VI. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI
28-30 Eylül 2016, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

UHUK-2016-029

KİRİŞ YAPILARINDAKİ HAFİFLETME DELİĞİ ETRAFINDAKİ GÜÇLENDİRMENİN, BİRLEŞİK YÜKLER ALTINDAKİ KRİTİK BURKULMA GERİLMESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Arif Emre ÖRÜN[1] ve Mehmet Ali GÜLER[2]
TOBB ETÜ, ANKARA

Murat ÇELİK[3]
TÜBİTAK UZAY, ANKARA

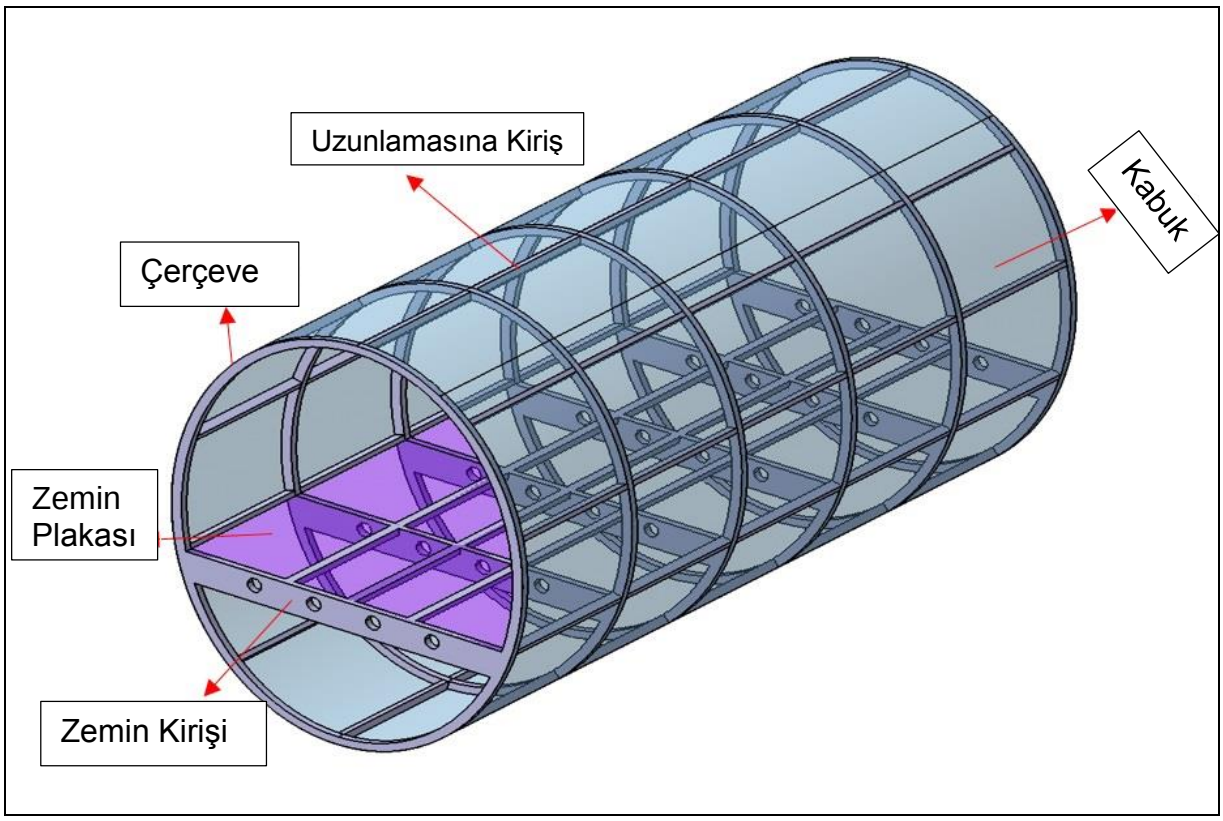
ÖZET

Havacılık ve savunma alanında kullanılan kiriş yapılarında çeşitli tasarım prensipleri kullanılmaktadır. Elektrik kabloları, hidrolik boruları, temiz ve atık su boruları gibi gereksinimlerden dolayı kiriş gövdesi (web) üzerinde hafifletme deliği açılmaktadır. Bu deliklerden dolayı delik yarıçapına bağlı olarak kritik burkulma gerilmesi değerinde azalma meydana gelmektedir. Bu zayıflamayı önlemek amacı ile delik etrafı güçlendirme metoduna başvurulmaktadır. Farklı parametrelerde tasarlanan kiriş yapılarında farklı yükleme koşullarında ABAQUS sonlu elemanlar (SE) programında burkulma analizleri yapılmıştır. Doğrulama işlemi, ABAQUS programından elde edilen analiz sonuçları, teorik hesap ve literatürdeki uluslararası makalelerdeki test datalarının karşılaştırılması ile yapılmıştır. SE programı kullanılarak saf yüklemeler altında (saf basma, saf kayma, saf eğilme), tasarlanan yapının güvenlikle taşıyabileceği (allowable) gerilme değerlerinin farklı tasarım kriterlerine bağlı eğrileri elde edilmiştir. Bu hesaplamalardan sonra, SE programı kullanılarak, birleşik yüklemeler (basma, kayma, eğilme) altında kritik burkulma gerilme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen güvenlikle taşıyabileceği gerilme değerine ve birleşik yükleme koşulundaki değerlere bağlı olarak yükleme oranları hesaplanmıştır. Sonuç olarak, basma, kayma ve eğilme yükleme oranlarına bağlı olarak parametrik etkileşim eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen eğriler yardımı ile mühendisler, tasarımın istenilen yük koşulunda burkulmaya sebebiyet verip vermeyeceğini grafik üzerinden gözlemleyebilecektirler.

