

OLUKLU SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN ÇEKİRDEK YAPISININ ELASTİK SABİTLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

Alper Onur Gülşan¹
İstanbul Teknik Üniversitesi

Kaan Yıldız²
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖZET

Sandviç yapılar iki yüzey tabakası arasında bir çekirdek yapıdan oluşan ve havacılık, ulaştırma, otomotiv gibi geniş alanlarda kullanım bulan bir yapı kategorisidir. Sandviç yapıların mukavemet değerleri çekirdek yapısına doğrudan bağlıdır. Bu çekirdek yapılardan oluklu (corrugated) çekirdek yapı çeşitli alanlarda sağladığı özelliklerden dolayı en çok kullanılanlardan birisidir. Oluklu çekirdekli metal sandviç paneller, yüksek katılık/kütle oranları nedeniyle yapısal bileşenler olarak önemli endüstriyel çözümler sağlamaktadır. Ancak, sayısal hesaplamalar için ayrıntılı sonlu elemanlar modellerinin kullanılması büyük modellere ve uzun çözüm süresine yol açar. Bu nedenle karmaşık şekilli çekirdeğin eşdeğer bir homojen malzemeye dönüştürülmesi yaygın olarak kullanılır. Literatürde karmaşık oluklu çekirdek yapıları sandviç malzemelerin basitleştirilerek analizlerinin yapılması için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada literatürde bulunan bir teknik önce sinüsoidal bir yapı üzerinde doğrulanmış ve sonrasında bir tarafı sinüsoidal diğer tarafı lineer olan ve hibrit olarak adlandırılan çekirdek yapısının çeşitli parametreleri değiştirilerek bunların yapının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Hibrit çekirdek yapısının kalınlık, uzunluk ve genişlik parametrelerinin değişimi ile farklı yönlerdeki elastisite ve kayma modülü değerleri hesaplanarak, çekirdek hücrenin performansı incelenecektir.

GİRİŞ

Sandviç yapılar, yüksek katılık, mukavemet, hafiflik ve enerji emme kapasitelerinden dolayı havacılık, denizcilik, otomotiv, inşaat mühendisliği ve ulaştırma endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sandviç yapılar genel olarak iki adet yüzey tabakasının bir çekirdek ya da dolgu malzemesi ile bir araya getirilmesi ile elde edilmektedir. Genel olarak sandviç yapılarda dolgu malzemesi olarak bal peteği gibi hücreli geometriler kullanılmaktadır. Ek olarak, sandviç yapıların yüzey tabakası genellikle fiber takviyeli kompozitler ve alüminyum alaşımlar gibi hafif malzemelerden yapılır. Bu sayede, eğilme yükleri altında yüzey tabakaları aksel gerilmeye maruz kalırken, dolgu malzemesi ise basma yüklerini taşımaktadır. Sonuç olarak hem yüksek mukavemet/ağırlık oranı hem de yüksek enerji emme yeteneğine sahip yapılar elde edilebilmektedir.

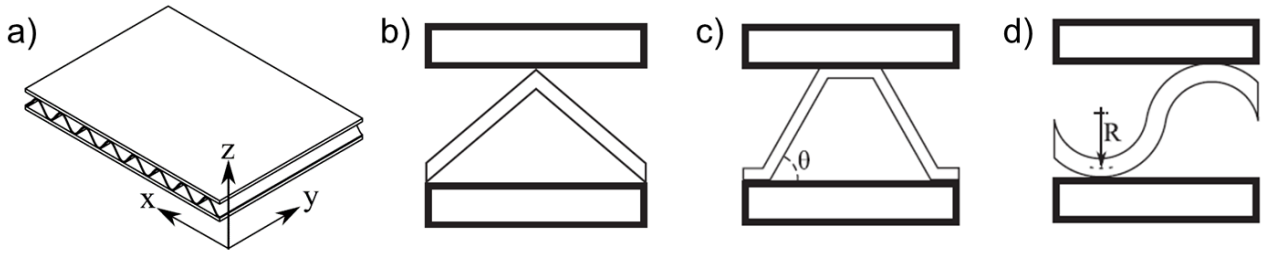
Metal sandviç paneller, birçok endüstriyel alanda çok fonksiyonlu bileşenler olarak giderek daha önemli hale gelmektedir. Ana özelliklerinden biri, eğilme koşullarında yüksek katılık/kütle oranlarıdır. Bu özellik kabuk yüzeylerin malzeme özelliklerine bağlı olarak değişmektedir ancak diğer özellikler (akustik, termal vb.) çekirdek yapısına bağlıdır.

Köpük ve bal peteği gibi birkaç çekirdek yapı türü literatürde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çekirdek yapılarına alternatif olarak oluklu çekirdek yapısı ulaşım endüstrisinde giderek daha fazla kullanılan ilginç bir alternatif haline gelmektedir.

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, E-Posta: gulsan15@itu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, E-posta: yildizkaa@itu.edu.tr

Oluklu terimi bir dizi paralel çıkıntı şeklinde tanımlanabilir. Mekanik olarak katlama, kalıplama yoluyla yapılmış oluk şeklinde bir yüzeye sahip herhangi bir yapıya oluklu yapı denir (Dayyani vd., 2015). Oluklu yapıların yapısal özellikleri kabuk yüzeyleri birbirinden ayıran ve yapıya sertliğini veren çekirdek yapıların boyut, şekil ve malzemelerine bağlı olarak değişmektedir. Oluklu yapıların en temel özelliği anisotropik davranışlara sahip olmalarıdır (Yokozeki vd., 2006). Oluklu çekirdek yapılar düşey deformasyonları ortadan kaldıracak ve aynı zamanda tüm yapının tek bir kalın levha gibi hareket etmesini sağlar. Oluklu sandviç paneller, son derece yüksek eğilme katılığı/ağırlık oranı nedeniyle genellikle havacılık, uzay, inşaat mühendisliği ve diğer uygulamalarda kullanılır. Oluklu sandviç yapılarının çekirdek şekilleri üçgen, trapezoidal ve sinüsoidal olmak üzere üçe ayrılmakta olup, bu çekirdek yapıları Şekil 1'de gösterilmektedir.



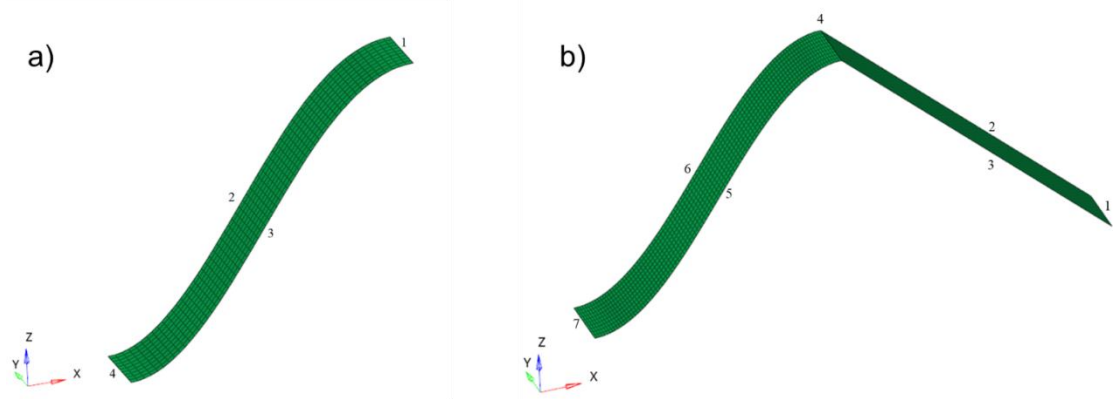
Şekil 1: Oluklu çekirdekli sandviç yapının temsili gösterimi a) izometrik, b) üçgen, c) trapezoidal ve d) sinüsoidal (Bartolozzi vd., 2013)

