Bu bağıntılarda;

V_{cr} : betonun kritik kesme kuvveti taşıma kapasitesi (N),

f_{ctd} : betonun çekme hesap dayanımı (N/mm²),

b_w : kirişin gövde genişliği (mm),

d : kirişin faydalı yüksekliği (mm)

N_d : eksenel normal kuvvet (daima pozitif) (N),

A_c : brüt beton kesit alanı (mm²),

γ : katsayı (N_d basınç ise 0.07, çekme ise -0.3)

olarak tanımlanmıştır [13]. Boşluğun üst başlığa bitişik olduğu tablalı kirişlerde, üst başlık bir döşeme gibi alınabilir. Üst başlıkta kayma gerilmeleri genellikle çok düşüktür. Bunun sonucu olarak, üst başlıklara kayma donatısı konmasına genellikle ihtiyaç duyulmaz.

İki Boşluk Arasındaki Geçiş Elemanının

Boyutlandırılması: Geçiş elemanı, hesaplanan toplam kesme kuvvetini taşıyacak bütün bir kesit olarak dizayn edilir. İki komşu boşluğa ait köşe donatılarının, kesitin kesme kuvveti taşıma kapasitesine etkisi ihmal edilir. Boşluk boyunca yapılan etriye sıklaştırması, geçiş elemanında da devam ettirilir.

2.3 Kullanılabilirlik Boyutlandırması

Çatlama ve sehim gibi iki önemli kullanılabilirlik şartı sağlanmalıdır.

Çatlama: Boşluksuz kesitin çatlak kontrolünün hesaplarla ve uygun donatı detayları ile karşılandığı kabul edilerek, boşluğun köşelerindeki kritik kesitlerde aşağıdaki çatlak kontrol şartlarının sağlanması önerilir. Boşluğun her bir düşey kenarında, düşey etriye ve diyagonal çubuklardan oluşan bir donatı kombinasyonu kullanılmalıdır. Kayma mukavemetinin en az %75'i bu diyagonal çubuklar tarafından sağlanmalıdır. Böylece boşluğun her bir düşey kenarı için gerekli düşey etriye alanı;

$$A_v = \frac{0.25(\eta V)}{\phi f_{ywd}} \quad (15)$$

bağıntısından hesaplanır. Burada;

A_v : düşey etriye alanı,

η : kayma yoğunluk faktörü ($\eta=2$),

V : dizayn kesme kuvveti,

ϕ : kapasite azaltma faktörü ($\phi=0.85$),

f_{ywd} : etriyenin akma gerilmesi

olarak verilmiştir. Düşey etriyeler boşluğun kenarına, gerekli pas payının imkan tanıdığı ölçüde yakın olarak yerleştirilmelidir.

Boşluğun köşe noktalarına yerleştirilecek diyagonal donatının alanı;

$$A_d = \frac{0.75(\eta V)}{\phi f_{yd} \sin \varphi} \quad (16)$$

bağıntısından hesaplanır. Burada f_{yd} , diyagonal donatının akma gerilmesi, φ ise kiriş eksenine ile diyagonal çubuklar arasındaki açıdır. İmalat sırasında karışıklığı önlemek ve deprem gibi etkiler nedeniyle yüklerin tersinebilme olasılığını göz önüne alarak, aynı miktardaki diyagonal donatı, boşluğun hem alt hem üst kısmındaki köşelerinde bulundurulmalıdır.

Sehim: Kiriş faydalı yüksekliğinin kiriş açıklığına oranı olarak belirlenen kullanılabilirlik şartı boşluklu kirişler için geçerli değildir. Bu nedenle, işletme yükleri altında meydana gelecek gerçek deformasyonların bilinmesi gerekir. Bunun için, kirişin statik hesabında kullanılan Rijitlik Matrisi Metodu kullanılabilir. Tüm donatı detayları bilindiğinden işletme yüklerinden dolayı meydana gelecek deformasyon hakkında emniyetli tarafta kalacak bir hesaplama yapılabilir. Değişik bölümlerin çatlama kesit atalet momentleri kullanılarak yönetmeliklerde belirtilen şartlarla karşılaştırılabilir. Boşluklu kısmın (1) bağıntısı kullanılarak hesaplanan eşdeğer kayma rijitliği, başlık elemanlarının çatlama atalet momentleri kullanılarak da hesaplanabilir.

