



Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı malzemelere sahip köpük çekirdekli sandviç plaklarda tabaka kalınlıklarının burkulma davranışına etkisi

Derya Çıraklı ¹, Mustafa Halûk Saraçoğlu ², Uğur Albayrak ³

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 43100, Kütahya, Türkiye

²Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya, Türkiye

³Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Burkulma analizi
İnce plak
Köpük çekirdek
Sandviç plak
Kritik burkulma yükü

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 10.10.2023
Kabul Tarihi: 29.12.2023

Öz: Sandviç plaklar, iki ince cidar tabakası arasında kalın bir çekirdek tabakası olmak üzere toplam üç tabakadan oluşur. Cidar tabakaları eğilmeye karşı direnç sağlarken, çekirdek tabakası kaymaya karşı direnç sağlar. Genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımları, yapıların davranışını araştırmak için en uygun ve yaygın olarak kullanılan analiz yöntemlerinden birisidir. Bu analiz programları sayesinde birçok tasarım parametresi kolaylıkla incelenebilmektedir. Bu çalışmada, çekirdek tabakası kalınlığının cidar tabakası kalınlığına oranı 7 ile 9 arasında olan dört kenarından basit mesnetli sandviç kare plakaların burkulma davranışı genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Sabit bir toplam kalınlığa sahip sandviç plakaların cidar ve çekirdek tabaka kalınlıkları değiştirilerek kalınlık değişiminin etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda cidar ve çekirdek tabakalarının malzemeleri de değiştirilerek burkulma davranışına en uygun tasarım ortaya konmuştur. Bu amaçla 2 farklı cidar malzemesi, 5 farklı çekirdek malzemesi, 11 farklı kalınlık oranı ile 110 analiz yapılmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara göre en büyük burkulma yükü çelik cidarlı ve PVC H200 çekirdekli sandviç plakta 282.108 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar grafiklerle sunularak sandviç plakların burkulmaya karşı en uygun tasarımı belirlenmiştir.

Atıf için/To Cite:

Çıraklı D. Saraçoğlu M.H. Albayrak U. Farklı Malzemelere Sahip Köpük Çekirdekli Sandviç Plaklarda Tabaka Kalınlıklarının Burkulma Davranışına Etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(3), 111-117, 2023.

The effect of layer thicknesses on buckling behavior in foam core sandwich plates with various materials

Keywords

Buckling analysis
Thin plate
Foam core
Sandwich plate
Critical buckling load

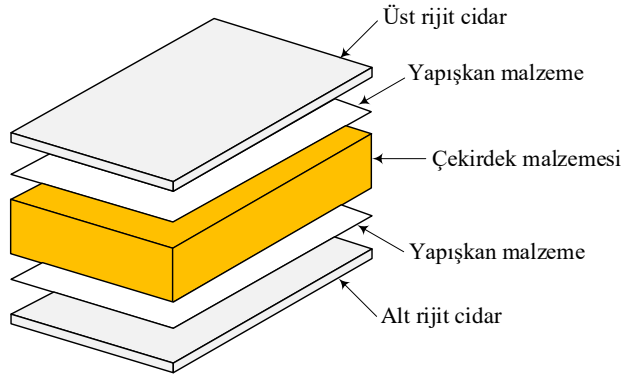
Article history:

Received: 10.10.2023
Accepted: 29.12.2023

Abstract: Sandwich plates consist of a total of three layers, with a thick core layer between two thin face layers. The face layers provide resistance to bending, while the core layer provides resistance to shear. General purpose finite element softwares are one of the most suitable and widely used analysis methods to investigate the behavior of structures. Many design parameters can be easily examined by using these analysis programs. In this study, the buckling behavior of sandwich square plates simply supported on four sides, whose ratio of core layer thickness to face layer thickness is between 7 and 9, was investigated using a general purpose finite element software. The effect of thickness variation was investigated by varying the face and core layer thicknesses of sandwich plates with a constant total thickness. At the same time, the materials of the face and core layers were changed and the most suitable design for the buckling behavior was revealed. For this purpose, 110 analyzes were made with 2 different face materials, 5 different core materials, 11 different thickness ratios. According to the results obtained from the analysis, the maximum critical buckling load was calculated as 282.108 N/mm² in the sandwich plate with steel face and PVC H200 core. The most suitable design of sandwich plates against buckling was determined by presenting the results with graphics.

