



İNŞ-320 BETONARME 2

BAHAR DÖNEMİ

DERS NOTLARI

PROF DR. CENGİZ DÜNDAR





BAHAR YARIYILINDA İŞLENECEK KONULAR

7. KESME ETKİSİNDEKİ ELEMANLARIN TAŞIMA GÜCÜ

- *Kesme Donatısı Bulunmayan Elemanların Davranışı
- *Kesme Donatılı Elemanlar
- *TDY' ne Göre Kirişlerin Kesme Güvenliği (TDY 97)
- *Dolaylı Mesnetler
- *Zımbalama Etkisi
- *Kısa Konsollar

8. BETONARME YAPILARDA ve YAPI ELEMANLARINDA BURULMA

- *Basit Burulma
- *Burulma ve Eğilme
- *Burulma, Kesme ve Eğilme



9. BETONARME TEMELLER

- *Tekil Temeller
- *Birleşik Temeller
- *Sürekli Temeller
- *Radye Temeller

10. BETONARME DÖŞEMELER

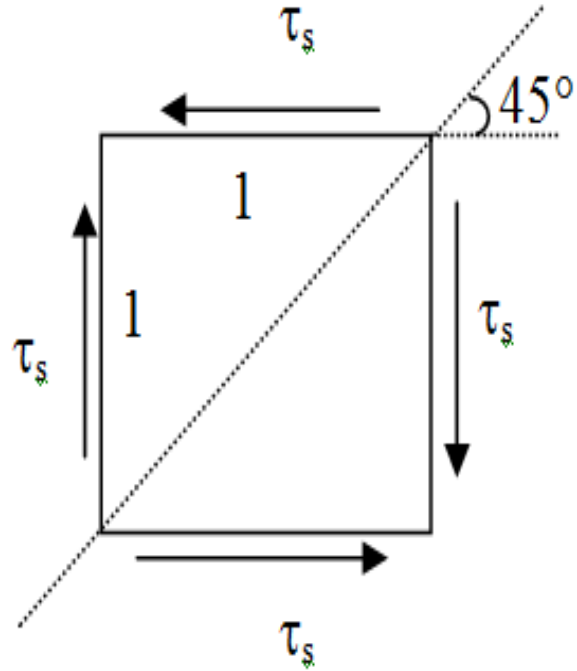
- *Plak döşemelerin elastik davranışı
- *Tek doğrultuda çalışan plak döşemeler
- *Tek doğrultuda çalışan dişli döşemeler
- *Çift doğrultuda çalışan plak döşemeler
- *Çift doğrultuda çalışan kirişsiz plak döşemeler
- *Çift doğrultuda çalışan döşemeler için genel yöntem



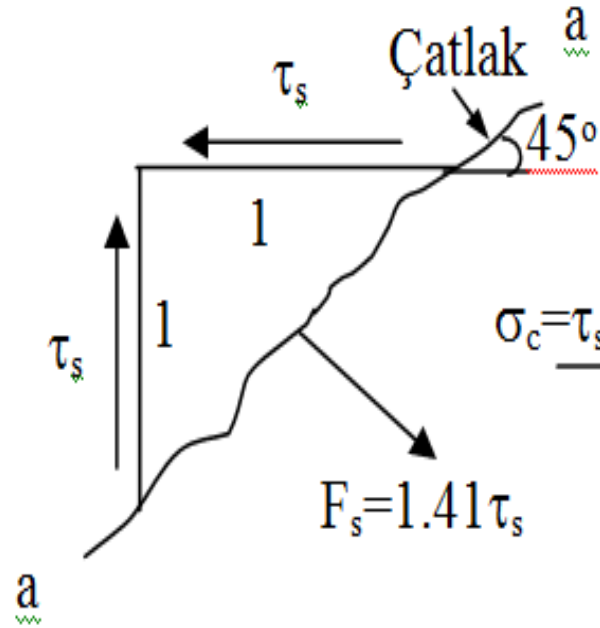
KESME ETKİSİNDEKİ ELEMANLARIN TAŞIMA GÜCÜ

Betonun kayma dayanımı oldukça yüksek olduğundan, betonarme elemanlarda kesme kırılmasına pek rastlanmaz. Buna karşın, kayma ve normal gerilmelerin neden olduğu asal çekme gerilmeleri betonun düşük çekme dayanımı nedeni ile önemli sorunlar doğurur.

Betonun kayma ve basınç dayanımı çekme dayanımından yüksek olduğundan basit kayma durumunda dahi kırılma, asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşur.

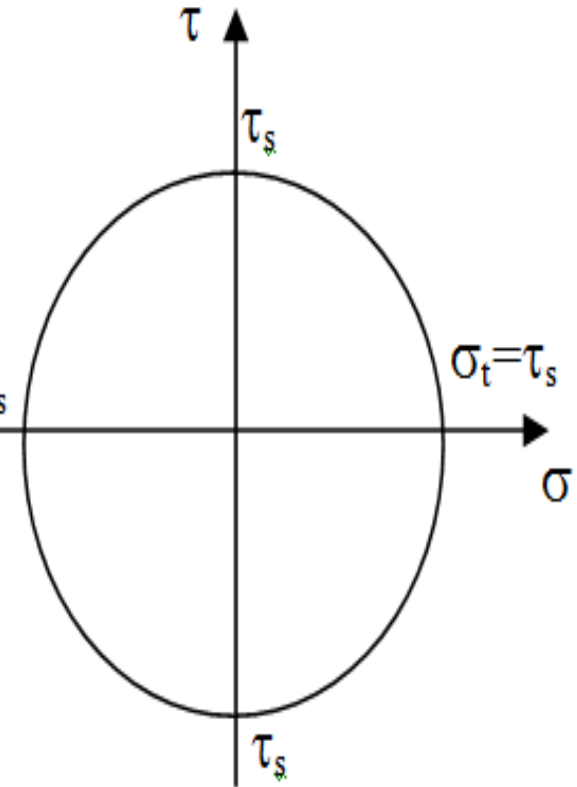


(a)



$$\sigma_t = 1.41\tau_s / 1.41 = \tau_s$$

(b)



(c)

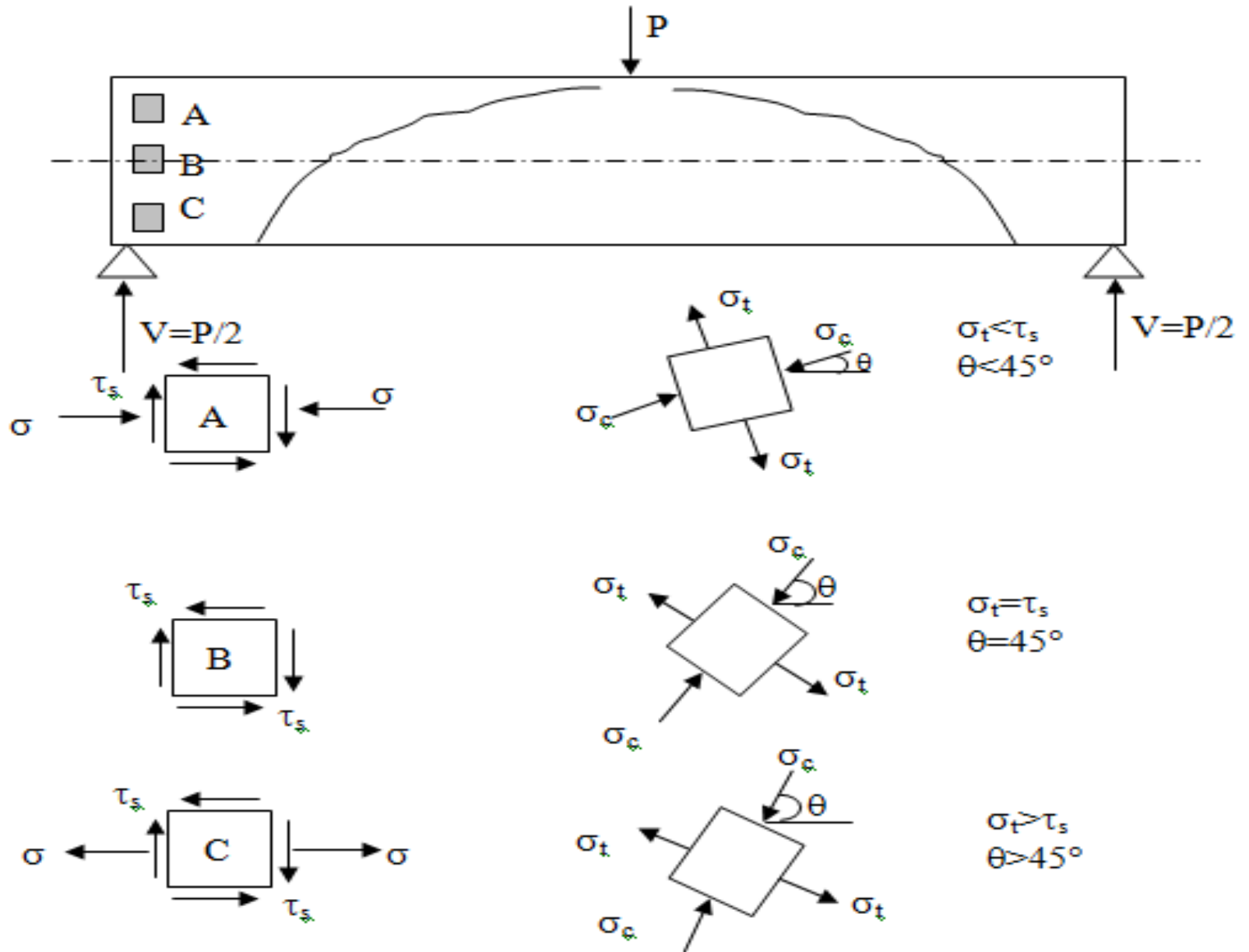


Asal çekme gerilmeleri, kayma gerilmelerinin etkidiği yüzeye 45° lik açı yapan bir düzlem üzerinde etkiyeceğinden, kırılma, asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan eğik bir çatlakla meydana gelecektir. Bu tür bir çatlama, eğik çatlak, buna neden olan asal gerilme de, eğik çekme olarak adlandırılır.

Asal çekme gerilmeleri ile oluşan bu tür eğik çatlaklar son derece tehlikelidir ve gevrek kırılmaya neden olabilirler. Kayma gerilmeleri ile normal gerilmelerin etkidiği durumlarda, eğik çatlağın eğimi, asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlıdır. Şekilde simetrik yüklenmiş bir betonarme kiriş, tarafsız eksenin üstünde ve altında kalan A, B, C olarak işaretlenen üç elemana etkiyen gerilmeler ile bu gerilmelerin oluşturduğu asal gerilmeler gösterilmektedir.



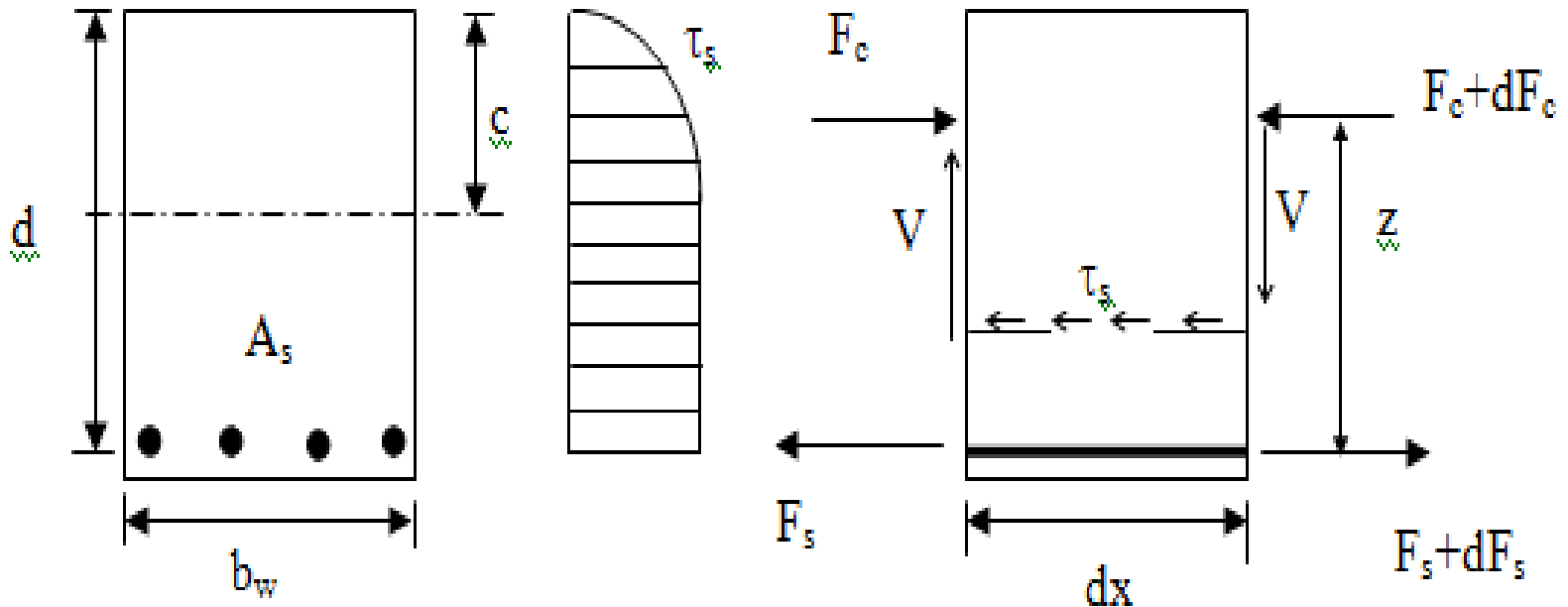
Tarafsız eksen düzeyinde normal gerilmeler sıfır olduğundan, çatlama kiriş eksenine 45° lik bir açıda oluşmaktadır. Normal gerilmelerin varlığı, hem asal çekme gerilmelerinin büyüklüğünü hem de eğimini etkilemektedir. Çatlama, asal çekme gerilmelerine dik yönde oluştuğundan kirişin alt yüzünden üst yüzüne doğru uzayan eğik çatlağın eğimi azalmaktadır. Deneysel veriler de çatlak eğimi ile ilgili yapılan bu kuramsal irdelemeyi doğrulamaktadır.





