KOMPOZİT YAPIYA SAHİP I-KESİTLİ KİRİŞLERİN PLASTİK MOMENT KAPASİTESİNİN ANALİTİK METOTLA ÇÖZÜMÜ

Barış Mehmet ZEYTİNCİ¹ ve Mehmet Ali GÜLER² TOBB ETÜ, ANKARA Mehmet ŞAHİN³ TAI TUSAŞ, ANKARA

ÖZET

Günümüzde havacılık ve uzay alanında sıklıkla kullanılan I-kesitli kirişlerin yapısal özellikleri halen aktif olarak çalışılan bir araştırma konusudur. Bu bildiride, kompozit yapıya sahip I-kesitli kirişlerin plastik moment kapasitesinin analitik metot ile hesaplanması ele alınmıştır. Yapılan çalışmada, I-kesitli kirişlerde başlık ve gövde farklı malzemelere sahip olduğu ve bu malzemelerin bi-lineer plastik malzeme olduğu kabul edilmiştir. Yapılan analitik hesapların doğrulanabilmesi için ANSYS, sonlu elemanlar programı ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde, doğrusal olmayan(non-linear) malzemeye sahip sonlu elemanlar modeli hazırlanıp, plastik moment kapasitesi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar ve analizlerin birbirleriyle karşılaştırmaları yapılmıştır. Analitik hesap metodunun doğru olduğu kanıtlandıktan sonra mühendislerin kullanabileceği E_t / E_y (tanjant modül/elastik modül), artışının plastik moment üzerinde

meydana getirdiği etki araştırılmıştır. Ayrıca uygulanan kuvvetin I-kesitli kirişin merkez kesitindeki normal gerilme dağılımına etkisi de incelenmiştir.

GIRİŞ

I-kesitli kirişler günümüzde havacılık, gemi inşaatı, bina yapıları, uçak ana gövdesi ve helikopter gövdesi yapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanılan I-kesitli kirişlerin geometrik ve mekanik özelliklerinin arttırılması için mühendisler çeşitli çalışmalar sürdürmektedir. Uçakların iskelet gövdelerinde ağırlıklı olarak kullanılan I-kesitli kirişler, hafifletme, dayanımının arttırılması vb. mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar ile birlikte günümüz uygulamalarına araştırma konusu olmaktadır. Uçak gövdesinde kullanılan I-kesitli kirişler **Şekil 1'de** görülebilir.



Şekil 1: [Celik M., Guler M.A., Orun A. E., 2016] Uçak gövdesi

¹ Araştırmacı, E-posta: bzeytinci@etu.edu.tr

² Prof. Dr., Makina Müh. Böl., E-posta: mguler@etu.edu.tr

³ Başuzman Araştırmacı, E-posta: mehmet.sahin2@tai.com.tr

Şekil 1'den de görülebileceği üzere uçak yapısının yolcu taşıma zemin plakasının hemen altında uzunlamasına I-kesitli kirişler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, I-kesitli kirişlerin tasarımında kullanılmak üzere, I-kesitli kirişlerin eğilme momenti altında plastik davranışı analitik metotlar ile hesaplanmıştır ve aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanmıştır.

Günümüzde I-kesitli kirişlerin üzerinde sıklıkla ağırlık azaltma delikleri açılmaktadır. [D'Mello ve Tsavdaridis, 2011] üzerinde ağırlık azaltma deliği olan I-kesitli kirişlerin plastik moment analizlerini Ansys sonlu elemanlar programını kullanarak yapmışlardır. Bu araştırmayı yaparken I-kesitli kirişin malzemesini kompozit olarak kullanmışlardır. Kompozit malzemeli I-kesitli kirişler, günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle bu kirişlerde, başlık(flange) ve gövde(web) farklı malzemelerden oluşmaktadır. Literatürde yapılan araştırmalara göre, kompozit yapıda olan I-kesitli kirişlerin plastik moment kapasitesinin analitik metot ile hesaplanmasına ulaşılamamıştır. Bu yüzden literatürde bulunan bu eksikliği gidermek için, kompozit yapıya sahip I-kesitli kirişlerin plastik moment kapasitesinin analitik metot ile hesaplanmasına ve bunun sonlu elemanlar programı ile doğrulanmasına gerek görülmüştür.