TS 500'e göre normal kat elemanları için izin verilen kısa süreli sehim δ_s , $L/360$ 'dan fazla olmamalıdır. Bu sehim hesabında $1.0g + 1.0q$ yükleri dikkate alınır.

Uzun süreli sehim hesabında ise, eğilme elemanlarındaki sünme ve rötre etkilerini göz önüne alabilmek için, ömrü boyunca yapıya etki edecek yüklerden dolayı meydana gelecek ani sehimin,

$$\lambda = \frac{\gamma_t}{1 + 50 \rho'} \quad (17)$$

katsayısı ile çarpılması gerekir.

Burada ρ' , açıklık ortasındaki basınç donatısı yüzdesi, γ_t ise zaman faktörüdür. γ_t 'ye, yükleme süresine bağlı olarak;

5 yıl ve daha fazla..... 2.0

12 ay 1.4

6 ay 1.2

3 ay 1.0

değerleri verilebilir. Buna göre uzun süreli sehimi;

$$\delta_t = \delta_i + \lambda \delta_{ig} \quad (18)$$

bağıntısından hesaplanır. Burada;

δ_t : toplam sehimi,

δ_i : ani sehimi,

δ_{ig} : kalıcı yüklerden oluşan ani sehimi

olarak tanımlanmaktadır [13].

Eğer hareketli yükün bir kısmı yapıda sürekli olarak kalıyorsa, bu yükler uzun süreli sehimde dikkate alınmalıdır. Örneğin, yapı elemanına etki eden hareketli yüklerin %50'sinin sürekli olarak sistemde kaldığını düşünürsek, bu durumda sabit yüklerden meydana gelecek ani sehimi hesabında, $1.0g+0.5q$ yükünün dikkate alınması gerekir [8].

Uzun süreli sehimi $L/240$ 'dan fazla olamaz [13].

3. SAYISAL UYGULAMA

Şekil 3'te görülen 3 açıklıklı, orta açıklığında gövdesinde büyük bir dikdörtgen boşluk bulunan (900×200 mm²) tablalı betonarme kirişin statikbetonarme hesabı:

Malzeme :

Beton : C20, $f_{cd}=20$ N/mm², $f_{ctd}=1.25$ N/mm²,
 $E_c=3.2 \times 10^4$ N/mm², $G_c=3.2 \times 10^4$ N/mm²

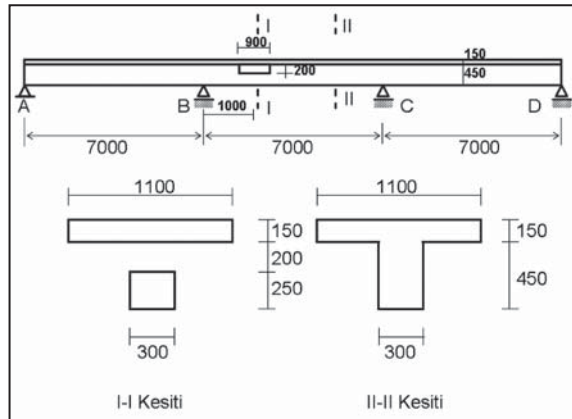
Boyuna donatı : S420, $f_{yd}=365$ N/mm²

Enine donatı : S220, $f_{ywd}=191$ N/mm²

Donatılar için : $E_s=2 \times 10^5$ N/mm²

Sabit yükler : $g=14$ kN/m

Hareketli yükler : $q=12$ kN/m



Şekil 3 - 3 Açıklıklı, Boşluklu Betonarme Kiriş

1. Adım: Yapısal Çözümleme

Kiriş Parçalarının Rijitliğinin Hesabı

Her bir kiriş kesiti için, kendi ağırlık merkezlerinden geçen eksenlere göre atalet momentleri;