GİRİŞ

Uçak ve benzeri hava araçlarının iskelet gövdeleri **Şekil 1**'de görüldüğü üzere temelde kabuk (skin), çerçeve (frame) ve uzunlamasına kirişler (lonjeron/stringer) parçalarından oluşmaktadır. Yine **Şekil 1**'de yer verildiği üzere, yolcu koltuklarının bulunduğu düzlemi taşıyan yapıya zemin kirişi (floor beam) ve zemin plakaları (floor panels) adı verilmektedir. Zemin kirişinde olduğu gibi uçak yapılarında tasarlanan kirişlerin birçoğunda çeşitli tasarım prensiplerine ve ağırlık hafifletmesi gibi nedenlerle delik açma işlemi yapılmaktadır [1,2]. Bu işlem sonucu zayıflayan yapılar, eğer saç bükme yöntemi ile üretiliyor ise delik kısmı dışa doğru bükülerek; birçok uçak parçasında da olduğu gibi eğer talaşlı imalat yöntemi (CNC) ile üretilmekte ise delik etrafında belirli genişlik ve yükseklikte güçlendirme yapısı bırakılarak kuvvetlendirme yoluna gidilmektedir. Bu çalışmada parça CNC metodu baz alınarak üretilmiştir.

[1] Araştırmacı, E-posta: arif.orun@tubitak.gov.tr
[2] Prof. Dr., Makina Müh. Böl., E-posta: mguler@etu.edu.tr
[3] Başuzman Araştırmacı, E-posta: murat.celik@tubitak.gov.tr

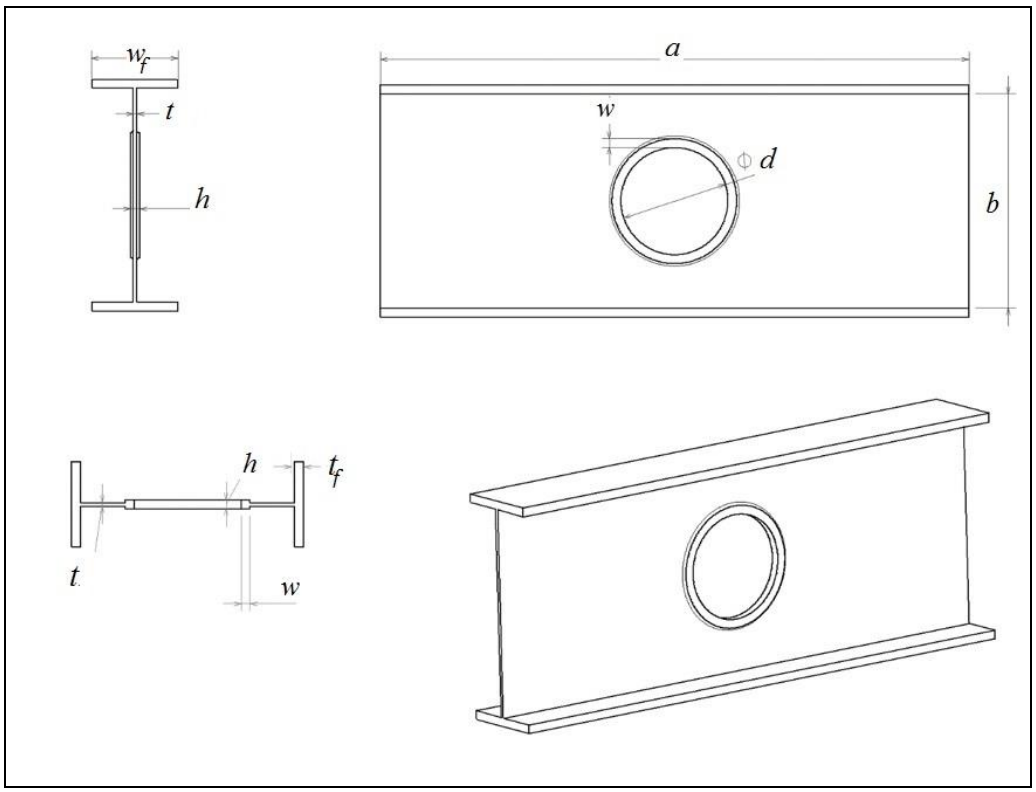


Şekil 1: Yolcu Uçakları için genel iskelet gövdesi ve zemin kirişi (floor beam) yapısı

Bu çalışmada, burkulmayı modellemek ve analiz etmek için ABAQUS sonlu elemanlar (SE) programı kullanılmıştır. Panedpojaman [6] makalesinde yürütülen yükleme koşulları ABAQUS programı ile tekrar koşturulmuş ve makalede yer alan ANSYS programı ile elde edilen yükleme - deformasyon eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra “Aerospatiale - Static stressing Manual"[3] uçak yapıları el kitaplarında yer alan saf yükleme koşulları için kritik burkulma gerilmesi formüllerinden elde edilen teorik hesap ile ABAQUS ile elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler ve hata oranları **Tablo 2**’de sunulmuştur. Bu iki yöntem ile SE programının doğrulanma işlemi başarıyla tamamlanmıştır.