Literatürde kirişlerin plastik momentinin sonlu elemanlar metoduyla, analitik metot ile ve deneysel metotlar ile incelenmesi hakkında yapılan çalışmalar detaylı olarak araştırılmıştır. [Dadras P, 2001] makalesinde, kavisli düz kiriş üzerine, elastik-plastik eğilme momentini analitik metotlar ile hesaplamış ve daha sonra sonlu elemanlar bulgularıyla karşılaştırmıştır. Chan ve arkadaşları [1], dalgalı ağ yapısına sahip I-kesitli kirişlerin, farklı ağ özellikleri ile birlikte eğilme momentini sonlu elemanlar metodu ve aynı zamanda deneysel çalışmalar ile hesaplamıştır. [Chan C.L., Hamouda A.M.S., Khalid Y.A., ve Sahari B.B., 2002] yaptıkları çalışmada, bu çalışmada olduğu gibi doğrusal olmayan malzeme özellikleri kullanmıştır. [AbdelRahim A.B., Abdul Hameed D.O., ve Dessouki A.K., 2015] sarkan zeminlerde kullanılan I-kesitli kirişlerin, eğilme momentlerinin, sonlu elemanlar metoduyla ve deneysel çalışmalar ile hesaplayıp karşılaştırmalarını yapmıştır. [AbdelRahim A.B., Abdul Hameed D.O., ve Dessouki A.K., 2015] yaptıkları çalışmalarına göre; mühendislere kolay uygulanabilir, tasarım modelleri sunmuştur., yaptıkları araştırmada, delikli I kirişlerin farklı delik yapılarında sonlu elemanlar yöntemiyle analizini ele almıştır ve [McCutcheon, J. O., ve Redwood, R. G., 1968], un kupon testlerinden yapmış olduğu plastik moment test değerleriyle, kendi yapmış olduğu sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırmıştır. [Callioglu H., ve Sayman O., 2000], analitik metot ile yüksek öz kütleli termoplastik bazlı kompozit ankastre kiriş için elastik-plastik gerilme analizini yapmıştır.



Analitik metot ile hesaplama yapılan I-kesitli kirişlerin geometrisi Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2: I-kesitli kiriş geometrisi

ANALİTİK METOT İLE ÇÖZÜM

Bildirinin bu kısmında, I-kesitli kirişlerin plastik moment kapasitesinin analitik metot ile hesaplanması ele alınmıştır. Bu bağlamda analitik metot ile hesaplama yapılırken iki farklı bölge göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar; kirişin başlık ve gövde bölgeleridir. Her bölge için ise üç farklı durum söz konusudur. Bunlar; iki bölge içinde, bölgenin, elastik, elasto-plastik(kısmi plastik) ve tam plastik olduğu durum olarak özetlenebilir. Her bir durum için kuvvet ve moment denklemleri yazılarak, plastik moment kapasiteleri hesaplanmıştır.

Hesaplamalar yapılırken I-kesitli kirişin iki farklı malzemeden (kompozit) yapıldığı kabul edilmiştir. Ayrıca Bi-lineer malzeme özelliklerine sahip olduğu varsayılmıştır. Bu kısımda kabul edilen varsayımlar aşağıda olduğu şekliyle özetlenebilir;

- 1) I-kesitli kiriş x ve y eksenlerine göre simetrik kabul edilmiştir.
- 2) Üst ve alt başlıkların kalınlıkları ve uzunlukları aynıdır.
- 3) I-kesitli kirişin başlık ve gövde kısımları farklı malzeme özelliklerine sahiptir.
- 4) I-kesitli kirişin hem başlık kısmı hem de gövde kısmı bi-lineer elastik-plastik malzeme özelliklerine sahiptir.