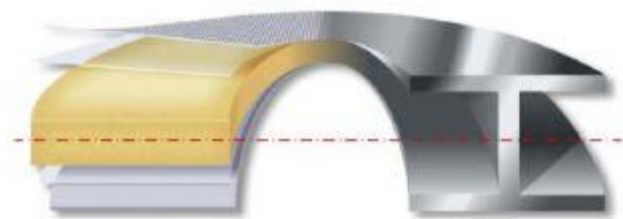
1. Giriş

Sandviç yapılar ortada kalın ve hafif çekirdek tabakası, alt ve üstte ince ve rijit cidar tabakası ve bu tabakaların birleştirilmesini ve birlikte hareket etmesini sağlayan yapışkan malzemeden oluşur [1]. Sandviç plaklar inşaat, uzay, otomobil, havacılık, deniz vb. alanlarda çeşitli yapıların inşasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca filtre, spor araba, rüzgâr türbini kanatları, uçak, tekne, savunma araçları vb. yapımı için de tercih edilirler. Dayanıklılık, darbe direnci, hasar ve yorulma direnci sandviç plakların üstünlüklerindedir [2].



Şekil 1. Sandviç plak ve tabakaları

Çekirdek malzemesi olarak bal peteği, balsa ağacı, EPS (expanded polystyrene), köpük gibi hafif malzemeler, dış cidar malzemesi olarak da karbon kumaşlar, cam elyafı, GRP (glass reinforced polyester), FRP (fiber reinforced polymer), FRC (fiber reinforced composite) gibi kompozit malzemeler veya çelik levha, alüminyum levha gibi izotrop malzemeler kullanılmaktadır. Örnek bir sandviç plak kesiti Şekil 1'de gösterilmiştir. Sandviç plaklar Şekil 2 de gösterildiği gibi işlevsel olarak I-Kiriş profillerine benzemektedir. I Kiriş profillerde başlıklar eğilme gerilmelerini taşıırken, başlıklar arasındaki gövde kısmı da kesme kuvvetlerini taşımaktadır [3], [4].



Şekil 2. Sandviç plak ve I-Kiriş profili arasındaki benzeşim [4]

Literatürde sandviç plakların davranışlarını gözlemlemek ve istenilen mekanik özelliklere ulaşmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda sandviç yapıların statik ve dinamik hareketlerinin teorik olarak

araştırılması yapılmış ve analitik olarak modellemesi çıkartılmıştır.

Sandviç plaklar hakkında yazılan derleme türü yazılar konu hakkında detaylı bilgiler vermektedir. Garg vd., fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış sandviç plaklar hakkında bir derleme yazısı yayınlamışlardır. Derleme yazısında sandviç yapılarının çeşitli yüklemeye koşulları altında analizine ilişkin detaylı literatür taraması sonrasında önemli noktaları da sunmuşlardır [5]. Xiong vd., prizmatik ve köpük çekirdekli sandviç yapılar hakkında yazdıkları derleme makalesi oluklu, balpeteği ve köpük çekirdekli sandviç yapıların özellikleri ve geliştirilmesi hakkındadır. Çalışmada değişken kesitli kanat tasarımı, darbe dayanımı ve çok hafif ağırlık uygulamaları hakkında gelecekte oluşması mümkün olan gelişmeler de tartışılmaktadır.

Araştırmacılar plakların burkulması ile ilgili çalışmalarında farklı özelliklerdeki plaklar da kullanmışlardır. Uslu vd., çalışmalarında tek eksenli yüklemeye altındaki kare ve dairesel delikli kare plakların burkulmasını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda aynı boşluk alanına sahip kare delikli plakaların burkulma yüklerinin dairesel delikli plakalara göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. [6].

Balaraman ve Sreehari, sandviç plakaların burkulması üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, birinci derece ve yüksek dereceli kayma deformasyon teorilerini kullanarak sandviç plakaların burkulma davranışının çeşitli yönlerini dikkate almışlar ve ayrıntılı bir çalışma yürütmüşlerdir. Başlangıçta sayısal formülasyon yapılmış ve Matlab ortamında programlama yapmışlardır. Sandviç yapıların burkulma davranışının net bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için ayrıntılı parametrik çalışmalar da yapmışlardır [7]. Adhikari vd., yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisine dayanan, çeşitli türlerdeki düzgün olmayan kenar sıkıştırması altında gözenekli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden imal edilmiş sandviç plakaların burkulma analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında gözenekli malzemenin boşluk dağılımını farklı şekillerde modelleyerek gerçekçi sonuca ulaşmaya çalışmışlardır [8]. Arshid vd., fonksiyonel derecelendirilmiş piezo elektro manyetik nano kompozit tabakalarla bütünleştirilmiş heterojen sıcaklığa bağlı mikro halka şeklinde/dairesel gözenekli sandviç plakaların eğilme ve burulma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında bu tür sandviç plakların burkulma davranışlarını da ortaya koymuşlardır [9]. Altunsaray, yayınladığı bildiri çalışmasında sandviç uzun dikdörtgen plakların burkulmasını parametrik olarak incelemiştir. Çalışmasında farklı özellikteki cidar

ve çekirdek malzemesinin sandviç plakların burkulmaları üzerine etkilerini ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda bilgisayar destekli parametrik analizlerle sandviç yapıların ön tasarımında zaman, ağırlık, maliyet, işgücünden tasarruf edilebileceği ortaya konulmuştur [10].