Boşluksuz kesit $I_{go}=9.27 \times 10^9$ mm⁴

Boşluklu kesit $I_{gs}=8.95 \times 10^9$ mm⁴

Üst başlık $I_{gt}=3.09 \times 10^8$ mm⁴

Alt başlık $I_{gb}=3.90 \times 10^8$ mm⁴

olarak hesaplanır. (2) bağıntısından boşluk etkili uzunluğu $\ell=1114.48$ mm, (1) bağıntısından boşluklu kesitin eşdeğer kayma rijitliği;

$(GA)_{eq}=2.164 \times 10^8$ N

olarak bulunur.

Eğilme Momenti ve Kesme Kuvveti Diyagramlarının Elde Edilmesi

Verilen boşluklu betonarme kiriş için, bütün elverişsiz yük kombinasyonları dikkate alınır. Kirişin statik hesabı, kayma etkileri de göz önüne alınarak Rijitlik Matrisi Metodu ile yapılır [17].

Şekil 4'te görülen 5 farklı yükleme sonucunda elde edilen kritik kesit tesirleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

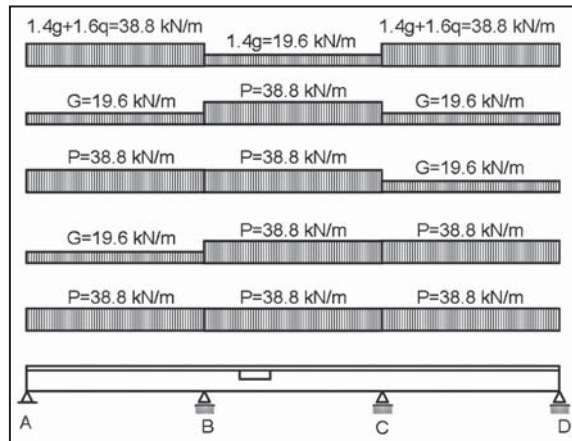
2. Adım: Mukavemet Boyutlandırması

Elverişsiz yüklemeler sonucu elde edilen eğilme momenti ve kesme kuvveti diyagramlarına göre, bütün kritik kesitlerdeki eğilme ve kayma donatıları betonarmeden bilindiği şekilde hesaplanır. Bu hesaplamalar sonucu seçilen donatılar Çizelge 1'de verilmiştir.

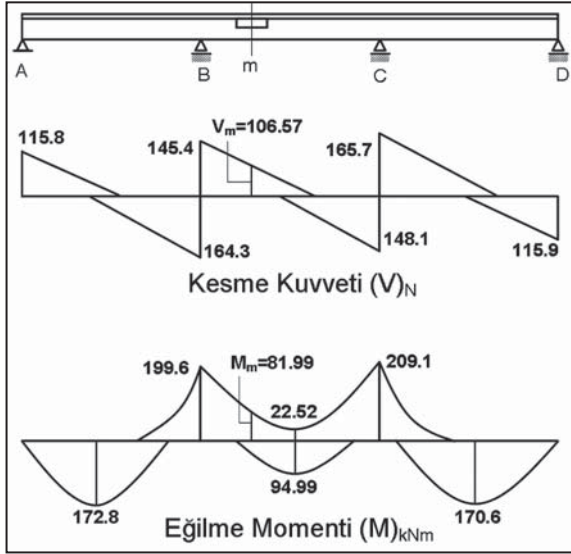
Kayma donatısı, güvenlik tarafında kalan bir yaklaşımla, en büyük kesme kuvvetine göre hesaplanmış ve bütün açıklıklarda sabit olarak alınmıştır.