Betonarme elemanlarda kayma gerilmelerinin sorun yaratmadığını, çatlama ve kırılmalara, bu gerilmelerin de katkısıyla oluşan asal çekme gerilmelerinin neden olduğu ilk kez RITTER tarafından öne sürülmüştür. Daha sonraları MÖRSCH bazı deneyler yaparak kesme kuvvetlerinin neden olduğu eğik çatlama ve kırılmaları incelemiş ve Ritter'in ortaya attığı tezi geliştirerek savunmuştur. Mörsch önerdiği hesap yönteminde asal çekme gerilmeleri yerine, kayma gerilmelerini temel almıştır. Bunun nedeni Mörsch'ün kayma gerilmelerinin asal çekme gerilmeleri için bir ölçü olacağına inanması idi.

Kayma gerilmelerinin hesabı için, çatlamış bir betonarme kesit ele alınmış ve tarafsız eksen üzerinde (basınç bölgesi) kayma gerilmelerinin dağılımı, klasik teoriye uygun olarak ikinci dereceden bir eğri ile ifade edilmiştir. Tarafsız eksen altında beton çatlamış olacağından, bu bölgede kayma gerilmelerinin sabit olduğu varsayılmıştır.



$$\tau_s b_w dx = dF_s = \frac{dM}{z}, \quad \text{Birim kenetleme kuvveti} = \frac{dF_s}{dx}$$

$$\frac{dM}{dx} = V \quad \tau_s = \frac{V}{b_w z} \cong \frac{V}{0.9 b_w d}$$

Bu denklemin çıkarılmasında şekildeki gerilme dağılımı temel alınmış ve hesaplar, donatıdaki kuvvetin dx uzaklığında dF_s kadar arttığına göre yapıldığından, kenetlenmenin tam olduğu varsayılmıştır. Şekilde gösterilen dF_s / dx e bölündüğünde birim kenetleme kuvveti elde edilir.



Mörsch, kirişte bir kez eğik çatlama oluştuktan sonra betonun kesme dayanımına katkıda bulunamayacağını varsaymış ve geliştirdiği kafes kiriş analojisi ile kayma donatısının hesaplanabileceğini göstermiştir. Aynı yıllarda İsviçre’de Ritter, Mörsch’den bağımsız olarak kafes kiriş analojisini geliştirmiştir. Bu yaklaşım “Mörsch-Ritter Kafes Kiriş Analojisi” olarak bilinmektedir.

1950 yılından sonra Avrupa ve ABD’de yapılan deneysel çalışmalar sonucunda betonarme kirişlerin kesme dayanımını etkileyen ve Mörsch teorisinde dikkate alınmayan bazı değişkenler bulunmuştur.



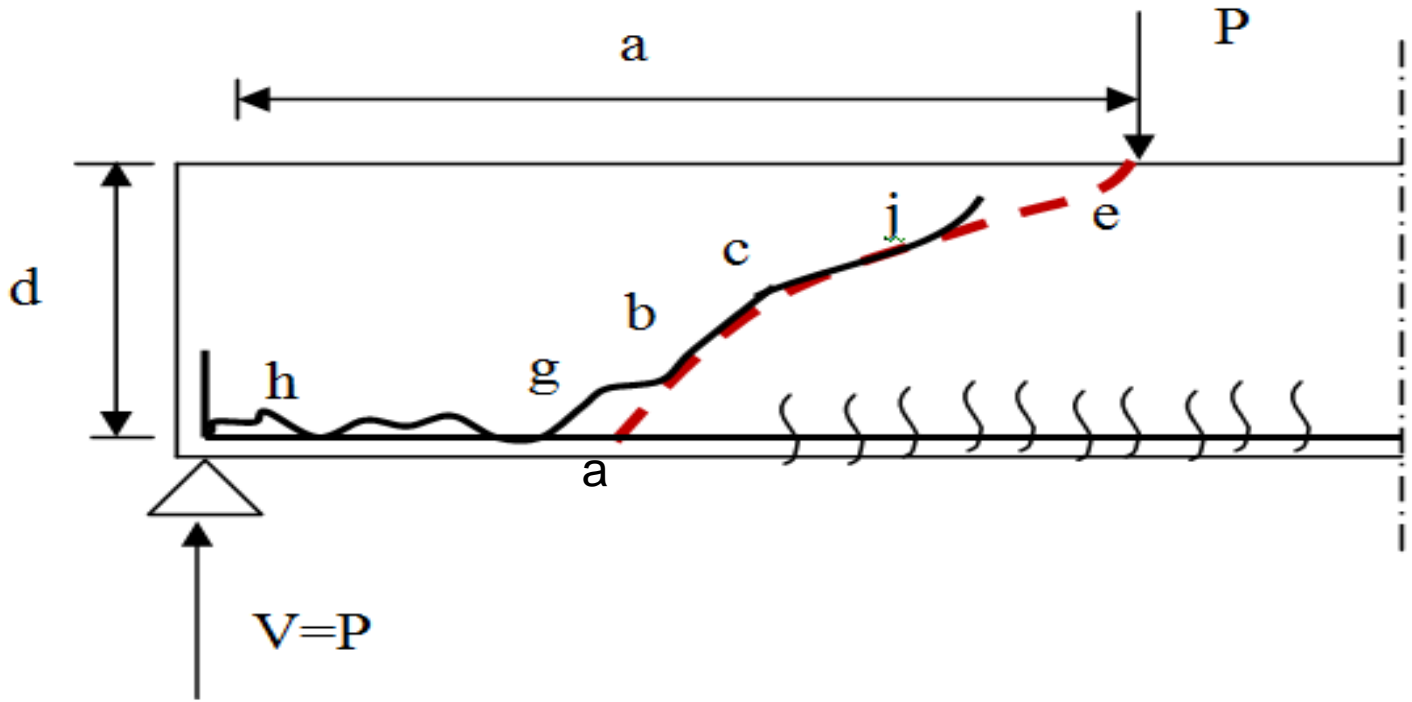
Çalışmalar sonucunda Mörsch teorisinin ancak kenetlenmenin tam olduğu durumlar için geçerli olduğunu göstermiştir. Ayrıca klasik kafes kiriş analojisinin bazı durumlarda gerçeği yansıtmadığı gözlenmiştir.

Son yıllarda Avrupa'da geliştirilen "Plastik Kafes Kiriş Analojisi" ve Prof. Collins'in öncülüğünde geliştirilen "Basınç Alanları Teorisi"ne dayanan yöntemler bazı yönetmeliklerde yer almaktadır. Günümüzde büyük ilgi gören "Çubuk Analojisi" de kesme donatısı hesabında yararlı olmaktadır.



KAYMA DONATISI BULUNMAYAN ELEMANLARIN DAVRANIŞI

Yapılan çok sayıda deneysel araştırmalar, kırılma biçiminin “kesme açıklığı/etkili derinlik” (a/d) oranına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. (a/d) nin çok büyük olduğu durumlarda ($a/d > 7$) kiriş, genellikle eğilme kırılması ile taşıma gücünü kaybeder. Kırılma üzerinde kesme kuvvetinin etkisi olmaz. Bunun temel nedeni, kesme açıklığı büyük olduğundan eğilmedeki taşıma gücüne erişildiğinde kesme kuvvetinin, dolayısıyla tarafsız eksen ve onun altında oluşan asal çekme gerilmelerinin düşük olmasıdır.



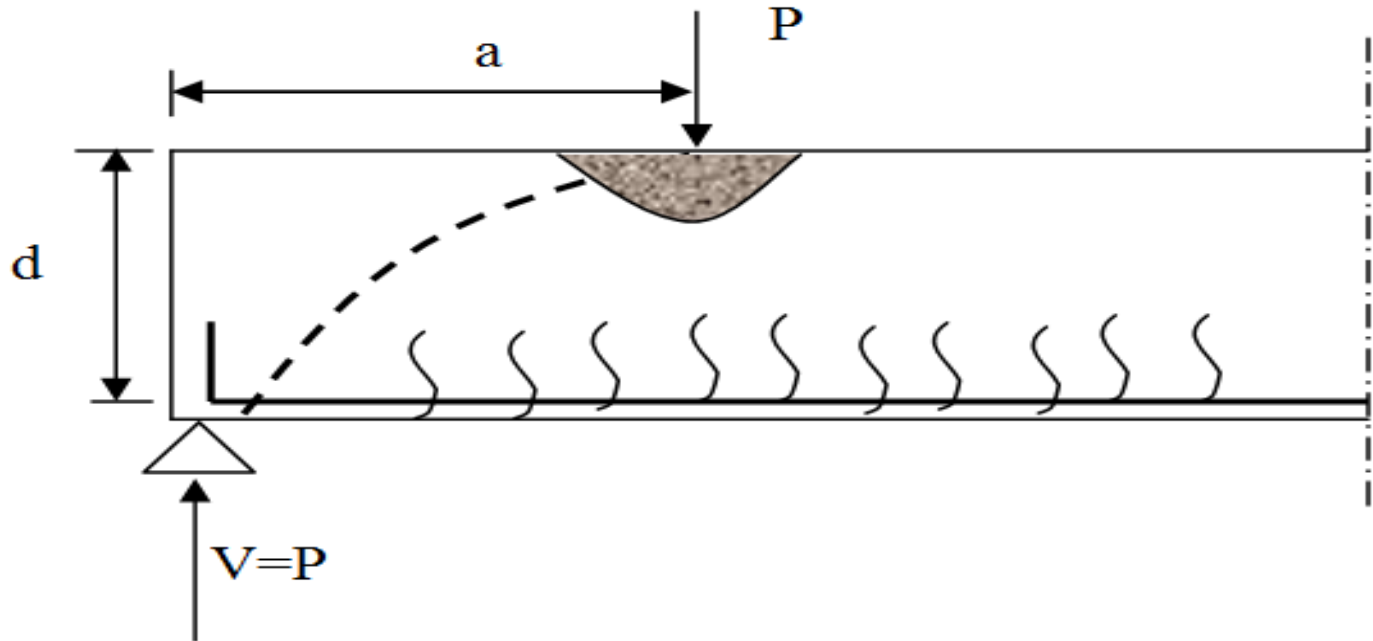
$7 > a/d > 3$ olması halinde kiriş taşıma gücünü kesme kırılması ile kaybeder. Bu durumda P kesme kuvvetinin artması ile mesnete en yakın bulunan (a-b) çatlak yüklenme noktasına doğru ilerler ve gittikçe bir eğik çatlak görünümünü alır. Bu çatlak **eğilme-kesme** çatlak ya da çoğu zaman **eğik çatlak** olarak adlandırılır (a-b-c) çatlak.



P kesme kuvvetinin artması ile kırılma genellikle iki biçimde oluşabilir. (a/d) oranı bağıl olarak büyükse eğik çatlak (e) ye doğru hızla ilerler ve giriş iki parçaya ayrılarak göçer. Bu kırılma biçimi çoğu zaman **eğik çekme kırılması** olarak adlandırılır.

Bu tür kırılmada göçme yükü eğik çatlağın oluşumuna yol açan yükten çok az büyük olur. Boyuna donatının uçları kancalı ise boyuna donatıdaki artan kuvvet etkisiyle, kancaları kuşatan beton parçalanıncaya ve göçme oluşuncaya dek giriş **iki mafsallı bir kemer** gibi çalışır. Bu kırılma biçimi çoğu zaman **kesme-çekme kırılması** ya da **kesme aderans kırılması** olarak adlandırılır.

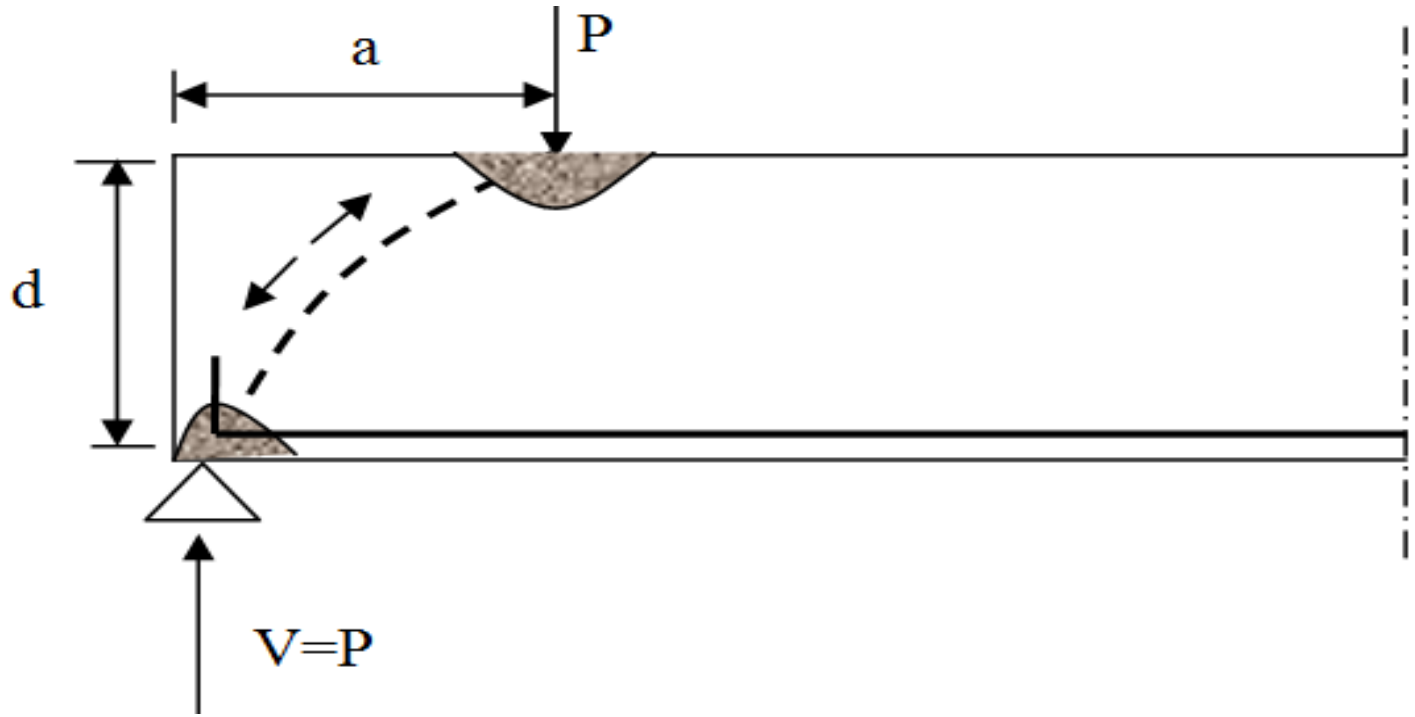
$1 < a/d < 3$ olması halinde eğik çatlak çoğunlukla bağımsız olarak oluşur. Bu tür çatlamadan sonra kiriş, çoğunlukla dengede kalır. P kuvvetinin artması ile çatlağın basınç bölgesine girmesine ve yükleme noktasına doğru ilerlemesine neden olur. Bu kırılma biçimi **kesme basınç kırılması** olarak adlandırılır. Bu tür kırılmada göçme yükü eğik çatlamaya neden olan yükün kimi zaman iki katı olabilir.