Tablo 1: Sonlu Elemanlar Programı doğrulama işlemi – Hata oranı tablosu

Yükleme [kN]	Yer Değiştirme [mm]					Hata Oranı %		
	Deneysel	ANSYS	ABAQUS	Teorik Hesap		Deney - ABAQUS	ANSYS - ABAQUS	Teorik - ABAQUS
30.00	0.80	0.84	0.85	0.91		5.88	1.18	7.06
60.00	1.65	1.69	1.71	1.75		3.51	1.17	2.34
90.00	2.51	2.53	2.56	2.65		1.95	1.17	3.52
100.00	2.78	2.81	2.84	2.87		2.11	1.06	1.06
110.00	3.02	3.11	3.15	3.21		4.13	1.27	1.90
120.00	3.41	3.55	3.48	3.45		2.01	2.01	0.86
130.00	3.81	4.50	3.86	3.91		1.30	16.58	1.30
140.00	4.31	7.10	4.35	4.41		0.92		1.38
150.00	4.92		5.07	5.12		2.96		0.99
160.00	6.11		6.19	6.21		1.29		0.32
165.00	6.85		6.91	6.95		0.87		0.58



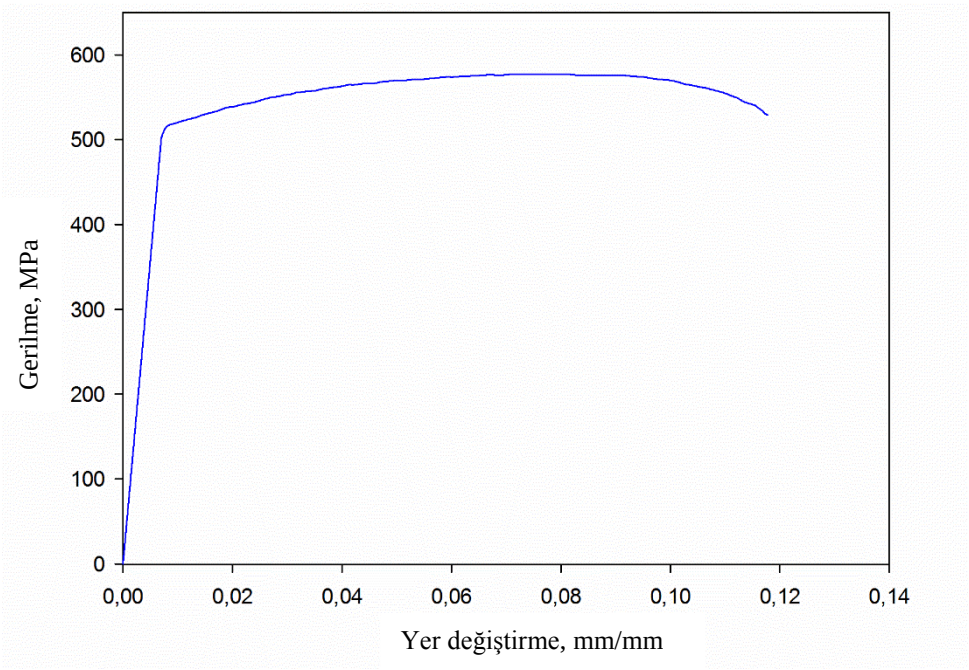
Şekil 2 Kiriş Geometrisi parametreleri

Analizlerde kullanılmak üzere, sekizer farklı güçlendirme yüksekliğinin web kalınlığına oranı (h/t), güçlendirme genişliğinin delik çapına oranı (w/d) ve web genişliğinin web yüksekliğine oranı (a/b) için tasarımlar yapılmıştır. Web kalınlığı, t, flanş kalınlığı, t_f, flanş genişliği w_f ve web yüksekliği, b sırasıyla 2 mm, 5 mm, 48 mm ve 120 mm olarak sabit alınmıştır. Web uzunluğu ise 330 mm olarak referans alınmıştır. **Şekil 2**'de kiriş geometrisi ve geometrik parametreler sunulmuştur.

Havacılık alanında kiriş ve çerçeve yapılarında çoğunlukla alüminyum 7000 serisi tercih edilmektedir. Bu çalışmada 7075 T651 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Analizlerde gerekli olan malzeme özellikleri **Tablo 2**'de sunulmuştur. SE programında doğru sonuç alabilmek için malzemenin MIL-HDBK 5 [4]'te yer alan gerilme-yer değiştirme eğrisinden (**Şekil 3**) hem elastik hem plastik gerilme değerleri elde edilerek girdi olarak eklenmiştir.