Formülasyon yaparken kullanılan bazı terimler;

- $\sigma_{\scriptscriptstyle A}$: başlık ve gövde arasındaki bölgede oluşan gerilme
- σ_c :kirişin en üst noktasında oluşan gerilme
- $\sigma_{_{v\!f}}$:başlık kısmının akma gerilmesi
- σ_{vw} :gövde kısmının akma gerilmesi
- E_v :Elastisite Modülü
- E_{tf} :başlık kısmının tanjant modülü
- E_{tw} :gövde kısmının tanjant modülü
- y_v :akma mesafesi

 κ :eğrilik

bunlar dışında kullanılan geometrik terimler Şekil 2'de verilmiştir.

Gövde bölgesi için plastik moment hesaplaması

Bu kısımda gövde bölgesi öncelikle tamamen elastik, daha sonrasında kısmı plastik olduğu durum olarak iki farklı şekilde incelenmiştir.

<u>Gövde bölgesinin tamamen elastik olduğu durum:</u> Gövde bölgesinin tamamen elastik olduğu durumun kuvvet moment gösterimi **Şekil 3'de** görülebilir.





(3)

Sekil 3 üzerinde 1 numaralı bölge olarak kırmızı ile işaretlenen bölge üzerinde oluşan kuvvet ve bu kuvvetin merkeze olan uzaklığı (1) ve (2) numaralı denklemlerde görülebilir.

$$F_{1} = \frac{\sigma_{A}}{2} \frac{dt_{w}}{2}$$

$$y_{1} = \frac{d}{3}$$
(1)
(2)

Bu bölgedeki kuvvetten dolayı oluşacak moment;

$$M_1 = 2F_1 y_1$$

I-kesitli kirişin geometrisi simetrik olduğu için diğer tarafta da aynı büyüklükte moment oluşmaktadır ve bundan sonra hesaplanan her moment değerinde, moment 2 ile çarpılacaktır. (1) ve (2) nolu denklemler (3) nolu denklemde verine konursa aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$M_1 = \sigma_A \frac{d^2 t_w}{6} \tag{4}$$

Gövde bölgesinin kısmi plastik olduğu durum: Gövde bölgesinin tamamen kısmi plastik olduğu durumun kuvvet moment gösterimi Şekil 4'de görülebilir.



Şekil 4: Gövde bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için Kuvvet-Moment gösterimi

Şekil 4 üzerinde 2 numaralı bölgede verilmiş olan kuvvet ve onun merkeze olan mesafesi (5) ve (6) numaralı denklemlerde verilmiştir.

$$F_{2} = \frac{\sigma_{yw}}{2} t_{w} t_{y}$$

$$y_{2} = \frac{2}{3} y_{y}$$
(5)
(6)

Bu bölgedeki kuvvetten dolayı oluşacak moment;

 $M_2 = 2F_2y_2$ (7)

Bu bölgedeki momentin hesaplanabilmesi için (5) ve (6) nolu denklemler (7) nolu denklemde yerine koyulursa;

$$M_2 = \frac{2}{3}\sigma_{yw}t_wt_yy_y \tag{8}$$

3 numaralı bölgede gösterilmiş olan kuvvet ve kuvvetin kirişin merkezine olan mesafesi (9) ve (10) numaralı denklemlerde verilmiştir.

$$F_{3} = \frac{\sigma_{yw} + \sigma_{A}}{2} t_{w} (d/2 - y_{y})$$
(9)

$$y_{3} = y_{y} + \frac{(\sigma_{yw} + 2\sigma_{A})}{(\sigma_{yw} + \sigma_{A})} (d/2 - y_{y}) \frac{1}{3}$$
(10)

Bu bölgedeki moment;

$$M_3 = 2F_3 y_3$$
(11)

Şeklinde hesaplanabilir.

2

3.bölgedeki moment değerinin hesaplanabilmesi için (9) ve (10) numaralı denklemler (11) denkleminde verine koyulursa:

$$M_{3} = \left[(\sigma_{yw} + \sigma_{A}) t_{w} (d/2 - y_{y}) \right] \left[y_{y} + \frac{(\sigma_{yw} + 2\sigma_{A})}{3(\sigma_{yw} + \sigma_{A})} (d/2 - y_{y}) \right]$$
(12)

Başlık bölgesi için plastik moment hesaplaması

Bu kısımda başlık bölgesi öncelikle tamamen elastik, daha sonrasında kısmı plastik olduğu durum olarak 2 farklı şekilde incelenmiştir.