Bu çalışmada ise, ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak, dört tarafından basit mesnetli, farklı çekirdek malzemeleri ve farklı tabaka kalınlıklarına sahip, tek eksenli düzgün yayılı düzlem yük ile yüklü köpük çekirdekli sandviç plakaların burkulma analizleri yapılmıştır. Sandviç plakaların burkulmasında malzeme ve tabaka kalınlığının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla basit mesnetli kare sandviç plak düşünülmüş ve plaklara tek eksenli düzgün yayılı eksenel yükler uygulanmıştır. 11 farklı cidar ve çekirdek tabaka kalınlığına sahip sandviç plaklar, tabaka kalınlığının etkisini araştırmak için modellenmiştir. Bu burkulma analizleri sonucunda köpük çekirdek malzemesinin aynı koşullardaki köpük çekirdekli sandviç plaklar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hesaplanan sonuçlar tablo ve grafiklerle tartışılarak ortaya konulmuş ve sandviç plakların burkulmaya karşı en uygun tasarımı belirlenmiştir.

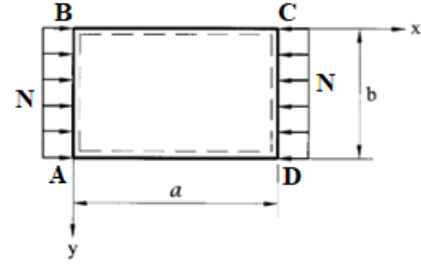
2. Materyal ve Metod

Sandviç yapılar ince ve yüksek yoğunluklu iki rijit tabaka arasında bulunan kalın ve düşük yoğunluklu bir çekirdek tabakasından oluşurlar. En az iki farklı malzemenin birleşmesi ile oluşur ve kompozit yeni bir malzemedir. Sandviç yapıların tercih edilmesinin sebebi; nihai malzemenin dayanıklılık, darbe direnci, hasar ve yorulma direncinin bileşen malzemelerinden yüksek olmasıdır. Sandviç plaklar, son derece hafif malzemeler olmalarına karşılık olarak yüksek sertlik ve güç-ağırlık oranları verdikleri için gerek havacılık gerekse ticari endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

2.1. Sandviç Plakta Burkulma Denklemleri ve Sınır Koşulları

İnce plaklar plak orta düzleminde etkili olan normal eksenel ve düzlem içi kesme yüklerine maruz kalabilir. Belirli koşullar altında bu tür yükler plakta burkulmaya neden olabilir. Plakların burkulması veya elastik kararsızlığı pratikte büyük öneme sahiptir. Burkulma yükü plak kalınlığına doğrudan bağlıdır. Plak ne kadar ince olursa kritik burkulma yükü de o kadar düşük olacaktır. Bu nedenle plakların burkulma analizi bir yapının genel analizinin ayrılmaz bir parçasıdır [11]

Dikdörtgen bir plağın burkulması ile ilgili yükleme ve plak geometrisi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Tek eksenli burkulma yüklerine maruz sandviç plak geometrisi [11]

Plak, dört kenarından basit mesnetlenmiştir. AB ve CD kenarı N yükü (N/mm) ile yüklenmiştir.

$$\omega = 0 \quad (1)$$

$$M_n = 0 \quad (2)$$

M_n normal yöndeki eğilme momentini, ω ise z eksenli yöndeki düşey çökme değerini temsil etmektedir. Sınır koşulları normal ve teğet yönlerde ayrılmalıdır.

$$(N_n - \bar{N}_n)\delta u_n = 0 \quad (3)$$

$$(N_t - \bar{N}_t)\delta u_t = 0 \quad (4)$$

N_n normal yöndeki eksenel kuvveti, \bar{N}_n normal yöndeki plağa etki eden eksenel kuvveti, u_n normal yöndeki yer değiştirmeyi, N_t teğet yöndeki eksenel kuvveti, \bar{N}_t teğet yöndeki plağa etki eden eksenel kuvveti, u_t teğet yöndeki yer değiştirmeyi temsil etmektedir.