Bu çalışmanın asıl amacı, sinüsoidal çekirdek yapısına sahip bir oluklu sandviç bileşiminin çeşitli yapısal analizlerini yaparak literatürdeki tekniğin doğrulanması sonrasında hibrit çekirdek yapısının geometrik parametrelerinin bu sonuçlara etkisinin incelenmesidir. Bu çalışma için karmaşık oluklu sandviç yapıları basitleştirme yöntemine odaklanılmıştır. Bu yöntem temel olarak yapıya uygulanan kuvveti belirli bir alana bölerek farklı yönlerdeki elastisite ve kayma modüllerini, yapı üzerinde meydana gelen deplasmanları yapının uzunluk, kalınlık ve yüksekliğine oranlayarak hesaplamaktadır. Kullanılan yöntem hem zaman hem de bilgisayar yükünü azaltarak analizleri hızlandırmaktadır.

ÇEKİRDEK YAPI TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR MODELİ

Yapılan çalışma kapsamında Şekil 2a ve Şekil 2b'de gösterilen oluklu çekirdek yapıları incelenmiştir. Şekil 2a'da gösterilen yapı sinüsoidal bir oluklu çekirdek yapıyı gösterirken geometrinin simetrisinden yararlanılmış ve analizler yapının sadece yarısında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2b'de gösterilen yapı ise yarım sinüs dalgası ile düz bir çizginin birleşiminden oluşmakta ve hibrit model olarak isimlendirilmektedir.

Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde, ağ yapısı oluşturulurken dört düğüm noktası barındıran *quad* elemanlar kullanılmış ve sonlu eleman boyutları 0.1 mm olarak seçilmiştir. Analizlerde çekirdek yapının alüminyumdan yapıldığı kabul edilmiş olup elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk değerleri 71 GPa, 0.33 ve 2700 kg/m³ olarak verilmektedir. Sinüsoidal modelin yüksekliği 4 mm ve uzunluğu 4.25 mm olup kalınlığı 0.5 ile 2 mm arasında değiştirilmiştir. Hibrit model kapsamında yapılan çalışmalarda ise yükseklik ve uzunluk aynı olup kalınlık 0.3 mm olarak kullanılmıştır.



Şekil 2: Model doğrulama çalışması için kullanılan geometriler: a) sinüsoidal ve b) hibrit

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için çizimlerde CATIA, çözüm ağı için Hypermesh, analizler için ise OptiStruct programları kullanılmıştır. Hesaplanacak elastik özelliğe göre modellerde numaralandırılmış kenarlara rijit elemanlar (rbe2) aracılığıyla sınır şartları tanımlanmıştır. Sonrasında ilgili kenarlardaki rijit elemanların bağlandığı bağımsız noktaya kuvvet uygulanmış ve gerçekleştirilen analizler sonucunda ise x ve y yönündeki elastisite modülleri ile kayma modülleri hesaplanmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2’de sırasıyla sinüsoidal ve hibrit model için uygulanan sınır koşulları özetlenmektedir. 1, 2 ve 3 sırasıyla x, y ve z yönünde öteleme hareketini temsil ederken, 4, 5 ve 6 sırasıyla x, y ve z eksenleri etrafında dönme hareketlerini ifade etmektedir.

Tablo 1: Sinüsoidal model sınır koşulları

Elastik Özellik	Kenar 1	Kenar 2	Kenar 3	Kenar 4	Yükleme Durumu
E_x	456	-	-	1456	1 nolu kenarda +x yönünde
E_y	-	123456	13456	-	3 nolu kenarda -y yönünde
G_{xy}	-	123456	23456	-	3 nolu kenarda +x yönünde
G_{xz}	3456	-	-	13456	1 nolu kenarda +x yönünde
G_{yz}	13456	-	-	123456	1 nolu kenarda +y yönünde

Tablo 2: Hibrit model sınır koşulları

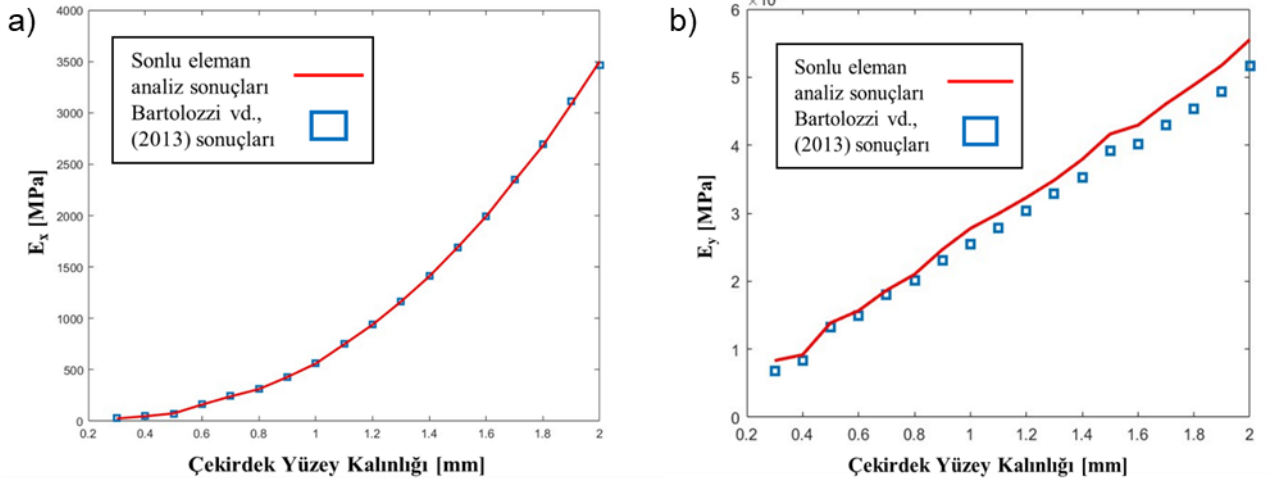
Elastik Özellik	Kenar 1	Kenar 2	Kenar 3	Kenar 4	Kenar 5	Kenar 6	Kenar 7	Yükleme Durumu
E_x	23456	-	-	2456	-	-	123456	1 nolu kenarda +x yönünde
E_y	-	13456	123456	-	123456	13456	-	2 nolu kenar ile 6 nolu kenarın orta noktası üzerinde -y yönünde
G_{xy}	-	13456	123456	-	123456	13456	-	2 nolu kenar ile 6 nolu kenarın orta noktası üzerinde +x yönünde
G_{yx}	13456	-	-	-	-	-	123456	1 nolu kenarda +y yönünde
G_{xz}	123456	-	-	23456	-	-	123456	4 nolu kenarda +x yönünde
G_{yz}	123456	-	-	13456	-	-	123456	4 nolu kenarda +y yönünde

Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen elastisite ve kayma modülleri sonlu eleman modellerinin her birinde belirli bağımsız noktaya uygulanan kuvvetlerin izdüşüm alana bölünerek elde edilen ilgili gerilme değerlerinin analiz sonrasında elde edilen gerilme değerlerine bölünmesi ile elde edilmektedir.

