



**TİTANYUM PLÂKLARLA YAPILAN STERNAL
KAPAMALARIN MEKANİK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

Eda ALKAN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

2022

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TİTANYUM PLÂKLARLA YAPILAN STERNAL KAPAMALARIN MEKANİK
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Eda ALKAN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

25 / 08 / 2022

Eda ALKAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TİTANYUM PLÂKLARLA YAPILAN STERNAL KAPAMALARIN MEKANİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Eda ALKAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

Bu çalışmada, sternal kapamalarda kullanılan x-şekilli, yıldız-şekilli ve düz-şekilli titanyum plâkların etkinliği, plâkların çelik tellerle birlikte kullanıldığında nasıl davranış gösterdiği ve plâklarda kullanılan vida sayısının etkisi nümerik analizlerle incelenmiştir. Oluşturulan kırk sekiz farklı sternum sabitleme yöntemi sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alınarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Geleneksel çelik tel, tek titanyum plâk ve üç titanyum plâk sabitleme yöntemlerinin nümerik analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve böylece sonlu elemanlar yöntemi analizlerinin gerçekliği ortaya konmuştur. Yanal ayrılma ve boyuna kesme etkisinin uygulandığı analizler ANSYS Workbench programında gerçekleştirilmiştir. Tüm yöntemlerin analizlerden elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri incelendiğinde boyuna kesme yükleme etkisinde x-şekilli plâk kullanılan yöntemlerde, yanal ayrılma yükleme etkisinde ise yıldız-şekilli ve x-şekilli plâk kullanılan yöntemlerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Düz-şekilli ve yıldız-şekilli plâkların yanal ayrılmada iyi bir kapama davranışı gösterdiği belirlenirken, boyuna kesmede ise bu plâklarla yapılan kapamaların oldukça yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde, yanal ayrılmada en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri 2x4d(vida) sabitleme yönteminden, boyuna kesmede ise 4x(vida) sabitleme yönteminden elde edilmiştir. Ayrıca, analizler sonucunda plâklarda kullanılan vida sayısı arttıkça her iki yükleme durumunda da daha iyi sternal sabitleme sağlandığı belirlenmiştir.

2022, 117 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyomekanik, Sonlu elemanlar analizi, Mediyan sternotomi, Sternum kapama teknikleri, Titanyum plâk.

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF STERNAL CLOSURES MADE WITH TITANIUM PLATES

Eda ALKAN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Süleyman Nazif ORHAN

In this study, the effectiveness of x-shaped, star-shaped and straight-shaped titanium sternal closure plates was investigated numerically. Also, the influence on the plate behavior of the number of screws and utilization of steel wires was identified. Forty-eight different sternum fixation techniques were modelled and compared taking into account the safety load and stiffness values obtained from the finite element method analyses. In order to reveal the accuracy of analyses, traditional steel wire, single titanium plate and three titanium plate fixation techniques were numerically examined and the results were compared with the experimental data. The analyses were conducted by using Ansys Workbench software and performed under lateral distraction and longitudinal shear loading effects. When the safety load and stiffness values of all methods were examined, better results were obtained from the methods using x-shaped plates under the longitudinal shear effect, and from the methods using star-shaped and x-shaped plates under the lateral distraction effect. Moreover, it was determined that the straight-shaped and star-shaped plates provided a good sternal closure in lateral distraction, but showed a very poor behavior in longitudinal shear. As a result of the analyses, the highest safety load and stiffness values were obtained from the 2x4d(screw) fixation techniques in lateral distraction and the 4x(screw) fixation technique in longitudinal shear. In addition, it was observed that as the number of screws used in the plates increased, better sternal fixation was achieved in both loading conditions.

2022, 117 page

Keywords: Biomechanics, Finite element analysis, Median sternotomy, Sternum closure techniques, Titanium plate.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca değerli vaktini bana ayıran, her türlü bilgi ve desteklerini esirgemeyerek benimle paylaşan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde bana destek olan canım aileme teşekkürlerimi sunarım. İyi ki varsınız ve hep yanımdasınız.

Tez çalışmalarım boyunca her konuda bilgi ve birikimlerini benimle paylaşıp bana yardımcı olan arkadaşım Osman YAVUZ'a teşekkür ederim.

Her zaman şanslı olduğumu hissettiren hep yanımda olan canım arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eda ALKAN
Ağustos 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Kuramsal Temeller.....	2
1.1.1. Sternumun anotomik yapısı	2
1.1.1. Mediyan sternotomi yöntemi ve sternum kapama teknikleri	3
1.1.2. Titanyum plâklarla sternal sabitleme	7
1.1.3. Sternuma etki eden kuvvetler	9
1.1.4. Sternal sabitleme deneylerinde uygulanan yükler.....	10
2. KAYNAK ÖZETLERİ	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM	26
3.1. Deneylerde Kullanılan Sternum Modelleri ve Sabitleme Malzemeleri	26
3.2. Deneylerin Gerçekleştirilmesi.....	28
3.3. Yer Değiştirmelerin Görüntü İşleme ile Belirlenmesi	30
3.4. Gerçekleme Çalışması.....	31
3.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri	31
3.6. Sabitleme Tekniklerinin Bilgisayar Modellerinin Oluşturulması	32
3.7. Sonlu Elemanlar Analizlerinde Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	39
3.8. Sonlu Elemanlar Analizlerinde Kullanılan Parametreler	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	45
4.1. Yanal Ayrılma Deney Bulguları	45
4.2. Boyuna Kesme Deney Bulguları.....	46
4.3. Görüntü İşleme Yöntemi Sonuçları.....	48
4.4. Gerçekleme Çalışması Sonuçları	48
4.5. Yanal Ayrılma Analiz Sonuçları	50

4.6. Boyuna Kesme Analiz Sonuçları	67
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR	87
EKLER.....	94
EK 1	94
EK 2	106



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

cm	Santimetre
dk.	Dakika
GPa	Gigapascal
kg	Kilogram
kPa	Kilopascal
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton

Kısaltmalar

3B	Üç boyutlu
CT	Bilgisayarlı tomografi
KOAH	Kronik obstrüktif akciğer hastalığı
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sternumun bölümleri ve göğüs kafesi (Anonim 2020a).....	3
Şekil 1.2. Sternumun kemik dokusu (Dieselman 2011)	3
Şekil 1.3. Mediyan sternotomi yönteminin uygulanması (Rashed et al. 2018)	4
Şekil 1.4. Çelik tellerle sternumun geleneksel şekilde sabitlenmesi (Kiessling 2005).....	5
Şekil 1.5. (a) X konfigürasyonunda trans-osseöz serklaj telleri, (b) Figür sekiz, (c) Çift serklaj çoklu büküm konfigürasyonu, (d) Sıfır figürü, (e) Parasternal örgü (Gandhi, 2019).....	6
Şekil 1.6. Titanyum plâklarla sternumun sabitlenmesi (Anonymous 2021d).....	7
Şekil 1.7. Steral kapamada kullanılan plak tipleri; (a) 8 delikli küçük H- şekilli plâk, (b) 8 delikli büyük H- şekilli plâk, (c) 10 delikli X- şekilli plâk, (d) 14 delikli çift T- şekilli plâk, (e) 6 delikli yıldız şekilli plâk, (f) 12 delikli yıldız şekilli plâk, (g) 12 delikli açılı şekilli plâk, (h) 10 delikli geniş X- şekilli plâk, (i) 18 delikli çift T- şekilli plâk, (j) 8 delikli düz şekilli plâk, (j) 12 delikli düz şekilli plâk (Anonymous 2021c)	8
Şekil 1.8. Sternuma etki eden kuvvetler sonucunda oluşan hareketler.....	11
Şekil 3.1. Mediyan sternotomi prosedürü uygulanan poliüretan sternum modeli	27
Şekil 3.2. X- şekilli titanyum plâk	27
Şekil 3.3. Üç tane X-şekilli titanyum plâk kullanılarak sternumun sabitlenmesi.....	28
Şekil 3.4. Yanal ayrılma deneyi.....	30
Şekil 3.5. Boyuna kesme deneyi.....	30
Şekil 3.6. Sternumun 3B modelinin MIMICS programında oluşturulması	33
Şekil 3.7. Analizlerde kullanılan plak tipleri; (a) X- şekilli, (b) Yıldız şekilli, (c) Düz şekilli.	33
Şekil 3.8. Çelik tellerin 3B modelinin oluşturulmuş hali	34
Şekil 3.9. Gerçekleme çalışmasında incelenen yöntemler; (a) Geleneksel çelik tel, (b) Tek titanyum plâk, (c) Üç titanyum plâk.....	34
Şekil 3.10. Sonlu elemanlar analizleri ile incelenen sternum sabitleme yöntemleri	35
Şekil 3.11. Sternum ve plaklara uygulanan mesh görüntüsü	40
Şekil 3.12. Yanal ayrılma analizlerinde modellere uygulanan sınır şartları	43
Şekil 3.13. Boyuna kesme analizlerinde modellere uygulanan sınır şartları	44
Şekil 4.1. Üç titanyum plâk yöntemi deneylerindeki farklı göçme mekanizmaları.....	46

Şekil 4.2. Üç titanyum plâk yönteminin yanal yükleme etkisi altında oluşan yük-yer değiştirme eğrisi.	46
Şekil 4.3. Üç titanyum plâk yöntemi deneylerindeki farklı göçme mekanizması	47
Şekil 4.4. Üç titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yükleme etkisi altında oluşan yük-yer değiştirme eğrisi.	47
Şekil 4.5. Yanal yükleme etkisi altında üç titanyum plâk yönteminin deney aleti, görüntü işleme yöntemi ve SEY analizinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	49
Şekil 4.6. Boyuna kesme yükleme etkisi altında üç titanyum plâk yönteminin deney aleti, görüntü işleme yöntemi ve SEY analizinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	50
Şekil 4.7. SEY analizleri ile karşılaştırılan yöntemlerin yanal ayrılma etkisinde oluşan yük-yer değiştirme eğrileri.	51
Şekil 4.8. Yanal ayrılmada sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri.....	62
Şekil 4.9. Yanal ayrılmada sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri.....	62
Şekil 4.10. Yanal ayrılmada plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri	64
Şekil 4.11. Yanal ayrılmada plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri.....	65
Şekil 4.12. Yanal ayrılmada sternumda oluşan von Mises gerilmelerinin bölgesel dağılımı.....	66
Şekil 4.13. Yanal ayrılmada sternumda maksimum von Mises gerilmelerine sebep olan sabitleme malzemelerinin dağılımı.	67
Şekil 4.14. SEY analizleri ile karşılaştırılan yöntemlerin boyuna kesme etkisinde oluşan yük-yer değiştirme eğrileri.	68
Şekil 4.15. Boyuna kesmede sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri.....	79
Şekil 4.16. Boyuna kesmede sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri.....	80
Şekil 4.17. Boyuna kesmede plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri	82
Şekil 4.18. Boyuna kesmede plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri.....	82
Şekil 4.19. Boyuna kesmede sternumda oluşan von Mises gerilmelerinin bölgesel dağılımı.....	83

Şekil 4.20. Boyuna kesmede sternumda maksimum von Mises gerilmelerine sebep olan sabitleme malzemelerinin dağılımı. 83



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri	39
Çizelge 3.2. Skewness değerine göre eleman kalitesi.....	40
Çizelge 3.3. Analizlerde kullanılan kontak elemanları, tipleri ve sürtünme katsayıları .	41
Çizelge 4.1. Görüntü işleme yönteminden elde edilen sonuçlar.....	48
Çizelge 4.2. Sonlu elemanlar yöntemi analiz sonuçları	49
Çizelge 4.3. Yanal ayrılımda sabitleme yöntemlerinin emniyet yükü ve direngenlik değerleri.	59
Çizelge 4.4. Kuvvet etkisi altında sternumun ön ve arka yüzeyinde oluşan yer değiştirmeler	66
Çizelge 4.5. Boyuna kesmede sabitleme yöntemlerinin emniyet yükü ve direngenlik değerleri	76

1. GİRİŞ

Günümüzde kalp ve damar hastalıklarındaki büyüyen artışla birlikte açık kalp prosedürüne duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Her açık kalp ameliyatının başlangıcında sternum (göğüs kemiği) uzunlamasına iki eş parçaya ayrılmaktadır. Bu prosedüre “mediyan sternotomi” adı verilmektedir. Sternotomi tekniği intratorasik (göğüs içi) ameliyatların büyük bir çoğunluğu için oldukça gereklidir. Sternotomi tekniği uygulanıp cerrahi müdahale yapıldıktan sonra sternum yeniden hizalanıp çeşitli sternal sabitleme malzemeleri kullanılarak birleştirilip sabitlenmektedir (Dieselman 2011).

Literatürde sternal sabitleme teknikleriyle alakalı birçok deneysel, klinik ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Çelik tellerle alakalı birçok çalışma olmasına rağmen, titanyum plâkların hem deneysel hem de nümerik olarak birlikte incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, literatürdeki eksiklikler göz önüne alınarak sabitleme tekniklerinden çelik tel ve titanyum plâkların hem deneysel hem de nümerik çalışmaları yapıp, sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri dikkate alınarak deneylerde görülen gerçek davranışının yansıtılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde mediyan sternotomi prosedürü uygulanan poliüretan sternum modelleri üzerine üç titanyum plâk sabitleme yöntemi uygulanıp, yanal ayrılma ve boyuna kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde Dasika et al. (2003) tarafından yapılan çalışmada sternal kapama kuvvetleri etkisi altında en çok sternumun ksifoid bölgesinin etkilendiği belirtilmiştir. Fedak et al. (2010) ve Fedak et al. (2011) tarafından yapılan çalışmalarda ise sternal yer değiştirmenin 2 mm’yi aşması durumunda çeşitli komplikasyonların oluşabildiği ifade edilmiştir. Literatürde yapılan bu çalışmalar dikkate alınarak yapılan deneylerde, sternumun ksifoid bölgesinin kesi hattında 2 mm yer değiştirmeye neden olan yük değerleri görüntü işleme yöntemi ile MATLAB dilinde özel bir kod kullanılarak hesaplanmıştır. Orhan (2016) tarafından yapılan geleneksel çelik tel ve tek titanyum plâk deneylerinden elde edilen sonuçlar çalışma kapsamında kullanılmıştır. Bu üç farklı sabitleme konfigürasyonunun deney bulgularından elde edilen değerler referans alınarak sınır şartlar belirlenip ANSYS Workbench programında bu tekniklerin elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi

analizleri yapılmıştır. Geleneksel çelik tel, tek titanyum plâk ve üç titanyum plâk sabitleme yöntemlerinin nümerik analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve böylece sonlu elemanlar yöntemi analizlerinin gerçekliği ortaya konmuştur.

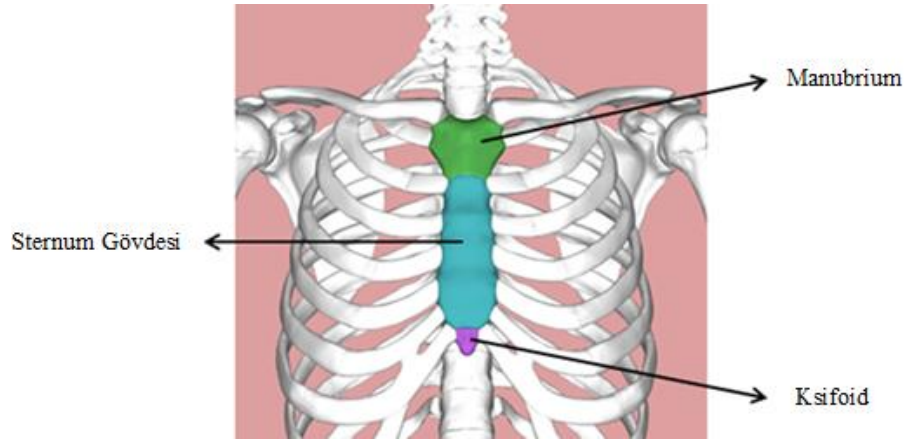
Çalışmada daha sonra X- şekilli, yıldız şekilli ve düz şekilli titanyum plâklar modellenip çelik teller de kullanılarak çeşitli yerleşim konfigürasyonları oluşturulmuş ve belirlenen sınır şartları altında sonlu elemanlar yöntemi analizleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Aynı zamanda çalışmada hem titanyum plâk çeşitleri birbirleri arasında karşılaştırılıp hem de plâklar üzerine çeşitli vida yerleşimi yapılarak vida yerleşiminin etkisi incelenmiştir. Karşılaştırma yaparken, analizler sonucunda elde edilen sternumun ksifoid bölgesinin kesi hattında 2 mm yer değiştirmeye neden olan yük ve direngenlik değerleri dikkate alınmıştır.

1.1. Kuramsal Temeller

Bu kısımda sternumun anatomik yapısı, sternuma etki eden yükler, mediyan sternotomi yöntemi ve tekli çelik tellerle yapılan sabitleme tekniğinden kısaca bahsedilip, asıl araştırma konusu olan titanyum plâklarla sternal sabitleme tekniği hakkında bilgi verilecektir.

1.1.1. Sternumun anotomik yapısı

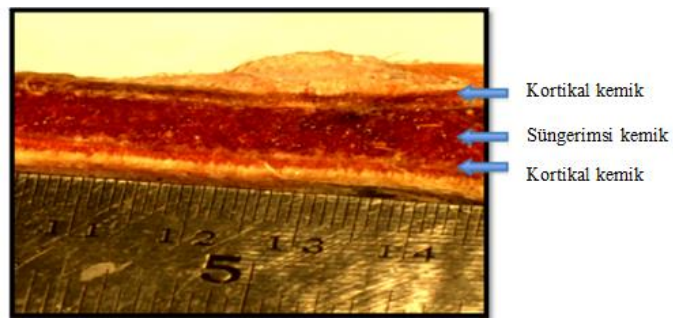
Sternum, sağ ve sol kaburga kemiklerini bir arada tutan göğüs kafesinin ön tarafının tam merkezinde bulunan yassı kemiktir. Sternum, en üstte manubrium, ortada gövde ve alt kısımda ksifoid denilen üç bölümden oluşur (Şekil 1.1) (Anonim 2020a).



Şekil 1.1. Sternumun bölümleri ve göğüs kafesi (Anonim 2020a)

Manubrium, köprücük kemiğini destekleyen ve sternumun en üst bölgesinde bulunan geniş dikdörtgen kısımdır (Anonymous 2021a). Gövde, altı çift kaburganın bağlandığı sternumun çoğunu oluşturan uzun ve düz kısımdır. Sternumun en altında bulunan ksifoid ise kişiden kişiye göre büyüklük ve şekil açısından en çok değişen, sternumun diğer kısımlarına göre daha ince ve dar olan kısımdır (Anonymous 2021a).

Sternum, süngerimsi kemik ve kortikal kemik olmak üzere iki tür kemik dokusundan oluşur. Kortikal kemik dokusu, kemiğin dış kabuğunu oluşturan yoğun bir yapıya sahiptir. Süngerimsi kemik ise kortikal kemik içerisindeki gözenekli ve yumuşak bir dokuya sahip olan kısımdır (Şekil 1.2) (Topaloğlu vd 2017).

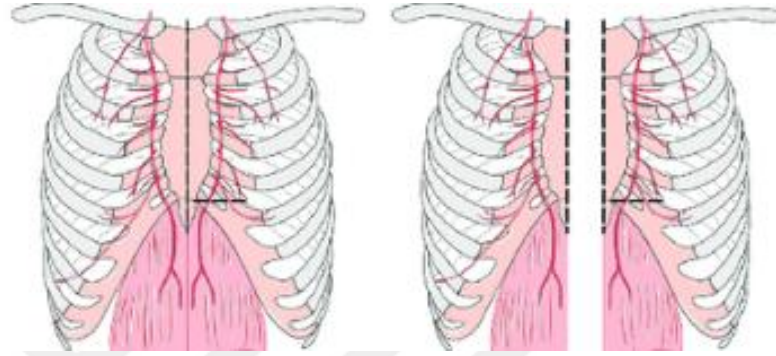


Şekil 1.2. Sternumun kemik dokusu (Dieselman 2011)

1.1.1. Mediyan sternotomi yöntemi ve sternum kapama teknikleri

Mediyan sternotomi, cerrahların akciğerlere veya kalbe erişebilmesi için uygulanan bir yöntemidir. Mediyan sternotomi yönteminde ilk olarak sternum

üzerindeki doku kaldırılmakta ve daha sonra cerrahi testere yardımıyla sternum, tam orta hattından boyunca uzunlamasına iki eş parçaya ayrılmaktadır. Kesiyi açık tutmak için sternal retractor bu ayrılan iki parçanın arasına yerleştirilmekte ve böylece göğüs kafesi cerrahların istediği büyüklükte ayarlanıp açılabilir. Cerrahlar tarafından yapılan operasyon sonucunda sternum, sternal kapama yöntemlerinden biriyle birleştirilip sabitlenmektedir (Şekil 1.3) (Anonymous 2021b).

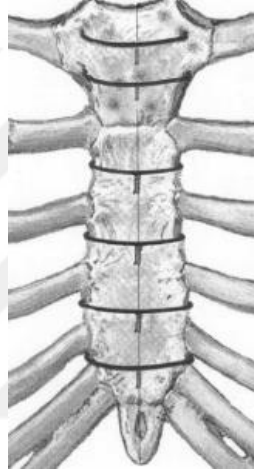


Şekil 1.3. Mediyen sternotomi yönteminin uygulanması (Rashed et al. 2018)

Tarihte ilk olarak mediyen sternotomi yöntemi H. Milton tarafından 1897 yılında önerilmiştir. Milton ilk olarak klinik uygulamadan önce mediyen sternotomiye insan kadavrasında gerçekleştirmiş daha sonra bu yöntemi canlı bir keçinin mediastinumunu muayene etmek için uygulamıştır. Milton prosedürü 1897 yılında önerilmesine rağmen 1957 yılına kadar oldukça az tercih edilmiştir. 1953'deki ilk başarılı açık kalp ameliyatından sonra çoğu cerrah, ağırlı ve komplikasyona eğimli bir yaklaşım olan bilateral anterior torakotomi yöntemini kullanmışlardır. 1957 yılında mediyen sternotomi yönteminin üstünlüğünün gösterilmesinden sonra bu yöntem standart bir insizyon haline gelmiştir. Koroner bypass ameliyatının 1968'de ortaya çıkmasıyla da mediyen sternotomi yöntemi en sık uygulanan cerrahi prosedürlerinden biri olmuştur (Anonymous 2021b).

Mediyen sternotomi operasyonu sonucunda sternum, sternal sabitleme yöntemlerinden biriyle birleştirilip sabitlenmektedir. Sternumun sabitlenmesi ile ilgili çeşitli yöntemler yaklaşık 50 yıldır uygulanmaktadır. Literatürde en yaygın olarak kullanılan sabitleme tekniğinin Milton et al. (1897) tarafından önerilen ve Julian et al. (1957) tarafından yaygınlaştırılan tekli çelik tel yöntemi olduğu görülmüştür.

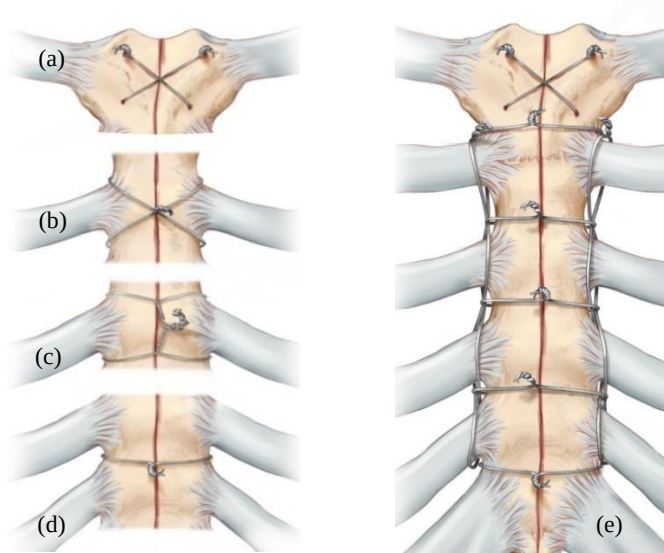
Tekli çelik tellerle sternum sabitleme tekniği ilk olarak Milton tarafından 1897 yılında gerçekleştirilmiştir. 1957 yılında median sternotomi yönteminin üstünlüğünün gösterilmesinden sonra standart bir sabitleme yöntemi haline gelmiştir (Çiçek 2018). Tekli çelik tellerle yapılan sabitlemelerde, bir veya iki tel sternumun manubrium kısmının içinden (transsternal) geçirilerek, kalan teller ise kaburgalar arasındaki boşluklardan sternumu arkasından saracak şekilde (peristernal) geçirilerek sternum sabitlenir. Çelik tellerin uçları kesi orta hattı üzerinde birleştirilip sıkıca bükülerek doku üzerine gömülür (Losanoff 2004). Çelik tellerle yapılan sternal sabitleme Şekil 1.4’de gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Çelik tellerle sternumun geleneksel şekilde sabitlenmesi (Kiessling 2005)

Çelik tellerle yapılan sabitlemede kullanım kolaylığı, kullanım hızı, görece düşük komplikasyon oranı ve düşük maliyet avantajları sebebiyle geleneksel bir sabitleme yöntemi haline gelmiştir (Çiçek 2018).

Çelik tellerin kemiği kesmesi, kopması, gevşeyip açılması gibi dezavantajları sebebiyle sternal ayrılmalar oluşabilmektedir. Çelik tellerde karşılaşılan dezavantajlı durumları önleyebilmek için farklı şekillerde birçok bağlama yöntemi geliştirilmiştir (Losanoff 2004). Çelik tellerle geliştirilen bazı bağlama teknikleri Şekil 1.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. (a) X konfigürasyonunda trans-osseöz serklaj telleri, (b) Figür sekiz, (c) Çift serklaj çoklu büküm konfigürasyonu, (d) Sıfır figürü, (e) Parasternal örgü (Gandhi, 2019).

Casha et al. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada sternal tel kapamasının başarısız olmasıyla, telin bükülme sayısının ilişkili olduğu ifade edilmiş ve kemik iyileşmesini hızlandırıp sternotomi kapamasının sertliğini artırmak için tel büküm sayısının minimumda tutulması gerektiği belirtilmiştir.

Sternum sabitleme ile ilgili çeşitli yöntemler uzun yıllardır uygulanmaktadır. Hangi sabitleme tekniğinin seçileceği konusunda maliyet, performans, uygulama kolaylığı gibi birçok parametre bulunmaktadır (Alhalawani 2013). Sternal kapamada yaygın olarak kullanılan sabitleme teknikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çift çelik tel
- Sternal kablo
- ZipFix sternotomi kapama sistemi
- Kryptonite kemik çimentosu
- Vitalitec sternotomi kapama sistemi
- Waston titanyum klips
- Ortholox® UHMWPE sternotomi kapama sistemi
- Tritium® SCP sternotomi kapama sistemi
- SternaLock 360 Sternotomi Kapama Sistemi
- SuperCable Polimer Iso-Elastic sternotomi kapama sistemi

1. GİRİŞ

Şu anda en yaygın kullanılan sternal sabitleme tekniği çelik tel yöntemidir. Bununla birlikte, yapılan çalışmalar sonucunda titanyum plâklarla yapılan sabitlemenin yanal yer değiştirmeyi azalttığı ve sternumun biyomekanik stabilitesini iyileştirdiği belirlenmiştir (Ozaki 1999; Dieselman 2011).

1.1.2. Titanyum plâklarla sternal sabitleme

Bu teknik Robert Danis tarafından 1949 yılında geliştirilmiştir. Robert Danis bu tekniği kullanarak kırık parçaların hareketlerinin minimize edilip sıkıştırıldığında kemik kırıklarının fibröz doku oluşumu olmadan iyileşebileceğini göstermiştir (Mostofi 2005; Dieselman 2011).

Titanyum plâklarla sternum sabitleme yönteminde ilk olarak sternal yarı boyunca sternum kalınlığı, vidalar için açılacak olan deliklerin derinliğini ve vidaların kemik üzerine yerleşimini belirlemek için ölçülür. Sternal yarılar pens yardımıyla birleştirilir daha sonra plâklar kemik üzerine yerleştirilerek vidalanır. (Şekil 1.6) (Anonymous 2021c).

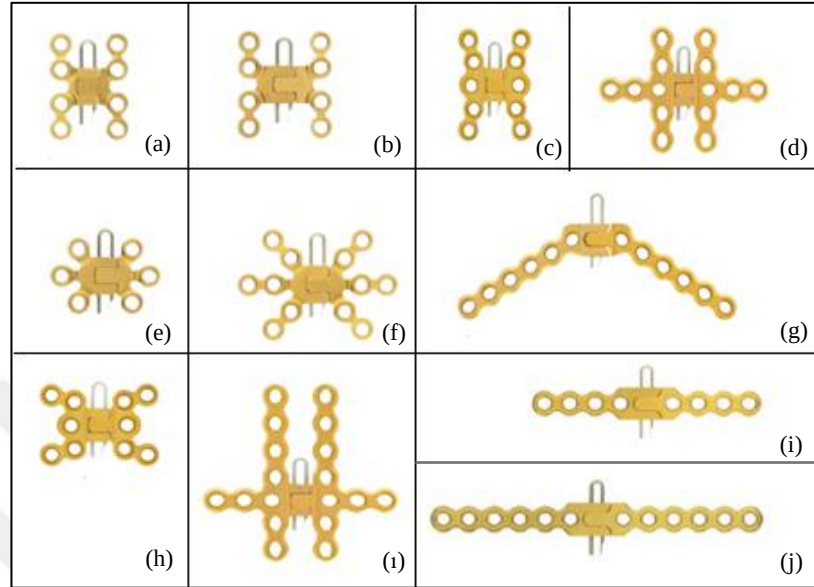


Şekil 1.6. Titanyum plâklarla sternumun sabitlenmesi (Anonymous 2021d)

Sternumun şekline ve kalınlığına bağlı olarak farklı şekillerde birçok plâk üretilmiştir (Şekil 1.7) (Anonymous 2021c). Literatürde yapılan bir çalışmada X- şekilli titanyum plâkların yüzdeki kemikler gibi yassı ve uzun kemiklerde avantajlı olduğu

1. GİRİŞ

belirtilmiştir. Sternum da geometrik olarak yüz kemiklerine benzediğinden, X- şekilli titanyum plâk tasarımının sternum için en yaygın kullanılan sabitleme plâğı olduğu ifade edilmektedir (Ozaki 1999).



Şekil 1.7. Steral kapamada kullanılan plak tipleri; (a) 8 delikli küçük H- şekilli plâk, (b) 8 delikli büyük H- şekilli plâk, (c) 10 delikli X- şekilli plâk, (d) 14 delikli çift T- şekilli plâk, (e) 6 delikli yıldız şekilli plâk, (f) 12 delikli yıldız şekilli plâk, (g) 12 delikli açılı şekilli plâk, (h) 10 delikli geniş X- şekilli plâk, (i) 18 delikli çift T- şekilli plâk, (j) 8 delikli düz şekilli plâk, (k) 12 delikli düz şekilli plâk (Anonymous 2021c).

Literatürde vida uzunluğunun etkisiyle alakalı Price et al. (2012) tarafından yapılan nümerik bir çalışmada, uzun vidalardaki sternal ayrılmanın kısa vidalara göre daha az olduğu belirtilmiştir. Ayrıca uzun vidalarda kemiğe daha fazla yük aktarıldığı da ifade edilmiştir.

Titanyum plâklarla sabitleme tekniği geleneksel çelik tel yönteminin tavsiye edilmediği durumlarda, özellikle tellerin kemiği kesebileceği kemik erimesi olan hastalarda genellikle tercih edilmektedir (Dieselman 2011).

Geleneksel çelik tel yöntemiyle karşılaştırıldığında bu yöntemde plâkların yerleştirilmesi ve vidalanması işlemi sebebiyle operasyon daha uzun sürmektedir. Aynı zamanda daha fazla cerrahi beceri gerektirmektedir. Titanyum plâk yönteminin yaygın olarak benimsenmemesinin bir sebebi de maliyetidir. Plâk ve vida sistemi, tellerle

kıyaslandığında daha fazla maliyete sahiptir (Dieselman 2011). Fakat literatürde yapılan bir çalışmada titanyum plâk sisteminin geleneksel tel yöntemine göre daha maliyetli olduğu belirtilmesine rağmen, titanyum plâk kullanılan hastalarda operasyon sonrasında görülen komplikasyonların daha az olduğu ve bu yüzden de genele bakıldığında plâkların daha düşük bakım maliyeti oluşturduğu ifade edilmiştir (Park et al. 2017).

1.1.3. Sternuma etki eden kuvvetler

Sternumun yükleme profili, sternal sabitlemenin başarısını belirlemede önemli bir faktördür. Açık kalp ameliyatının ardından iki eş parçaya ayrılmış sternum, üzerine gelen yüklere karşı koyamaz ve bu yükler doğrudan sternal sabitleme cihazlarına aktarılır. Sternal kuvvetlerin *in vivo* insan modelleri üzerinde karakterize edilmesinin oldukça zor olduğu ifade edilmektedir (Casha et al. 1999). Sternotomi kapaması üzerine etkiyen kuvveti bulmak amacıyla literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır;

a) Casha et al. (1999) öksürük sırasında göğüs duvarında oluşan kuvvetleri hesaplamak için matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Göğüs kafesinin silindirik olduğu ve öksürme sırasında silindirin dairesel kısmı boyunca etki eden kuvvetlerin radyal olarak yönlendirebileceği varsayılmıştır. Bu kabullere göre sternotomi kapaması üzerine etkiyen kuvveti bulmak için aşağıdaki eşitlik yazılmıştır;

$$T = r.l.P \quad (1.1)$$

Eşitlikte, T sternotomi kapaması üzerine etkiyen kuvvet, r göğüs yarıçapı, l göğüs uzunluğu, P ise şişirme basıncıdır (iç ve dış basınçlar arasındaki fark). Göğüs yarıçapının yaklaşık 15 cm, göğüs uzunluğunun yaklaşık 25 cm olduğu ve öksürük sırasında şişirme basıncının 40 kPa' a kadar ulaşabileceği bilgileri dikkate alınarak denklemde yerine yerleştirildiğinde sternotomi kapaması üzerine etkiyen kuvvet $T = r.l.P = (0,15).(0,25).(40) = 1500$ N olarak bulunmuştur. Bulunan bu kuvvete şiddetli bir öksürük durumunda ve büyük göğüs kafesine sahip kişilerde ulaşılması daha olasıdır. Ayrıca bu çalışmada normal öksürüğün şişirme basıncının 13,3 kPa olduğu ve sternuma 555,3 N'luk bir kuvvet uyguladığı, maksimal bir öksürüğün şişirme basıncının ise 39,9 kPa olduğu ve sternuma 1666 N'luk bir kuvvet uyguladığı belirtilmiştir.

b) Pai et al. (2005) tarafından domuzlar üzerinde yapılan çalışmada çeşitli solunum koşulları altında sternum üzerine etkiyen yüklerin büyüklüğü, dağılımı ve yönü araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda daha önceki çalışmalara göre düşük büyüklükteki kuvvetler olduğu, bulunan bütün kuvvetlerin 45 N'dan daha az olduğu ve öksürme esnasında kaydedilen maksimum yükün manubriumda 44 N, ksifoid de ise 36 N olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca yanal doğrultudaki kuvvetlerin diğer doğrultularda ölçülen kuvvetlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

c) Parker et al. (2008), sternotomi kapaması üzerine öksürük sırasında uygulanan kuvvetleri ve valsalva manevrası ile birlikte çeşitli kaldırma aktivitelerini karşılaştırmışlardır. Gönüllü 9 hasta üzerinde valsalva manevrası ile birlikte 2,5 kg'lık ağırlık kaldırma, 13,6 kg bavul kaldırma, aynı anda iki adet 18,2 kg ağırlık kaldırma, 11,4 kg ağırlığında simüle edilmiş (kukla) bir çocuğu kaldırma, 3,7 kg ağırlığında sütü buzdolabından tezgâha kaldırma gibi beş adet aktivite gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda öksürük kuvvetinin 27,5 kg ile sternum üzerine etkiyen en büyük kuvvet olduğu, iki adet 18,2 kg ağırlık kaldırmanın 23,3 kg ile öksürük kuvvetine en yakın ağırlık kaldırma aktivitesi olduğu belirtilmiştir.

d) Alhalawani and Towler (2013) tarafından sunulan çalışmada Laplace yasasına göre sternum üzerine etkiyen kuvvetlerin solunum sırasında 160-400 N, öksürme sırasında ise 550-1650 N arasında değiştiği ifade edilmiştir.

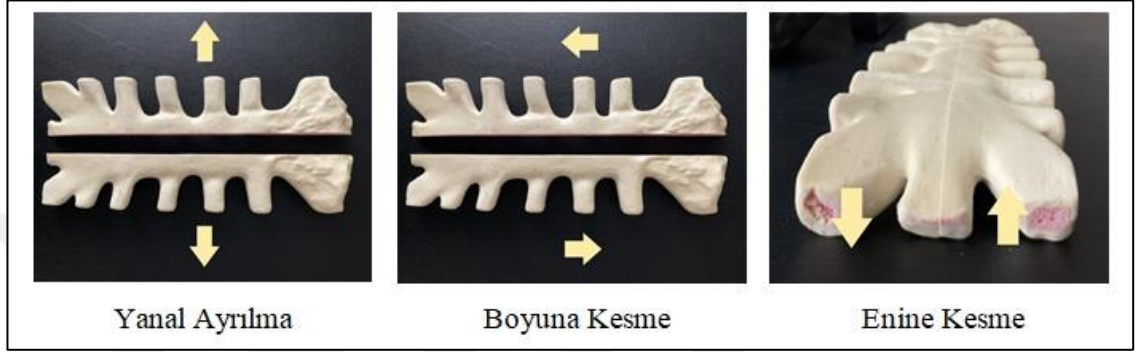
e) Swanson et al. (2014) tarafından çalışmada sternotomi sonrası hastalara çekme, kaldırma ve itme gibi hareketler içeren 19 aktivite yaptırılmıştır. En yüksek kuvvet oluşturan aktivitenin ticari bir binanın dış kapısının çekerek açılması olduğu ve yaklaşık 138 N'luk (14.06 kg) kuvvet oluşturduğu belirtilmiştir.

1.1.4. Sternal sabitleme deneylerinde uygulanan yükler

Sternal sabitleme yöntemlerini test edebilmek için dinamik test ve statik test olmak üzere iki mevcut teknik bulunmaktadır (Cohen 2002). Dinamik testte, solunum sırasında sternuma etkiyen kuvvetleri simüle etmek için yanal yönde tekrarlı bir kuvvet uygulanırken, statik testte modelde göçme olana kadar sürekli artan bir yük uygulanır

1. GİRİŞ

(Wangsgard 2008). Hastaların solunum, öksürme, ağır bir cisim kaldırma, bir tarafının üzerine uzanması gibi hareketlerinden kaynaklı sternumlarında enine kesme, boyuna kesme ve yanıl ayrılma şeklinde hareketlere sebep olduğu görölmektedir. Bu yüzden de sternal sabitlemeyi inceleyen çalışmaların çoğunda sternumda enine kesme, boyuna kesme ve yanıl ayrılma olmak üzere yüklemenin üç yönüne odaklanılır (Şekil 1.8) (Dieselman 2011).



Şekil 1.8. Sternuma etki eden kuvvetler sonucunda oluşan hareketler

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Ozaki et al. (1998), insan kadavralarından alınan sternumlar üzerine titanyum plâk ve geleneksel çelik tel sabitleme tekniklerini uygulanarak karşılaştırmışlardır. İki aşamalı olarak gerçekleştirilen deneylerin ilk aşamasında geleneksel çelik tel yöntemiyle dört delikli düz titanyum plâklar kıyaslanmıştır. Deneylerin ikinci aşamasında ise geleneksel çelik tel yöntemiyle dört delikli H şekilli titanyum plâklar karşılaştırılmıştır. Deneylerde sternuma solunum hareketini yansıtan 22,5 kg'lık tekrarlı yükler dört noktalı eğilme basması şeklinde uygulanmıştır. Deneyler sonucunda yanal yer değiştirmeler ölçülmüş ve yük-yer değiştirme eğrisinin eğiminden yöntemlerin direngenliğini hesaplamışlardır. Düz titanyum plâk ve geleneksel çelik tel arasında belirgin bir fark olmadığı belirtilmiştir. H şekilli titanyum plâkların geleneksel tellere göre daha iyi rijitlik sağladığı ve daha az yanal ayrılmaya sebep olduğu ifade edilmiştir.

Mitra et al. (2004), çalışmada çelik tel ile yapılan sternal kapamalarda oluşabilecek sternal yarıma, tellerin kemiği kesmesi, tel kopması gibi problemleri göz önüne alarak çelik tellerin ve titanyum plâkların bir arada kullanıldığı sternum sabitleme tekniğini altı hastaya uygulayıp etkilerini incelemişlerdir. Kullanılan bu teknikte boyuna iki titanyum plâk sternuma yerleştirilip vidalanmıştır. Daha sonra dört çelik tel bu plâkların etrafını saracak şekilde yerleştirilip sabitlenmiştir. Çalışma sonucunda bütün hastalarda sternal iyileşme komplikasyonsuz ve başarılı bir şekilde gerçekleşmiş ve bu yöntemin riskli vakalarda sternal iyileşmenin sağlanmasında geleneksel çelik tel yöntemine alternatif olabileceği belirtilmiştir.

Song et al. (2004), mediyastinit açısından yüksek risk grubunda bulunan ve KOAH, böbrek yetmezliği, diyabet ve obezite gibi hastalıklara sahip 45 kişiye sternal kapama yöntemi olarak titanyum plâk uygulamış ve bu yöntemin etkinliğini araştırmışlardır. Temmuz 2000 - Aralık 2001 tarihleri arasında yaş ortalaması 63 olan, 26'sı erkek 19'u kadın olmak üzere 45 hastaya titanyum plâk sternal sabitleme yöntemi uygulanmıştır. Hastalar 15 hafta boyunca takip edilmiştir. Takip sonucunda 4 hastada sternal sabitlemeyle ilgisi olmayan sebeplerden ölüm görülmüştür. Diğer hastalarda sternal iyileşme başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Çalışmada ayrıca yakın zaman diliminde çalışılan geleneksel çelik tel sternal sabitleme yöntemiyle de karşılaştırma

yapılmıştır. Geleneksel çelik tel sabitleme yöntemi 206 hastaya uygulanmıştır. Bu hastalardan 18 tanesinde sternal sabitlemeyle ilgisi olmayan sebeplerden ölüm, 28 tanesinde ise mediastinit gelişmiştir. Titanyum plâk uygulanan hastalarda ise hiç mediastinit görülmemiştir. Sonuç olarak titanyum plâk yönteminin geleneksel çelik tel yöntemine göre mediastiniti önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir.

Wu et al. (2004), çelik tellerle sternal sabitleme yapılan fakat sternal kaynama sağlanamayan 6 hastaya titanyum plâklar (SternaLock) ile tekrardan sternal kapama yapmışlardır. Hastalar 6-18 ay boyunca takip edilmiştir. Süreç boyunca hastalarda herhangi bir komplikasyon tespit edilmemiş olup, sternal iyileşmenin sağlandığı belirtilmiştir.

Pai et al. (2005), poliüretan sternum modelleri üzerine titanyum plâk ve çelik tel kapama yöntemlerini uygulanıp karşılaştırmışlardır. Yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretan sternum modelleri üzerine 3 adet X şeklinde titanyum plâk (SternaLock) veya 7 adet geleneksel çelik tel uygulanarak sabitlenmiş ve yanal çekme kuvveti uygulanmıştır. Modeller her iki tarafından da sekiz noktadan test cihazına sabitlenip, sabitlenen noktaların her birine eşit olacak şekilde 180 N yanal çekme kuvveti 12,7 mm/dk yükleme hızıyla uygulanmıştır. Sternum modelleri üzerinde işaretlenen yedi noktadan dijital görüntü analizi ile yanal ayrılmalar hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda titanyum plâkların, çelik tellere göre yanal ayrılmayı daha iyi önlediği görülmüştür.

Cicilioni et al. (2005), sternal yaraların onarılması için hastalara titanyum plâk sabitleme yöntemini uygulayıp deneyimlerinin retrospektif bir çalışmasını sunmuşlardır. 1998-2002 yılları arasında yaş ortalaması 65,12 olan 50 hasta üzerinde çalışılmıştır. Hastaların tümü daha öncesinde kalp hastalığından dolayı sternotomi geçirmiştir. Hastaların sternumlarını bir araya getirip daha sonra minimum 3 tane enine titanyum plâkları (Synthes) kaburgaların üçüncü, dördüncü ve altıncı seviyesine yerleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda hastalarda hiç ölüm görülmediği, sternal iyileşmenin sağlandığını ancak bir hastada operasyondan 3,5 yıl sonra plâk etrafında enfeksiyon geliştiği görülmüştür. Sonuç olarak titanyum plâkların kullanımının güvenli ve kolay uygulanabilir bir sternal kapama tekniği olduğunu ifade etmişlerdir.