Tablo 2: Alüminyum 7075 T651 malzeme özellikleri

Yoğunluk (g/mm^3)	$2.81*10^{-9}$
E_c , Esneklik Modülü (MPa)	71700
F_{ty} , Akma Gerilmesi (MPa)	502
F_{tu} , Kopma Gerilmesi (MPa)	572
ν , Poisson oranı	0.33
E_s , Kayma Modülü (MPa)	26900
F_{su} , Kayma Gerilmesi (MPa)	331



Şekil 3: Alüminyum 7075 T651 gerilme-yer değiştirme eğrisi

Teorik Hesap

Buradaki teorik hesaplar Aerospatiale [3] "SSM V1-2 • Buckling of Thin Plates and Shells section" bölümünde yer alan hesaplamalar baz alınarak yapılmıştır. Denklem (1-3) ile saf basma, kayma ve eğilme kuvvetleri altında güvenlikle taşıyabileceği gerilme değerleri hesaplanmaktadır. Formülde yer alan burkulma faktörü (K) sınır şartlarına bağlı olarak belirlenmektedir.

$$F_{ccr} = K_c E_c \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq F_{cy} \tag{1}$$

$$F_{bcr} = K_b E_c \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq F_{cy} \tag{2}$$

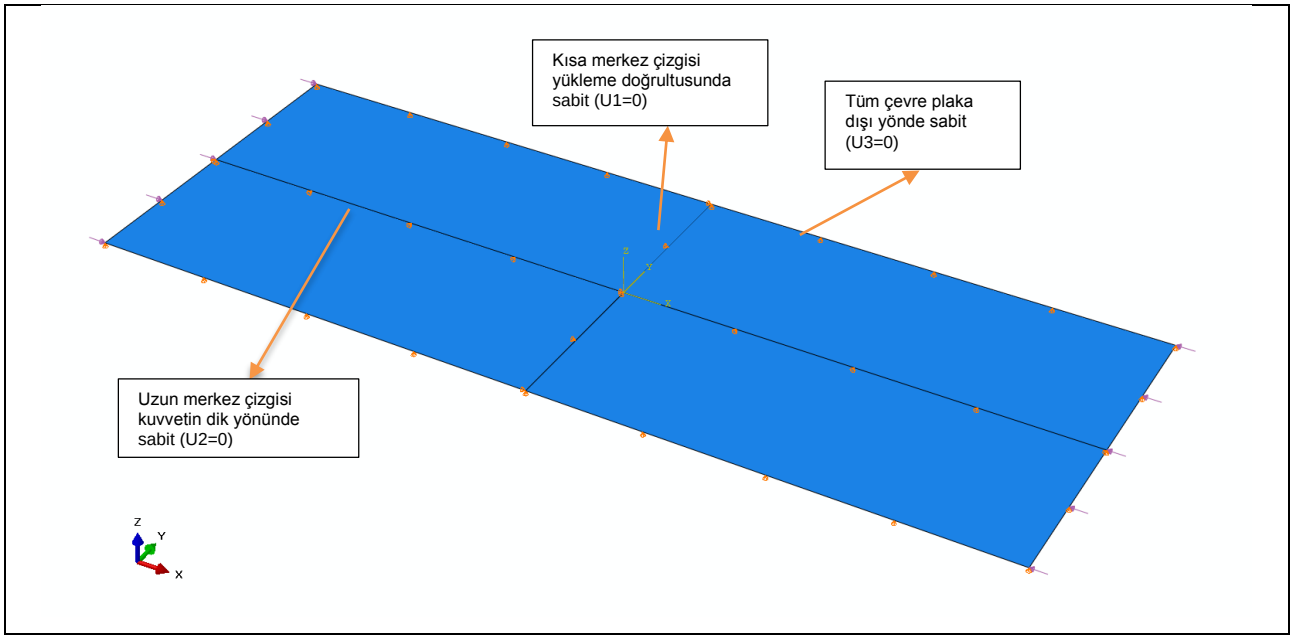
$$F_{scr} = K_s E_c \left(\frac{t}{\min(a;b)}\right)^2 \leq F_{sy} \tag{3}$$

F_{ccr} saf basma yükü altında kritik burkulma gerilmesi, F_{bcr} saf eğilme yükü altında kritik burkulma gerilmesi, F_{scr} saf kayma yükü altında kritik burkulma gerilmesini ifade etmektedir. K_c (basma burkulma katsayısı), K_b (Eğilme burkulma katsayısı) ve K_s (Kayma burkulma katsayısı) Aerospatiale [3] kaynağında yer alan a/b oranı ve sınır şartlarına bağlı olarak hesaplanmıştır.