Başlık bölgesinin tamamen elastik olduğu durum: Başlık bölgesinin tamamen elastik olduğu durumun kuvvet moment gösterimi Şekil 5'de görülebilir.



Sekil 5: Başlık bölgesinin elastik olduğu durum için Kuvvet-Moment gösterimi

4 numaralı bölge üstünde oluşan kuvvet ve bu kuvvetin merkeze olan uzaklığı;

$$F_{4} = \frac{\sigma_{A} + \sigma_{C}}{2} bt_{f}$$

$$y_{4} = \frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_{A} + 2\sigma_{C}}{\sigma_{A} + \sigma_{C}}\right) \frac{t_{f}}{3}$$
(13)
(14)

(13) ve (14) numaralı denklemlerde görüldüğü gibi hesaplanabilir. Bu bölgedeki kuvvetin oluşturacağı moment ise (15) numaralı denklemde görülebilir;

$$M_4 = 2F_4 y_4 \tag{15}$$

(15) numaralı formülü hesaplamak için (13) ve (14) numaralı denklemler (15) numaralı denklemin içine yazdığımız zaman;

$$M_{4} = \left[(\sigma_{A} + \sigma_{C}) bt_{f} \right] \left[\frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_{A} + 2\sigma_{C}}{\sigma_{A} + \sigma_{C}} \right) \frac{t_{f}}{3} \right]$$
(16)

Başlık bölgesinin kısmi plastik olduğu durum: Başlık bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için kuvvet moment gösterimi Şekil 6'da görülebilir.

(22)



Şekil 6: Başlık bölgesinin kısmi plastik olduğu durum için Kuvvet-Moment gösterimi

5.bölgede ve 6. bölgede bulunan kuvvet değerlerini ve mesafe değerlerini hesaplayabilmemiz için σ_A (başlık ve gövde arasındaki bölgede oluşan gerilme), σ_C (kirişin en üst noktasında oluşan gerilme değerlerini kullanmamız gerekmektedir.

$$\sigma_A = \frac{y_y}{d/2} \sigma_{yf} \tag{17}$$

$$\sigma_{B} = \sigma_{yf} \tag{18}$$

$$\sigma_{c} = \sigma_{yf} \left(1 - c + c \frac{h/2}{y_{y}} \right)$$
(19)

Bu değerler kullanılarak F_5 ve y_5 değerleri hesaplanabilir.

$$F_{5} = \frac{(\sigma_{C} + \sigma_{yf})}{2} b(h/2 - y_{y})$$
(20)

$$y_{5} = y_{y} + \left(\frac{\sigma_{yf} + 2\sigma_{c}}{\sigma_{yf} + \sigma_{c}}\right) \frac{(h/2 - y_{y})}{3}$$
(21)

5.bölgedeki moment değeri (22) numaralı formül kullanılarak elde edilebilir. $M_5 = 2F_5y_5$

(20) ve (21) nolu denklemler (22) nolu denklemde yerine koyulursa aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$M_{5} = \left[(\sigma_{c} + \sigma_{yf})b(h/2 - y_{y}) \right] \left[y_{y} + \left(\frac{\sigma_{yf} + 2\sigma_{c}}{\sigma_{yf} + \sigma_{c}}\right)\frac{(h/2 - y_{y})}{3} \right]$$
(23)

6.bölge üzerinde oluşacak kuvvet ve kuvvetin merkeze olan mesafesi (24) ve (25) numaralı denklemler üzerinde verilmiştir;

$$F_{6} = \frac{(\sigma_{A} + \sigma_{yf})}{2} b(y_{y} - d/2)$$
(24)

$$y_{6} = \frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_{A} + 2\sigma_{yf}}{\sigma_{A} + \sigma_{yf}}\right) \frac{(y_{y} - d/2)}{3}$$
(25)

Bu bölge üzerinde oluşacak moment değeri M_6 ;

$$M_6 = 2F_6 y_6$$
 (26)

Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı

(24) ve (25) nolu denklemler (26) nolu denklemde yerine koyulursa aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$M_{6} = \left[(\sigma_{A} + \sigma_{yf})b(y_{y} - d/2) \right] \left[\frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_{A} + 2\sigma_{yf}}{\sigma_{A} + \sigma_{yf}} \right) \frac{(y_{y} - d/2)}{3} \right]$$
(27)

Başlık ve gövde bölgesinin tamamen plastik olduğu durum

Bu kısımda başlık ve gövde bölgesinin birlikte plastik olduğu durum incelenmiştir. Bu bölgenin kuvvet moment gösterimi **Şekil 7'de** görülebilir.



Şekil 7: Başlık ve gövde plastik olduğu durum için Kuvvet-Moment gösterimi

7.bölge üzerinde oluşacak kuvveti ve kuvvetin merkeze olan uzaklığını hesaplayabilmemiz için σ_c ve σ_A bilinmelidir. (27) ve (28) numaralı denklemlerde görülebilir.

$$\sigma_{c} = \sigma_{y} \left(1 - c + c \frac{h/2}{y_{y}} \right)$$

$$\sigma_{A} = \sigma_{y} \left(1 - c + c \frac{d/2}{y_{y}} \right)$$
(28)
(29)

Daha sonra F_7 ve y_7 değerleri (30) ve (31) numaralı denklemlerde olduğu gibi hesaplanabilir.

$$F_{7} = \frac{(\sigma_{A} + \sigma_{C})}{2} bt_{f}$$
(30)

$$y_7 = \frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_A + 2\sigma_C}{\sigma_A + \sigma_C}\right) \frac{t_f}{3}$$
(31)

Bu bölgede kuvvet sebebiyle oluşacak moment;

$$M_7 = 2F_7 y_7 \tag{32}$$

şeklinde hesaplanabilir.

Kirişin tamamen plastik olduğu bölgedeki momentin hesaplanabilmesi için (32) numaralı denklem içersine (30) ve (31) numaralı denklem yazılarak (33) numaralı denklem elde edilebilir.

$$M_{7} = \left[(\sigma_{A} + \sigma_{C}) b t_{f} \right] \left[\frac{d}{2} + \left(\frac{\sigma_{A} + 2\sigma_{C}}{\sigma_{A} + \sigma_{C}} \right) \frac{t_{f}}{3} \right]$$
(33)

Kompozit kirişin analitik metotlar ile hesaplanmasını yapabilmemiz için (4), (8), (12), (16), (23), (27), (33) numaralı denklemlerin moment sonuçlarını bir denklem içerisinde toplamamız gerekmektedir. (34) numaralı denklemde; bu yukarıdaki bahsi geçen denklemlerden yararlanarak plastik moment kapasitesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$M_{kesit} = \sum M_{govde} + \sum M_{baslik}$$
(34)

Yapılmış olan analitik metotlar ile çözümlemelerin doğrulaması için 4 farklı eğer ifadesi(if statement) (34) numaralı denklem içerisinde kullanılması gereklidir. Bunlar; hepsinin elastik olduğu durum, başlık kısmının plastik gövde kısmının elastik olduğu durum, başlık kısmının elastik gövde kısmının plastik olduğu durum ve başlık ve gövde kısmının plastik olduğu durum olarak özetlenebilir.

Analitik metodun doğrulanabilmesi için Pyhton programlaması kullanılarak daha önce bahsedilen eğer ifadesi tanımlanmıştır ve buna göre çözümlemeler yapılmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken Başlığın akma gerilmesi(σ_{yf}) < Gövdenin akma gerilmesi(σ_{yw}) olduğu kabul edilmiştir. Hesaplamalar yapılırken kullanılan malzeme özellikleri **Tablo 1'de** verilmiştir.