Raman et al. (2006), mediastinit açısından yüksek risk grubunda bulunan 320 hastaya sternotomi sonrasında titanyum plâk (SternaLock) uygulaması yapıp, geleneksel yöntem uygulanmış benzer risk faktörlerine sahip 215 hastadan oluşan ayrı bir grupla karşılaştırmışlardır. Sternumun üst ve alt bölgeleri figür-8 tel tekniğiyle sabitlenip orta bölgelere iki adet titanyum plâk uygulanmıştır. Hasta takipleri ise 4 ile 200 hafta arasında sürmüştür ve araştırma sonucunda titanyum plâk uygulanan hastaların hiçbirinde mediastinit görülmediği, çelik tel uygulanan hastalarda ise 28 vaka görüldüğü belirlenmiştir. Bu vakaların ikisi de ölümle sonuçlanmıştır. Çalışmada sonuç olarak titanyum plâklarla yapılan sternal kapamada, kemik enfeksiyonunun azaldığı ve sternal hareketsizliği sağlamada etkili olduğu görülmüştür. Bu uygulanan teknikle yüksek riskli hastalarda sternotomiden kaynaklanan enfeksiyonlarda azalma olduğu belirtilmiştir.

Plass et al. (2007), mediyan sternotomi sonrasında sternal ayrılma ve enfeksiyon görülen üç hastaya titanyum plâk (Synthes) sternal kapama tekniğini uygulamışlardır. Kullanılan enine titanyum plâkları hastanın sternum özelliklerine göre düzenleyip kaburgaların da üzerinde gelecek şekilde sabitlemişlerdir. Çalışma sonucunda hastalarda herhangi bir sorun görülmediği ve yöntemin güvenli ve kolay uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Pai et al. (2007), titanyum plâkların sayılarının ve etkin yerleşimlerinin nasıl olacağı konusundaki literatürdeki eksikliği belirtmişlerdir ve bu eksikliği giderebilmek için yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretan sternum modelleri üzerinde X şekilli ve kutu şekilli titanyum plâkları beş farklı kombinasyonda uygulayarak karşılaştırmışlardır. Uygulanan beş farklı kombinasyon dört X şekilli, iki X ve bir kutu şekilli, üç X ve bir kutu şekilli, üç X şekilli ve en son olarak üç X şekilli fakat alttaki plağın ksifoid bölgesine daha yakın yerleştirilmiş olduğu modellerden oluşmaktadır. Modellere karşılıklı sekiz noktadan en fazla 360 N olacak şekilde yanal çekme kuvveti uygulanmıştır. Çalışma sonucunda beklenenin aksine dört X şekilli plâklarda, üç X şekilli plâklara göre daha fazla ayrılma olduğu belirlenmiştir. Sternal ayrılmaya karşı en iyi davranışın ise üç X ve bir kutu şekilli modelde olduğu görülmüştür.

Voss et al. (2008), daha öncesinde geleneksel çelik tellerle sternal kapama yapılan 15 hastaya titanyum plâk (Synthes) sternal kapama tekniğini uygulamışlardır. Hastaların bir kısmının sternumlarına çelik teller de kullanılarak kaburga kısmına kadar uzanan iki enine titanyum plâk, manubrium bölgesine H şekilli titanyum plâk ve ksifoid bölgesine ise yıldız şekilli titanyum plâklar uygulanmıştır. Hastaların diğer kısmına ise sternum boyunca uzunlamasına iki titanyum plâk, çelik ya da titanyum plâk kullanmışlardır. Çalışma sonucunda titanyum plâkların kullanımının güvenli ve kolay uygulanabilir bir sternal kapama tekniği olduğu ve uzunlamasına uygulanan kapamanın diğer yöntemle göre daha az komplikasyona sebep olduğu ifade edilmiştir.

Huh et al. (2008), Haziran 2004 – Haziran 2007 yılları arasında 15 hastaya uygulanan titanyum plâk sabitleme yöntemindeki deneyimlerinin retrospektif bir çalışmasını sunmuşlardır. Hastaların genellikle sternumlarının manubrium kısmına yıldız şekilli titanyum plâk, kalan kısımlara ise üç ila beş arasında enine titanyum plâk yerleştirilmiştir. Hastalar 15,5 ay boyunca takip edilmiştir. Bir hastada seroma ve başka bir hastada enfeksiyon görülmüştür. Bir hasta ise operasyondan 5 ay sonra sternal plâk kırığı sebebiyle yeniden bir operasyon geçirmiştir. Tüm hastalarda sternal stabilitenin iyi sağlandığı ve ağrı seviyesinin de düşük olduğu belirtilmiştir.

Fawzy et al. (2009), 18 insan kadavrası üzerinde, beş farklı sternum sabitleme yöntemlerini (6 çelik tel, 6 çelik kablo, 6 çelik tel + 1 plâk, 6 çelik kablo + 1 plâk, 4 plâk) uygulayarak deneylerle karşılaştırmışlardır. Deneylerde kesi hattında 2 mm' lik yer değiştirmeler oluşana kadar, göğüs içi boşluğa konulan plastik torbalar havayla şişirilmiştir. Modellerin kesi hattındaki yer değiştirmeleri piezoelektrik kristal dönüştürücüler ile ölçülerek karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda 6 çelik tel ve 6 çelik kablo yöntemi arasında belirgin bir farklılık görülmemiştir. Yine aynı şekilde 6 çelik tel + 1 plâk, 6 çelik kablo + 1 plâk ve 4 plâk sabitleme yöntemleri arasında da belirgin bir farklılık görülmemiştir. Bununla birlikte, plâk kullanılan modellerde sadece tel ve kablo kullanılan modellere göre daha iyi sternal stabilite sağlandığı belirlenmiştir.

Snyder et al. (2009), çalışmada benzer risk grubundaki 30 hastaya çelik tellerle birlikte titanyum plâklar, 129 hastaya ise geleneksel çelik tel yöntemini uygulayarak karşılaştırmışlardır. Ameliyat süresi bakımından iki kapama yönteminde de belirgin bir

farklılık görülmemiştir. Çalışma sonucunda titanyum plâkların ameliyat sonrası hastanede kalış süresini kısalttığı görülmüştür. Yüksek riskli hastalarda titanyum plâk kullanımının erken dönemde çelik tellere göre daha iyi davranış gösterdiği ancak ilerleyen zamanlarda yara komplikasyonlarını önleyemediği ifade edilmiştir.

Lee et al. (2010), geriye dönük bir çalışma olarak Temmuz 2000 – Ekim 2006 tarihleri arasında yüksek risk faktörüne sahip 750 hasta üzerinde titanyum plâk sternal sabitleme yöntemini uygulayarak ağrı, sternal stabilite, enfeksiyon ve plâk göçmesi açısından incelemiştir. Hastalar 6 hafta boyunca takip edilmiştir. Çalışma sonucunda 732 hastada başarılı sonuçlar elde edilirken 18 hastada sternal ayrılmanın gerçekleştiği ve bu hastaların 4'ünde ameliyat sonrası mediastinit geliştiği görülmüştür. Çalışma sonucunda titanyum plâkların, yüksek riskli hastalarda ameliyat sonrası mediastinit gelişiminin önlenmesinde basit, etkili ve güvenilir bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Hirsch et al. (2010), 65 yaşındaki obez bir hastanın sternal sabitlemesinde, orta hattın dışında uygulanan sternotomi sonrasında çift çelik tellerle birlikte sternal talon kullanılmış fakat ameliyattan sonraki beşinci günde sternal ayrılma görüldüğünü belirtmişlerdir. Hasta incelendiğinde sternal talonların ve çelik tellerin yerinden çıktığı tespit edilmiştir. Hastaya titanyum plâklarla ikinci defa sternal kapama yapılmıştır. Yapılan ikinci operasyondan sonra herhangi bir komplikasyon görülmemiş olup sternal stabilitenin sağlandığı belirtilmiştir. Orta hattın dışında uygulanan sternotomilerde, sternumdaki kuvvet dağılımı eşit olmadığından sternal talon kullanımında dikkatli olunması gerektiği vurgulanmıştır.

Fawzy et al. (2011), sternotomi işlemi sonrasında sternal ayrılma ve yara akıntısı görülen 40 hastaya yeniden yapılan sternal sabitlemelerde titanyum plâk (Synthes) kullanmışlardır. Hastaların tümünün sternumlarının manubrium kısmına bir adet, kaburga kısımlarına ise üç adet titanyum plâk uygulanmıştır. Ameliyat sonrası bir hastada kanama görüldüğü, bir hastada seroma geliştiği ve altı hastada yüzeysel yara ayrılması olduğu belirtilmiştir. Bu sayılan komplikasyonların hepsi daha sonra yok olmuştur. 38 hastada sternal iyileşme görülürken iki hastada yara enfeksiyonu tekrar görülmüştür. Bu enfeksiyon görülen hastalara negatif basınçlı yara tedavisi (vac) uygulaması yapılmıştır ve bu uygulama sonucunda hastalar iyileşmiştir. Çalışma

sonucunda sternal ayrılmanın tedavisinde sternal plâkların risksiz, güvenli ve iyi bir seçenek olduğunu ifade edilmiştir.

Hirose et al. (2011), hastaların sternumları üzerine titanyum plâk (SternaLock) ve çelik tel kapama yöntemlerini uygulanıp karşılaştırmışlardır. Çalışma 2009 ile 2010 yılları arasında koroner arter baypas ameliyatı veya kapak (valve) cerrahisi uygulanan hastalardan oluşmuş olup, hastalar R ve C grubu olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Titanyum plâk uygulanan 89 hasta R grubuna, çelik tel uygulanan 133 hasta ise C grubuna dâhil edilmiştir. Sternumun titanyum plâklarla kapatılma ihtimali daha fazla olan hasta tipleri araştırılıp, geleneksel çelik tel yöntemi ile karşılaştırma yapılmıştır. Geleneksel çelik tel uygulamasında 6-8 çelik tel kullanılmıştır. Sternumun manubrium kısmına 2-3 tel, gövde kısmına ise 5-6 tel yerleştirilmiştir. Titanyum plâk uygulamasında, manubriuma iki tel ve en az bir plâk, ksifoid kısmına en az bir tel ve gövde kısmına da en az iki plâk yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda her iki grupta da çok düşük komplikasyonlar görülmüştür. Sadece R grubunda bir hastada sternal enfeksiyon görülüp titanyum plâk çıkarılmıştır. Sternumun stabilitesi sternal enfeksiyona rağmen korunmuştur. Düşük riskli genç erkek hastalarda ve yüksek riskli obez hastalarda titanyum plâkların daha fazla kullanıldığı görülmüştür. Titanyum plâklarla yapılan kapamanın geleneksel çelik tel yöntemine göre daha iyi sternal stabilite sağladığı ve ağrı açısından da daha avantajlı olduğunu ifade edilmiştir.

Price et al. (2012), titanyum plâk ve geleneksel çelik tel kapama yöntemlerini dikkate alarak sternumun mekanik performansını sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle incelemişlerdir. Tasarımda iki farklı model oluşturulmuştur. Hastanın CT taramasına bağlı olarak sternal ayrılmayı hesaplamak, titanyum plâkların ve çelik tellerin etkilerini görmek için global adını verdikleri tüm kemik yüzeyini içeren bir model oluştururken; kemik, plâka ve vidadaki gerilmeleri daha detaylı incelemek için lokal adını verdikleri kemiğin sadece belli bir yüzeyini içeren model oluşturmuşlardır. Yanal ayrılma ve boyuna kesme kuvvetleri uygulanıp orta süngerimsi, arka ve ön kortikal kısımlardaki sternal ayrılmaları ve gerilmeleri analiz etmişlerdir. Öksürük kuvvetini simule etmek için 350 N'luk yanal yük uygulanırken, 11,34 kg kaldırmanın sternum üzerine etkisi incelemek için 175 N'luk rostral-kaudal kesme kuvveti uygulanmıştır. Global modelde geleneksel çelik telde sternal ayrılma titanyum plağa göre 48-75 kat daha fazla

görülmüştür. Tel ve sternum arasındaki gerilmeler düşük temas bölgesi yüzünden tellerde daha fazla olup kemikte daha düşük bir gerilme dağılımı görülmüştür. Lokal modellerde ise vida uzunluğu ve kemik kalitesi önemli ölçüde yük dağılımını ve sternal ayrılmayı etkilemiştir. Uzun vidalardaki sternal ayrılmanın kısa vidalara göre daha az olduğunu görülmüştür. Ayrıca uzun vidalarda kemiğe daha fazla yük aktarıldığı da görülmüştür. SEY sonuçlarına göre yükün birçoğunu üst kortikal kemiğin taşıdığını ve yükün yaklaşık %80'ini X şekilli titanyum plâklardaki iç vidaların taşıdığını belirtmişlerdir. Süngerimsi kemiğin düşük sertliği sebebiyle bu kısımda düşük gerilme seviyeleri görülmüştür. L ve X şekilli plâkalar benzer bir davranış göstermişlerdir.

Casha et al. (2012), çalışmada titanyum plâk ve geleneksel çelik tel kapama yöntemlerini dikkate alarak sternumun mekanik performansını sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle incelemişlerdir. Tasarımda iki farklı model oluşturulmuştur. Hastanın CT taramasına bağlı olarak global adını verdikleri tüm kemik yüzeyini içeren bir model oluşturulurken; kemik, plâka ve vidadaki gerilmeleri daha detaylı incelemek için lokal adını verdikleri kemiğin sadece belli bir yüzeyini içeren model oluşturulmuştur. Global modelde iki X şekilli plâk ve bir L şekilli plâk uygulanmıştır. Bu modelde ilk yükleme durumunda sternumun yarısını sabitleyip diğer yarısına 350 N yanal yük uygulanırken ikinci yükleme durumunda ise 175 N boyuna kesme kuvveti uygulanmıştır. Lokal modelde de aynı yükleme durumu ele alınmıştır. Global modelde, geleneksel çelik tellerde görülen sternal ayrılmanın titanyum plağa göre 48-75 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çalışmada farklı kortikal kalınlık değerleri denenmiş olup kalınlık arttıkça plâktaki gerilme azalmıştır. Vida uzunluğunun sternal ayrılma ve kemik-plâk gerilmeleri üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Titanyum plâklarla denenilen bütün varyasyonlarda sternal yarılar arasındaki ayrılma 0,1 mm' den daha düşük çıkmıştır. Bunun sonucunda titanyum plâkların iyi bir sternal stabilite sağladığı belirtilmiştir.

Schulman et al. (2012), çeşitli hastalıklara sahip yüksek risk faktörlü 28 kişilik bir grup üzerinde, sternum stabilitesini elde etmek için enine titanyum plâkları (Synthes) kullanmışlardır. Hastalar, hastalıklarına göre sınıflandırılıp sonuçlar değerlendirilmiştir. Morbid obez 3 hastaya plâk sabitlemesi uygulanmıştır. 1 hastada iyileşme sağlanırken, 1 hastada küçük bir yara ayrılmasından kaynaklı vakum yardımıyla kapatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Diğer hastada ise iki derin küçük apse

yüzünden ameliyattan bir sene sonra plâkların birisi çıkarılmıştır. Operasyondan 48 saat sonra hematoma gelişen beş hastadan birine müdahale işlemi pimlerin açılıp kapanması sayesinde kolay bir şekilde gerçekleştirilip, sternum tekrar sıkıntısız bir şekilde kapatılmıştır. Atletik hasta diye sınıflandırdıkları altmış yaşından küçük sporla aktif dört hasta 72 saat içerisinde taburcu edilmiştir. 28 hasta üzerindeki çalışmalara bağlı olarak bu sistemin mortaliteyi ve hastanede kalış süresini azalttığı ifade edilmiştir.

Raman et al. (2012a), sternotomiden sonra hastaların sternumlarını titanyum plâk (SternaLock) veya geleneksel çelik tel ile sabitleyip karşılaştırmışlardır. 140 hasta üzerinde yapılan çalışma sonucunda plâk kullanılan sternumlarda operasyon sonrası dönemde daha az ağrı ve daha erken iyileşme görüldüğü belirtilmiştir. Plâk ve vidalarla sabitlemenin kemik iyileşmesini geliştirdiği ve ağrıyı önemli ölçüde azalttığı ifade edilmiştir.

Raman et al. (2012b), sternal yara komplikasyonları bakımından risk altında olduğu belirlenen 140 hastanın sternumlarını geleneksel tel ve titanyum plâk ile sabitleyip karşılaştırmışlardır. 70 hastaya çelik tel uygulanırken 70 hastaya da titanyum plâk uygulanmıştır. Bilgisayarlı tomografiyle operasyon sonrasında 3. ve 6. aylarında hastaların sternal iyileşme süreci takip edilmiştir. Çalışma sonucunda titanyum plâk kullanılan hastaların hem 3. ayda hem de 6. ayda sternum iyileşmesinin daha iyi olduğu belirlenmiştir. 6. ayda titanyum plâk kullanılan hastaların %70'inde sternum kaynaması görülürken, bu oran tel uygulanan hastalarda %24'tür. Her iki grupta da komplikasyonlar arasında önemli bir fark görülmemiştir. Plâk kullanımını tel ile karşılaştırdıklarında kemik iyileşmesinin daha üstün olduğunu ve ameliyat sonrası ağrıyı azalttığını ifade etmişlerdir.

Arnoni et al. (2013), yeni geliştirilen çeşitli şekillerdeki titanyum plâkların sternal kapama üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak plâk modelleri statik eğilme testi, vidalar ise statik sertlik testi ile test edilmiştir. Plâklar, daha sonra kadavra üzerinde de test edildikten sonra koroner arter hastalığı olan on kişiye uygulanmıştır. Hastalar altı ay boyunca göğüs röntgeni ile takip edilmiş olup, takip sonucunda iyi sonuçlar alınmıştır. Kapatmayla alakalı sadece bir hastada yara açılması görülüp cerrahi müdahale gerekmiştir. Diğer hastalarda herhangi bir problem

görülmemiştir. Yapılan testler ve uygulamalar sonucunda Engimplan implantlarının kullanımının sternal kapamada etkili ve güvenli olduğu belirtilmiştir.

Elfström and Grunditz (2013), beş farklı sternum sabitleme yöntemini (4 ZipFix bant, 6 çelik tel, 3 talon, 3 talon + 1 tel, 4 ZipFix bant + 1 tel) ANSYS programında yapılan sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırmışlardır. Programda malzemeler doğrusal-elastik modellenip, sternum üzerine 800 N yanal çekme kuvveti uygulanmıştır. Sternumda oluşan yer değiştirme ve gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Sabitleme tekniklerinin tümünün malzeme özelliklerini titanyum, çelik (316L) ve PEEK olarak değiştirip, sabitleme malzemelerinin farklı bir malzemeden üretilmesi durumunda nasıl bir etki oluşturacağı incelenmiştir. Çalışma sonucunda malzeme özelliği titanyum olan ZipFix bant ve geleneksel çelik tel sabitleme yönteminin en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir.

Casha et al. (2014), sternotomi ayrılmasının nasıl oluştuğunu incelemek ve bu ayrılmayı önlemek için sonlu elemanlar analizi tekniklerini kullanarak göğüs duvarının bilgisayar modellemesi üzerine çalışmışlardır. Rastgele seçilmiş sekiz yetişkin erkeğin bilgisayarlı tomografi (CT) görüntüleri dikkate alınarak ortalama göğüs kafesi ölçüleri belirlenip elipsoid adı verilen bir FEA modeli oluşturulmuştur. Ayrıca kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) olan insanları temsil eden başka bir model daha oluşturulmuştur. Daha önce çalıştıkları farklı iki modeli göğüs duvarı modelini de bu iki modele dâhil edip karşılaştırma yapılmıştır. En iyi davranışın, oluşturulan elipsoid modelinden elde edildiğini belirtmişlerdir. Elipsoid modelde 40 kPa'lık öksürük basıncında sternuma etki eden yanal kuvvetin 660 N, dönme momentinin 92 Nm olduğu, KOAH hastalığını temsil eden modelde ise öksürük kuvvetinin 827 N, dönme momentinin ise 118 Nm olduğu belirlenmiştir. Altı çelik telle yapılan geleneksel kapamada sternumun üst kısmının dönerek ayrılması için gerekli dönme momentinin 84 Nm olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca modelde sternumun alt ucuna ekstra tel eklenmesi sternal kapamayı açması için gereken dönme momentini 107 Nm'ye çıkarırken, sternumun alt ucuna sekizinci telin eklenmesi momenti 127 Nm'ye çıkarmıştır. Göğüs duvarının analiz modellerinde sternumun alt ucuna bir veya iki tel eklenmesi sayesinde daha başarılı sonuçlar alınabileceği belirtilmiştir.

Nishimura et al. (2014), çalışmada SternaLock titanyum sternum sabitleme plâklarının yaşlı hastalarda güvenli bir şekilde kullanılıp kullanılmayacağını incelemişlerdir. Araştırma grubundaki 30 yaşlı hastayı 2 gruba ayırmışlardır. İlk grubun sternumları beş veya altı titanyum tel ile sabitlenirken ikinci grubun sternumları SternaLock kapama plâklarıyla sabitlenmiştir. SternaLock plâklarını sabitlemede vidalara uygulanan kuvvetin, tel yönteminde uygulanan kuvvetin yarısına kadar düşebildiğini belirtmişlerdir. Bu yüzden de kemiğin kırılğan olduğu yaşlı hastalarda plâk kullanımının faydalı olabileceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, cerrahın teli farklı şekillerde sıkacağı tekniklerinde mevcut olduğu ve bu yüzden tel ile plâk kapama yöntemleri arasında karşılaştırma yapmanın zor olduğu belirtilmiştir.

Nazerali et al. (2014), Ocak 2006 ile Aralık 2012 tarihleri arasında 57 hasta üzerinde yapılan çalışmada Talon, Lactosorb, titanyum plâk (SternaLock) ve nitinol klips sternum sabitleme yöntemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Operasyon sonrasında hastaların hiçbirinde mediyastinit görülmediği belirtilmiştir. Kemikte ise stabilite ve iyileşmenin sağlandığı görülmüştür. Kullanılan bu dört sternum sabitleme yönteminin, yüksek riskli hastalarda mediyastinit oluşumunun önlenmesinde ve yanlış kemik kaynaması tedavilerinde güvenle uygulanabileceği ifade edilmiştir.

Roughton et al. (2015), mediyastinit sonrasında mediyastinit tanısı konan 18 yaşından küçük 25 hastaya titanyum plâk uygulayıp, etkilerini araştırmışlardır. 1 yaşın altındaki çocuklarda emilebilir bir ağ plâkası kullanılmış ve çelik tel ve titanyum vidalarla bu ağ plâkası sternuma sabitlenmiştir. 1-9 yaş aralığında olan hastalara Lactosorb plâkaları kullanılmış olup sternum kemiği daha büyük olan çocuklarda ise titanyum plâklar uygulanmıştır. Hastaların hiçbirinde mediyastinit kaynaklı ölüm görülmediği, bir hastanın takipten çıktığı, üç hastanın kapama öncesi kalp rahatsızlıkları yüzünden ve bir hastanın da kapama sonrasında farklı sebeplerden öldüğü belirtilmiştir. Uygulanan yöntemlerin hastaların yaşamlarına olumsuz bir etkisi olduğu görülmemiş olup titanyum plâkların güvenle uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Elghonemy and Hussein (2016), koroner arter bypass ameliyatı sonrası sternumun sabitlenmesinde hastalara titanyum plâk ve çelik tel uygulayıp, etkilerini incelemişlerdir. Hastalar A ve B olmak üzere iki gruba ayrılıp sırasıyla 15 hastaya

titanyum plâk, 15 hastaya da çelik tel uygulanmıştır. Hastalar üzerinde yapılan altı aylık incelemeler sonucunda A grubunda ilk başlarda daha az ağrı görülmesine rağmen 6. ayın sonunda iki grup arasında anlamlı bir farklılık görülmemiştir. Hastanede kalış süresinin iki grupta da hemen hemen aynı olduğu belirtilmiştir. Çalışmada titanyum plâkların, koroner arter bypass ameliyatı sonrasında giderek sık görülen bir sternum kapama yöntemi olduğu belirtilmiştir. Bu yöntemin güvenli, tekrar müdahale gerektiren durumlarda açılmasının basit ve ameliyat sonrasında daha az bir ağrı sürecinin olduğu ifade edilmiştir.

Orhan et al. (2017a), çalışmada yapay sternum kemiği kullanarak 4 farklı sternum kapama tekniğinin (geleneksel tel, 3 çelik bant + 2 çelik tel, 3 ZipFix bant + 4 çelik tel, 3 figure-8 + 2 çelik tel) etkinliğini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Deneylerde, yapay kemiğin boyuna kesme, enine kesme ve yanal ayrılma olmak üzere 3 farklı statik yükleme etkisi altındaki etkinliği incelenmiştir. Yapay sternum kemiklerinin üzerine kaburga kısımlarından delikler açılıp yükleme cihazının çenelerine vidalayarak sabitleyip yükleme yapılmıştır. Yükleme cihazından alınan veriler doğrultusunda yük-deplasman eğrilerini çizdirip karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan deneylerde yanal ayrılmada en iyi sonucu çelik bantlar verirken, boyuna ve enine kesmede en iyi sonuç ZipFix yönteminden elde edilmiştir. Çalışma sonucunda 4 farklı kapama yöntemi arasında önemli bir farklılık görülmediği fakat uygulama kolaylığı ve maliyeti dikkate alındığında geleneksel tel yönteminin daha avantajlı gözüktüğü, maliyet dikkate alınmadığında ise telin kırılması ve telin kemiği kesmesini engellemek için çelik bant yönteminin iyi bir seçenek olduğu belirtilmiştir.

Grapow et al. (2017), çalışma kapsamında Ocak 2007 ile Aralık 2011 yılları arasında derin sternal yarası olan hastalara sternal plâk (TSFS) ve kas flebi (MFC) tekniklerini uygulamış ve bu teknikleri karşılaştırmışlardır. 20 hastaya tedavi için TSFS uygulanırken 22 hastaya da MFC uygulanmıştır. Ameliyat ve hastanede kalış süresi bakımından TSFS ile tedavinin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca ölüm oranının daha düşük olduğu ve yeniden müdahaleye daha az ihtiyaç duyduklarını ifade etmişlerdir. Göğüs stabilitesi bakımından TSFS yönteminin iyi sonuç verdiği, rahat nefes alma olanağı ve daha az göğüs ağrısı bakımından ise MFC yönteminin daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Avtaar Singh et al. (2017), diyabetik bir hastanın sternal kapamasında ilk olarak Robicsek tekniğini kullanmışlardır. Hasta, yatağında döndüğü zaman sternumunda ses ve hareket farketmiş ayrıca nesneleri kaldırmada sıkıntılar yaşamıştır. Yapılan tetkiklerde sternumun yanlış kaynakıldığı görülmüş ve hasta tekrar operasyona alınıp sternal teller çıkarılıp yerine titanyum plâklarla sabitleme yapılmıştır. Hastanın operasyon sonrası 6 hafta ve 1 yıllık takip süresinde herhangi bir ağrı gözlemlenmediği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda plâkların sternal kaynama tedavisinde uygulanabilecek bir yöntem olduğu ifade edilmiştir.

Orhan et al. (2017b), çalışmada yapay sternum kemiği kullanarak 4 farklı sternum kapama tekniğinin etkinliğini deneysel olarak karşılaştırmışlardır. 4 farklı sternum kapama yöntemi olarak çelik tel, çelik kablo, 3 titanyum klips + 4 çelik tel, 2 titanyum plâk + 3 çelik tel birlikte uygulanmıştır. Deneylerde yapay kemiğin boyuna kesme, enine kesme ve yanal ayrılma olmak üzere 3 farklı statik yükleme etkisi altındaki etkinliğini incelenmiştir. Yapay sternum kemiklerinin üzerine kaburga kısımlarından delikler açılıp yükleme cihazının çenelerine vidalayarak sabitleyip yükleme yapılmıştır. Her bir kapama tekniği ve yükleme çeşidi için üç test gerçekleştirmişlerdir. Yükleme cihazından alınan veriler doğrultusunda yük-deplasman eğrilerini çizdirip karşılaştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, yanal ayrılmada en iyi kapamanın titanyum klipslerden, boyuna kesmede titanyum plâklardan, enine kesmede ise titanyum klipslerden elde edildiği ifade edilmiştir. Genel olarak deney sonuçları değerlendirildiğinde ise titanyum klipslerin diğer yöntemlere göre daha iyi davranış sergilediği belirtilmiştir.

Park et al. (2017), çalışmada sternumun sabitlenmesinde kullanılan titanyum plâk sistemiyle geleneksel tel yöntemini yüksek riskli hastalarda bakım maliyeti açısından karşılaştırmışlardır. Yüksek riskli hastaların sternal kapamalarında titanyum plâk sisteminin geleneksel tel yöntemine göre daha faydalı olduğu söylenmiştir. Titanyum plâk sistemi geleneksel tel yöntemine göre daha maliyetli olmasına rağmen titanyum plâk kullanılan hastalarda operasyon sonrasında görülen komplikasyonlar daha azdır. Bu nedenle genele bakıldığında plâkların daha düşük bakım maliyeti oluşturduğu ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda yüksek riskli hastaların tedavisinde titanyum plâk sabitleme tekniğinin düşünülmesi gerektiği belirtilmiştir.

Voss et al. (2018), 34 hastaya 2005 ile 2011 yılları arasında titanyum plâk sternal sabitleme sistemini uygulamışlardır. Sternal kırık hattına veya tam sternal ayrılmaya bağlı olarak çapraz, uzunlamasına, enine, köşeli, yıldız veya H şekilli titanyum plâklar uygulanmıştır. Çalışma sonucunda sadece enine titanyum plâk uygulanan bir hastada plâk kırığı tespit edilmiştir. Göğüs duvarının stabilitesi incelendiğinde ise bütün hastalarda sternum stabilitesinin sağlandığı belirlenmiştir. 6 hastada yara enfeksiyonu görülmüş olup bu enfeksiyonları iyileştirmek için çeşitli tedavi yöntemleri denemişlerdir. Sternal ağrı bakımından ise hastaların 16'sında hiç ağrı olmamış, 9'unda az şiddetli ağrı, 3 hastada orta şiddetli ağrı, 5 hastada ise şiddetli ağrı görülmüş olup hiçbir hastada aşırı şiddetli bir ağrı görülmediği ifade edilmiştir. 8 hastada ortalama 331 günden sonra görülen kalıcı ağrıdan dolayı, uygulanan plâk sistemi çıkarılmıştır. 3 hastada plâk çıktıktan sonra herhangi bir ağrı gözlemlenmezken, 5 hastanın rahatsızlığının devam ettiği bildirilmiştir. 3 hastada enine kullanılan uzun titanyum plâklarda vida gevşeme gözlemlenmiştir. Bu 3 hastanın 2'sinde plâk sistemi çıkarıldıktan sonra ağrı görülmediği bu yüzden de enine kullanılan uzun titanyum plâkları daha kısa kullanmaya çalıştıklarını belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda, geleneksel tel yönteminin uygun olmadığı yüksek riskli hastalarda sternal plâk sabitleme sisteminin kullanılması önerilmiştir.

Liao et al. (2019), kalp cerrahisinde kullanılan mediyan sternotomi yöntemi sonrasında morbid obez hastalarda sternal ayrılma riskinin çok daha fazla olduğunu belirtmiş ve bu riskli duruma çözüm bulmak için bu hastalarda enine sternal plâk sabitleme yöntemini kullanıp, etkilerini incelemişlerdir. Vücut kitle endeksi 35kg/m^2 ' den büyük olan 14 hastanın sternumuna figüre-8 şeklinde paslanmaz çelik teller ile kapama uygulanıp kemiğin ksifoid kısmına titanyum sternal plâk yerleştirilmiştir. Kıyaslama yapmak için yine vücut kitle endeksi 35kg/m^2 ' den büyük olan 14 hastanın sternumuna figüre-8 şeklinde paslanmaz çelik teller ile kapama uygulanmıştır. Ayrıca yapılan bütün operasyonların aynı cerrah tarafından yapıldığını da belirtmişlerdir. Tüm hasta gruplarında sternal stabilitenin sağlandığı, sadece geleneksel tel uygulanan bir hastada sternal ayrılmanın gerçekleştiği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda sternal plâk takviyesinin sternumun kaynamasını ve stabilitesini sağladığını, morbid obez hastalar için uygun bir seçenek olduğunu ifade etmişlerdir.

Tugulan et al. (2020), çalışmada morbid obez hastalarda sternotomi sonrasında titanyum plâk ve geleneksel tel sabitleme tekniklerinin operasyon sonrasındaki komplikasyon oranını incelemişlerdir. Temmuz 2014 ile Temmuz 2017 tarihleri arasında 564 hastaya mediyan sternotomi uygulanmıştır. 380 hastanın vücut kitle endeksinin 35kg/m^2 ' den küçük, 184 hastanın ise vücut kitle endeksinin 35kg/m^2 ' den büyük olduğu belirtilmiştir. Vücut kitle endeksi 35kg/m^2 ' den büyük 184 hastanın 58'ine X şekilli titanyum plâk, 126'sına geleneksel çelik tel yöntemi uygulanmıştır. Ortalama hastanede kalış süresi plâklı grupta sekiz gün iken tel grubunda on iki gündür. Operasyon sonrası plâklı grupta üç ölüm, tel grubunda ise altı ölüm görülmüştür. Toplam sternal komplikasyon oranının %4,9 (9/184) olduğu belirtilmiştir. Sternal komplikasyonların altısı tel grubunda, üçü ise plâklı grupta meydana gelmiştir. Çalışma sonucunda vücut kitle endeksi 35kg/m^2 ' den büyük olan hastalarda sternal komplikasyon açısından sabitleme teknikleri arasında önemli ölçüde bir farklılık görülmediği belirtilmiştir.

Al-Abassi et al. (2022), çalışmada biyo-aktif yapıştırıcılar kullanarak yapılan sternal kapamanın sonlu eleman modellemesini ve biyomekanik çalışmaların gözden geçirilmesini amaçlamışlardır. Çalışmada üç boyutlu sternal sabitleme modellerinin fiziksel davranışını, sonlu elemanlar analizi ile incelemenin klinik deneyleri yürütme masrafını azaltacağı belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak deneylerde kullanılan sternum modelleri, sabitleme teknikleri ve deneylerin yapılış aşamaları hakkında bilgi verilip daha sonra deneylerden elde edilen değerler referans alınarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi analizleri detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

3.1. Deneylerde Kullanılan Sternum Modelleri ve Sabitleme Malzemeleri

Sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde sabitleme yöntemlerinin gerçek davranışlarının yansıtılabilmesi ve sınır şartlarının doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için öncelikle deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları nümerik analizlerle karşılaştırılmıştır.

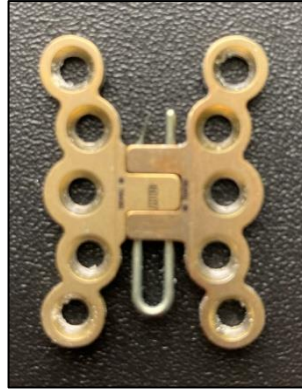
Sternum sabitleme tekniklerinin incelendiği biyomekanik çalışmalarda, hayvan ve insan kadavralarından elde edilen sternum modelleri dışında poliüretandan yapılan sternum modelleri de kullanılmaktadır (Dieselman 2011). Trumble et al. (2002) tarafından yapılan araştırmada, poliüretandan yapılmış yoğunluğu 320 kg/m^3 olan yapay sternum modelleri ile kadavralardan alınan sternumlar üzerine figür-8 ve geleneksel çelik tel yöntemleri uygulanmış ve sternumların üzerinde oluşan yer değiştirmeler karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda poliüretandan yapılmış yapay sternumun, deneysel çalışmalarda kullanımının uygun olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada yapılan deneylerde, poliüretandan yapılmış ve yoğunluğu 320 kg/m^3 olan Sawbones (Pacific Research Laboratories, Vashon, WA, USA) firması tarafından üretilen yapay sternum modelleri kullanılmıştır. Toplam 6 adet yapay sternum modeline mediyan sternotomi prosedürü uygulanıp, sternum modelleri titanyum plâk montajına hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Mediyen sternotomi prosedürü uygulanan poliüretan sternum modeli

Piyasada sternumun sabitlemesinde kullanılan çeşitli boyut ve şekillerde üretilen birçok titanyum plâk bulunmaktadır. Deneylerde Synthes (MTF/Synthes CMF, West Chester, PA, USA) firması tarafından üretilen X-şekilli titanyum plâklar tercih edilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. X-şekilli titanyum plâk

Mediyen sternotomi prosedürü uygulanan sternum modelleri üzerine üç adet X-şekilli titanyum plâk uygulanmıştır. Şekil 3.3’de gösterildiği gibi ilk plâk sternumun manubrium bölgesine, ikinci plâk üçüncü kaburga boşluğunu tam ortalayacak şekilde sternumun gövde kısmına, üçüncü plâk ise sternumun ksifoid bölgesine yerleştirilip 3 mm çapındaki titanyum vidalar kullanılarak kemiğe sabitlenmiştir. Sabitlemede birinci ve üçüncü plâkta altı, ikinci plâkta dört vida kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Üç tane X-şekilli titanyum plâk kullanılarak sternumun sabitlenmesi

Çalışmada yapılan deneylerde, literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak statik olarak yanıl ayrılma ve boyuna kesme etkisi olmak üzere modellerin iki farklı yükleme etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Deneylerde istenilen şekilde yüklemeleri yapabilmek için özel olarak tasarlanıp yaptırılan yükleme cihazına uyumlu çelik parçalar kullanılmıştır.

Sternum modellerinin çelik parçalara sabitlenmesi için literatürde yapılan çalışmaların (Losanoff et al. 2004; Pai et al. 2007; Dieselman 2011; Orhan 2016) çoğunda da kullanılan vidalarla sabitleme yöntemi kullanılmıştır. Sternum modellerinin kaburga çıkıntılarına, uç kısımlarından 1 cm mesafe olacak şekilde 3 mm çapında 7'si sağ 7'si sol olmak üzere 14 delik açılıp, yükleme çenelerine sabitlenip, deneye hazır hale getirilmiştir.

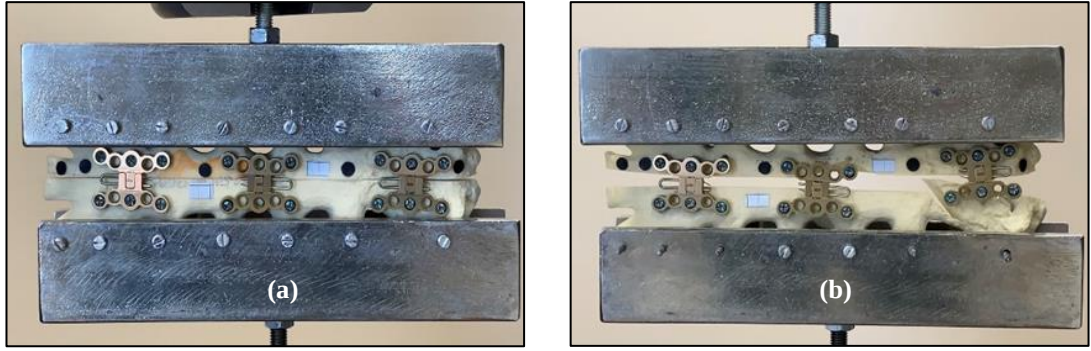
3.2. Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Deney aletinin yükleme hızının belirlenmesinde literatür çalışmaları dikkate alınmıştır. Zeitani et al. (2006) ve Zeitani et al. (2008) tarafından poliüretan modeller üzerinde yapılan yanıl ayrılma deneylerinde 2 mm/dk, Pai et al. (2005) ve Pai et al.

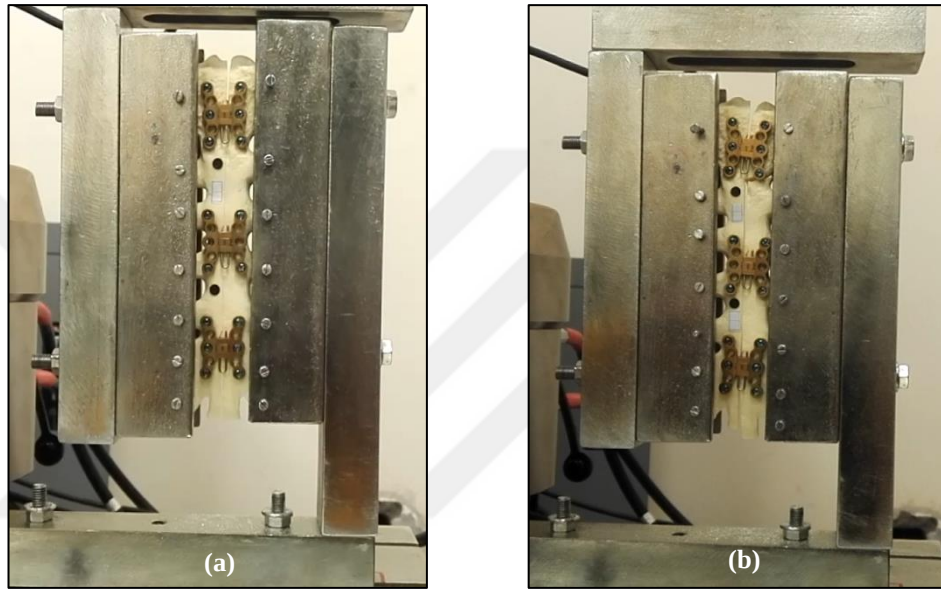
(2007) tarafından poliüretan modeller üzerinde yapılan yanal ayrılma deneylerinde 12,6 mm/dk yükleme hızı kullanılmıştır. Cohen and Griffin (2002) ve Orhan (2016) tarafından yapılan poliüretan modeller üzerindeki çalışmada ise üç farklı yükleme etkisi (enine kesme, boyuna kesme, yanal ayrılma) altında yükleme hızı 10 mm/dk alınmıştır. Yapılan çalışmanın literatürle karşılaştırılabilir olabilmesi için iki farklı yükleme etkisi (boyuna kesme ve yanal ayrılma) altında yükleme hızı 10 mm/dk olarak alınmıştır.

Deneyler için titanyum plâklarla sabitlenmiş toplam 6 adet sternum modeli hazırlanmıştır. Deneylerin tümü Instron-5982 (Instron Company, MA, Norwood, USA) deney cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk önce yanal ayrılma deneyleri daha sonra boyuna kesme deneyleri yapılmıştır. Her bir yükleme durumu için deneyler üçer defa tekrar edilmiştir.

Yanal ayrılma deneylerinde, istenilen yüklemelerin yapılabilmesi için Şekil 3.4'de gösterilen özel olarak tasarlanıp yaptırılan çelik parçalar deney aletine sabitlenmiştir. Boyuna kesme deneylerinde ise, yüklemenin kemik modelinin tam orta hattının üzerinde gerçekleştirebilmesi için Şekil 3.5'de gösterilen özel olarak yaptırılmış olan L şeklindeki parçalar kullanılıp deney aletine sabitlenmiştir. Daha sonra titanyum plâklarla sabitlenen sternum modeli yükleme çenelerine vidalanarak sabitlenmiştir. Deney aletinin yükleme hızı 10 mm/dk olarak ayarlandıktan sonra yer değiştirmelerin görüntü işlemeyle hesaplanabilmesi için bir kamera kullanılarak deneyler kayıt altına alınmıştır. Deneylere, modeller kırılıp yük boşalınca kadar devam edilmiştir. Deneyler sonlandıktan sonra deney aletinden yük-yer değiştirme verileri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.4. Yanal ayrılma deneyi; (a) Deney öncesi, (b) Deney sonrası



Şekil 3.5. Boyuna kesme deneyi; (a) Deney öncesi, (b) Deney sonrası

3.3. Yer Değıştirmelerin Görüntü İşleme ile Belirlenmesi

Yapılan deneyler sonucunda deney aletinden alınan verilerin dışında görüntü işleme yöntemi de kemik modelleri üzerindeki yer değıştirmelerin belirlenebilmesi için kullanılmıştır. Bu amaçla, kemik modelleri üzerine 5,5 mm çapında siyah kartondan kesilen dört daire sternumun manubrium ve ksifoid bölgelerine bir, gövde kısmına ise iki adet olacak şekilde yerleştirilip yapıştırılmıştır. Yer değıştirmeler piksel olarak belirlendiğinden, milimetreye dönüştürülebilmesi için kemik modelleri üzerine bir de milimetrik kâğıt yapıştırılmıştır. Çalışmada ilk olarak MATLAB programında özel bir kod kullanılarak deney videolarından bir saniyede iki görüntü olacak şekilde deney fotoğrafları alınmıştır. Deney fotoğrafları alındıktan sonra görüntü işleme yönteminde Orhan (2016) tarafından oluşturulan MATLAB kodu kullanılmıştır. Oluşturulan bu kod

bir fotoğrafta belirlenen bir çap aralığındaki daireleri tespit edip koordinatlarını hesaplamaktadır. Bu işlem deneylerden elde edilen fotoğrafların tümü için sırayla yapılmaktadır böylece yer değiştirmeler dairelerin koordinatlarındaki değişimlerden belirlenmektedir.

