

## **Takviyeli Kirişlerin Çift Perdeli Sistem Modeli ile Yaklaşık Analizi**

**S.Tanvir WASTİ**

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
Ankara 06531, Türkiye*

**Mehmet UTKU**

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
Ankara 06531, Türkiye*

**Selçuk SAATCI**

*Toronto Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
Toronto, Kanada*

**ÖZET:** Bağ kirişleri ile bağlanan çift perdeli sistemlerin yatay yük altındaki çözümlenmeleri genellikle bilgisayar kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmakta ancak elle hesaplamaya imkân verecek yaklaşık yöntemlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Çift perdeli bağ kirişli sistemler yatay konuma getirilip incelendiğinde ve bağ kirişleri eşdeğer sürekli bir kayma ortamına dönüştürüldüğünde ortaya çıkan model, epoksi ile çelik plaka kaynatılarak güçlendirilen betonarme bir kirişe benzetilebilmektedir. Bu çalışmada yazarlar tarafından her iki sistemin çözümünü sağlayacak yaklaşık bir analitik yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar çeşitli yük durumları için hem perdeli sistemler hem de takviyeli kirişler üzerinde sonlu elemanlar yönteminin verdiği değerler ile uyum içinde olduğu gözlenmektedir.

**Anahtar Kelimeler :** Perdeli sistemler; bağ kirişli çift perdeler; takviyeli kirişler.

**ABSTRACT :** The analysis of twin shear walls joined with connecting beams is usually performed by computer, but approximate methods of manual analysis are also needed. If a twin shear wall system with connecting beams is turned horizontal and these beams transformed into an equivalent continuous shear-connecting medium, the problem resembles that of a beam strengthened with an externally bonded steel plate. In this paper, an approximate analysis method that can be applied to the solution of both these cases is presented. The results from this method are observed to be in agreement with those obtained from the finite element method both for shear wall systems and for plate bonded beams.

**Key Words :** Shear wall systems; twin walls with connecting beams; strengthened beams.

## Giriş

Perde duvarlı sistemler özellikle binaların deprem dayanımları bakımından oldukça sık tercih edilmektedir. Her ne kadar günümüzde bu tür sistemlerin yatay yük altındaki çözümlenmeleri genellikle bilgisayar kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmakta ise de gerek ön tasarım aşamasında gerekse bilgisayar çıktılarının kontrolünün gerektiği durumlarda elle hesaplamaya imkân verecek yaklaşık yöntemlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür sistemlerin analizi için bugüne kadar geliştirilmiş olan çok sayıda yöntem arasında Chitty (1947), Beck (1967), Rosman (1964), Coull ve Choudhury (1967a, 1967b) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar öncü sayılabilir. Burada yazarlar tarafından söz konusu sistemlerin çözümü için geliştirilen bir başka yöntem anlatılmakta ve yeni geliştirilen bu yöntem, sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılınca kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Ayrıca yöntemden elde edilen denklemlerle, altına zambak veya epoksi ile yapıştırılarak ince çelik plaka ile takviye edilen bir kiriş de modellenenmektedir.

Boşluklu perde duvar sistemleri iki perde duvar arasında pencere, koridor vs. amaçlarla bırakılmış boşlukların bulunduğu ve iki perde duvarın kat seviyelerinde kiriş veya döşeme gibi eğilmeye çalışan elemanlarla bağlandığı sistemlerdir (Şekil 1). Bu tür sistemlerin çözümünde Chitty (1947)'den itibaren takip edilen yaklaşım iki duvar arasındaki eğilmeye çalışan elemanların oluşturduğu süresiz ortamın daha ziyade kesmeye maruz eşdeğer sürekli bir ortamla değiştirilmesidir. Söz konusu yaklaşımda, kirişlerde momentin sıfır olduğu noktanın kiriş ortasında olduğu varsayımıyla kirişlerin sadece kesme kuvvetleri taşıdığı kabul edilmekte ve bu kabule dayanarak h kat yüksekliği aralıklı kirişlerin herbirinin eğilme rijitliği olan EI, h 'a bölünerek sürekli ortamın eğilme rijitliği elde edilmektedir. Çözümleme sonucu sürekli ortamdaki kayma gerilmesi ifadesi çıkarılmakta ve kat seviyelerinde bulunan kayma gerilmeleri kat yüksekliğiyle çarpılarak o kattaki kirişin taşıdığı kesme kuvveti bulunmaktadır. Bu yazıda ele alınan yöntemde ise sadece kesme kuvvetlerini taşıyan bu eşdeğer sürekli ortam için eşdeğer bir  $G_e$  kayma modülü ifadesi çıkarılmakta ve sistem iki duvar arasında sadece kayma gerilmelerini taşıyan yapışkan bir tabaka olduğu varsayılarak çözümlenmektedir. Tekil yük, düzgün yayılı yük ve deprem yüklemesini temsil eden üçgen yayılı yük gibi değişik yanal yükler için analiz edilen sistemin çözümünde deplasman değerleri, perdelerdeki kesme kuvvetleri ve momentler de elde edilebilmekle beraber mevcut yazıda sadece bağ kirişlerindeki kesme kuvvetleri ve momentlere yer verilmiştir.