Şekil 3'teki plak için;

$$(N_{xx} - \bar{N}_{xx})\delta u_x = 0 \quad (5)$$

$$(N_{xy} - \bar{N}_{xy})\delta u_y = 0 \quad (6)$$

$$(N_{yy} - \bar{N}_{yy})\delta u_y = 0 \quad (7)$$

$$(N_{xy} - \bar{N}_{xy})\delta u_x = 0 \quad (8)$$

Şekil 3'teki plak için gerilme sınır koşulları uygulanır ve yüklemenin tensörü elde edilir;

$$\bar{N}_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} \bar{N} & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad N_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (9)$$

Bünye denklemlerinden eşitlik (10) ve (11) elde edilir;

$$N_{xx} = C(\epsilon_{xx}^\circ + \nu\epsilon_{yy}^\circ) \quad (10)$$

$$0 = C(\epsilon_{yy}^\circ + \nu\epsilon_{xx}^\circ) \quad (11)$$

Bu nedenle $\epsilon_{yy}^\circ = -\nu\epsilon_{xx}^\circ$ ve $N_{xx} = E h \epsilon_{xx}^\circ$ olur. Yer değiştirme eşitlik (12) ve (13)'teki iki denklem ile çözülür;

$$\epsilon_{xx}^{\circ} = \frac{\delta u_x}{\delta x} \quad (12)$$

$$\epsilon_{yy}^{\circ} = \frac{\delta u_y}{\delta y} \quad (13)$$

Koordinat sisteminin Şekil 3'teki plağın A köşesinde olduğu varsayılmaktadır. Çözüm eşitlik (14)'teki gibidir;

$$u_x = u_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad u_y = v u_0 \frac{y}{a}, \quad N = \frac{Eh}{a} u_0 \quad (14)$$

N kuvveti basınçta pozitif olarak uygulanır. Bu sebeple Poisson oranı etkisi ile plak x yönünde sıkışır ve y yönünde yanal olarak genişler.

2.2. Basit Mesnetli Bir Plağın Burkulması

Şekil 3'teki dört kenarından basit mesnetli $x=0$ ve $x=a$ kenarları düzgün yayılı N düzlem yükü ile yüklü plağın doğrusal burkulma analizinin yönetici diferansiyel denklemi eşitlik (15)'teki gibidir;

$$D \left[\frac{\delta^4 \omega}{\delta x^4} + 2 \frac{\delta^4 \omega}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta^4 \omega}{\delta y^4} \right] + N \frac{\delta^2 \omega}{\delta x^2} = 0 \quad (15)$$

Yukarıdaki sabit katsayılı lineer kısmi diferansiyel denklemin çözümü iki harmonik bir denklem haline getirilir;

$$\omega(x, y) = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (16)$$

m boyuna yönde yarım dalga, n enine yönde yarım dalgayı temsil etmektedir. $\omega(x, y)$ fonksiyonu, yer değiştirme için sınır koşulunu sağlar. Eğilme momenti M_n ;

$$M_n = M_{xx} = D[K_{xx} + vK_{yy}] = -D \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + v \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (17)$$

$x=0$ ve $x=a$ kenarında eğilme momenti $M_n = M_{xx} = 0$ olur. Ayrıca $y=0$ ve $y=b$ kenarında $M_n = M_{yy} = 0$ 'dır. Böylelikle dört kenarda da basit mesnet sınır şartları sağlanmış olur. $\omega(x, y)$ denkleminde yerine yazılır ise;

$$\left\{ D \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 + 2 \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^4 \right] - \bar{N} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = 0 \quad (18)$$

Denklem düzenlenirse;

$$\bar{N} = D \left(\frac{\pi a}{m} \right)^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \quad (19)$$

a, b ve m'nin tüm değerleri için en küçük \bar{N} değerinin $n=1$ iken elde edildiği görülmektedir. Buradan yola çıkarak, uygulanan yüke dik yönde bir yarım dalga oluşacağı anlaşılır.

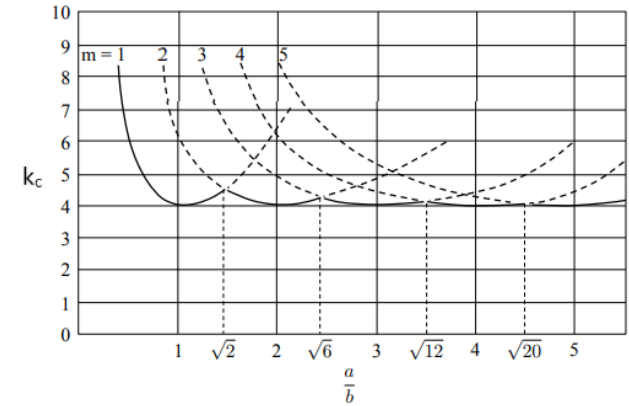
(17) denklemi kısaltılacak olursa;