Bi-lineer elastik-plastik malzeme gerilim-gerinim grafiği Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: Bi-lineer elastik-plastik malzeme gerilim-gerinim grafiği

Bu grafiklere göre yapılan hesaplamalarda I-kesitli kirişin gövde kısmının ve başlık kısmının elastisite modülünün aynı ($E_W = E_f = E_y$), teğet modüllerini farklı ($E_{tw} \neq E_{tf}$) ve akma dayanımılarının farklı ($\sigma_{yf} \neq \sigma_{yw}$) olduğu kabul edilmiştir. $\sigma_{yf} < \sigma_{yw}$ olduğuna göre, plastik bölgeye öncelikli olarak girecek kısım kirişin başlık bölgesidir, ve daha sonra yukarıdan aşağı olmak üzere gövde kısmı plastik bölgeye geçiş yapmaktadır.

SONLU ELEMANLAR METODU İLE ÇÖZÜM

Bildirinin bu kısmında I-kesitli kompozit kirişin analitik metotlar ile çözümünü doğrulamak için Ansys 2018 programı kullanılmıştır. I-kesitli kompozit kiriş SolidWorks 2015 programı kullanılarak çizilmiştir. Daha sonra, sonlu elemanlar ağı tanımlaması yapılabilmesi için ANSA programı kullanılmıştır. ANSA programı içerisinde kiriş Shell element olarak (4-köşeli SHELL181) elementi kullanılarak tasarlanmıştır. Programın çözüm süresi kısaltılması ve alınan sonucun doğruluğundan emin olunabilmesi için çeşitli sonlu elemanlar ağı doğrulaması işlemleri yapılmıştır ve daha sonra analizlere başlanmıştır.

Ansys programı bünyesinde plastik analizler sıkılıkla kullanılmaktadır. Analizler yapılırken I-kesitli kirişin başlık ve gövde kısmının farklı malzemelerden oluştuğu ve aynı zamanda malzemeler bilineer plastik malzeme özelliğine sahip olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 4'de verilen gerilim-gerinim grafiği benzeri malzeme tanımlaması Ansys programına girilmiştir. Malzeme özellikleri **Tablo 1'de** detaylı olarak görülebilir.

Tablo 1. Kullanılan Bi-lineer malzeme özellikleri

$E_{_y}$ (Elastik Modül)	200(GPa)	
$E_{ m tf}$ (Başlık kısmının tanjant modülü)	1000(MPa)	
E_{tw} (MPa) (gövde kısmının tanjant modülü)	1000(MPa)	
$\sigma_{_{y\!f}}$ (Başlık kısmının akma gerilmesi)	352(MPa)	
$\sigma_{_{yw}}$ (gövde kısmının akma gerilmesi) 376(MPa)		
u (poissons oranı)	0.3	

Analiz yapılırken malzemenin Von-Mises akma kriterine göre eğildiği ve ayrıca kinematik sertleşme kuralını izlediği kabul edilmiştir ve programda bu şekilde tanımlanmıştır. Buna ek olarak, programın iteratif Newton-Raphson metodu ile çözümleme yapması istenmiştir. Eğilme(Bending) analizi yapabilmek için 4-nokta temaslı eğilme metodu esas alınmıştır. I-kesitli kiriş üzerinde uygulanan sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları **Şekil 9 (a) ve (b)'de** görülebilir.



Şekil 9(a): Sınır koşulları



Şekil 9(b): Sonlu Elemanlar Ağı

ANALİZ SONUÇLARI ve ANALİTİK METOT İLE YAPILAN HESABIN KARŞILAŞTIRILMASI

Ansys 2018 kullanılarak plastik momentin özellikleriyle sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Plastik bölgede yapılan analizin doğruluğu için Plastik Moment ile Orta Noktadaki Sehim eğrisi çizdirilmiştir. (Bakınız: **Şekil 10**)



Şekil 10: Plastik Moment ile Orta Nokta Sehim grafiği

Yapılmış olan plastik analiz ile analitik hesap yöntemiyle elde edilen M_{ela} (Elastik Moment) ve M_{pla} (Plastik Moment) değerlerinin birbirleriyle karşılaştırılması Tablo 2'de görülebilir. Analitik metotlar ile hesaplamalar yapılırken (34) numaralı denklem kullanılmıştır.