## Genel Formülasyon

İki perde duvar ve aradaki sadece kayma gerilmesi taşıyan sistemde oluşan kuvvetler Şekil 2' de gösterilmektedir. Kesitteki toplam kesme kuvveti olan F, perde duvarın üst noktasından itibaren ölçülen x' e bağlı bir fonksiyon olup yük türüne göre değişmektedir. q eşdeğer sürekli ortamdaki kayma akımı olup  $q = \tau \cdot t$  olmaktadır. Burada  $\tau$  eşdeğer sürekli ortamda kayma gerilmesi, t ise perde duvar kalınlığıdır. Ayrıca  $\tau = G_e \gamma$  ifadesiyle yazılabilmektedir. Burada  $\gamma$  eşdeğer ortamdaki dönmedir.

Sürekli ortamın eşdeğer kayma modülü, atalet momenti  $I_p$  ve uzunluğu b olan her iki ucu ankastre bir kiriş ele alınarak bulunabilir. Böyle bir kirişte bir ucun diğerine göre  $\Delta$  kadar deplasman yapması halinde kiriş uçlarında oluşacak kesme kuvvetleri  $12 E I_p \Delta / b^3$  olacaktır (Şekil 3).  $\gamma = \Delta / b$  alınarak elde edilen kesme kuvvetleri tipik kat yüksekliği olan h boyunca dağıtılacak olursa  $q = \tau \cdot t = (12 E I_p / h b^2) \gamma$  ifadesi elde edilir.  $q = \tau \cdot t = G_e \cdot \gamma \cdot t$  olduğu düşünülecek olursa eşdeğer kayma modülü için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$G_e = \frac{t}{g} = \frac{q}{g t} = \frac{12EI_p}{hb^2 t} \quad (1)$$

Burada E malzemenin elastisite modülü,  $I_p$  bir bağ kirişinin atalet momenti, h kat yüksekliği ve b iki duvar arasındaki mesafe ve aynı zamanda bağ kirişinin açıklığıdır. Eşdeğer sürekli ortamdaki  $\gamma$  dönmesi duvarların yatay yük altında eğilmesinden ve duvarlarda kayma gerilmelerinin yolaçtığı aksel boy değiştirmelerden kaynaklanan iki bileşene sahiptir.

$$g = \frac{\mathbf{l}}{b} \frac{dy}{dx} - \frac{2u}{b} \quad (2)$$

Burada  $\mathbf{l}$  perdelerin orta eksenleri arasındaki mesafe, u bağ kirişlerindeki kayma gerilmesinden dolayı perdelerde oluşan aksel boy değiştirme ve y yatay koordinat eksenidir. Dk. (2) 'den  $dy/dx$  ifadesi çıkarılır ve her iki taraf E ( $I_1+I_2$ ) ile çarpılacak olursa,

$$E(I_1 + I_2) \frac{dy}{dx} = \frac{b}{\mathbf{l}} \frac{q E(I_1 + I_2)}{G_e} + \frac{(I_1 + I_2)}{\mathbf{l}} \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \int_0^H \int_0^x q dx dx \quad (3)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemlerde  $I_1$ ,  $I_2$  perdelerin atalet momentleri,  $A_1$ ,  $A_2$  perdelerin kesit alanları ve H perdelerin yerden yüksekliğidir. Denklemden değişken olarak alınan x perdelerin üst noktasından itibaren ölçülen mesafedir. Öte yandan Şekil 2 'de birim perde uzunluğu için denge denklemi aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{d}{dx} \left[ E(I_1 + I_2) \frac{d^2 y}{dx^2} \right] - \mathbf{l} q + F(x) = 0 \quad (4)$$

Denklem (3) 'ün x 'e göre iki kere türevinin alınması ve denklem (4) de yerine konularak farklı yük fonksiyonları için (Şekil 4) çözümü neticesinde aşağıdaki ifadeler elde edilebilir.