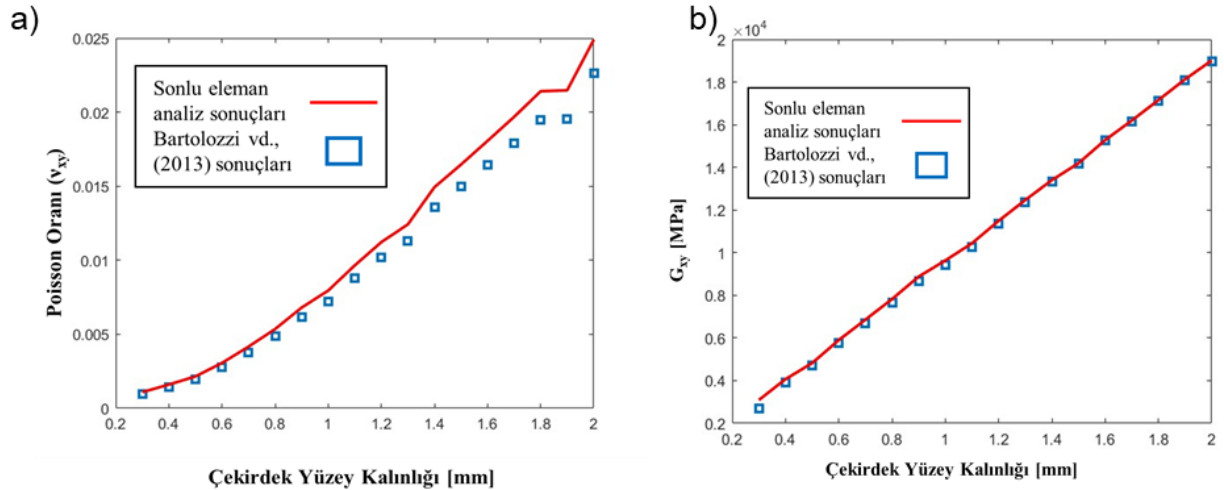
Poisson oranı değerleri x yönündeki elastisite modeli için yapılan sonlu eleman modeli analizi sonucu elde edilen gerilme oranları ile elde edilmektedir.

SİNÜSODİAL MODEL DOĞRULAMA ÇALIŞMASI SONUÇLARI

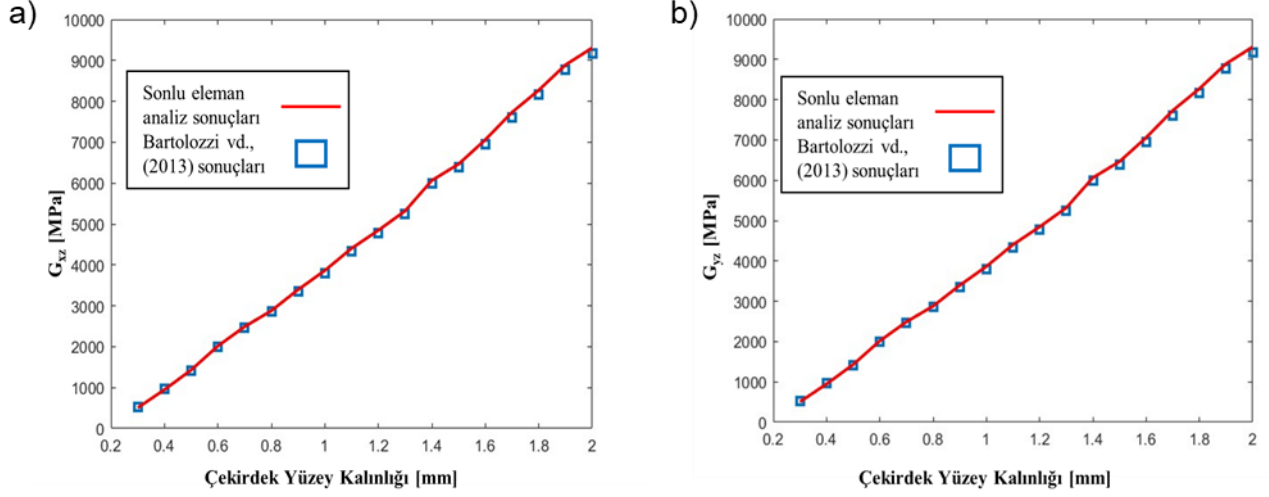
Bartolozzi vd. (2013)’te kullanılan tekniğin doğrulanması için yapılan çalışmada elastisite ve kayma modülleri yüzey kalınlığı değiştirilerek makaledeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bartolozzi vd. (2013) değerleri bir data digitizer uygulaması kullanılarak makalede bulunan grafiklerden elde edilmiştir. Doğrulama çalışmasında yüzey kalınlığı değeri 0.3 mm ile 2 mm arasında değiştirilmiş olup artış değeri 0.1 mm olarak alınmıştır. Kullanılan modeller literatürden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır. Sonuçlar kıyaslandığında tüm elastik özellikler incelendiğinde en yüksek farkın %10’dan az olduğu tespit edilmiştir. Sinüsoidal oluklu çekirdek yapılarının yüzey kalınlıkları arttırıldığında hem elastisite hem de kayma modüllerinin yükseldiği görülmüştür.



Şekil 3: a) E_x elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi b) E_y elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi



Şekil 4: a) Poisson Oranı yüzey kalınlığı ilişkisi b) G_{xy} elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi



Şekil 5: a) G_{xz} elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi b) G_{yz} elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi

HİBRİT MODEL DOĞRULAMA ÇALIŞMASI SONUÇLARI

Tablo 3'te verilen hibrit model için yapılmış olan literatürdeki sonuçlar ile yapılan karşılaştırma çalışması için hibrit modelde yüzey kalınlığı 0.3 mm olarak alınmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde en yüksek farkın %5 seviyelerinde olduğu görülmüştür. Özellikle x ve y yönündeki elastisite modülü sonuçlarındaki fark oldukça düşüktür. Bu çalışmada kullanılan iki boyutlu sonlu elemanlar modelinden alınan bu sonuçlar çerçevesinde oluşturulan modellerin doğru olduğu düşünülerek çalışmanın sonraki aşamasına geçilmiştir.