3.4. Gerçekleme Çalışması

Literatürde sabitleme yöntemleriyle ilgili gerçekleştirilen deneylerde, yöntemler arasında karşılaştırma yapılırken göçme yükü değerleri (Zeitani et al. 2006; Zeitani et al. 2008; Dieselman 2011), bir kuvvete karşılık gelen yer değiştirme değerleri (Dasika et al. 2003; Pai et al. 2005; Pai et al. 2007) veya belirli bir yer değiştirmeye (2 mm) karşılık gelen yük miktarı değerleri (McGregor et al. 1999; Trumble et al. 2002) kullanılmıştır.

Dasika et al. (2003) tarafından yapılan çalışmada sternal kapamalarda manubriumun sternumun en stabil kısmı olduğu, ksifoidin ise en hassas kısmı olduğu ifade edilmiştir. Fedak et al. (2010) ve Fedak et al. (2011) tarafından yapılan çalışmalarda ise sternal yer değiştirmenin 2 mm'yi aşması durumunda çeşitli komplikasyonların oluşabildiği belirtilmiştir.

Yukarıda açıklanan çalışmalar dikkate alınarak bu çalışmada, 3 X-şekilli plâkla yapılan sternal kapamanın deneyleri yapıldıktan sonra görüntü işleme yöntemi ile sternumun kesi hattında 2 mm yer değiştirmeye neden olan kuvvet ve direngenlik değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen titanyum plâk deneyleriyle birlikte, Orhan (2016) tarafından yapılan geleneksel çelik tel ve tek titanyum plâk deneylerinden elde edilen sonuçlar ANSYS Workbench programında gerçekleştirilen elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi analizlerinin sınır şartlarını belirlemede kullanılmıştır.

3.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri

Sternumun sabitlenmesinde kullanılan tekniklerin karşılaştırılması ve mekanik davranışlarının incelenmesi için literatürde yapılan çalışmaların çoğu klinik ve deneysel olup, sayısal (bilgisayar modeli) çalışmalar oldukça az sayıdadır. Deneylerde; farklı

yüklemeler şekillerinin uygulanması, farklı sabitleme malzemelerinin birlikte kullanılması ve oldukça fazla sternum kullanılması gibi sebepler dikkate alınıp maliyet açısından değerlendirildiğinde oldukça zorlayıcı olmaktadır. Bu sebeple, deneysel çalışmalar dikkate alınarak sabitleme yöntemlerinin gerçek özelliklerini ve davranışlarını yansıtabilecek şekilde modellerin oluşturulması ve sayısal analizlerinin gerçekleştirilmesi sabitleme yöntemlerinin karşılaştırılmasını ve incelenmesini kolaylaştıracaktır.

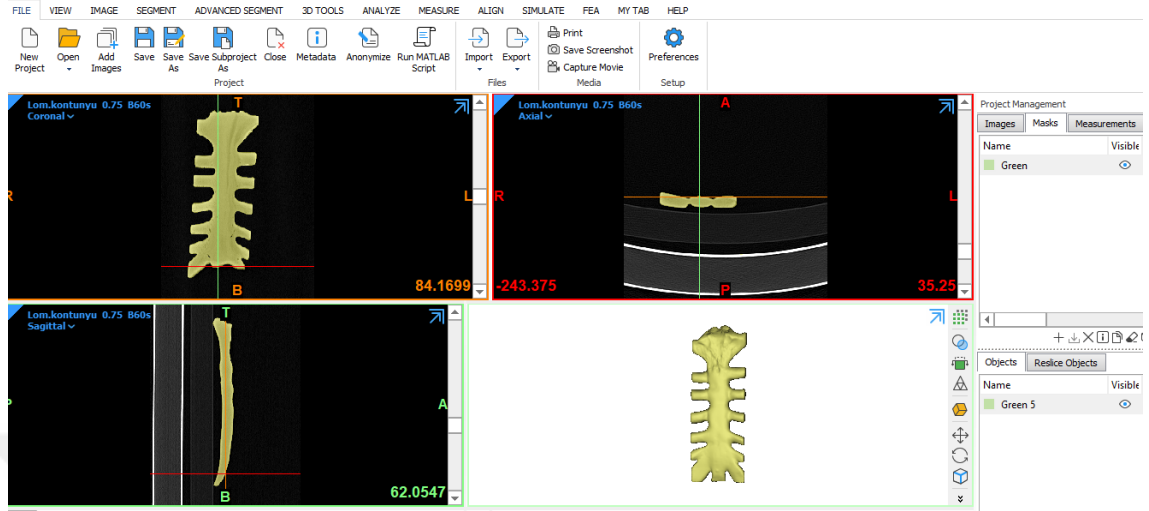
Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen sayısal analiz simülasyonlarının ve gerçek testlerin birbirleriyle uyumlu olması gerekmektedir. Sabitleme tekniklerinin gerçek özelliklerini ve davranışlarını yansıtabilecek şekilde doğru sayısal analiz modellerinin oluşturulabilmesi için deneylerde incelenen üç titanyum plâk sabitleme yönteminin sayısal modeli oluşturularak analizi gerçekleştirilmiştir. Orhan (2016) tarafından deneyleri gerçekleştirilen geleneksel çelik tel ve tek titanyum plâk sabitleme yöntemlerinin de sayısal modelleri oluşturularak analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda deneysel çalışma verilerine yakın sonuçlar elde edilmiş ve böylece analizlerde kullanılacak sınır şartları belirlenmiştir. Çalışmada daha sonra X- şekilli, yıldız şekilli ve düz şekilli titanyum plâklar modellenip çelik teller de kullanılarak çeşitli yerleşim konfigürasyonları oluşturulup, belirlenen sınır şartları altında sonlu elemanlar yöntemi analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan analizler ANSYS Workbench 2020.R2 (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) programının Static Structural modülünde gerçekleştirilmiştir.

3.6. Sabitleme Tekniklerinin Bilgisayar Modellerinin Oluşturulması

Sabitleme tekniklerinin bilgisayar modellerinin oluşturulabilmesi için ilk olarak, deneylerde kullanılan poliüretandan yapılmış yapay sternum modelinin 0,1 mm aralıklı bilgisayarlı tomografi (CT) görüntüleri çekilmiştir. Bilgisayarlı tomografiden alınan DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) formatındaki 300 kesitten oluşan görüntüler MIMICS 21.0 (Materialise, Leuven, Belgium) programı ile 3B katı bir model haline getirilmiştir. Kesit görüntüleri MIMICS 21.0 programına aktarıldıktan sonra ilk olarak kemik yüzeyi dışındaki gereksiz yüzeyler temizlenmiştir. Gereksiz

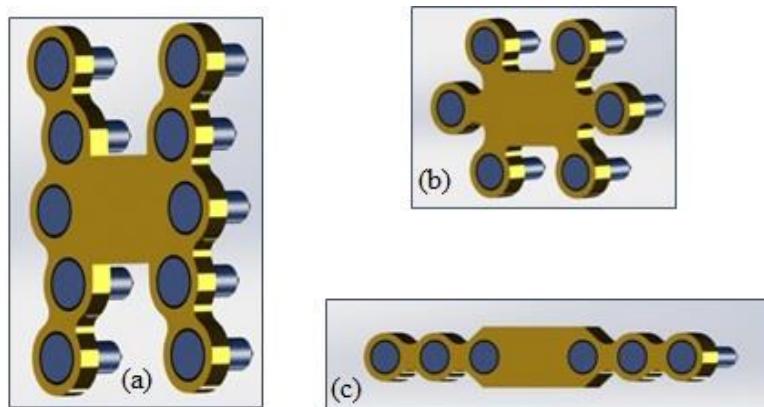
3. MATERYAL ve YÖNTEM

yüzeyler temizlendikten sonra kemik geometrisindeki boşluklar ve yüzey kusurları düzeltilmiştir böylece analizler için 3B model hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Sternumun 3B modelinin MIMICS programında oluşturulması

Üç boyutlu kemik modeli, MIMICS programından .stl formatında alınarak SOLIDWORKS 2019 (SolidWorks Corp., MA, USA) programına aktarılmıştır. Sabitleme tekniklerinin modellenmesi ve sternuma montajlanması işlemleri SOLIDWORKS programında gerçekleştirilmiştir. Titanyum plâklar ve vidalar, hassas dijital ölçüm cetveli ile boyutları belirlendikten sonra Şekil 3.7’de gösterildiği gibi modellenmiştir.



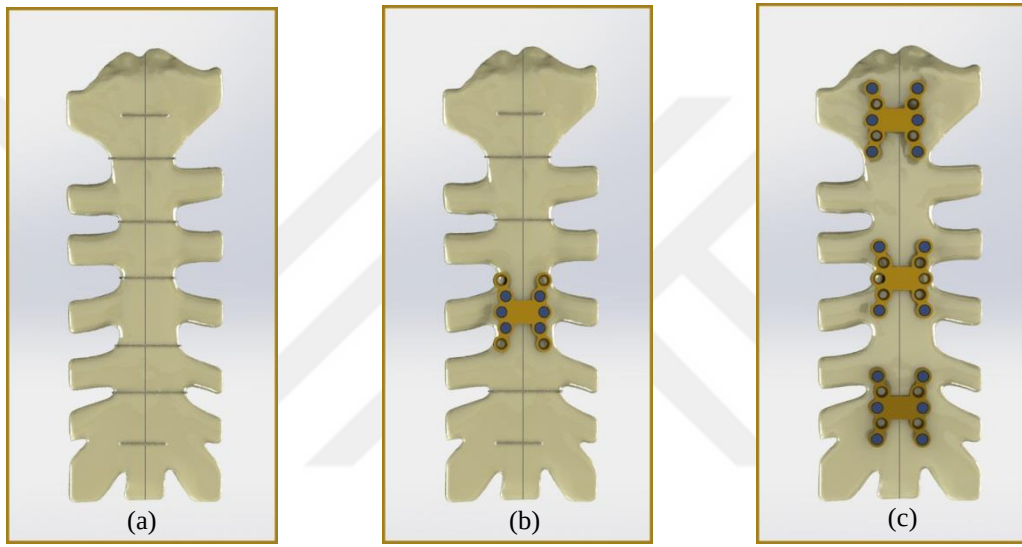
Şekil 3.7. Analizlerde kullanılan plak tipleri; (a) X- şekilli, (b) Yıldız şekilli, (c) Düz şekilli.

Çelik teller, çapları 0,787 mm ve kemiğin yüzey geometrisini saracak şekilde Şekil 3.8’de gösterildiği gibi modellenmiştir.



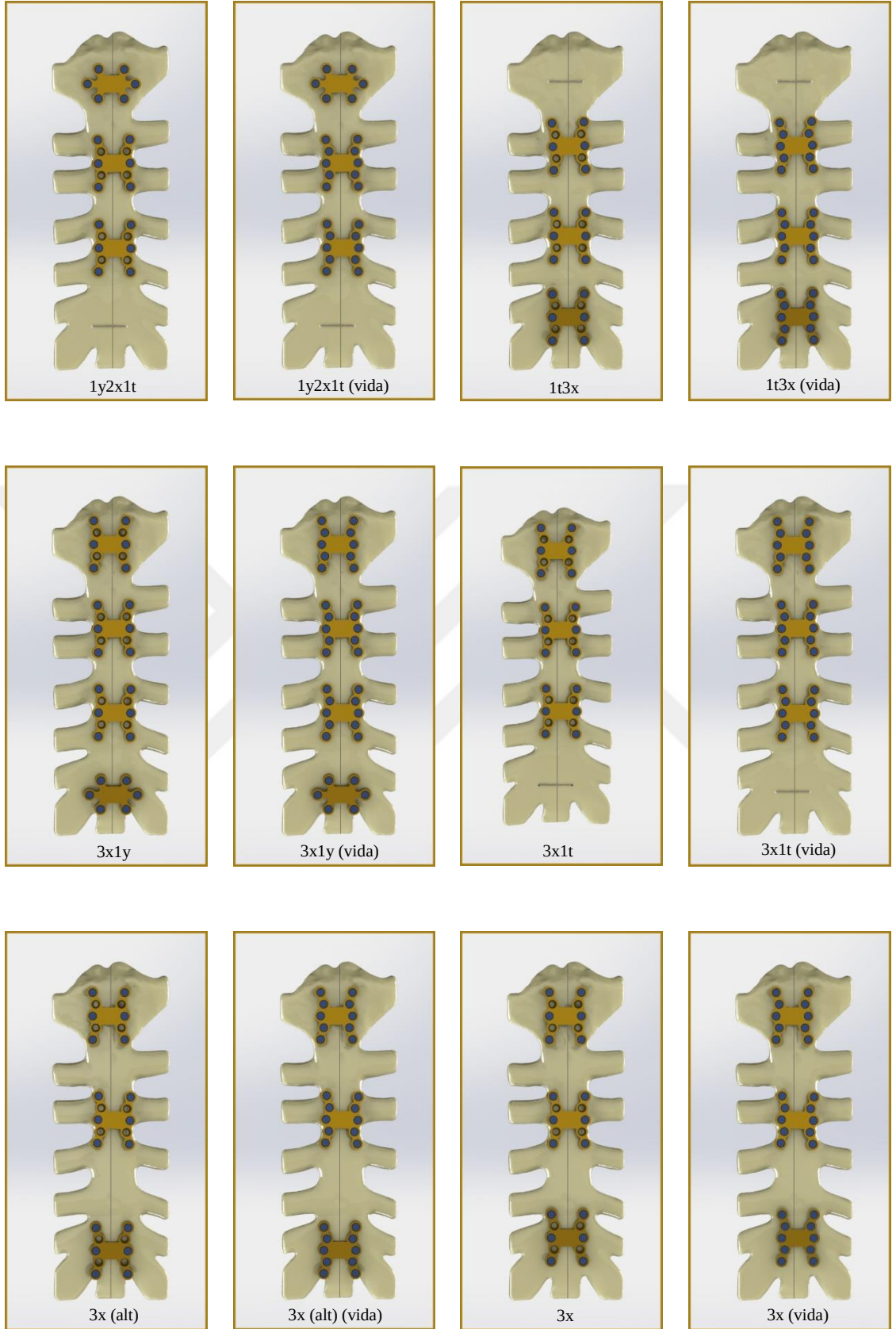
Şekil 3.8. Çelik tellerin 3B modelinin oluşturulmuş hali

Deneyleri gerçekleştirilen üç farklı sabitleme konfigürasyonu (geleneksel çelik tel, tek titanyum plâk ve üç titanyum plâk) Şekil 3.9’da gösterildiği gibi montajlanıp, modeller sonlu elemanlar analizlerine hazır hale getirilmiştir.

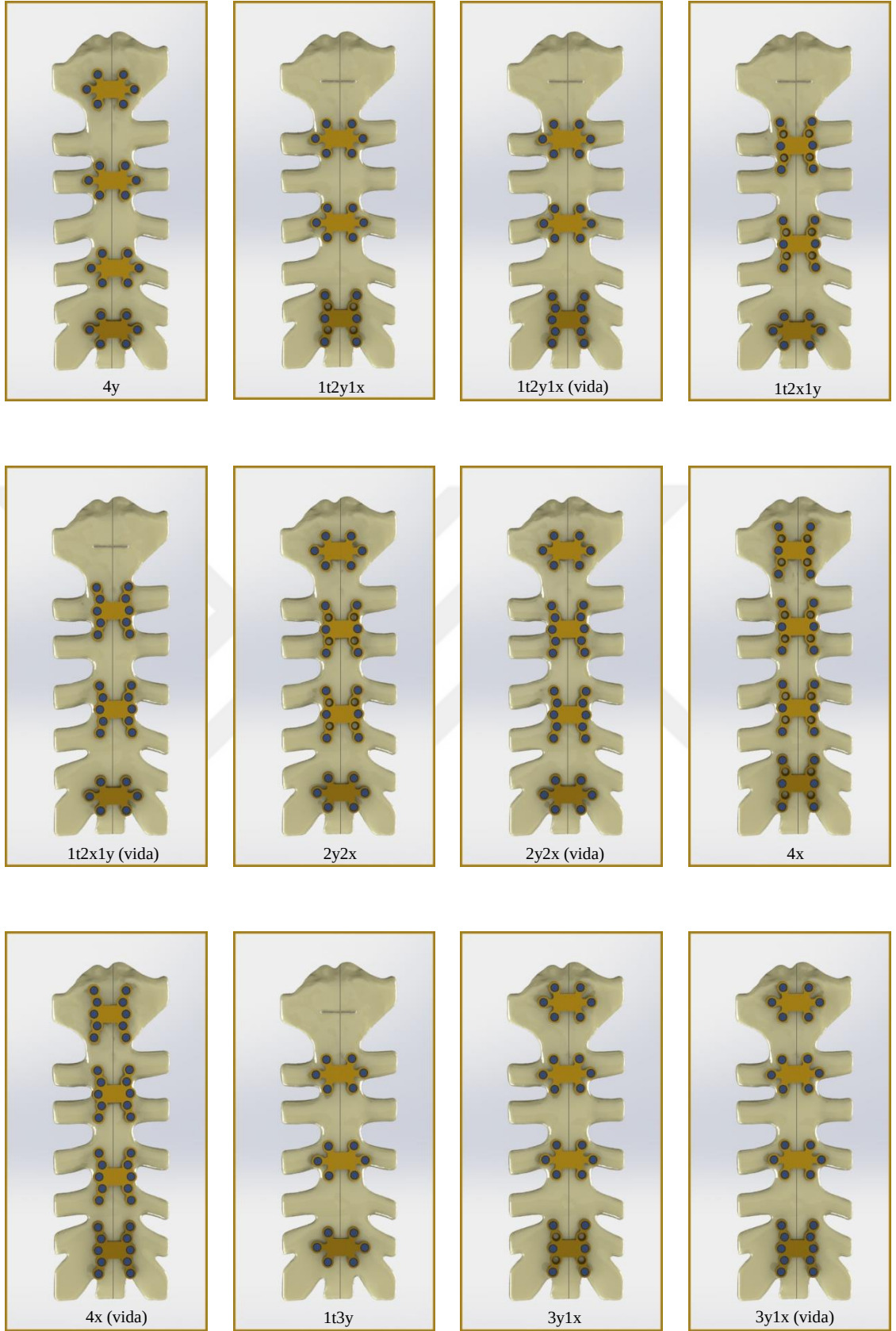


Şekil 3.9. Gerçekleme çalışmasında incelenen yöntemler; (a) Geleneksel çelik tel, (b) Tek titanyum plâk, (c) Üç titanyum plâk.

Daha sonra plâklar ve teller kullanılarak çeşitli yerleşim kombinasyonlarıyla toplam kırk sekiz yöntem Şekil 3.10’da gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Bu konfigürasyonlar, literatürde yapılan çalışmalar da dikkate alınarak oluşturulmuştur. Yöntemler, yerleşim konfigürasyonları ve kullanılan plâk ve tel sayısına bağlı olarak isimlendirilmiştir. Teller “t” harfiyle, yıldız şekilli plâk “y” harfiyle, X- şekilli plâk “x” harfiyle, düz şekilli plâk “d” harfiyle gösterilmiştir Çalışma kapsamında ayrıca vida sayısının etkisi de incelenmiştir.



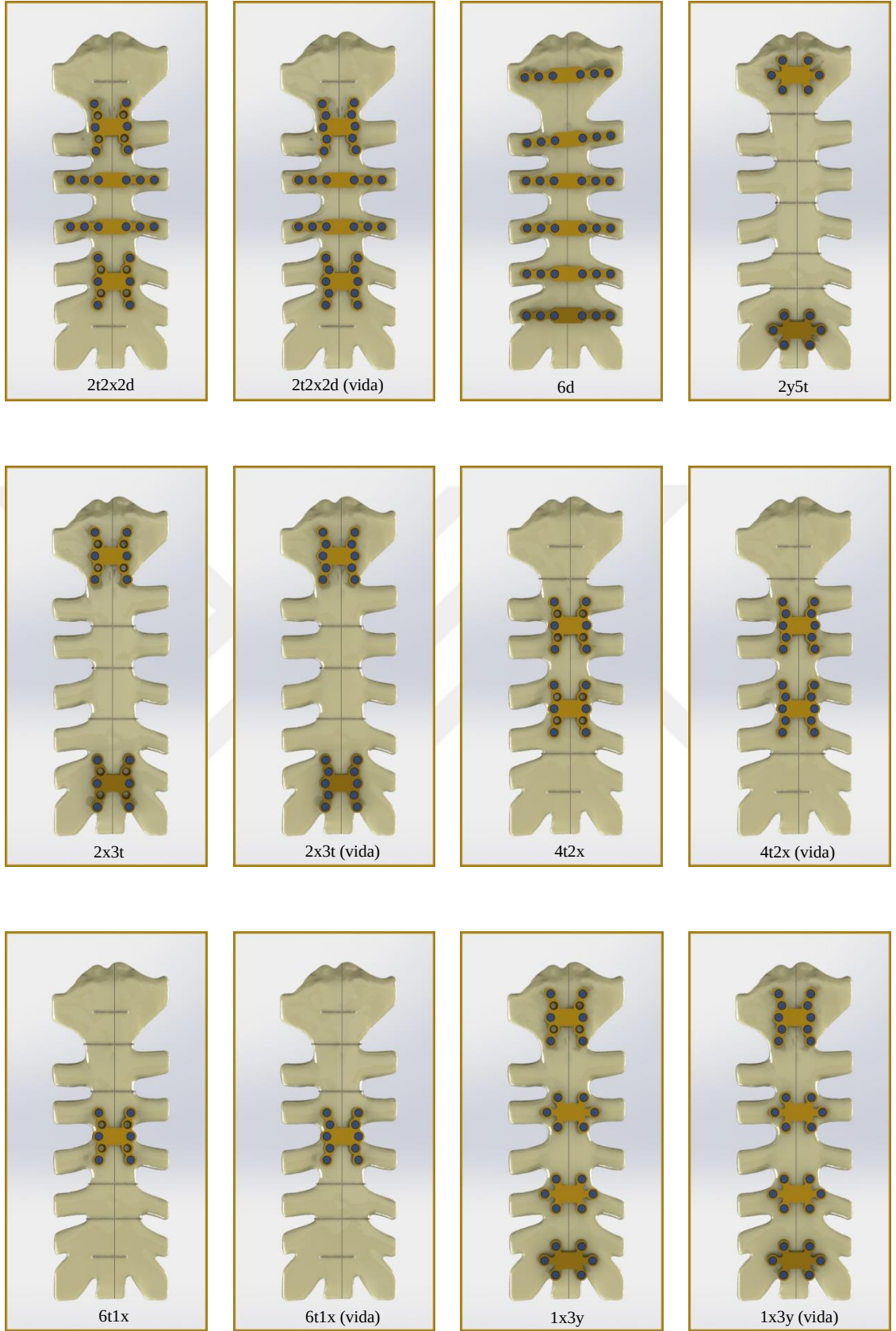
Şekil 3.10. Sonlu elemanlar analizleri ile incelenen sternum sabitleme yöntemleri



Şekil 3.10. (devam)



Şekil 3.10. (devam)



Şekil 3.10. (devam)

3.7. Sonlu Elemanlar Analizlerinde Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

SOLIDWORKS ortamında hazırlanan modeller STEP (.step) formatında kaydedildikten sonra ANSYS Workbench yazılımına aktarılmıştır. Analizler, ANSYS Workbench yazılımının Static Structural analiz modülünde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde vidaların kemikten sıyrıldığı hatta plağa yakın noktalarda kemikte kırılma olduğu görülmüştür. Orhan (2016) tarafından gerçekleştirilen deneylerde ise çelik tellerin yüklemeye birlikte sternumu ezmeye ve kesmeye başladığı, bu yüzden de malzemelerin analizlerde doğrusal olmayan özelliklerinin çift doğrusal (bilineer) olarak tanımlandığı ve bütün malzemelerin özelliklerinin izotropik ve elasto-plastik olarak kabul edildiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada da malzemelerin davranışları dikkate alınarak özellikleri çift doğrusal (bilineer) olarak tanımlanıp, bütün malzemelerin özellikleri izotropik ve elasto-plastik olarak kabul edilmiştir. Poliüretan sternum ve çelik telin malzeme özellikleri Orhan (2016) tarafından yapılan çalışmadan alınırken, titanyum plâğin malzeme özellikleri ANSYS Workbench yazılımının nonlinear malzeme modülünde tanımlı olan titanyum alaşımından alınarak kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

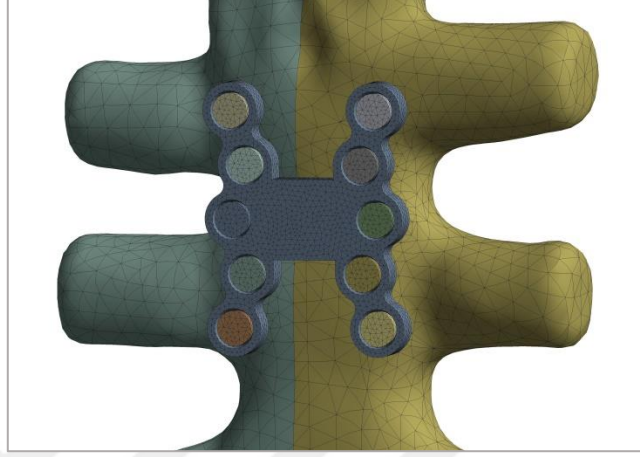
Çizelge 3.1. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Dayanımı (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
Poliüretan Sternum	0,210	0,3	320	8,4	21
Titanyum Plâk (Ti-6Al-4V)	96	0,36	4.620	930	2150
Çelik Tel (316L)	193	0,27	8.000	290	19.300

3.8. Sonlu Elemanlar Analizlerinde Kullanılan Parametreler

Analiz modellerindeki tüm parçaların hacimsel olarak sonlu sayıda elemana bölünmesinde (mesh), Patch confirming algoritması ve Tetrahedron (dört yüzlü üçgen) mesh yöntemi kullanılmıştır. Bu algorithmada meshleme işlemi sırasıyla kenar, yüz ve gövde olacak şekilde yapılmaktadır (Anonimous 2022e).

Sternum kemiği 3 mm, plâklar 0,7 mm, teller 1,2 mm üçgen eleman ile meshlenmiştir. Mesh işlemini iyileştirmek için sternuma temas eden sabitleme malzemelerinin kontak bölgelerinde sternum gövdesine göre daha küçük elemanlar kullanılmıştır. Genel bir mesh görüntüsü Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 11. Sternum ve plâklara uygulanan mesh görüntüsü

Mesh boyutlarına karar verilmesinde ve mesh kalitesinin değerlendirilmesinde programda tanımlı olan parametrelerden Skewness değeri dikkate alınmıştır. Skewness, en uygun mesh yapısı ile mevcut mesh yapısı arasındaki oranı veren grafiklerdir. Bu yöntem yalnızca üçgensel elemanlara uygulanabilmektedir (Anonymous 2022f). Çizelge 3.2’de Skewness parametresine göre eleman kalitesinin değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Skewness değerine göre eleman kalitesi

Skewness Değeri	Eleman Kalitesi
1	Bozuk
0,9-<1	Kötü
0,75-0,9	Zayıf
0,5-0,75	Vasat
0,25-0,5	İyi
>0-0,25	Çok iyi
0	Eşkenar

Yapılan analiz çalışmalarında skewness değerinin 0,3’den küçük olmasına dikkat edilmiştir.

Analizlerde sternum ile sabitleme malzemeleri arasındaki temas bölgeleri ve iki parçaya ayrılan sternumun temas bölgesi sürtünmeli (frictional) kontak seçilmiştir. Sternumun iki parçası arasındaki temas bölgesinin sürtünme katsayısı Goffin et al. (2012) ve Eberle and Augat (2007) tarafından yapılan çalışmalar dikkate alınarak 0,46 olarak alınmıştır. Sternum ile çelik tel arasındaki temas bölgesinin sürtünme katsayısı López-Campos et al. (2018) tarafından yapılan çalışma dikkate alınarak 0,37 olarak alınmıştır. Sternum ile titanyum plâk arasındaki temas bölgesinin sürtünme katsayısı Eberle and Augat (2007) tarafından yapılan çalışma dikkate alınarak 0,36 olarak alınmıştır. Plâk ve vida arasındaki temas bölgesi, sürtünme tutuşunun korunması ve kaymaması için bağlı (bonded) kontak olarak seçilmiştir. Çizelge 3.3’de kontak elemanlar, kontak tipleri ve sürtünme katsayıları gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Analizlerde kullanılan kontak elemanları, tipleri ve sürtünme katsayıları

Kontak Elemanları	Kontak Tipi	Sürtünme Katsayısı
Kemik-Kemik	Frictional	0,46
Kemik-Çelik tel	Frictional	0,37
Kemik-Vida	Frictional	0,36
Titanyum Plâk-Vida	Bonded	-

Kontak ara yüzünde uyumluluğu sağlayabilmek için ANSYS programı farklı kontak kombinasyonları sunmaktadır. Yüzeylerin doğrusal olmayan katı cisim kontakları için Augmented Langrange ve Pure Penalty formülasyonları kullanılabilir. Pure Penalty ve Augmented Langrange formülasyonları arasındaki temel fark, ikinci formülasyonun kontak kuvvetini (kontak basıncı) artırmasıdır (Kaplan 2013).

$$\text{Pure penalty: } F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} \cdot X_{\text{penetrasyon}} \quad (3.1)$$

$$\text{Augmented Langrange: } F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} \cdot X_{\text{penetrasyon}} + \lambda \quad (3.2)$$

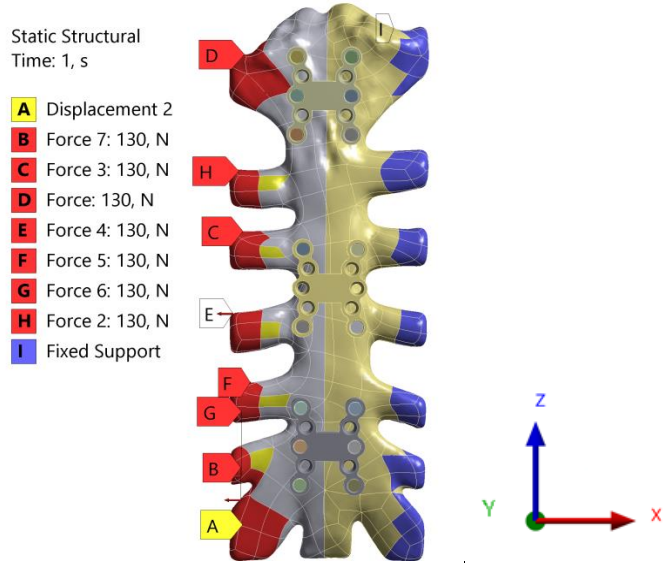
Denklem 3.1 ve 3.2’de görüldüğü gibi iki yöntem arasındaki ekstra λ terimi sebebi ile kontak direngenliğinin (k_{normal}) etkisi Augmented Langrange yönteminde daha düşüktür. Her iki metod da kontak kısmında penetrasyona izin vermektedir fakat, Augmented Langrange metodunda kontrollü bir penetrasyon oluşumu bulunurken, Pure

Penalty metodunda penetrasyon oluşumunda sınır değeri bulunmamaktadır (Kaplan 2013). Bu bilgilerle birlikte deneylerde görülen davranışlar da dikkate alınarak çelik telin ve titanyum plâkın, sternuma temas eden kontak bölgeleri için Pure Penalty yöntemi kullanılmıştır.

İki ara yüzey arasındaki ayrılma olmayan yani bağlı kontak tiplerinde çoklu nokta sınırlaması (MPC) yönteminin kullanılması uygun olmaktadır (Kaplan 2013). Bu yüzden analizlerde plâk ve vida arasındaki temas yüzeyinde çoklu nokta sınırlaması (MPC) yöntemi kullanılmıştır.

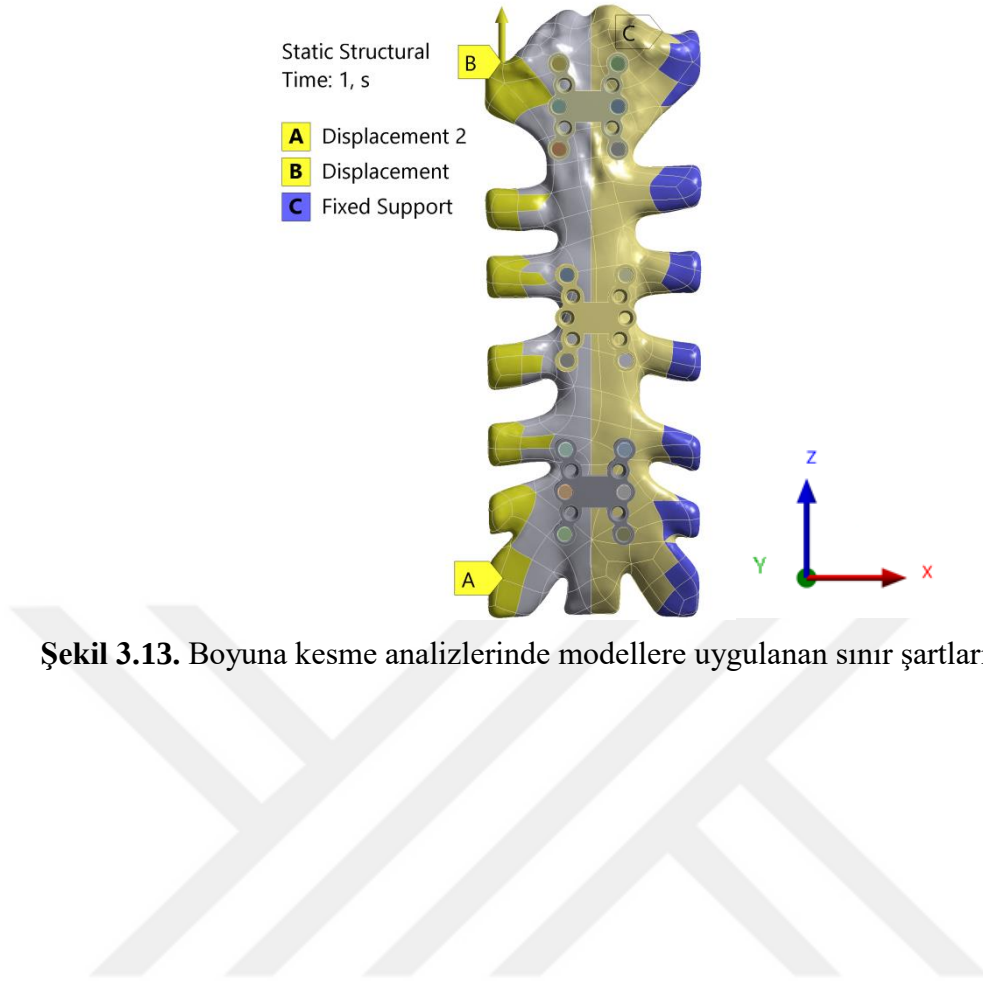
Sınır şartlarının uygulanmasında deneylerde gerçekleştirilen yükleme sisteminin aynısı ANSYS programında oluşturulmaya çalışılmıştır.

- Yanal ayrılma analizlerinde, sternum modeli sol tarafındaki kaburga çıkıntılarından sabitlenip modele, sağ tarafındaki kaburga çıkıntılarından yatay eksen (x eksen) doğrultusunda çekme kuvveti uygulanmıştır. Deneylerde 2 mm'lik kritik deplasman değerinin ilk olarak ksifoid bölgesinde olduğu görüldüğünden analizlerde, bu bölgede 2 mm deplasmanı elde etmek için her yönüne farklı kuvvet uygulanmıştır ve daha sonra bu değerler baz alınarak modeller arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca yanal ayrılma analizlerinde sternum modelinin y-ekseni ve z- eksenine doğrultusundaki hareketleri engellenmiştir. Çelik tel sabitleme malzemesinin ise sadece z-ekseni doğrultusundaki hareketi engellenmiş olup, titanyum plâk sabitleme malzemelerinin hareketi ise tamamen serbest bırakılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Yanal ayrılma analizlerinde modellere uygulanan sınır şartları

- Boyuna kesme analizlerinde, sternumun bütün keski hattı boyunca aynı yer değiştirme olduğundan, analizlerde sternum modeli sol tarafındaki kaburga çıkıntılarında sabitlenmiş ve sağ tarafındaki kaburga çıkıntılarında dikey eksen (z- eksen) doğrultusunda 2 mm'lik yer değiştirme uygulanmıştır. Bu 2 mm'lik yer değiştirme sonucunda oluşan kuvvet değeri bütün modeller için belirlenip bu değerler baz alınarak modeller arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca boyuna kesme analizlerinde sternum modelinin ve çelik tel sabitleme malzemesinin x-ekseni ve y- eksen doğrultusundaki hareketleri engellenmiş olup titanyum plâk sabitleme malzemelerinin hareketi ise tamamen serbest bırakılmıştır (Şekil 3.13).



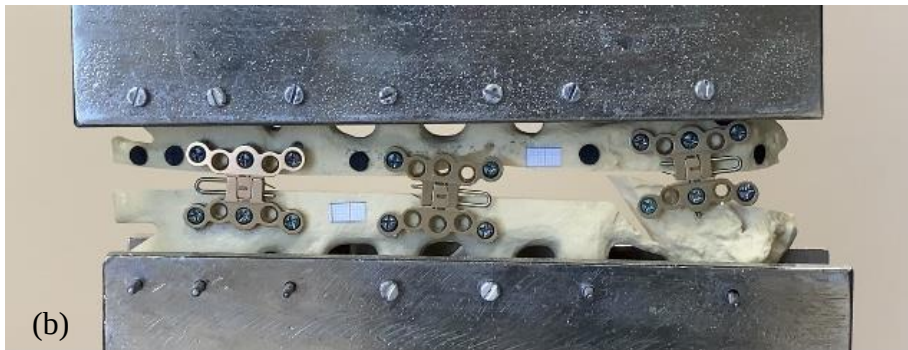
Şekil 3.13. Boyuna kesme analizlerinde modellere uygulanan sınır şartları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde deneylerden ve sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen sonuçlar sunulacak ve çalışma kapsamında incelenen yöntemlerin karşılaştırması yapılacaktır.

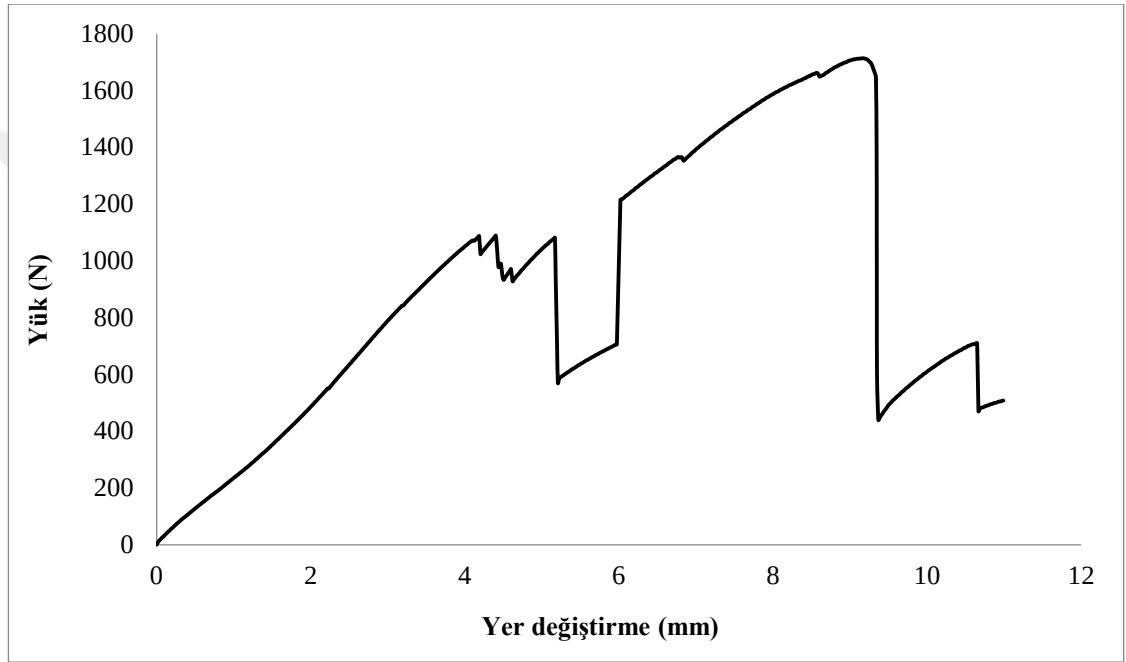
4.1. Yanal Ayrılma Deney Bulguları

Üç titanyum plâk yönteminin incelendiği deneylerin ilkinde kaburga çıkıntısından kemiğin kırıldığı görülmüştür (Şekil 4.1a). İkinci deneyde, manubrium kısmına yerleştirilen plâğın olduğu kısımda kemikte kırılma meydana gelmiştir ve manubrium kısmında bulunan plaktaki vidaların kemikten sıyrıldığı görülmüştür (Şekil 4.1b). Üçüncü deneyde ise ksifoid kısmına yerleştirilen plâğın olduğu kısımda kemikte kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.1c). Üç tekrar yapılarak gerçekleştirilen yanal ayrılma deney verilerinin ortalaması alınarak elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.





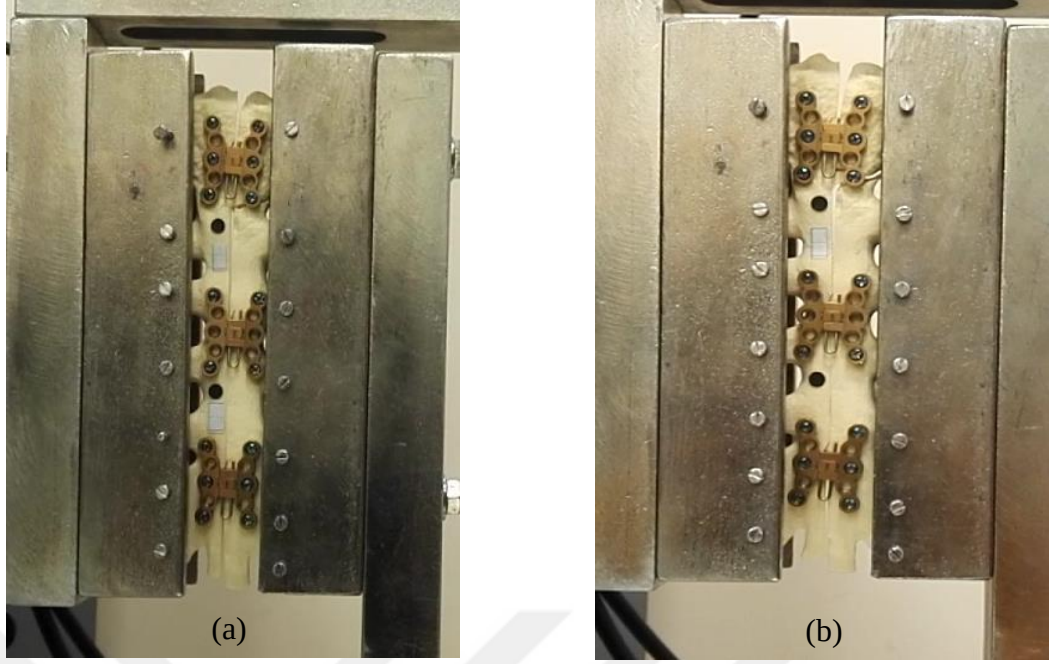
Şekil 4.1. Üç titanyum plâk yöntemi deneylerindeki farklı göçme mekanizmaları



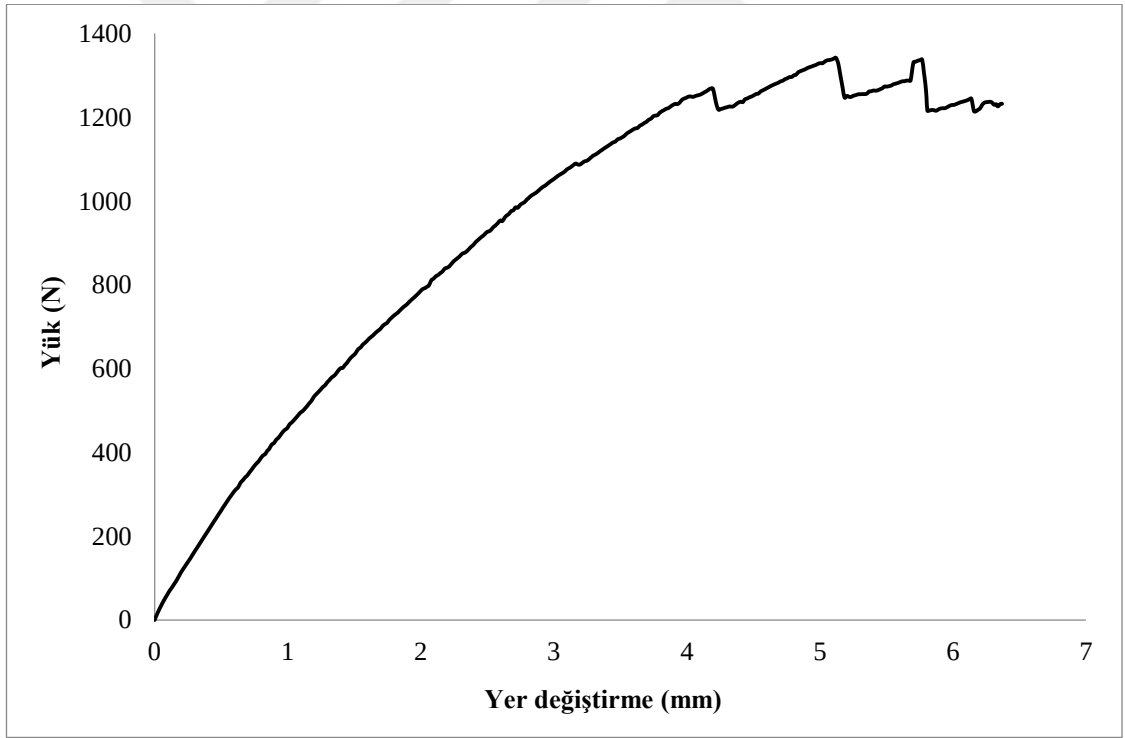
Şekil 4.2. Üç titanyum plâk yönteminin yanal yükleme etkisi altında oluşan yük-yer değiştirme eğrisi.