Perde duvarın en üst noktasından etki eden yanal tekil yük P için,

$$q_t(x) = t t_t(x) = \frac{G_e t \mathbf{l} P}{b E (I_1 + I_2) m^2} \left( 1 - \frac{\cosh(mx)}{\cosh(mH)} \right) \quad (5)$$

Düzgün yayılı yük w için,

$$q_d(x) = t t_d(x) = \frac{G_e t \mathbf{l} w}{b E (I_1 + I_2) m^2} \left[ -\frac{\sinh(mx)}{m} + \left( \frac{\tanh(mH)}{m} - \frac{H}{\cosh(mH)} \right) \cosh(mx) + x \right] \quad \dots (6)$$

Üçgen yayılı yük için,

$$q_u(x) = \frac{G_e t \mathbf{l} w_u}{b E (I_1 + I_2) m^2} \left\{ -\frac{\sinh(mx)}{m} + \frac{\cosh(mx)}{\cosh(mH)} \left[ \frac{1}{2H m^2} - \frac{H}{2} + \frac{\sinh(mH)}{m} \right] - \frac{1}{2H m^2} + x - \frac{x^2}{2H} \right\} \quad \dots (7)$$

Bu denklemlerde P perde üst noktasından yatay olarak uygulanan tekil yük, w perdelerine yatay olarak uygulanan düzgün yayılı yük ve  $w_u$  perdelerine yatay olarak uygulanan üçgen yayılı yükün

perde üst noktasındaki en büyük değeridir. Her üç yük durumu için de, m parametresi aşağıdaki denklemden elde edilebilir:

$$m^2 = \frac{G_e t \mathbf{1}}{b E (I_1 + I_2)} \left[ \frac{(I_1 + I_2)}{\mathbf{1}} \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) + \mathbf{1} \right] \quad (8)$$

Yukarıdaki ifadeler eşdeğer sürekli ortamdaki kayma gerilmesi değişimini vermektedir. Belli bir kattaki bağ kirişindeki kesme kuvveti bu denklemlerin bir üst ve bir alt katın orta noktaları arasında integrallerinin alınmasıyla bulunabilir. Ancak daha kolay olması bakımından, istenilen kat seviyesinde denklem (5) , (6) veya (7) den elde edilen kayma gerilmesi değeri kat yüksekliğiyle çarpılarak da o kattaki bağ kirişinde yaklaşık olarak bir kesme kuvveti değeri elde edilebilir.

Burada perde duvarlar için geliştirilen formulasyon iki paralel kirişin yapışkan bir tabakayla birbirlerine yapıştırılması neticesinde elde edilen tabakalı kirişlerin çözümü için de kullanılabilir. Perde duvarlar arasındaki bağ kirişler yerine kullanılan eşdeğer sürekli bir ortam tabakalı kiriş probleminde yapışkan tabakayı temsil etmekte, Denklem (1) de çıkarılan  $G_e$  ise yapışkanın kayma modülü olmaktadır. Konu ile ilgili daha ayrıntılı bilgi aşağıda verilmektedir. Ayrıca Saatçı (2001)'e bakılabilir.

