



**STERNUM KAPAMA TEKNİKLERİNİN
ETKİNLİĞİNİN BİYOMEKANİK YÖNTEMLERLE
ARAŞTIRILMASI**

Süleyman Nazif ORHAN

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı
Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU
2016
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**STERNUM KAPAMA TEKNİKLERİNİN ETKİNLİĞİNİN
BİYOMEKANİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI**

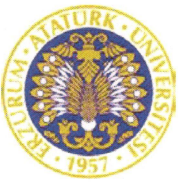


Süleyman Nazif ORHAN

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Mekanik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2016**

Her hakkı saklıdır



TEZ ONAY FORMU

**STERNUM KAPAMA TEKNİKLERİNİN ETKİNLİĞİNİN
BİYOMEKANİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI**

Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU danışmanlığında, Süleyman Nazif ORHAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 21/07/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Sadri ŞEN

Üye : Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU

Üye : Doç. Dr. Habib UYSAL

Üye : Doç. Dr. İlker KAZAZ

Üye : Doç. Dr. A. Fatih YETİM

İmza :

İmza :

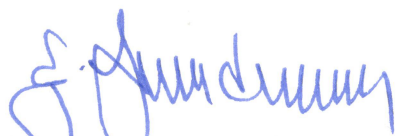
İmza :

İmza :

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **28.07./2016** tarih ve **30...../..20.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 2012/433

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

STERNUM KAPAMA TEKNİKLERİNİN ETKİNLİĞİNİN BİYOMEKANİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Süleyman Nazif ORHAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU

Bu çalışmada, çelik tel (no.5), çelik bant, PEEK bant, çelik kablo, titanyum klips ve titanyum plâk kullanılarak yapılan on farklı sternum kapama tekniğinin etkinliği biyomekanik deneylerle, çelik tel, çelik bant ve PEEK bantlarla yapılan ve deneysel olarak karşılaştırılmamış on bir farklı kapama tekniğinin yanal ayrılma yükü etkisindeki davranışları ise sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle incelenmiştir. Yapay sternum modellerinin kullanıldığı deneylerde, yanal ayrılma, boyuna kesme ve enine kesme yüklemelerinin etkisi incelenmiş ve kapama yöntemleri, deneylerden elde edilen emniyet yükü, direngenlik, kopma yükü ve kopma uzaması değerleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemelerinde, sternumda oluşan yer değiştirmeler MATLAB ortamında kodlanan özel bir program kullanılarak görüntü analizi yöntemiyle belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar yöntemlerin karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Değerlendirmelerde ayrıca, kapama yöntemlerinin maliyetleri, uygulama hızı ve kolaylığı ile birlikte deneyler sırasında gözlemlenen davranışları da dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri ise ANSYS Workbench programında gerçekleştirilmiş ve malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri de dikkate alınarak yapılan analizlerin, yöntemlerin gerçek davranışlarını yansıttığı doğrulanmıştır.

Deneyler sonucunda, üç tane PEEK bant veya çelik bantın dört adet telle birlikte kullanıldığı yöntemlerin diğer yöntemlerden daha istikrarlı bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Analizler sonucunda ise manubrium ve ksifoid bölgesinde en az iki adet tel kullanılmasının gerekli olduğu ve çelik bantların PEEK bantlardan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Çelik tellerde ve PEEK bantlarda görülen kopmalar, tellerin kemik üzerindeki kesme etkisi ve maliyetler de dikkate alındığında, üç çelik bant ve altı çelik telle yapılan kapamanın en optimum kapama yöntemi olduğu belirlenmiştir.

2016, 267 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mediyan sternotomi, sternum kapama teknikleri, biyomekanik, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi, görüntü analizi, plastik malzeme modellemesi, kontak mekaniği

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF STERNUM CLOSURE TECHNIQUES BY BIOMECHANICAL METHODS

Süleyman Nazif ORHAN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Division of Mechanics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU

In this study, efficiency of different sternum closure techniques using steel wire, steel band, PEEK band, steel cable, titanium clips and titanium plate are investigated both by experiments and by finite element models that consider material nonlinearity. In the experiments, artificial sternum models are exposed to lateral distraction (tension), longitudinal shear and torsion and the efficiency of the ten different closure techniques are assessed with respect to the allowable load, stiffness, rupture load and rupture displacement, observed in the experiments. Displacements in the lateral distraction and longitudinal shear tests are determined by a special image processing code developed, for this study, under MATLAB. In the evaluations, the techniques are also compared with respect to cost as well as speed and ease of application. The lateral distraction tests are computer simulated by ANSYS software and the effectiveness of finite element method in replicating the behaviour is verified. Eleven other variations of closure, not considered in the experiments, are compared by finite element models under lateral distraction by using ANSYS software.

As a result of the experiments, the two techniques using either three PEEK or steel bands with four steel wires are found to provide the most stable closure. The computer models further show that application of at least two wire loops at manubrium and xiphoid are invariably required and steel bands provide better closure than PEEK bands. When considering the rupture of the steel and PEEK bands as well as bone punching by wires and costs together, a closure using three steel band and six steel wire loops is determined to be the optimum technique.

2016, 267 pages

Keywords: Median sternotomy, sternum closure techniques, biomechanics, nonlinear finite element analysis, image processing, plastic material modeling, contact mechanics

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırladığım bu çalışmada, araştırmalarımı yönlendiren ve her türlü destek, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet H. ÖZYAZICIOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince yaptıkları yardımlardan dolayı, Sayın Prof. Dr. Sadri ŞEN'e, Sayın Doç. Dr. Habib UYSAL'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Abdurrahim ÇOLAK'a, Sayın Doç. Dr. İlker KAZAZ'a, Sayın Arş. Gör. Türkay KOTAN'a, Sayın Arş. Gör. Halim KOVACI'ya, Sayın Mak. Yük. Müh. Burak BOZKURT'a ve doktora eğitimim boyunca verdiği maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım süresince, göstermiş oldukları büyük sabır ve özveriyle bana destek olan çok kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

Süleyman Nazif ORHAN

Temmuz 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Amaç ve Kapsam	2
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Sternumun Anatomisi	5
2.2. Solunum Hareketinin Fizyolojisi ve Sternuma Etkisi	8
2.3. Sternuma Etkiyen Diğer Kuvvetler	12
2.4. Mediyana Sternotomi Yönteminin Tarihçesi ve Uygulanışı.....	13
2.5. Sternum Kapama Teknikleri	16
2.5.1. Tekli çelik tellerle sternal kapama.....	16
2.5.2. Çift çelik tellerle sternal kapama.....	21
2.5.3. Naylon bantlar ile sternal kapama	23
2.5.4. Mersilene şeritler ile sternal kapama.....	24
2.5.5. Polidioksanon (pds) sütürler ile sternal kapama.....	25
2.5.6. Sternal kablo sistemiyle sternal kapama	25
2.5.7. Çelik bantlar ile sternal kapama	27
2.5.8. Sternal ZipFix sistemiyle sternal kapama	28
2.5.9. Titanyum plâklarla sternal kapama	31
2.5.10. Sternal Talon sistemiyle sternal kapama	34
2.5.11. Nitinol sternum kapama klipsleri ile sternal kapama	35
2.5.12. Kryptonite kemik çimentosu ile sternal kapama	38
2.5.13. Vitalitec sternum kapama klipsleri ile sternal kapama.....	41
2.5.14. Sternumun kapatılmasında kullanılan diğer yöntemler	42

2.6. Kaynak Özetleri	46
3. MATERYAL ve YÖNTEM	77
3.1. Deneylerde Kullanılan Sternum Modelleri	77
3.2. Deneylerde Karşılaştırılan Sternum Kapama Teknikleri	81
3.2.1. Geleneksel tel yöntemi	84
3.2.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi	84
3.2.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi	86
3.2.4. Çelik bantlarla yapılan kapama yöntemleri	87
3.2.5. PEEK bantlarla yapılan kapama yöntemleri	89
3.2.6. Titanyum klips yöntemi.....	91
3.2.7. Titanyum plâklarla yapılan kapama yöntemleri.....	92
3.3. Yüklerin Uygulanması	94
3.3.1. Yükleme hızı	98
3.4. Deneylerin Gerçekleştirilmesi.....	99
3.4.1. Yanal ayrılma deneyi.....	99
3.4.2. Boyuna kesme deneyi.....	100
3.4.3. Enine kesme deneyi.....	101
3.5. Görüntü Analizi ile Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi	102
3.6. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	105
3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri	108
3.7.1. Sonlu elemanlar yöntemi.....	110
3.7.2. Sternum kapama yöntemlerinin bilgisayar modellerinin oluşturulması.....	111
3.7.3. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve sınır şartlarının uygulanması	116
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	125
4.1. Yanal Ayrılma Deneyi Bulguları	125
4.1.1. Geleneksel tel yöntemi	125
4.1.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi	127
4.1.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi	128
4.1.4. İki çelik bant yöntemi.....	130
4.1.5. Üç çelik bant yöntemi.....	132
4.1.6. İki PEEK bant yöntemi.....	134
4.1.7. Üç PEEK bant yöntemi	135

4.1.8. Titanyum klips yöntemi.....	137
4.1.9. Tek titanyum plâk yöntemi.....	139
4.1.10. İki titanyum plâk yöntemi	141
4.1.11. Yanal ayrılma deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	143
4.2. Boyuna Kesme Deneyi Bulguları.....	146
4.2.1. Geleneksel tel yöntemi	146
4.2.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi	148
4.2.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi	150
4.2.4. İki çelik bant yöntemi.....	152
4.2.5. Üç çelik bant yöntemi.....	154
4.2.6. İki PEEK bant yöntemi.....	156
4.2.7. Üç PEEK bant yöntemi	158
4.2.8. Titanyum klips yöntemi.....	160
4.2.9. Tek titanyum plâk yöntemi.....	162
4.2.10. İki titanyum plâk yöntemi	164
4.2.11. Boyuna kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	166
4.3. Enine Kesme Deneyi Bulguları.....	170
4.3.1. Geleneksel tel yöntemi	170
4.3.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi	172
4.3.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi	173
4.3.4. İki çelik bant yöntemi.....	175
4.3.5. Üç çelik bant yöntemi.....	176
4.3.6. İki PEEK bant yöntemi.....	178
4.3.7. Üç PEEK bant yöntemi	180
4.3.8. Titanyum klips yöntemi.....	182
4.3.9. Tek titanyum plâk yöntemi.....	184
4.3.10. İki titanyum plâk yöntemi	186
4.3.11. Enine kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	188
4.4. Kapama Yöntemlerinin Mekanik Özelliklerine Göre Karşılaştırılması.....	191
4.4.1. Yöntemlerin emniyet yüklerine göre karşılaştırılması	191
4.4.2. Yöntemlerin direngenlik değerlerine göre karşılaştırılması.....	194
4.4.3. Yöntemlerin kopma yüklerine göre karşılaştırılması	197

4.4.4. Yöntemlerin kopma uzamalarına göre karşılaştırılması.....	201
4.5. Yöntemlerin Karşılaştırılmasında Dikkate Alınan Diğer Değişkenler.....	204
4.5.1. Çelik tellerle yapılan sternal kapamalar	204
4.5.2. Çelik kablolarla yapılan figür-8 kapaması	206
4.5.3. Çelik bantlarla yapılan sternal kapamalar	208
4.5.4. PEEK bantlarla yapılan sternal kapamalar	209
4.5.5. Titanyum klipslerle yapılan sternal kapamalar	210
4.5.6. Titanyum plâklarla yapılan sternal kapamalar	210
4.6. Görüntü Analizi Sonuçları.....	212
4.6.1. Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi sonuçları	212
4.6.2. Boyuna kesme yüklemesinde görüntü analizi sonuçları	219
4.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları	222
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	238
5.1. Sonuçlar.....	239
5.2. Öneriler.....	243
KAYNAKLAR	248
EKLER	257
EK 1	257
ÖZGEÇMİŞ	267

SİMGELER DİZİNİ

316L	Paslanmaz çelik sınıfı (cerrahi çelik)
3B	Üç boyutlu
BT-CT	Bilgisayarlı tomografi
cm	Santimetre
dk	Dakika
E	Elastisite modülü
ϵ	Birim şekil değiştirme
F_n	Kontak kuvveti
F_t	Teğetsel kuvvet
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
kg	Kilogram
kPa	Kilopascal
L	Litre
m	Metre
mm	Milimetre
mmHg	Milimetre civa
ms	Milisaniye
MPa	Megapascal
μ	Sürtünme katsayısı
N	Newton
ν	Poisson oranı
P	Göğüs iç basıncı
PEEK	Polietereter keton
R	Göğüs kafesi yarıçapı
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
sn	Saniye
σ	Normal gerilme

σ_e	von Mises eşdeğer gerilmesi
T	Sternuma etkiyen iç kuvvet
τ	Kayma gerilmesi
X_p	Kontak penetrasyonu