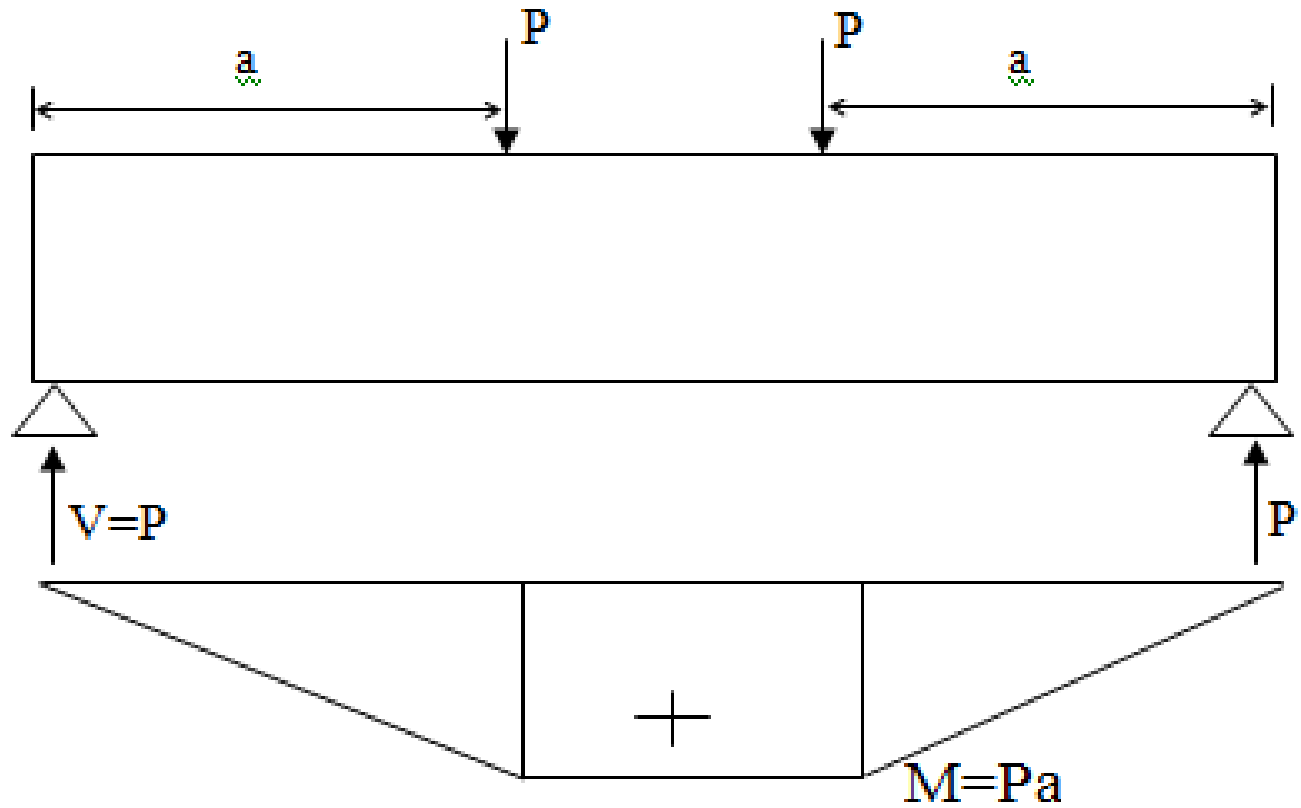


$a/d < 1$ olduğu durumlarda kirişin davranışı derin kiriş davranışına yaklaşır. Eğik çatlak yaklaşık olarak mesnet ile yükleme noktası arasında doğrusal olarak gelişir. Bu durumda çatlak, öncelikle yükleme noktasından mesnete doğru aktarılan basınç kuvvetinin parçalayıcı etkisi ile oluşur ve çoğu zaman kirişin alt yüzünden aşağı yukarı $d/3$ uzaklığında ortaya çıkar. P kuvvetinin artması ile eğik çatlak ardışık olarak yükleme ve mesnet kesimlerine doğru ilerler.

Çatlak yükleme noktasındaki ya da çoğu zaman mesnet noktasındaki beton kesime yeteri ölçüde girince betonda ezilme kırılması oluşur. Derin kiriş kırılması için göçme yükü çoğunlukla eğik çatlağın oluşumuna yol açan yükün birkaç katı olur.



a/d oranı yalnız noktasal yüklü kirişler için geçerli olduğundan bu değişkeni yayılı yük durumunu kapsayacak şekilde M/Vd olarak değiştirmek uygun olacaktır.

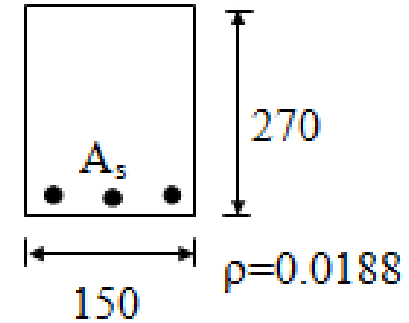
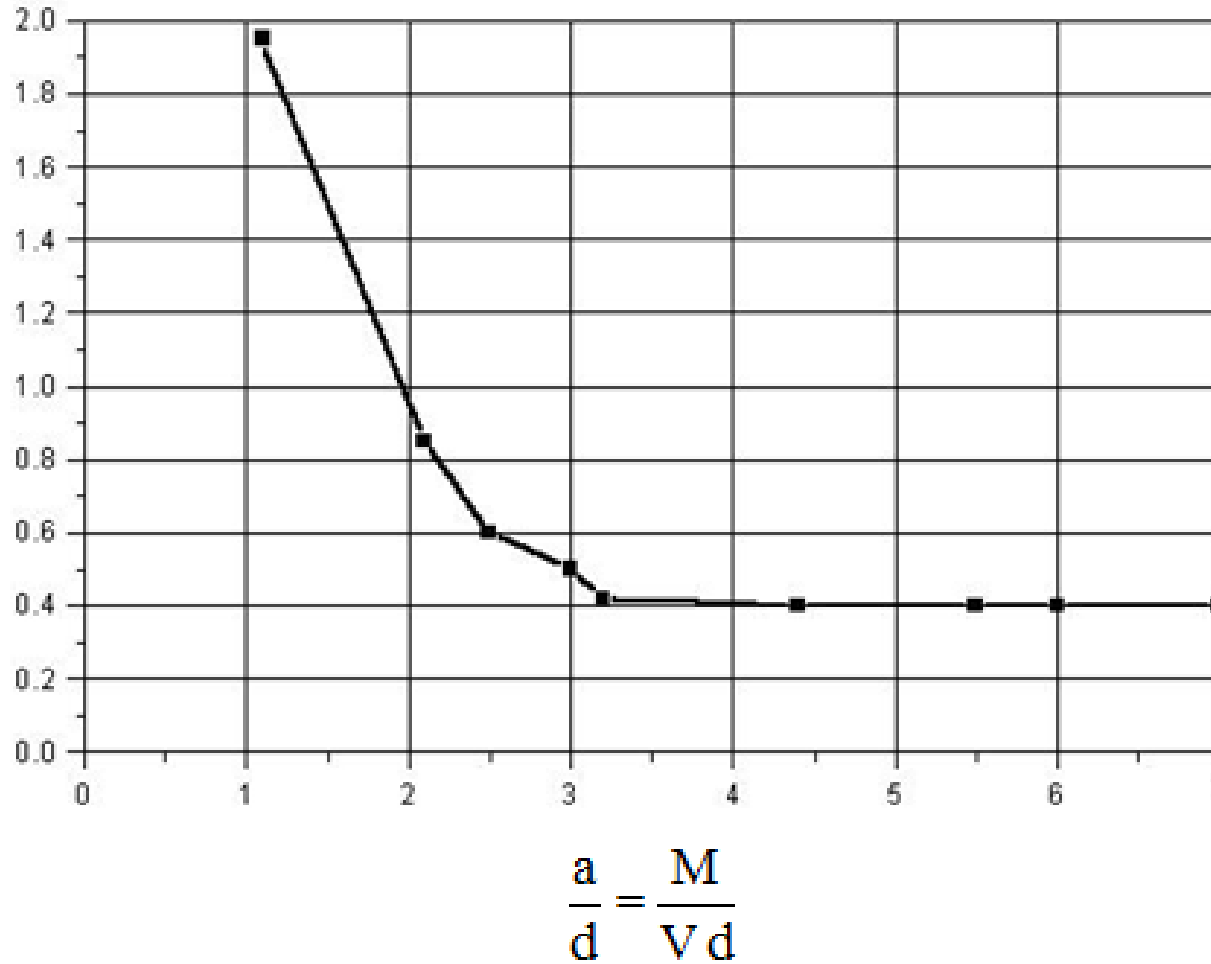


$\left(\frac{a}{d}\right)$ $\left(\frac{M}{Vd}\right)$ Yayılı yük olması halinde;

$$M=P a$$

$$\frac{M}{Vd} = \frac{Pa}{Vd} = \frac{Pa}{Pd} = \frac{a}{d} \text{ elde edilir.}$$

V_u (kN)



Kesme dayanımının $\frac{M}{Vd}$ oranına göre değişimi

$7 > \frac{M}{Vd} > 3$ olduğunda (gerçek eğik çekme kırılması) kesme

dayanımı hemen hemen sabit kalırken $\frac{M}{Vd} < 3$ olduğu durumlarda

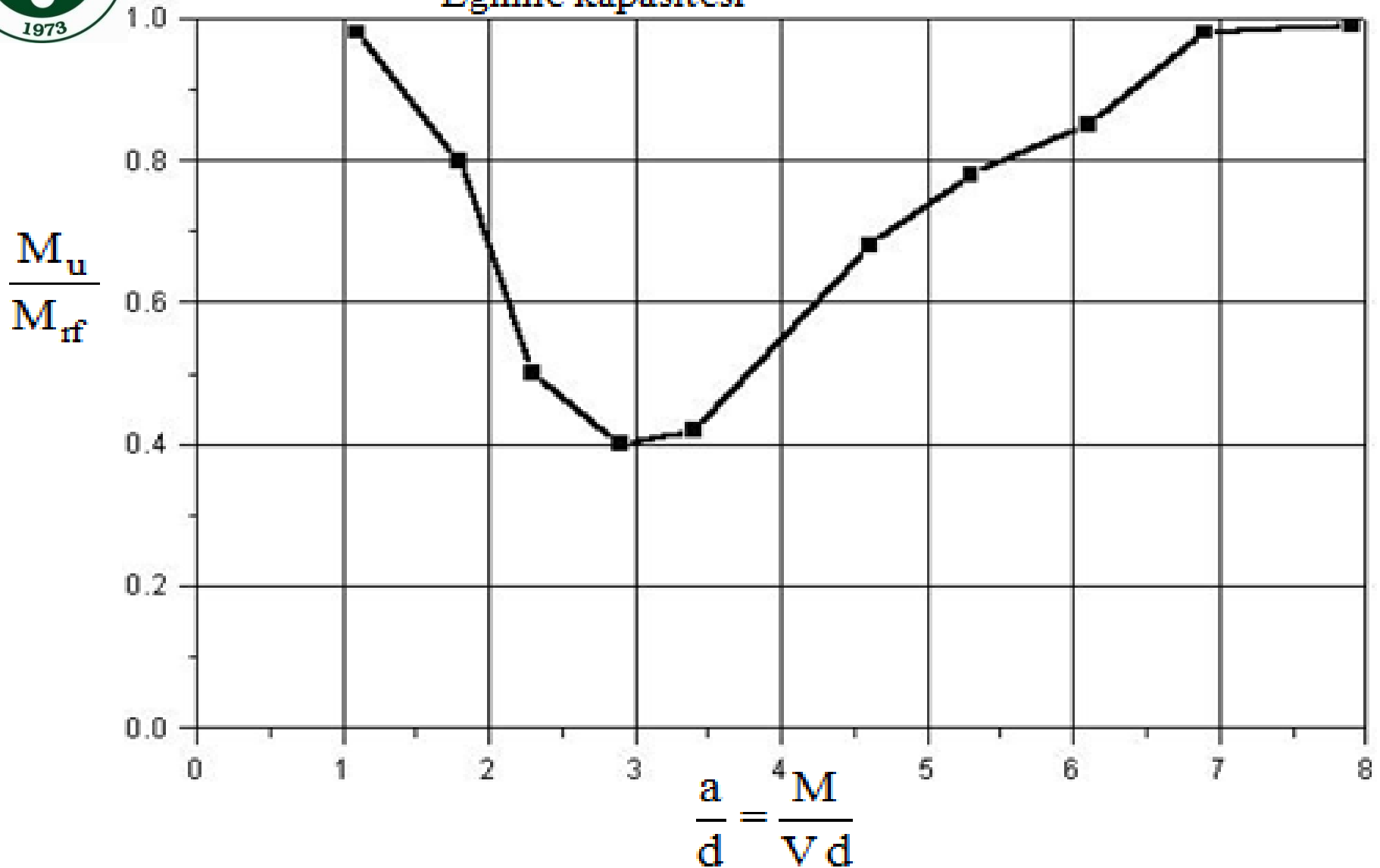
kesme dayanımı $\frac{M}{Vd}$ oranı azaldıkça artmaktadır.