Başlık Elemanlarındaki Kuvvetler ve Momentler

Şekil 5'te verilen V_m kesme kuvveti ve M_m eğilme



Şekil 4 - Elverişsiz Yük Kombinasyonları



Şekil 5 - Kritik Kesit Tesirleri

Çizelge 1 - Çekme ve Kayma Donatısı

Yer	Moment (kNm)	Asal Donatı (mm ²)
A-B Açıklığı	172.80	6Ø14 (923.64)
B Mesnedi	-199.60	8Ø14 (1231.52)
B-C Açıklığı	94.99 / -22.52	4Ø14 / 2Ø12
C Mesnedi	209.10	8Ø14 (1231.52)
C-D Açıklığı	170.60	6Ø14 (923.64)

Kayma donatısı Ø8/170 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2 - Başlık Elemanlarının Ortasındaki Kesme Kuvvetleri (V) ve Normal Kuvvetler (N)

Yüklemeye No	M _m kNm	V _m kN	V _t kN	V _b kN	N _t =N _b
1	81.994	48.270	21.334	26.936	204.985
2	23.078	95.665	42.281	53.384	57.695
3	73.623	106.565	47.098	59.467	184.058
4	19.189	84.740	37.452	47.288	47.973
5	69.734	95.640	42.269	53.371	174.335

Çizelge 3 - Başlık Elemanlarının Uç Momentleri

Yüklemeye No	p kN/m	Üst Başlık Momentleri (kNm)		Alt Başlık Momentleri (kNm)	
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
1	19.6	-11.585	+7.616	-12.121	+12.121
2	38.8	-22.955	+15.098	-24.023	+24.023
3	38.8	-25.123	+17.266	-26.760	+26.760
4	38.8	-20.782	+12.925	-21.280	+21.280
5	38.8	-22.950	+15.093	-24.017	+24.014

momenti boşluk ortasındaki en büyük kesit tesirleridir. Ancak her bir elverişsiz yükleme için, boşluk ortasındaki bu kesit tesirlerinden dolayı alt ve üst başlık elemanlarına gelecek olan aksenal normal kuvvetler (3) ve (4), kesme kuvvetleri (5) ve (6) bağıntıları yardımıyla hesaplanmalıdır. Bu bağıntılar yardımıyla, z=400 mm alınarak hesaplanan başlık elemanlarındaki kesme kuvvetleri ve normal kuvvetler Çizelge 2'de gösterilmiştir.

(7), (8), (9) ve (10) bağıntıları yardımıyla hesaplanan başlık elemanlarının uç bölgelerindeki 2. meritebe momentler Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelgede 1, 2, 3 ve 4 indisleri kritik kesitlerin yerini göstermektedir (Şekil 2).

Basınç Başlığının Stabilitesi

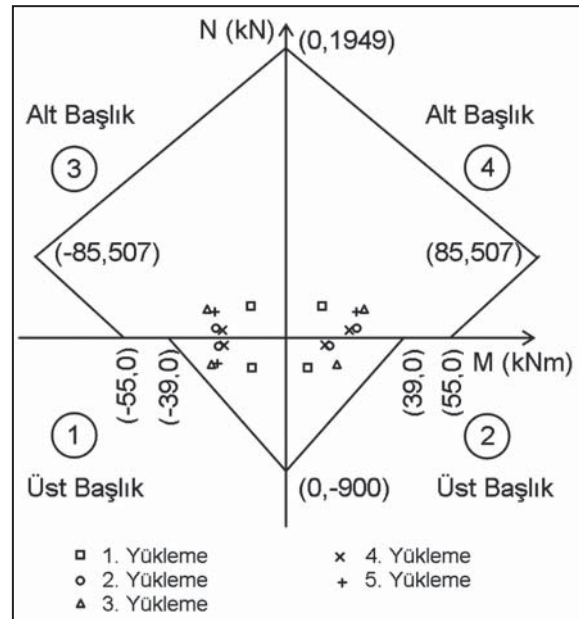
Tablalı kirişte boşluk bölgesi negatif eğilmeye maruz kalmıştır. Bu yüzden basınç başlığı (alt başlık elemanı) yanal yer değiştirmesi önlenmemiş kabul edilerek kontrol edilir. Basınç başlığının atalet yarıçapı (12) bağıntısından $i=72.17$ mm. olarak hesaplanır. Atalet yarıçapı değeri (13) bağıntısında yerine konulursa;

$$\frac{1114.48}{72.17} = 15.44 < 22$$

olduğundan narinlik etkisi ihmal edilebilir.