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Göğüs kafesi ve sternum.....	5
Şekil 2.2.	Sternumun önden, yandan ve arkadan görünüşü ile sternum kısımları ...	6
Şekil 2.3.	Sternumun iç yapısı	8
Şekil 2.4.	Solunum sırasında göğüs kafesinin çalışma mekanizması	9
Şekil 2.5.	(a) Kova kulpu hareketi ile göğüs kafesinin yanal çapının artması, (b) tulumba kolu hareketi ile göğüs kafesinin ön-arka çapının artması ...	9
Şekil 2.6.	Sternuma etkiyen kuvvetler sonucunda oluşan hareketler.....	13
Şekil 2.7.	Valsalva hareketinin sternuma etkisi	13
Şekil 2.8.	Mediyan sternotomi uygulamasında sternumun kesilip göğüs kafesinin açılması	14
Şekil 2.9.	Sternumun çelik tellerle geleneksel şekilde kapatılması	17
Şekil 2.10.	Çelik tellerle yapılan farklı kapama teknikleri.....	18
Şekil 2.11.	Tellerin çelik sarmallarla takviye edildiği sternal kapama	20
Şekil 2.12.	Çelik tellerle birlikte zımba tellerinin kullanıldığı sternal kapama	21
Şekil 2.13.	Çift çelik tellerin sternuma yerleştirilmesi.....	22
Şekil 2.14.	Çift telin kanca ile bükülmesi ve yeterli bükülmede telde oluşan burkulma	22
Şekil 2.15.	Mersilene şeritlerle yapılan sternal kapama.....	24
Şekil 2.16.	Sternal kablo ve gerdirme/sıkıştırma aleti	26
Şekil 2.17.	Sternal kablolarla sternumun kapatılması.....	26
Şekil 2.18.	Sternum Band yönteminin uygulanışı.....	28
Şekil 2.19.	ZipFix sternum kapama bandı	29
Şekil 2.20.	ZipFix bantların sternuma uygulanışı	29
Şekil 2.21.	ZipFix bant yönteminin farklı uygulama şekilleri	30
Şekil 2.22.	X ve L şekilli titanyum plâklarla yapılan sternal kapama.....	32
Şekil 2.23.	Sternumun kapatılmasında kullanılan farklı şekillerdeki titanyum plâklar	32
Şekil 2.24.	Synthes firmasının plâklarında bulunan acil durum pimi	33
Şekil 2.25.	Sternal Talon kullanılarak sternumun kapatılması	34

Şekil 2.26. Tek ve çift ayaklı Talon modelleri.....	35
Şekil 2.27. Farklı boyutlardaki nitinol klipsler ve uygulama aleti.....	36
Şekil 2.28. Yapay bir sternum modeli üzerine yerleştirilmiş nitinol klipsler	37
Şekil 2.29. Sternumun kemik çimentosu kullanılarak kapatılmasının aşamaları.....	40
Şekil 2.30. Vitalitec sternum kapama klipsleri ve sıkıştırma aleti.....	41
Şekil 2.31. Vitalitec klipsler ile sternumun kapatılması	42
Şekil 2.32. Titanyum hasırın çelik tellerle birlikte uygulaması	43
Şekil 2.33. Farklı boyutlardaki Waston sternum kapama klipsleri	44
Şekil 2.34. Tritium plâk ve bu plâğin sternuma uygulaması.....	44
Şekil 2.35. Dsf plâkların yapay modeller üzerinde uygulanması.....	45
Şekil 3.1. Poliüretandan üretilen yapay sternum modeli.....	78
Şekil 3.2. Deneysel bir çalışmada kullanılan çelik bloklar	79
Şekil 3.3. Polietilen bloklar kullanılarak hazırlanan deney düzeneği	80
Şekil 3.4. Mediyen sternotomi uygulanmış sternum modelleri	80
Şekil 3.5. Geleneksel tel yöntemiyle sternumun kapatılması	84
Şekil 3.6. Çelik tellerle figür-8 tekniğinin uygulanışı.....	85
Şekil 3.7. Figür-8 tekniğiyle kapatılmış sternumlar.....	85
Şekil 3.8. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin uygulanışı.....	86
Şekil 3.9. Çelik kablolarla yapılan figür-8 yöntemiyle kapatılmış sternumlar	87
Şekil 3.10. Çelik bant yönteminin uygulanışı	88
Şekil 3.11. Üç çelik bant ve dört tane tel kullanılarak sternumun kapatılması.....	88
Şekil 3.12. İki çelik bant ve beş tane tel kullanılarak sternumun kapatılması	89
Şekil 3.13. PEEK bant yönteminin uygulanışı.....	90
Şekil 3.14. Üç tane PEEK bant ve dört tane tel kullanılarak sternumun kapatılması	90
Şekil 3.15. İki tane PEEK bant ve beş tane tel kullanılarak sternumun kapatılması	91
Şekil 3.16. Üç tane titanyum klips ve dört tane tel kullanılarak sternumun kapatılması	92
Şekil 3.17. (a) Bir tane plâk ve beş tane çelik tel, (b) iki tane plâk ve üç tane çelik tel kullanılarak sternumun kapatılması	93

Şekil 3.18. Biyomekanik çalışmalarda dikkate alınan yükleme şekilleri	94
Şekil 3.19. Yüklerin uygulanmasından kullanılan özel parçalar.....	96
Şekil 3.20. Sternum modellerinin delinmesinde kullanılan kalıplar	97
Şekil 3.21. Sternum modellerinin çenelere vidalarla sabitlenmesi	98
Şekil 3.22. Yanal ayrılma deneyi	100
Şekil 3.23. Boyuna kesme deneyi	101
Şekil 3.24. Enine kesme deneyi	102
Şekil 3.25. Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi için kullanılan daireler	103
Şekil 3.26. Boyuna kesme yüklemesinde görüntü analizi için kullanılan daireler	104
Şekil 3.27. Yük-yer değiştirme eğrisi ve karşılaştırma parametreleri.....	107
Şekil 3.28. Modelleme ve sonlu elemanlar analizlerinde yapılan işlemler.....	110
Şekil 3.29. BT görüntüleri ile MIMICS programında sternum geometrisinin oluşturulması	112
Şekil 3.30. Sternumun Solidworks programında oluşturulmuş katı modeli	113
Şekil 3.31. (a) Kapama malzemeleri modellenirken dikkate alınan bir sternum kesiti ve bu kesite göre modellenen, (b) çelik tel, (c) çelik bant, (d) PEEK bant...	113
Şekil 3.32. Sonlu elemanlar analizleriyle incelenen sternum kapama yöntemleri.....	114
Şekil 3.33. ANSYS programında tanımlanan elasto-plastik malzeme özellikleri	117
Şekil 3.34. On düğüm noktasına sahip tetrahedral eleman	118
Şekil 3.35. Sternum gövdesi ve kontak bölgelerindeki genel mesh yapısı	120
Şekil 3.36. Sürtünme etkisindeki blok sistemi.....	121
Şekil 3.37. Kontak bölgesinde penetrasyon oluşumu	122
Şekil 3.38. Sonlu elemanlar analizlerinde modellere uygulanan sınır şartları.....	124
Şekil 4.1. Geleneksel tel yönteminin yan al ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması	126
Şekil 4.2. Geleneksel tel yönteminin yan al ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	126
Şekil 4.3. Çelik tellerle figür-8 yönteminin yan al ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	127
Şekil 4.4. Çelik tellerle figür-8 yönteminin yan al ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	128

Şekil 4.5. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	129
Şekil 4.6. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	130
Şekil 4.7. İki çelik bant yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	131
Şekil 4.8. İki çelik bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	132
Şekil 4.9. Üç çelik bant yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması.....	133
Şekil 4.10. Üç çelik bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	133
Şekil 4.11. İki PEEK bant yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	134
Şekil 4.12. İki PEEK bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	135
Şekil 4.13. Üç PEEK bant yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	136
Şekil 4.14. Üç PEEK bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	137
Şekil 4.15. Titanyum klips yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması.....	138
Şekil 4.16. Titanyum klips yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	138
Şekil 4.17. Tek titanyum plâk yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	140
Şekil 4.18. Tek titanyum plâk yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	141
Şekil 4.19. İki titanyum plâk yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması.....	142
Şekil 4.20. İki titanyum plâk yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi.....	142

Şekil 4.21. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin emniyet yükleri ...	144
Şekil 4.22. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin direngenlikleri.....	144
Şekil 4.23. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma yükü değerleri.....	145
Şekil 4.24. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma uzaması değerleri.....	146
Şekil 4.25. Geleneksel tel yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	147
Şekil 4.26. Geleneksel tel yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	148
Şekil 4.27. Çelik tellerle figür-8 yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde göçme mekanizması.....	149
Şekil 4.28. Çelik tellerle figür-8 yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	149
Şekil 4.29. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	151
Şekil 4.30. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	152
Şekil 4.31. İki çelik bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	153
Şekil 4.32. İki çelik bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	154
Şekil 4.33. Üç çelik bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	155
Şekil 4.34. Üç çelik bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	156
Şekil 4.35. İki PEEK bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	157
Şekil 4.36. İki PEEK bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	158
Şekil 4.37. Üç PEEK bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	159

Şekil 4.38. Üç PEEK bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	160
Şekil 4.39. Titanyum klips yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	161
Şekil 4.40. Titanyum klips yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	162
Şekil 4.41. Tek titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	163
Şekil 4.42. Tek titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	164
Şekil 4.43. İki titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	165
Şekil 4.44. İki titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	166
Şekil 4.45. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin emniyet yükleri ..	168
Şekil 4.46. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin direngenlikleri	168
Şekil 4.47. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma yükü değerleri.....	169
Şekil 4.48. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma uzaması değerleri.....	170
Şekil 4.49. Geleneksel tel yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	171
Şekil 4.50. Geleneksel tel yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	171
Şekil 4.51. Çelik tellerle figür-8 yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	172
Şekil 4.52. Çelik tellerle figür-8 yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	173
Şekil 4.53. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	174
Şekil 4.54. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	174

Şekil 4.55. İki çelik bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	175
Şekil 4.56. İki çelik bant yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	176
Şekil 4.57. Üç çelik bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde göçme mekanizması.....	177
Şekil 4.58. Üç çelik bant yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	177
Şekil 4.59. İki PEEK bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	179
Şekil 4.60. İki PEEK bant yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	180
Şekil 4.61. Üç PEEK bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	181
Şekil 4.62. Üç PEEK bant yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	181
Şekil 4.63. Titanyum klips yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	183
Şekil 4.64. Titanyum klips yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	184
Şekil 4.65. Tek titanyum plâk yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	185
Şekil 4.66. Tek titanyum plâk yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	186
Şekil 4.67. İki titanyum plâk yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları.....	187
Şekil 4.68. İki titanyum plâk yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi.....	187
Şekil 4.69. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin emniyet yükleri	189
Şekil 4.70. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin direngenlikleri	189
Şekil 4.71. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma yükü değerleri.....	190

Şekil 4.72. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma uzaması değerleri.....	191
Şekil 4.73. Farklı yükleme durumları için yöntemlerin emniyet yüklerinin karşılaştırılması	192
Şekil 4.74. Farklı yükleme durumları için yöntemlerin direngenlik değerlerinin karşılaştırılması	195
Şekil 4.75. Farklı yükleme durumları için yöntemlerin kopma yüklerinin karşılaştırılması	198
Şekil 4.76. Farklı yükleme durumları için yöntemlerin kopma uzamalarının karşılaştırılması	202
Şekil 4.77. Çelik tellerin bağlama esnasında sternumu kesmesi.....	205
Şekil 4.78. Düğüm noktasından kırılıp açılan çelik tel	206
Şekil 4.79. Çelik kabloların montaj enstrümanının üzerindeki gerilme göstergesi ...	207
Şekil 4.80. Çelik kabloların montaj sonrası görüntüsü	207
Şekil 4.81. Çelik bantların montaj sırasında sternumu kesmesi ve ezmesi.....	208
Şekil 4.82. Yanal ayrılma deneyinde kilit kısmından sıyrılıp açılan PEEK bantlar ..	209
Şekil 4.83. Boyuna kesme yüklemesinde plâk vidalarının sternumu kesmesi.....	211
Şekil 4.84. Enine kesme yüklemesinde plâk vidalarının sternumdan sıyrılması	211
Şekil 4.85. Yanal ayrılma deneylerinde görüntü analizi ile elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri.....	213
Şekil 4.86. Boyuna kesme deneylerinde görüntü analizi ile elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri.....	220
Şekil 4.87. Üç çelik bant yönteminde emniyet yükü etkisinde oluşan yer değiştirmeler.....	223
Şekil 4.88. Geleneksel tel ve üç çelik bant yöntemlerinin SEY analizi ve deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	224
Şekil 4.89. Üç PEEK bant yönteminin SEY analizi ve deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması	225
Şekil 4.90. Ksifoid bölgesinde kullanılan telin kemiği kesme etkisi	227
Şekil 4.91. SEY analizleri ile karşılaştırılan yöntemlerin yük-yer değiştirme eğrileri.....	228
Şekil 4.92. Üç çelik bant ve altı çelik tel kullanılarak yapılan sternal kapama.....	237