Aynı deney sonuçları kullanılarak $\frac{M_u}{M_{rf}}$ oranının $\frac{M}{Vd}$ ile değişimi gösterilmiştir.

M_u : Deneyde erişilen en büyük moment

M_{rf} : Söz konusu kirişin eğilmede taşıma gücüdür.

Eğilme kapasitesi



$\frac{M}{Vd} \geq 7$ olduğunda kiriş eğilme kapasitesine ulaşırken $\frac{M}{Vd} < 7$

olduğunda erişememektedir. $\frac{M}{Vd}$ yaklaşık 1 veya daha küçük olunca eğilme kapasitesine yeniden ulaşabilmektedir.

Kesme kırılması (eğik çekme), $\frac{M_u}{M_{rf}}$ oranının birden küçük olduğu durumlarda söz konusu olduğundan kritik bölgenin yaklaşık olarak $1 < \frac{M}{Vd} < 7$ olduğu söylenebilir.

Deney elemanı eğilmeden de, çekmeden de kırılrsa $\frac{M}{Vd} \geq 3$ olduğu durumlarda davranışa eğilme hakim olur. $\frac{M}{Vd} < 3$ olduğunda gergili kemer davranışı etkili olmaya başlamaktadır. $\frac{M}{Vd} \cong 3$ değerinde eğrinin yön değiştirmesi ve $\frac{M}{Vd}$ azaldıkça kapasitenin artmasının temel nedeni budur.



Gergili kemer davranışının eğilme davranışının yerini almaya başladığı durumda $\frac{M}{Vd} < 3$ donatıdaki gerilme hemen hemen sabit kaldığından, donatıdaki gerilmenin değiştiği varsayımına dayanan klasik Mörsch teorisinin geçerli olmayacağı açıktır.









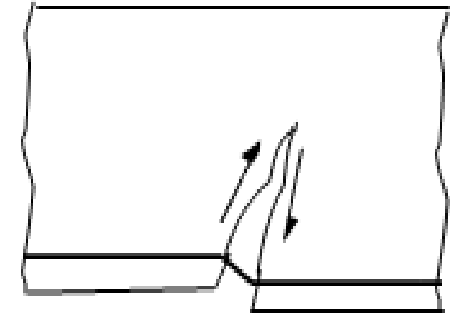
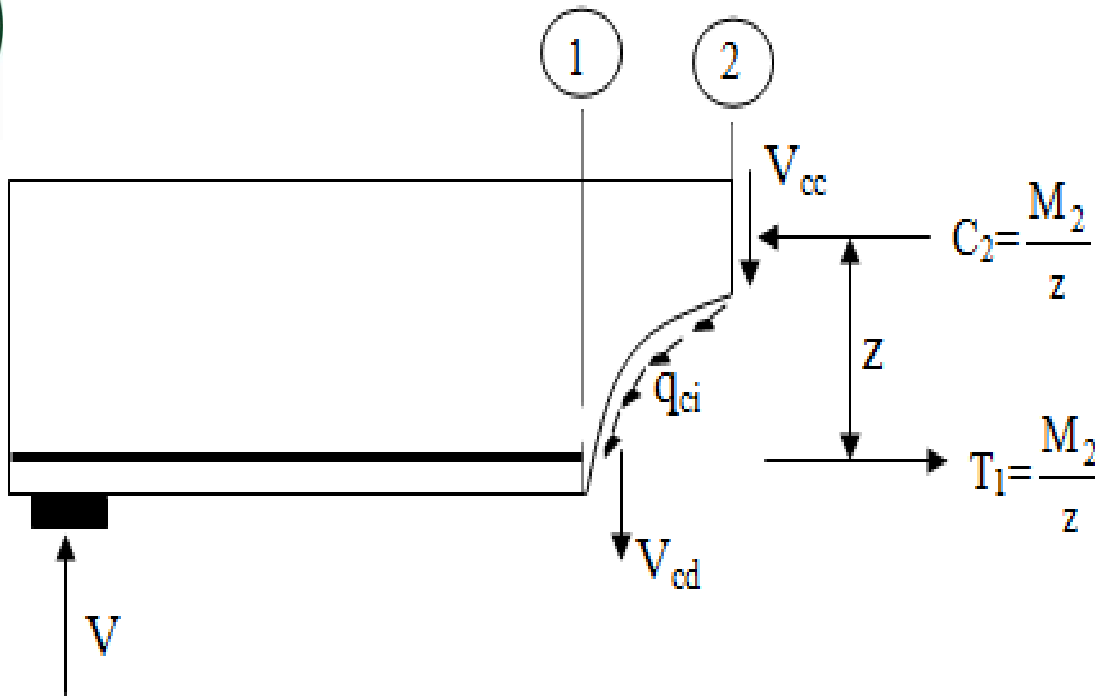






Kesme Kuvvetinin Taşınması ile İlgili Mekanizmalar/Kesme Kuvvetini Dengeleyen İç kuvvetler

İki simetrik noktasal yük altında kirişte, eğik çatlakların oluşması ile gerilmelerde önemli değişimler olur. Bu değişimleri görebilmek için ve kirişin çatlak oluştuğundan sonra nasıl yük taşıdığını anlayabilmek için kirişin çatlak boyunca kesilmesi ile elde edilen serbest cisim diyagramı aşağıda verilmiştir. Şekilden görüleceği gibi eğik çatlak oluştuğu bir kirişte uygulanan kesme kuvveti, üç ayrı iç kuvvetle dengelenmektedir.



Kaldıraç etkisi ve
çatlak içi gerilmeler

- Çatlamamış basınç bölgesinde taşınan kesme kuvveti (V_{cc}),
 - Çekme donatısınca taşınan kesme kuvveti (V_{cd}),
 - Çatlak yüzeyinde oluşan "çatlak içi kayma gerilmeleri" (q_{ci}).
- Bu gerilmelerin toplamının düşey bileşkesi (V_{ci}) uygulanan kesme kuvvetinin taşınmasına katkıda bulunacaktır.

Eğik çatlağın oluşturduğu kirişte düşey kuvvetler dengesi yazılırsa

$$V = V_{cc} + V_{cd} + V_{ci}$$

Çatlak oluştuğunda iç kuvvetlerin toplamı, uygulanan kesme kuvvetini taşımaya yeterli ise kiriş yük taşımaya devam eder ($\frac{M}{V_d} < 3$).

Tersi durumda ($3 < \frac{M}{V_d} < 7$) ilk çatlamanın oluşması ile denge sağlanmadığından kiriş aniden kırılır.

Şekilden, eğik çatlamanın oluşması ile çekme donatısında gözlenen ani gerilme sıçramasının nedeni de kolayca görülebilir. Donatıdaki T_1 kuvveti çatlak oluşmadan önce 1 ile gösterilen moment ile orantılıdır ($T_1 = \frac{M_1}{z}$). Çatlağın oluşması ile $T_1 = C_2$ olması

gerektiğinden T_1 , 2 nolu kesitteki moment ile orantılı olmak durumundadır ($T_1 = \frac{M_2}{z}$). $M_2 > M_1$, T_1 kuvvetinin dolayısıyla donatıdaki gerilmenin önemli ölçüde artması gerekir.

Kesme açıklığı büyük olduğu durumlarda (yaklaşık $3 < \frac{M}{V_d} < 7$) eğik çekme dayanımının kırılma yükü ile aynı olduğu $V_{cr} = V_u$, kesme açıklığı küçük olduğu durumlarda ise ($\frac{M}{V_d} < 3$) kırılma yükü eğik çekme dayanımından yüksek çıkmaktadır.



EĞİK ÇATLAMA DAYANIMI

Yapılan deneysel ve analitik çalışmalar, kırılmayı tanımlayan kesme dayanımının belirlenmesinin zor ve karmaşık olduğunu, buna karşın eğik çatlama dayanımının daha kolay belirlenebileceğini göstermiştir. Kiriş davranışını önemli ölçüde etkileyen ve gerilme uyumuna neden olan eğik çekme çatlağının oluştuğu andaki kesme kuvvetinin (eğik çekme dayanımı) belirlenmesi yararlı ve gereklidir.

Prof. Viest klasik mukavemet denklemleri aracılığı ile hesapladığı asal çekme gerilmesini, betonun çekme dayanımına eşitleyerek eğik çekme dayanımını saptamaya çalışmıştır. Elde ettiği denklemlerdeki sabitleri deneysel verilerden faydalanarak belirleyen Viest, çekme dayanımı için aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir.

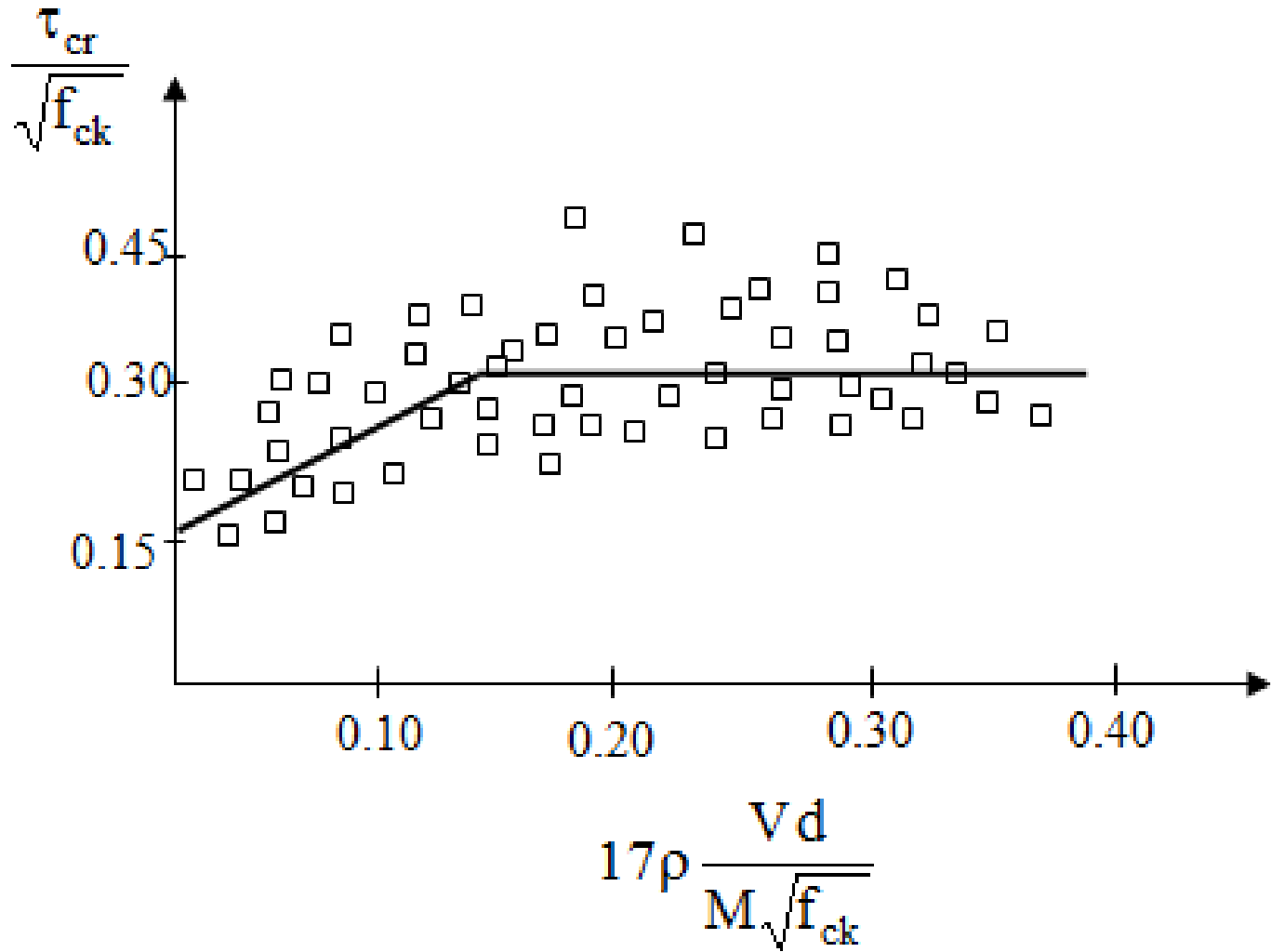
$$V_{cr} = \left[0.52 \sqrt{f_{ck}} + 175 \rho \frac{Vd}{M} \right] b_w d \leq 0.93 \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (\text{metrik})$$

$$V_{cr} = \left[0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17 \rho \frac{Vd}{M} \right] b_w d \leq 0.3 \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (\text{SI})$$

TS500-2000 ve tüm çağdaş yönetmeliklerde ortalama kayma gerilmesi;

$$\tau_s = \frac{V}{b_w d} \quad \text{Olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda denklem;}$$

$$\frac{\tau_{cr}}{\sqrt{f_{ck}}} = \left[0.16 + 17 \rho \frac{Vd}{M} \frac{1}{\sqrt{f_{ck}}} \right] \leq 0.3 \quad (\text{SI})$$



ACI yönetmeliğinde;

$$V_{cr}=0.16 \sqrt{f_{ck}} b_w d$$

kullanılabileceği belirtilmiştir. $0.16 \sqrt{f_{ck}}$ çok emniyetli yönde bir alt sınır oluşturmaktadır. Hesaplarda kullanılırken bu değer ACI güvenlik katsayısı $\phi=0.85$ ile çarpılmalıdır.