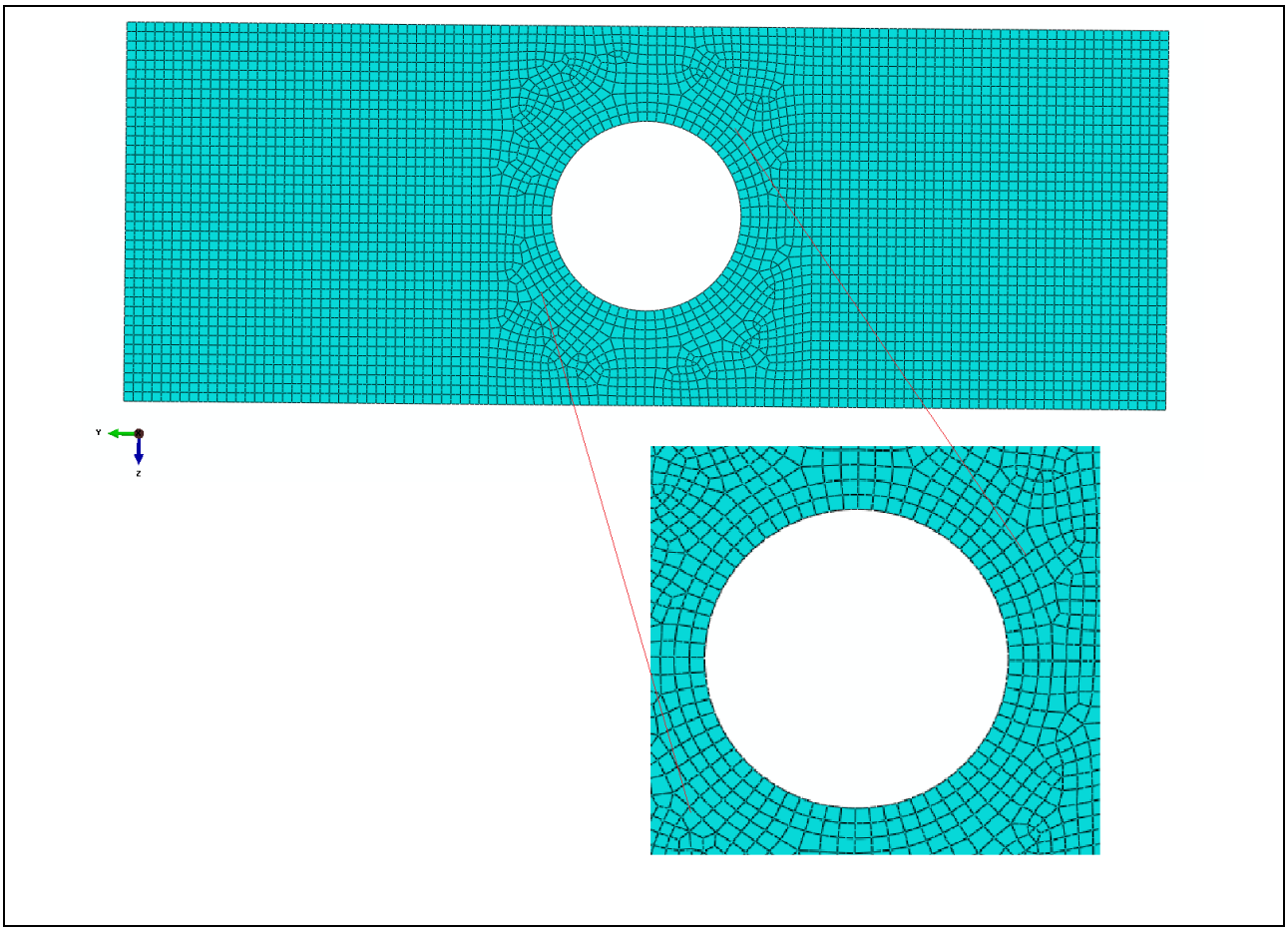
Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Burkulma Analizi Çalışması

Ağ (mesh) ve sınır şartları: SE programında çalışma 2 boyutlu (2B) elemanlar kullanılarak yürütülmüştür. 2B çalışmada plaka kalınlığı olarak 2 mm ABAQUS modülüne tanımlanmıştır. SE çalışmalarında doğru sonuç alınabilmesi için ağ çalışması ve sınır şartı belirleme konusu ciddi öneme sahiptir. Kritik burkulma değerinin daha doğru hesaplanabilmesi için 4 düğüm noktalı element yerine 8 düğüm noktalı element modeli (S8R5-quadratic shape function) tercih edilmiştir. Delik etrafındaki burkulmanın daha net gözlenebilmesi için delik etrafı ağ geçişi daha düzgün ve olabildiğince karesel olması hedeflenmiştir (washer metodu, **Şekil 5**). Üç ayrı saf yükleme ve

birleşik yükleme koşulu olmak üzere dört farklı yükleme ortamı için ayrı ayrı sınır şartı çalışması yürütülmüştür. Basma ve eğilme yükleme koşulu ve efektif ağ çalışması için Moen[5] makalesinde yer alan çalışmalar referans alınmıştır. Kayma ve birleşik yükleme koşulu için ise tasarlanan sınır şartı çalışması teorik hesaplar ile doğrulanarak yeni bir yaklaşım sağlanmıştır. Basma yükü koşulu sınır şartları **Şekil 4**'te sunulmuştur.