$$\bar{N}_c = k_c \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (20)$$

k_c burkulma katsayısını temsil etmektedir;

$$k_c = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (21)$$

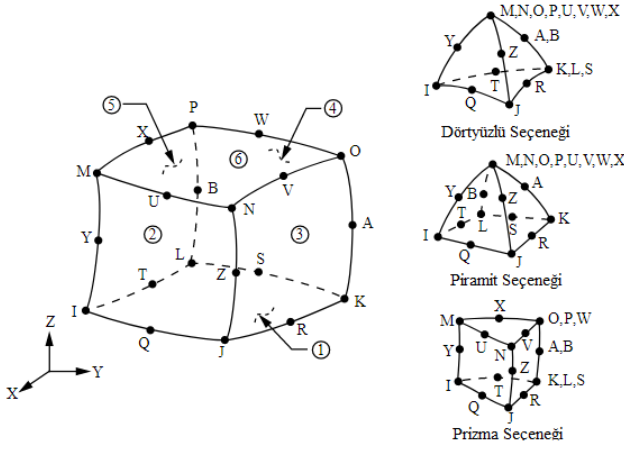
m parametresi bir tamsayıdır ve plağın uzunluğuna kaç tane yarım dalga oluşacağını belirler. En/boy oranı yani a/b oranı biliniyor fakat m parametresi bilinmiyor ise m parametresi, burkulma katsayısının a/b'nin bir fonksiyonu olarak çizilmesi ile bulunabilir. İlgili grafik aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4. Basit mesnetli bir plak için, a/b ve m değerleri için k_c burkulma katsayısı grafiği [12]

Bu çalışmada ele alınan örneklerin hesap sonuçları ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Sonlu eleman olarak Şekil 5'te gösterilen, ANSYS eleman kütüphanesinde bulunan üç boyutlu SOLID186 katı elemanı kullanılmıştır.

SOLID186 elemanı, ikinci dereceden yer değiştirme davranışı gösteren yüksek mertebeden üç boyutlu 20 düğümlü katı elemandır. Bu elemanın 20 düğüm noktasının her birisinde x, y ve z yönlerindeki ötelemeler olmak üzere üç serbestlik derecesi mevcuttur. Plastisite, hiperelastisite, gerilme sertleşmesi, büyük yer değiştirme ve büyük şekil değiştirme gibi özellikleri desteklemektedir [13].

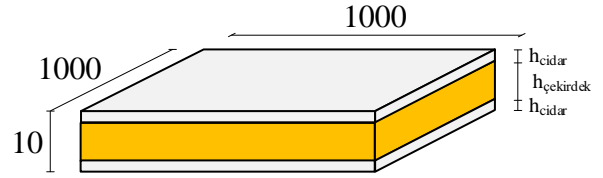


Şekil 5. ANSYS kütüphanesinde SOLID 186 elemanı [13]

3. Sayısal Örnekler

Bu çalışmada, cidar katmanında iki farklı rijit malzeme, çekirdek katmanında ise beş farklı köpük malzeme kullanılarak oluşturulan 1000 mm x 1000 mm düzlem genişliğinde, aynı toplam kalınlıkta, farklı katman

kalınlıklarına sahip kare sandviç plak modellerinin burkulma analizleri yapılmıştır. Sandviç plaklar x ekseninde tek eksenli AB ve CD kenarlarından düzgün yayılı düzlem yüklerine maruz bırakılmıştır.



Şekil 6. İncelenen sandviç plakların geometrisi

Plakalar dört kenarından basit mesnetle mesnetlenmiştir. Analizde Katman Kalınlığı Etkisi (K), Cidar Malzemesi Etkisi (F) ve Çekirdek Malzemesi Etkisi (C) olmak üzere üç farklı parametrenin kombinasyonları tartışılacaktır. Katman kalınlığı etkisi (K) sandviç plağın köpük çekirdek kalınlığının tek bir cidar tabakası kalınlığına oranı olarak hesaplanmaktadır. Kullanılan farklı köpük ve çekirdek malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Sandviç plak malzemelerinin mekanik özellikleri

Tip	Malzeme	E (MPa)	G (MPa)	K (MPa)	ν
Cidar 1	Çelik	206000.000	79300.000	171666.667	0.300
Cidar 2	Alüminyum	69000.000	25940.000	68986.203	0.333
Çekirdek 1	PVC H200	230.000	86.466	225.494	0.330
Çekirdek 2	PVC H60	45.000	20.737	18.072	0.085
Çekirdek 3	Linear PVC foam (Airex R63.80)	56.000	21.000	56.000	0.333
Çekirdek 4	AIREX® R82.110 High Performance Structural Foam	83.000	30.000	118.571	0.383
Çekirdek 5	CoreLite PVC 100 Closed-Cell PVC Foam Sheet	89.980	37.000	52.795	0.216

Tablo 1'deki E elastisite modülünü, G kayma modülünü, K hacim modülünü ve ν ise Poisson oranını göstermektedir.