4.2. Boyuna Kesme Deney Bulguları

Üç titanyum plâk yönteminin incelendiği boyuna kesme deneylerinin tümünde manubrium kısmına yerleştirilen plâğın olduğu kısımda kemikte kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.3). Üç tekrar yapılarak gerçekleştirilen boyuna deney verilerinin ortalaması alınarak elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Üç titanyum plâk yöntemi deneylerindeki farklı göçme mekanizması



Şekil 4.4. Üç titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yükleme etkisi altında oluşan yük-yer değiştirme eğrisi.

4.3. Görüntü İşleme Yöntemi Sonuçları

Yapılan deneylerde görüntü işleme yöntemi, kemik modelleri üzerindeki yer değiştirmelerin belirlenebilmesi için kullanılmıştır. Yanal ayrılma deneylerinde sternumun manubrium bölgesinde bir, gövde ve ksifoid bölgesinde iki olmak üzere beş farklı noktada, boyuna kesmede ise gövdede iki noktada oluşan yer değiştirmeler görüntü işleme yöntemi ile belirlenmiştir.

Yanal ayrılma ve boyuna kesme deneylerinden elde edilen görüntüler kullanılarak sternum üzerinde oluşan yer değiştirmeler görüntü işleme yöntemi ile belirlenmiş ve üç titanyum plâk sabitleme yönteminin emniyet yükü (2 mm yer değiştirmeye neden olan yük) ve direngenlik değerleri hesaplanıp Çizelge 4.3’de verilmiştir. Orhan (2016) tarafından gerçekleştirilen geleneksel çelik tel ve tek titanyum plâk sabitleme yöntemlerinin görüntü işleme yöntemi sonuçları da Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Görüntü işleme yönteminden elde edilen sonuçlar

Sabitleme Yöntemi	Emniyet Yükü (N)		Direngenlik (N/mm)	
	Yanal ayrılma	Boyuna kesme	Yanal ayrılma	Boyuna kesme
Üç Titanyum Plâk	733	1.059	355,5	479,9
Tek Titanyum Plâk	1.105,1	856,02	643,8	524,03
Geleneksel Çelik Tel	1.050,7	664,03	565,5	427,76

Görüntü işleme yöntemi sonuçlarına göre en büyük emniyet yükü yanal ayrılmada tek titanyum plâk sabitleme yönteminden elde edilirken boyuna kesmede üç titanyum plâk sabitleme yönteminden elde edilmiştir. En büyük direngenlik değeri yanal ayrılma ve boyuna kesmede tek titanyum plâk sabitleme yönteminden elde edilmiştir.

4.4. Gerçekleme Çalışması Sonuçları

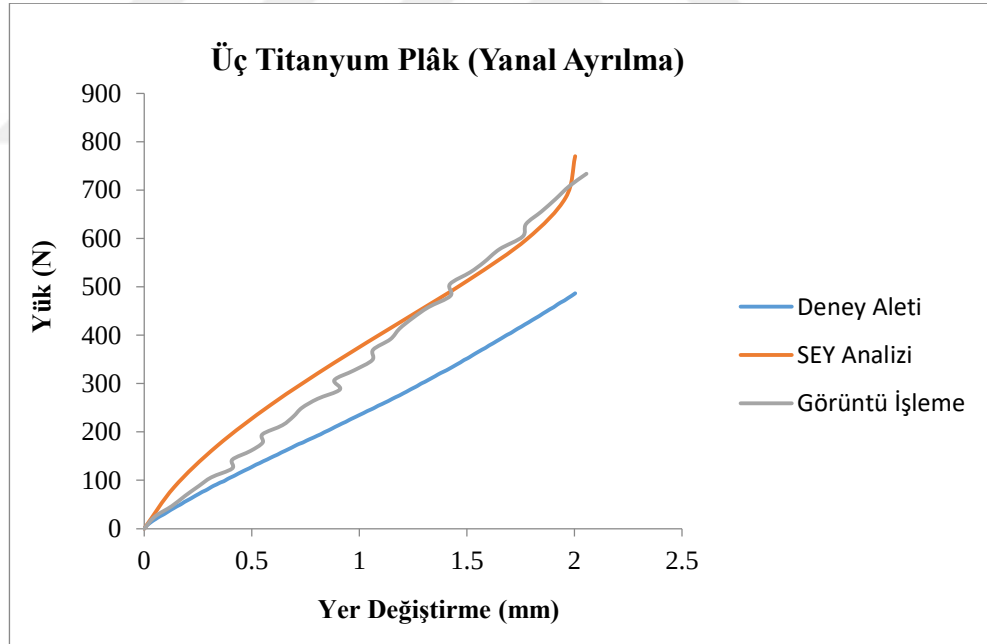
Deneyleri gerçekleştirilen geleneksel çelik tel, tek titanyum plâk ve üç titanyum plâk yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile bu yöntemlerin sonlu elemanlar yöntemi

analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

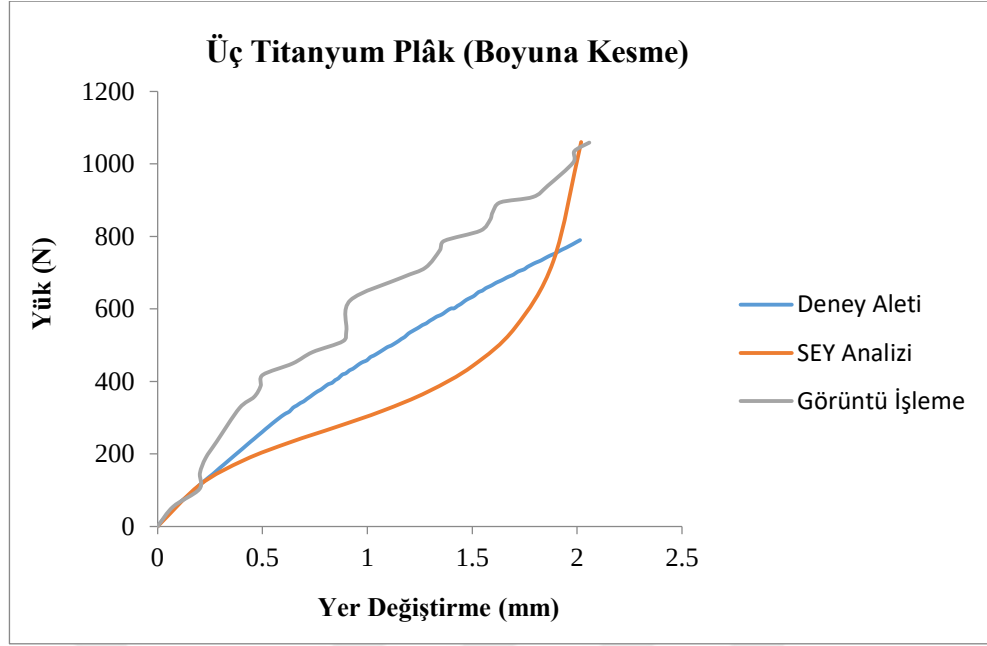
Çizelge 4.2. Sonlu elemanlar yöntemi analiz sonuçları

Sabitleme Yöntemi	Emniyet Yüğü (N)		Direngenlik (N/mm)	
	Yanal ayrılma	Boyuna kesme	Yanal ayrılma	Boyuna kesme
Üç Titanyum Plâk	763,6	1.012,8	392,9	481,4
Tek Titanyum Plâk	1.073,5	814,7	600,8	521,2
Geleneksel Çelik Tel	1.042,9	589,2	581,2	437,4

Yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemelerinde, üç titanyum plâk yönteminin deney aleti, görüntü işleme yöntemi ve SEY analizinden elde edilen yük-yer değıştirme eğrisi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Yanal yükleme etkisi altında üç titanyum plâk yönteminin deney aleti, görüntü işleme yöntemi ve SEY analizinden elde edilen yük-yer değıştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

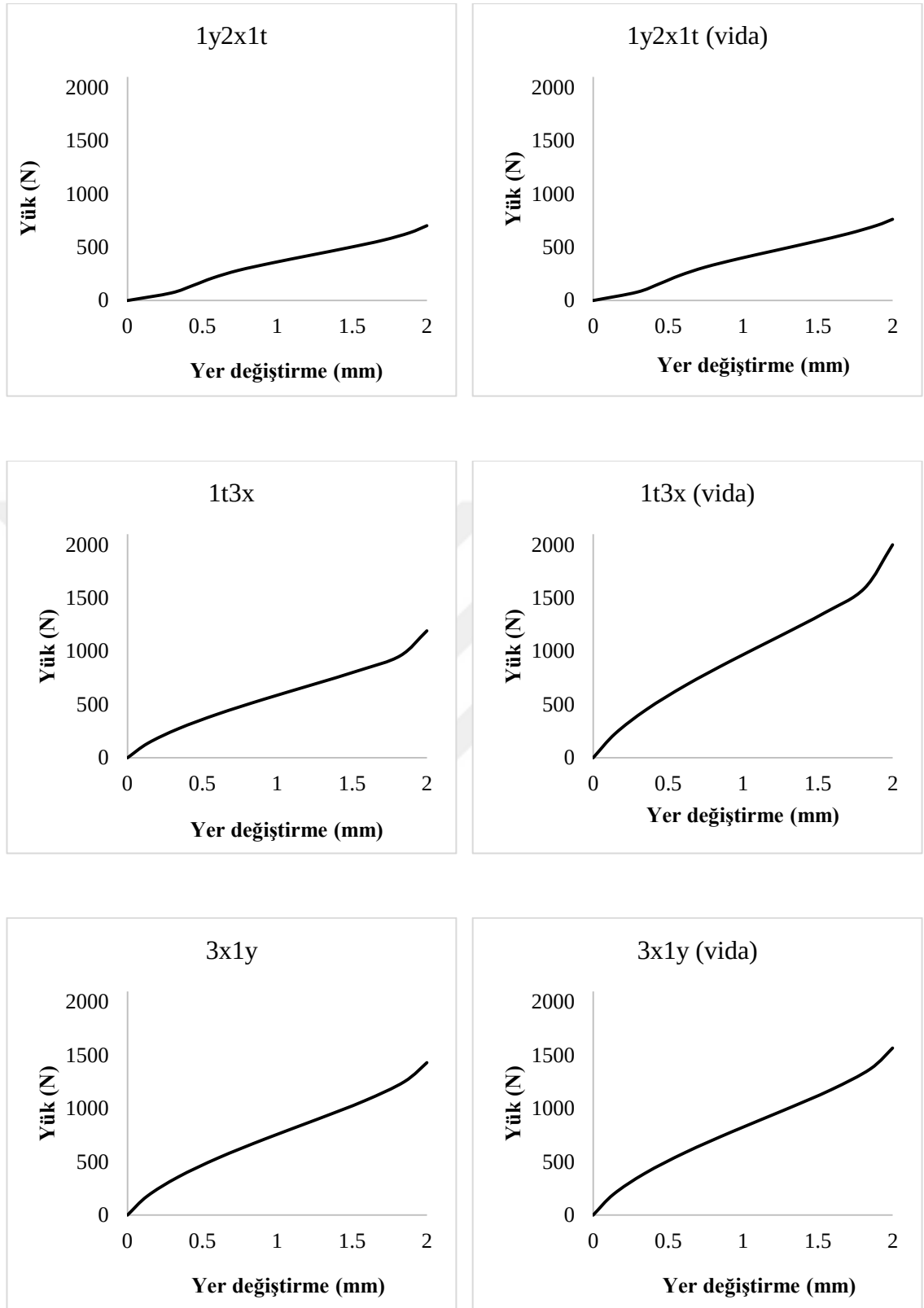


Şekil 4.6. Boyuna kesme yükleme etkisi altında üç titanyum plâk yönteminin deney aleti, görüntü işleme yöntemi ve SEY analizinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

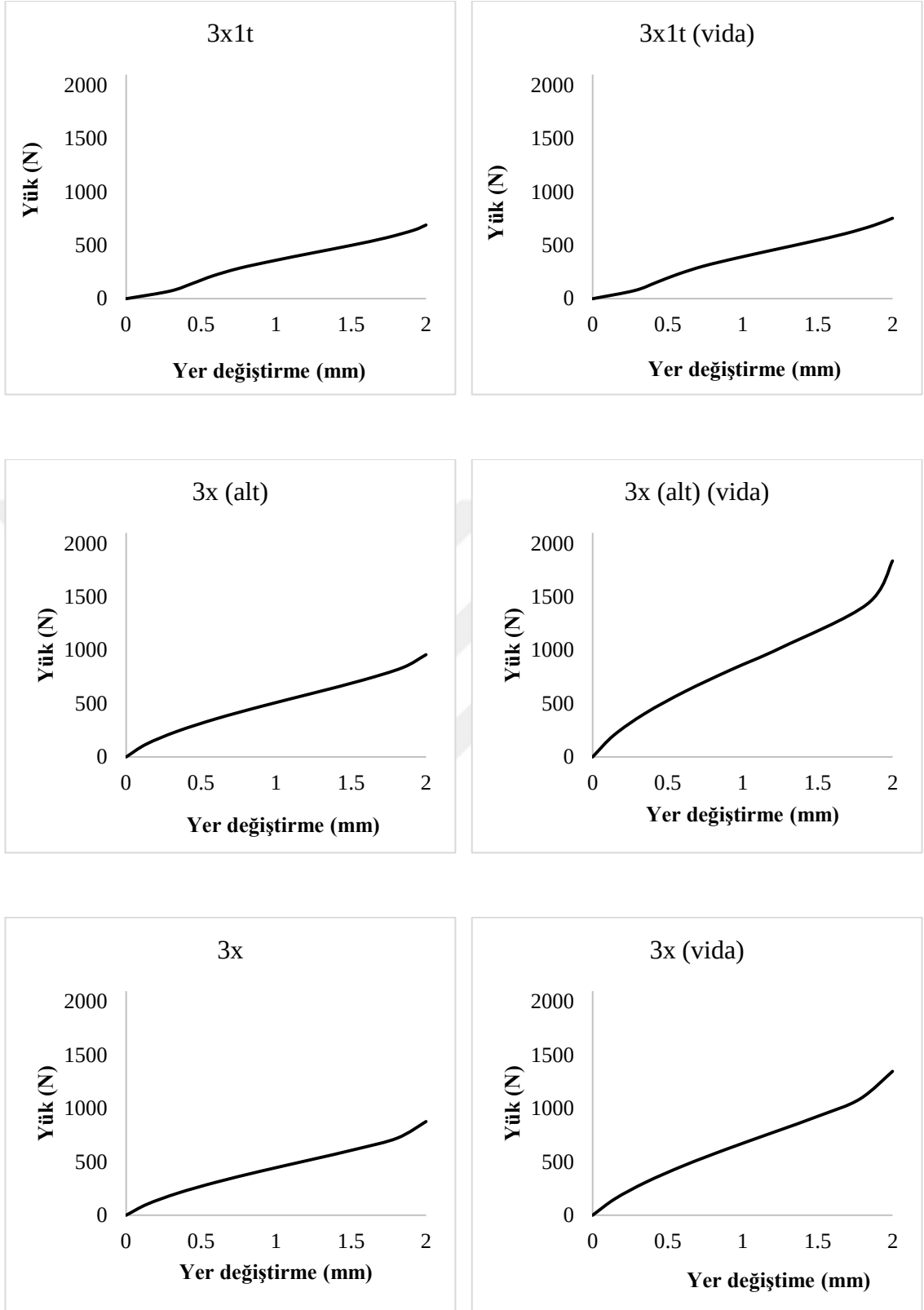
Sabitlenme yöntemlerinin emniyet yükleri hesaplanırken grafikler üzerinde 2 mm yer değiştirmeye neden olan yük değeri dikkate alınmıştır. Yapılan SEY analizleri sonucunda bulunan emniyet yükü ve direngenlik değerlerinin görüntü işleme yöntemi analizlerinden elde edilen sonuçlarla yakın olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan sayısal modellerin gerçek davranışları yansıttığı görüldükten sonra deneyleri gerçekleştirilmemiş, plâklarla oluşturulmuş kırk sekiz farklı yerleşim konfigürasyonu SEY analizleri ile incelenip karşılaştırılmıştır.

4.5. Yanal Ayrılma Analiz Sonuçları

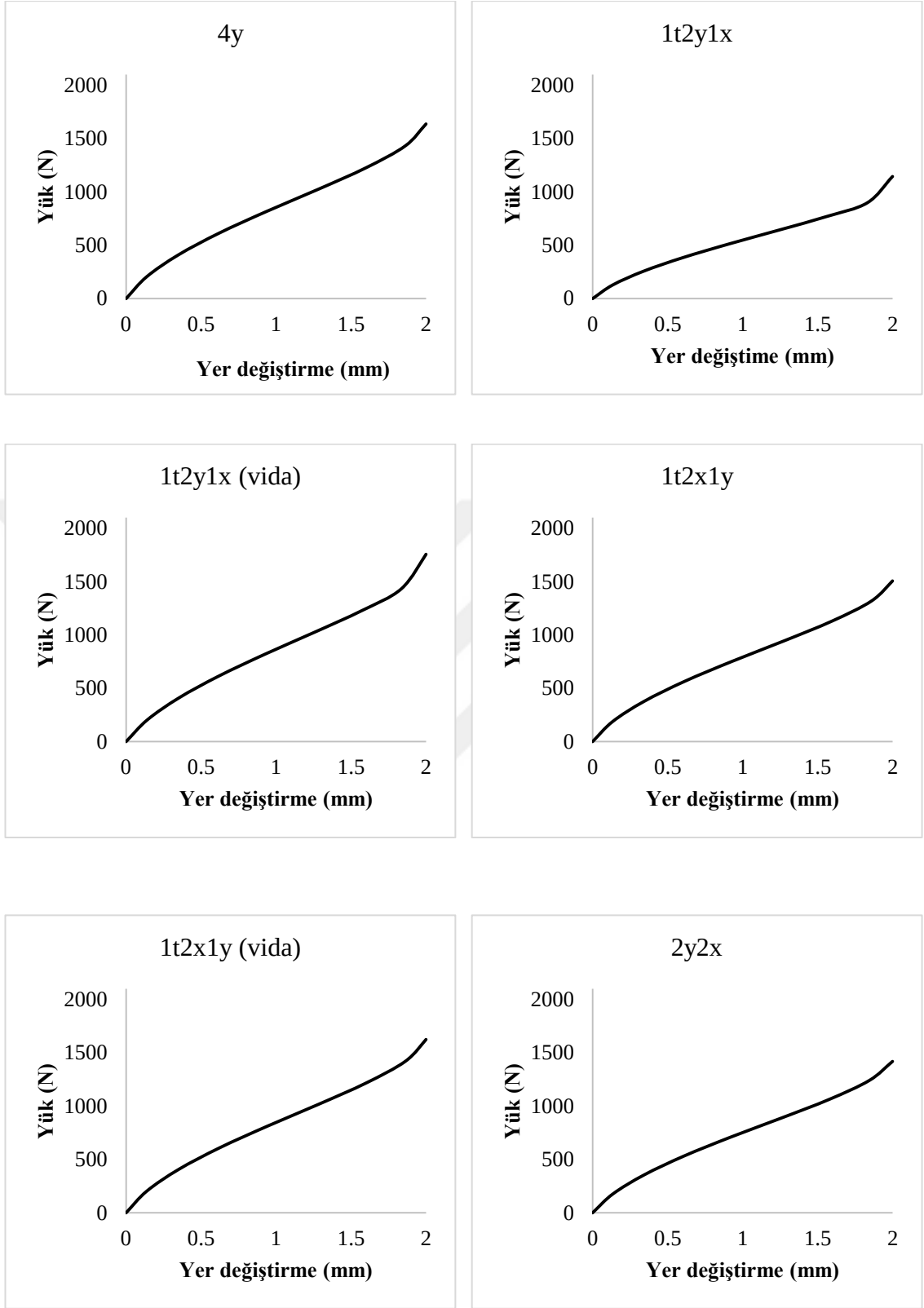
Çalışma kapsamında incelenen kapama tekniklerinin sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.7’de verilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrileri kullanılarak emniyet yükü ve direngenlik değerleri hesaplanıp bu değerler Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.



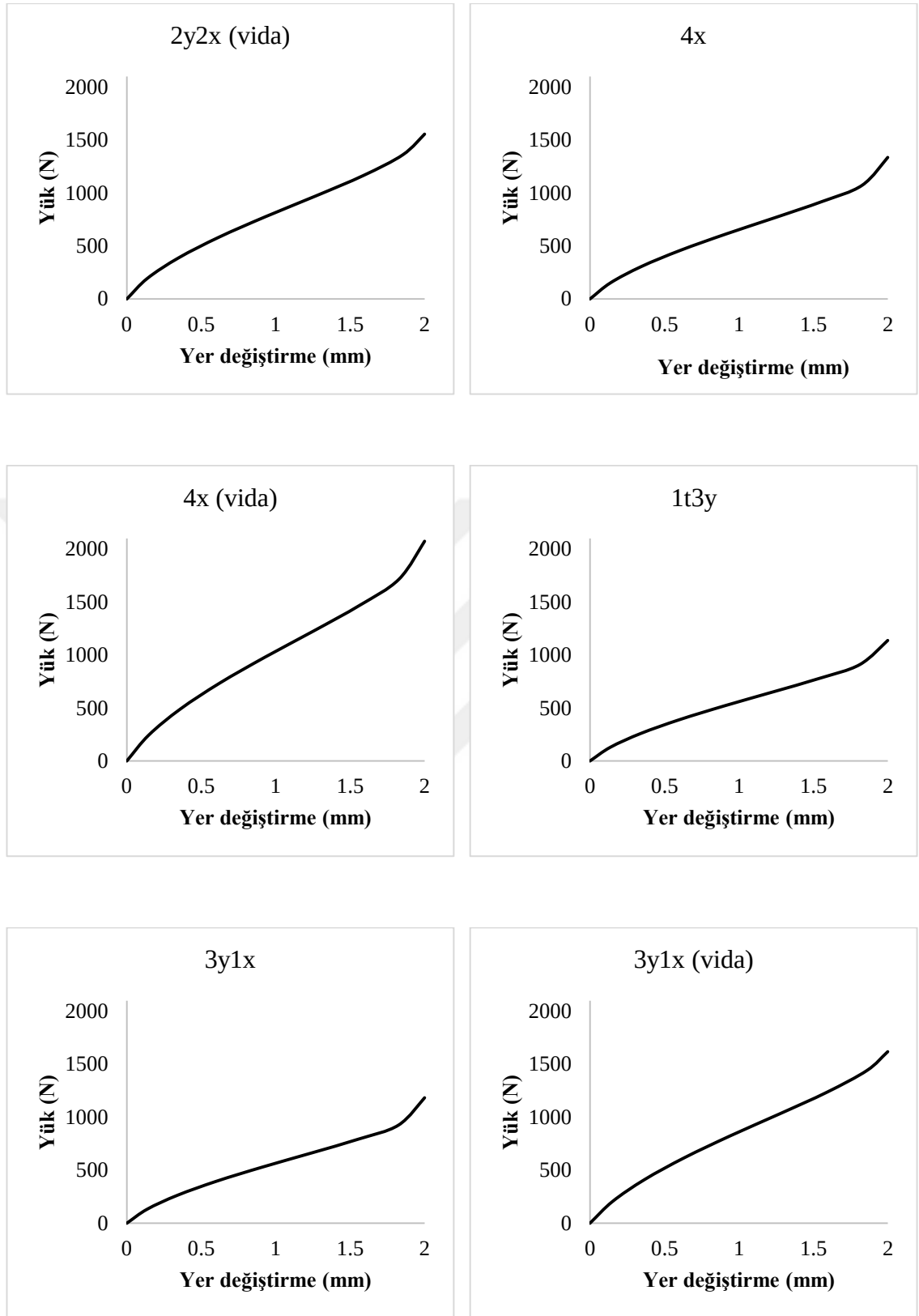
Şekil 4.7. SEY analizleri ile karşılaştırılan yöntemlerin yanılma ayrılma etkisinde oluşan yük-yer değiştirme eğrileri.



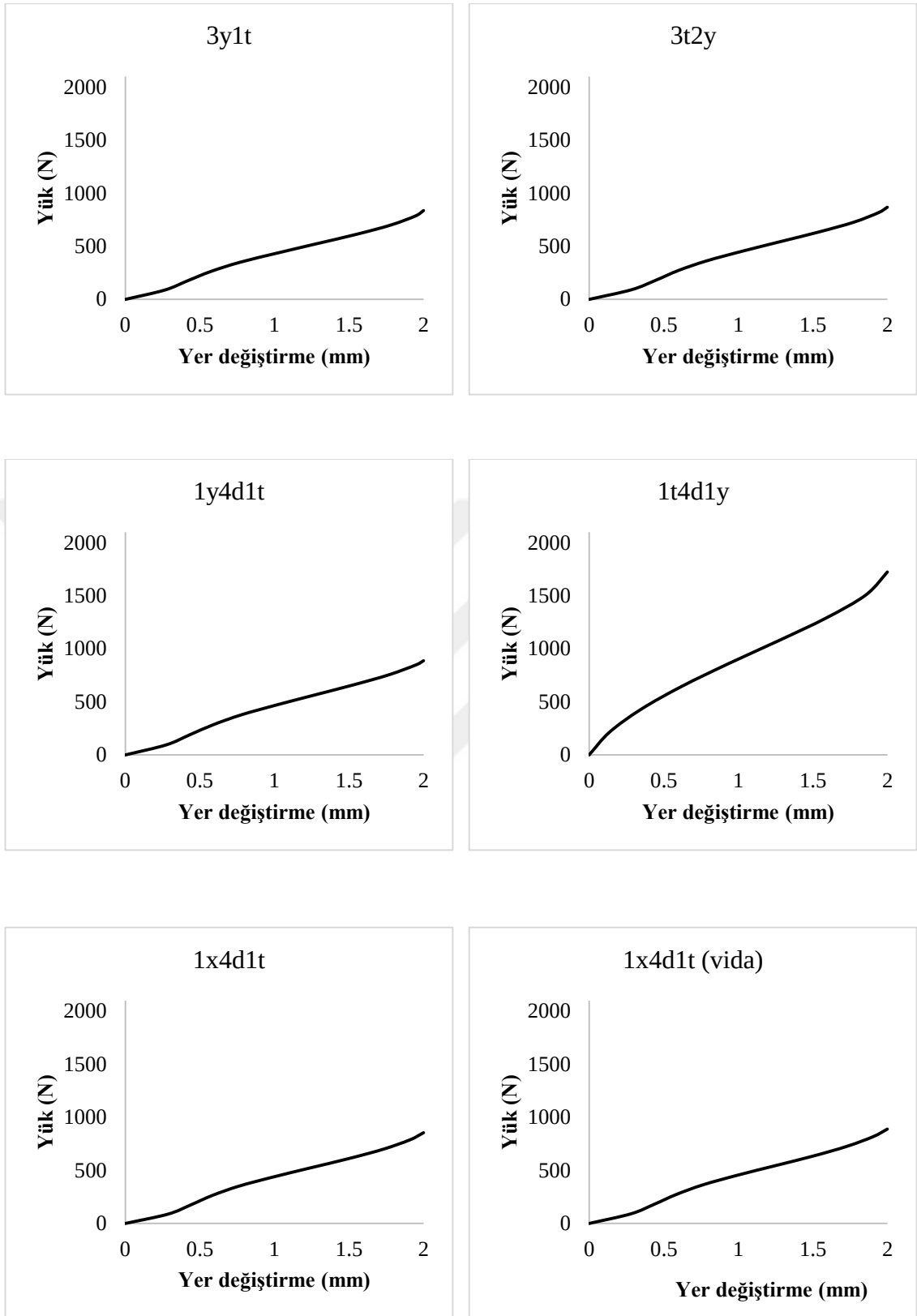
Şekil 4.7. (devam)



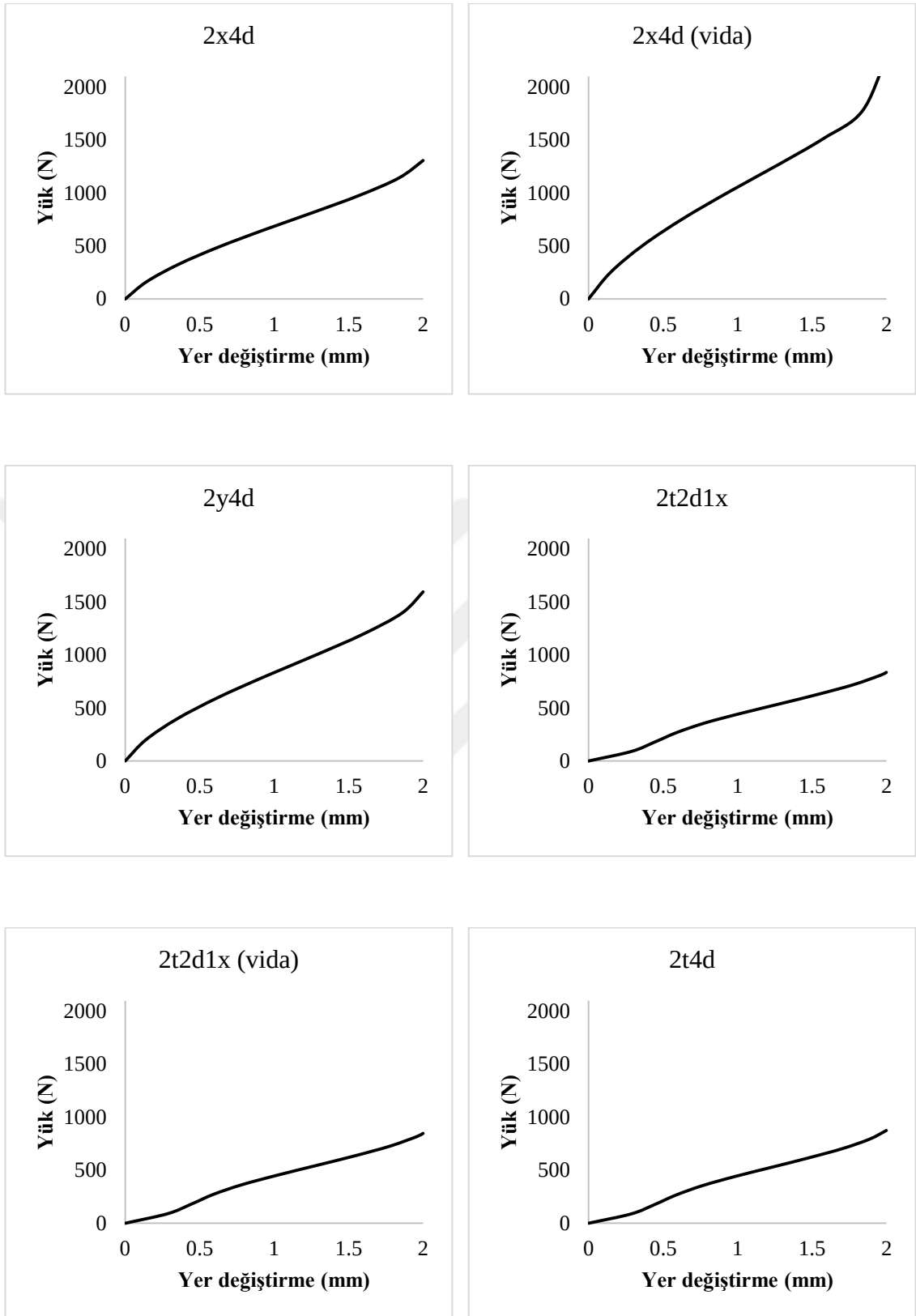
Şekil 4.7. (devam)



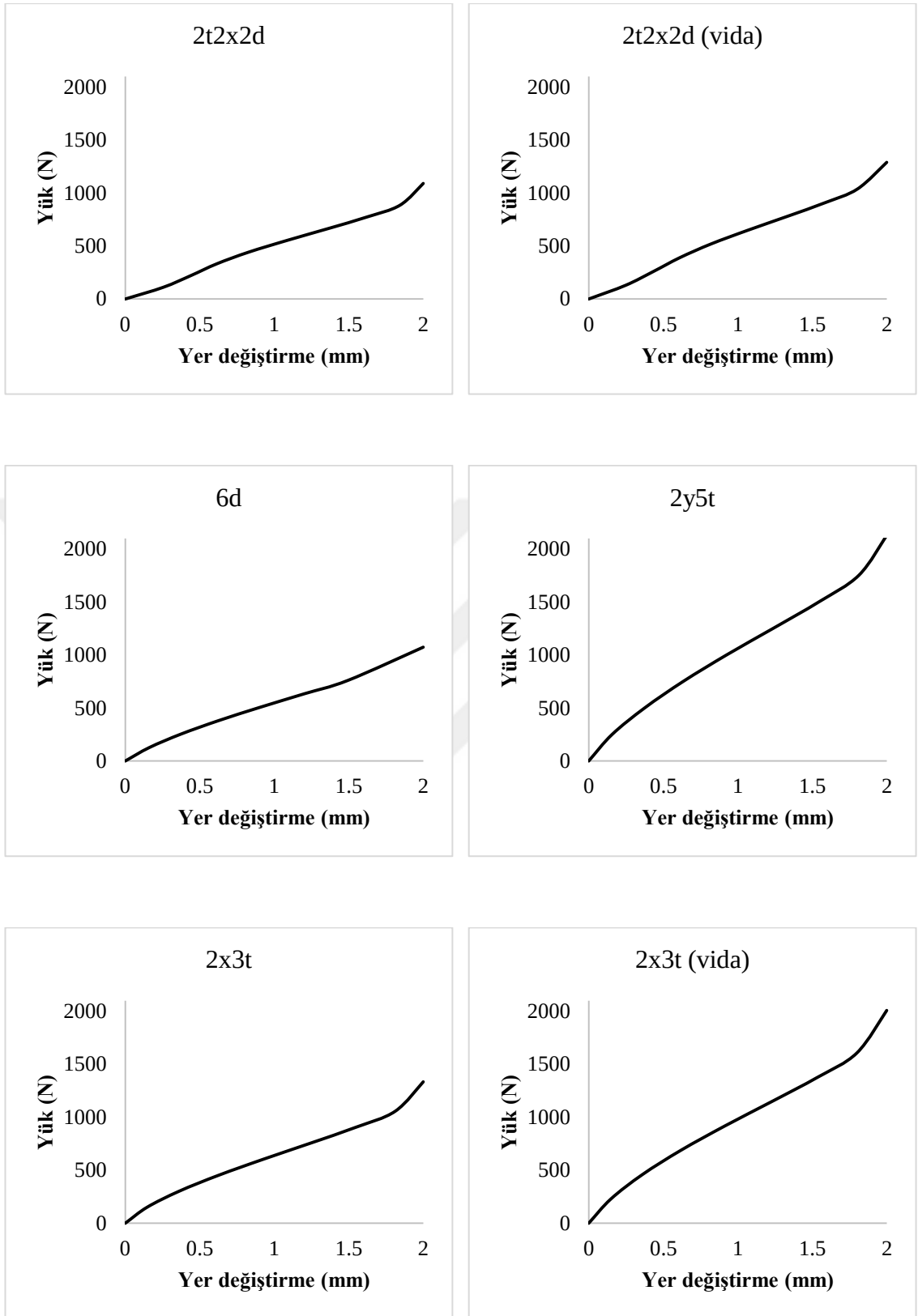
Şekil 4.7. (devam)



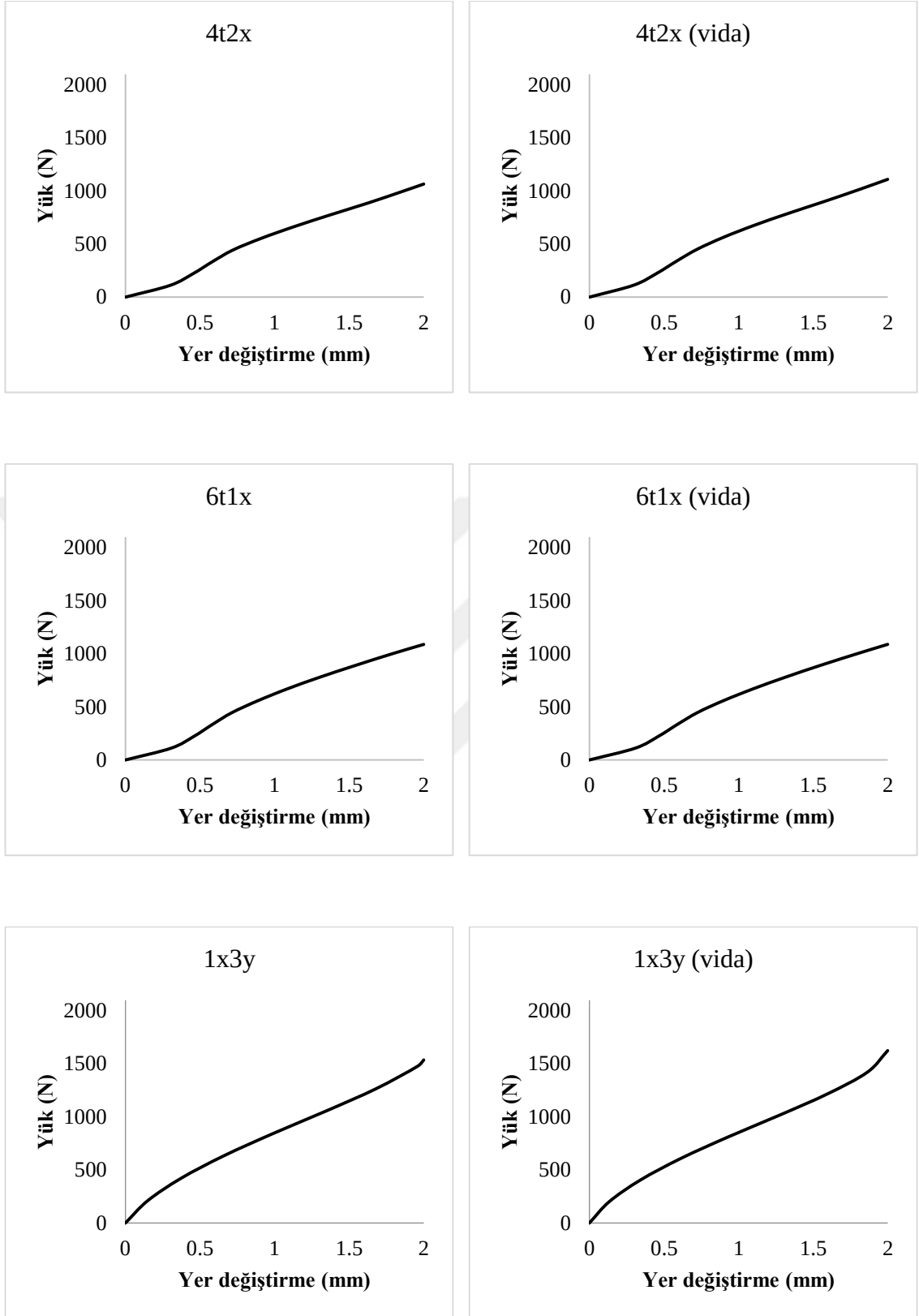
Şekil 4.7. (devam)



Şekil 4.7. (devam)



Şekil 4.7. (devam)



Şekil 4.7. (devam)

Çizelge 4.3. Yanal ayrılmada sabitleme yöntemlerinin emniyet yükü ve direngenlik değerleri.

Sabitleme yöntemi	Emniyet Yüğü (N)	Direngenlik (N/mm)
1y2x1t	702,45	378,61
1y2x1t(vida)	762,55	413,46
1t3x	1.192,01	599,68
1t3x(vida)	1.999,65	975,58
3x1y	1.431,11	743,94
3x1y(vida)	1.568,00	809,70
3x1t	690,20	374,48
3x1t(vida)	753,78	407,95
3x(alt)	958,22	510,80
3x(alt)(vida)	1.836,40	896,63
3x	877,87	459,96
3x(vida)	1.348,23	684,74
4y	1.636,44	839,14
1t2y1x	1.144,36	566,02
1t2y1x(vida)	1.755,28	867,30
1t2x1y	1.505,78	776,80
1t2x1y(vida)	1.624,00	832,28
2y2x	1.418,67	738,51
2y2x(vida)	1.555,56	802,36
4x	1.335,86	665,12
4x(vida)	2.073,40	1.028,90
1t3y	1.137,32	574,06
3y1x	1.183,76	584,58
3y1x(vida)	1.618,35	841,40
3y1t	837,23	442,58
3t2y	868,59	457,67
1y4d1t	887,43	474,05
1t4d1y	1.723,56	884,30
1x4d1t	855,07	452,90
1x4d1t(vida)	889,19	468,87
2x4d	1.306,67	682,38
2x4d(vida)	2.271,31	1073,9
2y4d	1.596,00	820,11
2t2d1x	836,17	449,65
2t2d1x(vida)	847,64	454,72
2t4d	875,16	461,42
2t2x2d	1.090,30	540,13
2t2x2d(vida)	1.289,39	638,56
6d	1.073,87	573,90

Çizelge 4.4. (devam)

2y5t	2.128,77	1.058,10
2x3t	1.334,20	659,81
2x3t(vida)	2.007,63	987,89
4t2x	1.064,86	585,76
4t2x(vida)	1.109,02	609,56
6t1x	1.088,32	608,38
6t1x(vida)	1.088,72	605,11
1x3y	1.536,01	812,19
1x3y(vida)	1.624,00	834,11

Yapılan analizlerde en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri 2x4d(vida) yönteminden elde edilmiş ve onu sırasıyla 2y5t, 4x(vida), 2x3t(vida) yöntemleri takip etmiştir.

3x1y, 3x1y(vida), 3x1t ve 3x1t(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında en iyi sonucun 3x1y(vida) yönteminden elde edildiği görülmüştür. Bu yöntemler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda ksifoid bölgesinde yıldız şekilli plâk kullanımının daha etkili olduğu görülmüştür.

3x(alt), 3x(alt)(vida), 3x, 3x(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında en iyi sonuç 3x(alt)(vida) yönteminden elde edilmiştir. 3x(alt)(vida) ve 3x(vida) yöntemleri plâk yerleşimi açısından incelendiğinde tam ksifoid bölgesine oturtulacak şekilde alttan yapılan sabitlemenin 488 N'luk bir avantaj sağladığı belirlenmiştir.

1y2x1t, 1y2x1t (vida), 1t2x1y, 1t2x1y(vida) yöntemleri karşılaştırıldığında en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri 1t2x1y(vida) yönteminden elde edilmiştir. Manubrium bölgesine tel, ksifoid bölgesine yıldız şekilli plâk kullanımının daha iyi bir kapama sağladığı görülmüştür. 1y2x1t ve 1y2x1t (vida) yöntemleri arasında emniyet yükü açısından belirgin bir farklılık görülmezken 1t2x1y, 1t2x1y(vida) yöntemleri arasında 118 N fark görülmüştür.

2y2x, 2y2x(vida), 2y4d yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında en iyi sonuç 2y4d yönteminden elde edilmiştir. Fakat 2y2x(vida) ve 2y4d yöntemleri arasında emniyet yükü ve direngenlik değerleri bakımından çok da belirgin bir farklılık görülmemiştir. Kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirmeler dikkate alındığında, sternumun gövde kısmına X- şekilli veya düz şekilli plâk kullanılması arasında herhangi bir fark olmadığı tespit edilmiştir.

1t3x, 1t3x(vida) ve 1t3y yöntemleri karşılaştırıldığında en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri çok belirgin bir farkla 1t3x(vida) yönteminden elde edilmiştir. 1t3x ve 1t3x(vida) yöntemlerinin sonuçlarında görüldüğü gibi plâklardaki tüm yuvaların vidalanmasının emniyet yükü ve direngenlik etkisi bakımından oldukça önemli bir avantaj sağladığı görülmüştür.