TS500-2000'de eğik çekme dayanımı;

$V_{cr}=0.65 f_{ctd} b_w d$ olarak tanımlanır. Bu ifade ACI tarafından önerilen ifade ile uyumludur.

TS500 de ACI daki alt sınır olan;

$$0.85 * 0.16 * \sqrt{f_{ck}} \cong 0.14 \sqrt{f_{ck}} = 0.4 f_{ctk} = 0.6 f_{ctd} \text{ temel alınmıştır.}$$

$$f_{ctk} = 0.35 \sqrt{f_{ck}}$$

ACI yönetmeliğinde eğik çekme dayanımını belirleyen ifade;
 $(V_{cr} = \phi \cdot 0.16 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d)$, eksenel yükü içeren bir faktörle
çarpılarak değiştirilmelidir.

$$N_d = \text{çekme ise, } V_{cr} = \phi \cdot 0.16 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \left\{ 1 - 0.3 \frac{N_d}{A_c} \right\}$$

$$N_d = \text{basınç ise, } V_{cr} = \phi \cdot 0.16 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \left\{ 1 + 0.07 \frac{N_d}{A_c} \right\}$$

Denklemdaki N_d hesap eksenel yükü, A_c ise brüt beton alanıdır.

TS500 de ACI da izlenen yol tercih edilmiştir.

$$N_d = \text{çekme ise, } V_{cr} = 0.65 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \left(1 - 0.3 \frac{N_d}{A_c} \right)$$

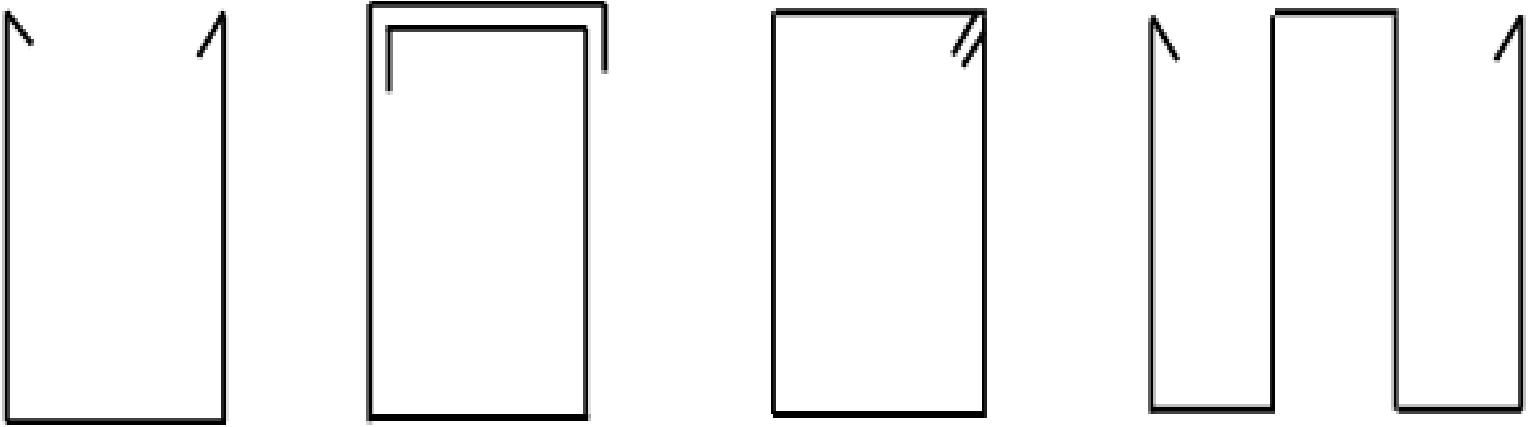
$$N_d = \text{basınç ise, } V_{cr} = 0.65 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \left(1 + 0.07 \frac{N_d}{A_c} \right)$$

KAYMA DONATILI ELEMANLAR

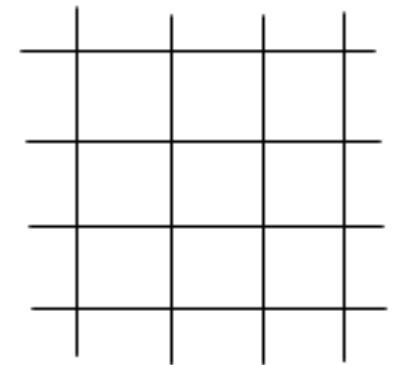
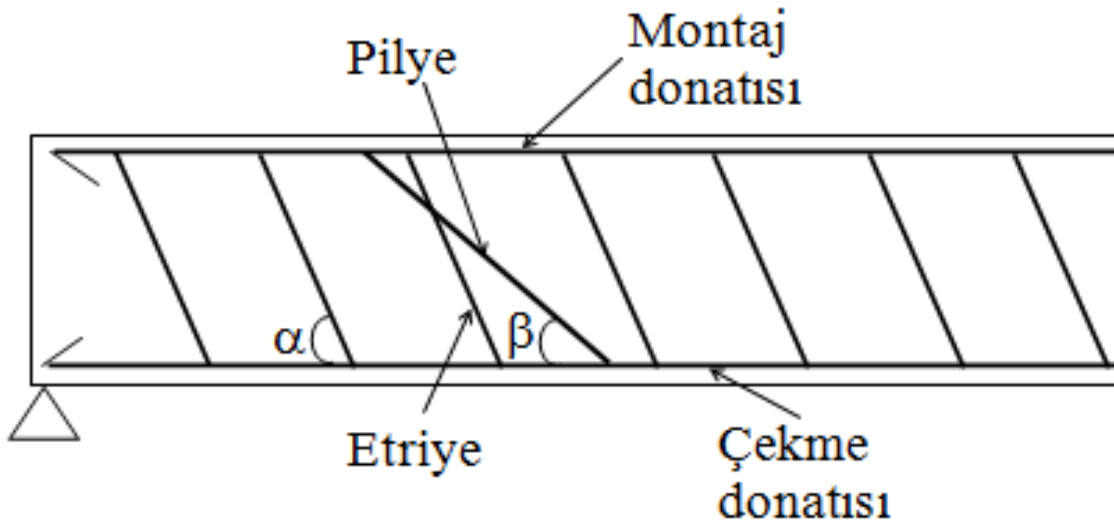
Kesme gerilmelerinden oluşan eğik çekme gerilmelerini salt betonla karşılamak güvenli ve ekonomik değildir. Ülkemizde kullanılan yönetmeliğe göre, kesme gerilmelerinin düzeyi ne olursa olsun eleman boyunca kesme donatısı bulundurulması zorunlu kılınmıştır.

Kayma donatısı genellikle üç türlü olabilir. Bu üç tür ayrı veya birlikte kullanılabilir.

- * Etriyeler
- * Pilyeler
- * Hasır donatı



Etriyeler



Hasır donatı

$$45^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}, \quad \text{genellikle } \alpha = 90^{\circ}$$



Etriyeler bireysel çubuklardır. Bunlar boyuna donatıya 45° veya daha büyük açı yapacak şekilde belirli (s) aralıkları ile yerleştirilir. Genellikle bu açı 90° olur.

Pilyeler çekme donatısının kiriş eksenine bir β açısı ile bükülmesiyle yapılır. Genellikle bu açı 45° dir. Yapılan çalışmalar pilyelerin kesme açısından etriyeler kadar etkili olmadığını kanıtlamıştır.

Pilyeler kullanıldığında çatlak genişliğinin etriyelere oranla çok daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca deprem etkisi altında bir tersinme söz konusu olduğundan asal çekme gerilmeleri pilyeye dik yönde oluşur ve pilyeler tamamen etkisiz kalır.



Tablalı kirişlerde oluşan eğik çatlakların, tabla düzeyine ulaştıklarında yatay bir yön izleyerek tablayı gövdeden ayırdıkları gözlenmiştir. Bu gibi durumlarda etriye adeta bir dikiş donatısı gibi davranarak, tablanın gövdeden ayrılmasına engel olur. Pilyeler bu konuda etriyeler kadar etkili değildir.

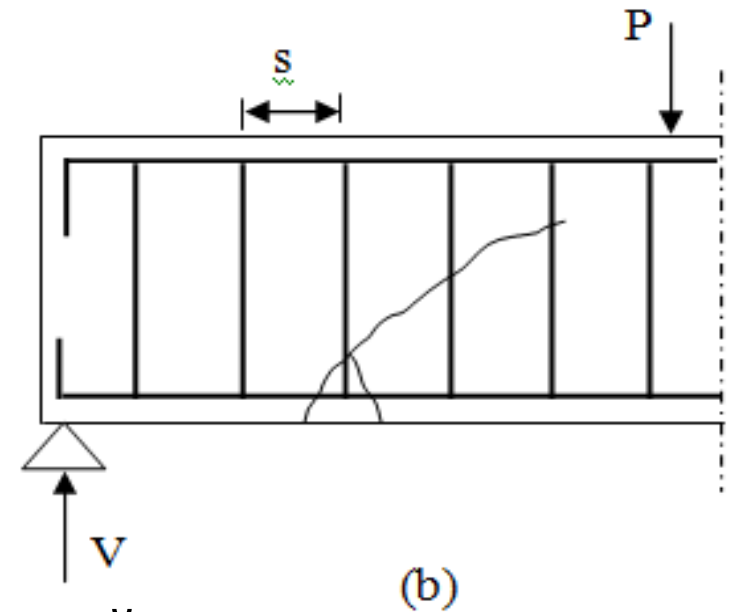
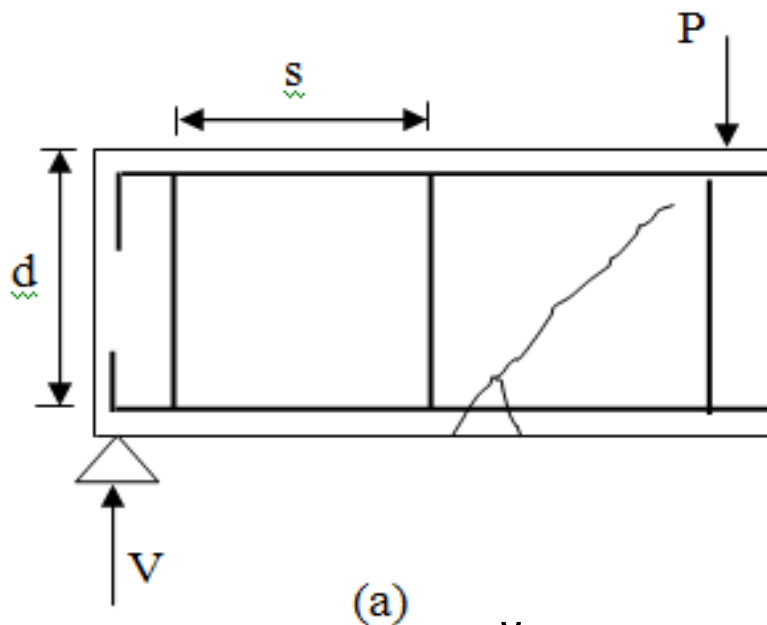
Hasır donatı karesel bir ağ oluşturduğundan, asal çekme gerilmelerinin yönü ne olursa olsun etkili olabilmektedirler.



Kayma Donatılı Elemanların Davranışı:

Kayma donatısının temel işlevi elemanın kesmeden kırılmasını önleyerek, eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır ($M_u > M_{rf}$).

Yapılan deneyler kayma donatılı bir kirişin, eğik çatlama oluşuncaya kadar kayma donatısız bir kiriş gibi davrandığını göstermiştir. Eğik çatlağın oluşması ile çatlakla kesişen etriyelerde büyük gerilmeler oluşmaktadır. Dolayısıyla bu aşamadan sonra etriyeler etkili olmaya başlamıştır. Etriyeler çok seyrek yerleştirildiği takdirde oluşacak çatlaklar çok az sayıda etriye ile kesişeceğinden etriyelerin hiçbir yararı olmayacaktır (**Şekil (a)**). Sık etriye yerleştirildiğinde oluşacak çatlaklar birden fazla etriye ile kesişeceğinden bu etriyeler daha etkili olacaktır (**Şekil (b)**).



Etriye çubuğunun taşıyabileceği çekme kuvveti, etriye alanı ve akma gerilmesi ile orantılı olduğundan yerleştirilecek etriyenin çapıda önemlidir.

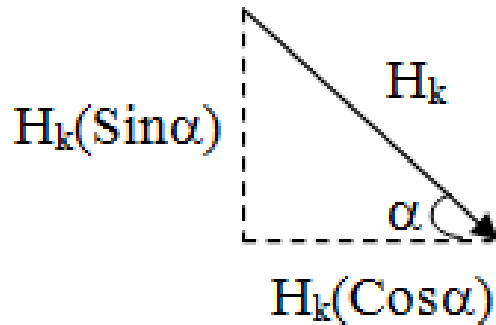
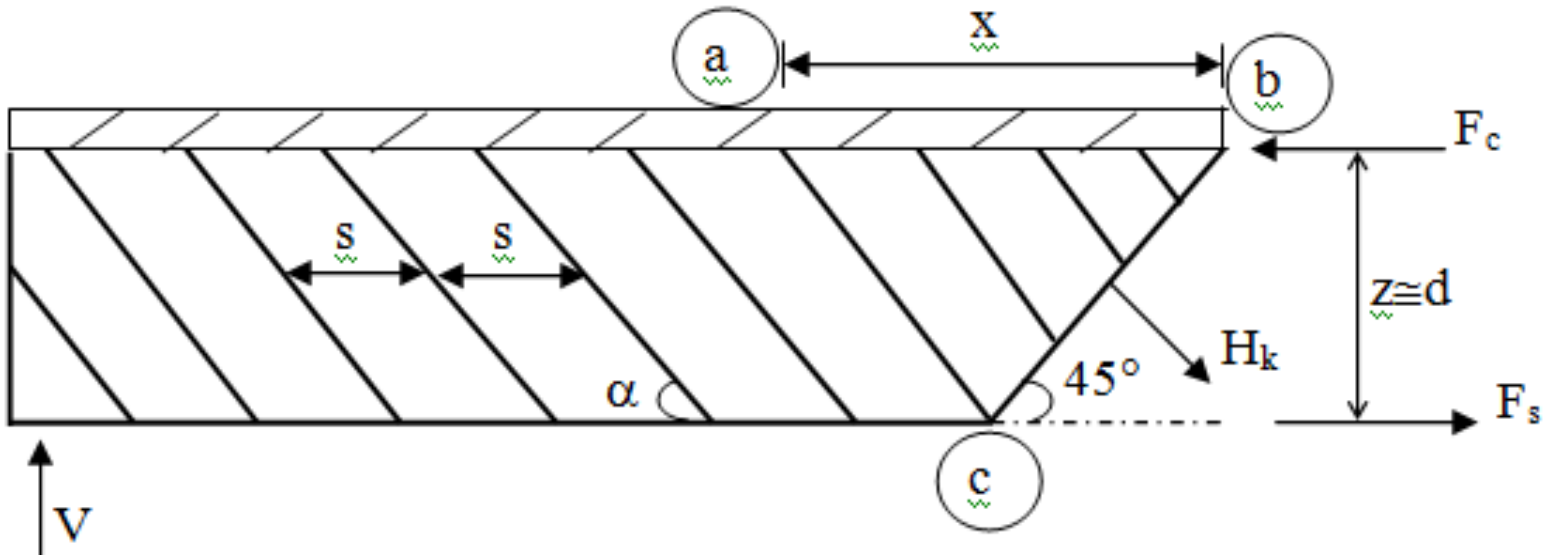
Buradaki bütün olumsuzlukları önleyebilmek için; etriye olabildiğince sık yerleştirilmeli ($s \leq d/2$) ve birim boyda oluşacak kuvvetleri karşılamaya yeterli etriye alanı bulundurulmalıdır. Yönetmeliklerde öngörülen min. etriye ve max. aralık koşuluna uyulmalıdır.