### Sayısal Örnek

Düzgün yayılı ve tekil yük durumları için aşağıdaki parametrelere sahip bir örnek seçilmiştir.

$$\begin{array}{llll} E = 20.10^6 \text{ kPa} & H = 56 \text{ m} & d_1 = 7 \text{ m} & d_2 = 7 \text{ m} \\ b = 2 \text{ m} & I_p = 1.6 \cdot 10^{-3} & h = 2.8 \text{ m} & t = 0.3 \text{ m (duvar kalınlığı)} \end{array}$$

Örnek problem hem  $w = 16.5 \text{ kN/m}$  'lik yanal düzgün yayılı yük için hem de düzgün yayılı yükün toplamı olan  $P = 924 \text{ kN}$  tekil yük için çözülmüştür. Problem ayrıca  $d_2 = 1 \text{ m}$  alınarak da çözülmüş ve iki duvarın çok farklı boyutlara sahip olduğu durum da incelenmiştir. İki duvar genişliğinin eşit olduğu durum için hesaplanan parametreler aşağıdaki gibidir.

$$\begin{array}{lll} \mathbf{l} = 9 \text{ m} & G_e = 3.429 \cdot 10^4 & I_1 = I_2 = 8.575 \text{ m}^4 \\ A_1 = A_2 = 2.1 \text{ m}^2 & m = 0.06975 & \end{array}$$

Bu parametreler kullanılarak tekil yük ve düzgün yayılı yük için eşdeğer sürekli ortamda kayma gerilmesini veren ifadeler aşağıdaki gibi elde edilebilir.

Perde duvarın en üst noktasından etki eden yanal tekil yük için,

$$q_t(x) = 85.438 \left( 1 - \frac{\cosh(0.06975 x)}{24.856} \right) \quad (9)$$

Denklem (9)'un  $x$ 'e bağlı değişiminin grafiği Şekil 4'te verilmektedir.

Şekil 5 'ten de gözlemlenebileceği gibi eşdeğer sürekli ortamda kayma gerilmesi temelde sıfırdan başlamakta ve perde ucuna doğru gittikçe artarak sabit bir değere yakınsamaktadır. Duvar üst noktasından etki ettirilen tekil yükün duvar boyunca kesitte sabit kesme kuvveti yarattığı göz önüne alınacak olursa bu yakınsamanın kesitteki kesme kuvveti değişimini takip ettiği görülür. Aynı problem, iki perde duvar genişliğinin farklı olduğu durumun da incelenmesi

amacıyla  $d_2 = 1 \text{ m}$  ( $d_1 / d_2 = 7$ ) değişikliğiyle tekil yük için tekrar çözülmüştür. Bu çözümlere ait grafik Şekil 4'te verilmektedir.

Her kattaki bağ kirişindeki kesme kuvveti daha önce de bahsedildiği gibi denklem (9) ve (10) dan ilgili kat seviyesinde bulunan  $q$  değerinin kat yüksekliği olan  $h$  ile çarpılmasıyla elde edilebilir. Bu durumda, kirişlerde momentin sıfır olduğu noktanın kirişin ortasında yer aldığı varsayımı yapıldığından, kirişte bulunan kesme kuvveti ile kiriş açıklığının yarısının çarpımı bağ kirişi uçlarındaki momenti verecektir.

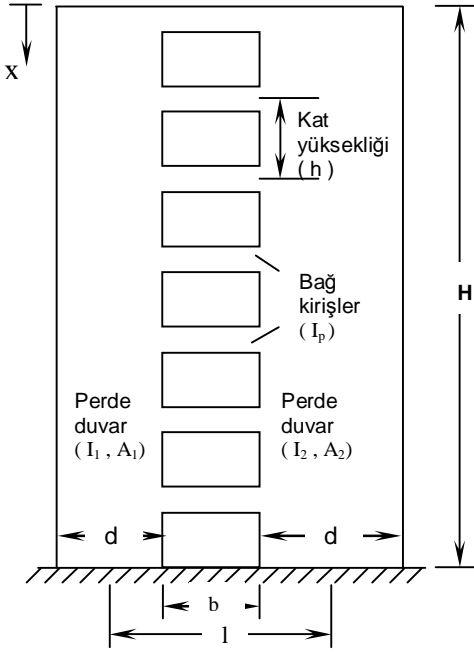
### Sonlu Eleman Analiz

Ele alınan örnek problem sonlu elemanlar yöntemi ile de çözülmüştür. Problemden perde duvarlar SAP2000 (1998) bilgisayar programında bulunan dikdörtgen 9 düğüm noktalı izoparametrik düzlem gerilme elemanlarıyla modellenmiştir. Aradaki bağ kirişleri ise bilinen kiriş elemanlarıyla modellenmektedir. Her iki duvarın eşit genişliğe sahip olduğu durum için 410 düğüm noktası ve 80 düzlem gerilme elemanı, duvar genişliklerinin farklı olduğu durum için ise 328 düğüm noktası ve 60 düzlem gerilme elemanı kullanılmıştır. Her kat seviyesinde bir tane olmak üzere toplam 20 bağ kiriş elemanı mevcuttur.