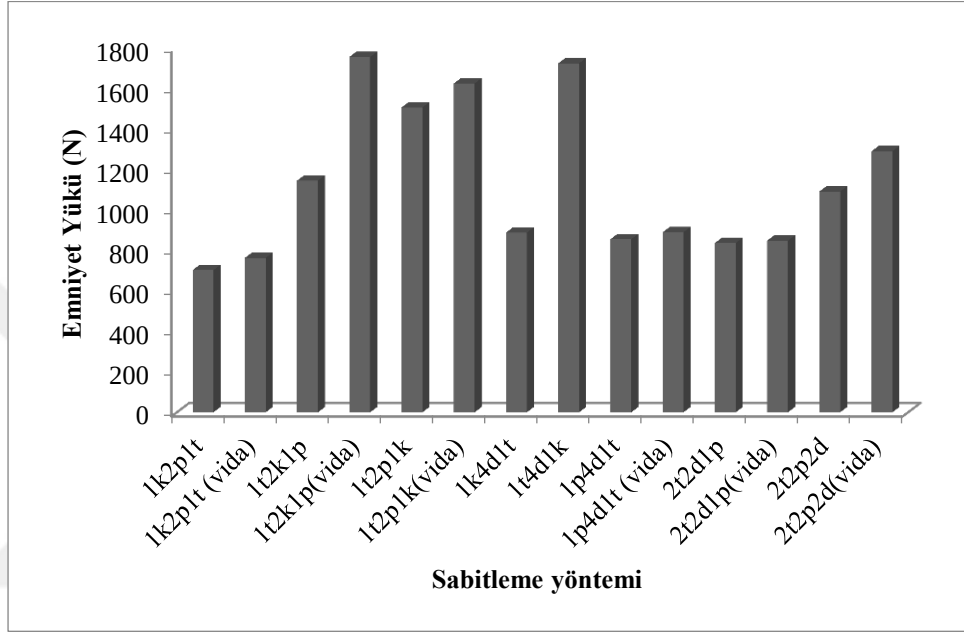
1y4d1t, 1x4d1t, 1x4d1t (vida) ve 2t4d yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında teknikler arasında belirgin bir farklılık görülmemesine rağmen en iyi sonuç 1x4d1t (vida) yönteminden elde edilmiştir. Manubriumda tel, X- şekilli ve yıldız şekilli plâk kullanımının etkinlikleri incelendiğinde, X- şekilli plâkların daha iyi bir kapama sağladığı tespit edilmiştir.

1y4d1t ve 1t4d1y yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 1t4d1y yönteminden elde edilmiştir. Manubrium bölgesine tel, ksifoid bölgesine yıldız şekilli plâk kullanımının daha iyi bir kapama sağladığı görülmüştür.

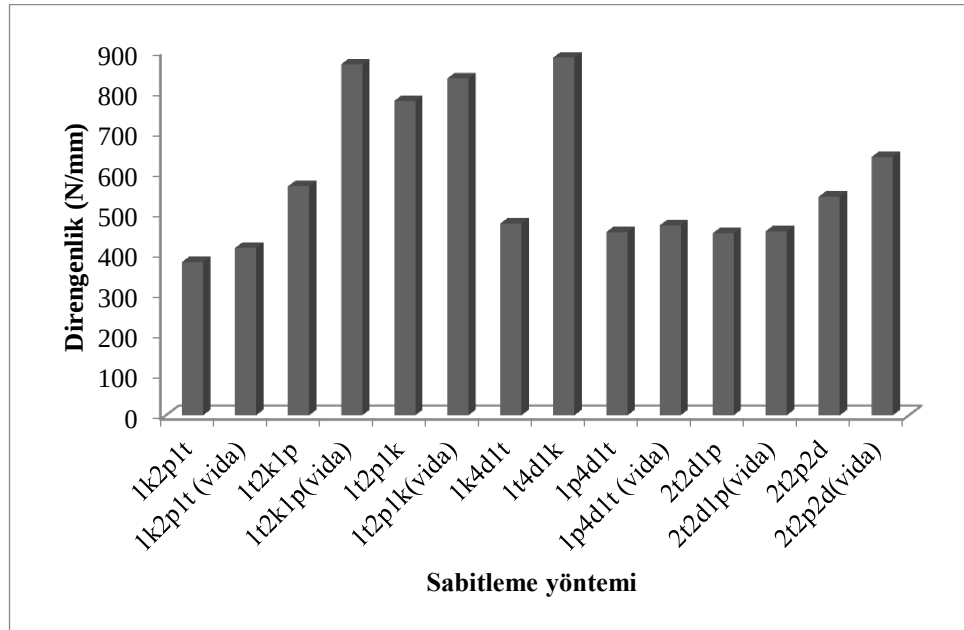
3x(alt), 3x(alt)(vida), 4x ve 4x(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 4x(vida) yönteminden elde edilmiştir. 3x(alt)(vida) yönteminde üç plâk, 4x yönteminde dört plâk olmasına rağmen, yöntemler emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında kullanılan vida sayısından kaynaklı 3x(alt)(vida) yönteminde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Üç farklı sabitleme malzemesi kullanılarak oluşturulan 1y2x1t, 1y2x1t (vida), 1t2y1x, 1t2y1x(vida), 1t2x1y, 1t2x1y(vida), 1y4d1t, 1t4d1y, 1x4d1t, 1x4d1t (vida),

2t2d1x, 2t2d1x(vida), 2t2x2d, 2t2x2d(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 1t2x1y(vida) yönteminden elde edilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterildiği gibi bu yöntemler arasında emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alındığında manubriumun telle, gövde ve ksifoidin yıldız şekilli veya X- şekilli plâklarla sabitlendiği yöntemlerde nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Yanal ayrılımda sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri



Şekil 4.9. Yanal ayrılımda sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri

X- şekilli plâk ve telin birlikte kullanıldığı 2x3t, 2x3t(vida), 4t2x, 4t2x(vida), 6t1x ve 6t1x(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 2x3t(vida) yönteminden elde edilmiştir. 4t2x, 4t2x(vida), 6t1x ve 6t1x(vida) yöntemleri arasında emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında belirgin bir farklılık görülmemiştir. Emniyet yükü, direngenlik ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerlerine göre, manubrium ve ksifoid bölgelerine plâklarla, gövde kısmına ise tellerle yapılan sabitlemenin daha iyi sonuçlar ortaya çıkardığı görülmektedir.

Sternumun gövdesinde tel, manibrium ve ksifoid bölgesinde yıldız şekilli veya X- şekilli plâkların kullanıldığı 2y5t, 2x3t ve 2x3t(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 2y5t yönteminden elde edilmiştir.

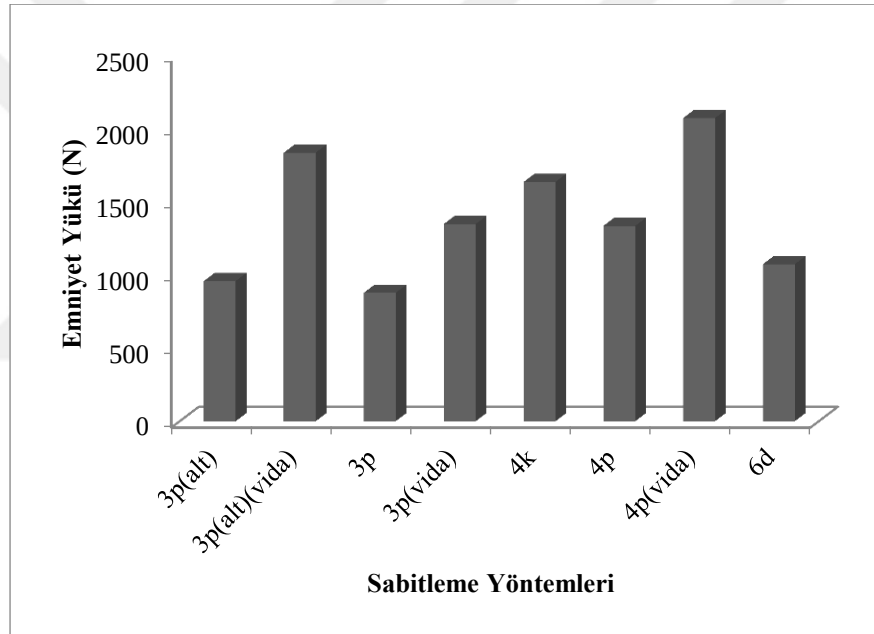
Sternumun manibrium ve ksifoid bölgelerinde yıldız şekilli plâk, gövdesinde ise farklı sabitleme malzemelerinin kullanılıp incelendiği 2y2x, 2y2x(vida), 2y4d ve 2y5t yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 2y5t yönteminden elde edilmiştir. Yöntemlerin emniyet yükü, direngenlik ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerleri dikkate alındığında gövdede tel kullanımının, X- şekilli ve düz şekilli plâk kullanımına göre çok daha iyi bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

1t3x, 1t3x(vida), 3x1t ve 3x1t(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 1t3x(vida) yönteminden elde edilmiştir. 3x1t ve 3x1t(vida) yöntemleri arasında emniyet yükü ve direngenlik değeri dikkate alınarak vida etkisi incelendiğinde 60 N'luk bir fark görülürken, 1t3x ve 1t3x(vida) yöntemleri arasında 807 N'luk oldukça belirgin bir farklılık görülmüştür. Yöntemlerin emniyet yükü, direngenlik ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerleri dikkate alındığında, en iyi sonuç manubriumda tel ksifoidde plâk kullanım konfigürasyonundan elde edilmiştir.

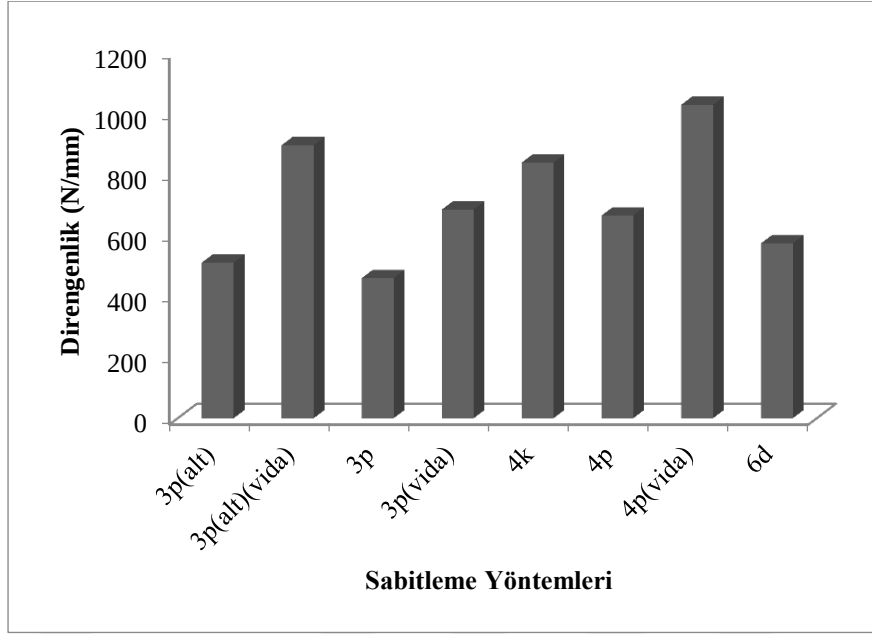
Yıldız şekilli ve X- şekilli plâk etkisinin incelenebileceği 4y, 4x, 4x(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi

sonuç 4x(vida) yönteminden elde edilmiştir. 4x ve 4x(vida) yöntemlerinde plâkların tüm yuvalarının vidalanmasının emniyet yükü etkisi bakımından oldukça önemli bir avantaj sağladığı görülmektedir. 4y ve 4x yöntemlerinde kullanılan plâk ve vida sayısı aynı olmasına rağmen, yıldız şekilli plâk kullanımının emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alındığında çok daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

Tek çeşit plâk kullanımının tercih edilmesi durumunda 3x(alt), 3x(alt)(vida), 3x, 3x(vida), 4y, 4x, 4x(vida) ve 6d sabitleme yöntemleri karşılaştırıldığında en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterildiği gibi 4x(vida) yönteminden elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Yanal ayrılmada plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri



Şekil 4.11. Yanal ayrılmada plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri.

Yöntemlerin etkinlikleri emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alındığında, plâkların tüm yuvalarının vidalanması şartıyla X- şekilli plâkların, düz şekilli ve yıldız şekilli plâklara göre daha iyi bir kapama sağladığı tespit edilmiştir. X- şekilli plâklardan sonra en iyi davranış yıldız şekilli plâklarda görülmüştür.

3x ve 4x yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 4x yönteminden elde edilmiştir. SEY analizleri gerçekleştirilen 3x ve 4x yöntemleriyle Pai et al. (2007) tarafından yapılan deneylerdeki 3X ve 4X plâk yöntemlerinin yerleşim konfigürasyonunun aynı olduğu, tek farkın vida sayısı olduğu tespit edilmiştir. Pai et al. (2007) tarafından yapılan çalışma sonucunda 4X şekilli plâklarda, 3X şekilli plâklara göre daha fazla yanılma ayrılma olduğu belirtilmiştir. Fakat SEY analizleri gerçekleştirilen 3x ve 4x yöntemlerinde bu söylemin tam aksine, üç tane X- şekilli plâklarda, dört X şekilli plâklara göre daha fazla yanılma ayrılma olduğu tespit edilmiştir.

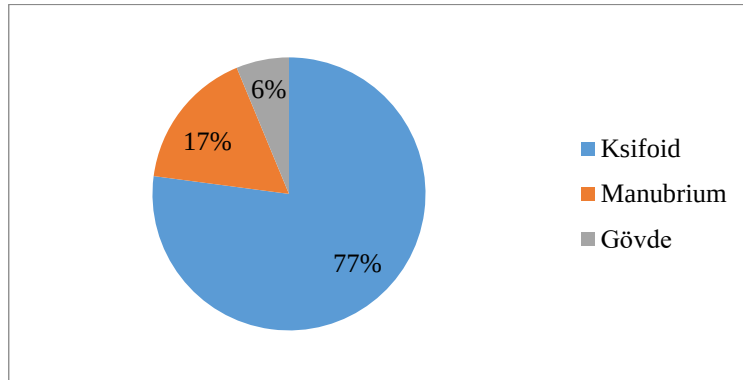
3x(alt), 3x(alt)(vida), 3x, 3x(vida), 4y, 4x, 4x(vida), 6d, 6t1x, 6t1x(vida), 4t2x ve 4t2x(vida) sabitleme yöntemlerinin sternumun ksifoid bölgesinde kuvvet etkisi altında ön ve arka yüzeylerinde yer değiştirmeler ölçülmüş ve Çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Plâkların kullanıldığı yöntemlerde, sternumun arka yüzeyinde daha büyük yer

değişikliklerin oluştuğu görülürken, tellerin kullanıldığı yöntemlerde ise yer değişikliklerinin hemen hemen aynı seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Sternumun ön ve arka yüzeyi arasındaki en büyük fark 4x(vida) yönteminden elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. Kuvvet etkisi altında sternumun ön ve arka yüzeyinde oluşan yer değişiklikleri.

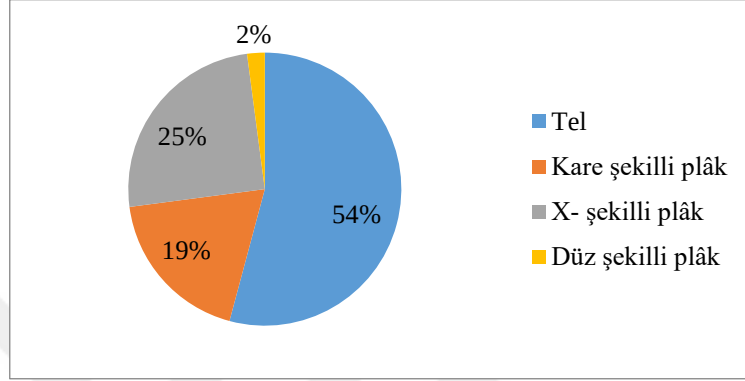
Sabitlenme yöntemi	Ön yüzey	Arka yüzey
3x(alt)	2,00	2,20
3x(alt)(vida)	2,00	2,38
3x	2,01	2,18
3x(vida)	2,02	2,18
4y	2,00	2,40
4x	2,00	2,35
4x(vida)	2,01	2,52
6d	2,04	2,11
6t1x	2,05	2,06
6t1x(vida)	2,07	2,15
4t2x	2,09	2,13
4t2x(vida)	2,03	2,07

Yanal ayrılma analizleri sonucunda sternumda oluşan von Mises gerilmeleri Ek 1’de sunulmuştur. Her yöntem için sternumda meydana gelen maksimum von Mises gerilmeleri bölgesel olarak incelendiğinde, maksimum gerilmelerin %77’lik bir oranla en çok ksifoid bölgesinde oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Yanal ayrılmada sternumda oluşan von Mises gerilmelerinin bölgesel dağılımı.

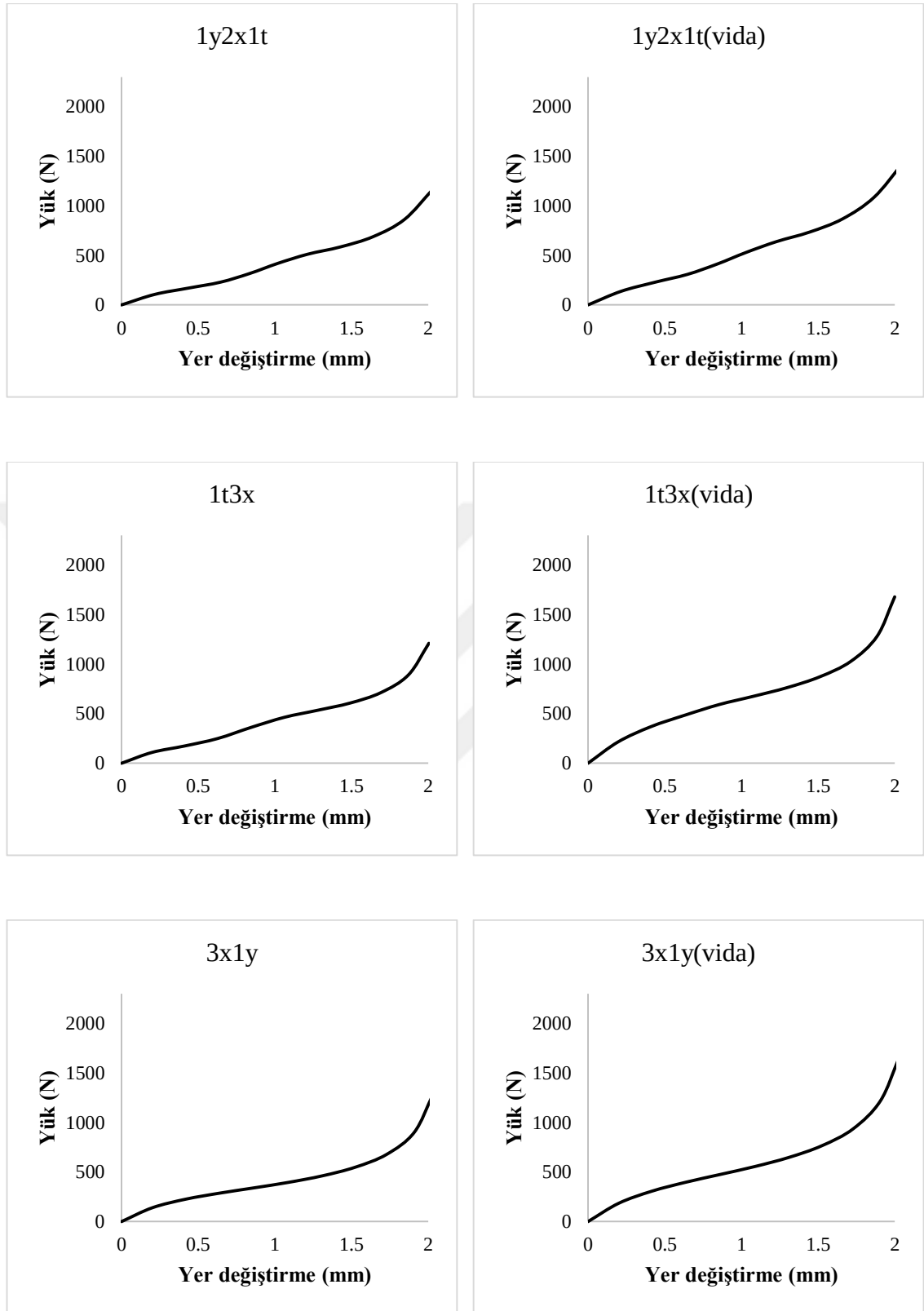
Oluşan maksimum von Mises gerilmeleri incelendiğinde telin, sternumda daha çok gerilme yığılmasına sebep olduğu görülmüştür. Yerleşim konfigürasyonunda tel bulunan yöntemlerin %92,6'lık kısmında oluşan gerilmeler telin olduğu kısımda görülürken, %7,4'lük kısmında ise X- şekilli plâkların olduğu kısımda görülmüştür. Sternal kapamalarda en büyük von Mises gerilmesinin hangi kapama malzemesine daha yakın bölgede oluştuğunun grafiksel gösterimi Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



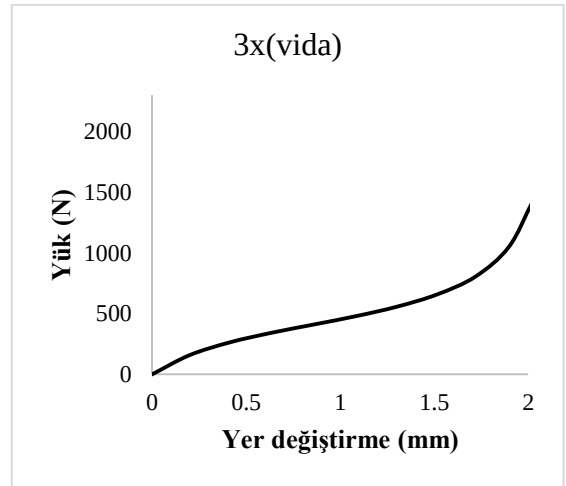
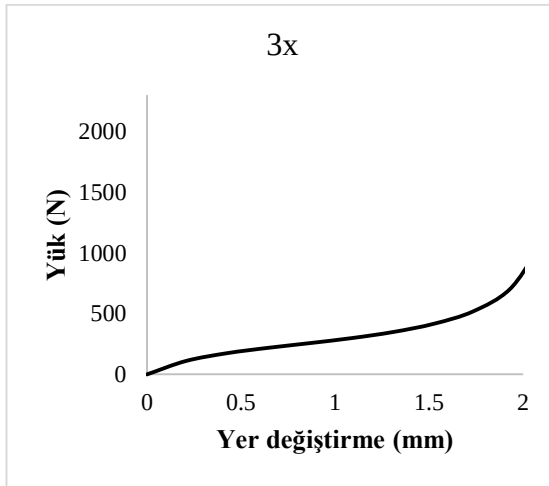
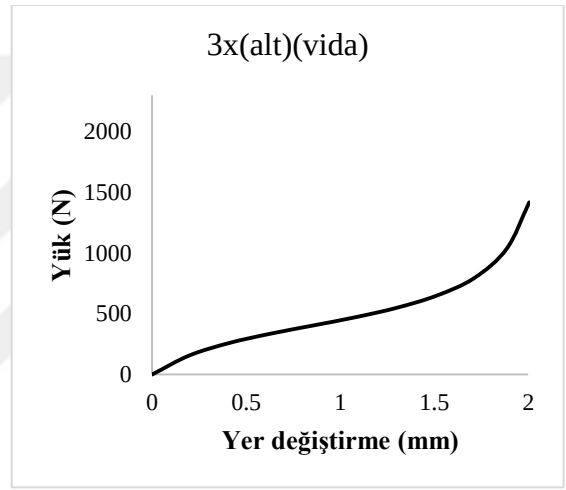
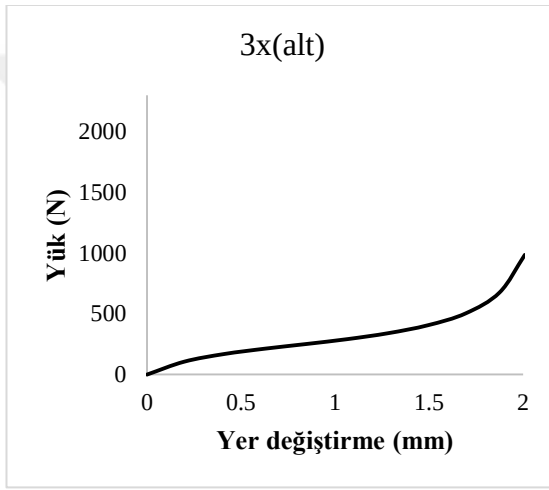
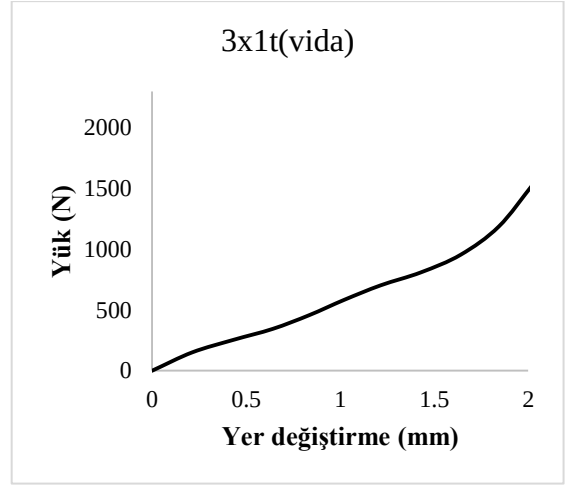
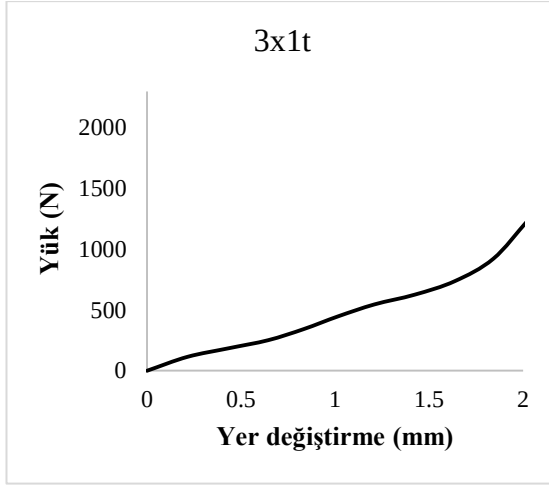
Şekil 4.13. Yanal ayrılımda sternumda maksimum von Mises gerilmelerine sebep olan sabitleme malzemelerinin dağılımı.

4.6. Boyuna Kesme Analiz Sonuçları

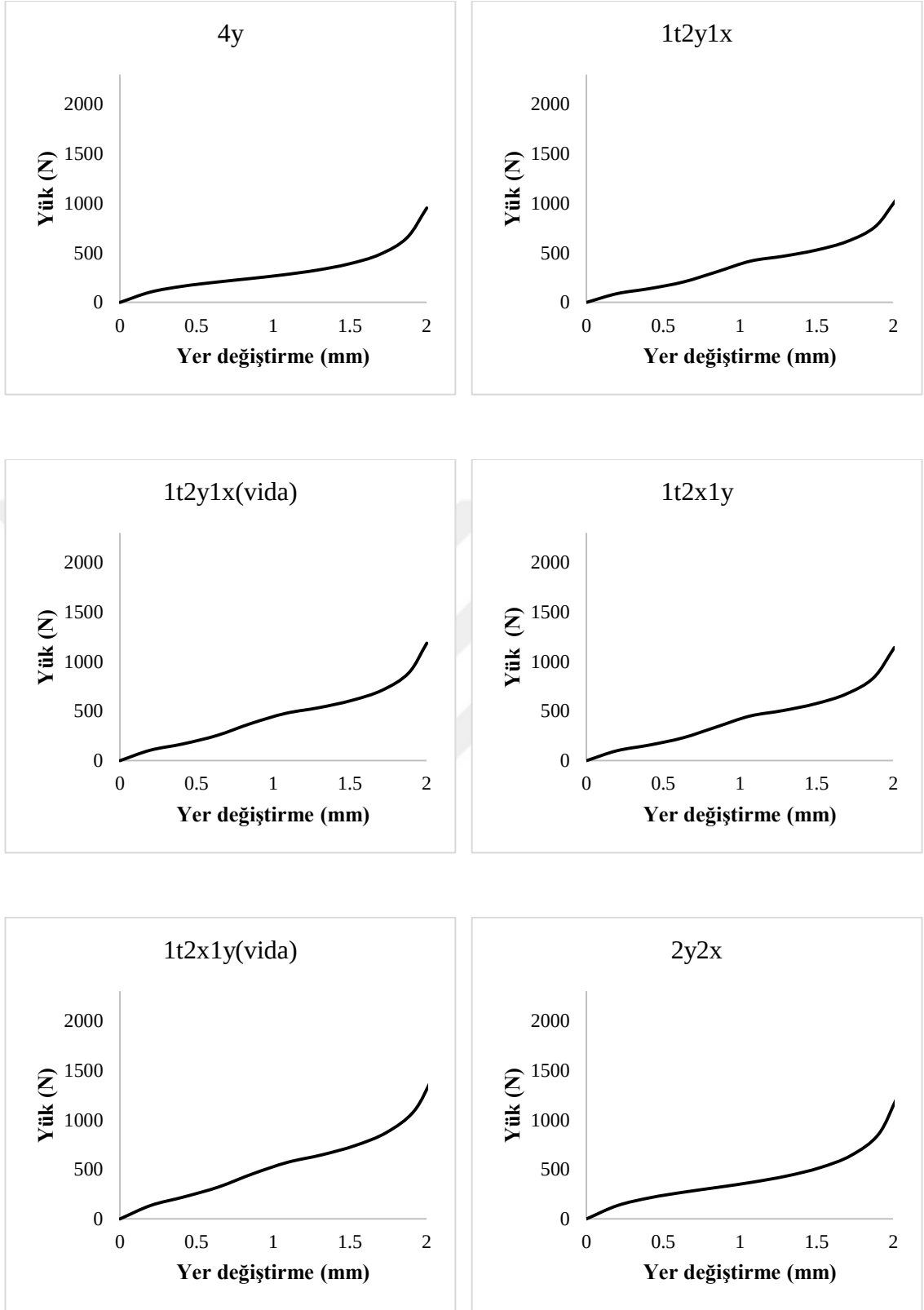
Çalışma kapsamında incelenen kapama tekniklerinin sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.14'de verilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrileri kullanılarak emniyet yükü ve direngenlik değerleri hesaplanıp bu değerler Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.



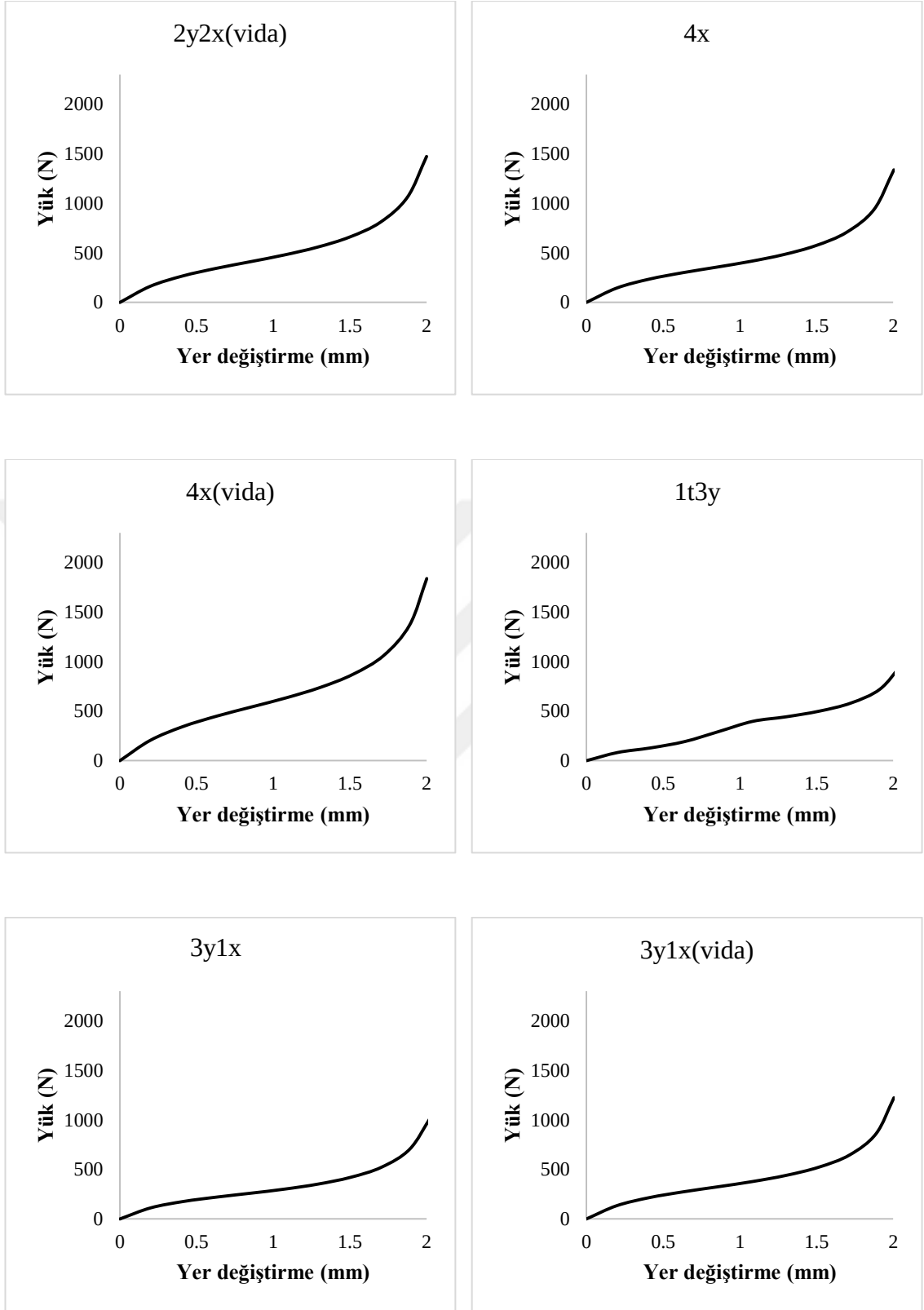
Şekil 4.14. SEY analizleri ile karşılaştırılan yöntemlerin boyuna kesme etkisinde oluşan yük-yer değiştirme eğrileri.



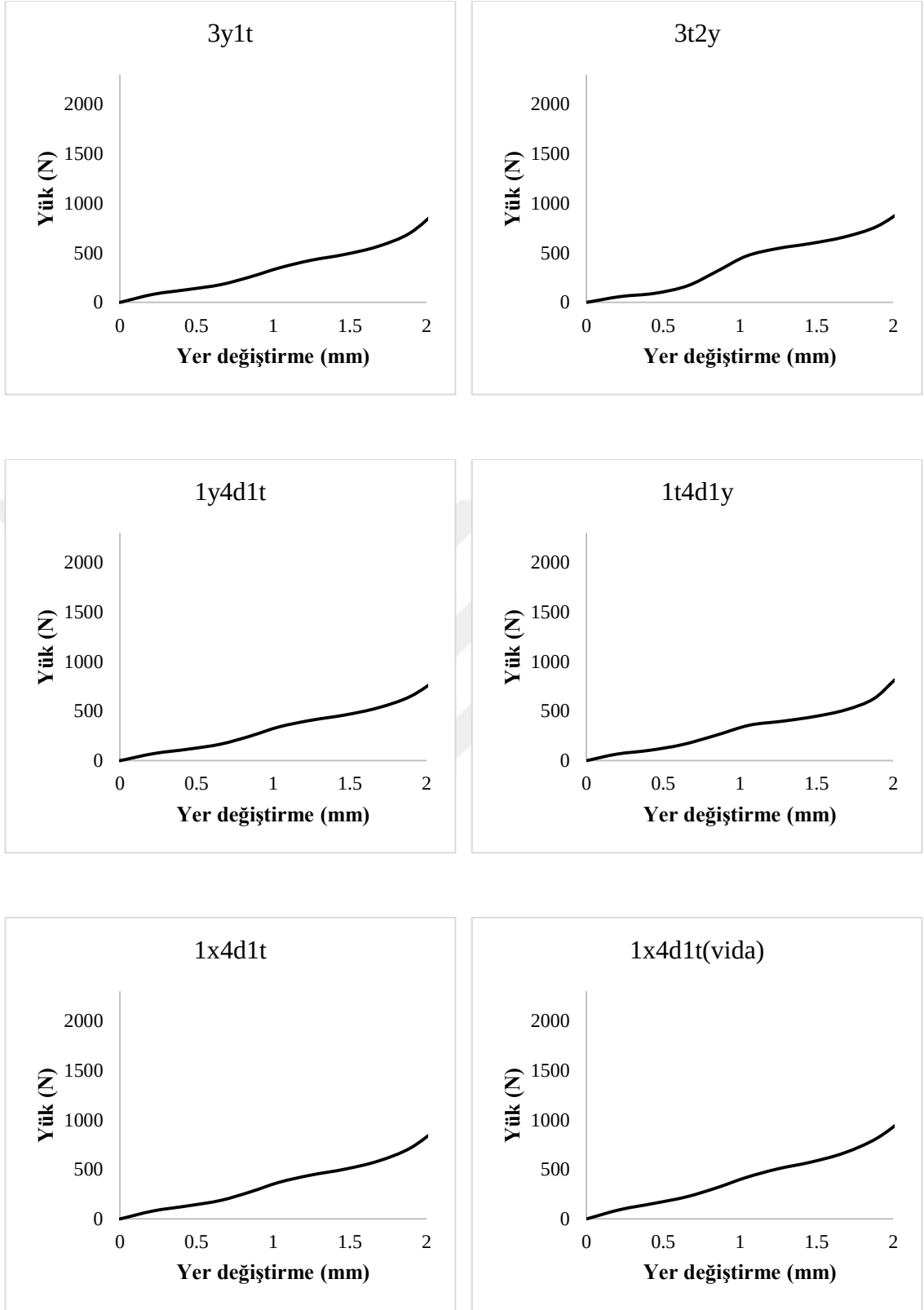
Şekil 4.14. (devam)



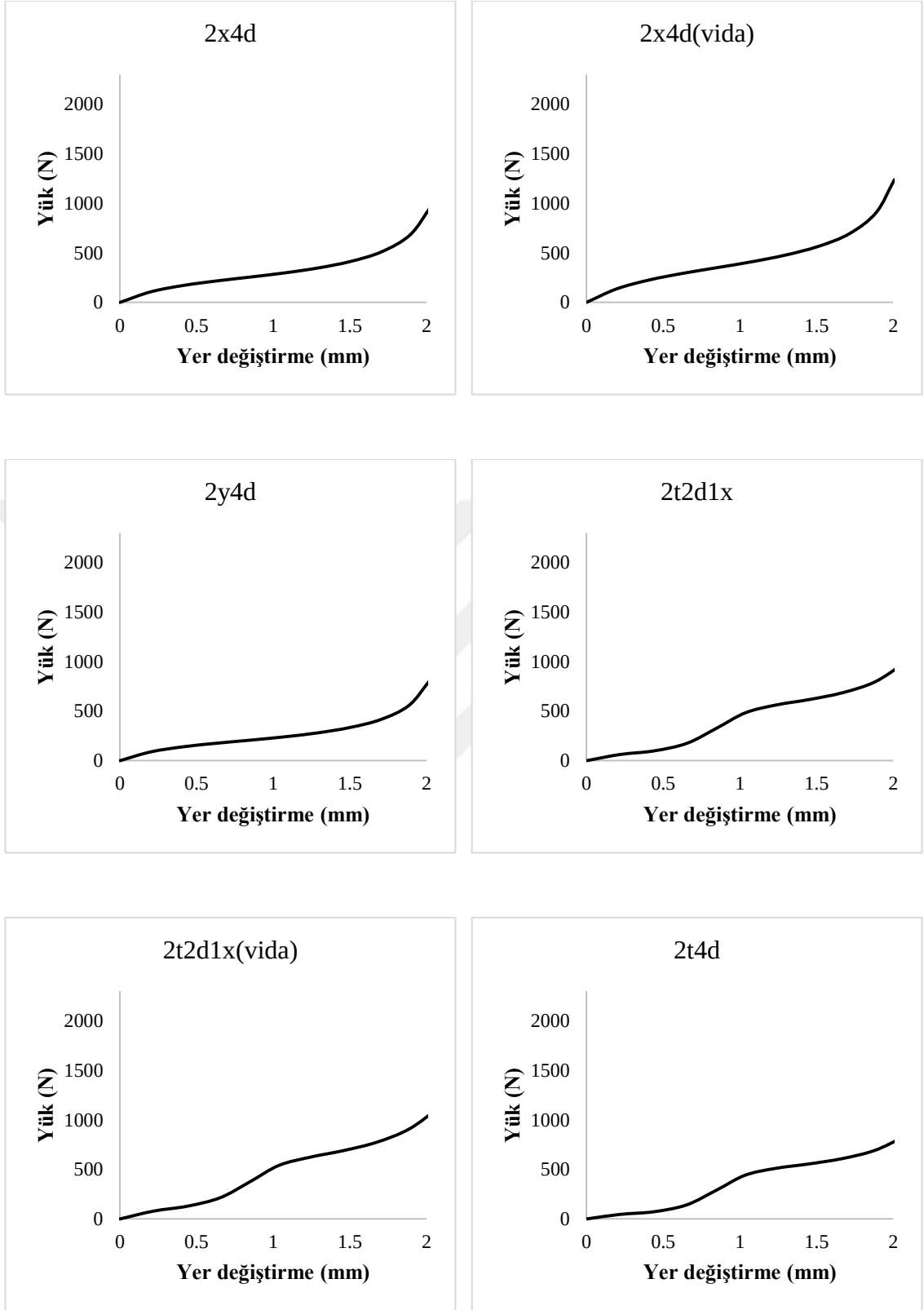
Şekil 4.14. (devam)



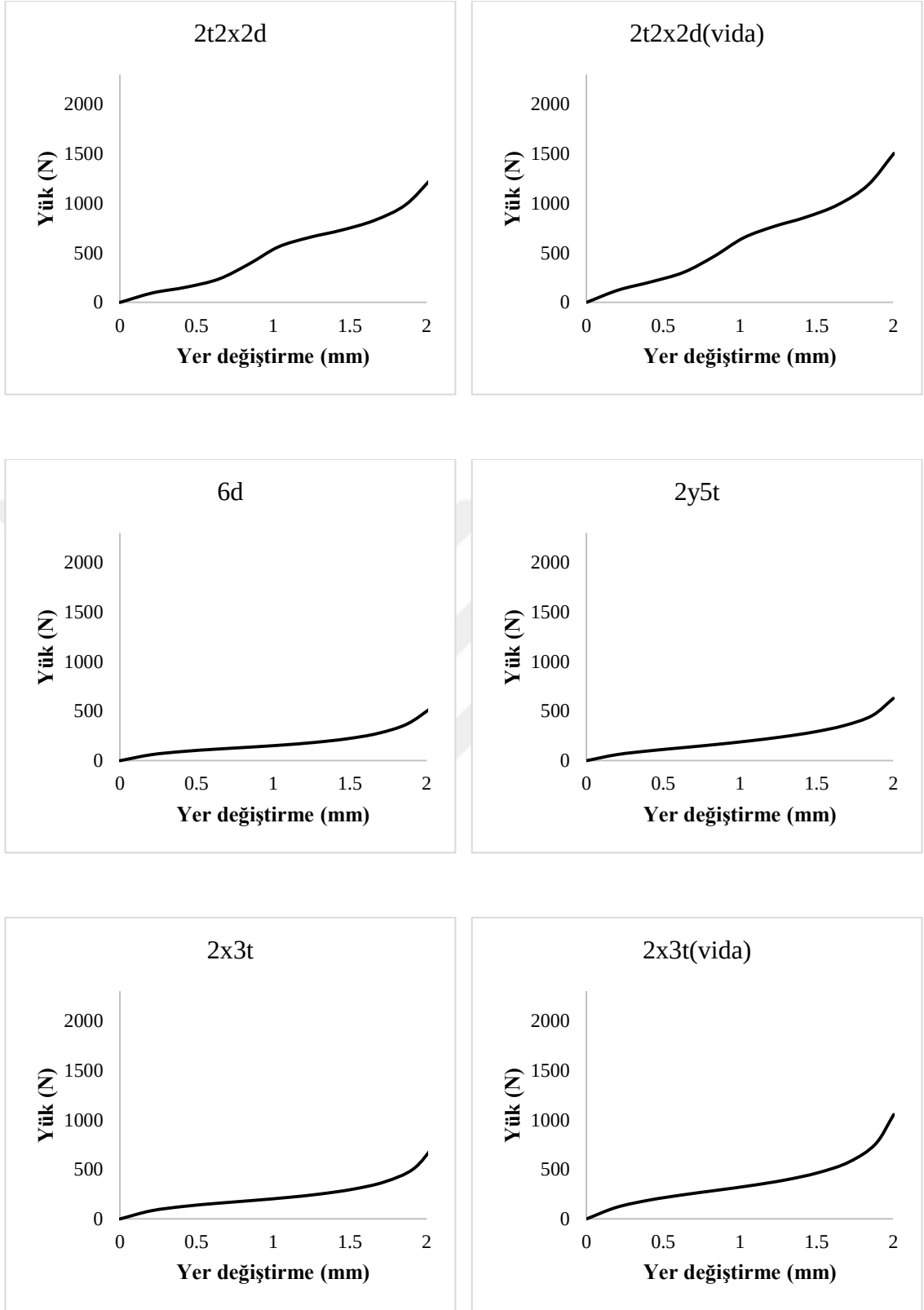
Şekil 4.14. (devam)



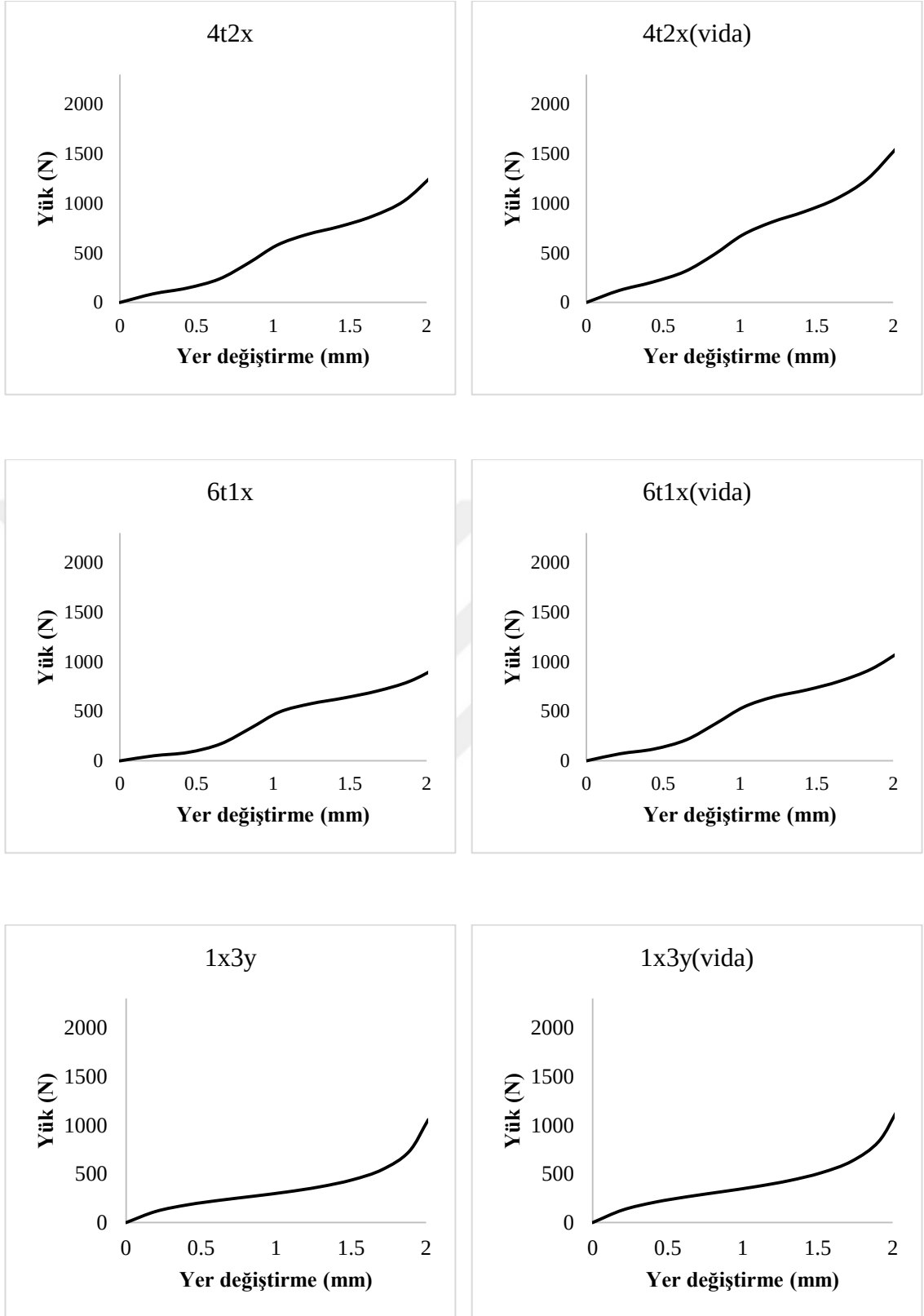
Şekil 4.14. (devam)



Şekil 4.14. (devam)



Şekil 4.14. (devam)



Şekil 4.14. (devam)

Çizelge 4.6. Boyuna kesmede sabitleme yöntemlerinin emniyet yükü ve direngenlik değerleri.