Tablo 3: Hibrit model doğrulama çalışması sonuçları

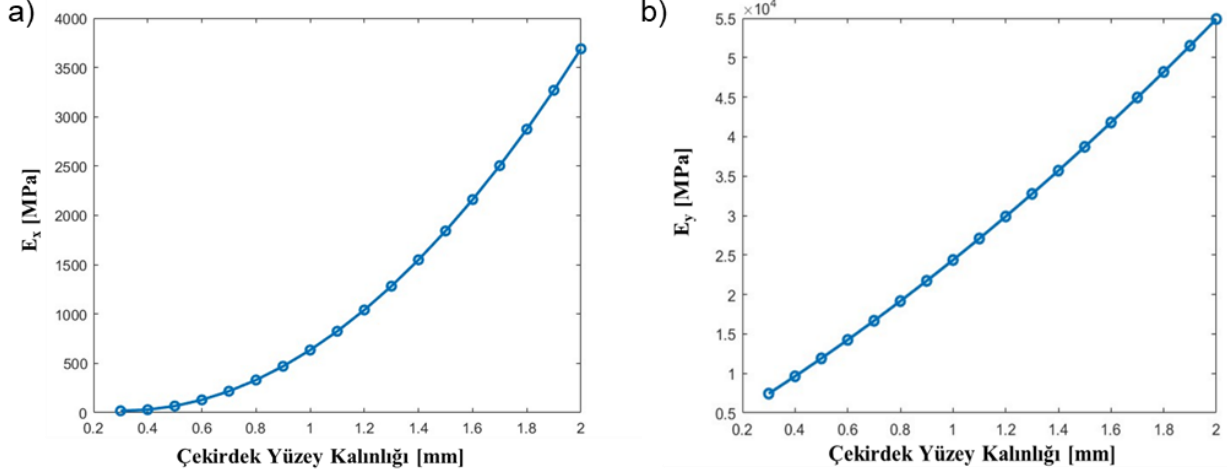
Elastik Özellik	Sonlu Elemanlar (MPa)	Bartolozzi vd. (2014) (MPa)	Yüzde Fark
E_x	18.95	18.94	0.05
E_y	7437.00	7453.56	-0.22
ν_{xy}	8.54E-04	8.41E-04	1.60
G_{xy}	2944.12	2790.00	5.52
G_{yx}	1433.00	1455.08	-1.54
G_{xz}	1183.00	1193.18	-0.86
G_{yz}	1268.00	1212.86	4.35

HİBRİT MODEL YÜZEY KALINLIĞI ÇALIŞMASI

Bu çalışmada hibrit modelin yüzey kalınlığı (t_c) 0.3 mm ile 2 mm arasında değiştirilerek elastisite ve kayma modüllerine etkisi incelenmiştir. Modelin yükseklik ve uzunluk değerleri sabit bırakılmıştır. Kalınlık değeri arttıkça elastik sabitlerin hepsinde yükselme görülmektedir.

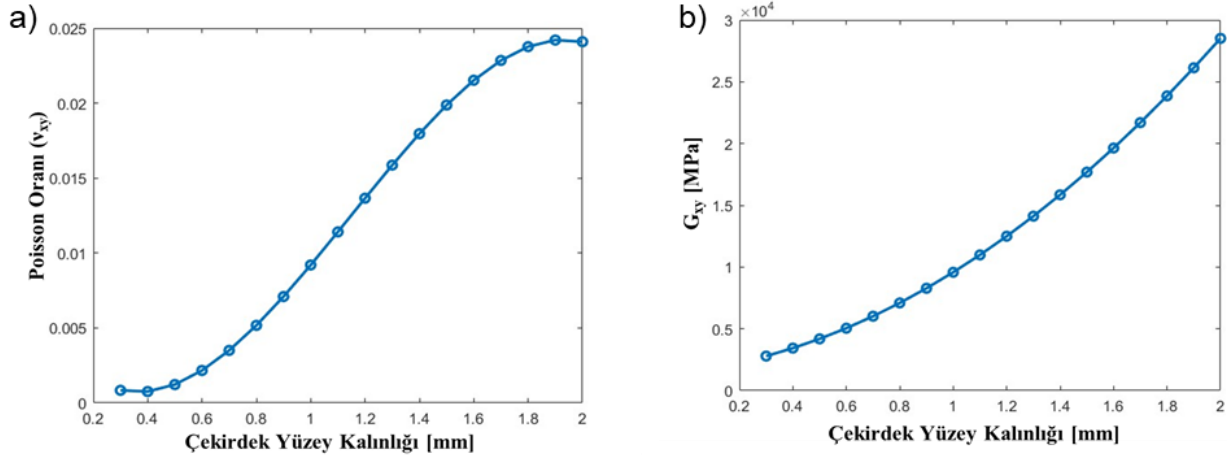
Şekil 6a'da E_x elastisite modülü değerlerinin kalınlık değeri arttıkça artış hızının da arttığı görülmektedir. Kalınlık değeri 0.3 mm iken 18.95 MPa olarak elde edilen elastisite modülü kalınlık 2 mm'ye geldiğinde 3689 MPa değerlerine ulaşmaktadır. E_y değerlerinin yüzey kalınlık değerleri ile değişimi Şekil 6b'de verilmektedir. Değerler 7.4 GPa'dan 54.9 GPa değerlerine kadar

yükselmektedir. E_x ile karşılaştırıldığında grafiğin daha lineere benzer bir artış gösterdiği gözlemlenmektedir.

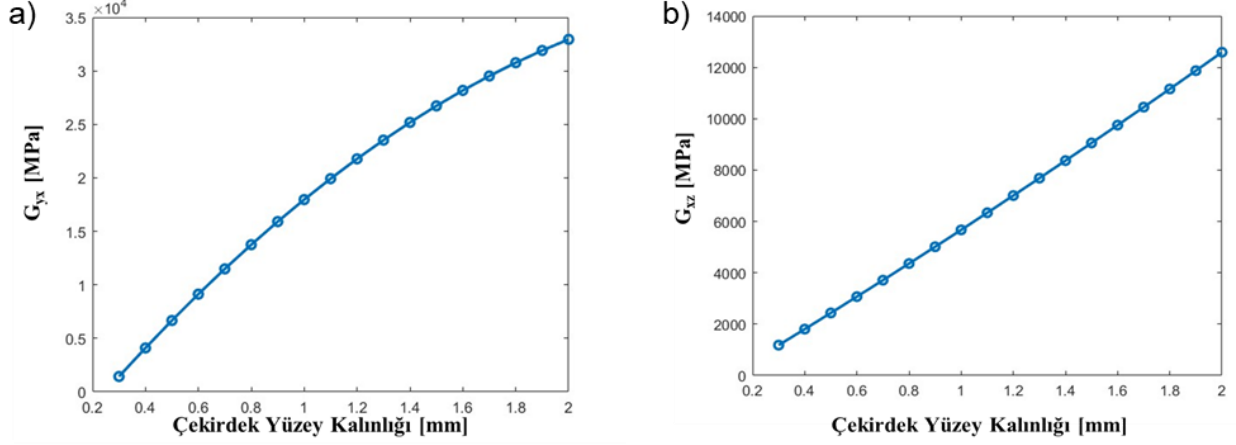


Şekil 6: a) E_x elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi b) E_y elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi
Şekil 7a'da Poisson oranının değişim grafiği verilmektedir. Bu değer 0.3 ile 0.5 mm arasında çok değişmediği 0.5 mm ve 1.8 mm kalınlıkları arasında hızlıca yükseldiği ancak sonrasında tekrardan yakınsama trendine girdiği ve 0.024 değerine yaklaştığı görülmektedir.