Tablo 2. Sandviç plakların geometrik özellikleri (mm)

model no	k	a	h	h _{cidar}	h _{çekerdek}
1	9.0	1000	10	0.91	8.18
2	8.8	1000	10	0.93	8.14
3	8.6	1000	10	0.94	8.12
4	8.4	1000	10	0.96	8.08
5	8.2	1000	10	0.98	8.04
6	8.0	1000	10	1.00	8.00
7	7.8	1000	10	1.02	7.96
8	7.6	1000	10	1.04	7.92
9	7.4	1000	10	1.06	7.88
10	7.2	1000	10	1.08	7.84
11	7.0	1000	10	1.11	7.78

Kirchoff ince plak varsayımlarını sağlamak amacıyla sandviç plağın narinlik oranı $a/h = 100$ olarak sabit alınmıştır. Buna göre 1x1 metre örneklerde kare levhanın toplam kalınlığı 10 mm olarak alınmıştır. Numunelerde üst ve alt cidar kalınlıkları eşit olarak alınmıştır. $k = h_{\text{çekerdek}} / h_{\text{cidar}}$ denklemi ile çekirdek kalınlıkları artırılıp yüzey kalınlıkları azaltılarak aynı toplam kalınlıktaki sandviç plakalar elde edilmiştir. Şekil 4'te k sabiti 7 ile 9 arasında olan farklı 11 sandviç plaka modeli ele alınmıştır. İncelenen plakaların geometrik özellikleri aşağıdaki Tablo 2'de gösterilmektedir.

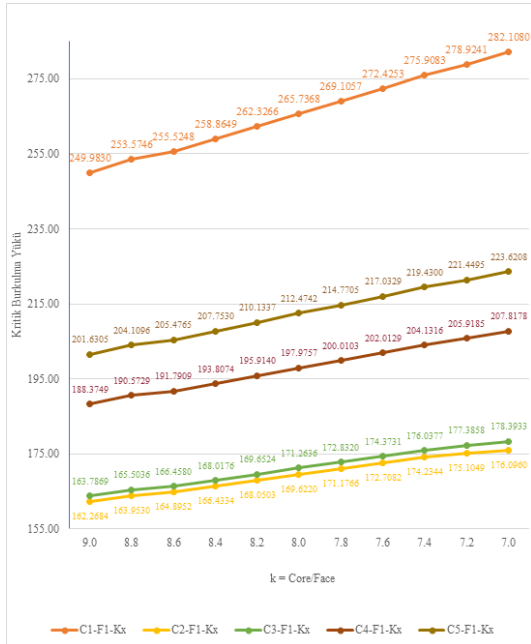
4. Bulgular ve Tartışma

Farklı cidar ve köpük malzemelerine sahip tek eksenli burkulma yüküne maruz dört kenarından basit

mesnetli sandviç kare plakların kritik burkulma yükleri ANSYS paket programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Çalışmada oluşturulan sandviç plakların seri isimleri için Cx-Fx-Kx şeklinde kodlama kullanılmıştır. Bu kodlamada F1 Tablo 1’de verilen çelik malzemesini, F2 ise alüminyum malzemesini ifade etmektedir. Yine aynı tabloda numaralandırılan 5 farklı çekirdek malzemesi Cx ile tanımlanmıştır. Kx ise Tablo 2’de model no ile belirtilen sandviç plağın 11 adet tabaka kalınlık oranları ile ilgili geometrik özelliği ifade etmektedir.