Sabitleme yöntemi	Emniyet Yüğü (N)	Direngenlik (N/mm)
1y2x1t	1.117,0	569,8
1y2x1t(vida)	1.332,7	679,1
1t3x	1.199,3	578,9
1t3x(vida)	1.678,8	785,0
3x1y	1.185,4	561,4
3x1y(vida)	1.550,6	721,7
3x1t	1.193,6	602,7
3x1t(vida)	1.484,6	740,4
3x(alt)	963,7	454,6
3x(alt)(vida)	1.397,4	635,2
3x	853,9	454,5
3x(vida)	1.351,5	638,5
4y	949,9	442,0
1t2y1x	996,6	509,9
1t2y1x(vida)	1.182,2	572,1
1t2x1y	1.122,4	551,5
1t2x1y(vida)	1.316,9	665,8
2y2x	1.146,3	539,7
2y2x(vida)	1.472,9	653,7
4x	1.321,8	590,7
4x(vida)	1.832,3	805,3
1t3y	872,1	480,7
3y1x	963,3	465,6
3y1x(vida)	1.205,4	543,7
3y1t	838,4	473,2
3t2y	869,2	517,0
1y4d1t	753,2	445,8
1t4d1y	800,6	438,7
1x4d1t	833,7	479,8
1x4d1t(vida)	932,1	529,3
2x4d	907,9	453,6
2x4d(vida)	1.214,1	566,9
2y4d	770,1	390,6
2t2d1x	911,9	535,4
2t2d1x(vida)	1.032,9	591,6
2t4d	778,1	481,4
2t2x2d	1.199,7	640,1
2t2x2d(vida)	1.493,8	751,8
6d	500,9	296,6

Çizelge 4.7. (devam)

2y5t	626,55	340,6
2x3t	653,87	359,6
2x3t(vida)	1.042,52	491,7
4t2x	1.226,60	661,5
4t2x(vida)	1.520,13	784,2
6t1x	887,34	534,1
6t1x(vida)	1.059,21	606,9
1x3y	1.017,32	478,2
1x3y(vida)	1.069,25	525,2

Yapılan SEY analizlerinde en iyi emniyet yükü değeri 4x(vida) sabitleme konfigürasyonundan elde edilmiş ve onu sırasıyla 1t3x(vida), 3x1y(vida), 4t2x(vida) sabitleme konfigürasyonları takip etmiştir.

3x1y, 3x1y(vida), 3x1t ve 3x1t(vida) yöntemleri emniyet yükü bakımından karşılaştırıldığında en iyi sonucun yanal ayrılmadaki gibi 3x1y(vida) yönteminden elde edildiği görülmüştür. Yanal ayrılmada ksifoid bölgesinde yıldız şekilli plâk kullanımının daha etkili olduğu görülmüş fakat boyuna kesmede ksifoid bölgesinde yıldız şekilli plâk veya tel kullanımı arasında belirgin bir farklılık görülmemiştir.

3x(alt), 3x(alt)(vida), 3x, 3x(vida) yöntemleri emniyet yükü bakımından karşılaştırıldığında en iyi sonuç yanal ayrılmadaki gibi 3x(alt)(vida) yönteminden elde edilmiştir. 3x(alt)(vida) ve 3x(vida) yöntemleri plâk yerleşimi açısından incelendiğinde tam ksifoid bölgesine oturtulacak şekilde alttan yapılan sabitlemenin hem yanal ayrılmada hem de boyuna kesmede emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından önemli bir avantaj sağladığı görülmüştür.

1y2x1t, 1y2x1t (vida), 1t2x1y, 1t2x1y(vida) yöntemleri karşılaştırıldığında en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri yanal ayrılmada 1t2x1y(vida) yönteminden elde edilirken boyuna kesmede 1y2x1t (vida) yönteminden elde edilmiştir. Yanal ayrılmada manubrium bölgesine tel, ksifoid bölgesine yıldız şekilli plâk kullanımının daha iyi bir kapama sağladığı görülürken, boyuna kesmede kullanımlar arasında belirgin bir farklılık görülmemiştir.

2y2x, 2y2x(vida), 2y4d yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında yanal ayrılmada en iyi sonuç 2y4d yönteminden elde edilirken boyuna kesmede 2y2x(vida) yönteminden elde edilmiştir. Yanal ayrılmada yöntemler arasında emniyet yükü ve direngenlik değerleri bakımından çok da belirgin bir farklılık görülmezken boyuna kesmede çok belirgin bir fark görülmüştür. Emniyet yükü, direngenlik ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerleri dikkate alındığında, sternumun gövde kısmına X- şekilli plâk kullanılmasının oldukça önemli bir avantaj sağladığı görülmektedir.

1t3x, 1t3x(vida) ve 1t3y yöntemleri karşılaştırıldığında yanal ayrılmada görüldüğü gibi en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri çok belirgin bir farkla 1t3x(vida) yönteminden elde edilmiştir. 1t3x ve 1t3x(vida) yöntemleri incelendiğinde plâklardaki tüm yuvaların vidalanmasının emniyet yükü ve direngenlik etkisi bakımından oldukça önemli bir üstünlük sağladığı görülmektedir.

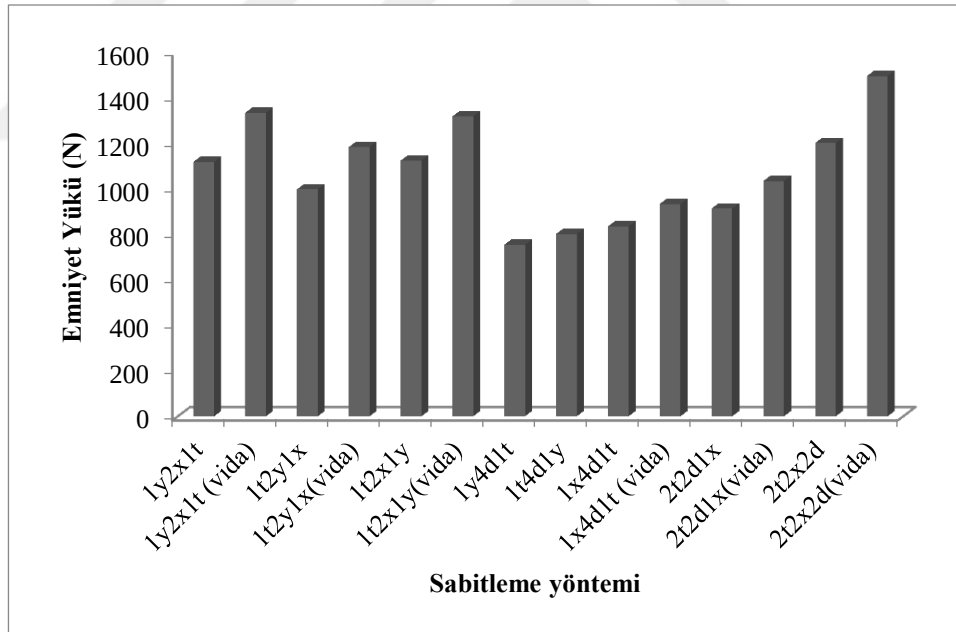
2x4d, 2x4d(vida), 2y4d ve 2t4d yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 2x4d(vida) yönteminden elde edilmiştir. Sternumun manubrium ve ksifoid bölgelerinde tel, X- şekilli ve yıldız şekilli plâk kullanımının etkinlikleri emniyet yükü, direngenlik ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerlerine göre incelendiğinde, yanal ayrılmada da görüldüğü gibi X- şekilli plâkların daha iyi bir kapama sağladığı tespit edilmiştir.

1y4d1t, 1x4d1t, 1x4d1t (vida) ve 2t4d yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında en iyi sonuç 1x4d1t (vida) yönteminden elde edilmiştir. Manubriumda tel, X- şekilli ve yıldız şekilli plâk kullanımının etkinlikleri incelendiğinde, yanal ayrılmada da görüldüğü gibi X- şekilli plâkların daha iyi bir kapama sağladığı tespit edilmiştir.

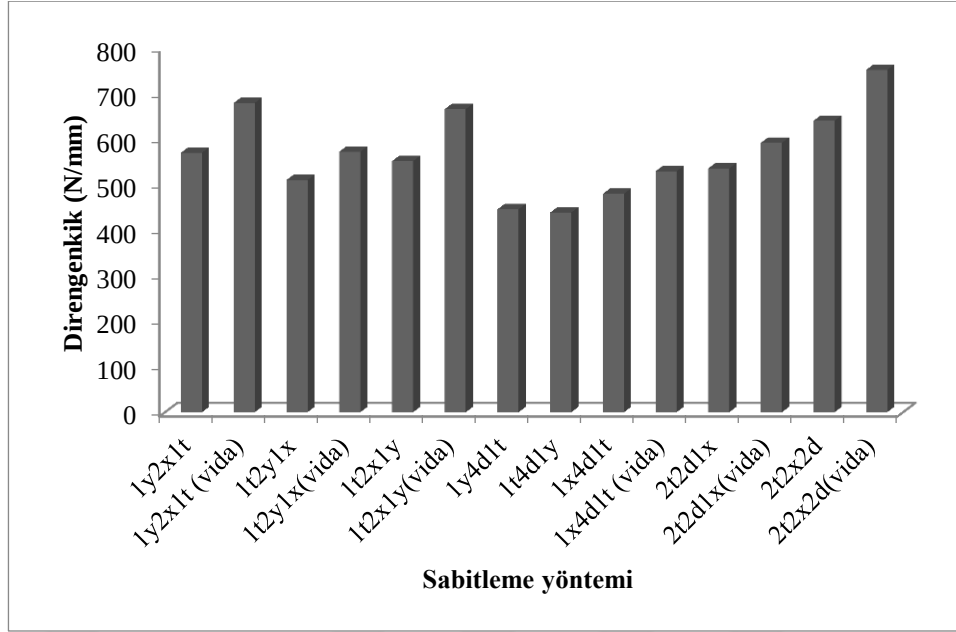
1y4d1t ve 1t4d1y yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 1t4d1y yönteminden elde edilmiştir. Yanal ayrılmada manubrium bölgesine tel, ksifoid bölgesine yıldız şekilli plâk kullanımının daha iyi bir kapama sağladığı görülmüşken boyuna kesmede belirgin bir farklılık görülmemiştir.

3x(alt), 3x(alt)(vida), 4x ve 4x(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 4x(vida) yönteminden elde edilmiştir. 3x(alt)(vida) yönteminde üç plâk, 4x yönteminde dört plâk olmasına rağmen yöntemler emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında kullanılan vida sayısından kaynaklı 3x(alt)(vida) yönteminden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Üç farklı sabitleme malzemesi kullanılarak oluşturulan 1y2x1t, 1y2x1t (vida), 1t2y1x, 1t2y1x(vida), 1t2x1y, 1t2x1y(vida), 1y4d1t, 1t4d1y, 1x4d1t, 1x4d1t (vida), 2t2d1x, 2t2d1x(vida), 2t2x2d, 2t2x2d(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 2t2x2d(vida) yönteminden elde edilmiştir. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da gösterildiği gibi bu yöntemler arasında emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alındığında X- şekilli plâkların kullanıldığı yöntemlerde nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Boyuna kesmede sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri



Şekil 4.16. Boyuna kesmede sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri

X- şekilli plâk ve telin birlikte kullanıldığı 2x3t, 2x3t(vida), 4t2x, 4t2x(vida), 6t1x ve 6t1x(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 4t2x(vida) yönteminden elde edilmiştir. Emniyet yükü, direngenlik ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerlerine göre, yanal ayrılmada manubrium ve ksifoid bölgelerine plâklarla, gövde kısmına ise tellerle yapılan sabitlemenin daha iyi sonuçlar ortaya çıkardığı görülürken, boyuna kesmede manubrium ve ksifoid bölgelerine tellerle, gövde kısmına ise plâklarla yapılan sabitlemede daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sternumun gövdesinde tel, manibrium ve ksifoid bölgesinde yıldız şekilli veya X- şekilli plâkların kullanıldığı 2y5t, 2x3t ve 2x3t(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 2x3t(vida) yönteminden elde edilmiştir. Manibrium ve ksifoid bölgesinde X- şekilli plâk kullanımının emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından oldukça önemli bir üstünlük sağladığı görülmektedir.

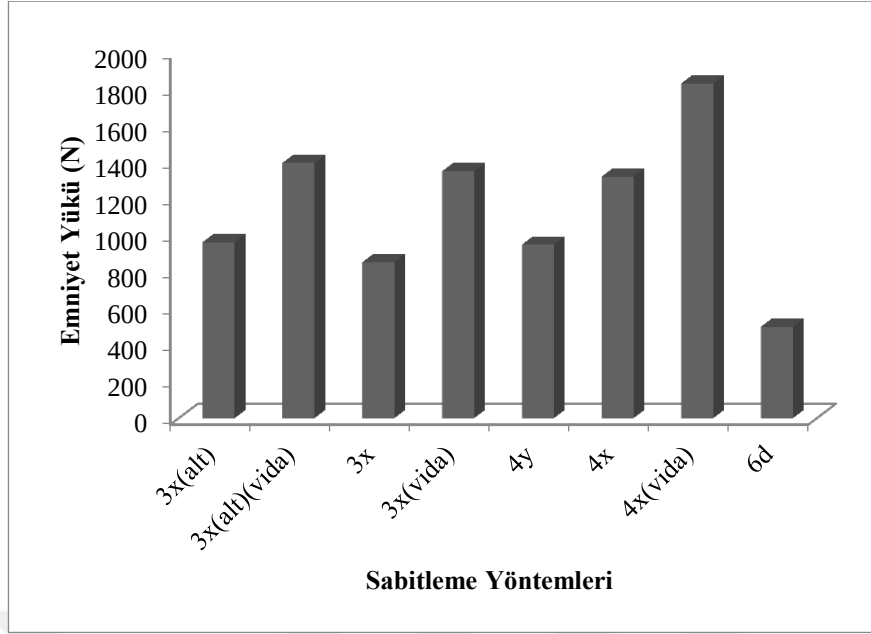
Sternumun manibrium ve ksifoid bölgelerinde yıldız şekilli plâk, gövdesinde ise farklı sabitleme malzemelerinin kullanılıp incelendiği 2y2x, 2y2x(vida), 2y4d ve 2y5t yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 2y2x(vida) yönteminden elde edilmiştir. Yöntemlerin emniyet yükü, direngenlik

ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerleri dikkate alındığında yanal ayrılmada gövdede tel kullanımının, X- şekilli ve düz şekilli plâk kullanımına göre çok daha iyi bir davranış gösterdiği, boyuna kesmede ise gövdede X- şekilli plâk kullanımının, tel ve düz şekilli plâk kullanımına göre çok daha iyi bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

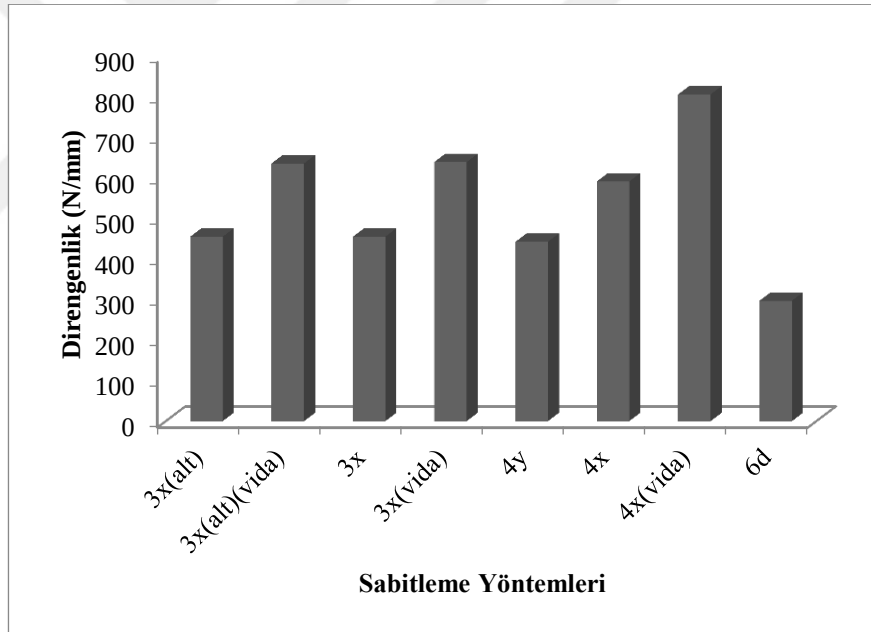
1t3x, 1t3x(vida), 3x1t ve 3x1t(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç çok belirgin bir farkla 1t3x(vida) yönteminden elde edilmiştir. Yöntemlerin emniyet yükü, direngenlik ve kuvvet etkisi altında oluşan yer değiştirme değerleri dikkate alındığında, en iyi sonuç manubriumda tel, ksifoidde plâk kullanım konfigürasyonundan elde edilmiştir.

Yıldız şekilli ve X- şekilli plâk etkisinin incelenebileceği 4y, 4x, 4x(vida) yöntemleri emniyet yükü ve direngenlik değeri bakımından karşılaştırıldığında, en iyi sonuç 4x(vida) yönteminden elde edilmiştir. 4y ve 4x yöntemlerinde kullanılan plâk ve vida sayısı aynı olmasına rağmen, X- şekilli plâk kullanımının emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alındığında çok daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

Tek çeşit plâk kullanımının tercih edilmesi durumunda 3x(alt), 3x(alt)(vida), 3x, 3x(vida), 4y, 4x, 4x(vida) ve 6d sabitleme yöntemleri karşılaştırıldığında en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterildiği gibi 4x(vida) yönteminden elde edilmiştir.



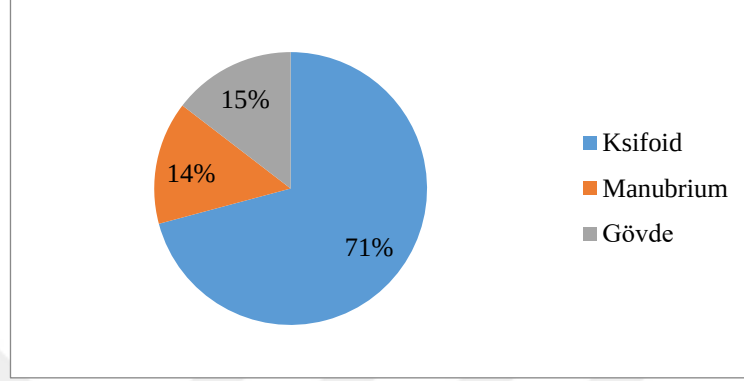
Şekil 4.17. Boyuna kesmede plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin emniyet yükleri



Şekil 4.18. Boyuna kesmede plâklarla yapılan sabitleme yöntemlerinin direngenlik değerleri.

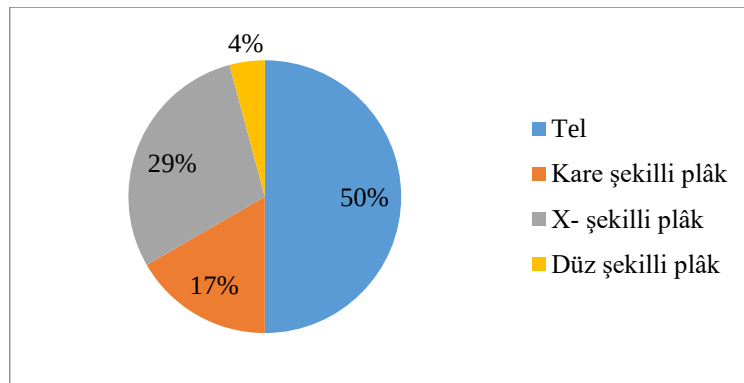
Yöntemlerin etkinlikleri emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alındığında, plâkların tüm yuvalarının vidalanması şartıyla X- şekilli plâkların, düz şekilli ve yıldız şekilli plâklara göre daha iyi bir kapama sağladığı tespit edilmiştir. X-şekilli plâklardan sonra en iyi davranış yıldız şekilli plâklarda görülmüştür.

Boyuna kesme analizleri sonucunda sternumda oluşan von Mises gerilmeleri Ek 2’de sunulmuştur. Her yöntem için sternumda meydana gelen maksimum von Mises gerilmeleri bölgesel olarak incelendiğinde, maksimum gerilmelerin %71’lik bir oranla en çok ksifoid bölgesinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Boyuna kesmede sternumda oluşan von Mises gerilmelerinin bölgesel dağılımı.

Oluşan maksimum von Mises gerilmeleri incelendiğinde telin, sternumda daha çok gerilme yığılmasına sebep olduğu görülmüştür. Yerleşim konfigürasyonunda tel bulunan yöntemlerin %92,6’lık kısmında oluşan gerilmeler telin olduğu kısımda görülürken, %7,4’lük kısmında ise X- şekilli plâkların olduğu kısımda görülmüştür. Sternal kapamalarda en büyük von Mises gerilmesinin hangi kapama malzemesine daha yakın bölgede oluştuğunun grafiksel gösterimi Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Boyuna kesmede sternumda maksimum von Mises gerilmelerine sebep olan sabitleme malzemelerinin dağılımı.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada kapsamında X- şekilli, yıldız şekilli ve düz şekilli titanyum plâkların etkinliği, plâkların çelik tellerle birlikte kullanıldığında nasıl davranış gösterdiği ve plâkların vida etkisi incelenmiştir. Oluşturulan kırk sekiz farklı sternum sabitleme yöntemi sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alınarak incelenip karşılaştırılmıştır.

Analizlerden belirlenen emniyet yükü ve direngenlik değerlerine göre elde edilen sonuçlar ve yapılan değerlendirmeler maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Yanal ayrılma yükleme etkisinde sternumun ön ve arka yüzeyindeki yer değiştirmeler incelendiğinde plâkların kullanıldığı yöntemlerde, sternumun arka yüzeyinde daha büyük yer değiştirmelerin olduğu, tellerin kullanıldığı yöntemlerde yer değiştirmelerin hemen hemen aynı seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Plâkların kullanıldığı yöntemlerde görülen, sternumun ön ve arka yüzeyindeki yer değiştirme farkları kemik iyileşmesi bakımından olumsuz sonuçlar oluşturabilecektir.
- Tüm yöntemlerin emniyet yükü ve direngenlik değerleri incelendiğinde boyuna kesme yükleme etkisinde X- şekilli plâk kullanılan yöntemlerde, yan al ayrılma yükleme etkisinde ise yıldız şekilli ve X- şekilli plâk kullanılan yöntemlerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Düz şekilli ve yıldız şekilli plâkların emniyet yükü ve direngenlik değerleri incelendiğinde yan al ayrılmada iyi bir kapama davranışı gösterdiği belirlenirken boyuna kesmede oldukça zayıf bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir.
- Yapılan SEY analizlerinde en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri yan al ayrılma yükleme etkisinde 2x4d(vida) sabitleme yönteminden elde edilirken, boyuna kesme yükleme etkisi altında 4x(vida) sabitleme yönteminden elde edilmiştir.

- Tel ve plâkların birlikte kullanıldığı sternal kapamalarda en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri yanal ayrılma yükleme etkisinde 2y5t sabitleme yönteminden elde edilirken, boyuna kesme yükleme etkisi altında 1t3x(vida) sabitleme yönteminden elde edilmiştir.
- Yıldız şekilli plâkların kullanıldığı sternal kapamalarda en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri yanal ayrılma yükleme etkisinde 2y5t sabitleme yönteminden elde edilirken, boyuna kesme yükleme etkisi altında 3x1y(vida) sabitleme yönteminden elde edilmiştir.
- X-şekilli plâkların kullanıldığı sternal kapamalarda en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri yanal ayrılma yükleme etkisinde 2x4d(vida) sabitleme yönteminden, boyuna kesme yükleme etkisi altında 4x(vida) sabitleme yönteminden elde edilmiştir.
- Düz plâkların kullanıldığı sternal kapamalarda en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri yanal ayrılma yükleme etkisinde 2x4d(vida) sabitleme yönteminden elde edilirken, boyuna kesme yükleme etkisi altında 2t2x2d(vida) sabitleme yönteminden elde edilmiştir.
- Sternal kapamalarda en iyi emniyet yükü ve direngenlik değeri her iki yükleme etkisi dikkate alındığında en iyi sonuç 4x(vida) yönteminden elde edilmektedir. Bu yüzden plâkla yapılan sternal kapamalarda bu yöntem tercih edilebilir.
- Vida etkisinin incelendiği sabitleme yöntemlerinde plâkların tüm yuvalarının vidalanmasının, emniyet yükü bakımından oldukça önemli bir avantaj sağladığı görülmektedir. Bu yüzden sternal kapamalarda plâkların tüm yuvalarının vidalanması önerilmektedir.
- Tüm yöntemlerin emniyet yükü ve direngenlik değerleri incelendiğinde boyuna kesme yükleme etkisinde X- şekilli plâk kullanılan yöntemlerde, yanal ayrılma yükleme etkisinde ise yıldız şekilli ve X- şekilli plâk kullanılan yöntemlerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu yüzden her iki yükleme etkisi dikkate

alındığında sabitlemelerde X- şekilli plâk kullanımının daha avantajlı olacağı düşünülmekte fakat sternumun ksifoid bölgesinde ön ve arka yüzeyde oluşan yer değiştirmeler kemik iyileşmesi bakımından olumsuz sonuçlar oluşturabileceği de dikkate alınmalıdır.

- Gelecek çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle incelenen bu yöntemlerin deneysel çalışmaları gerçekleştirilebilir veya hastalar üzerinde klinik olarak uygulamaları yapılabilir. Ayrıca, plâk ve vida yerleşiminde en uygun noktaların belirlenebilmesi için bir topoloji optimizasyonu çalışması gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Anonim, 2021a. Web Sitesi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Sternum>, Eriřim Tarihi: 09.11.2021.
- Anonymous, 2021b. Web Sitesi: <https://mmcts.org/tutorial/80>, Eriřim Tarihi: 17.11.2021.
- Anonymous, 2021c. Web Sitesi: http://synthes.vo.llnwd.net/o16/LLNWMB8/US%20Mobile/Synthes%20North%20America/Product%20Support%20Materials/Technique%20Guides/DSUSCMF10160627_Ti_SternalFixSys_TG_150dpi.pdf, Eriřim Tarihi: 21.12.2021.
- Anonymous, 2021d. Web Sitesi: <https://www.jsshuangyang.com/titanium-chest-locking-plate-product/>, Eriřim Tarihi: 21.12.2021.
- Anonymous, 2021e. Web Sitesi: <https://slideplayer.com/slide/7042083/>, Eriřim Tarihi: 16.03.2022.
- Anonymous, 2021f. Web Sitesi: <http://makinacitu.blogspot.com/2014/02/mesh-parametreleri.html>, Eriřim Tarihi: 16.03.2022.
- Al-Abassi, A., Papini, M., Towler, M. 2022. Review of biomechanical studies and finite element modeling of sternal closure using bio-active adhesives. *Bioengineering*, 9(5), 198.
- Alhalawani, A. M. F. and Towler, M. R. 2013. A review of sternal closure techniques. *Journal of Biomaterials Applications*, 28(4), 483-497
- Arnoni, R. T., Dantas, D. C., Arnoni, A., Nigro Neto, C. and Abdulmassih Neto, C. 2013. Assessment of sternal closure using titanium plate. *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular*, 28(3), 386-390.
- Avtaar Singh S. S., Capoccia, M., Deep, K. and Al-Attar, N. 2017. Sternal malunion fixation using a titanium sternal fixation system in a diabetic patient. The first of its kind in Scotland. *Vessel Plus Journal*, 1, 242-245.
- Casha, A. R., Manch , A., Gauci, M., Camilleri-Podesta, M. T., Schembri-Wismayer, P., Sant, Z., Gatt, R. and Grima, J. N. 2012. Placement of trans-sternal wires according to an ellipsoid pressure vessel model of sternal forces. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 14(3), 283-287.
- Casha, A. R., Manch , A., Gatt, R., Duca, E., Gauci, M., Schembri-Wismayer, P., Camilleri-Podesta, M. T. and Grima, J. N. 2014. Mechanism of sternotomy dehiscence. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 19(4), 617-621.

- Casha, A. R., Yang, L., Kay, P. H., Saleh, M. and Cooper, G.J. 1999. A biomechanical study of median sternotomy closure techniques. *European Journal of Cardiothoracic Surgery*, 15 (3), 365-369.
- Casha, A. R., Camilleri, L., Manché, A., Gauci, M., Magri, C. J., Agius, A., Yang, L. 2017. Effect of sternal wire twisting on sternotomy closure rigidity. *Indian Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 34(1), 25–30.
- Cicilioni, O. J. Jr, Stieg, F. H. 3rd and Papanicolaou, G. 2005. Sternal wound reconstruction with transverse plate fixation. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 115(5), 1297-1303.
- Cohen, D. J. and Griffin, L. V. 2002. A biomechanical comparison of three sternotomy closure techniques. *The Annals of Thoracic Surgery*, 73(2), 563-568.
- Çiçek, S. 2018. Sternal closure: wires still the king!. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 156(4), 1596-1597.
- Dasika, U. K., Trumble, D. R. and Magovern, J. A. 2003. Lower sternal reinforcement improves the stability of sternal closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 75 (5), 1618-1621.
- Dieselman, J. C. 2011. Comparison of alternative rigid sternal fixation techniques. MS Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 45, Worcester, Massachusetts.
- Eberle, S., Gerber, C., von Oldenburg, G., Högel, F., Augat, P. 2010. A biomechanical evaluation of orthopaedic implants for hip fractures by finite element analysis and in-vitro tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 224(10), 1141–1152.
- Elfström, A. and Grunditz, A. 2013. Evaluation of sternum closure techniques using finite element analysis. MS Thesis, The Royal Institute of Technology, 37, Flemingsberg, Sweden.
- Elghonemy, Y. F. and Hussein, M. A. 2016. Titanium plate fixation versus wire sternal closure in coronary artery bypass graft patients: Need for rigid sternal fixation. *Journal of the Egyptian Society of Cardio-Thoracic Surgery*, 24(2), 150-158.
- Fawzy, H., Alhodaib, N., Mazer, C. D., Harrington, A., Latter, D., Bonneau, D., Errett, L. and Mahoney, J. 2009. Sternal plating for primary and secondary sternal closure; can it improve sternal stability?. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 4(19).
- Fawzy, H., Osei-Tutu, K., Errett, L., Bonneau, D., Musgrave, M. and Mahoney, J. 2011. Sternal plate fixation for sternal wound reconstruction: initial experience (retrospective study). *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 6(1).

- Fedak, P. W. M. and Kasatkin, A. 2011. Enhancing sternal closure using kryptonite bone adhesive: technical report. *Surgical Innovation*, 18(4), 8-11.
- Fedak, P. W. M., Kolb, E., Borsato, G., Frohlich, D. E. C., Kasatkin, A., Narine, K., Akkarapaka, N. and King, K. M. 2010. Kryptonite bone cement prevents pathologic sternal displacement. *The Annals of Thoracic Surgery*, 90(3), 979-985
- Gandhi, H. S. 2019. Rationale and options for choosing an optimal closure technique for primary midsagittal osteochondrotomy of the sternum, part 2: a theoretical and critical review of techniques and fixation devices. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 47(1), 27-57.
- Goffin, J. M., Pankaj, P., Simpson, A. H. 2012. The importance of lag screw position for the stabilization of trochanteric fractures with a sliding hip screw: a subject-specific finite element study. *Journal of Orthopaedic Research*, 31(4), 596-600.
- Grapow, M., Haug, M., Tschung, C., Winkler, B., Banerjee, P., Heinisch, P. P., Fassl, J., Reuthebuch, O. and Eckstein, F. 2017. Therapy options in deep sternal wound infection: Sternal plating versus muscle flap. *PLoS One*, 12(6).
- Hirose, H., Yamane, K., Youdelman, B. A., Bogar, L. and Diehl, J. T. 2011. Rigid sternal fixation improves postoperative recovery. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, 5, 148-152.
- Hirsch, E. M., Atoui, R., McCarthy, P. M., McGee, E. C., Malaisrie, S. C. and Lee, R. 2010. Sternal salvage with rigid plating system after failure of talon device. *The Annals of Thoracic Surgery*, 90(4), 1366.
- Huh, J., Bakaeen, F., Chu, D. and Wall, M. J. Jr. 2008. Transverse sternal plating in secondary sternal reconstruction. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 136(6), 1476-1480.
- Julian, O. C., Lopez-Belio M., Dye, W. S., Javid H., Grove W. J. 1957. The median sternal incision in intracardiac surgery with extracorporeal circulation: a general evaluation of its use in heart surgery. *Surgery*, 42(4), 753-61.
- Kaplan, G., 2013. Esnek mekanizmaların sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana bilim Dalı, 137, Ankara
- Kiessling, A-H., Isgro, F., Weisse, U., Möltner, A., Saggau, W., Boldt, J. 2005. Advanced sternal closure to prevent dehiscence in obese patients. *The Annals of Thoracic Surgery*, 80(4), 1537-1539.
- Lee, J. C., Raman, J. and Song, D. H. 2010. Primary sternal closure with titanium plate fixation: plastic surgery effecting a paradigm shift. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 125(6), 1720-1724.

- Liao, J. M., Chan, P., Cornwell, L., Tsai, P. I., Joo, J. H., Bakaeen, F. G., Luketich, J. D. and Chu, D. 2019. Feasibility of primary sternal plating for morbidly obese patients after cardiac surgery. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 14(1).
- López-Campos, J., Segade, A., Casarejos, E., Fernández, J., Vilán, J., Izquierdo, P. 2018. Finite element study of a threaded fastening: The case of surgical screws in bone. *Symmetry*, 10(8), 335.
- Losanoff, J. E., Collier, A. D., Wagner-Mann, C. C., Richman, B. W., Huff, H., Hsieh, F., Diaz-Arias, A., Jones, J. W. 2004. Biomechanical comparison of median sternotomy closures. *The Annals of Thoracic Surgery*, 77(1), 203- 209
- McGregor, W. E., Trumble, D. R. and Magovern, J. A. 1999. Mechanical analysis of midline sternotomy wound closure. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 117(6), 1144-1149.
- Milton, H. 1897. Mediastinal surgery. *The Lancet*, 149(3839), 872–875.
- Mitra, A., Elahi, M. M., Tariq, G. B., Mir, H., Powell, R. and Spears, J. 2004. Composite plate and wire fixation for complicated sternal closure. *Annals of Plastic Surgery*, 53(3), 217-221.
- Mostofi, S. B. 2005. *Who's who in orthopedics*. Springer, 389, London.
- Nazerali, R. S., Hinchcliff, K. and Wong, M. S. 2014. Rigid fixation for the prevention and treatment of sternal complications. *Annals of Plastic Surgery*, 72(1), 27-30.
- Nishimura, T., Kurihara, C., Sakano, Y. and Kyo S. 2014. Sternalock plating system for elderly post-sternotomy patients. *Journal of Artificial Organs*, 17(3), 288-290.
- Orhan, S. N. 2016. Sternum kapama tekniklerinin etkinliğinin biyomekanik yöntemlerle araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 289, Erzurum
- Orhan, S. N., Ozyazicioglu, M. H. and Colak, A. 2017a. A biomechanical study of 4 different sternum closure techniques under different deformation modes. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 25(5), 750-756.
- Orhan, S. N., Ozyazicioglu, M. H. and Colak, A. 2017b. Experimental comparison of efficiency of four different sternum closure techniques. *Turkish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 25(4), 535-542.
- Ozaki, W. 1999. Biomechanical study of sternal closure using rigid fixation techniques in human cadavers. *The Annals of Thoracic Surgery*, 1660-1665.
- Ozaki, W., Buchman, S. R., Iannettoni, M. D. and Frankenburg, E. P. 1998. Biomechanical study of sternal closure using rigid fixation techniques in human cadavers. *The Annals of Thoracic Surgery*, 65(6), 1660-1665.

- Pai, S. 2005. In vivo characterization of forces on the sternal midline following median sternotomy. MS Thesis. Worcester Polytechnic Institute. Biomedical Engineering, 74, Worcester, Massachusetts.
- Pai, S., Gunja, N. J., Dupak, E. L., McMahon, N. L., Coburn, J. C., Lalikos, J. F., Dunn, R. M., Francalancia, N., Pins, G. D. and Billiar, K. L. 2007. A mechanical study of rigid plate configurations for sternal fixation. *Annals of Biomedical Engineering*, 35(5), 808-816.
- Pai, S., Gunja, N. J., Dupak, E. L., McMahon, N. L., Roth, T. P., Lalikos, J. F., Dunn, R. M., Francalancia, N., Pins, G. D. and Billiar, K. L. 2005. In vitro comparison of wire and plate fixation for midline sternotomies. *The Annals of Thoracic Surgery*, 80(3), 962-968.
- Park, J. S., Kuo, J. H., Young, J. N., Wong, M. S. 2017. Rigid sternal fixation versus modified wire technique for poststernotomy closures: A retrospective cost analysis. *Annals of Plastic Surgery*, 78(5), 537-542.
- Parker, R., Adams, J. L., Ogola, G., McBrayer, D., Hubbard, J. M., McCullough, T. L., Cleveland, T. 2008. Current activity guidelines for CABG patients are too restrictive: Comparison of the forces exerted on the median sternotomy during a cough vs. lifting activities combined with valsalva maneuver. *The Thoracic and Cardiovascular Surgeon*, 56(4), 190–194.
- Plass, A., Grünenfelder, J., Reuthebuch, O., Vachenauer, R., Gauer, J. M., Zünd, G. and Genoni, M. 2007. New transverse plate fixation system for complicated sternal wound infection after median sternotomy. *The Annals of Thoracic Surgery*, 83(3), 1210-1212.
- Price, N., Kim, N. H., Wilcox, B. ve Hatcher, B. 2012. Design Study on Stability and Safety of Median Sternotomy Fixation, American Society of Biomechanics 36th Annual Conference, 15-18 August, Book of Abstracts, Gainesville, FL.
- Raman, J., 2012a. Rigid plate fixation promotes better bone healing after sternotomy. *Seminars in Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 24(3), 147-150.
- Raman, J., Lehmann, S., Zehr, K., DeGuzman, B. J., Aklog, L., Garrett, H. E., MacMohan, H., Hatcher, B. M. and Wong, M. S. 2012b. Sternal closure with rigid plate fixation versus wire closure: a randomized controlled multicenter trial. *The Annals of Thoracic Surgery*, 94(6), 1854-1861.
- Raman, J., Song, D. H., Bolotin, G. and Jeevanandam, V. 2006. Sternal closure with titanium plate fixation – a paradigm shift in preventing mediastinitis. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 5(4), 336-339.