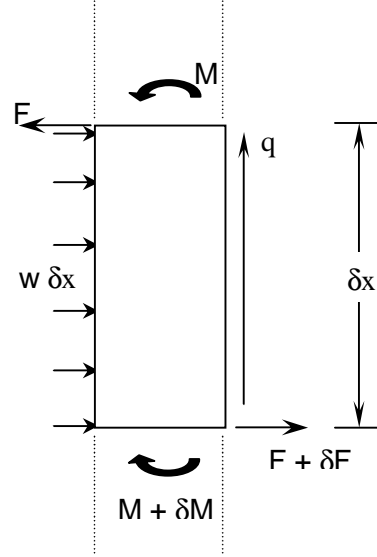
Her iki duvarın eşit genişlikte olduğu durum için her bir katta kirişlerde elde edilen kesme kuvvetleriyle analitik çözümden elde edilen kesme kuvvetleri Tablo 1' de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

**Tablo 1.** Perde genişliklerinin eşit olduğu ( $d_1=d_2 = 7 \text{ m}$ ) ve eşit olmadığı ( $d_1 = 7 \text{ m}$ ,  $d_2 = 1 \text{ m}$ ) durum için analitik ve sonlu eleman yöntemleri sonuçları

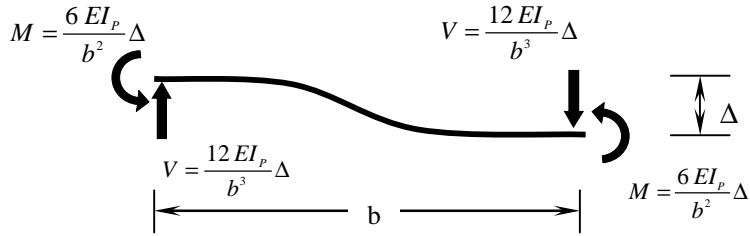
Kat No.	$d_1 = d_2 = 7 \text{ m}$				$d_1 = 7 \text{ m}, d_2 = 1 \text{ m}$			
	$q_t (x_i)$ ( kN/m )	$q_t (x_i) \cdot h$ ( kN )	Sonlu Eleman ( kN )	Fark ( % )	$q_t (x_i)$ ( kN/m )	$q_t (x_i) \cdot h$ ( kN )	Sonlu Eleman ( kN )	Fark ( % )
1	15.14	42.40	40.81	-3.9	16.68	46.70	40.46	-15.4
2	27.60	77.27	75.39	-2.5	29.90	83.72	68.97	-21.4
3	37.84	105.95	104.55	-1.3	40.39	113.09	94.15	-20.1
4	46.26	129.52	129.26	-0.2	48.71	136.39	114.55	-19.1
5	53.18	148.90	150.23	0.9	55.30	154.84	131.34	-17.9
6	58.87	164.83	168.00	1.9	60.53	169.48	145.08	-16.8
7	63.54	177.90	183.02	2.8	64.68	181.10	156.30	-15.9
8	67.37	188.63	195.65	3.6	67.96	190.29	165.42	-15.0
9	70.51	197.43	206.23	4.3	70.56	197.57	172.79	-14.3
10	73.08	204.62	215.03	4.8	72.61	203.31	178.67	-13.8
11	75.18	210.50	222.25	5.3	74.23	207.84	183.29	-13.4
12	76.88	215.26	228.08	5.6	75.51	211.43	186.82	-13.2
13	78.26	219.13	232.68	5.8	76.51	214.23	189.40	-13.1
14	79.36	222.21	236.15	5.9	77.29	216.41	191.11	-13.2
15	80.23	224.64	238.59	5.8	77.89	218.09	192.04	-13.6
16	80.90	226.52	240.06	5.6	78.34	219.35	192.20	-14.1
17	81.39	227.89	240.61	5.3	78.67	220.28	191.66	-14.9
18	81.73	228.84	240.16	4.7	78.89	220.89	190.12	-16.2
19	81.93	229.40	237.92	3.6	79.02	221.26	189.94	-16.5
20	82.00	229.60	230.62	0.4	79.06	221.37	186.66	-18.6