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Deneylerde karşılaştırılan sternum kapama teknikleri.....	81
Çizelge 3.2.	Sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılan sternum kapama teknikleri	109
Çizelge 3.3.	Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri	117
Çizelge 3.4.	Eleman kalitesinin skewness değerine göre değişimi	119
Çizelge 4.1.	Yanal ayrılma yüklemesi deney sonuçları	143
Çizelge 4.2.	Boyuna kesme yüklemesi deney sonuçları	167
Çizelge 4.3.	Enine kesme yüklemesi deney sonuçları	188
Çizelge 4.4.	Yöntemlerin emniyet yükü değerlerine göre oluşan sıralama	192
Çizelge 4.5.	Yöntemlerin direngenlik değerlerine göre oluşan sıralama	195
Çizelge 4.6.	Yöntemlerin kopma yükü değerlerine göre oluşan sıralama	198
Çizelge 4.7.	Yöntemlerin kopma uzaması değerlerine göre oluşan sıralama	201
Çizelge 4.8.	Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri.....	215
Çizelge 4.9.	Yanal ayrılma yüklemesinde sternumun ön ve arka yüzeylerindeki yer değiştirmelere göre belirlenen emniyet yükleri	216
Çizelge 4.10.	Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen kopma uzaması değerleri.....	217
Çizelge 4.11.	Tek plâk ve iki plâk yöntemlerinde sternumun ön ve arka yüzeylerinde oluşan yer değiştirmelerin karşılaştırılması	218
Çizelge 4.12.	Tek plâk ve iki plâk yöntemlerinde sternumun ön ve arka yüzeylerinden elde edilen emniyet yükü, direngenlik ve kopma uzaması değerleri ...	219
Çizelge 4.13.	Boyuna kesme yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri.....	221
Çizelge 4.14.	Boyuna kesme yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen kopma uzaması değerleri.....	222
Çizelge 4.15.	Geleneksel tel, üç çelik bant ve üç PEEK bant tekniklerinin farklı yöntemlerle belirlenen direngenlik ve emniyet yükü değerleri.....	225
Çizelge 4.16.	SEY analizleri ve deneylerden elde edilen yer değiştirme değerleri ...	226

Çizelge 4.17. SEY analizlerinde karşılaştırılan yöntemlerin emniyet yükü ve direngenlik değerleri	232
Çizelge 4.18. SEY analizleri sonucunda 1457 N yük değeri için bulunan yer değiştirme değerleri.....	233
Çizelge 4.19. SEY analizlerinde en iyi sonuçları veren üç yöntemin kendi emniyet yükleri etkisinde yer değiştirme değerleri.....	234



1. GİRİŞ

1.1. Genel

Kalp ve damar hastalıkları bugün için tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de başta gelen ölüm sebeplerindendir. Tüm dünyada yılda 17 milyon kişi hayatını kalp ve damar hastalıklarına bağlı nedenlerle kaybederken, ülkemizde kesin sayılar olmamakla birlikte, bugün için bu sayının 200 bin dolayında olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye’de genç nüfus yapısına karşın ölümler yüksek bir oranda görülmekte ve 2020 yılına doğru, nüfusun yaşlanmasına paralel olarak bu sayının 400 bin dolayına yükseleceği tahmin edilmektedir (Anonim 2012a). Türkiye İstatistik Kurumu’nun 2014 yılındaki çalışmasında, ölüm vakalarının %40,4’ünün dolaşım sistemi hastalıkları kaynaklı olduğu ve bu oranın %46,7’sini de kalp hastalıklarının oluşturduğu belirlenmiştir (Anonim 2014a). Kalp ve damar hastalıklarının görülmesindeki bu artışla birlikte açık kalp ameliyatı geçiren hasta sayısı da giderek artmaktadır. Ülkemizde 2009 yılında Sağlık Bakanlığı hastaneleri ile üniversite hastanelerinde toplam 21886 açık kalp ameliyatı gerçekleştirilmiş, 2010 yılında ise bu sayı 23043’e yükselmiştir (Anonim 2012b). Türk Kalp ve Damar Cerrahisi Derneği’nin 2014 yılı verilerine göre ise 42’si Sağlık Bakanlığı, 52’si üniversite ve 164’ü özel hastane olmak üzere toplam 260 kalp merkezinde yıllık 75 bin açık kalp ameliyatı yapılmaktadır (Anonim 2014b).

Açık kalp cerrahisine, kapak darlığı veya kapak yetersizliği kaynaklı kapak replasmanı ameliyatlarında, akciğer ve kalp yetmezliğine bağlı organ nakli ameliyatlarında, pıhtılaşmanın giderilmesine yönelik bypass cerrahisinde ve çeşitli travma vakalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Bütün açık kalp ameliyatlarının başlangıcında sternum (göğüs kemiği), kalbe ulaşımın sağlanması amacıyla uzunlamasına iki eş parçaya ayrılmakta ve ameliyat sonunda çeşitli sternal sabitleme (kapama) malzemesi ve yöntemleri kullanılarak tekrar birleştirilip kapatılmaktadır. İntratorasik (göğüs içi) ameliyatların büyük çoğunluğu için bir elzem olan bu yönteme “mediyan sternotomi” adı verilmektedir (Dieselman 2011).

Mediyan sternotominin ameliyat sonrası komplikasyonları, sık rastlanmamasına rağmen hastanede yatış süresini uzatıp başta enfeksiyon olmak üzere morbidite ve mortaliteyi arttırabilmektedir. Sternal problemler sadece sternotomi kesi hattının hareket etmesi (sternumun açılması) şeklinde olabileceği gibi, yüzeysel sternum enfeksiyonu, osteomyelit (kemik iltihabı), kostokondrit (kaburgaların sternumla birleştiği kostokondral bölgede oluşan şişme ve ağrı) veya mediastinit (göğüs kafesi içinde akciğerlerin arasında kalan bölge olan mediasteninin iltihaplanması) ile de sonuçlanabilir (Eğileten vd 2006). Sternal komplikasyonların görülme oranı % 0,5-2,5 arasında olmasına rağmen mortalite oranı %10-40 arasında değişmektedir (Casha *et al.* 1999a).

Sternotominin ameliyat sonrası komplikasyonlarından kaçınabilmek için iyi bir sternal sabitleme şarttır (Eğileten vd 2006). Genel olarak, kapama tekniğinin yüksek mukavemetli olması ve iyi bir rijitlik sağlaması durumunda iyi sonuçlar elde edilmektedir (Cohen and Griffin 2002).

En iyi sternal stabilitenin elde edilmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda 40'ın üzerinde farklı teknik geliştirilmiş ve birçok farklı malzeme sternal kapama için kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları belirli bir tekniğin klinik uygulamaları şeklinde yapılırken, diğerleri farklı tekniklerin yapay modeller kullanılarak biyomekanik özelliklerinin araştırılması şeklindedir. Bununla birlikte, sternal kapama için en uygun yöntemin hangisi olduğu konusu hâlâ tartışmalıdır (Tekümit *et al.* 2009).

1.2. Amaç ve Kapsam

Mediyan sternotomi sonrasında sternumun iyi bir şekilde kapatılması, sternumun hareketini minimize edecek şekilde rijit ve stabil bir kapamanın sağlanması demektir. Kapama yöntemleri üzerine birçok deneysel ve klinik çalışma yapılmasına rağmen en iyi kapamayı sağlayan yöntem hakkında bir fikir birliği oluşmamıştır. Deneysel ve klinik çalışmalar arasında farklı sonuçlar olduğu gibi, bu çalışmalar kendi içlerinde de çelişebilmektedir. Klinik çalışmalarda, hastaların kemik yapısı ve sahip oldukları risk

faktörleri çalışma sonuçlarını oldukça etkilerken, biyomekanik çalışmalarda da genel kabul gören ve uygulanan bir deney sistemi-yöntemi olmaması yapılan çalışmaların birbiriyle kıyaslanmasını engellemektedir. Literatürde yer alan deneysel çalışmalarda görülen farklılıklar aşağıda sıralanmıştır.

- Sternum modeli olarak farklı malzemeler (insan sternumu, hayvan sternumu, yapay sternum modelleri) kullanılmaktadır.
- Sternuma gerçekte etkiyen yükleri yansıtan, farklı yükleme şekillerinden (yanal ayrılma, boyuna kesme ve enine kesme) özellikle yanal ayrılma yüklemesi, çalışmaların büyük kısmında uygulanmakta, yöntemlerin diğer yükleme şartlarındaki davranışları çoğunlukla incelenmemektedir.
- Deneyler, statik veya dinamik deneyler şeklinde yapılmaktadır. Yüklerin uygulanmasında oldukça farklı yükleme hızı veya frekans değerleri kullanılmaktadır.
- Sternumların yükleme çenelerine bağlanması farklı yöntemlerle (yapıştırma veya vidalama) yapılmaktadır.
- Ameliyat uygulamalarından farklı olarak, kapama malzemeleri çoğunlukla sadece sternumun gövde kısmında kullanılmakta ve yüklemeler bu bölgedeki kaburga çıkıntılarında yapılmaktadır.

Bu çalışmada ise mevcut literatür çalışmalarındaki eksiklik ve farklılıklar dikkate alınarak, sternum kapama yöntemlerinin biyomekanik deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle detaylı bir incelemesinin yapılması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk kısmında, sternumun kapatılmasında en çok kullanılan malzemelerden olan çelik tel, çelik bant, PEEK bant (cırcır kilitli bant), titanyum klips ve titanyum plâklar kullanılarak yapılan toplam on farklı sternum kapama yöntemi biyomekanik deneylerle karşılaştırılmıştır. Poliüretandan üretilmiş yapay sternum modellerinin kullanıldığı deneylerde, üç farklı yükleme durumunun (yanal ayrılma, boyuna kesme ve enine kesme) etkisi incelenmiş ve kapama yöntemleri, deneylerden elde edilen emniyet yükü (sternum kesi hattında 2 mm değerinde yer değiştirmeye neden olan yük), direngenlik, kopma yükü ve kopma uzaması değerleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Kapama yöntemlerinin karşılaştırılmasında bu mekanik özelliklerle birlikte yöntemlerin

maliyetleri, uygulama hızı ve kolaylığı ile deneyler sırasında gözlemlenen davranışları da dikkate alınmıştır. Ayrıca, sternumun farklı bölgelerinde oluşan yer değiştirmelerin karşılaştırılması amacıyla görüntü analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla MATLAB dilinde özel bir program kodlanmış ve bu programla yanal ayrılma yüklemesinde sternumun ön ve arka yüzünde yedi farklı noktada, boyuna kesme yüklemesinde ise sternumun ön yüzünde oluşan yer değiştirmeler, deneyler sırasında kaydedilen görüntüler kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise çelik tel, çelik bant ve PEEK bant kullanılarak yapılan ve deneysel olarak karşılaştırılmamış toplam on bir farklı sternum kapama yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde davranışları ANSYS Workbench programında yapılan elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi analizleri ile karşılaştırılmıştır.

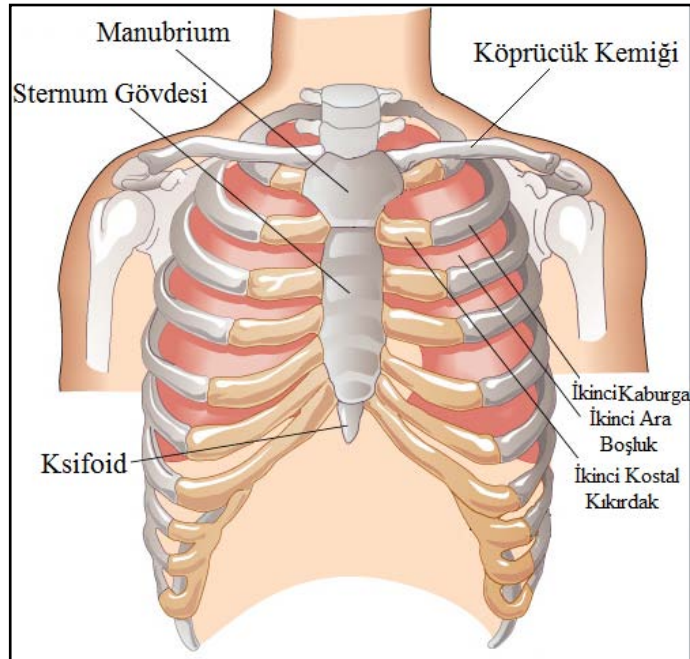
Çalışma kapsamında hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle incelenen kapama teknikleri, klinik uygulamalar dikkate alınarak ve kapama malzemelerin mekanik davranışlarını yansıtacak şekilde tasarlanmış, böylece mevcut literatür çalışmalardan farklı ve özgün kapama yöntemleri ortaya konmuş ve incelenmiştir. Ayrıca, deneylerde kullanılan PEEK bant ve titanyum klipslerle yapılan herhangi bir kapama tekniğinin incelendiği deneysel çalışmalar ve çelik bantların incelendiği sonlu elemanlar yöntemi çalışmaları literatürde yer almamaktadır. Yöntemlerin bu özgünlüğünün yanında, literatürde çok az sayıda ki çalışmada uygulanan boyuna kesme ve enine kesme yüklemeleri de, yanal ayrılma yüklemesinin yanında deneylerde dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde ise, mevcut literatür çalışmalarından farklı olarak, incelenen malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri de dikkate alınmış ve kapama yöntemlerinin, deneylerde görülen gerçek davranışlarını yansıtan modellerin ortaya konması amaçlanmıştır. Çalışmada, belirli markalar değerlendirilmemiş, ürünler konsept olarak test edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde sternumun anatomisi, sternuma etkiyen yükler, mediyan sternotomi yönteminin tarihçesi ve uygulanışı ile birlikte sternum kapama yöntemleri hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca, mevcut sternal kapama yöntemlerinin karşılaştırıldığı ve yeni kapama yöntemlerinin geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar anlatılacaktır.