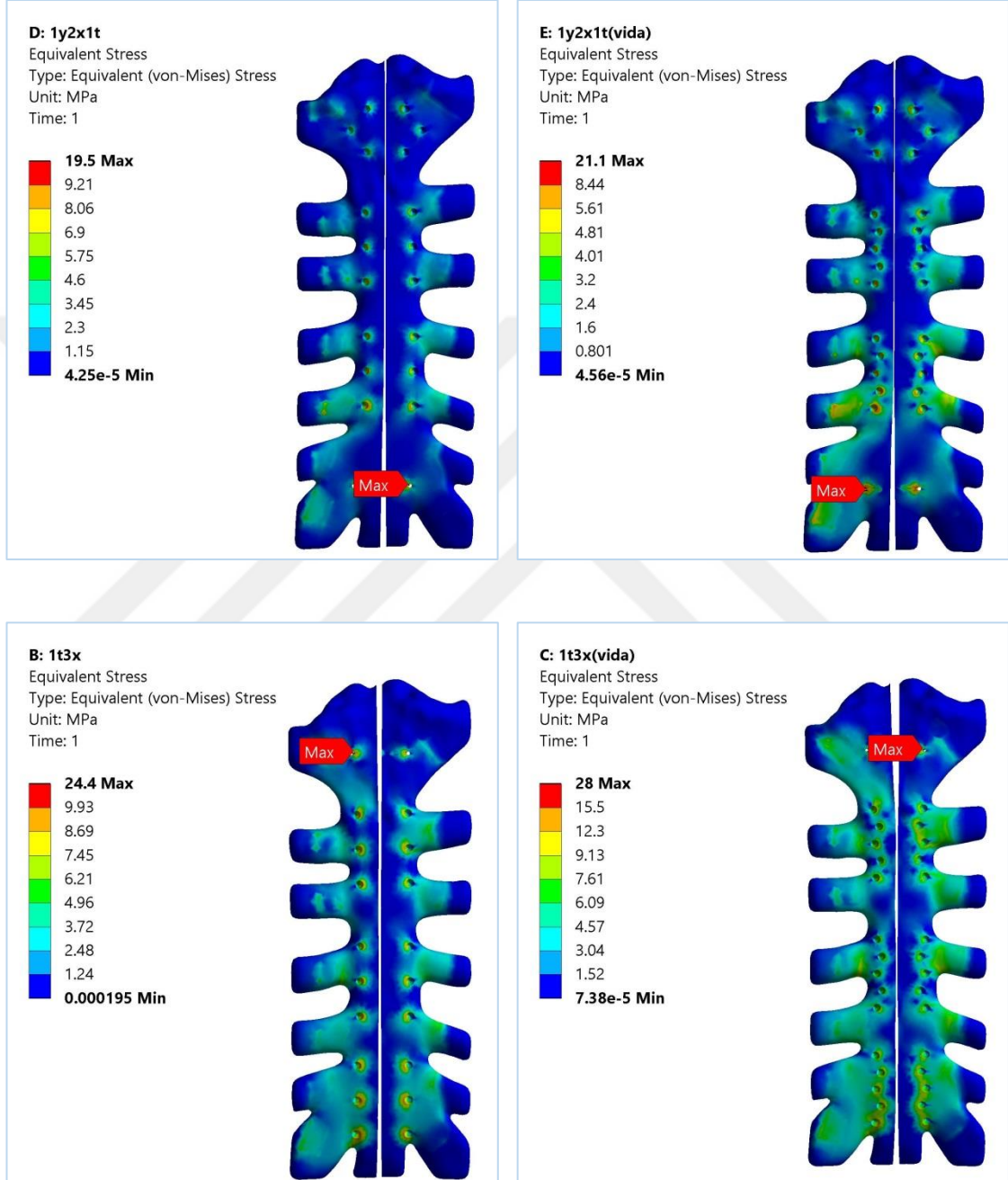
- Rashed, A., Verzar, Z., Alotti, N. and Gombocz, K. 2018. Xiphoid-sparing midline sternotomy reduces wound infection risk after coronary bypass surgery. *Journal of Thoracic Disease*, 10(6), 3568–3574.
- Roughton, M., Agarwal, S., Song, D. H. and Gottlieb, L. J. 2015. Rigid sternal fixation in the management of pediatric postmedian sternotomy mediastinitis: A 20-year study. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 68(12), 1656-1661.
- Schulman, N. H. 2012. Trans-sternal titanium fixation bars an initial experience with 28 patients. *Annals of Thoracic Surgery*, 69(4), 429-430.
- Snyder, C. W., Graham, L. A., Byers, R. E. and Holman, W. L. 2009. Primary sternal plating to prevent sternal wound complications after cardiac surgery: early experience and patterns of failure. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 9(5), 763-766.
- Song, D. H., Lohman, R. F., Renucci, J. D., Jeevanandam, V. and Rahman, J. 2004. Primary sternal plating in high-risk patients prevents mediastinitis. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 26(2), 367-372.
- Swanson, L. B. and LaPier, T. K. 2014. Upper extremity forces generated during activities of daily living. *Journal of Acute Care Physical Therapy*, 5(2), 70–76.
- Topaloğlu, U., Ketani, M. A. ve Saruhan-Güney, B. 2017. Kemik doku ve kemikleşme çeşitleri. *Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 10(1), 62-71.
- Trumble, D. R., McGregor, W. E. and Magovern, J. A. 2002. Validation of a bone analog model for studies of sternal closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 74(3), 739-744.
- Tugulan, C. I., Spindel, S. M., Bansal, A. D., Bates, M. J. and Parrino, E. P. 2020. Does elective sternal plating in morbidly obese patients reduce sternal complication rates?. *The Annals of Thoracic Surgery*, 110(6), 1898-1903.
- Voss, B., Bauernschmitt, R., Will, A., Krane, M., Kröss, R., Brockmann, G., Libera, P. and Lange, R. 2008. Sternal reconstruction with titanium plates in complicated sternal dehiscence. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 34(1), 139-145.
- Voss, S., Will, A., Lange, R. and Voss, B. 2018. Mid-Term results after sternal reconstruction using titanium plates: is it worth it to plate?. *The Annals of Thoracic Surgery*, 105(6), 1640-1647.
- Wangsgard, C., Cohen, D. J. and Griffin, L. V. 2008. Fatigue testing of three peristernal median sternotomy closure techniques. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 3(1), 52-61

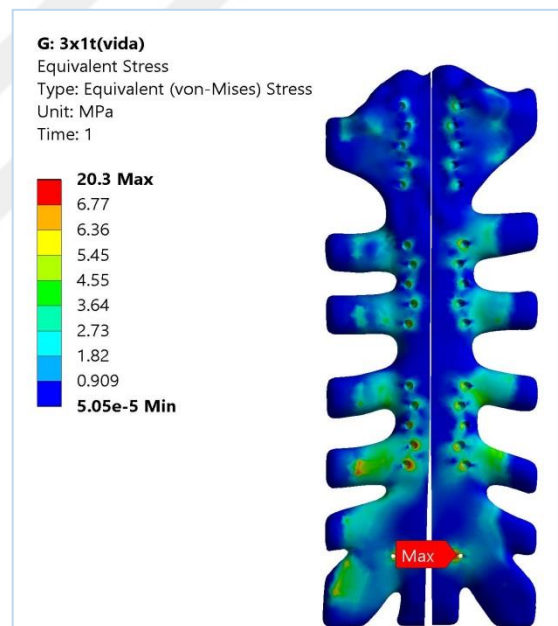
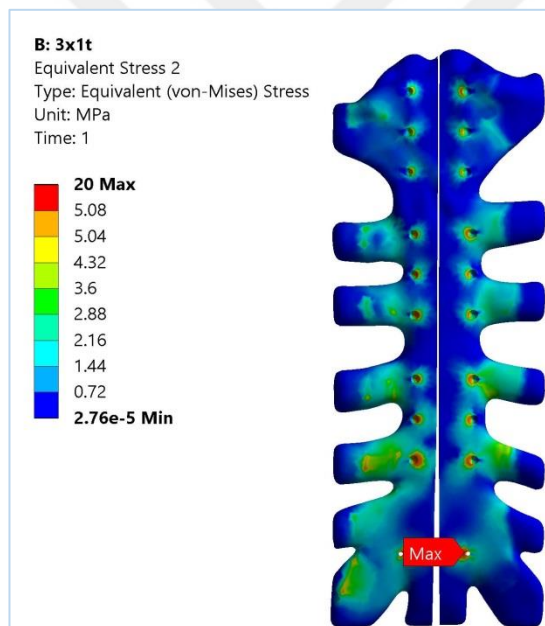
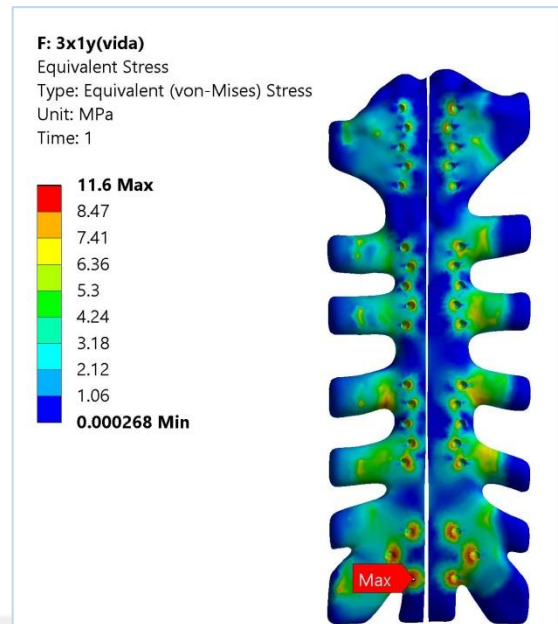
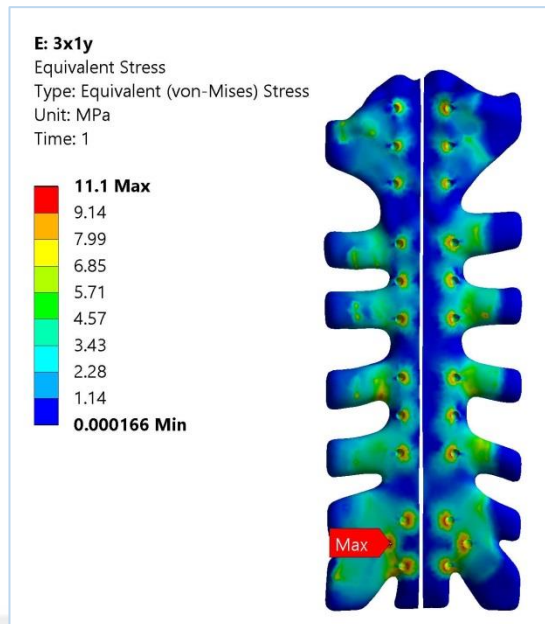
- Wu, L. C., Renucci, J. and Song, D. H. 2004. Rigid-plate fixation for the treatment of sternal nonunion. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 128(4), 623-624.
- Zeitani, J., de Peppo, A. P., Moscarelli, M., Wolf, L. G., Scafuri, A., Nardi, P., Nanni, F., di Marzio, E., de Vico, P., Chiariello, L. 2006. Influence of sternal size and inadvertent paramedian sternotomy on stability of the closure site: A clinical and mechanical study. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 132(1), 38–42.
- Zeitani, J., Peppo, A. P., Bianco, A., Nanni, F., Scafuri, A., Bertoldo, F., Salvati, A., Nardella, S. and Chiariello, L. 2008. Performance of a novel sternal synthesis device after median and faulty sternotomy: mechanical test and early clinical experience. *The Annals of Thoracic Surgery*, 85(1), 287-293.



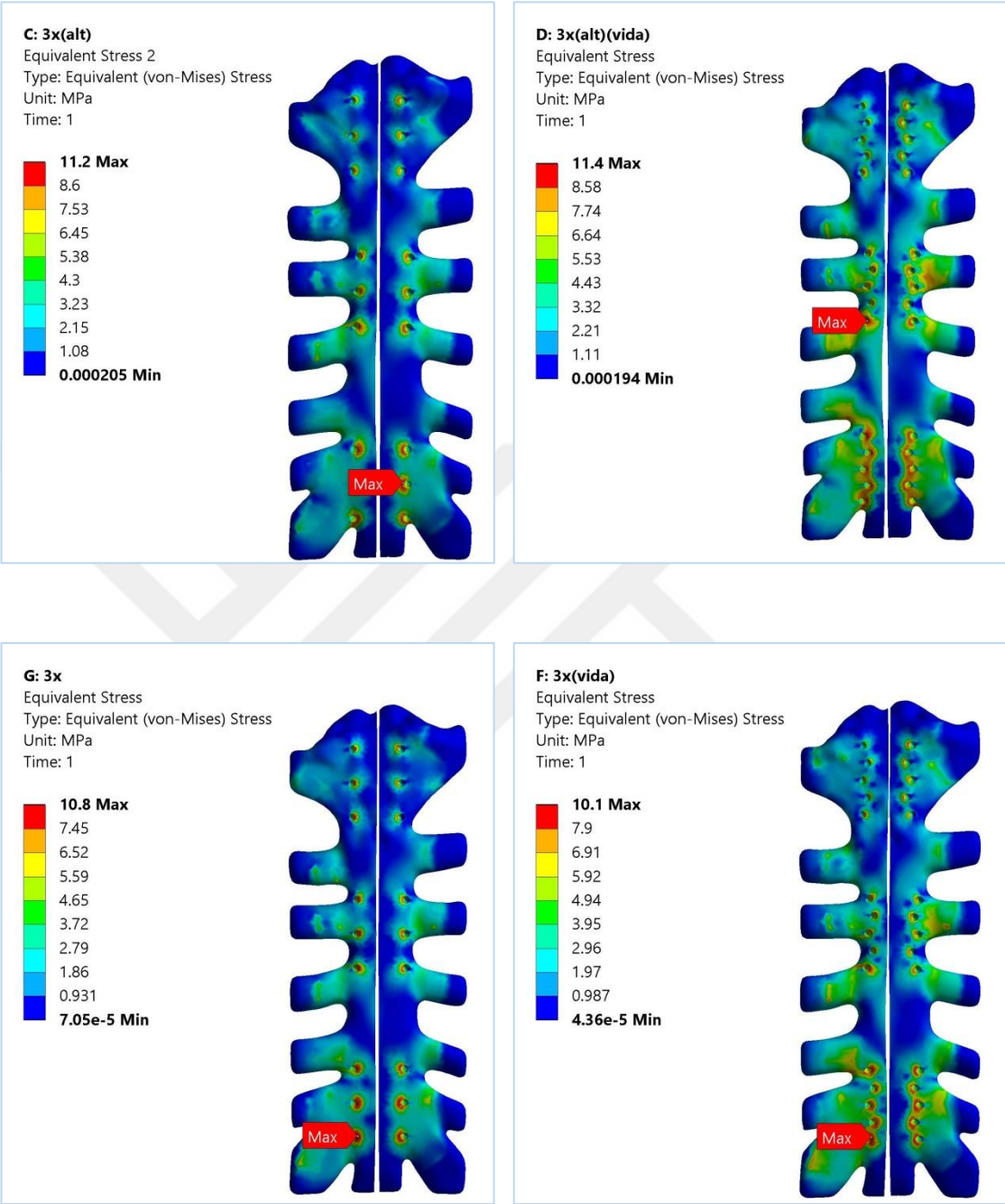
EKLER

EK-1 SEY analizlerinde yanal ayrılmada kemik yüzeyinde oluşan von Mises gerilme değerleri

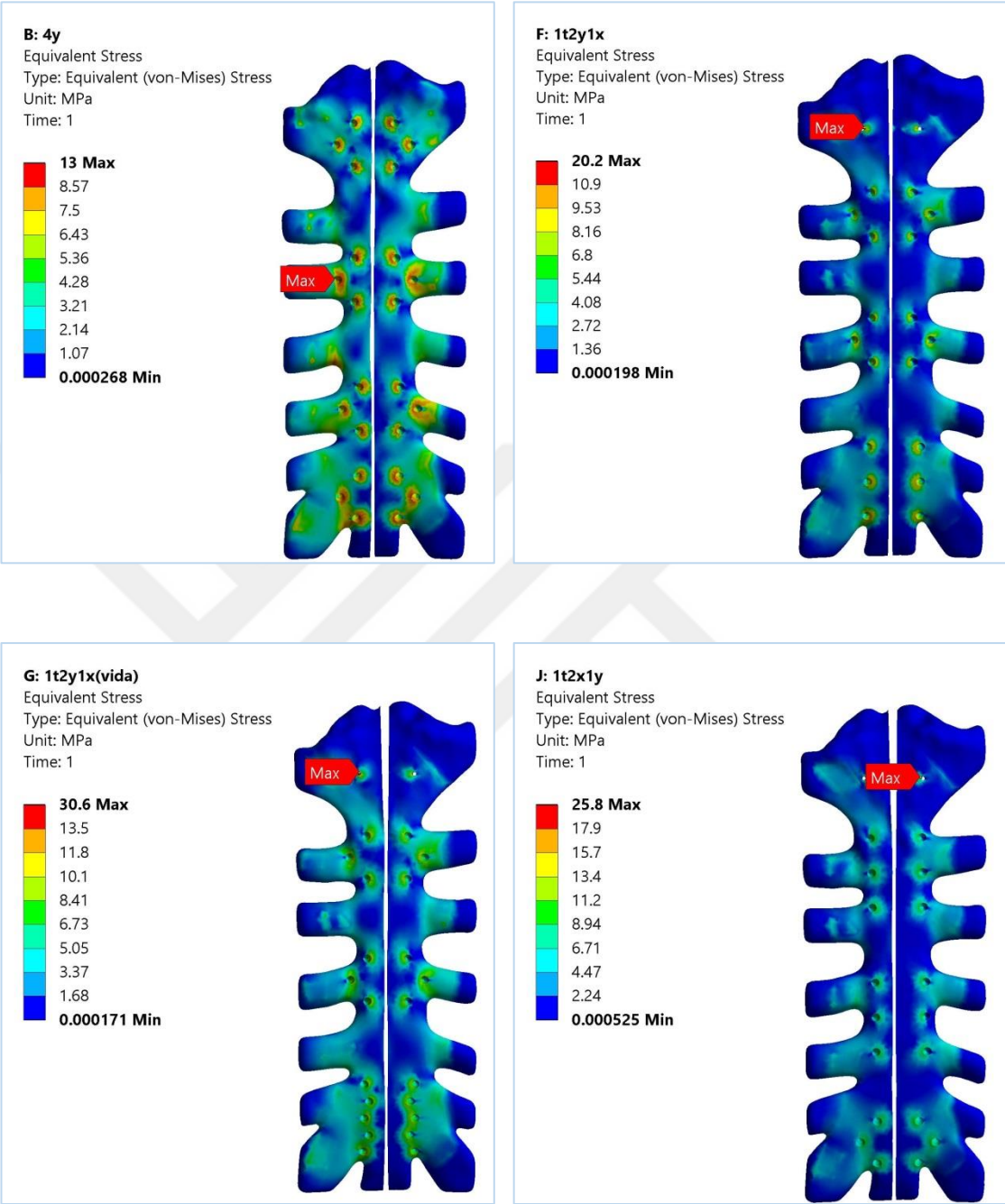




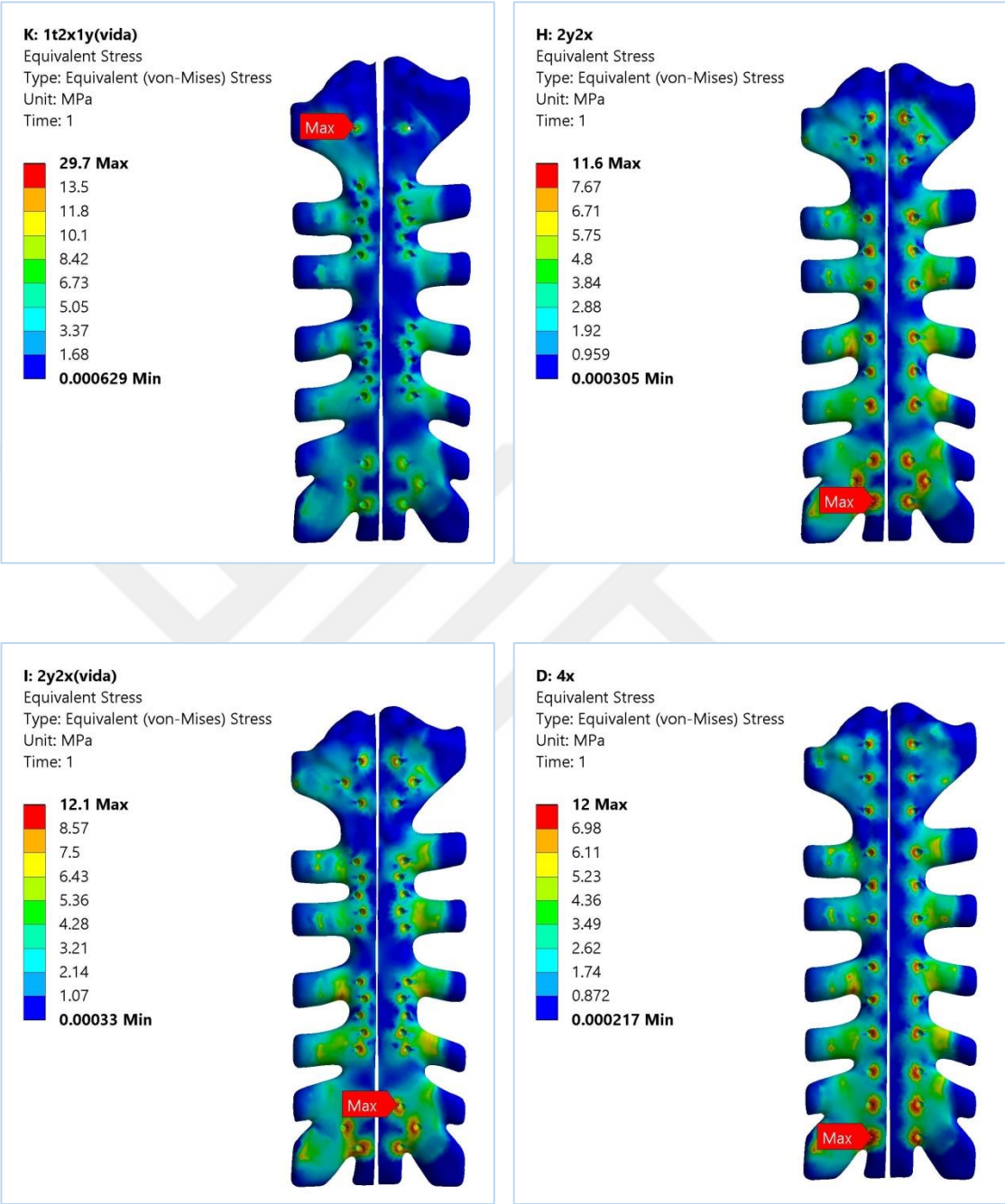
EK-1 (devam)



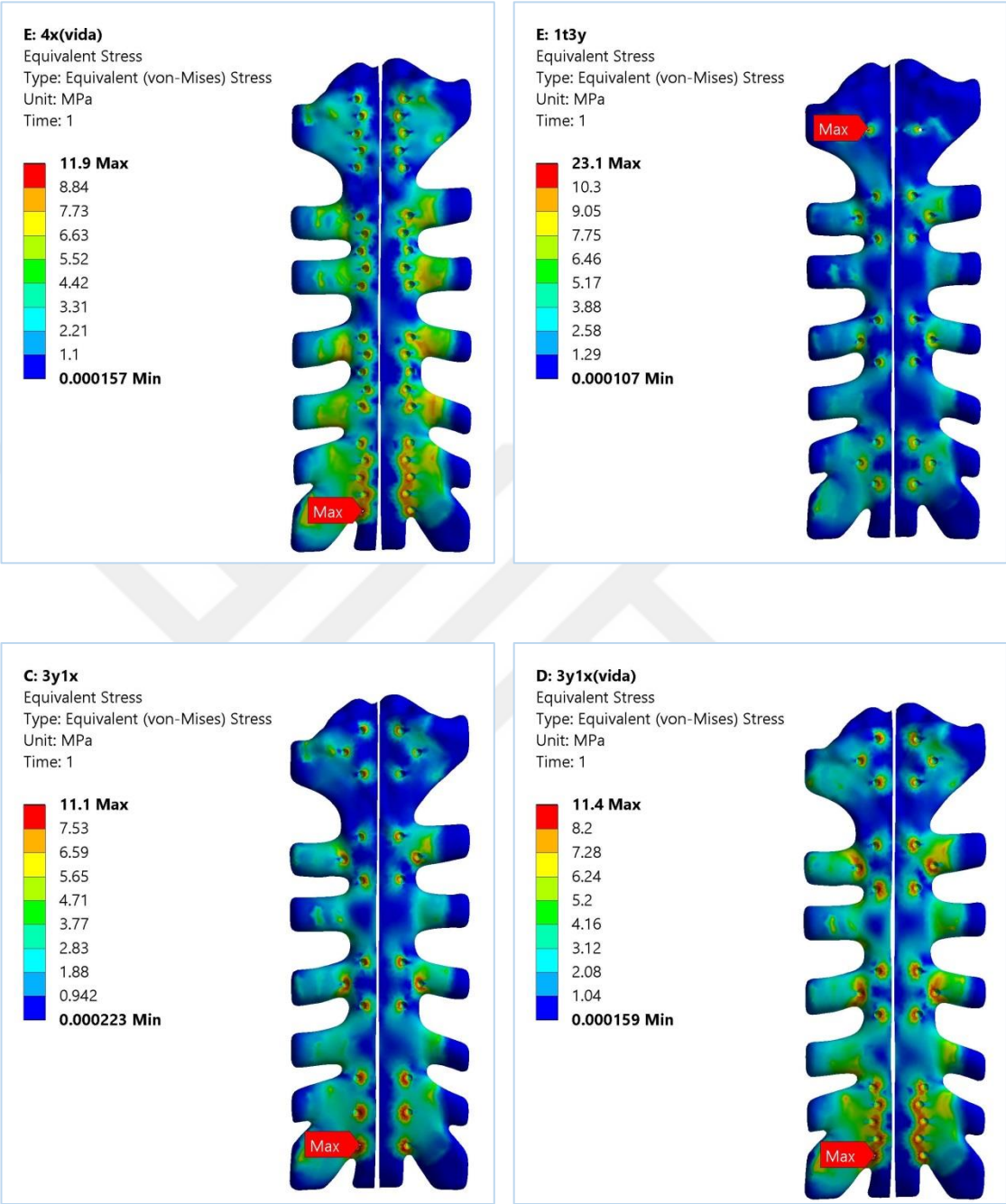
EK-1 (devam)



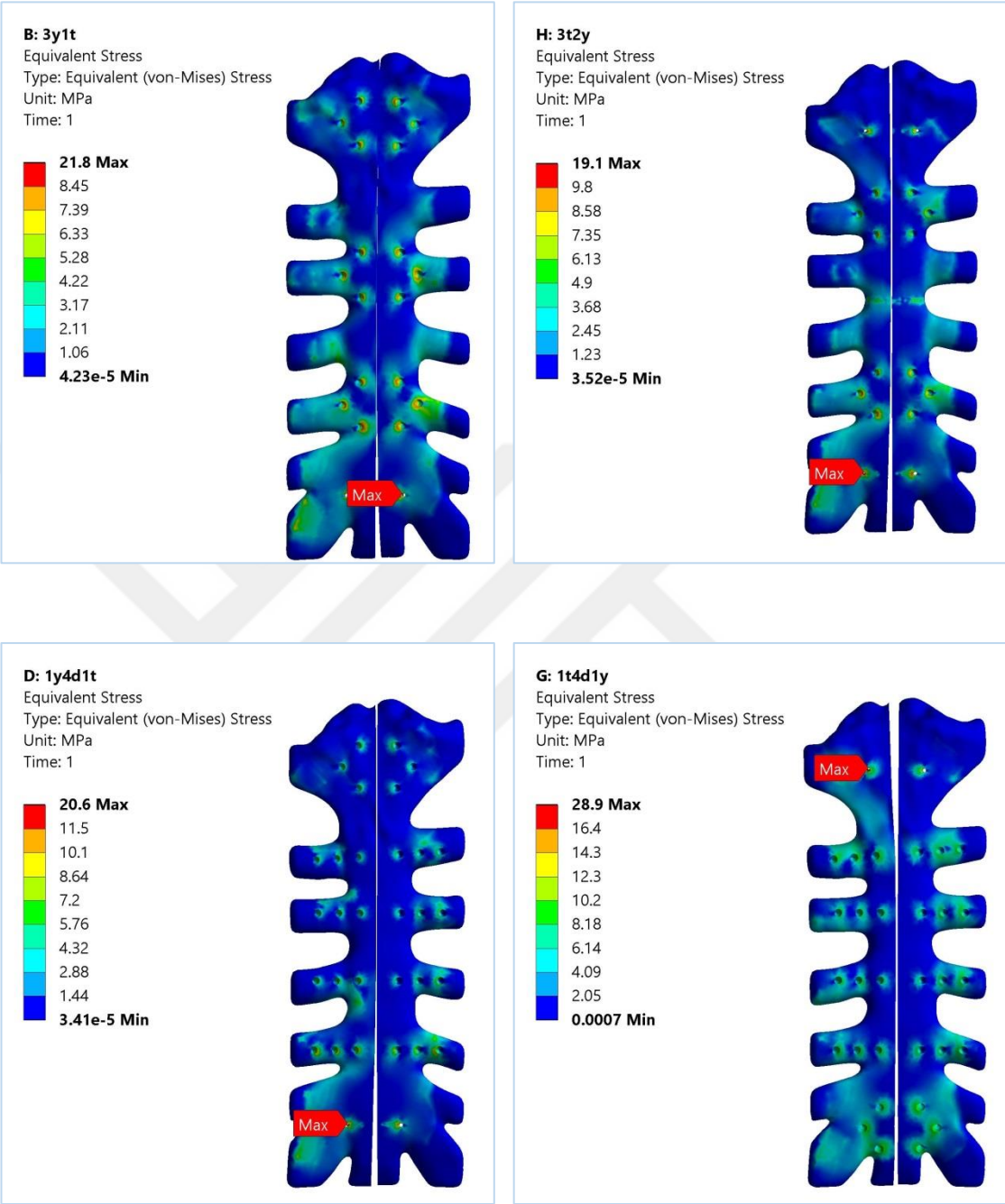
EK-1 (devam)



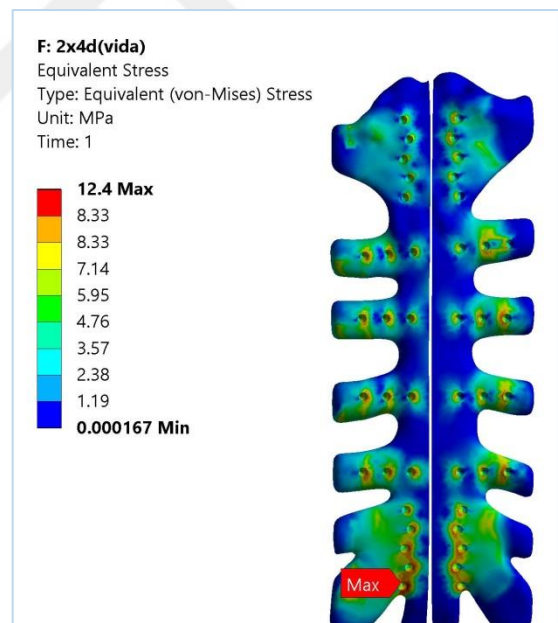
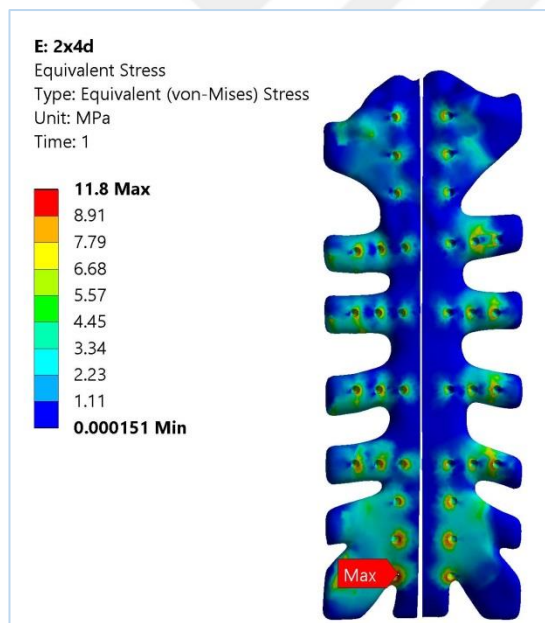
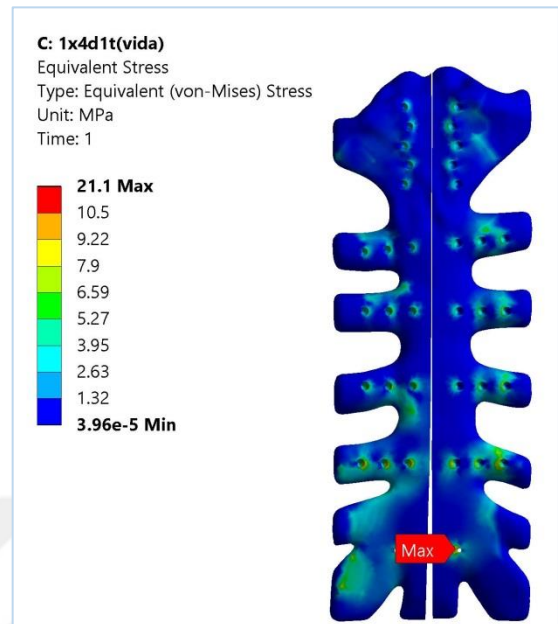
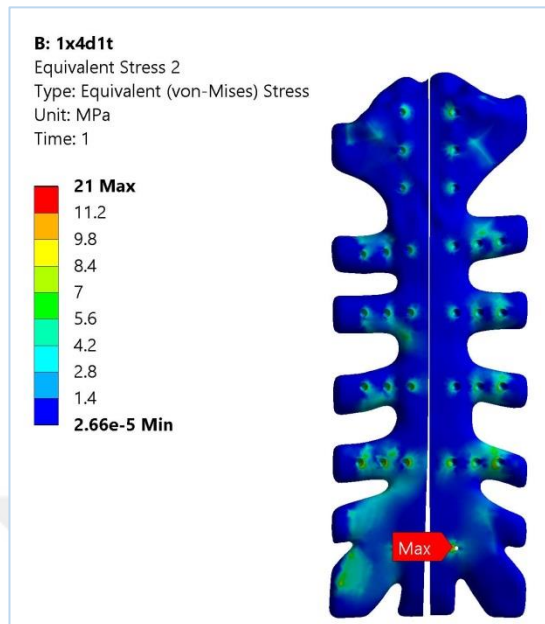
EK-1 (devam)



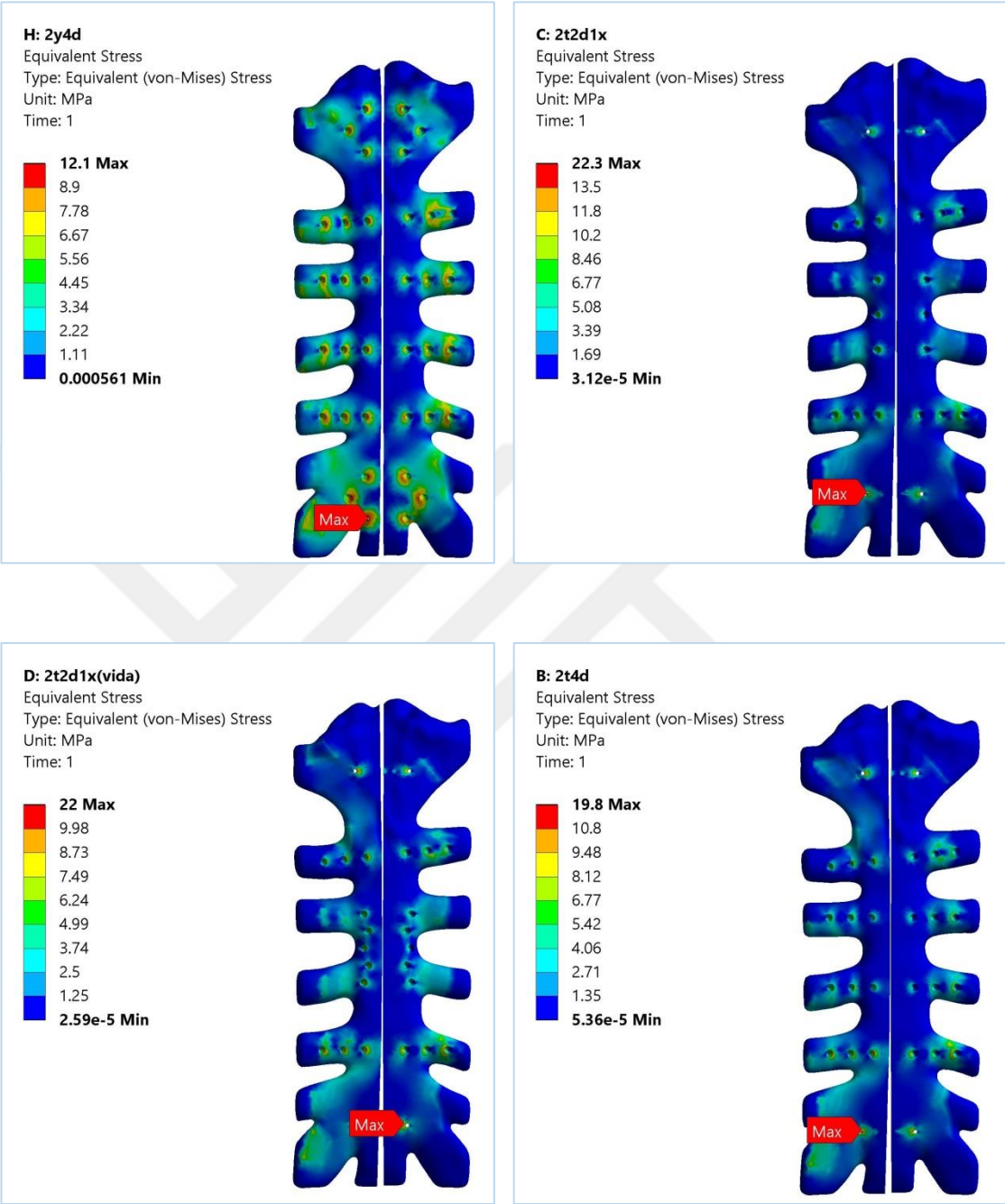
EK-1 (devam)



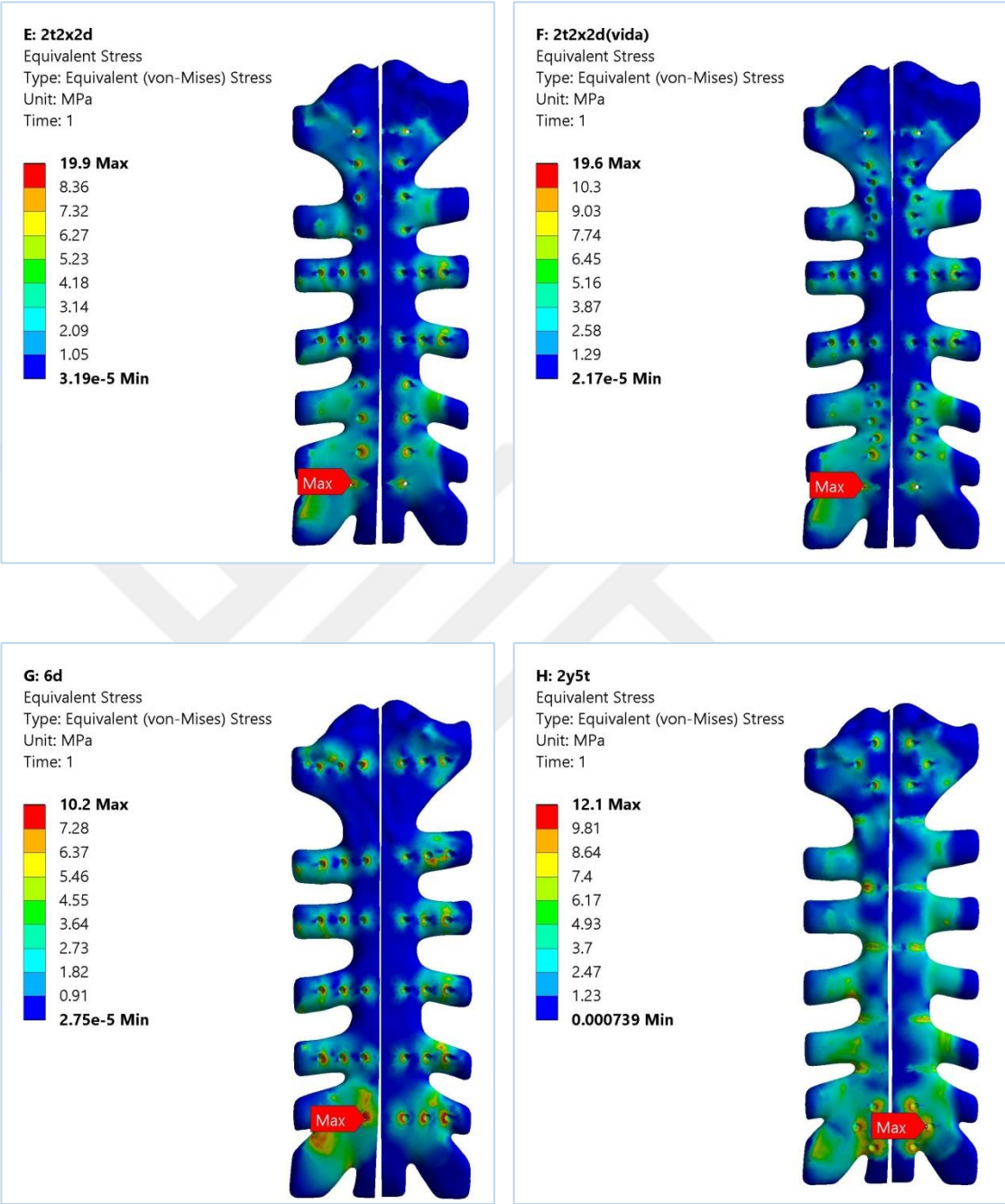
EK-1 (devam)



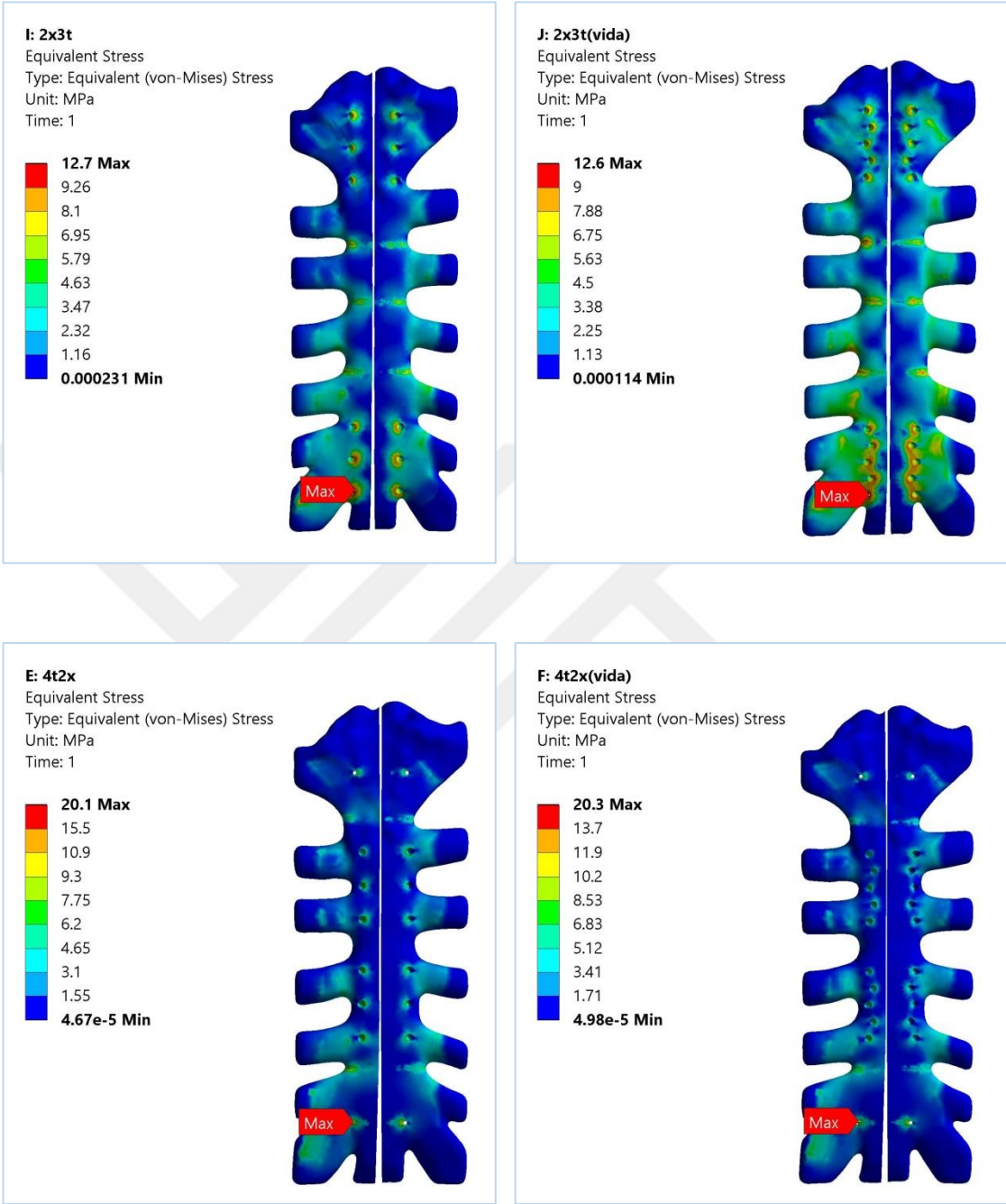
EK-1 (devam)