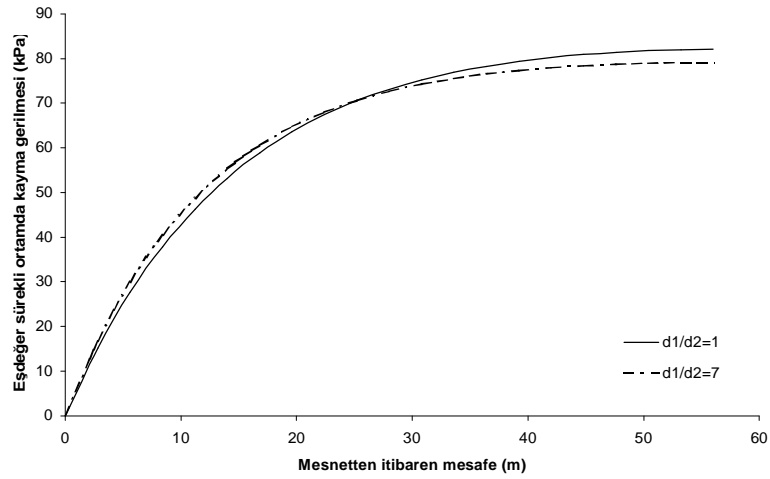
Şekil 1. Tipik bağ kirişli çift perde



Şekil 2. Bir perde duvara etki eden kuvvetlerin serbest kütle diyagramı



Şekil 3. Bir ucun diğerine göre  $\Delta$  deplasman yaptığında kirişte oluşan kuvvetler ve momentler



Şekil 4. Yatay tekil yük altında değişik perde genişliği oranları için eşdeğer sürekli ortamda kayma gerilmesi dağılımı

## İnce Levha ile Takviye edilen Kiriş

İki veya daha çok tabakanın epoksili zamlarla birleştirilmesinden imal edilen tabakalı veya katmanlı kirişlerin kullanımı artmaktadır. Laminat, kontrplak, kompozit kirişler ve glulam gibi adlar altında sunulan bu kirişlerin en basit hali, ahşap veya metal iki izotrop tabakanın mekanik özellikleri farklı olan bir yapıştırıcı ile birleştirilmesinden oluşturulan sistemdir. Betonarme kirişin epoksili zamlarla kullanılarak ince bir çelik levha ile güçlendirilmesi sonucu meydana gelen sistem de katmanlı kiriş olarak incelenebilmektedir. Yukarıda formülasyonu gerçekleştirilen ve her kat düzeyinde bağ kirişleri ile birleştirilen iki perde ile modellenen sistem, bağ kirişleri sadece kayma gerilmelerine maruz eşdeğer sürekli bir ortama dönüştürüldüğünde ve sistem konumu yatay olarak ele alındığında bir katmanlı kiriş ( veya iki malzemeli takviyeli kiriş ) olarak ele alınabilmektedir.

Yapıştırıcı ile birleştirilip katmanlı tek kiriş haline getirilen iki kiriş için analitik bir çalışma Allison (1998) tarafından gerçekleştirilmiştir. Aşağıda ele alınan bu analizin sonuçları Allison tarafından fotoelastik deneylerle kanıtlanmıştır. Wasti, Utku ve Saatçı (2000) tarafından yapışkan tabakanın elastisite modülü değiştirilerek bu tür kirişlerin davranışı iki boyutlu sonlu elemanlarla incelenmiştir.

### Allison' un Elastik Analizi

Allison yapmış olduğu çalışmasında, açıklık ortasında tekil yük uygulanan, basit mesnetli tabakalı bir kiriş ele almıştır. Kiriş iki tabaka ve tam ortada yapışkan bir tabakadan oluşmakta olup alt ve üst tabakalar özdeştir. Kayma akımı  $q$  ile kayma gerilmesi  $\tau$  değeri aynı olsun diye Allison seçtiği kirişin kalınlığını 1 olarak almıştır. Problemin simetrik olması nedeniyle sadece yarısının modellenmesi yeterli olacaktır (Şekil 7).