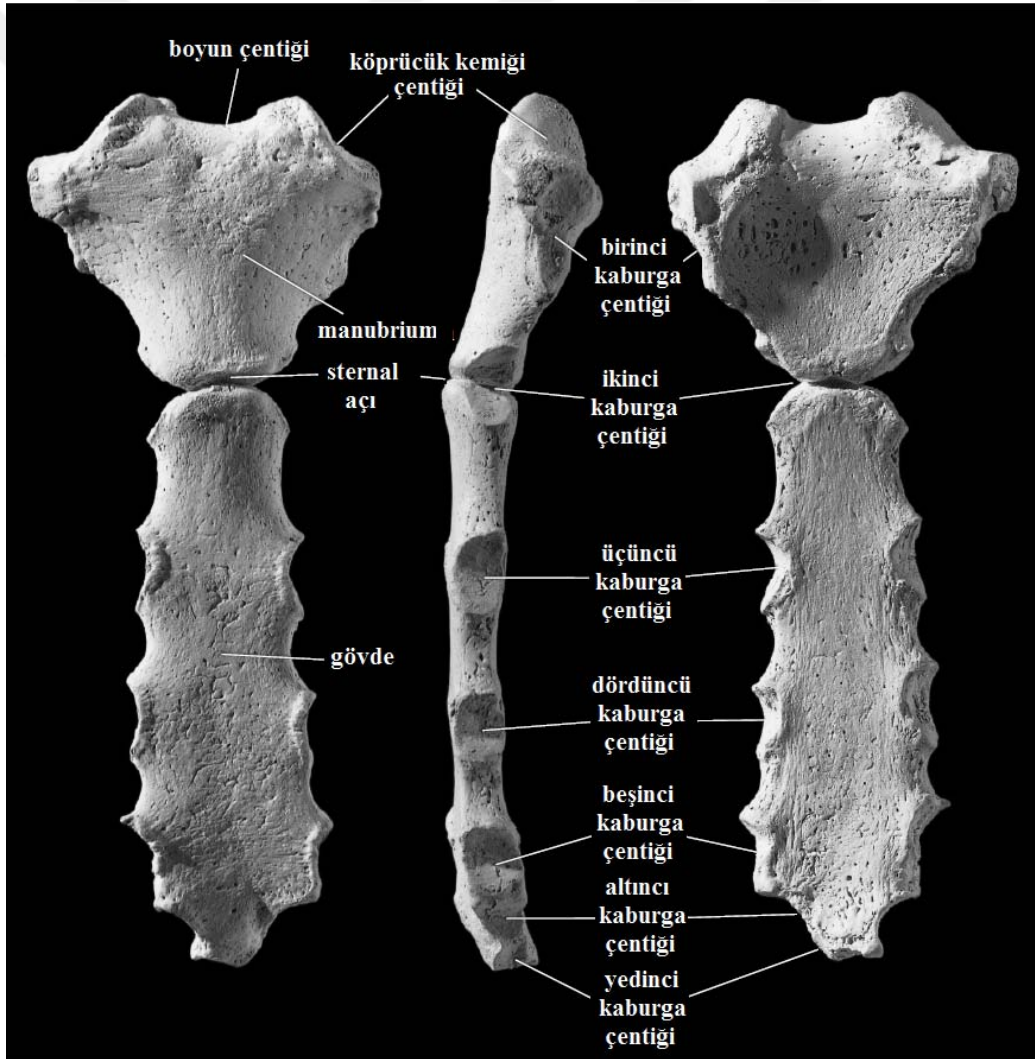
2.1. Sternumun Anatomisi

Göğüs kemiği olarak da bilinen sternum, göğüs kafesinin ön kısmının merkezinde yer alan ve iki yanından yedi çift kaburganın bağlandığı yassı bir kemiktir (Pai 2005). Sternum önden konveks, arkadan ise konkav bir şekildedir ve en üstte manubrium, ortada gövde (corpus) ve en altta da ksifoid denilen üç bölümden oluşmaktadır (Şekil 2.1) (Standring 2008).



Şekil 2.1. Göğüs kafesi ve sternum

Sternumun en üst kısmında bulunan ve köprücük kemiğini de destekleyen manubrium, genelde dört köşeli bir şekle sahiptir ve sternumun en kalın ve en yoğun kısmıdır. Manubriumun altında yer alan gövde kısmı, ikinci kaburga çiftinden yedinciye kadar, altı çift kaburganın bağlandığı ve manubriumdan daha uzun, daha dar ve daha ince olan bölgedir. Gövde kısmının altında yer alan ksifoid ise şekil ve büyüklük açısından en çok değişkenlik gösteren kısımdır. Oldukça kırıkdaksı bir yapıya sahip olan ksifoid ancak kırk yaş civarında kemikleşmektedir (Bakalova *et al.* 2010). Bu üç ana bölümün haricindeki sternum kısımları Şekil 2.2’de gösterilmiş ve aşağıda açıklanmıştır.

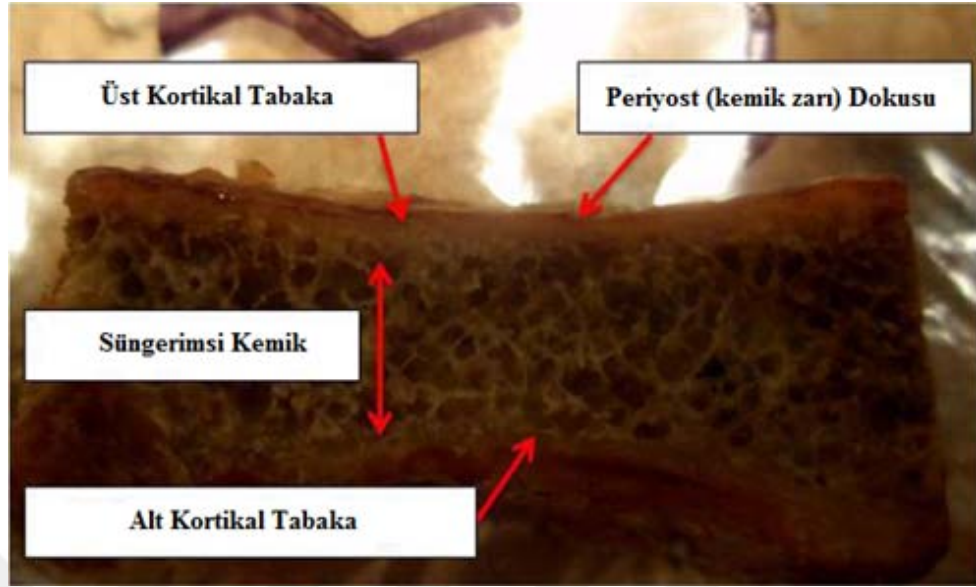


Şekil 2.2. Sternumun önden, yandan ve arkadan görünüşü ile sternumun kısımları (White *et al.* 2012)

- Köprücük kemiği çentikleri, sternumun en üst kısmının köşelerinde yer almaktadırlar ve manubriuma sağ ve sol köprücük kemiklerinin eklemlendiği yerlerdir.
- Boyun çentiği, manubriumun en üst kısmının ortasında bulunan çentiktir.
- Kostal çentikler, birincisi manubriumda köprücük kemiği çentiğinin altında, ikincisi manubriumla gövde arasında ve kalan beş tanesi ise gövdenin iki tarafında yer alan ve sternuma kaburgaların eklemlendiği çentik çiftleridir.
- Sternal açığı, manubriumla gövdenin birleştiği noktada oluşan açıdır (White *et al.* 2012).

Sternumun toplam uzunluğu erkeklerde ortalama 20,86 cm iken kadınlarda 18,29 cm civarındadır. Sternumun manubrium ve gövde kısımlarındaki ortalama genişliği ise erkeklerde sırasıyla, 5,25 cm ve 3,07 cm, kadınlarda 4,59 cm ve 2,71 cm'dir. Ayrıca, sternumun ortalama kalınlığı, manubrium kısmında erkeklerde 1,26 cm, kadınlarda 1,12 cm iken, gövde kısmında erkeklerde 1 cm, kadınlarda ise 0,92 cm'dir (Selthofer 2006).

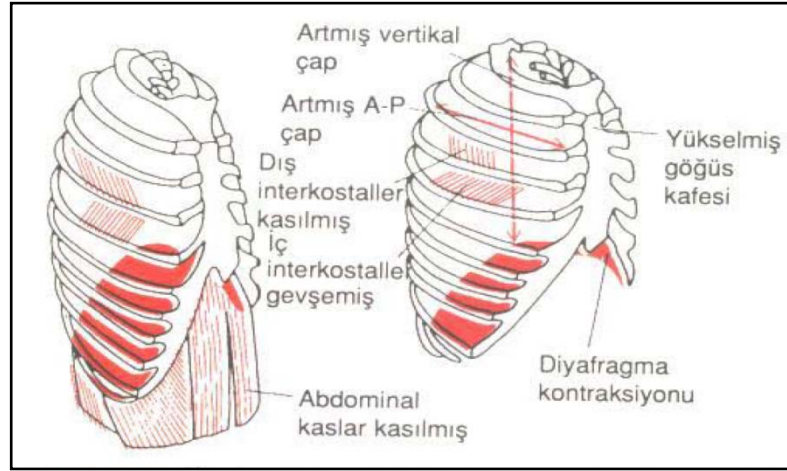
Sternum, kortikal (kabuksal) kemik ve süngerimsi kemik olmak üzere iki farklı kemik formundan oluşmuştur. Süngerimsi kemik sternumun iç kısmını oluştururken, kortikal kemik, sert bir kabuk şeklinde süngerimsi tabakanın etrafını sarmaktadır (Şekil 2.3). Oldukça yoğun bir yapıda olan kortikal kemik, kemiklere şeklini, yapısını ve yüklere karşı koyma kabiliyetini vermektedir. Süngerimsi kemik ise gözenekli ve oldukça yumuşak bir yapıdadır ve yeni kan hücrelerinin üretildiği kemik iliğini ihtiva etmektedir. Solunum esnasında sternumun esneyebilmesi için diğer kemiklere nazaran daha elastik olması gerektiğinden, sternum ince bir kortikal kemik tabakasının altında nispeten daha yüksek yoğunlukta bir süngerimsi kemik dokusu içermektedir (Bakalova *et al.* 2010).



Şekil 2.3. Sternumun iç yapısı

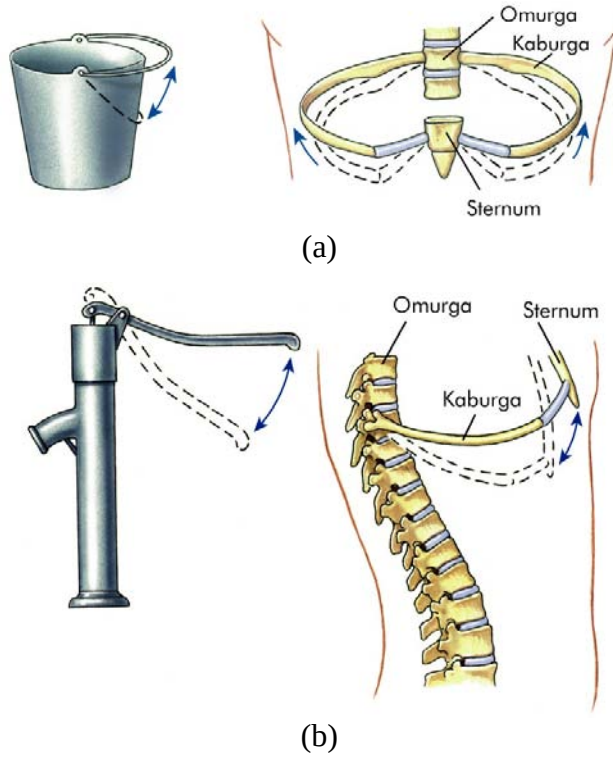
2.2. Solunum Hareketinin Fizyolojisi ve Sternuma Etkisi

Solunum hareketi esnasında, kaburga kemiklerinin omurga ve sternuma bağlandıkları noktadaki dönme hareketleri ile çeşitli kasların gevşemesi ve kasılması nedeniyle sternum üzerine etkiyen solunum yükleri oldukça karmaşık bir yapıdadır. Soluk alma sırasında göğüs kafesi yukarı ve dışa doğru ötelenerek hacmini artırır ve akciğerlerin havayla dolup genişlemesine imkân verir (Şekil 2.4) (Pai 2005).