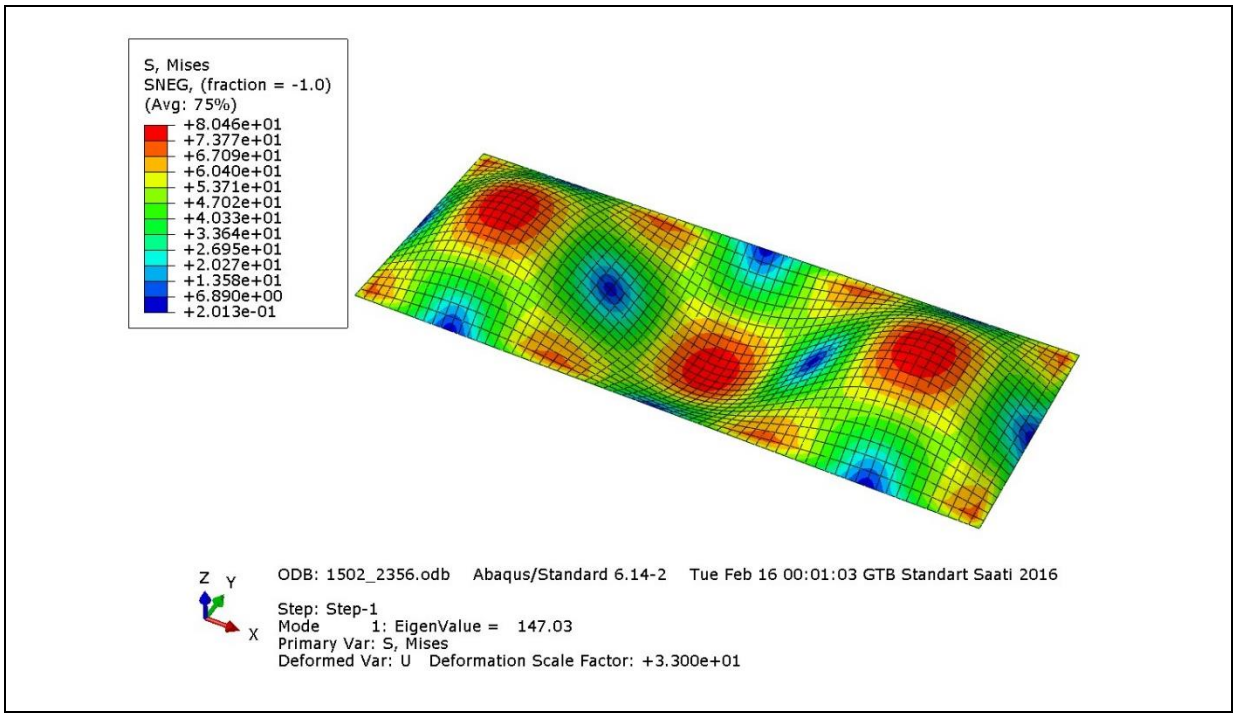
Şekil 4: Basma kuvveti için sınır şartı koşulları ve yükleme



Şekil 5: Washer metodu ile delikli plaka ağ çalışması

Yükleme ve Burkulma hesabı: 3 boyutlu plaka 2 boyuta indirgendiği için ABAQUS birim kalınlık yüklemesi modülü (shell edge load) kullanılmıştır. Basma kuvveti, kısa kenar normali yönünde; kayma kuvveti için 4 kenardan plaka kenar kayma yükü; eğilme yüklemesi için ise kısa kenarın üst köşesinde normal birim yük alt köşesinde negatif normal birim yük olacak şekilde lineer fonksiyonel bir yükleme yapılmıştır. Birleşik yükleme koşulu için ise tüm bu yük koşulları aynı anda uygulanmıştır.

Öz değer yorumlanması: ABAQUS programında Buckling (Burkulma) analiz aracı ile çalışmalar yürütülmüş ve sonuç kısmında özdeğer çıktısı vermiştir. Yüklemeler birim kalınlık için yürütüldüğünden, özdeğeri yapının kalınlığına (2 mm) bölerek kritik burkulma gerilmesi elde edilmektedir. **Şekil 6**'da verilen örnek için kritik burkulma gerilmesi değeri, özdeğer ikiye bölünerek 73.515 MPa olarak hesaplanmaktadır.



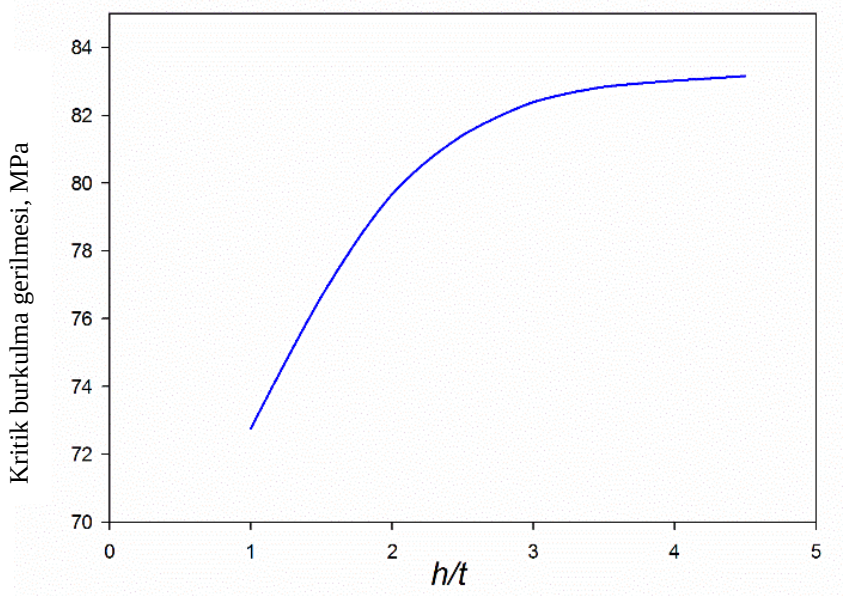
Şekil 6 Saf basma kuvveti altında plaka burkulma analizi