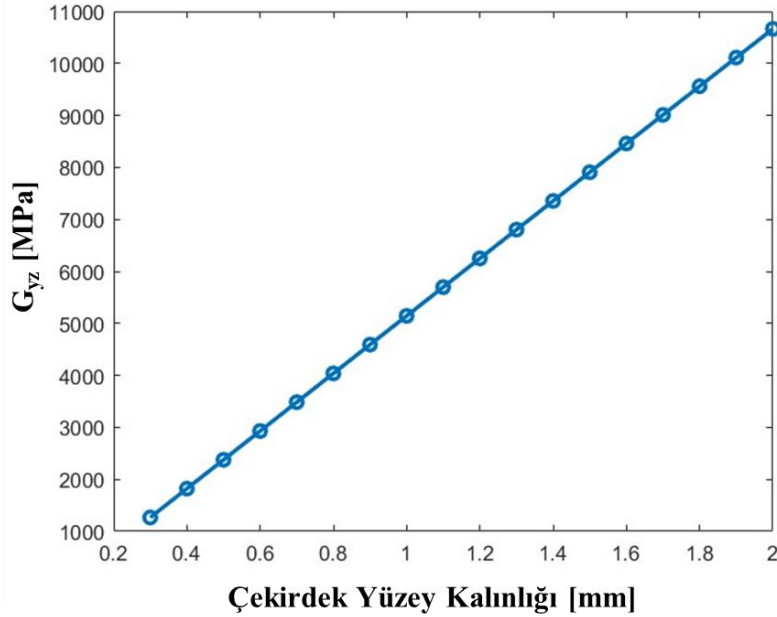
G_{xy} değerlerinin kalınlık değerlerine bağlı değişimi Şekil 7b'deki grafik ile verilmektedir. Bu değerlerin 1 mm 'yi geçtiğinde artışının daha çok hızlandığı görülmektedir. 2.7 GPa ile başlayan değerler 10 katını aşarak 28.5 GPa değerlerine ulaşmaktadır.



Şekil 7: a) Poisson oranı (v_{xy}) yüzey kalınlığı ilişkisi b) G_{xy} elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi
Şekil 8a'da G_{yx} değerlerinin yüzey kalınlığı ile değişim grafiği verilmektedir. G_{xy} grafiği ile karşılaştırıldığında G_{yx} değerlerinin artış hızının giderek yavaşladığı görülmektedir. Ancak artış oranı G_{xy} değerlerinden daha fazla olmaktadır. 0.3 mm kalınlıkta 1.4 GPa olan değerler 2 mm kalınlıkta 33 GPa değerlerini aşmaktadır.



Şekil 8: a) G_{yx} elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi b) G_{xz} elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi
Şekil 8b G_{xz} değerlerinin Şekil 9 ise G_{yz} değerlerinin çekirdek yüzey kalınlığı ile olan değişimini göstermektedir. Her iki grafik de lineere yakın bir artış göstermektedir ancak G_{xz} değerinin artış oranı G_{yz} den daha fazla olarak elde edilmektedir. G_{xz} değerleri 1.2 GPa'dan 12.6 GPa'ya artmış olup G_{yz} değerleri 1.2 GPa'dan 10.6 GPa değerlerine ulaşmıştır.



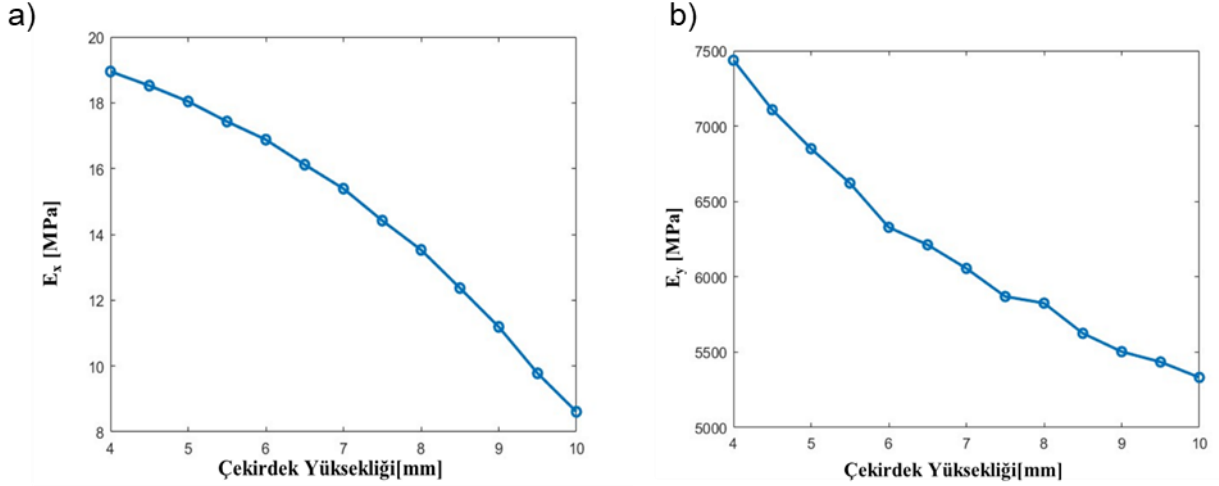
Şekil 9: G_{yz} elastisite modülü yüzey kalınlığı ilişkisi

HİBRİT MODEL ÇEKİRDEK YÜKSEKLİĞİ ÇALIŞMASI

Bu çalışmada hibrit çekirdek yapısı modelinin yükseklik değerinin elastik sabitlere etkisinin incelenmesi amacıyla çekirdek yapı yükseklik değeri (H_0) 4 mm ile 10 mm arasında değiştirilmiştir. Kalınlık ve uzunluk değerlerinde değişiklik yapılmamıştır. Çalışmada genel olarak elastik sabitlerin düştüğü görülmüştür.

Şekil 10a'da E_x elastisite modülünün ise çekirdek yükseklik değeri ile olan ilişkisi grafik olarak verilmektedir. Çekirdek yükseklik değeri arttıkça düşüş oranının arttığı ortaya çıkmaktadır. 18.95 MPa değeri yarısından fazla düşerek 8.61 MPa değerine ulaşmaktadır.

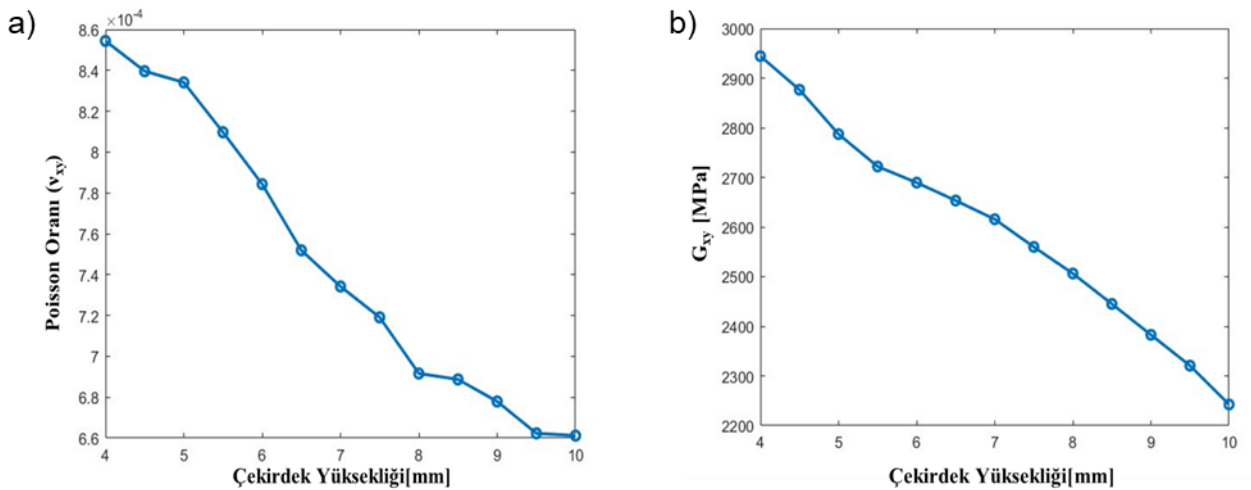
Şekil 10b'de verilen E_y değerlerinin çekirdek yükseklik değerleriyle olan ilişkisini gösteren grafiğe bakıldığında değerlerin düştüğü ancak bir limit değerine yaklaştığı gözlemlenmemiştir.