Şekil 2.4. Solunum sırasında göğüs kafesinin çalışma mekanizması

Hacimdeki artış, üst ve alt kaburga kemiklerinin omurga tarafından dönmesi sonucunda göğüs kafesi çapının yanıl ve dorsal-ventral (arka-ön) yönlerde artmasıyla meydana gelir (Şekil 2.5) (Pai 2005).



Şekil 2.5. (a) Kova kulpu hareketi ile göğüs kafesinin yanıl çapının artması, (b) tulumba kolu hareketi ile göğüs kafesinin ön-arka çapının artması

Diyafram kası, solunum hareketinin esas kası olarak kabul edilir. Soluk verme esnasında abdominal kaslar, karın bölgesindeki organları yukarı doğru diyaframın üzerine iterler ve böylece diyafram apozisyon bölgesinin içine doğru hareket eder. Diyafram, apozisyon bölgesindeki basıncı göğüs kafesine aktarır ve böylece akciğerler üzerinde harici bir basınç oluşturarak, içlerindeki havayı çıkarmaya zorlar. Abdominal kasların yanı sıra interkostal ve skalen kaslarda solunum hareketi için oldukça öneme sahiptirler. Kaburga kemikleri boyunca, birlikte dokunmuş bir formda bulunan bu kasların omurga ve sternumda ek noktaları bulunmaktadır ve muhtemelen sternum orta hattı üzerinde oluşan kuvvetler üzerinde etkilidirler. Sonuç olarak göğüs kafesindeki, iskelet sistemi ve kaslar arasındaki etkileşim solunum sırasında oldukça karmaşık bir yapıdadır ve bu etkileşim hâlâ araştırılmaya devam edilmektedir (Pai 2005).

Araştırmacılardan bazıları sternuma etkiyen en büyük yüklerin öksürme, hapşıрма ve darbe kaynaklı olduğunu belirtmektedirler (Casha *et al.* 1999a). Öksürme sırasında göğüs duvarında oluşan ve sternuma etkiyen kuvvetleri hesaplamak amacıyla Casha *et al.* (1999a) tarafından matematiksel bir model ortaya konmuştur. Göğüs kafesinin silindirik olduğu kabulü ve Laplace kanununun kullanılmasıyla aşağıdaki eşitlik yazılmıştır;

$$T=R.L.P \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte, T sternuma etkiyen kuvvet, R göğüs yarıçapı, L göğüs uzunluğu ve P göğüs iç basıncıdır. Göğüs yarıçapının yaklaşık 15 cm, uzunluğunun 25 cm olduğu kabulü ve öksürme esnasında göğüs iç basıncının 40 kPa'a kadar yükselebileceği bilgisinden hareketle sternuma etkiyen kuvvet $T=R.L.P=(0,15).(0,25).(40)=1500 \text{ N}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer geniş bir göğüs kafesinin ve güçlü bir öksürmenin etkisini yansıtmaktadır. Öksürmenin bu etkisi yaklaşık 200 ms sürmektedir ancak, kesik kesik öksürme durumunda bu etki tekrarlanabilmektedir.

Casha *et al.* (1999b), 1999 yılında McGregor *et al.* tarafından kadavralar üzerinde yapılan bir çalışmanın kendilerinin önceki hesaplamalarını doğruladığını belirtmişlerdir. Farklı yükleme şekillerinin incelendiği bu çalışmada, sternuma uygulanan 260 N kuvvete karşılık 1,99 mm yanal açılma değeri hesaplanmış, göğüs iç basıncının plastik torbalar yardımıyla 42 mmHg 'ya çıkarıldığı durumda ise 2,03 mm yanal açılma ölçülmüştür. Yaklaşık 5,6 kPa'a denk gelen bu iç basınç değerinin sternuma uygulayacağı kuvvet, Casha *et al.* (1999b) tarafından yukarıdaki Denklem 2.1 yardımıyla $T=R.L.P= (0,17).(0,25).(5,6)=238 \text{ N}$ olarak hesaplanmış ve bu değer McGregor *et al.* (1999) tarafından ölçülen değere (260 N) yakın olduğu ve kendi matematik modellerini doğruladığı ifade edilmiştir. Casha *et al.* (1999b) tarafından yapılan çalışmada ayrıca, normal bir öksürmeden kaynaklanan basıncın 13,3 kPa değerinden olduğu ve sternum üzerinde 555,3 N değerinden bir kuvvet oluşturduğu, öksürme kaynaklı en büyük basınç değerinin ise 39,9 kPa olup, sternumda 1666 N yük oluşturduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, McGregor *et al.* (1999), çalışmalarında sternuma etkiyen kuvvetlerin fizyolojik sınırının 400 N olduğunu belirtmişlerdir.

Casha *et al.* (1999b) tarafından yapılan çalışmaya benzer sonuçlar Trumble *et al.* (2002) ve Dasika *et al.* (2003) tarafından yapılan çalışmalarda da ortaya konmuştur. Laplace kanunu kullanılarak, nefes alışverişi ve öksürme esnasında sternuma etkiyen yüklerin sırasıyla, 160-400 N ve 550-1650 N arasında olduğu belirtilmiştir (Alhalawani and Towler 2013).

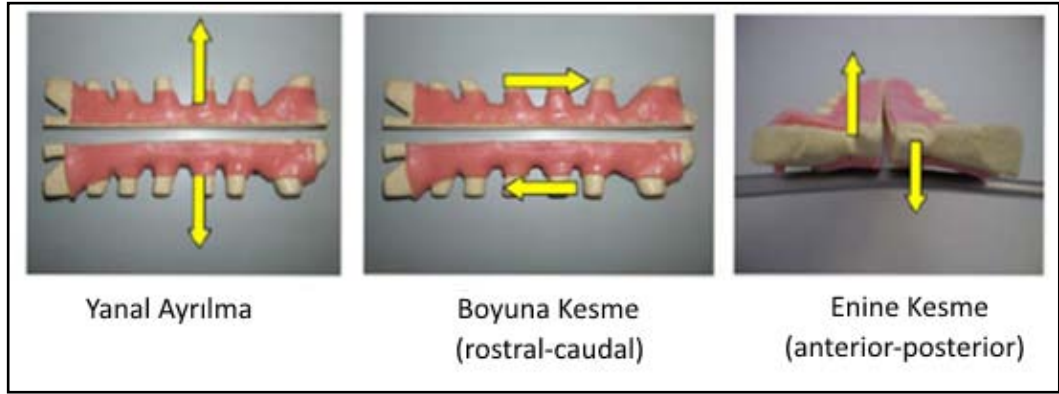
Pai (2005) tarafından sternuma etkiyen solunum yüklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada ise yukarıda verilen değerlerden daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. Domuzlar üzerinde yapılan bu çalışmada, solunum ve öksürmenin sternumda hangi yönlerde harekete neden olduğu ve oluşturduğu yük değerleri araştırılmıştır. Göğüs iç basıncı 35 kPa'a çıkarıldığında sternuma etkiyen kuvvetin 80 N olduğu görülmüştür. Deneylerde kullanılan domuzların yaklaşık 60 kg olduğu ve anatomik olarak yüksek-risk grubundaki bir hastaya denk olmadığı dikkate alınsa bile bu değer, önceki çalışmalarda bulunan değerlerden yaklaşık yirmi kat küçük olmasının beklenmedik derecede şaşırtıcı olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, araştırmalarda uzun periyotlu küçük

yorulma yüklerinin ve ağır bir cismi kaldırma ya da hastanın bir tarafı üzerine uzanması gibi büyük kuvvetler doğurabilecek etkilerin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, solunum kaynaklı en büyük kuvvetlerin yanal yönde oluştuğu ve en çok ksifoid bölgesini etkilediği belirtilmiştir.

Sternum kapama yöntemleri üzerine yapılan biyomekanik çalışmalarda solunum etkisini yansıtmak amacıyla, yanal ayrılma oluşturacak şekilde tekrarlı yükler uygulanarak dinamik testler ve öksürme etkisini yansıtacak şekilde statik testler yapılmaktadır (Zeitani *et al.* 2006; Wangsgard *et al.* 2008; Dieselman 2011; Alhalawani and Towler 2013).

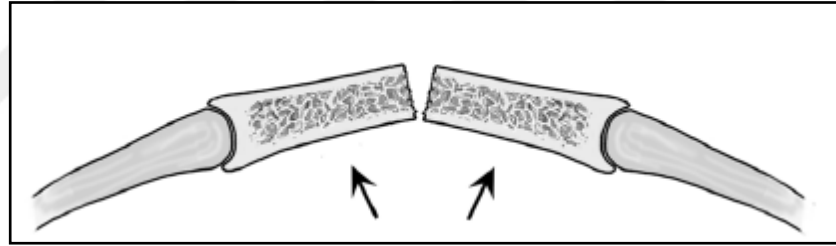
2.3. Sternuma Etkiyen Diğer Kuvvetler

Hastaların günlük hayattaki ağır bir cismi kaldırması, sırt çantası taşınması, bir tarafının üzerine uzanması, tek koluyla vücudunu desteklemesi gibi hareketler nedeniyle oluşan kuvvetler, sternumda boyuna kesme (rostral-caudal) ve enine kesme (anterior-posterior) şeklinde hareketlere neden olmaktadır (Şekil 2.6). Örnek olarak, hastanın ayakta aniden kayıp bir yere tutunması sonucunda vücut ağırlığının bir kısmı kollar tarafından taşınacak ve yük, bedenin üst kısmındaki eklem ve kaslara iletilecek, dolayısıyla sternumu da etkileyecektir. Bu yönlerde oluşan göçme mekanizmaları, ellerini kullanmadan oturamayan obez hastalarda oldukça yaygındır. Biyomekanik çalışmalarda bu kuvvetlerin kısa süreli ve yüksek enerjili olmaları dolayısıyla, tekrarlı yorulma deneyi yerine, giderek artan yüklerle statik testler yapılmaktadır (Pai 2005; Wangsgard *et al.* 2008; Dieselman 2011).



Şekil 2.6. Sternuma etkiyen kuvvetler sonucunda oluşan hareketler (Dieselman 2011)

Bu yüklerin yanında, valsalva manevrası (ıkmıma) nedeniyle sternum üzerine aşağıdaki şekilde bir yük etkiyebilmektedir (Şekil 2.7) (Robicsek *et al.* 2000).



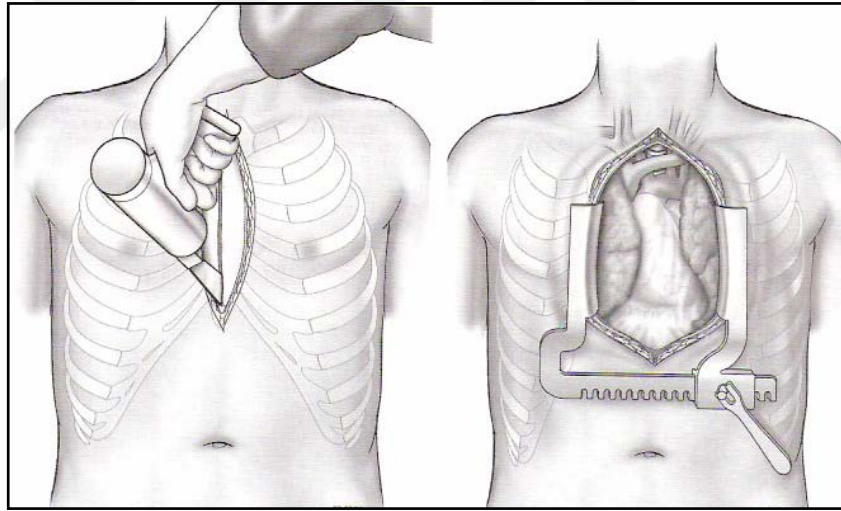
Şekil 2.7. Valsalva hareketinin sternuma etkisi (Robicsek *et al.* 2000)

2.4. Mediyen Sternotomi Yönteminin Tarihçesi ve Uygulanışı

Mediyen sternotomi yöntemi ilk olarak 1897 yılında H. Milton tarafından tanımlanmıştır. Milton, kadavralar ve hayvanlar üzerinde yaptığı denemelerden sonra mediyen sternotomiyi ilk olarak, ön mediyasteni sıkıştıran büyük tüberküloz lenf bezlerinin alınması operasyonunda uygulamıştır. Bununla birlikte, mediyen sternotomi 1957 yılına kadar oldukça az tercih edilen bir yöntem olarak kalmış, kalp cerrahlarının büyük kısmı bilateral anterior torakotomiyi (kaburga boşluklarından yapılan kesi yöntemi) kullanmışlardır. Bu tarihte O.C. Julian ve arkadaşları dört hasta üzerinde mediyen sternotomi uygulamış ve elde edilen sonuçları yayınlamışlardır. Operasyon süresinin bilateral torakotomiye nazaran belirgin şekilde kısaldığı ve kesik sayesinde

kalp, aort ve akciğer atardamarına mükemmel bir şekilde ulaşılabilirdi belirtilmiştir. Bu yayından sonra, bilateral anterior torakotominin kullanımı hızlı bir şekilde azalırken mediyan sternotomi giderek yaygınlaşmıştır (Dalton *et al.* 1992).