Başlık Elemanlarının Boyuna Donatı Hesabı

Kiriş boyuna donatılarının belirlenmiş olduğu Çizelge 1'den de görüleceği gibi, boşluğa komşu dolu kesitlerde üstte 8Ø14 (B mesnet donatısı) ve



Şekil 6 - Başlık Elemanları İçin Lineerleştirilmiş Karşılıklı Etki Diyagramı

altta 6Ø14 (A-B açıklık donatısı devam ettirilerek) donatı sağlanmıştır. Başlık bölgesinde donatının simetrik yerleşimini sağlamak için üst başlık elemanına 8Ø14 alta ve alt başlık elemanına 6Ø14 üste olmak üzere deneme amaçlı donatı düzenlemesi yapılır. Alt ve üst başlık elemanlarında, sağlanan donatının yeterliliğini kontrol etmek için karşılıklı etki diyagramları çizilir (Şekil 6).

Elverişsiz yüklemeler sonucu başlık elemanlarının kritik kesitlerinde hesaplanan iç kuvvetlerin tamamı karşılıklı etki diyagramı içinde kaldığından mevcut boyuna donatılar yeterlidir. Üst başlığa doğrudan etki eden $P=38.8$ kN/m'lik üniform yayılı yükten dolayı, üst başlığın 1 ve 2 kesitlerinde oluşacak;

$$M = \frac{P\ell_o^2}{24} = \frac{38.8 \times 0.9^2}{24} = 1.31 \text{ kNm}$$

eğilme momenti, Şekil 6'daki karşılıklı etki diyagramından görüleceği gibi 39 kNm'lik eğilme momenti taşıma kapasitesinin çok altındadır.

Başlık Elemanlarında Kayma Donatısı Hesabı

Boşluk ortasında maksimum kesme kuvveti 3. yüklemekten oluşur ve Çizelge 2'de görüldüğü gibi $V_m=10.565$ kN'dur. Aynı tablodan, üst ve alt başlık elemanlarına gelen kesme kuvvetleri sırasıyla $V_t=47.098$ kN, $V_b=59.467$ kN olarak okunur. Başlık elemanları eğilme momenti ve eksenel normal kuvvete maruzdur. Bu nedenle başlık elemanları için kritik kesme kuvveti taşıma kapasitesi (14) bağıntısı ile hesaplanır. Üst başlıkta 3. yükleme için,

$$V_{cr}=89.198 \text{ kN} < V_t=47.098 \text{ kN} \text{ olarak bulunur.}$$

Alt başlıkta ise daha kritik olan 4. yükleme için,

$$V_{cr}=63.664 \text{ kN} < V_t=47.288 \text{ kN}$$

olarak bulunduğundan, alt ve üst başlık elemanları kendilerine etki eden kesme kuvvetlerini güvenle taşıyabilmektedir. Sonuç olarak üst başlık elemanına konstrüktif olarak Ø8/200 dağıtma donatısı, alt başlık elemanına ise minimum enine donatı (etriye Ø8/90) yerleştirilir.

3. Adım: Kullanılabilirlik Boyutlandırması

Çatlama

Brüt beton kesitlerin çatlak kontrol gereksinimleri uygun donatı detayları ile sağlanır. Boşluklu kesit için maksimum kesme kuvveti, 3. yüklemekten dolayı boşluğun sol kenarında oluşur ve değeri;

$$V_\ell = V_m + \frac{P\ell_o}{2} = 106.565 + \frac{38.8 \times 0.9}{2} = 124 \text{ kN}$$

olarak bulunur. Kesme kuvvetinin bu değeri için boşluğun sol kenarındaki düşey donatı (15) bağıntısı

kullanılarak 1Ø12 etriye, (16) bağıntısı kullanılarak 4Ø12 diyagonal donatı bulunur.