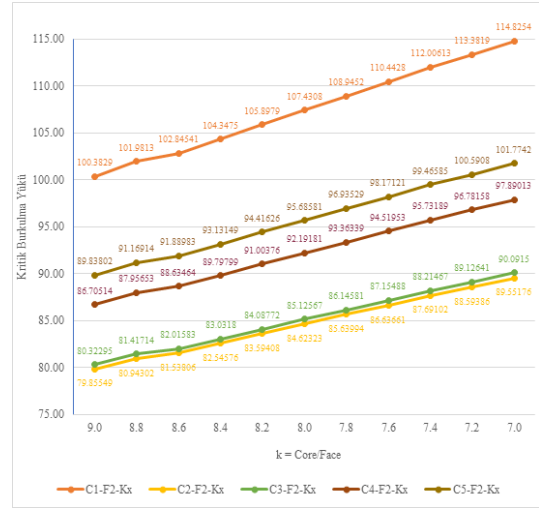
Çelik cidar tabakalı sandviç plakların kritik burkulma yükleri ile K katman kalınlığı etkisi arasındaki ilişki Şekil 7’de gösterilmektedir. Çekirdek malzemelerinin kayma modülü arttıkça rijitlikleri artar ve şekil değiştirmeye karşı dirençleri artar. Bu sebeple araştırma örnekleri arasında en rijit çekirdek PVC (H200) malzemesidir ve bu çekirdeğe sahip olan C1-F1-Kx serisi sandviç plağın kritik burkulma yükleri en yüksektir. C1-F1-Kx serisinde de en fazla kritik burkulma yükü cidarın en kalın olduğu araştırma örneği olan C1-F1-K11 araştırma örneğinde olduğu görülmektedir.



Şekil 7. C (1,2,3,4,5)-F1-Kx serilerinin kritik burkulma yüklerinin karşılaştırılması (N/mm)

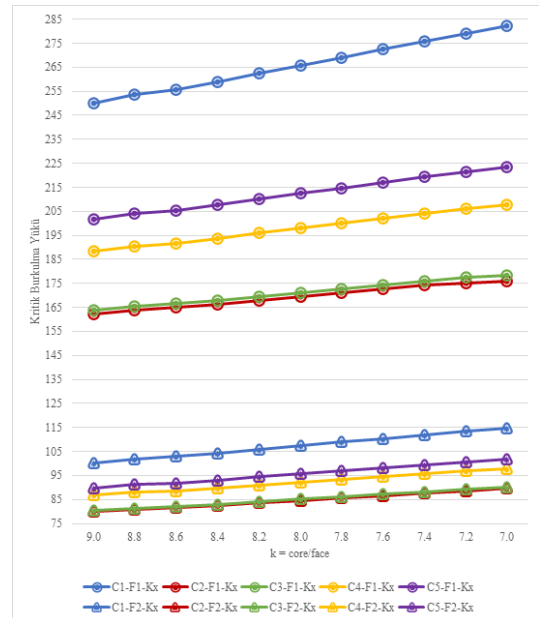
Alüminyum cidar tabakalı sandviç plakların kritik burkulma yükleri ile K katman kalınlığı etkisi arasındaki ilişki Şekil 8’de gösterilmektedir. Çekirdek malzemelerinin kayma modülü arttıkça rijitlikleri artar ve şekil değiştirmeye karşı dirençleri artar. Bu sebeple araştırma örnekleri arasında en rijit çekirdek PVC (H200) malzemesidir ve bu çekirdeğe sahip olan C1-F1-Kx serisi sandviç plağın kritik burkulma yükleri en yüksektir. C1-F2-Kx serisinde de en fazla kritik

burkulma yükü cidarın en kalın olduğu araştırma örneği olan C1-F2-K11 araştırma örneğinde olduğu görülmektedir.



Şekil 8. C (1,2,3,4,5)-F2-Kx serilerinin kritik burkulma yüklerinin karşılaştırılması (N/mm)

Şekil 9’da görüldüğü üzere çekirdek kalınlığının cidar kalınlığına oranı olan k değeri azaldıkça sandviç plağın burkulması için gereken kritik burkulma yükü değeri artmaktadır. Çünkü k oranının azalması; cidarın kalınlığı artarken çekirdeğin kalınlığının azaldığını ifade etmektedir. Cidar malzemesinin çekirdek malzemesine göre daha rijit bir yapıda olması, kritik burkulma yükünün hesaplanmasında çekirdek malzemesine göre cidar malzemesinin daha belirleyici olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. C (1,2,3,4,5)-F (1,2)-Kx serilerinin kritik burkulma yükleri (N/mm)

5. Sonuçlar

Araştırma örneklerinde en yüksek burkulma yüküne C1-F1-Kx serisinin sahip olduğu grafikte gözlemlenmektedir. C1-F1-Kx serisinde kullanılan cidar malzemesinin elastisite modülü 206000 ve poisson oranı 0.3, çekirdek malzemesinin elastisite modülü 230 ve poisson oranı 0.33'tür. Araştırma örneklerinde cidar malzemesi olarak kullanılan çelik ve alüminyumdan rijit olan F1 numaralandırma koduyla çeliktir, çekirdek malzemelerinden de en rijiti C1 numaralandırma koduyla PVC (H200)'dür. Sonuç olarak bu iki malzeme ile oluşturulan sandviç plakta en rijit, en dayanıklı ve şekil değiştirmeye karşı dirençli olan C1-F1-Kx serisinin sandviç plaklarıdır. Analizler sonucunda da bu yaklaşım doğrulanmaktadır.