İnce yapışkan tabakadaki  $\tau$  kayma gerilmesinin, yapışkan tabaka yüksekliği  $c$  boyunca sabit olduğu kabul edilmektedir. Bu varsayım, Allison'un kirişin açıklık ortasından  $x$  kadar uzakta yapışkan tabakada  $\tau$  kayma gerilmesini veren ifadesi aşağıdaki gibidir :

$$\tau = K [ \tanh mL \sinh mx - \cosh mx + 1 ] \quad (10)$$

Bu denklemde

$$K = 3 ( d + c ) W / [ 3 ( d + c )^2 + d^2 ] \quad (11)$$

$$m^2 = [ 2G / E cd^3 ] [ 3 ( d + c )^2 + d^2 ] \quad (12)$$

olup,  $d$  üst ve alt tabakaların derinliği,  $G$  yapışkan tabakanın kayma modülü,  $E$  ise tabakaların elastisite modülüdür.

Allison'un ifadesinde, yapışkan tabakadaki kayma gerilmesi kiriş açıklık ortasında sıfır değerinden başlamakta ve sürekli artarak  $x = L$  noktasında  $\tau_m$  ile gösterilen en yüksek değerine ulaşmaktadır. Kayma gerilmesi en yüksek değerine  $x = L$  noktasında ulaşmakla beraber, belli bir  $x$  değerinden sonra artma miktarının son derece az olduğu görülmektedir. Kayma gerilmesinin ulaşacağı en yüksek değer yapışkan tabakanın rijitliğiyle doğrudan ilişkili olup  $K = 3 ( d + c ) W / [ 3 ( d + c )^2 + d^2 ]$  değeri üst sınır olarak alınabilir.

Saatçı (2001) tarafından ikiz perde problemi en genel haliyle çözülmüştür. Kiriş katmanlarının yükseklikleri farklı ( kesit alanları ve atalet momentleri değişik ) ve üç değişik yük durumu için

kayma akımı ifadeleri Denklem (5) ilâ (8) arasında verilmiştir. Burada, Dk. (8) ile (12)'de verilen  $m^2$  ifadelerinin eşit olup olmadığı, akabinde tekil yük durumu için kayma gerilmesini veren Dk. ( 11 ) ve ( 12 ) 'nin Dk. ( 5 )'e eşit olup olmadığı kontrol edilecektir.

Önce Dk. (8)'deki notasyonu Allison'un makalesine denk getirmek için  $G_e$  yerine  $G$ ,  $t$  yerine  $1$ ,  $\ell$  yerine  $( d + c )$ ,  $b$  yerine  $c$ ,  $I_1$  ve  $I_2$  herbiri yerine  $d^3 / 12$ ,  $A_1 = A_2 = d$  yazılsın. Terimler yerleştirip basit bir hesap yapıldığında Dk. (8)'in aşağıdaki hale geldiği görülecektir:

$$m^2 = [2G / E c d^3 ] [ 3 ( d + c )^2 + d^2 ]$$

ki bu Dk. (13) ile tamamen aynıdır.

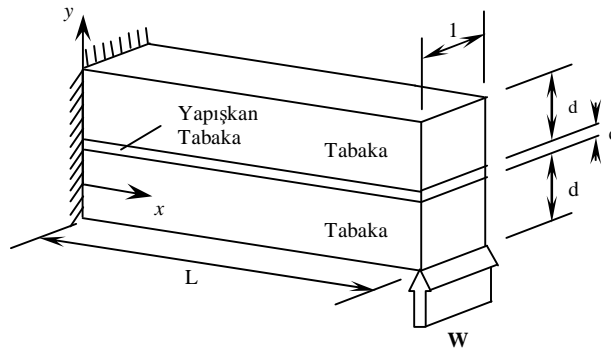
Perde duvarın en üst noktasından etki eden yanal tekil yük  $P$  için olan Dk. (5)'teki ifadenin notasyonunu Allison'un makalesine denk getirmek için  $G_e$  yerine  $G$ ,  $t$  yerine  $1$ ,  $\ell$  yerine  $( d + c )$ ,  $b$  yerine  $c$ ,  $I_1$  ve  $I_2$  herbiri yerine  $d^3 / 12$ ,  $H$  yerine  $L$  ve  $P = W$  yazılsın. Ek olarak Şekil 1 ve Şekil 5'ten izlendiği gibi,  $x$  mesafesi Allison tarafından farklı yönde ölçüldüğünden Dk. (5)'te  $x$  yerine  $L - x$  yazmak gerekecektir. Bu durumda  $\cosh (L - x)$  için şu açılıma da gereksinim olacaktır:

$$\cosh ( mL - mx ) = \cosh mL \cosh mx - \sinh mL \sinh mx$$

Terimler yerleştirip basit bir hesap yapıldığında Dk. (5)'in aşağıdaki hale geldiği görülecektir:

$$\tau = \frac{3(d+c)W}{(3[d+c]^2 + d^2)} [1 + \tanh mL \sinh mx - \cosh mx]$$

Yukarıdaki benzer ifadelerden görülüyor ki aynı denklemler hem bağ kirişlerle bağlanan ikiz perdeler için hem de yapışkanla birleştirilen iki katmanlı kiriş için kullanılabilir. Söz konusu problem sonlu eleman yöntemi ile de modellenmiş ve burada sunulan analitik çalışma ile uyum içinde oldukları gösterilmiştir. İlgili sayısal analizleri Saatçı (2001)'de takip etmek mümkündür.



Şekil 5. Tabakalı kiriş (tekil yük)

## Sonuçlar

Geliştirilen yaklaşık yöntem kullanılarak çeşitli geometri ve yük durumları için bağ kirişli çift perde sisteminin ve aynı şekilde ince levha ile takviye edilen kirişlerin analizi gerçekleştirilebilmektedir. Perdeler sistemi için geliştirilen formülasyon katmanlı kirişlerin analizine veya çelik plaka ile takviye edilen betonarme kirişlere de uyarlanabilmektedir.



Tablo 1’de görüldüğü gibi burada verilen yaklaşık yöntem duvar genişliklerinin aynı olduğu durumda tekil yük için kabul edilebilir yakınlıkta sonuçlar vermektedir ve en büyük fark yaklaşık %6 ‘dır. İki perde duvarın çok farklı genişliklere sahip olması durumunda iki yöntem arasındaki fark büyümektedir ve yer yer %21’e ulaşmaktadır. Aradaki fark yüksek olmakla birlikte analitik yöntemin güvenli tarafta kalması yine de analitik yöntemin yaklaşık hesap ve kontroller için kullanılabilirliğini göstermektedir.

Tekil ve yayılı yükler altında incelenen tabakalı kirişler için elde edilen sonuçlar, farklı yapışkan tabaka elastisite modülleri için sonlu eleman çözümleri ile doğrulanmıştır. Tabakalı kirişler için 9 düğüm noktalı izoparametrik düzlem gerilme elemanın kabul edilebilir sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Takviye için kullanılan çelik plaka’nın kiriş uzunluğundan daha kısa olma durumu ayrıca çözülmüş olup Saatçı (2001)’de incelenebilir.

## Referanslar

- Beck, H., 1962. Contribution to the analysis of coupled shear walls. *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 59, pp. 1055-1070.
- Chitty, L., 1947. On the cantilever composed of a number of parallel beams interconnected by cross bars,. *Phil. Mag.*, London, Vol. 38, pp. 685-699.
- Coull, A. ve Choudhury, J. R., 1967a. Stresses and deflections in coupled shear walls, *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 64, pp. 93-100.
- Coull, A. ve Choudhury, J. R., 1967b. Analysis of coupled shear walls. *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 64, pp. 587-593.
- Rosman, R., 1964. Approximate analysis of shear walls subjected to lateral loads. *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 61, pp. 717-734.
- Roberts, T. M. (1989). Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams, *The Structural Engineer*, Vol. 67, s. 229-233.
- Saatçı, S., 2001. Analytical and Finite Element Investigation of Layered Beams, M.S. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 100 pp.
- SAP 2000, 1998. *Integrated finite element analysis and design of structures – Analysis Reference*, Computers & Structures, Inc., Berkeley, California, pp. 205-218.
- Wasti, S.T , Utku M. , Saatçı S., 2000. Katmanlı Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, IV. Uluslararası Kongre, 1-3 Kasım 2000*, Doğu Akdeniz Üniversitesi, Gazimağusa, KKTC.