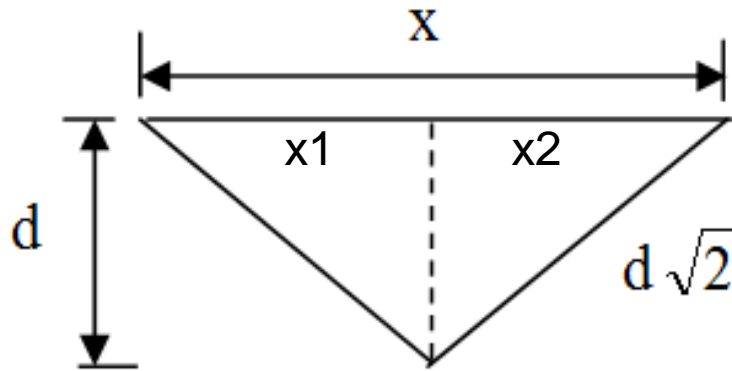
Etriyeleri gereğinden fazla kullanmak yararlı değildir. Yerleştirilen kayma donatısı ile giriş kapasitesi arttırıldığında gövdede oluşacak asal basınç gerilmeleride büyür. Bu basınç dayanımı betonun basınç dayanımını aşabilir. Bu nedenle yönetmeliklerde kesme kuvveti için bir sınır konmuştur ($V_d \leq V_{max}$).

KAYMA DONATISI HESABI

Kayma donatısı hesabı için aşağıdaki kiriş modeli kullanılır.



H_k : Etriyelerin bileşke kuvveti



$$\tan \alpha = \frac{d}{x_1}, \quad x_1 = \frac{d}{\tan \alpha}$$

$$x_2 = \frac{d}{\tan 45}, \quad x = x_1 + x_2$$

$$d \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\cos 45}{\sin 45} d$$

$$x = d \left(\frac{\cos \alpha + \sin \alpha}{\sin \alpha} \right)$$

$$n = \frac{x}{s} = \frac{d (\cos \alpha + \sin \alpha)}{s \sin \alpha}, \quad n: (c-b) \text{ üzerindeki etriye sayısı}$$

$H_k = (n) A_{sw} f_{ywd}$ n sayıda donatı tarafından taşınan çekme kuvveti

$$H_k = \frac{d (\cos \alpha + \sin \alpha)}{s \sin \alpha} (A_{sw} f_{ywd})$$

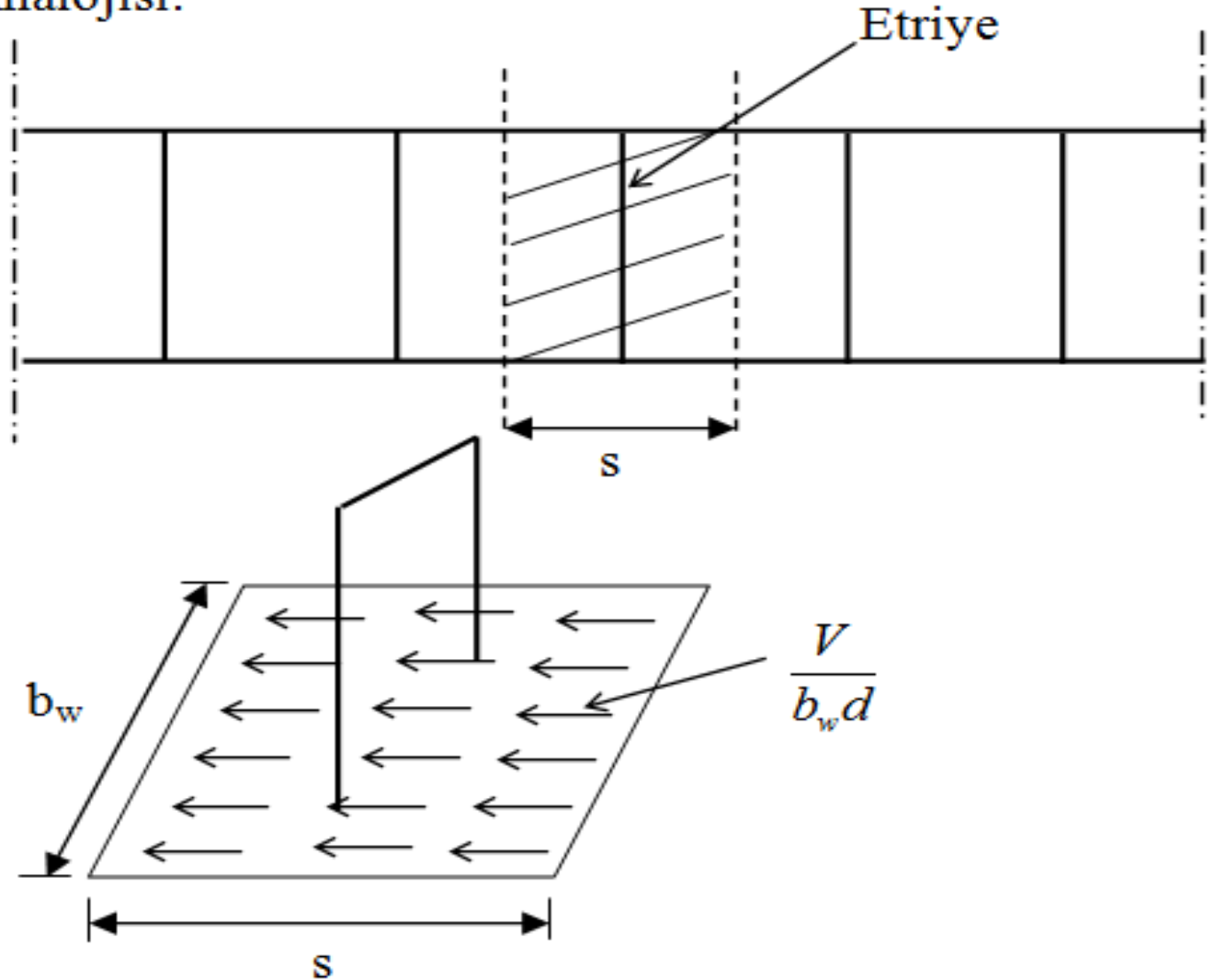
$H_k \sin \alpha = V$ dersek;

$$V = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) d f_{ywd} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad \text{olarak elde edilir.}$$

$\alpha=90^\circ$ olması halinde;

$$V = \frac{A_{sw}}{s} d f_{ywd} \text{ olur.}$$

Perçin Analojisi:

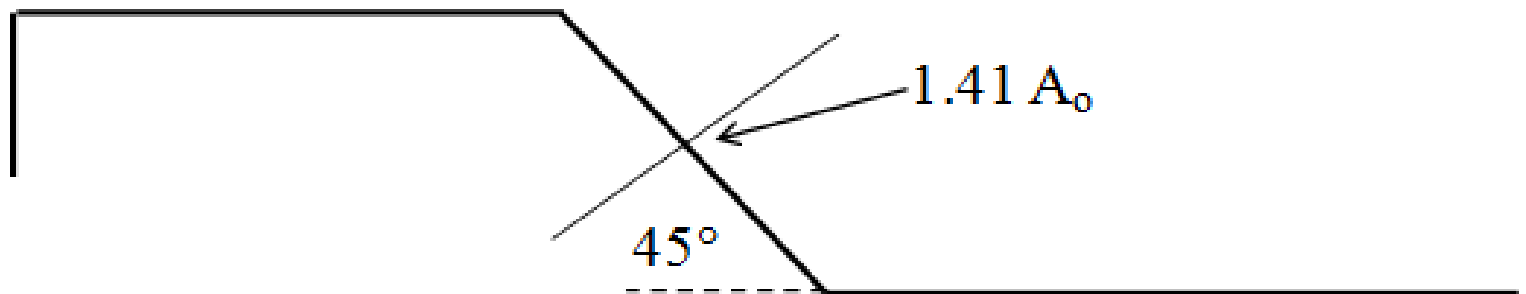


Perçin Alanı=Etriye Alanı=2(A_o)

$A_{sw}=2(A_o)$, $A_o=\frac{\pi\phi^2}{4}$, A_o : Etriyenin tek kolunun alanı

$\frac{V}{b_w d} b_w s = A_{sw} f_{ywd}$, $V_w = \frac{A_{sw}}{s} d f_{ywd}$ elde edilir.

Pilye Çeliği: Perçin Analojisi



$V_{(Pilye)}=1.41 A_o f_{ywd}$

Kesme Tasarımı:

$$V_d = V_r$$

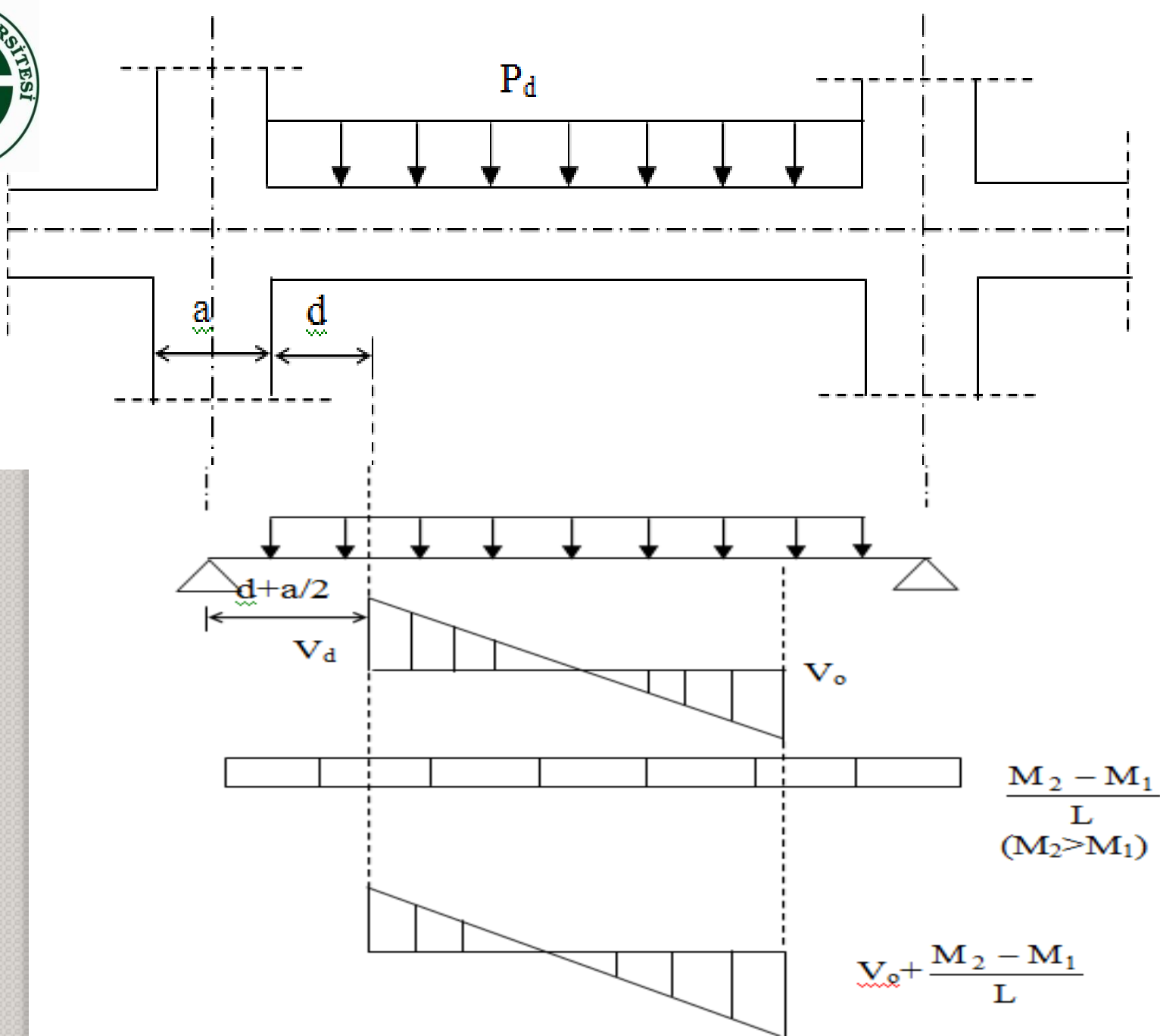
$$V_r = V_w + V_c$$

V_d : Hesap kesme kuvveti

V_w : Kayma donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti.