C1-F1-Kx serisinin en dayanıklı ve şekil değiştirmeye en dirençli olan araştırma örneği de C1-F1-K11'dir. Çünkü C1-F1-K11 numaralı sandviç plak, C1-F1-Kx serisi içerisinde cidar kalınlığı en yüksek olan araştırma örneğidir. Çekirdek malzemesinin kalınlığının cidar malzemesinin kalınlığına oranı azaldıkça, kritik burkulma yükü artmaktadır.

C2-F2-Kx serisi diğer araştırma serilerine göre daha az bir kuvvetle burkulduğu görülmektedir. C2-F2-Kx serisi; elastisite modülü 69000 MPa ve poisson oranı 0.333 olan alüminyum ve elastisite modülü 45 MPa ve poisson oranı 0.085 olan PVC (H60)'tır. Diğer araştırma örnekleri olan sandviç plaklarda kullanılan cidar ve çekirdek malzemelerinin rijitliğine göre C2-F2-Kx serisinde kullanılan alüminyum ve PVC (H60)'ın rijitliği düşüktür. Bunun yanında C2-F2-Kx serisinin en düşük kritik burkulma yüküne sahip olan araştırma örneği C2-F2-K1 model numaralı sandviç plağıdır. Çünkü çekirdek kalınlığının cidar kalınlığına oranı en fazla olan sandviç plak modelidir. Bu sebeple de tüm araştırma örnekleri arasında C2-F2-K1 model numaralı sandviç plak, en düşük kritik burkulma yükü ile burkulmaktadır. ANSYS Workbench sonlu elamanlar paket programı ile elde edilen analiz sonuçları da bu yaklaşımı doğrulamaktadır.

Kaynaklar

- [1] D. Çıraklı, "Investigation of Bending and Buckling Behaviors of Foam Core Sandwich Plates," Master Thesis, Kütahya Dumlupınar University, Kütahya, 2023.
- [2] D. Çıraklı, M. H. Saraçoğlu, and U. Albayrak, "Köpük Dolgulu Sandviç Plakların Statik Analizi," in 2022 Büyük Zafer'in 100. Yılı Anısına Ulusal Lisansüstü Öğrenci Sempozyumu, Kütahya, 2022, pp. 53–53.
- [3] Ç. Uzey, "Developing And Testing Of Polymer Foam Core Sandwich Structures With Hybrid Carbon

Fiber/Wire Mesh Sheet Facings," Çukurova University, Adana, 2020.

- [4] DIABGroup, "Guideline to Core and Sandwich," <https://www.diabgroup.com/media/q5yldbe4/dia-b-guideline-to-core-and-sandwich.pdf>.
- [5] A. Garg, M. O. Belarbi, H. D. Chalak, and A. Chakrabarti, "A review of the analysis of sandwich FGM structures," *Composite Structures*, vol. 258. Elsevier Ltd, Feb. 15, 2021. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113427.
- [6] F. Uslu, M. H. Saraçoğlu, and U. Albayrak, "Buckling of Square and Circular Perforated Square Plates under Uniaxial Loading," *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 61–75, 2022.
- [7] P. Balaraman and V. M. Sreehari, "A comprehensive study on the buckling of sandwich plates," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012128.
- [8] B. Adhikari, P. Dash, and B. N. Singh, "Buckling analysis of porous FGM sandwich plates under various types nonuniform edge compression based on higher order shear deformation theory," *Compos Struct*, vol. 251, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112597.
- [9] E. Arshid, S. Amir, and A. Loghman, "Bending and buckling behaviors of heterogeneous temperature-dependent micro annular/circular porous sandwich plates integrated by FGPEM nano-Composite layers," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 23, no. 8, pp. 3836–3877, Nov. 2021, doi: 10.1177/1099636220955027.
- [10] E. Altunsaray, "Sandviç Uzun Dikdörtgen Plakların Burkulmasının Parametrik Olarak İncelenmesi," in 12. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 2023.
- [11] E. Ventsel and Krauthammer T., *Thin Plates and Shells_ Theory, Analysis, and Applications*. 2001.
- [12] T. Wierzbicki, "2.080 Structural Mechanics Lecture 11: Buckling of Plates and Sections."
- [13] A. Swanson Analysis System Inc., "ANSYS User's manual." 2005.