Şekil 10: a) E_x elastisite modülü çekirdek yüksekliği ilişkisi b) E_y elastisite modülü çekirdek yüksekliği ilişkisi

Şekil 11a'da Poisson oranının çekirdek yükseklik değerleriyle değişimi verilmektedir. Poisson oranının düştüğü ancak yükseklik 9 mm üzerine çıktıktan sonra çok değişmediği görülmüştür. Poisson oranı yaklaşık $6.6 \cdot 10^{-4}$ değerine yakınsamaktadır.

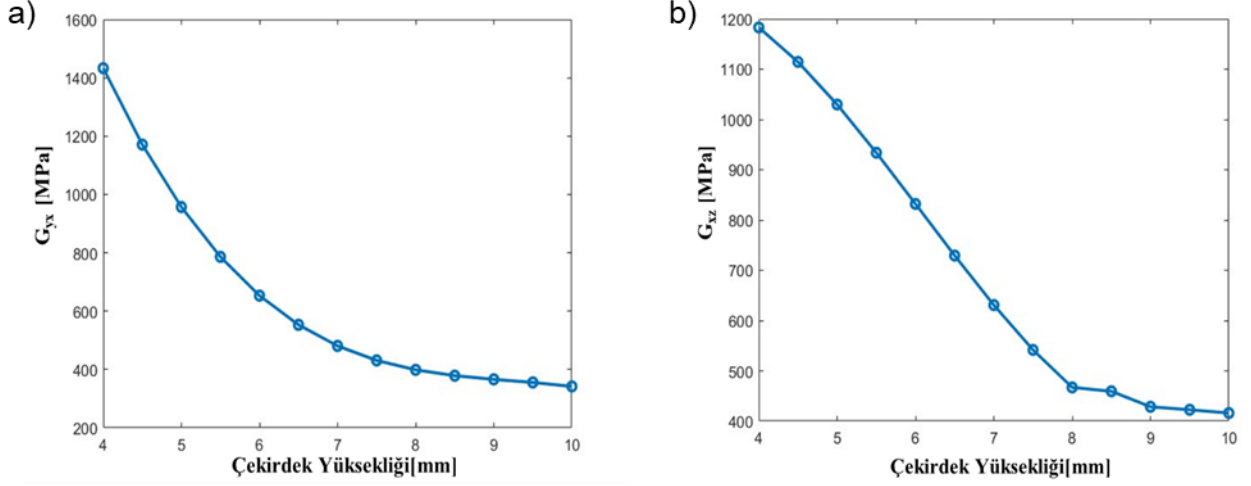
Şekil 11b'de G_{xy} kayma modülünün çekirdek yüksekliğinin artmasıyla uğradığı değişim verilmektedir. Lineere yakın bir grafik gözlemlenmektedir. Yaklaşık yüzde 30 oranında bir düşüş görülerek değerler 2.9 GPa seviyelerinden 2.2 GPa seviyelerine inmiştir



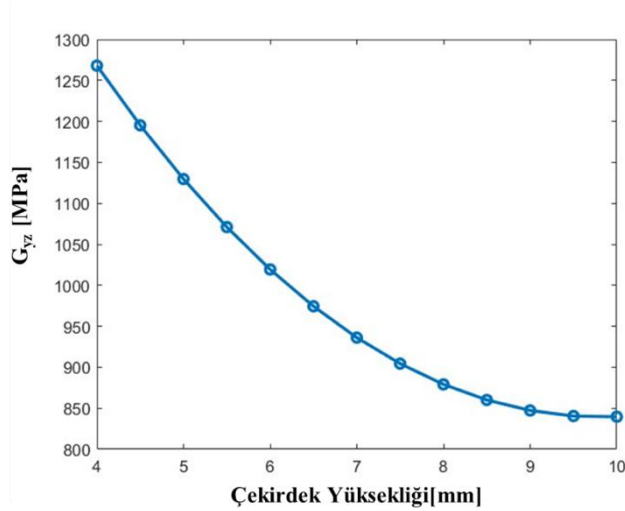
Şekil 11: a) Poisson oranı (v_{xy}) çekirdek yüksekliği ilişkisi b) G_{xy} elastisite modülü çekirdek yüksekliği ilişkisi

Kayma modülleri G_{yx} , G_{xz} , G_{yz} değerlerinin değişimleri Şekil 12a, 12b ve Şekil 13'te sırasıyla verilmektedir. Her 3 grafikte de değerlerin H_0 değeri 8 mm'nin üzerine çıktığında düşüş oranının

azalması ve bir limit değerine yaklaştığı görülmüştür. Ancak oransal olarak en az düşüş G_{yz} değerinde olmaktadır. En fazla ise G_{yx} değeri azalmaktadır.



Şekil 12: a) G_{yx} elastisite modülü çekirdek yüksekliği ilişkisi b) G_{xz} elastisite modülü çekirdek yüksekliği ilişkisi