Mediyan sternotomi yönteminde, öncelikle sternum üzerindeki doku ayrılmaktadır. Sonra, yüksek frekanslı bir cerrahi testere ile sternum, orta hattı boyunca uzunlamasına iki eşit parçaya ayrılmaktadır. Sternum ikiye ayrıldıktan sonra, sternal bir retraktör bu iki parçanın arasına yerleştirilmekte ve göğüs kafesi geriye çekilerek açılmaktadır (Şekil 2.8). Böylece, cerrahlar göğüs boşluğuna açılan aralığı istedikleri büyüklükte ayarlayabilmektedirler (Shields *et al.* 2004). İki parçaya ayrılan sternum ameliyat sonunda sternal kapatma yöntemlerinden biriyle kapatılıp sabitlenmektedir (Pai 2005).



Şekil 2.8. Mediyan sternotomi uygulamasında sternumun kesilip göğüs kafesinin açılması

Mediyan sternotomi, torakotomiden daha az acı veren, hızlı uygulanabilen, ön mediyaastene, kalbe ve büyük damarlara çok iyi bir ulaşım imkânı sunan, güvenli ve iyileşme sürecinin kısa sürdüğü bir yöntemdir. Bununla birlikte, mediyan sternotominin ameliyat sonrası komplikasyonlarının, sık rastlanmamalarına rağmen morbidite ve mortaliteyi artırdığı bilinmektedir. Sternal kaynaklı problemler sadece sternotomi kesi hattının hareket etmesi (sternal ayrılma) şeklinde olabileceği gibi, yüzeysel sternum

enfeksiyonu, osteomyelit, kostokondrit veya mediastinit ile de sonuçlanabilir (Eğileten vd 2006).

Sternal komplikasyonlar için risk faktörleri olarak ileri yaş, diyabet, düşük kalp debisi sendromu (kalp indeksinin $2,0 \text{ L/dakika/m}^2$ 'nin altında olması durumu), obezite, resternotomi, malnutrisyon (yetersiz beslenme), osteoporozis (kemik erimesi), sepsis (kan zehirlenmesi), kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAİ-kronik bronşit), sternal travma, immün yetmezlik ve daha önceden göğse radyoterapi uygulanması gibi faktörler gösterilmiştir. Bu grup içinde gelişebilecek sternal problemler hastanın hayatını tehdit edici boyutta olabilmektedir (Eğileten vd 2006). Sternal komplikasyonların, özellikle sternal ayrılma ve mediastinitin önlenmesinde en önemli faktör stabil bir sternal sabitlemenin gerçekleştirilmesidir (Di Marco *et al.* 1989).

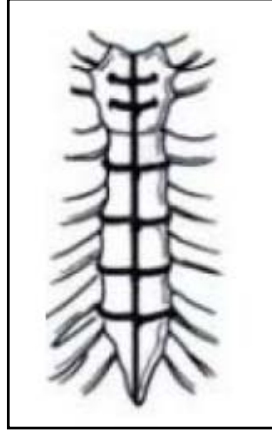
Kırık cerrahisinde önemli bir kavram olan stabilite, kırık bölgesinde ki şekil değiştirmenin miktarını belirler. Kırık açıklığındaki rölatif değişimin, kırık açıklığına oranı olan şekil değiştirme ise kırık bölgesinde meydana gelecek iyileşmenin tipini belirler. Şekil değiştirme değeri %2'nin altında olur ve hareketlilik minimum bir değerde tutulursa tam bir stabilite sağlanır ve bu durumda birincil kemik iyileşmesi meydana gelir. Şekil değiştirmenin %2 - %10 arasında olması durumunda ikincil kemik iyileşmesi görülür. Şekil değiştirme değeri %10'dan büyük olduğunda ise iyileşme meydana gelmez (Egol *et al.* 2004). Birincil kemik iyileşmesi, sert iç sabitlemeden sonra görülen zor bir olaydır. Belirli bir dış kallus oluşmadan sadece iç kallusla devam eden temas iyileşmesidir (Kılıçoğlu 2002). İkincil iyileşme ise kök hücrelerin kırıldak şeklinde farklılaşması ve sonuçta kırık bölgesinin içinde kemikleşmesiyle meydana gelir. Bu kök hücreler, kemiği saran bağ dokusu olan kemik dışzarının altında yer almaktadır (Bakalova *et al.* 2010).

2.5. Sternum Kapama Teknikleri

Mediyan sternotomi operasyonunun sonunda, iki parçaya ayrılmış olan sternum çeşitli kapama yöntemleri ile birleştirilip kapatılmaktadır. Hangi kapama tekniğinin seçileceği konusunda, tekniğin dayanımı, uygulamanın hızı ve maliyeti ile birlikte, yeniden sternumun açılmak istenmesi durumunda bunun maliyetinin ve süresinin ne kadar olacağı gibi düşünülmesi gereken birçok parametre bulunmaktadır (Dieselman 2011). Bununla birlikte, sternal komplikasyonların önlenmesinde en önemli faktör stabil bir sabitleme olduğundan, geliştirilen bütün kapama tekniklerinde en büyük sternal stabilitenin sağlanması amaçlanmıştır (Casha *et al.* 1999a).

2.5.1. Tekli çelik tellerle sternal kapama

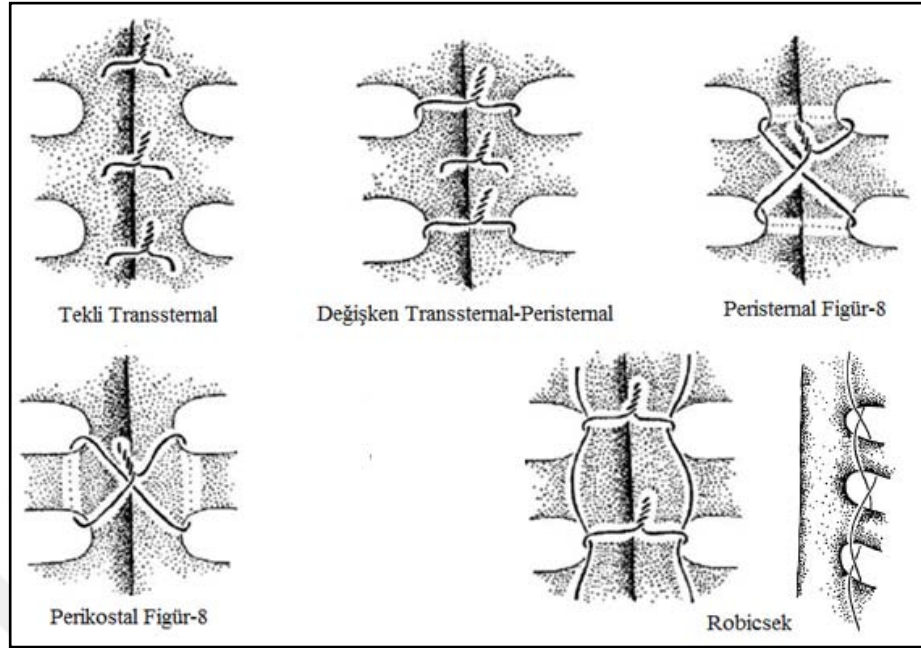
Sternumun tekli çelik tellerle kapatılması ilk olarak 1897 yılında Milton tarafından gerçekleştirilmiştir (Ozaki *et al.* 1998). Sternotominin 1957 yılından itibaren popülerleşmesiyle birlikte sternal kapamada paslanmaz çelik tellerin kullanımı geleneksel kapama tekniği haline gelmiştir (Ahn *et al.* 2009). Çelik tellerle yapılan geleneksel kapamada, paslanmaz çelik teller (genellikle no.5 veya no.6) ikisi manubriumda sternumun içinden (transsternal), kalanlar gövdede kaburgalar arası boşluklardan, toplam 4-7 adet tel tek tek, tam olarak karşılıklı gelecek biçimde peristernal (sternumu arkadan saracak şekilde) olarak geçirilerek sternum kapatılır. Tellerin uçları orta hat üzerinde sıkıca bükülerek sternal dokuya gömülür (Dieselman 2011; Öztekin 2011). Geleneksel tekli tel yöntemi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Sternumun çelik tellerle geleneksel şekilde kapatılması

Çelik tellerle kapama tekniği, hızlı uygulanabilir, görece güvenli ve ucuz olması nedeniyle ilk yaygınlaştığı dönemlerde en etkili kapama tekniği olarak görülmüştür (Ozaki *et al.* 1998). Bununla birlikte tellerin, gevşeyip açılması, kırılması veya kemiği kesmesi gibi nedenlerle sternal ayrılmalar meydana gelebilmektedir (Glennie *et al.* 2002).

Çelik tellerle geleneksel şekilde yapılan kapamalarda karşılaşılan problemlerin oluşmaması ve sternal stabilitenin artırılabilmesi için, tellerin farklı şekillerde bağlandığı birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler Şekil 2.10'a bağlı olarak aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.10. Çelik tellerle yapılan farklı kapama teknikleri (Losanoff *et al.* 2004)

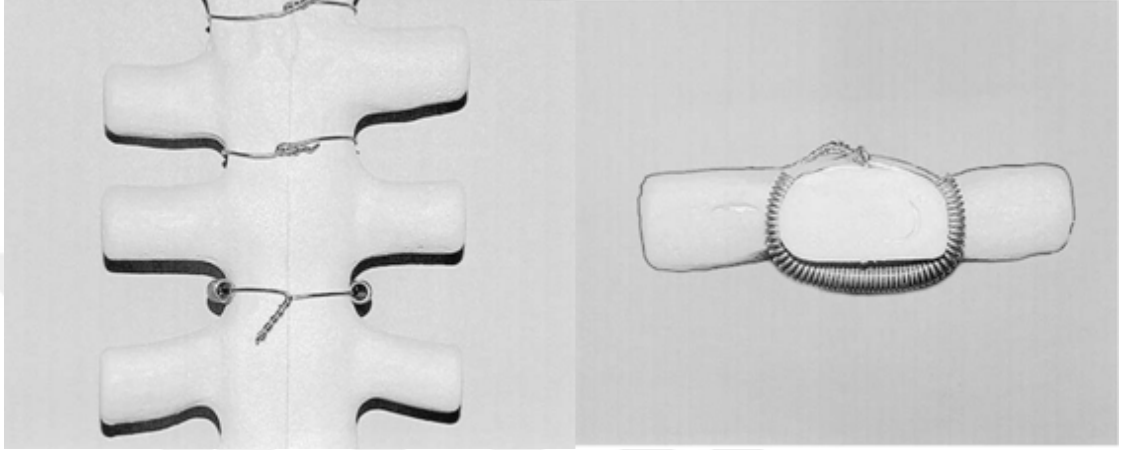
- **Tekli Transsternal Yöntemi:** Bu yöntemde, teller sternum boyunca kemiğin içinden geçirilerek kapama yapılır (Losanoff *et al.* 2004).
- **Değişken Transsternal-Peristernal Yöntemi:** Bu yöntemde teller dönüşümlü olarak önce kaburgalar arası boşluktan, sonra kemiğin içinden geçirilerek kapama yapılır (Losanoff *et al.* 2004).
- **Figür-8 Yöntemi:** Peristernal figür-8 yönteminde, teller sternumu arkadan saracak şekilde, ardışık iki kaburgalar arası boşluktan çaprazlamasına geçirilerek bağlanır. Perikostal figür-8 yöntemi de benzer biçimde, fakat teller karşılıklı iki kaburgayı arkadan saracak şekilde yapılmaktadır. Genel olarak figür-8 yöntemi, transsternal kapama yönteminden daha hızlı, daha basit ve daha güvenli bir yöntem olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemin avantajı, kesme kuvvetini direkt dik bir şekilde değil de yatay bir açıyla sternum üzerine aktarması, böylece kemiğin kesilmesi ve tellerin gevşemesi ihtimalini azaltmasıdır (Schimmer 2008).