V_c : Düzeltme terimidir ve yaklaşık olarak eğik çatlama dayanımına (V_{cr}) eşittir.

Kirişlerde kırılmaya yol açan çatlak genelde mesnet civarında değil, mesnetten (d) kadar uzaklıkta meydana gelmektedir. Bu nedenle hesap yapılırken mesnet yüzündeki kesme kuvveti değil, mesnetten (d) kadar uzaklıktaki kesme kuvveti alınır. Dolaylı mesnetlerde ise mesnet yüzündeki kesme kuvveti hesap kesme kuvveti olarak alınır.



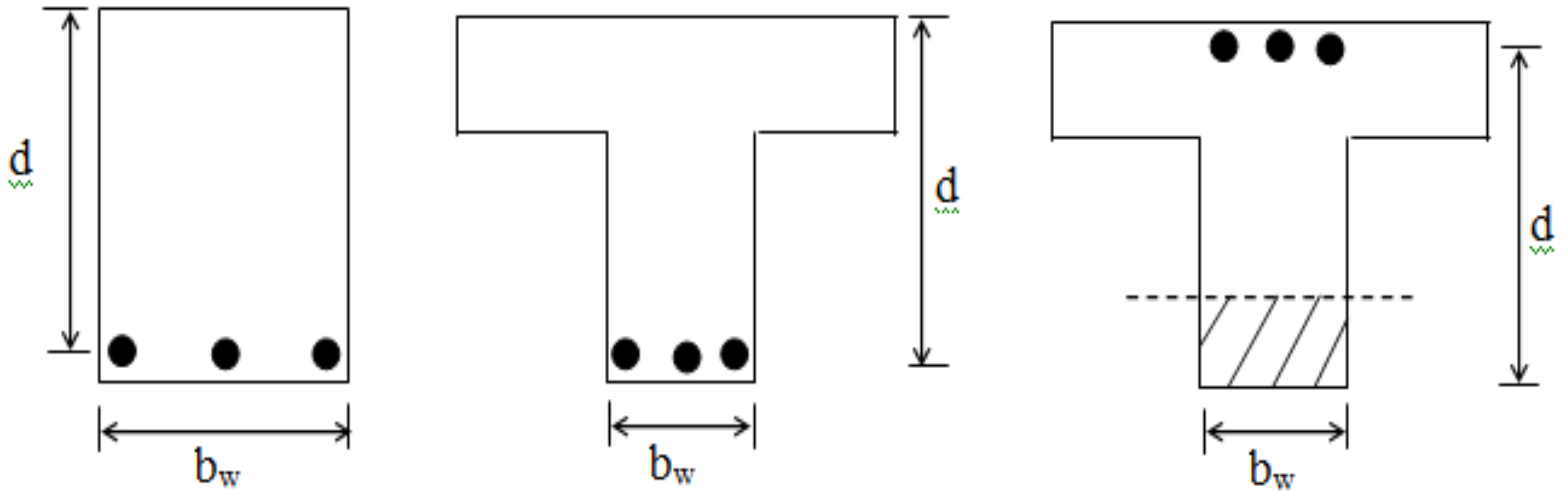
Klasik kafes kiriş analojisinden, gerekli kayma donatısı alanının (A_{sw}) hesaplanması öngörülmektedir.

Beton Tarafından Taşınan Kesme Kuvveti (V_c):

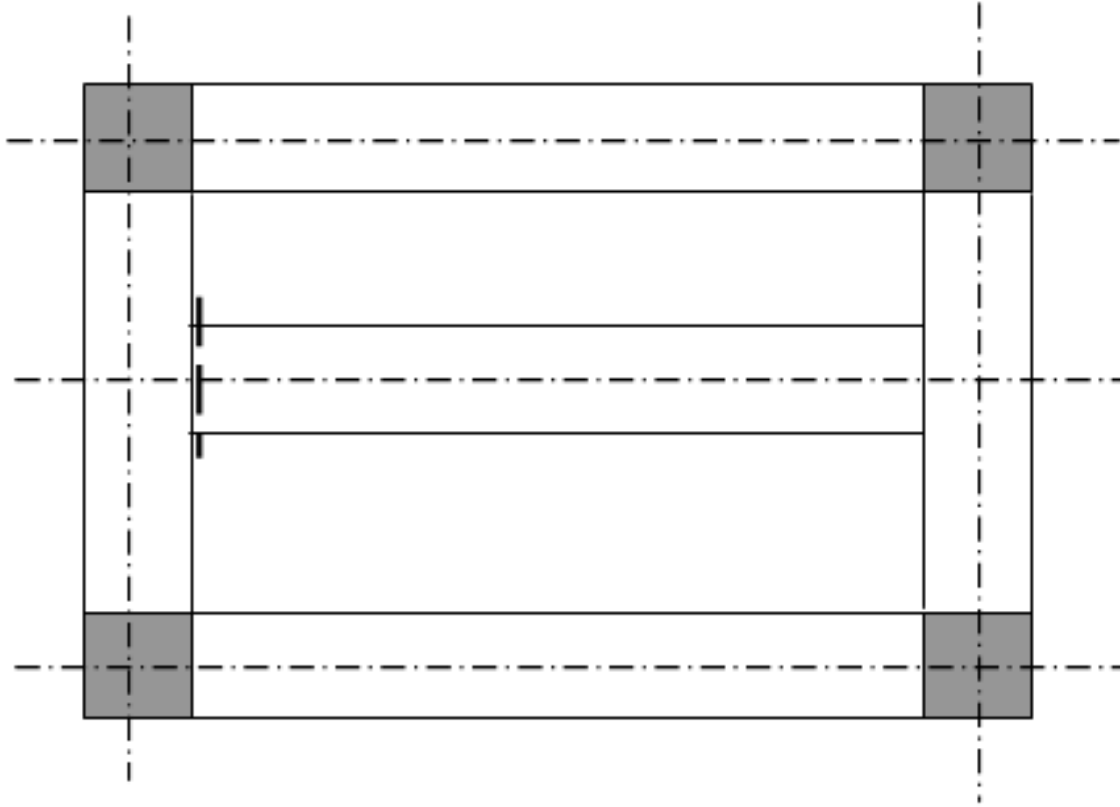
$V_c = 0.8 V_{cr}$ olarak alınır.

$$V_{cr} = 0.65 f_{ctd} b_w d$$

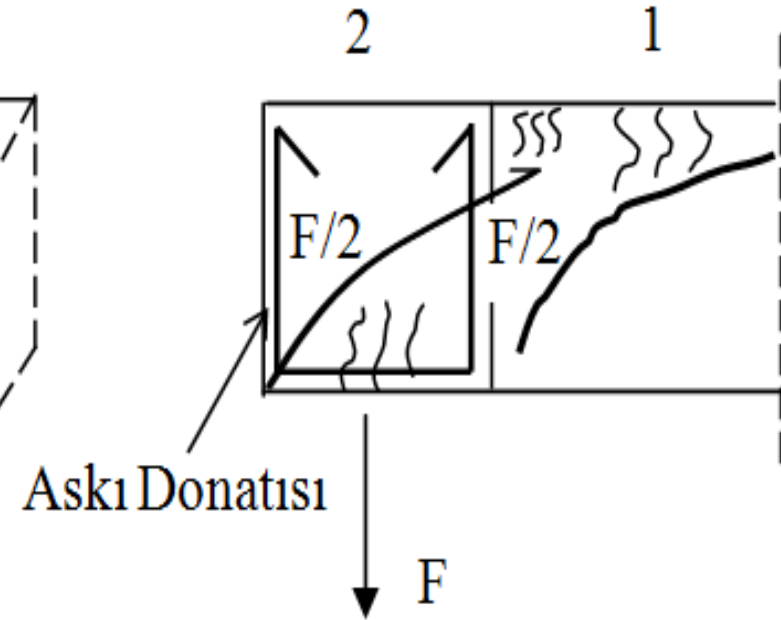
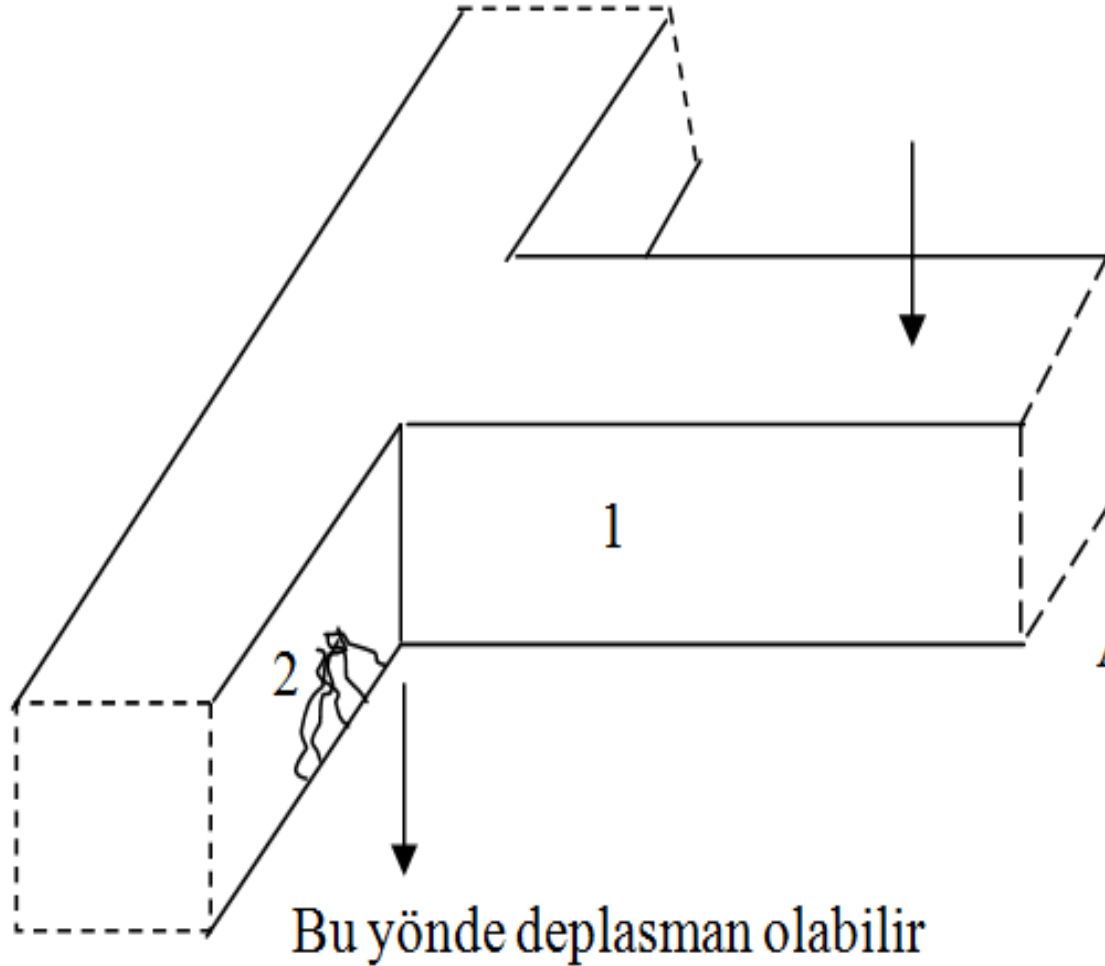
Bu ifadelerde b_w genişliği, kesitin gövde genişliği olarak alınır.



Dolaylı Mesnetler:



Bazı durumlarda kiriş kolon yerine diğer bir kirişe bağlanabilir. Bu durumdaki mesnetlenmeye dolaylı mesnet denir. Bu tür yapı sisteminde çatlamaya karşı mutlaka önlem alınmalıdır. Hesap kesme kuvveti olarak mesnet yüzündeki değer alınır.