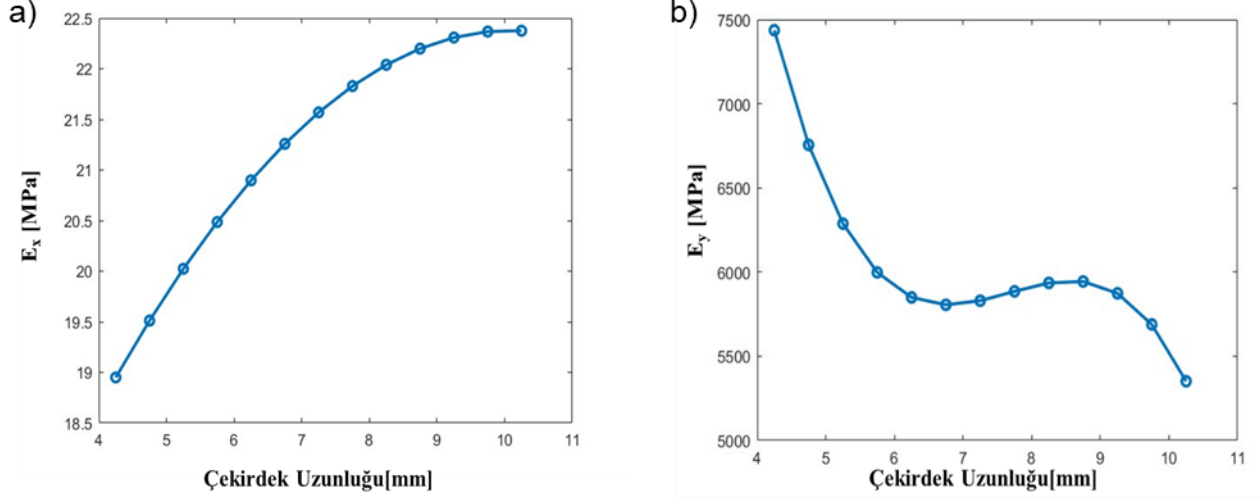


Şekil 13: G_{yz} elastisite modülü çekirdek yüksekliği ilişkisi

HİBRİT MODEL ÇEKİRDEK UZUNLUĞU ÇALIŞMASI

Bu bölümde hibrit modelin çekirdeğin x yönündeki uzunluğu (P_0) değiştirilerek elastisite ve kayma modüllerine etkisi incelenmiştir. Bu değer 4.25 mm ile 10.25 mm arasında değiştirilmiştir. Şekil 14a'da E_x değerinin çekirdek yüksekliği ile değişimi verilmektedir. Değerlerde yaklaşık yüzde 18'lik bir artış görülmekle beraber kalınlık 9.25 mm'nin üzerine çıktığında 22.30 MPa seviyelerine yakınsadığı gözlemlenmiştir.

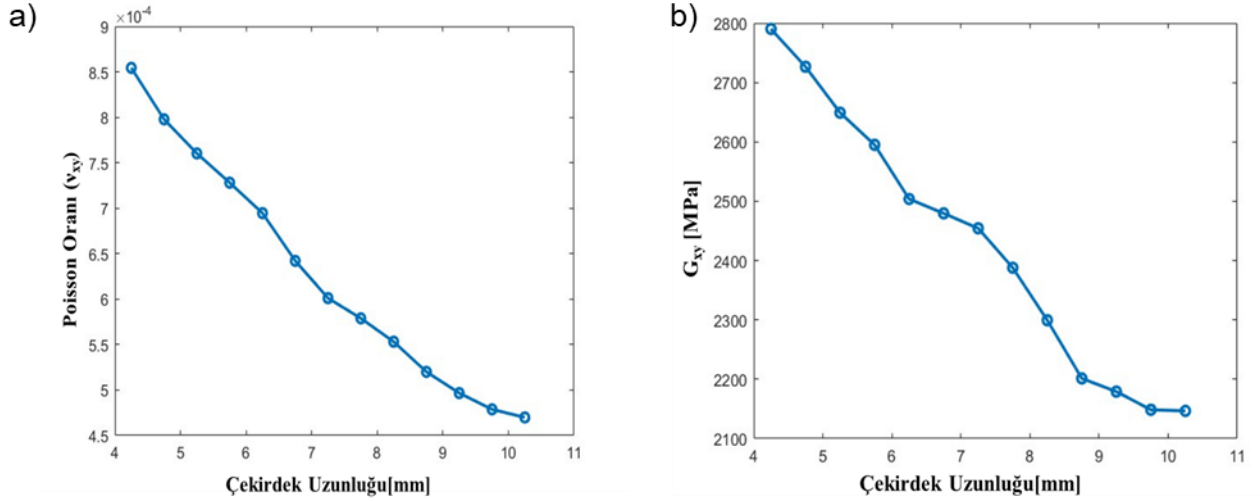
Şekil 14b'de E_y değerlerinin çekirdek uzunluğu ile değişimi verilmektedir. Değerler önce hızlı şekilde düşmeye başlamış ancak uzunluk değeri 6 ila 9 mm arasında iken çok yakın değerler verdikten sonra tekrar azalma eğilimine girmiştir. Değerler 7.4 GPa'dan 5.3 GPa seviyelerine kadar inmiştir.



Şekil 14: a) E_x elastisite modülü çekirdek uzunluğu ilişkisi b) E_y elastisite modülü çekirdek uzunluğu ilişkisi

Şekil 15a'da verilen grafikte Poisson oranının uzunluk arttıkça olan değişimi gözlemlenmektedir. Değerler lineere yakın bir şekilde düşüş göstermiştir. Uzunluk 4.25 mm iken $8.5 \cdot 10^{-4}$ olan Poisson oranı son uzunluk değerinde $4.7 \cdot 10^{-4}$ olarak gözlemlenmiştir.

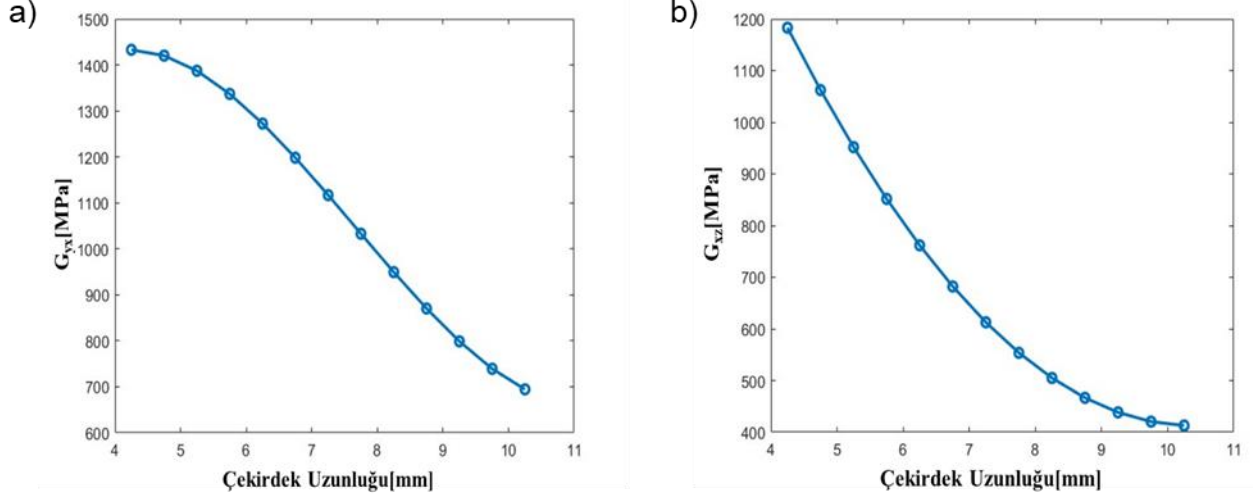
Şekil 15b'de kayma modülü G_{xy} değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Başta hızlı düşüş gösteren değerlerin P_0 değeri 8.75 mm'yi geçtikten sonra 2.1 GPa değerlerine yakınsadığı görülmüştür.