Geleneksel tel yöntemi ile figür-8 yöntemini 9957 hasta üzerinde yaptıkları çalışmada karşılaştıran Almdahl *et al.* (2013), figür-8 yönteminin geleneksel yöntemden belirgin şekilde üstün olduğunu söylemişlerdir. Bununla birlikte, Khasati *et al.* (2004) tarafından yapılan literatür çalışmasında ise figür-8 yöntemi ile geleneksel tel yöntemini karşılaştıran çalışmalar incelenmiş ve figür-8 yönteminin geleneksel tel yöntemine herhangi bir üstünlüğü olmadığı belirtilmiştir.

- **Robicsek Yöntemi:** Bu yöntem, 1977 yılında F. Robicsek ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Schimmer 2008). Bu yöntemde, sternumun her iki tarafında uzunlamasına ikiye bölünmüş tel kostal kırıkların ön ve arkasından dalgalı bir biçimde geçecek şekilde yerleştirilip bağlanmakta, sonra bu tellerin üzerinden peristernal şekilde enine teller geçirilerek düğümlenmektedir (Losanoff *et al.* 2002; Schimmer 2008). Bu yöntemin başlıca avantajları; kırılmış ya da stabilite problemi oluşabilecek sternumlarda stabiliteyi sağlaması, kullanılan boyuna teller sayesinde enine tellerin kemiği kesmesinin engellenmesi ve kemiğe gelen kuvvetleri daha geniş bir alana yayması olarak sıralanabilir (Schimmer 2008). Robicsek yönteminin dezavantajı ise sternuma paralel geçen tellerin sternumun kollateral kanlanmasını engellemesi ve uygulama süresinin artmasıdır (Eğileten vd 2006).

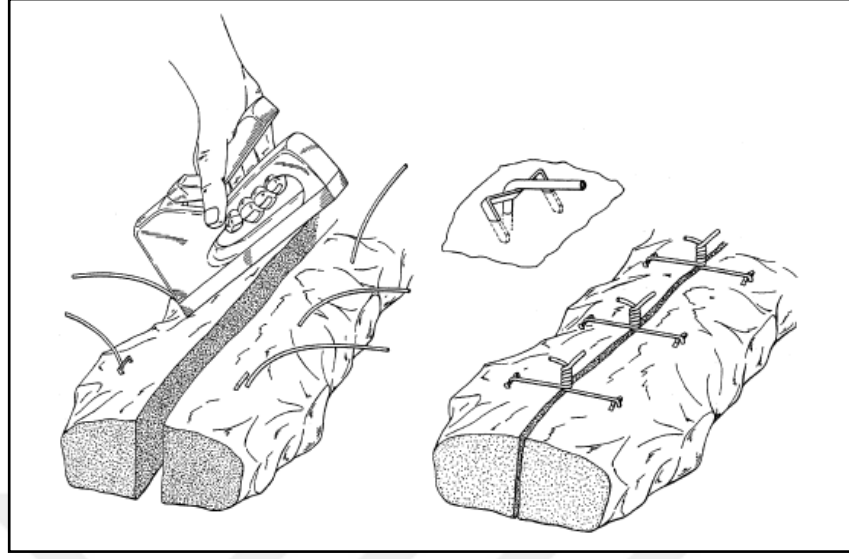
Çelik tellerle yapılan kapamalarda, tellerinin kemikteki kortikal tabakayı kesmesi sonucunda bir gerilme kaybı oluşmakta ve birleşme hattında bir cep meydana gelmektedir. Normal solunum hareketleri ve öksürük gibi artan hareketlerle, birleşme hattında meydana gelen cep daha da genişleyebilmektedir. Böylece stabil olmayan bir osteosentez oluşarak derin yara enfeksiyonu için uygun bir ortam oluşmaktadır (Okutan vd 2001). Sternumun çelik tellerle kapatılmasında karşılaşılan bu durumun önlenmesi için bazı farklı takviye yöntemleri de geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerden biri, tellerin paslanmaz çelikten yapılan sarmallara giydirilmesidir (Şekil 2.11). Çapları 3 mm olan bu sarmal çeliklerle kemik üzerindeki kuvvetin daha geniş bir alana yayılması amaçlanmaktadır (McGregor *et al.* 2003).



Şekil 2.11. Tellerin çelik sarmallarla takviye edildiği sternal kapama (McGregor *et al.* 2003)

Tellerin sternumu kesmemesi için uygulanan diğer bir takviye yöntemi de kapama tellerinin sternumun üst kısmına geçiş yerlerinin iç kısımlarının çelik zımba telleriyle zımbalanmasıdır. Zımba telleri, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi kapama tellerinin iç kenarlarına 30° açı yapacak şekilde zımbalanmakta ve sonra kapama tellerinin uçları, zımba telinde ufak bir hareket görülene kadar bükülmektedir (Zurbrugg *et al.* 2000). Sistemin kullanılması ile üst kortikal bölgede tek noktaya uygulanan güç daha geniş bir alana yayılmaktadır (Okutan vd 2001).

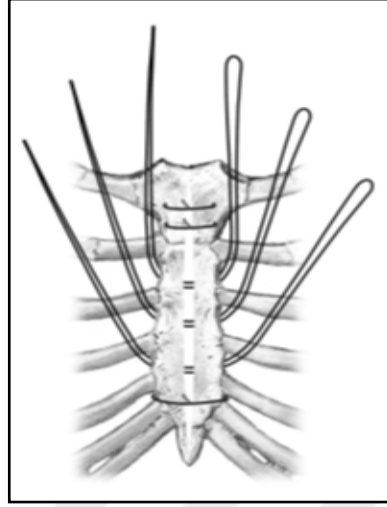


Şekil 2.12. Çelik tellerle birlikte zımba tellerinin kullanıldığı sternal kapama (Zurbrugg *et al.* 2000)

2.5.2. Çift çelik tellerle sternal kapama

Literatürde, sternal kapamada çift tel kullanımı ile ilgili az sayıda çalışma yer almasına rağmen birçok cerrahın, kolay uygulanışı ve stabiliteyi artırması sebebiyle bu yöntemi tercih ettiği bilinmektedir (Losanoff *et al.* 2007).

Bu yöntemde ilk olarak, telin iğne uçlu kısmı kaburga boşluğundan, sternumu arkadan saracak şekilde geçirilerek karşı taraftan çıkarılır. Sonra, telin bir ucunda bulunan iğne kısmı çıkarılır ve iki taraftaki tellerin uzunluğu eşitlenerek birleştirilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Çift çelik tellerin sternuma yerleştirilmesi

Bu tellerin bükülebilmesi için özel olarak geliştirilmiş kanca, tellerin birleştiği yerden geçirilir ve kanca döndürülerek teller bükülür. İyi ve sağlam bir kapama elde etmek için, teller bükülürken kanca eşzamanlı olarak yukarı doğru çekilmelidir. Bükme işlemi, bükme zorlaşana ve telde birkaç defa burkulma meydana gelene kadar devam ettirilir (Şekil 2.14). Son olarak örgü şekline gelen telin boyu 0,75-1 cm arasında kalacak şekilde tel kesilir ve kalan kısım sternum üzerine düz bir şekilde bastırılarak uzatılır (Kiessling *et al.* 2005; Losanoff *et al.* 2007).



Şekil 2.14. Çift telin kanca ile bükülmesi ve yeterli bükülmede telde oluşan burkulma (Kiessling *et al.* 2005)

Oldukça esnek ve yumuşak bir çelikten üretilen çift tel kolayca sıkıştırılıp bükülebilmekte ve daha sert çelikten yapılan tekli tele kıyasla, kemik çevresini daha düzgün bir şekilde sarabilmektedir (Losanoff *et al.* 2007). Tekli tel kullanımında karşılaşılan, telin kemiği kesmesi ihtimali çift tel kullanımında sternuma etkiyen kuvvetler daha geniş bir alana yayıldığından daha düşüktür. Çift telde karşılaşılan problemlerden biri, telin sonundaki lehimli kısmın, telin manubrium içinden geçirilmesine imkân vermemesidir. Bu nedenle, sternum gövdesinde çift tel kullanılırken manubriumda tekli tel tercih edilmektedir (Kiessling *et al.* 2005).

Bu yöntemle ilgili literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. Çift çelik tellerle geleneksel tel yöntemini obez hastalar üzerinde karşılaştıran Kiessling *et al.* (2005), çift çelik tel yönteminin daha etkili ve başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Losanoff *et al.* (2007) tarafından yapılan ve bu yöntemleri biyomekanik olarak karşılaştıran çalışmada ise çift çelik tellerin daha iyi ve stabil bir kapama sağladığı söylenmiştir.

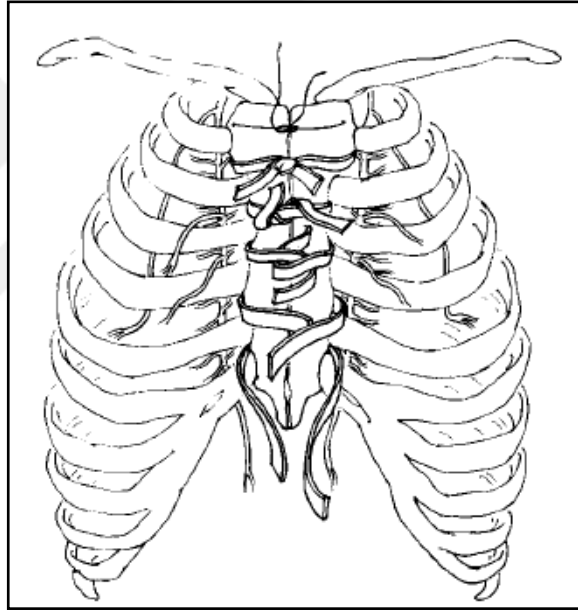
2.5.3. Naylon bantlar ile sternal kapama

Sternal kapamada naylon bantların kullanımı ilk olarak 1968 yılında Harry LeVeen ve Vincent Piccone tarafından gerçekleştirilmiştir (Kalush and Bonchek 1975). Genelde üç tane naylon bandın kullanıldığı bu yöntemde öncelikle bantlar otoklavda sterilize edilmektedir. Kendiliğinden kilitlenebilir özellikteki bu bantlar kaburgalar arası boşluklardan sternumu saracak şekilde geçirilmekte ve her bir bant özel bir bağlama tabancası ile iyice sıkıştırılmaktadır. Bantlar kilitlendikten sonra oluşan fazlalık kısımlar iyice derinden kesilmekte ve kilit bölgesi kaburgalar arası boşluklara gelecek şekilde bantlar yerleştirilmektedir (LeVeen and Piccone 1968).

1972 yılında bu yöntemi hastaları üzerinde kullanan Peter Sanfelippo ve Gordon Danielson, birçok vakada naylon bantların kırılıp yerlerinden çıkmasıyla önemli komplikasyonların oluştuğunu belirlemiş ve sternal kapamada naylon bant kullanımının kabul edilemez bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir (Kalush and Bonchek 1975).

2.5.4. Mersilene şeritler ile sternal kapama

Mersilene şerit, 5 mm genişliğinde ve 30 cm uzunluğunda, iki ucunda büyük iğneler bulunan polyesterden dokunmuş bir malzemedir (Cheng *et al.* 1993). Bu yöntemle yapılan kapamalarda mersilene şerit öncelikle, sternumun etrafını saracak şekilde kaburgalar arası boşluklardan geçirilir. Şeridin uçlarındaki iğneler çıkarılır ve yarım bir düğüm atıldıktan sonra şeridin gevşememesi için düğüme bir pensle bastırılır ve düğüm tamamlanır (Şekil 2.15) (Johnston *et al.* 1985).



Şekil 2.15. Mersilene şeritlerle yapılan sternal kapama (Johnston *et al.* 1985)

Mersilene şeritler, çelik tellerden daha pahalı bir malzeme olmakla birlikte kolay yerleştirilebilir ve kolay bir şekilde bağlanabilirler (Johnston *et al.* 1985). Ayrıca, bu şeritler çelik tellerden daha geniş oldukları için üzerlerine gelen kuvveti daha geniş bir alana yaymaktadırlar (McGregor *et al.* 1999). Çelik tellerin Mersilene şeritlere karşı avantajı ise çeliğin Mersilene kıyasla daha sağlam bir malzeme olması ve çelik tellerin simetrik bir şekilde bükülerek sabitlenmesinin, Mersilene şeritlerde ki düğümlerle sabitlemeye oranla, sternum üzerindeki gerilmelere daha iyi karşı koymasındır (Cheng *et al.* 1993). Mersilene şeritlerin sternal kapamada kullanımıyla ilgili bazı başarılı klinik

alışmalar olsa da, bu yöntem cerrahlar tarafından genel bir kabul görmemiştir (McGregor *et al.* 1999).