	Analitik Metot	Sonlu Elemanlar Analizi	Hata Oranı(%)
$M_{_{ela}}$	91.7 kN.m	91.5 kN.m	%0.2
M_{pla}	103.5 kN.m	100.6 kN.m	%2.8

Tablo 2'den anlaşılabileceği üzere analitik metot ile yapılmış olan hesaplamalar Sonlu Elemanlar Analizi ile yapılan hesaplamalar ile doğrulanmıştır.

YÖNTEM

Analitik metot ile kompozit malzemelerin plastik momentinin hesaplanması aşamasında [D'Mello ve Tsavdaridis 2012] makalesinden fikir edinilmiştir. Analitik metotlar ile hesaplamalar yapılırken [Dadras, 2001]'in eğri kiriş üzerinde uyguladığı metotlar, [Gallego A., Rescalvo F. J., Suarez E., Valverde-Palacios I., 2018], [Block P., Gardner L., Liew A., 2017]' nın yapmış olduğu analitik çözümler göz önünde bulundurulmuştur. Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapılırken [D'Mello ve Tsavdaridis 2012], [AbdelRahim A.B., Abdul Hameed D.O., ve Dessouki A.K., 2015] makalelerinden, 3-nokta temaslı eğilme metodu ve 4-nokta temaslı eğilme metodu örnekleri göz önünde bulundurulmuştur ve 4-nokta temaslı eğilme metodu uygulanmıştır.

UYGULAMALAR

Bildirinin bu kısmında analitik metot ile yapılan hesaplamalar sonucu E_t / E_y 'nin değişimi ile plastik momentin nasıl arttığını gösteren bir grafik mühendislerin kullanılabilmesi **Şekil 11'de** sunulmuştur.





34 numaralı denklem kullanılarak Plastik moment ve elastik moment değerleri farklı E_t / E_y oranları için hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken akma mesafesi (y_y), değişken olarak kabul edilmiştir.

 E_t / E_y arttıkça moment kapasitesinin arttığı grafikten açıkça görülmektedir. Plastisitenin başlık bölgesinden aşağıya doğru yaklaşmaya başladığı zaman belirli bir değere kadar moment kapasitesi az değişmekte, kritik bir değeri geçtikten sonra hızlı bir şekilde kapasite artmaya başlamaktadır. Bu artış E_t / E_y 'nin küçük olduğu değerlerde çok daha hızlıdır.

 E_t / E_y oranı sıfır olduğu zaman, elastik-tam plastik(elastic-perfectly plastic) malzeme için, plastik kesit katsayısı 1.125 çıkmıştır ve doğrunun asimptotik olarak ilerlemesi son bulmuştur. **Şekil 12'de** görülebilir.



Şekil 12: $E_t / E_y = 0$ için Moment oranı ile yükseklik oranı kıyaslaması (Elastik-tam plastik

malzeme) 11

Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı

Elastik-tam plastik kesit için yükseklik oranı vs Moment oranı grafiğini vermektedir. Şekilde görüldüğü gibi başlık bölgesinin kirişin yüksekliğinin yarısına oranı 0.071'dir. Başlık bölgesindeki yığılma oranı(birim mesafedeki moment değişim oranı), gövde bölgesindeki yığılma oranından daha büyüktür. I-kesitli kirişlerde M_{pla}/M_{ela} 1.10-1.15 arası değişmektedir. Bu örnekte de bu değerler içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca cisim üstüne gelen moment yükünün artmasıyla birlikte kesitte oluşacak gerilme yüklemesi Analitik Metot ile ve Ansys 2018'de yapılan analizler ile elde edilmiştir ve karşılaştırılmıştır. Buna göre; malzemenin elastik olduğu durum, malzemenin elastik momenten plastik momente geçtiği durum, malzemenin kısmı plastik bölgede olduğu durum ve malzemenin tam olarak plastik olduğu durum şeklinde analiz edilmiştir. **Şekil 13 ve 14'de** birkaç farklı yük için kirişin orta noktasındaki normal gerilme dağılımı verilmiştir.