Boşluğun sağ kenarı için maksimum kesme kuvveti yine 3. yüklemekten oluşur ve değeri;

$$V_r = V_m - \frac{P\ell_o}{2} = 106.565 - \frac{38.8 \times 0.9}{2} = 89.1 \text{ kN}$$

olarak bulunur. Kesme kuvvetinin bu değeri için boşluğun sağ kenarındaki düşey donatı (15) bağıntısı kullanılarak 1Ø10 etriye, (16) bağıntısı kullanılarak 3Ø12 diyagonal donatı bulunur. Boşluk kenarına yerleştirilecek düşey donatılar S420 olarak hesaplanmıştır. Bu donatılar boşluk kenarından itibaren 40 mm uzağa yerleştirilecektir. Diyagonal donatılar ise daha önce açıklandığı şekilde, boşluğun hem alt hem de üst kısmındaki köşelerine ayrı ayrı yerleştirilecektir.

Sehim

Kısa Süreli Sehim: Çeşitli kiriş parçalarının çatlamış kesit atalet momenti alınarak, $p=1.0g+1.0q$ işletme yükünün bütün açıklıklarda aynı anda bulunması halinde maksimum sehim A-B açıklığında ve A mesnedine 2.82 m mesafede bulunur. Sehimin değeri 1.56 mm'dir. Bu değer TS 500'de kısa süreli sehim için izin verilen değer altındadır.

$$\frac{L}{360} = \frac{7000}{360} = 19.44 \text{ mm} > \delta_i = 1.56 \text{ mm}$$

Uzun Süreli Sehim: 5 yıllık bir süre için hareketli yükün %50'sinin sistemde kaldığını varsayalım.

$$\rho' = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{923.64}{300 \times 545} = 5.649 \times 10^{-3}$$

(17) bağıntısından,

$$\lambda = \frac{2}{1 + 50 \times 5.649 \times 10^{-3}} = 1.56$$

olarak hesaplanır. $p=1.0g+1.0q=26$ kN/m için 1.56 cm olan ani sehim $p=1.0g+0.5q=20$ kN/m için doğru orantı yardımıyla 1.201 mm olarak bulunur. Buna göre uzun süreli sehim (18) bağıntısından,

$$\delta_t = 1.56 + 1.201 \times 1.56 = 3.43 \text{ mm}$$

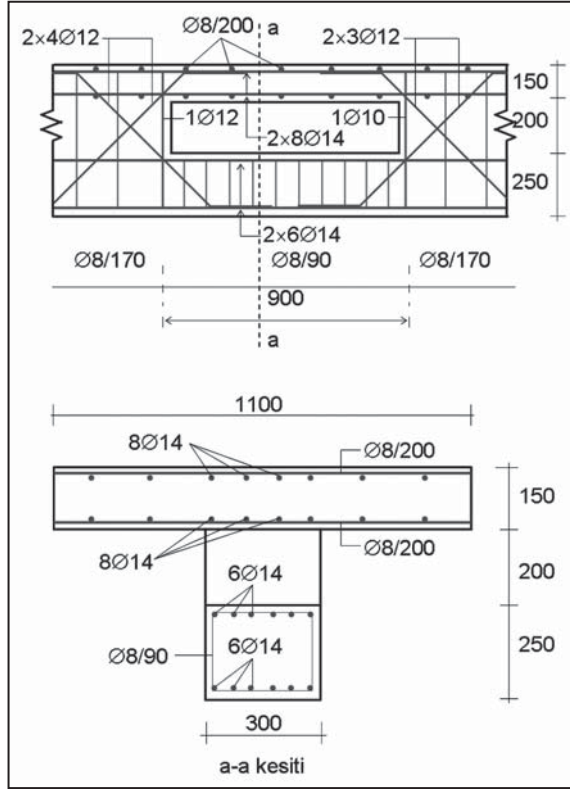
olarak hesaplanır. Bu değer TS 500'de uzun süreli sehim için kabul edilebilir sınır olan;

$$\frac{L}{240} = \frac{7000}{240} = 29.17 \text{ mm}$$

değerinden daha küçük olduğundan dizayn kabul edilebilir.