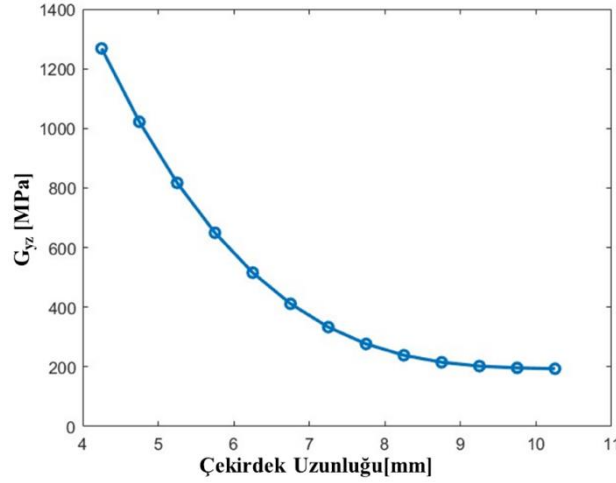
Şekil 15: a) Poisson oranı (v_{xy}) çekirdek uzunluğu ilişkisi b) G_{xy} elastisite modülü çekirdek uzunluğu ilişkisi

G_{yx} değerlerinin çekirdek uzunluğu ile olan değişimi Şekil 16a'da verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde değerlerin genel olarak düşüş eğiliminde olduğu ve uzunluk değeri arttıkça düşüş hızının arttığı görülmektedir.

Şekil 16b'de verilen G_{xz} ve Şekil 17'de verilen G_{yz} değerleri uzunluk değeri 8.75 mm'yi geçtikten sonra yakınsama eğilimine girmiştir. G_{xz} değerleri 420 MPa, G_{yz} değerleri ise 195 MPa seviyelerinde yakınsamıştır.



Şekil 16: a) G_{yx} elastisite modülü çekirdek uzunluğu ilişkisi b) G_{xz} elastisite modülü çekirdek uzunluğu ilişkisi



Şekil 17: G_{yz} elastisite modülü çekirdek uzunluğu ilişkisi

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada iki farklı üç boyutlu oluklu çekirdek yapısına sahip alüminyum sandviç paneller incelenmiştir. Üç boyutlu modelin hesaplama açısından maliyetli olması sebebiyle çekirdek yapının iki boyutlu eşdeğer bir yapıya indirildiği modeller kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı; sinüsoidal ve hibrit oluklu çekirdeklerin geometrik yapısı üzerinde yapılan değişikliklerin elastisite ve kayma modüllerine etkisini incelemektir.

Eşdeğer homojen malzemenin özelliklerini türetmek için literatürde var olan mevcut formülasyon uygun yapısal modeller kullanılarak doğrulanmıştır. Kullanılan modeller literatürden elde edilen sonuçlar ile doğrulanmıştır. Sonuçlar kıyaslandığında tüm elastik özellikler incelendiğinde en yüksek farkın %10'dan az olduğu tespit edilmiştir. Sinüsoidal oluklu çekirdek yapılarının yüzey kalınlıkları arttırıldığında hem elastisite hem de kayma modüllerinin yükseldiği görülmüştür.

Çalışmanın sonraki aşamasında bir tarafı sinüsoidal bir tarafı lineer çubuk şeklinde olan hibrit bir çekirdek modeli üzerinde doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu model sonuçları incelendiğinde en yüksek fark %5,52 olarak bulunmuştur.

Çalışmanın son aşamasında hibrit çekirdek yapısının yüzey kalınlığı, çekirdek yüksekliği ve uzunluğu değiştirilerek bunların elastisite ve kayma modüllerine etkisi incelenmiştir.

Çekirdek yüzey kalınlığı (t_c) arttıkça bütün modüllerin arttığı ancak Poisson oranının 1.8 mm'den sonra yakınsadığı gözlemlenmektedir. Çekirdek yükseklik değeri (H_0) ve uzunluğu (P_0) arttıkça ise modüllerin genel olarak düşme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Çekirdek yükseklik değeri (H_0) değeri arttırıldığında genel olarak bütün elastik sabitlerin düştüğü görülmektedir. Ancak Poisson oranı (ν_{xy}) ve kayma modülleri G_{yx} , G_{xz} , G_{yz} değerlerinin H_0 değeri arttıkça düşüş oranının azalması ve bir limit değerine yaklaştığı görülmüştür.

Çekirdek uzunluğu (P_0) değeri yükseldikçe E_x elastisite modülünün hafif arttığı ancak sonradan bir limit değerine ulaştığı ortaya çıkmaktadır. E_y değerleri hızlı şekilde düşmeye başlamış ancak uzunluk değeri 6 ila 9 mm arasında iken çok yakın değerler verdikten sonra tekrar azalma eğilimine girmiştir. Poisson oranı uzunluk arttıkça sürekli olarak düşüş göstermiştir. Kayma modülleri G_{xy} , G_{yz} ve G_{xz} değerlerinin P_0 değeri arttıkça bir limit değerine yaklaştığı görülmüştür. G_{yx} kayma modülünde başta yavaş başlayan düşüş sonrasında hızlanmış ancak sonrasında eğiliminin giderek azaldığı ortaya çıkmıştır.

Buradan H_0/t_c oranı arttıkça kayma modül değerlerinin azaldığı görülmüştür. G_{xy} haricindeki kayma modülleri limitlerine yakınsamıştır. Elastisite modüllerinde düşüş sürekli olarak gözlemlenmiştir.

P_0/t_c değerleri arttıkça x yönündeki elastisite modülün hafif artarak limite ulaştığı, y yönündeki elastisite modülün düşüşte olduğu, kayma modüllerin de belirli değerlerden sonra limitlerine yakınsadığı sonuçları elde edilmiştir.

Genel olarak H_0/t_c ve P_0/t_c değerleri yükseldikçe elastik sabitlerin düştüğü ancak yüzey kalınlığı çalışmadaki sonuçlar dikkate alındığında ise bu oranlar yükseldikçe elastik sabitlerin arttığı sonucuna varılmıştır.

İleride yapılacak çalışmalarda kalınlık değerlerinin artması ile yapılan bu çalışmada kalınlık arttıkça düşmekte olan H_0/t_c ve P_0/t_c oranları sebebiyle bir noktada elastik sabit değerlerinin artışının sonlanıp sonlanmayacağı konusu ayrıntılı olarak incelenebilir. Bu çalışmaya ek olarak H_0/t_c ve P_0/t_c oranları birlikte değiştirilerek yapılacak bir çalışma ile oluklu çekirdek yapılar için kullanılabilir boyutsuz parametreler elde edilebilir ve bu parametreler sayesinde oluklu çekirdek ile yüzeyler arasındaki katmanlar arası gerilmelerin ve elastik sabitlerin tahmin edilebilmesi için bir uygulama yapılabilir.

Kaynaklar

- Bartolozzi, G., Baldanzini, N., & Pierini, M. (2014). Equivalent properties for corrugated cores of sandwich structures: A general analytical method. *Composite Structures*, 108, 736-746.
- Bartolozzi, G., Pierini, M., Orrenius, U. L. F., & Baldanzini, N. (2013). An equivalent material formulation for sinusoidal corrugated cores of structural sandwich panels. *Composite Structures*, 100, 173-185.
- Dayyani, I., Shaw, A. D., Flores, E. S., & Friswell, M. I. (2015). The mechanics of composite corrugated structures: A review with applications in morphing aircraft. *Composite Structures*, 133, 358-380.
- Yokozeki, T., Takeda, S. I., Ogasawara, T., & Ishikawa, T. (2006). Mechanical properties of corrugated composites for candidate materials of flexible wing structures. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 37(10), 1578-1586.