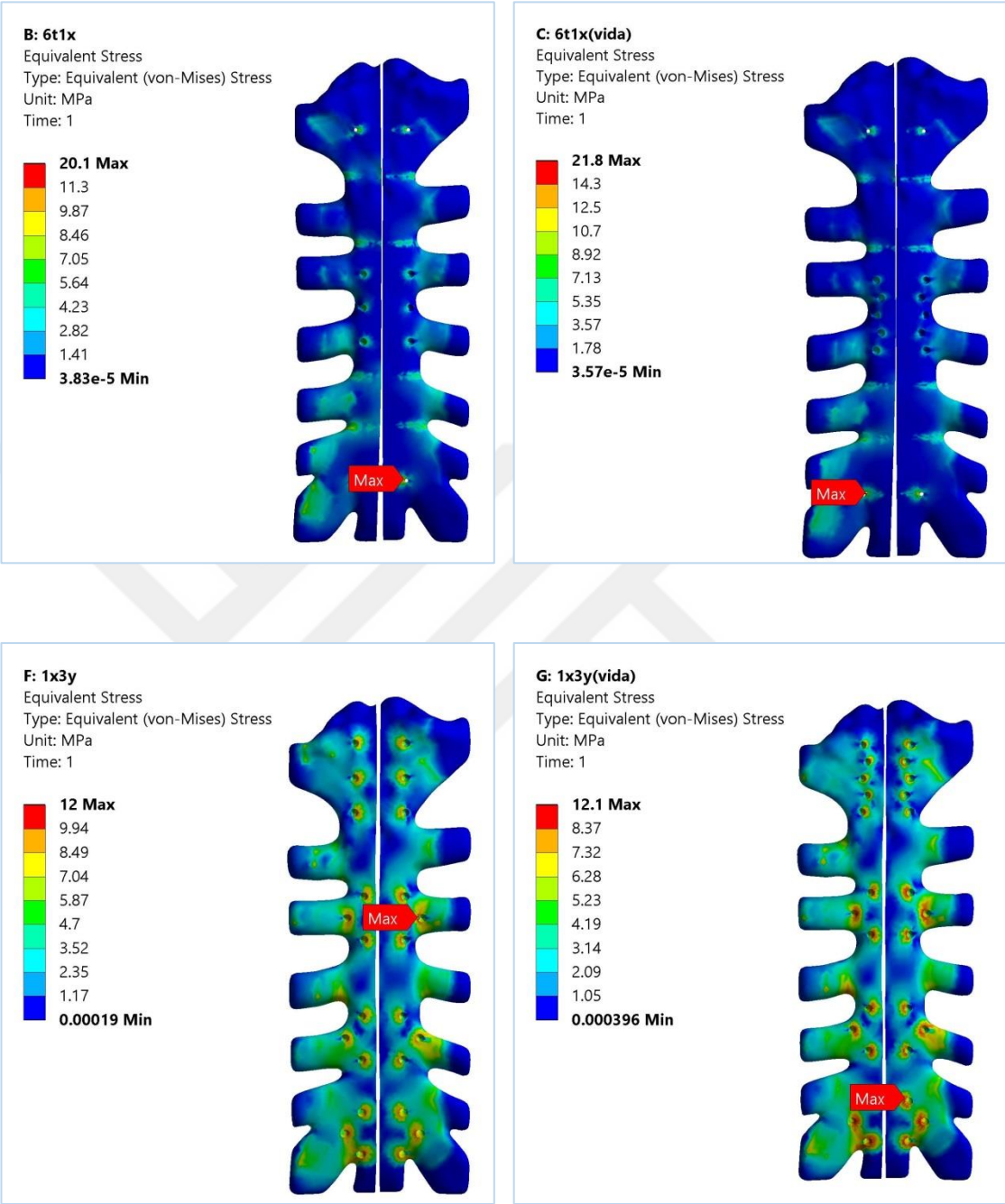
EK-1 (devam)



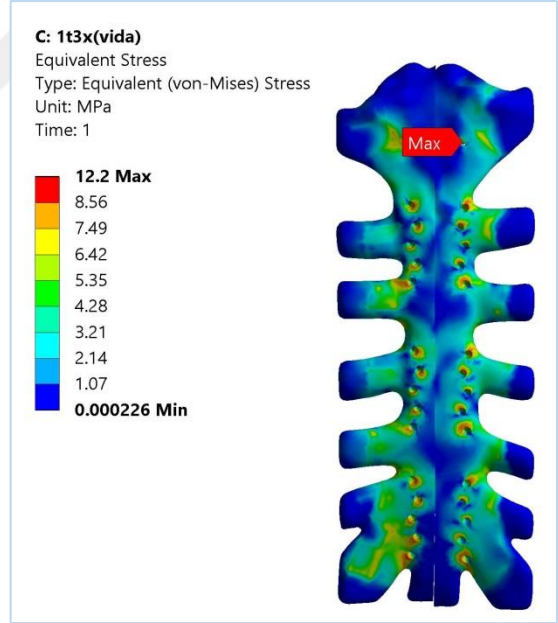
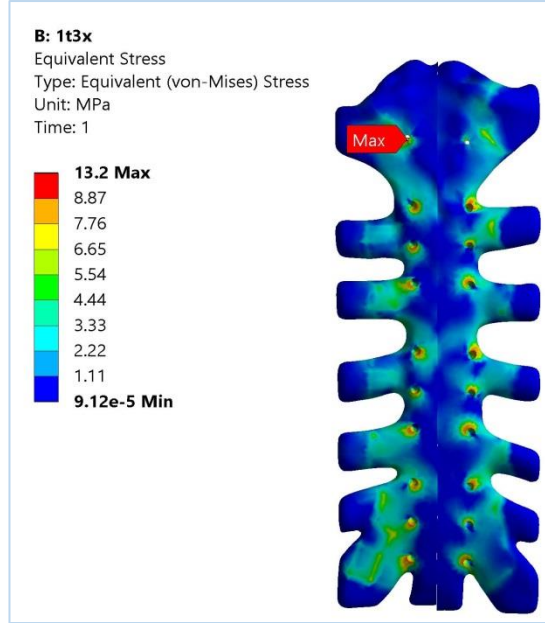
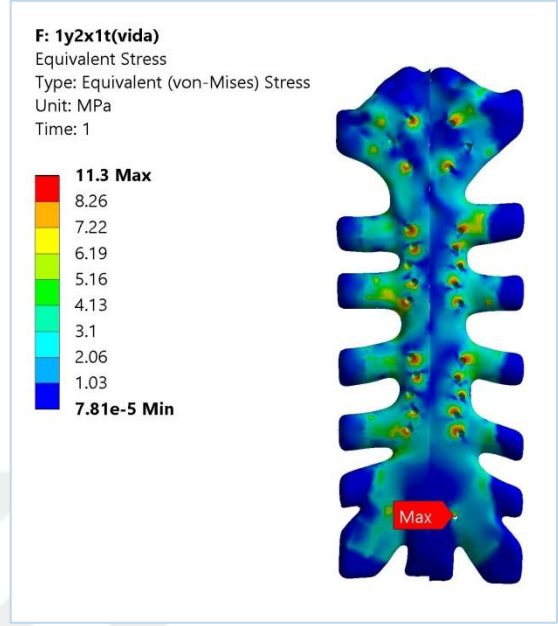
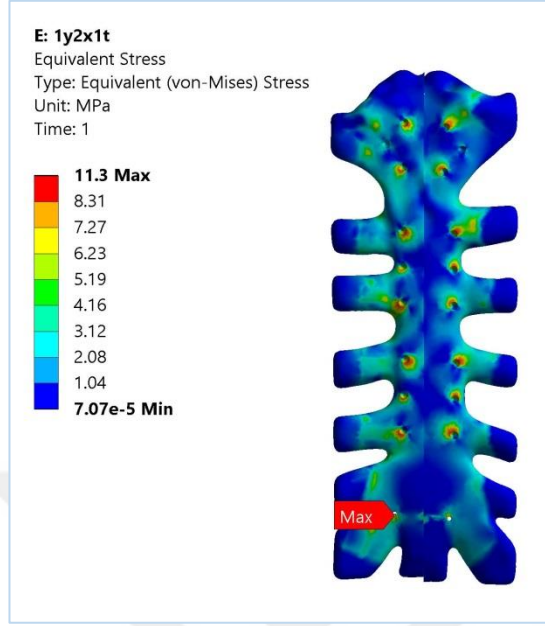
EK-1 (devam)



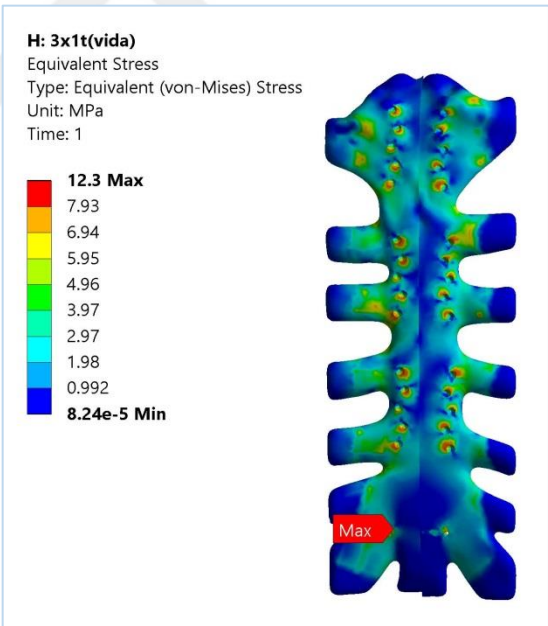
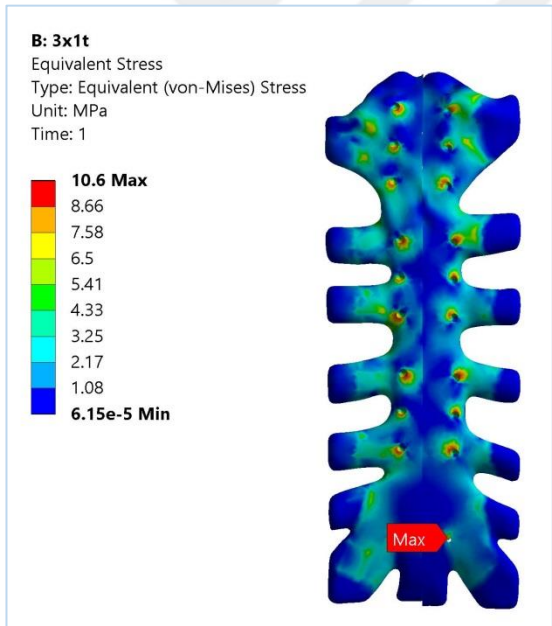
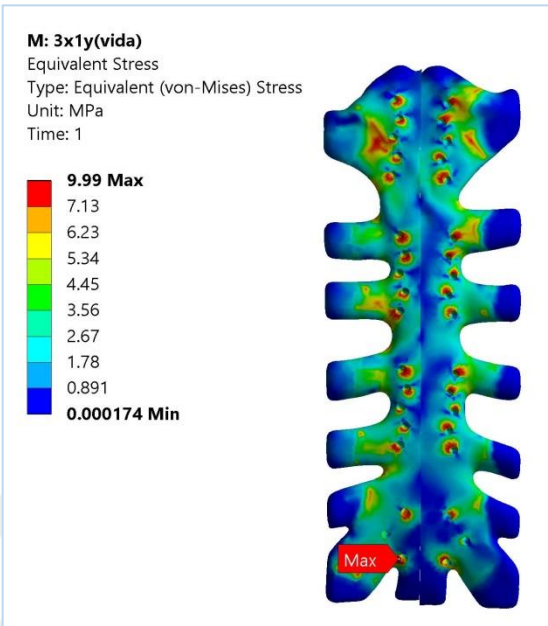
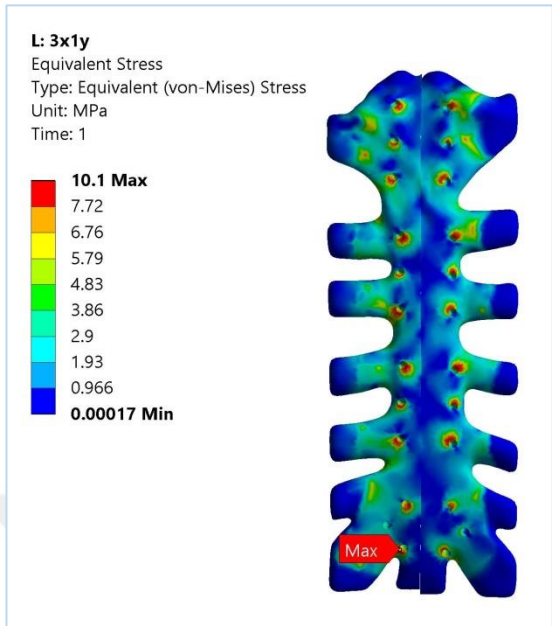
EK-1 (devam)



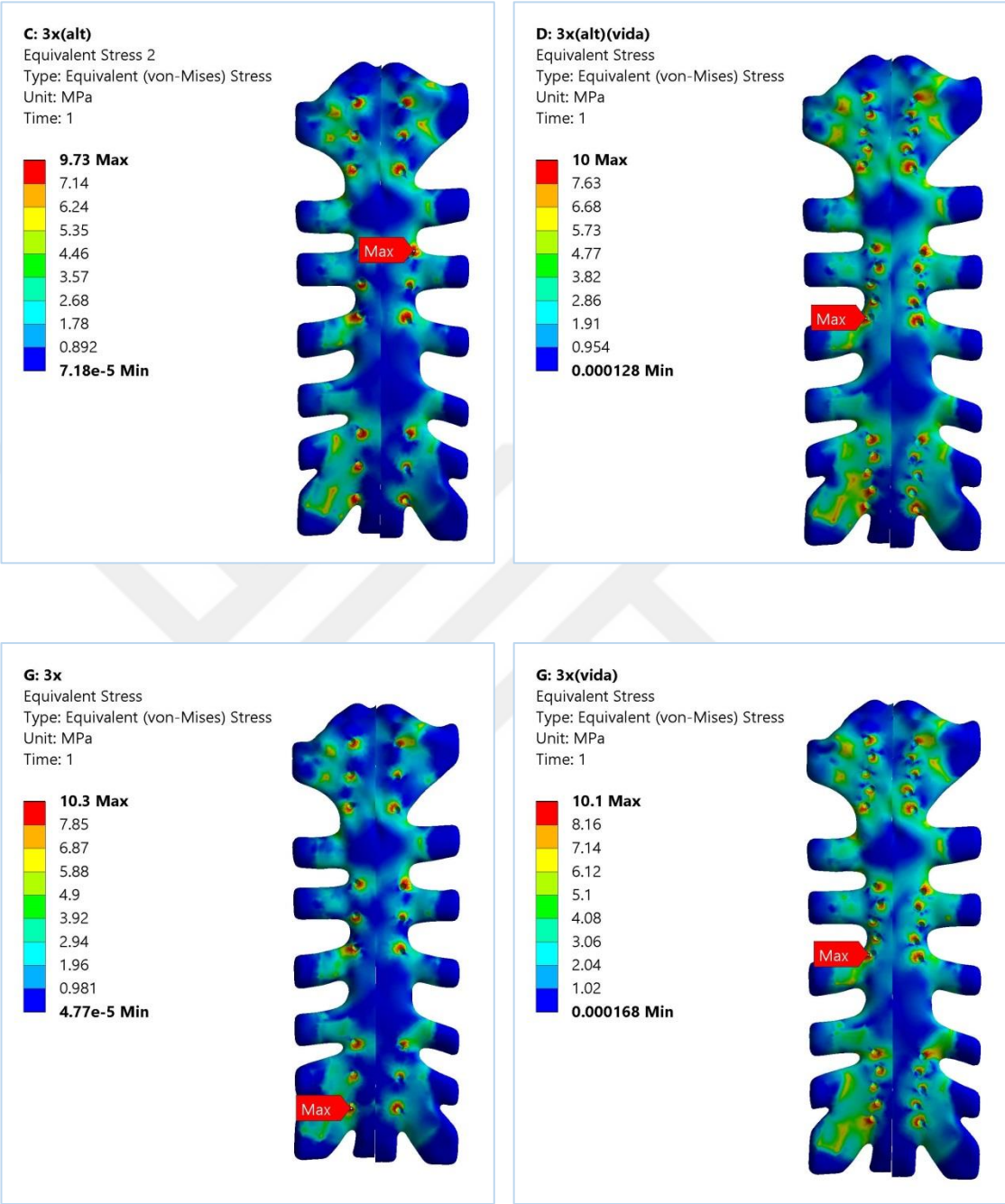
EK-2 SEY analizlerinden boyuna kesmede kemik yüzeyinde oluşan von Mises gerilme değerleri



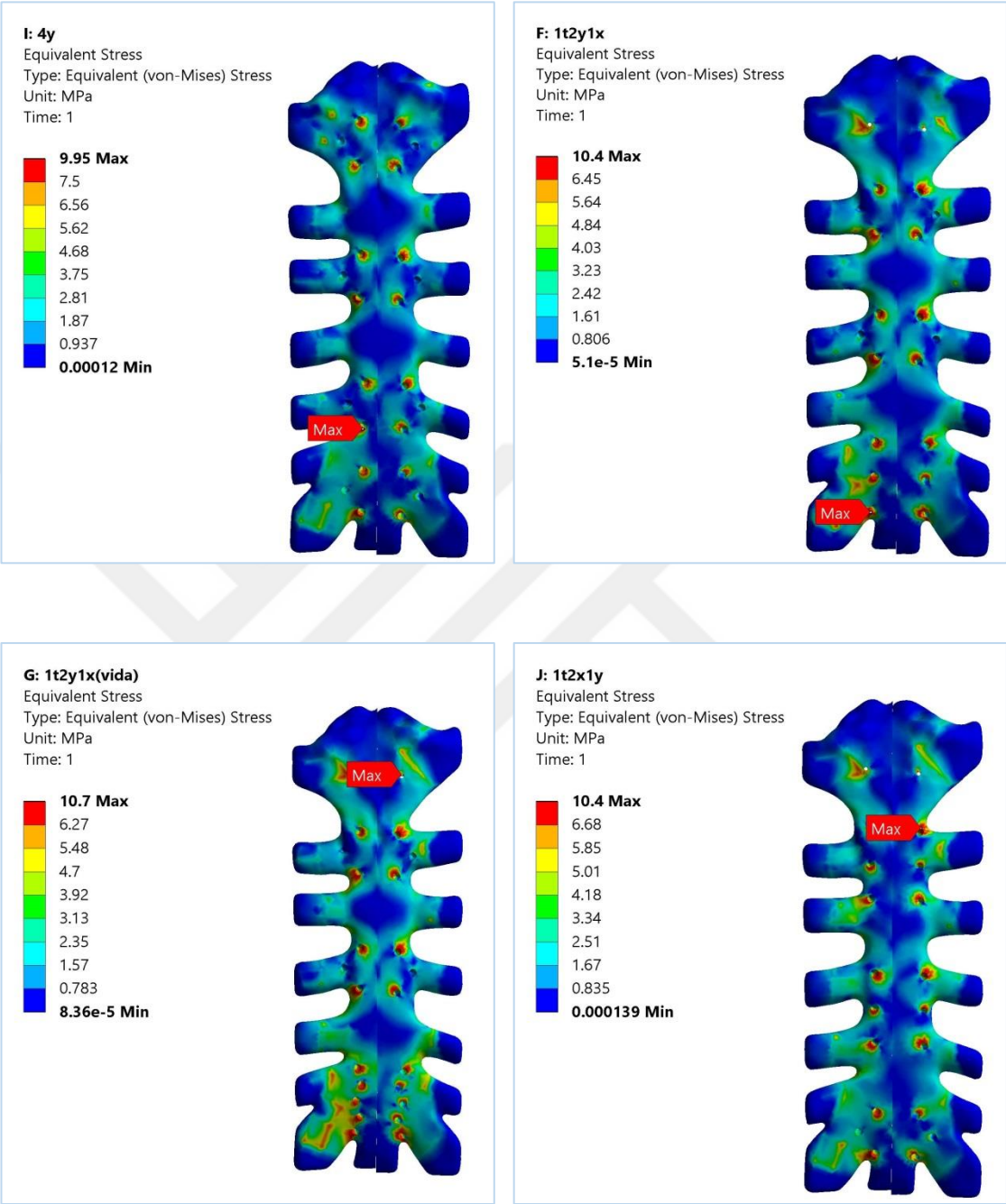
EK-2 (devam)



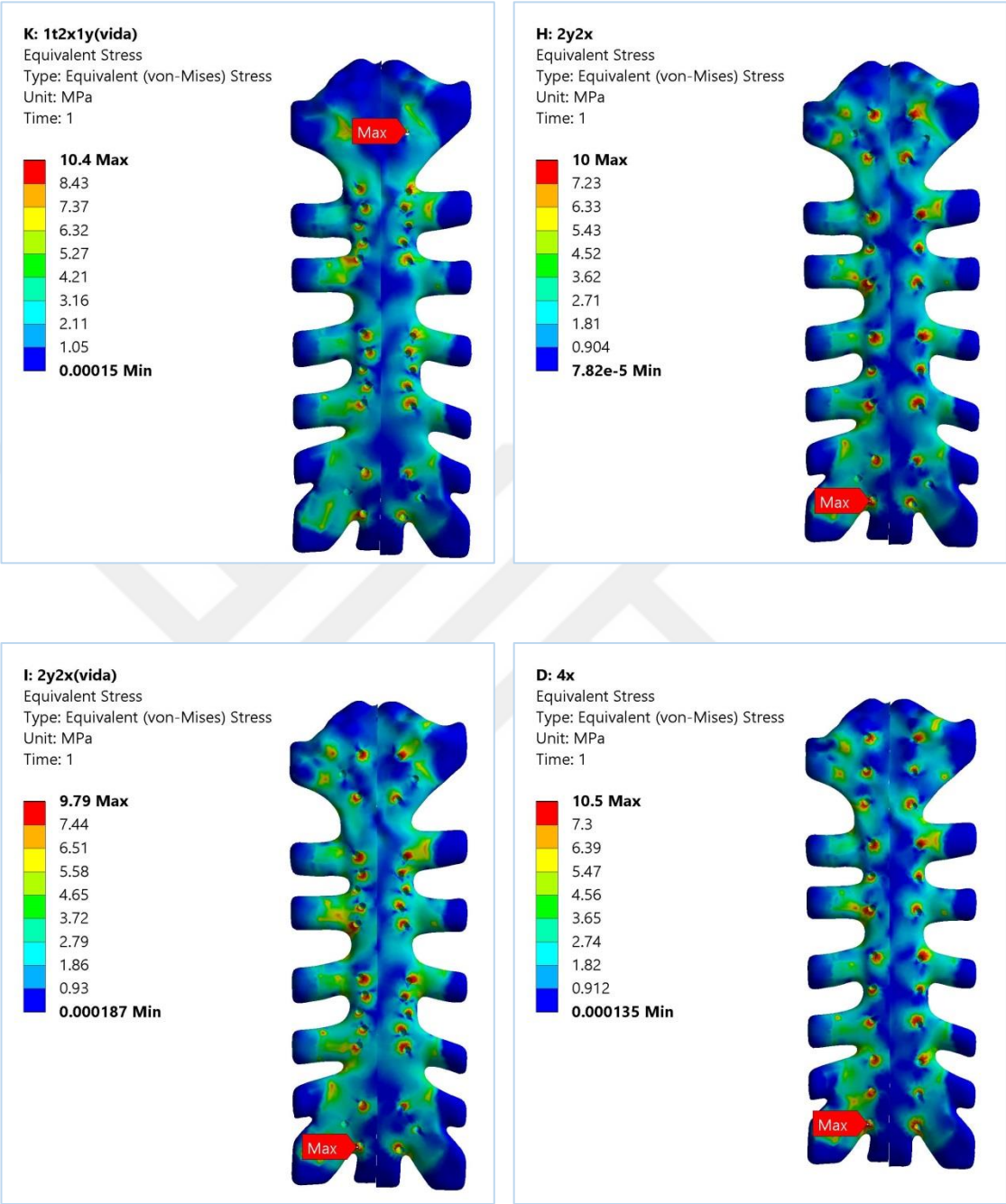
EK-2 (devam)



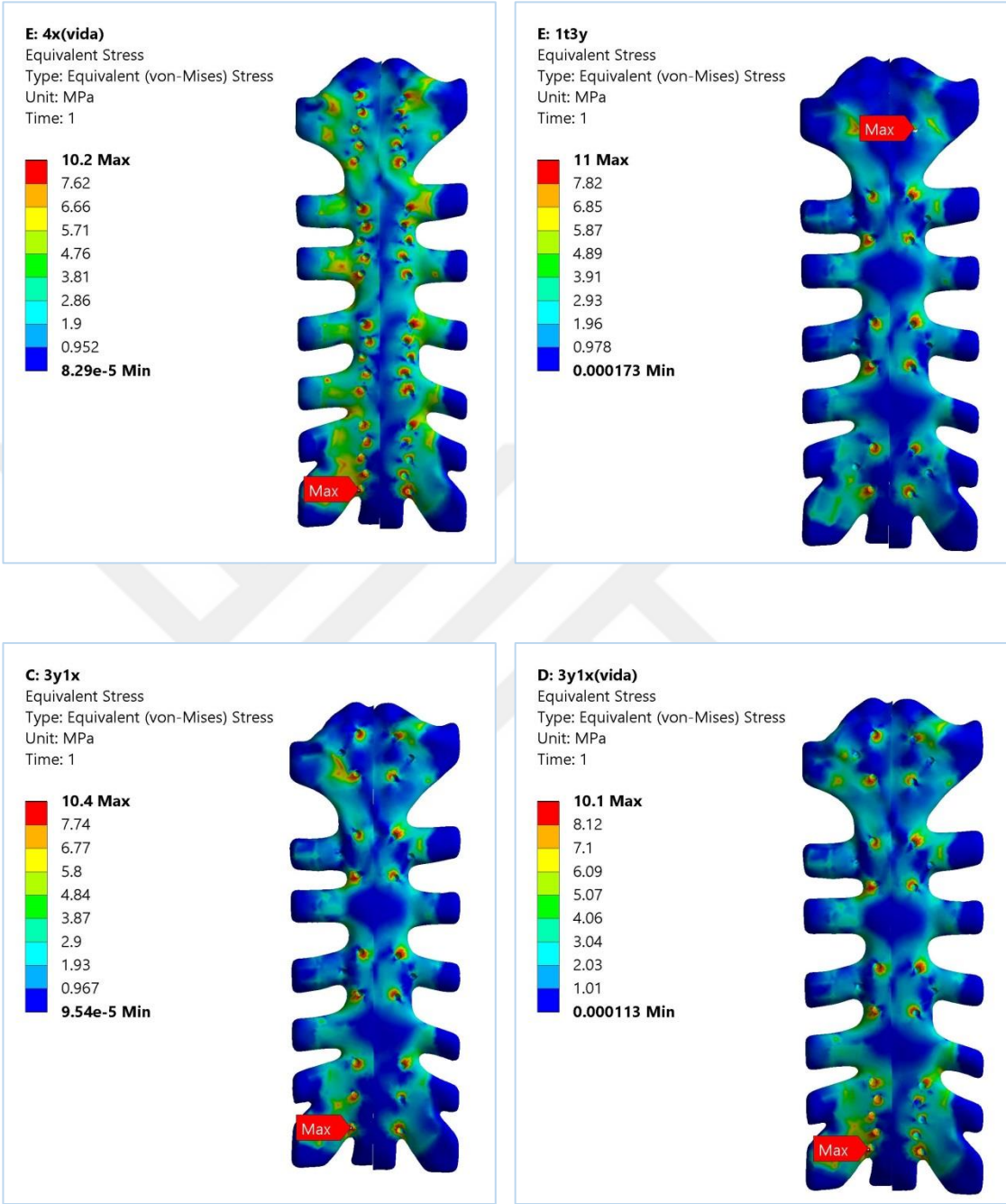
EK-2 (devam)



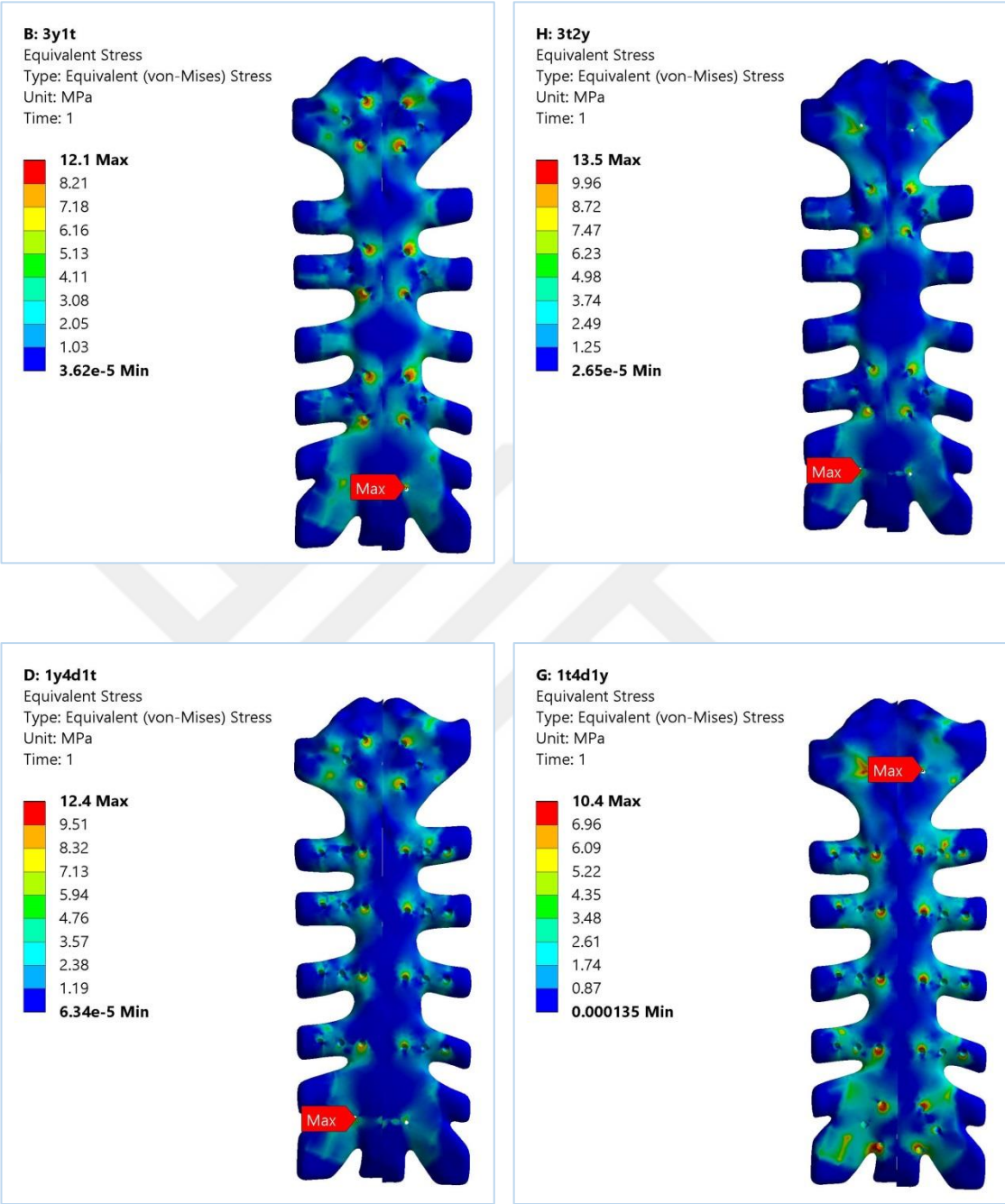
EK-2 (devam)



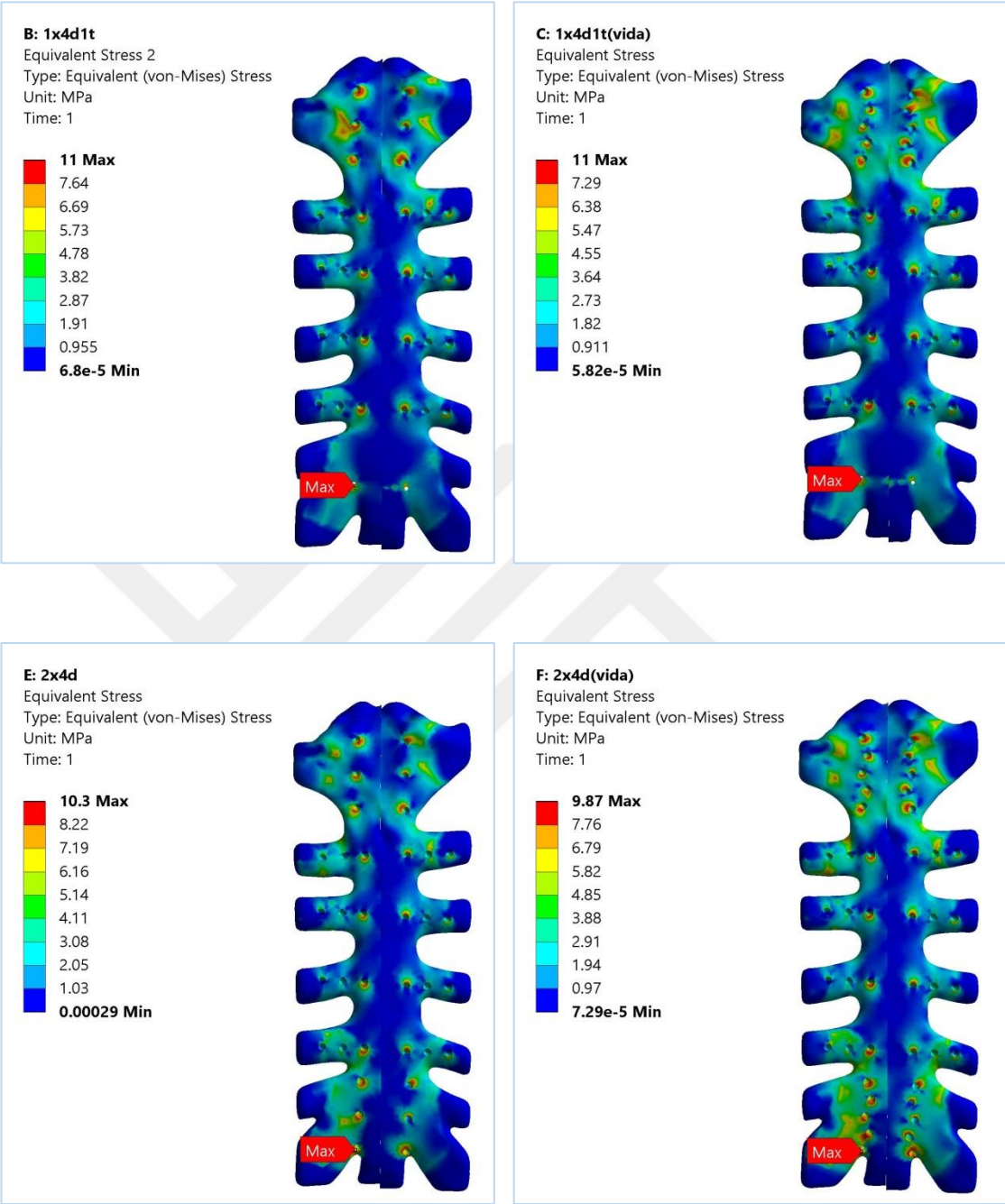
EK-2 (devam)



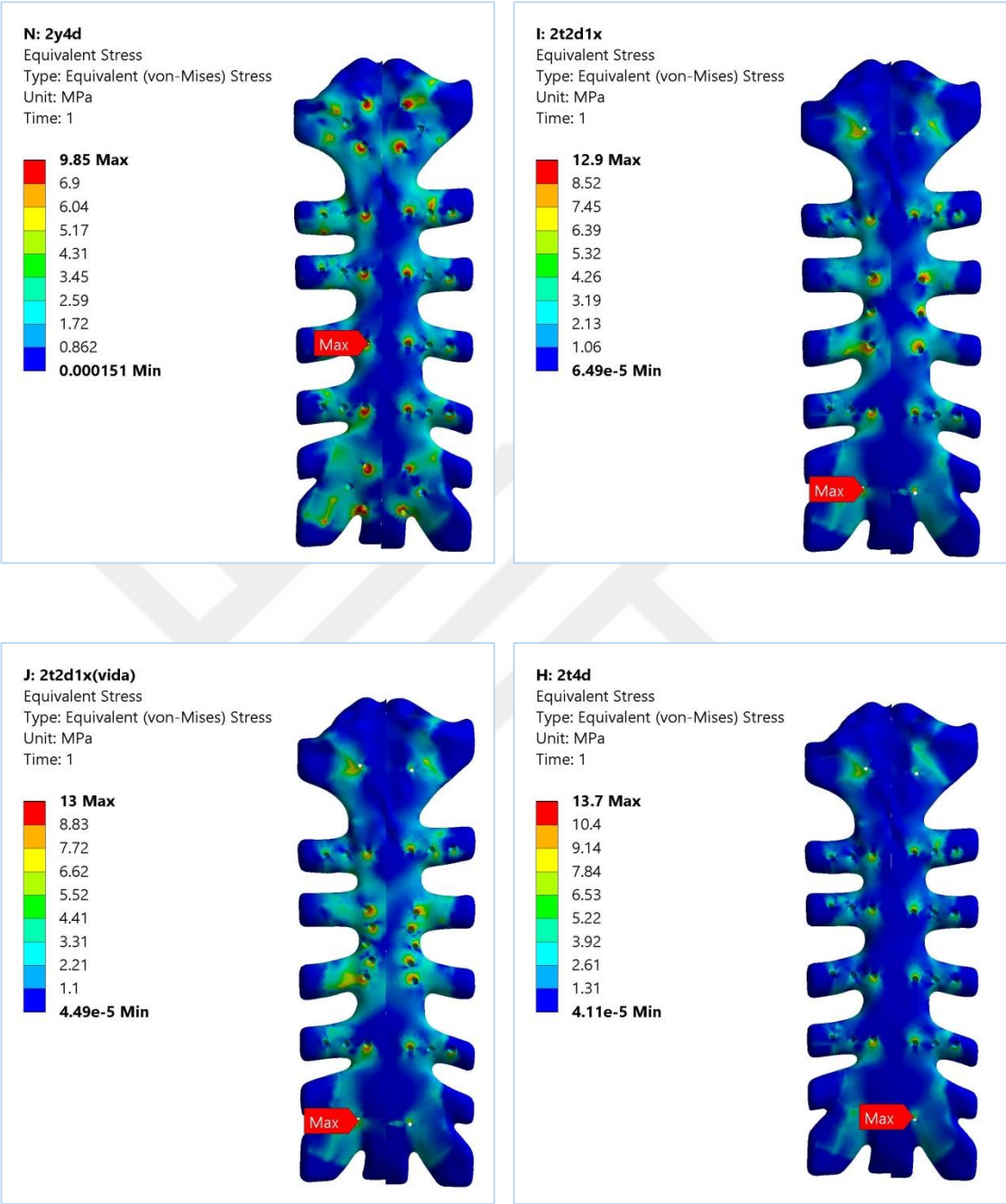
EK-2 (devam)



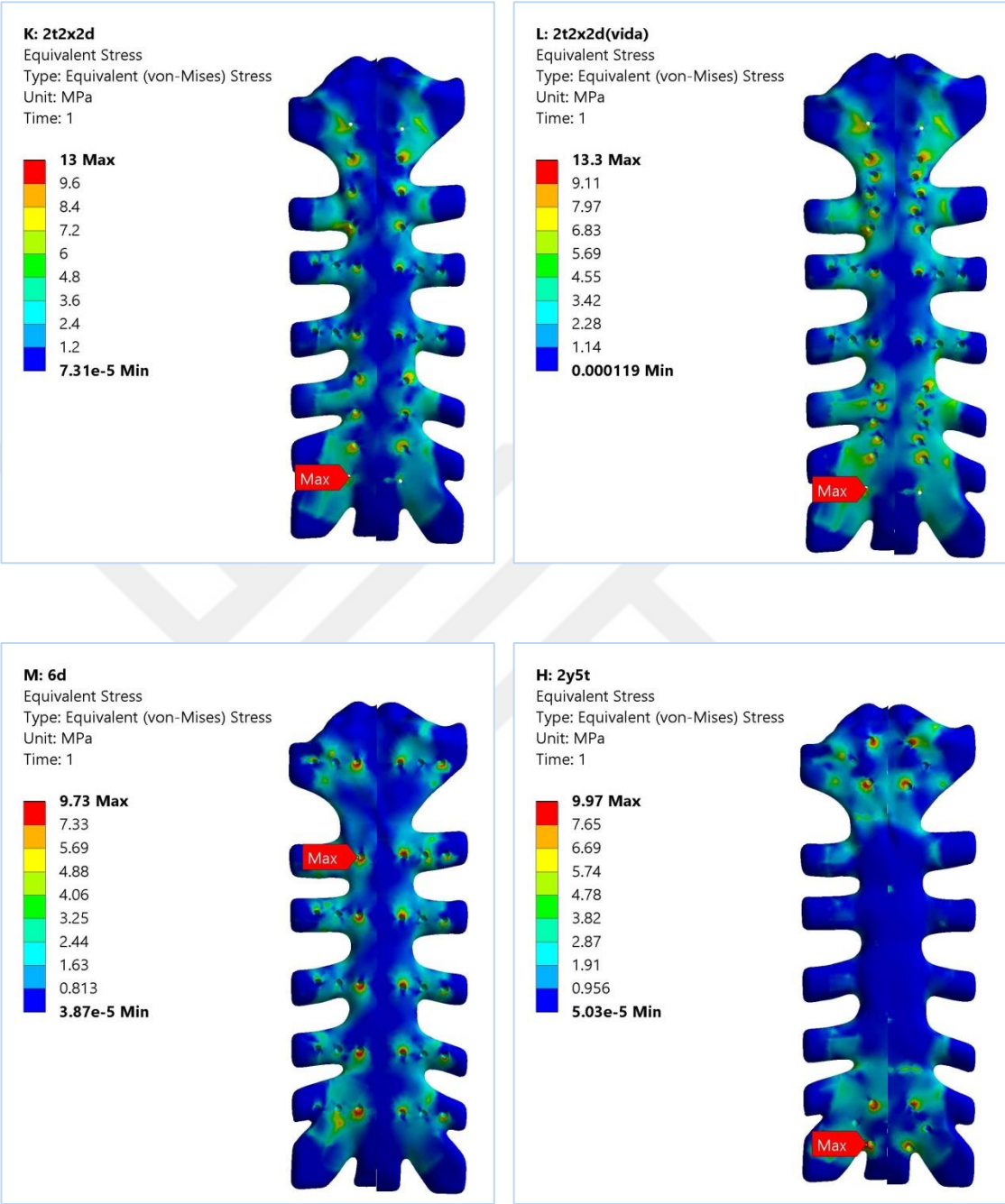
EK-2 (devam)



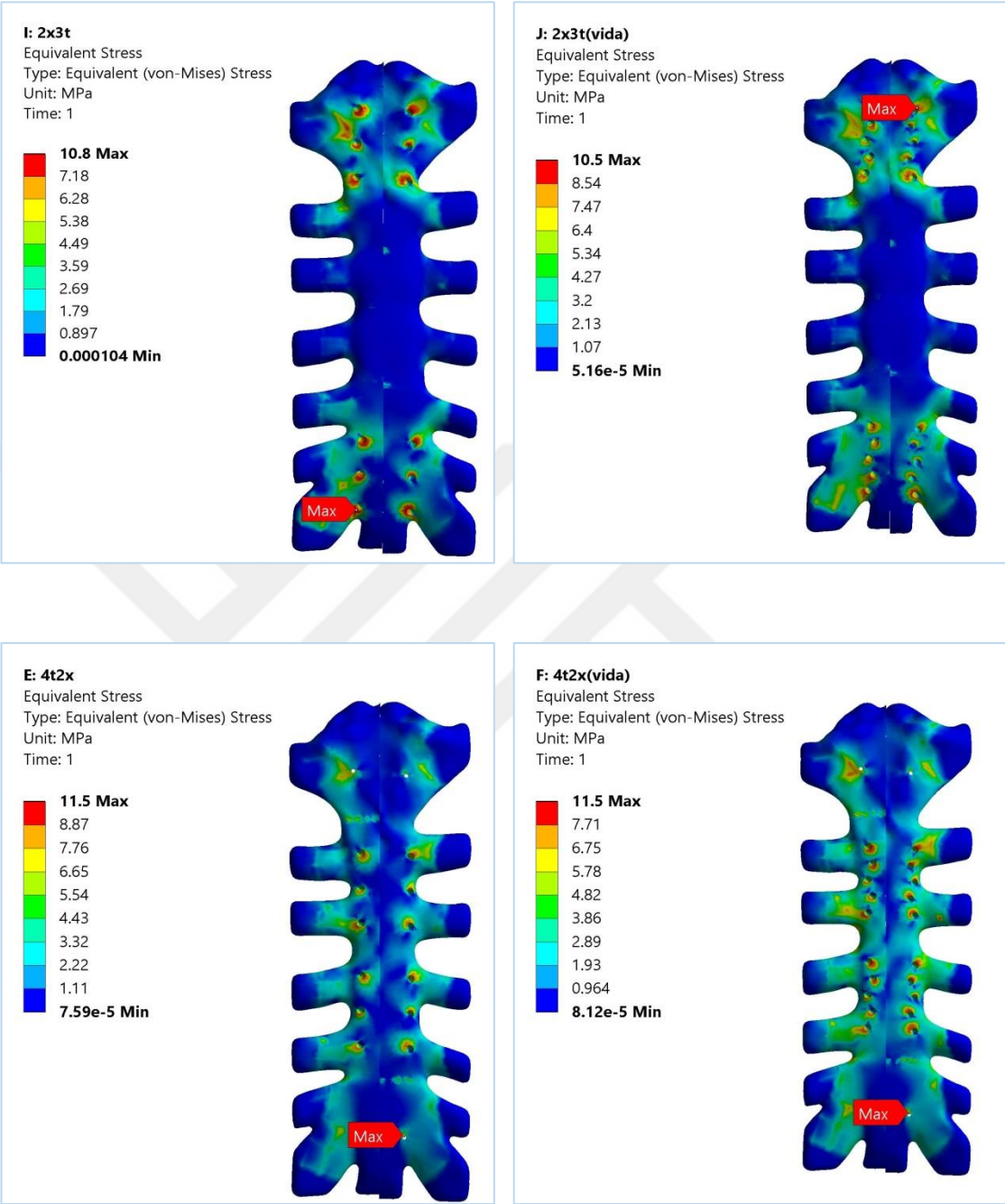
EK-2 (devam)



EK-2 (devam)



EK-2 (devam)



EK-2 (devam)