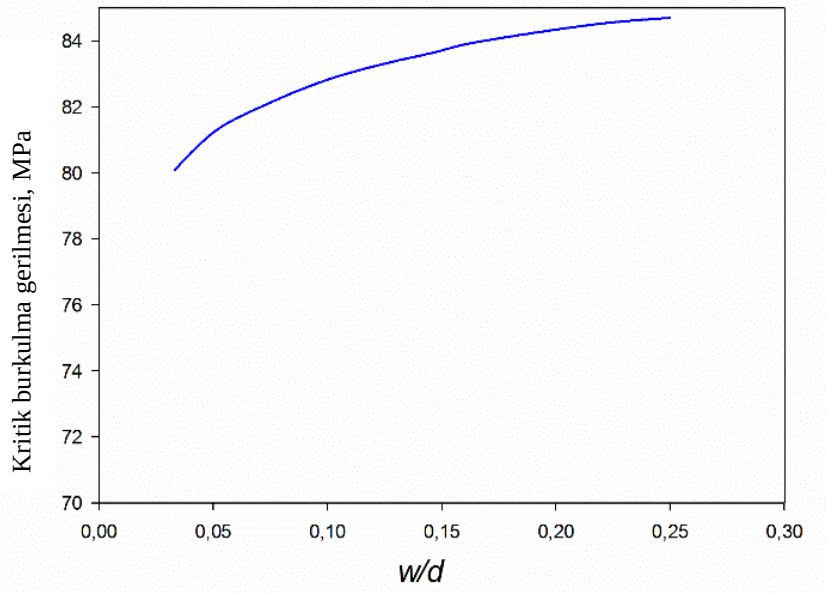
YÖNTEM

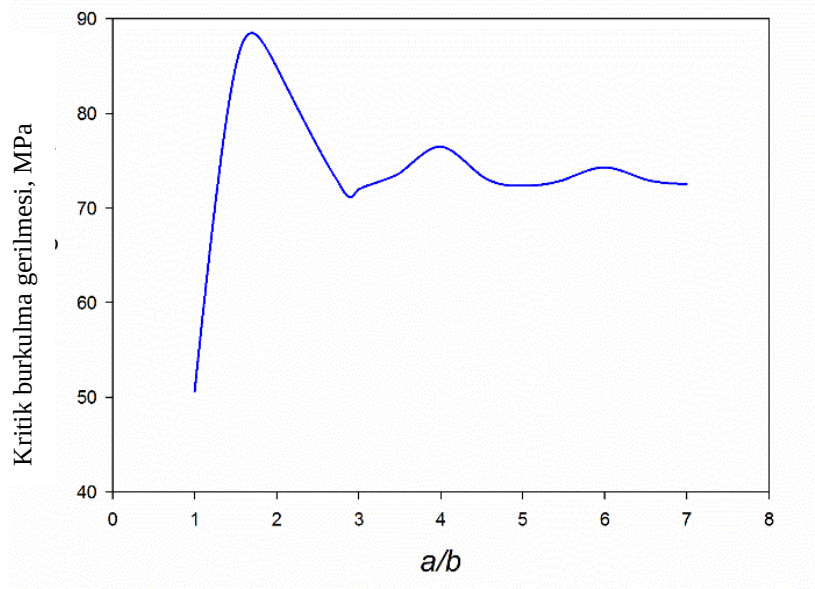
Kavramsal tasarım aşamasında [ChengB, 2010] ve [ChengB, 2014] nolu makalelerden fikir edinilmiştir. Doğrulama işlemlerinde [PanedpojamanP, 2014], [TsavdaridisK, 2011] ve [HuetJ, 1999] numaralı referanslar kullanılmıştır. Sınır şartı belirlenmesinde [MoenC, 2009] nolu makaleden faydalanılmıştır.

UYGULAMALAR

Tasarlanan sekizer farklı *h/t*, *w/d* ve *a/b* oranları ile 3 farklı saf yükleme koşulu için toplamda 9 farklı kritik burkulma gerilmesinin geometrik parametrelere bağlı değişim eğrileri oluşturulmuştur. **Şekil 7**'de saf basma kuvveti altında 0.5 d/b oranında deliğe sahip tasarım için eğrilere yer verilmiştir. Bu eğriler sayesinde farklı geometrik tasarımlar için kritik burkulma gerilmesi değerleri hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda eğrilerin belirli değerlerden sonra yakınsama eğilimine girdiği gözlenmektedir. Bu değerler ideal tasarım için gerekli geometrik parametreyi ifade etmektedir.