Şekil 14: (c) Kısmı Plastik, (d) Tamamen plastik

Şekil 13 ve 14'den de görülebileceği üzere analitik metot ile hesaplanan kirişin orta noktasının kesitindeki normal gerilme değerleri, sonlu elemanlar metodu ile hesaplanan gerilme değerleriyle aynı sonuçları vermektedir. Hesapların doğruluğu kesitte elde edilen grafikten de görülebilir.

Bu karşılaştırmalar dışında 12 farklı doğrusal olmayan(Non-linear) plastik analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 13 ve 14'de olduğu gibi kirişin orta noktasındaki normal gerilme değerleri elde edilmiştir. **Şekil 15'de** görülebilir.



Şekil 15: Doğrusal Olmayan Ansys 2018 Analizleri

Bu grafik ile birlikte I-kesitli kirişlerde oluşacak plastik momentin nasıl arttığı görülebilir.

SONUÇ

Sonuç olarak, mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan kompozit yapıya sahip I-kesitli kirişlerin plastik moment kapasitesi analitik metot ile hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaların doğrulanabilmesi için Ansys 2018 programı kullanılmıştır. Yapılan işlemler ve sonlu elemanlar analizinin birbirleriyle yakın sonuç verdiği görülmektedir. Yapılan analitik hesaplamalar ile birlikte, mühendisler, I-kesitli kompozit kirişlerin plastik momentinin hesaplanması, Şekil 11 (E_t / E_y)'de verilen grafik ile birlikte (E_t / E_y) oranın kompozit kiriş üstünde nasıl bir etki bıraktığı ve plastik momentin artmasıyla birlikte kesitte oluşacak gerilme yüklemesini elde edebilmektedirler.

Bu çalışmanın devamı olarak;

- I-kesitli kirişlerin üzerinde döşeme plakaları yerleştirilmektedir. Yerleştirilen plakalar ile birlikte
 I-kesitli kirişler, üçlü kompozit yapı halini almaktadır. Bu araştırmanın daha ileri safhası olarak
 üçlü kompozit yapının plastik moment kapasitesinin analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile
 hesaplanması araştırılabilir.
- Üzerinde ağırlık azaltma deliği olan I-kesitli kiriş yapılarının moment hesaplamaları analitik metot ile ve sonlu elemanlar metoduyla farklı geometrik ağırlık azaltma delikleri için yapılabilir.
- Bu çalışma simetrik I-kesitli kiriş için yapılmıştır. Benzer bir çalışma asimetrik I-kesitli kirişlerin plastik moment hesaplamaları için yapılabilir.

Kaynaklar

[Gallego A., Rescalvo F. J., Suarez E., Valverde-Palacios I., 2018], Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips, Composite Structures, s. 29-38.

[Block P., Gardner L., Liew A., 2017], Moment-Curvature Thrust Relationships for Beam-Columns, Structures 11, s.146-154.

[Celik M., Guler M.A., Orun A. E., 2016], Kiriş yapılarındaki hafifletme deliği etrafındaki güçlendirmenin, birleşik yükler altındaki kritik burkulma gerilmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi, Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Kocaeli Üniversitesi, 28-30 Eylül.

[AbdelRahim A.B., Abdul Hameed D.O., ve Dessouki A.K., 2015] Bending strength of singly-symmetric overhanging floor I-beams, HBRC Journal, s.176-193.

[D'Mello C. ve Tsavdaridis K., 2012], Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes, through Non-linear Finite Element Analyses, Journal of Structural Engineering, s.1214–1230.

[Chan C.L., Hamouda A.M.S., Khalid Y.A., ve Sahari B.B., 2002], Finite element analysis of corrugated web beams under bending, Journal of Constructional Steel Research, s.1391-1406.

[Dadras P, 2001] Plane strain elastic plastic bending of a strain-hardening curved beam, International Journal of Mechanical Sciences, s.39-56.

[Callioglu H., ve Sayman O., 2000], An elastic±plastic stress analysis of thermoplastic composite beams loaded by bending moments, Composite Structures, s.199-205

[McCutcheon, J. O., ve Redwood, R. G., 1968], "Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings." J. Struct. Div., s.1–17.