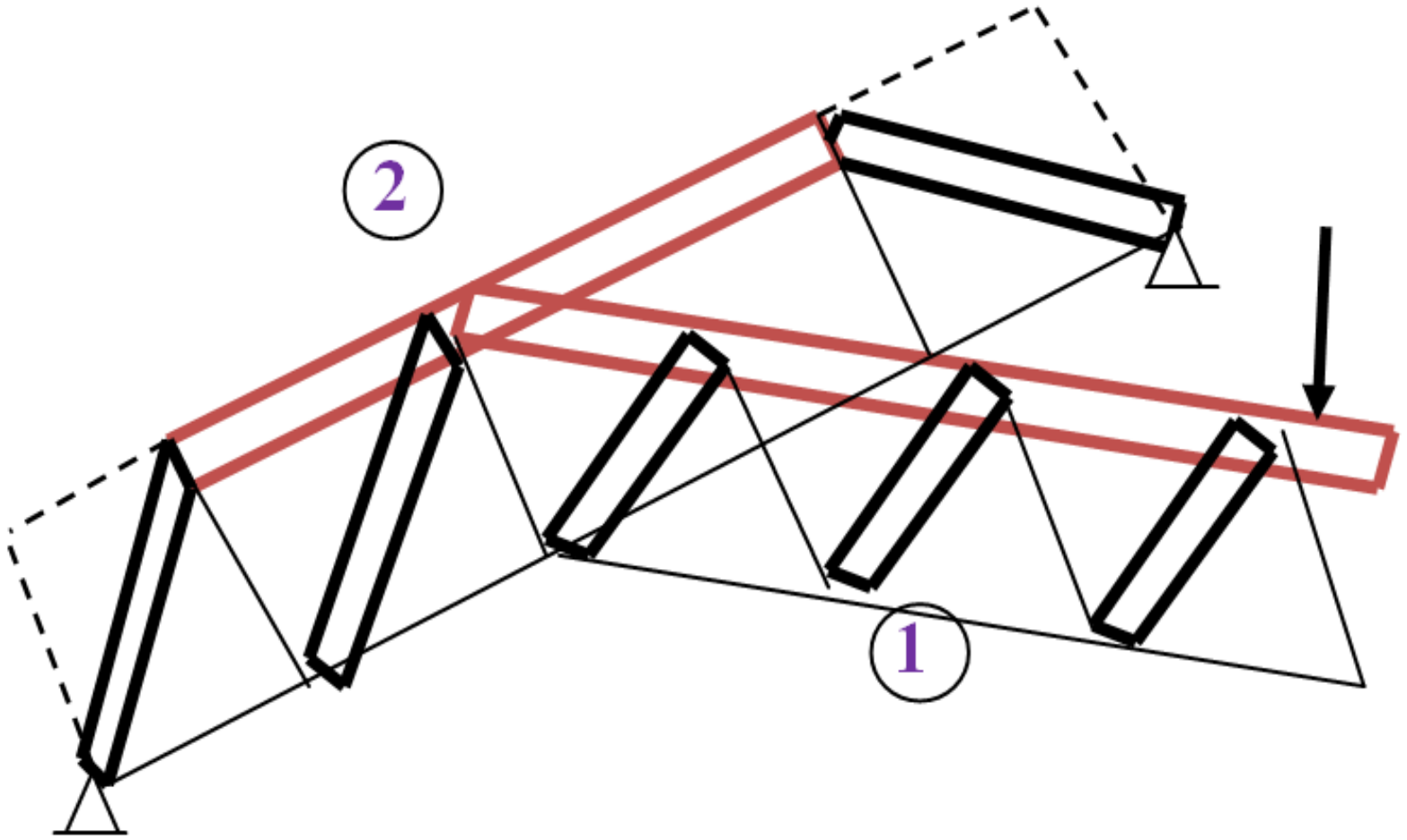


$$A_{sh} = \frac{F}{f_{wyk}}$$



1 nolu kirişteki yük **2** nolu kirişe kiriş gövdesinde oluşan basınç diyagonalleri ile aktarılır. Bu nedenle **1** nolu kirişin mesnet kuvveti F , **2** nolu kirişin alt yüzüne uygulanmış olur. Yani çekme bölgesine uygulanan bu kuvvet uygun bir şekilde basınç bölgesine aktarılmadığı takdirde, birleşim noktasına yakın yerde **2** nolu kirişte önemli eğik çatlaklar oluşur ve alttaki donatının kaldıraç etkisi ile yırtılmalar olur.

Bu gibi durumlarda alınabilecek en etkili önlem, **2** nolu kirişin birleşim bölgesine yerleştirilecek askı donatısı ile, F kuvvetini basınç bölgesine aktarmaktır. Askı donatısı olarak düşey etriye kullanılır.



Hesapla İlgili Öneriler:

Kesme açısından pilyelerden de bir miktar yararlanılmaktadır. Pilyeler bir kirişte şu şekilde detaylandırılmaktadır;

a) Pilyeler tek noktada yapıldığı durumlarda, kiriş üst yüzündeki büküm noktasının mesnet yüzünden uzaklığı (d) kadar alınır.

b) İki noktada pilye yapıldığı durumlarda ($d/2$) ve ($2d/3$) olması önerilmiştir.

Gevrek Kırılmanın Önlenmesi:

Asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşacak gevrek kırılmayı önlemek amacı ile etriye oranı için bir alt sınır konulması zorunludur. Gerekli min. etriye, kayma donatısız kirişin dayanımını, donatılı kiriş dayanımına eşitleyerek bulunur.

Kayma donatısız kiriş taşıma gücü:

$$V_r = V_{cr} = 0.16 \sqrt{f_{ck}} b_w d$$

Kayma donatılı kiriş taşıma gücü:

$$V_r = V_w + \frac{V_c}{2} = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (d) + \frac{0.16 \sqrt{f_{ck}}}{2} b_w d$$

Bu iki denklem eşitlendiğinde, $\min \rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w (s)}$ olarak bulunur.

$$\min \rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w (s)} = \frac{0.08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{ywk}}, \quad f_{ctk} = 0.35 \sqrt{f_{ck}} \text{ olduğundan;}$$

$$\min \rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w s} = 0.23 \frac{f_{ctk}}{f_{ywk}}$$

Asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşacak gevrek kırılma;
 $\rho_w \geq \min \rho_w$ koşulu sağlanarak önlenabilir.

TS500-2000'deki min. donatı koşulu f_{ctk} yerine $1.5 f_{ctd}$ ve f_{ywk} yerine $1.15 f_{ywd}$ konularak bulunmuştur.

$$\min \rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w s} = 0.30 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}}$$

ACI da min. kayma donatısı yüzdesi, beton çekme dayanımından bağımsız olarak ifade edilmiştir.

$$\min \rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w s} = \frac{1}{3(f_{ywk})}$$

CEB, ACI dakine benzer olarak, min. donatı çekme dayanımından bağımsız olarak ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} \min \rho_w &= \frac{A_{sw}}{b_w d} = 0.0025 \text{ (S220)} \\ &= 0.0015 \text{ (S500)} \end{aligned}$$

Kiriş gövdesindeki asal basınç gerilmeleri betonun basınç dayanımını aştığı takdirde, gövde betonunun ezilmesi ile gevrek kırılma oluşur. Bu kırılma hesap kesme kuvvetine bir üst sınır konarak önlenabilir ($V_d \leq V_{\max}$).



Deneysel verilerden yararlanarak, max. kesme kuvveti için aşağıdaki bağıntı verilmektedir.

$$V_{\max} = C_1 f_{ck} b_w d ,$$

C_1 katsayısı, 0.2 ile 0.35 arasında değişmektedir.

TS500-2000'de C_1 katsayısı 0.22 kabul edilmiş ve yeterli yapı güvenliği sağlamak için f_{ck} yerine f_{cd} alınmıştır.

$$V_{\max} = 0.22 f_{cd} b_w d$$



Ön Tasarım:

Kesme güvenliği saptanırken, pilyelerin kesme hesabına alınmasına yönetmeliğimizce izin verilmemektedir. Ön tasarım aşamasında kiriş boyutları belirlenirken, yalnız eğilmeye göre değil kesme güvenliğini de sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Kesmeye göre kiriş boyutları belirlenmesinde aşağıdaki yol izlenebilir;

$$V_d = V_w + V_c$$

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} (d) = \frac{A_{sw}}{s b_w} f_{ywd} (d) b_w$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s b_w} \text{ ise;}$$

$$V_w = \rho_w f_{ywd} b_w d$$

$$V_c = 0.52 f_{ctd} b_w d$$

$$V_d = V_w + V_c = \rho_w f_{ywd} b_w d + 0.52 f_{ctd} b_w d$$

Eğer $\rho_w = 2(\min \rho_w)$ varsayılırsa,

$$\min \rho_w = 0.3 \left(\frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} \right)$$

$$\rho_w = 0.6 \left(\frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} \right)$$

$$V_d = 0.6 \left(\frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} \right) f_{ywd} b_w d + 0.52 f_{ctd} b_w d$$

$$b_w d = \frac{0.9 V_d}{f_{ctd}}$$



Deprem Etkisi

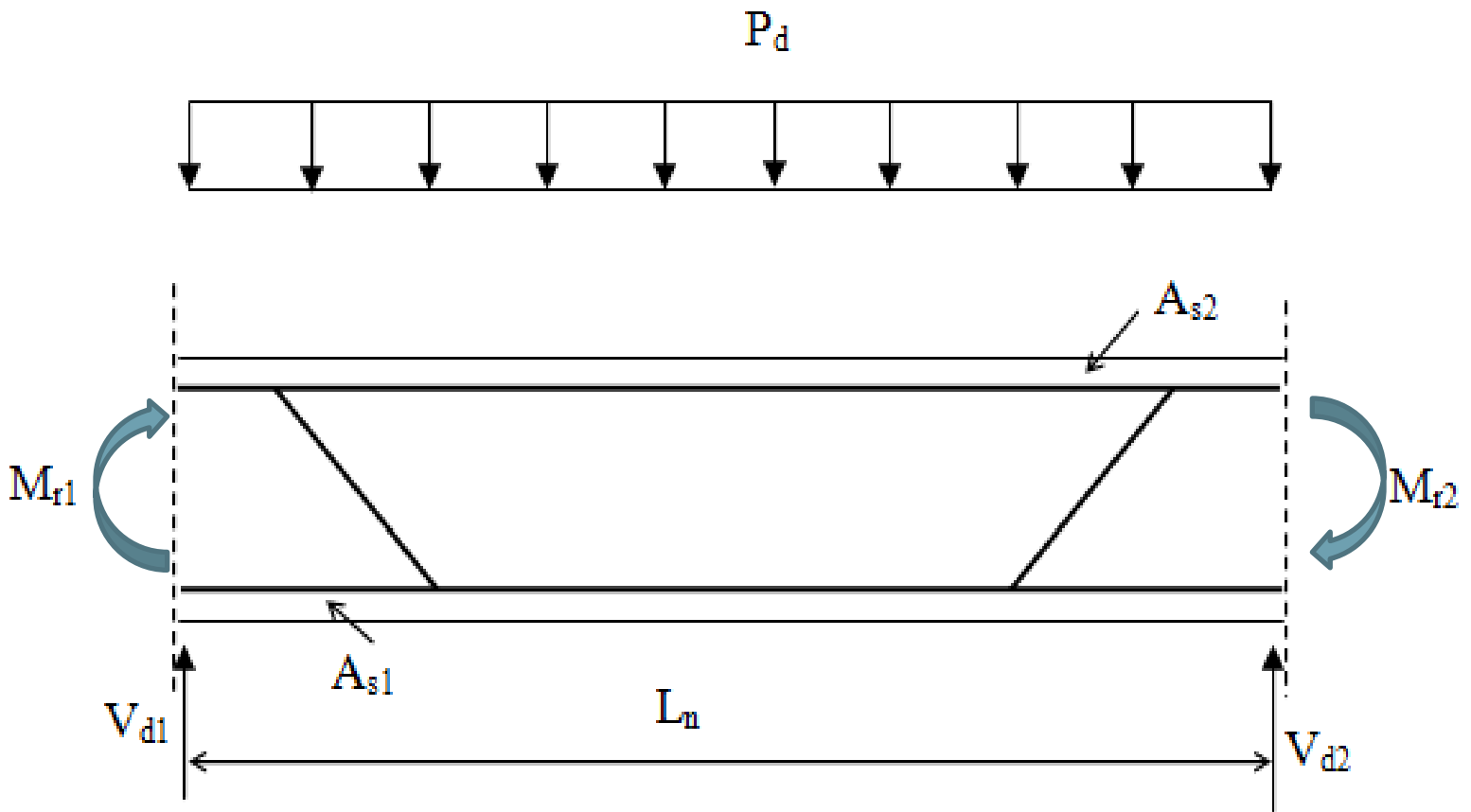
Depremi önemli olduğu durumlarda kiriş momentlerinde ve kesme kuvvetlerinde tersinmeler olur. Bunun sonucu olarak kiriş gövdesinde oluşan asal çekme gerilmelerinin yönü büyük çapta değişir.

Deprem etkisi ile boyuna donatıdaki gerilmeler önemli ölçüde artar. Bu nedenle alt ve üstteki çekme donatısı, mesnet yüzünde değil, $(d-1.5d)$ kadar uzaklıkta akma konumuna gelir. Akmanın belirli bir kiriş boyuna yayılması, plastik mafsallık uzunluğunun artması anlamına gelir. Bu durumda mesnetlerde oluşan plastik mafsalların dönme kapasitesi artacağından moment uyumu daha kolay oluşabilecektir.



Mafsal oluŖan yöredeki sünekliği ve kesme dayanımını arttırmak için, bu bölgenin sık yerleŖtirilmiŖ kapalı etriyelerle sarılması çok önemlidir. Deprem yönetmeliklerinde, mesnetten $(2d)$ uzaklığına kadar olan kiriŖ parçasının $d/4$ ü geçmeyen etriyelerle sarılması önerilir.

Deprem etkisinin çok önemli olduğu durumlarda, kayma donatısının hesabında temel alınacak kesme kuvvetini, kiriŖ mesnetlerindeki moment kapasitelerini temel alarak hesaplamak daha doğru olur.



$$V_d = \frac{M_{r1} + M_{r2}}{L_n} + \frac{P_d L_n}{2}$$

$$M_{r1} \cong A_{s1} f_{yk}(0.9) d$$

$$M_{r2} \cong A_{s2} f_{yk}(0.9) d \quad (\text{Emniyetli olması açısından } f_{yd} \text{ yerine } f_{yk} \text{ alınmıştır})$$

Eğik Çekmeye Karşı Güvenliğin Sağlanması:

- Hesap kesme kuvveti V_d hesaplanır.
- $V_{cr}=0.65 f_{ctd} b_w d$ hesaplanır.
- Eğer $V_d \leq V_{cr}$ ise kayma donatısının hesaplanması gerekmez. Ancak min. kayma donatısı bulundurulması zorunludur. $\min \rho_w = 0.3 \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}}$

Min. donatı kullanıldığında, etriye aralığı $d/2$ yi geçmemeli ve mesnetlerde $d/4$ e indirilmelidir.

- Eğer $V_d > V_{max}$ ise kiriş boyutları değiştirilmelidir.

$$V_{max} = 0.22 f_{ctd} b_w d$$

- $V_{max} \geq V_d \geq V_{cr}$ ise kayma donatısı hesaplanmalıdır.

Depremin önemli olmadığı durumlarda (4. Bölge);

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_d - V_c}{f_{ywd} d} \geq \min \rho_w(b_w)$$

Beton kalitesi ile ilgili ciddi kuşku varsa $V_c=0$ alınmalıdır.

Depremi önemli olduğu durumlarda (1, 2, 3. Derece Deprem Bölgeleri);

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_d - 0.5 V_c}{f_{ywd} d} \geq \min \rho_w(b_w)$$

$s \leq d/2$ (mesnet yüzünden 2d uzaklığına kadar $s \leq d/4$)

Depremi çok önemli olduğu durumlarda;

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_d}{f_{ywd} d}$$

$s \leq d/2$ (mesnet yüzünden 2d uzaklığına kadar $s \leq d/4$).