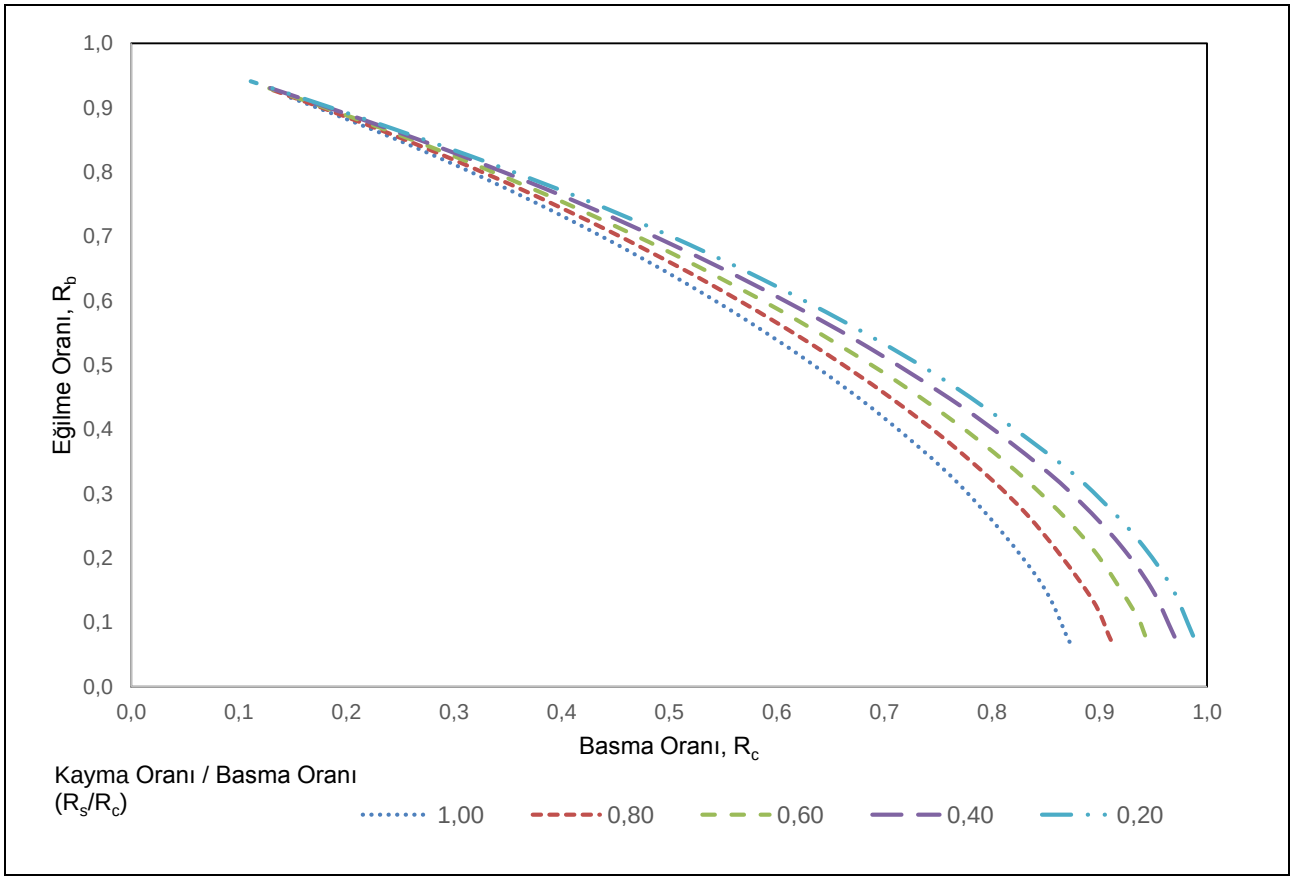




Şekil 7: Saf basma yükü altında *h/t, w/d* ve *a/b* oranına bağlı kritik burkulma gerilmesi eğrileri

Bir sonraki aşamada ise birleşik yükleme koşulunda öncelikle basma, eğilme ve kayma yükleri birim yükleme olarak uygulanarak dayanabileceği kritik burkulma gerilme değeri hesaplanmıştır. Daha sonra basma ve kayma yükleri sabit, eğilme kuvveti değişken olarak oluşturulmuş ve ilk çalışmada bulunan güvenlikle taşıyabileceği gerilme değeri ve uygulanan bu yüklemelerle elde edilen özdeğerler ile basma, kayma ve eğilme oranları elde edilmiştir. Bu eğriler **Şekil 7**'de gösterildiği üzere etkileşim (intreraction) eğrisi ile parametrize edilmiştir.

$R_c = \frac{\sigma_{app}}{F_{ccr}}$ basma oranı, $R_s = \frac{\sigma_{app}}{F_{scr}}$ kayma oranı ve $R_b = \frac{\sigma_{app}}{F_{bcr}}$ eğilme oranı , σ_{app} uygulanan gerilmedir (applied stress).



Şekil 8: Birleşik yükleme altında Kritik Burkulma Gerilmesi etkileşim eğrisi

SONUÇ

Klasik el hesabı formüllerinde sadece deliksiz yapılar için burkulma sonuçları hesaplanması mümkün iken bu çalışma sonucunda, elde edilen parametrik formüllerle kullanıcı web yükseklik, web genişlik, delik etrafı güçlendirme gibi geometrik verilerini girdiğinde kritik burkulma gerilmesi değerini elde edebilecektir. Ayrıca bildiriyi daha önce yayınlanan uluslararası çalışmalardan farklı kılan en önemli özelliği ise birleşik yükler için güvenlik katsayısı parametrik çalışması ile uygulanan yüklemeler altında yapının burkulma güvenlik faktörü hesabı yapılabilinecek olmasıdır.

Kullanıcı yükleyeceği yüklere bağlı olarak belirleyeceği basma, eğilme ve kayma oranları girdileri etkileşim eğrisinin altında yer alması durumda tasarladığı sistemin doğruluğunu/güvenirliğini gözlemlemiş olacaktır.

Kaynaklar

1- Cheng B., Shi P., Wang J., Li C., *Opening reinforcement for box-section walls containing continuous elliptical holes in steel pylons,* Journal of Constructional Steel Research 103 (2014) 89–100.

2- Cheng B., *Strengthening of perforated plates under uniaxial compression: Buckling analysis*, Thin Walled Structure 48 (2010) 905-914

3- Huet J., *Static Stressing Manual,* Aerospatiale Matra Airbus (1999)

4- MIL-HDBK-5H, *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures,* United States Department of Defense, (1998).

5- Moen C., *Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending*, Thin Walled Structure 47 (2009) 1597–1607,

6- Panedpojaman. P., *Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams,* Thin Walled Structure 76 (2014) 92-104.

7- Tsavdaridis K., *Web buckling study of the behavior and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes,* Journal of Constructional Steel Research 67 (2011) 1605–1620.