4. Adım: Donatı Detayları

Yukarıda açıklandığı şekilde kritik kesitler için hesaplanan enine, boyuna ve diyagonal donatılar detay çizimlerde gösterilir (Şekil 7).



Şekil 7 - Donatı Detayları

KAYNAKLAR

- [1] Pool B.P. and Lopes R., "Cyclically Loaded Concrete Beams with Web Openings", *ACI Journal*, Title no. 83-69, September-October, (1986) 757.
- [2] Mansur M.A. and Paramasivam P., "Reinforced Concrete Beams with Small Opening in Bending and Torsion", *ACI Journal*, Title no. 81-20, March-April, (1984) 180.
- [3] Hasnat, A. and Akhtaruzzaman A.A., "Beams with Small Rectangular Opening under Torsion, Bending, and Shear", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 113, No. 10, October, (1987) 2253.
- [4] Elçi H. Boşluklu Betonarme Kirişlerin Davranışı Boşluk Civarında Gerilme Dağılımının İncelenmesi, Doktora Tezi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (1998) 125.
- [5] Tan K.H.; Mansur M.A. and Huang L.M., "Reinforced Concrete T-Beams with Large Web Openings in Positive and Negative Moment Regions", *ACI Structural Journal*, V.93, No. 3, May-June, (1996) 277.
- [6] Mansur M.A.; Tan K.H. and Lee, S.L. "Collapse Loads of R/C Beams with Large Openings", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 110, No. 11, November, (1984) 2602.
- [7] Mansur M.A.; Tan K.H. and Lee S.L., "Design Method for Reinforced Concrete Beams with Large Openings", *ACI Journal*, Title no. 82-46, July-August, (1985) 517.
- [8] Tan K.H. and Mansur, M.A. "Design Procedure for Reinforced Concrete Beams with Large Web Openings", *ACI Structural Journal*, V. 93, No. 4, July-August, (1996) 404.
- [9] Mansur M.A.; Lee Y.F.; Tan K.H. and Lee S.L., "Tests on RC Continuous Beams with Openings", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 6, June, (1991) 1593.
- [10] ACI 318R-95, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*, ACI, Detroit, (1995).
- [11] Mansur, M.A. and Tan, K.H., "Concrete Beams with Openings", CRC Press LLC, New York, (1999) 220.
- [12] Mansur M.A.; Huang L.M.; Tan K.H. and Lee S.L., "Deflections of Reinforced Concrete Beams with Web Openings", *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 4, July-August, (1992) 391.
- [13] TS 500, *Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, (2000) 67.
- [14] Elçi H., *Düğüm Noktaları İdealleştirilmesinin Kesit Tesirlerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (1996) 116.
- [15] Oakberg R.G. and Weaver W.Jr., "Analysis of Frames with Shear Walls by Finite Elements", *Symposium on Application of Finite Elements Methods in Civil Engineering*, Vanderbilt University, November, (1969) 567-607.
- [16] DüNDAR C.; KIRAL E. ve MENGİ Y., *Yapı Mekaniğinde Bilgisayar Programları (Statik, Dinamik, Betonarme)*, Teknik Yayınevi, Ankara, (1986) 328.
- [17] ÇAKIROĞLU A., ÖZDEN E., ve ÖZMEN G., "Yapı Sistemlerinin Hesabı için Matris Metotları ve Elektronik Hesap Makinası Programları : Cilt-I, Cilt-II", İstanbul, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, (1992) 792.