2.5.5. Polidioksanon (pds) sütürler ile sternal kapama

PDS sütür (iplik), absorbe olabilen monofilaman sentetik bir malzemedir (Keçeligil vd 1995). Genel cerrahide genellikle abdominal (karın) duvarının dikilmesinde kullanılan PDS sütürler, sahip oldukları yeterli çekme dayanımı nedeniyle sternal kapamaya uygun şekilde tasarlanarak bu amaçla kullanılmaya başlanmışlardır (Kun and Xiubin 2009). PDS sütürlerin çekme dayanımı, ameliyattan sonra üçüncü haftada başlangıç değerinin %50-%65'ine, altıncı haftada ise %30-%40'ına düşmektedir (Luciani *et al.* 2006a).

Sternal kapamada PDS sütür kullanımının artmasıyla kazanılan tecrübeler sonucunda, bu malzemenin çeliğin yerini alabilecek güvenli bir alternatif olduğunu düşünen uzman sayısı giderek artmıştır. Bununla birlikte PDS sütürlerle yapılan klinik çalışmalarda çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Keçeligil vd (1995) ve Luciani *et al.* (2006b) yaptıkları çalışmalar sonucunda bu malzemelerin iyi bir sternal kapama sağladığını söylerken, Sterkenburg *et al.* (1990) ve Usui *et al.* (2006) ise çalışmaları sonucunda PDS sütürlerin yeterli bir güvenlik sağlamadığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, PDS malzemesinde elde edilen önemli gelişmelere rağmen bu malzeme hala çeliğe karşı ideal bir alternatif olamamıştır (Kun and Xiubin 2009).

2.5.6. Sternal kablo sistemiyle sternal kapama

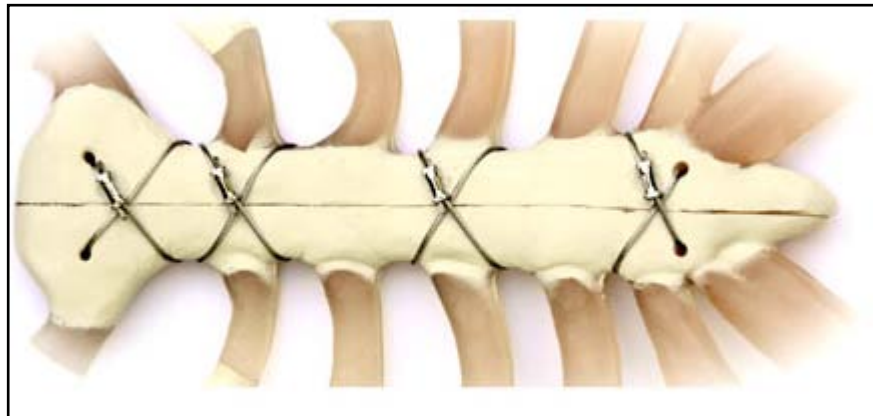
Bu yöntem, Pioneer Surgical firması tarafından geleneksel telle kapama yöntemine karşı bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu sistem, multifilament yapıda paslanmaz çelikten üretilmiş kablo ile patentli bir gerdirme/sıkıştırma aletinden oluşmaktadır (şekil 2.16) (Anonymous 2013b).



Şekil 2.16. Sternal kablo ve gerdirme/sıkıştırma aleti

Yumuşak ve esnek yapıdaki kabloların yerleştirilmesi ve olası bir acil durumda çıkartılması kolaydır. Gerdirme/sıkıştırma aletindeki basınç ölçeği kabloları uygulanan kuvvetin ölçülmesine ve ayarlanabilmesine, bu da her bir kablonun eşit miktarda gerilerek kemiğe uygulanan basıncın homojen dağıtılabilmesine imkân sağlamaktadır (Anonymous 2013c).

Sternal kablolarla yapılan kapamalarda genelde üç veya dört tane kablo kullanılmakta ve kapama figür-8 şeklinde yapılmaktadır (Cohen and Griffin 2002; Anonymous 2013c). Kablolar peristernal ya da transsternal şekilde yerleştirildikten sonra, kablonun iki ucu karşılıklı olarak bir klipsten geçirilir ve sonra germe ve sıkıştırma işlemi yapılarak fazla kısımlar kesilir (Şekil 2.17) (Anonymous 2013c).



Şekil 2.17. Sternal kablolarla sternumun kapatılması

Çapı 1,1 mm olan kabloların kemiği kesme ihtimali çelik tellere kıyasla daha düşüktür (Cohen and Griffin 2002). Üretici firma tarafından yapılan testlerde, kabloların yorulma dayanımının standart çelik tellerden yaklaşık 10 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Anonymous 2013c). Bu yöntemle, çelik tellerle yapılan figür-8 yöntemini biyomekanik deneylerle karşılaştıran iki çalışmada (Cohen and Griffin 2002; Wangsgard *et al.* 2008) çelik kablo yönteminin daha iyi bir sternal kapama sağladığı belirtilmiştir.

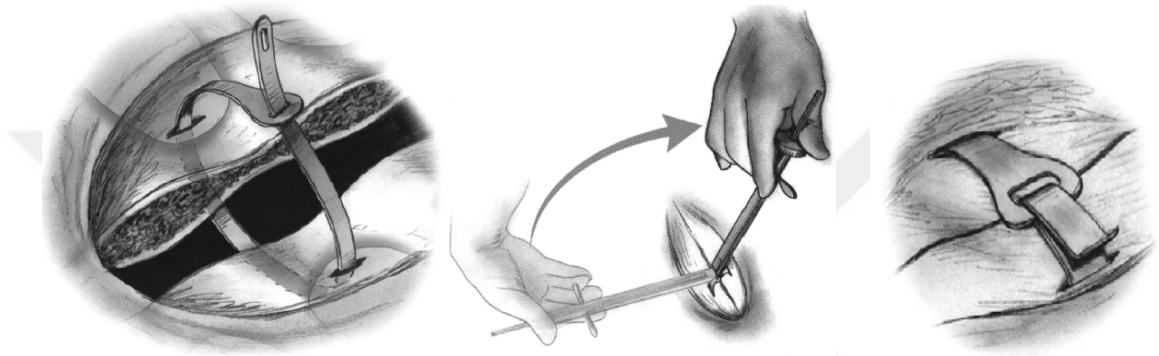
2.5.7. Çelik bantlar ile sternal kapama

Sternal kapamada çelik bant kullanımı çoğunlukla KOAH ve obezite görülen hastalarda tercih edilmektedir. Bu yöntemde çelik bantlar kaburgalar arası boşluklardan sternumu saracak şekilde geçirilmekte ve sonra sabitlenmektedir. Etkili bir kapama için üç tane bandın yeterli olduğu düşünülmektedir (Kalush and Bonchek 1976).

Çelik tel kullanımında karşılaşılan tellerin kemiği kesmesi durumu çelik bant kullanılarak, kemiğe etkiyen kuvvetin daha geniş bir alana yayılmasıyla önlenmek istenmektedir. Ancak, çelik bantların sternumu tam olarak sarması rijit yapılarından dolayı mümkün olmamaktadır (Schimmer *et al.* 2008). Bununla birlikte, çelik bant kullanımında, telle kapamada oluşan düğümler bulunmayacağından, yaranın iyileşmesi kolaylaşacak ve hastayı rahatsız edebilecek bir durum oluşmayacaktır (Kalush and Bonchek 1976).

Piyasada, Ethicon firması tarafından üretilen Sternum Band ve Peninsula firmasının ürettiği Sterna-Band ismi altında iki farklı çelik bant bulunmaktadır. Her iki malzemede 316L paslanmaz çelikten imal edilmektedir. Genişliği 5 mm olan Sterna-Band kaymayı önlemek için çift kilitli olarak tasarlanmıştır ve uygulaması oldukça kolaydır. Kendinden kilitlemeli toka üzerindeki kanaldan geçirilerek tel portegüsü ile kilitlenip, katlanarak tel makası ile kesilmektedir (Erk 2012). Genişliği 4,5 mm olan Sternum Band ise özel bir gerdirme aleti yardımıyla uygulanmaktadır. Çelik bantlar, kaburgalar

arası boşluktan geçirilip peristernal şekilde yerleştirildikten sonra gerdirme aleti ile iyice sıkıştırılmakta ve fazla kısım sternum üzerinde yaklaşık 1,5 cm kalacak şekilde kesilmektedir (Şekil 2.18) (Riess *et al.* 2004; Franco *et al.* 2009). Sterna-band peristernal veya transsternal olarak uygulanabilmekte, Sternum Band ise peristernal olarak yerleştirilmektedir (Erk 2012; Anonymous 2015a).



Şekil 2.18. Sternum Band yönteminin uygulanışı (Riess *et al.* 2004)

Literatürde, çelik bantlar üzerine yapılan klinik çalışmalarda (Kalush and Bonchek 1976; Özergin vd 2000; Riess *et al.* 2004; Bhattacharya *et al.* 2007) başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çelik bantları, geleneksel yöntemle karşılaştıran iki çalışmadan birinde (Cheng *et al.* 1993) geleneksel yöntemin daha iyi olduğu belirtilirken, diğer çalışmada (Casha *et al.* 2001) çelik bantların geleneksel yöntemden daha üstün olduğu ifade edilmiştir.

2.5.8. Sternal ZipFix sistemiyle sternal kapama

Synthes firması tarafından İsviçre’de geliştirilen bu yöntem en yeni sternal kapama tekniklerinden biridir (Grapow *et al.* 2012). Bu yöntemde, yüksek performanslı termoplastik bir malzeme olan polietere eter keton (PEEK)’dan üretilen ve ZipFix adı verilen cırcır kilitli bantlar kullanılmaktadır (Şekil 2.19) (Melly *et al.* 2013).



Şekil 2.19. ZipFix sternum kapama bandı

Genişliği 4,2 mm olan bu bantların bir ucunda paslanmaz çelikten kör bir iğne bulunmaktadır. Bu iğne yardımıyla bant, kaburgalar arası boşluktan sternumu peristernal olarak (çevresinden) saracak şekilde geçirilmekte ve sonra iğneli uç kısım kesilerek çıkarılmaktadır. İğne çıkarıldıktan sonra uç kısım, bandın baş kısmının içinden geçirilmekte ve özel bir gerilme uygulayıcı alet yardımıyla bant iyice sıkılmaktadır. Oluşabilecek aşırı gerilmeyi önlemek amacıyla uygulama aleti özel bir mekanizmaya sahiptir. Bantlar yeterli miktarda sıkıldıktan sonra fazla kısımlar yine bu alet yardımıyla kesilmektedir. (Şekil 2.20) (Anonymous 2013a).



Şekil 2.20. ZipFix bantların sternuma uygulanışı

Bu yöntemle yapılan kapamalarda genel olarak 5 adet ZipFix bant kullanılması tavsiye edilmekle birlikte, diğer kapama malzemelerinin de (tel, çelik bant, plâk vb.) eklenmesiyle farklı kapamalar gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2.21) (Grapow *et al.* 2012; Anonymous 2013a).



Şekil 2.21. ZipFix bant yönteminin farklı uygulama şekilleri

Bu yöntemin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için üretici firma tarafından, bu yöntemi çelik tellerle (no.5) karşılaştıran statik ve dinamik testler yapılmıştır. İlk olarak iki yöntemde statik yanal ayrılma testine tabi tutulmuş ve akma dayanımları, ZipFix için $425 \pm 18,1$ N ve çelik tel için $299 \pm 11,5$ N olarak bulunmuştur. Sonra, solunum hareketini etkisini yansıtacak şekilde yapılan dinamik yüklemede en fazla 300 N yük uygulanmış ve ZipFix bant bir milyon döngü boyunca sağlam kalırken, çelik tel için bu döngü sayısı $148,041 \pm 114,394$ olmuştur. Bu yöntemlerin kemiği kesme etkileri ise 12 mm kalınlığında ve 160 kg/m^3 yoğunluğundaki poliüretan köpük bloklar kullanılarak araştırılmış ve kesme etkisinin ZipFix bantlarda 184 ± 7 N, çelik telde ise $52 \pm 5,3$ N değerinde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, ZipFix sisteminin çelik tellerden daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (Grapow *et al.* 2012).

ZipFix bant yönteminin, sternal çelik bantlara karşı da üstün özellikleri olduğu belirtilmiştir. Bu bantların uygulanışının çelik bantlardan daha hızlı ve kolay olduğu ve acil bir müdahale gerektiğinde, ZipFix bantların makas kullanılarak kolayca çıkarılabildiği söylenmektedir. Ayrıca, yumuşak bir malzeme olan ZipFix bandın kemiği, çeliğe nazaran daha iyi sardığı ve rahatsızlık verecek keskin kenarlar oluşmadığı ifade edilmektedir (Grapow *et al.* 2012).

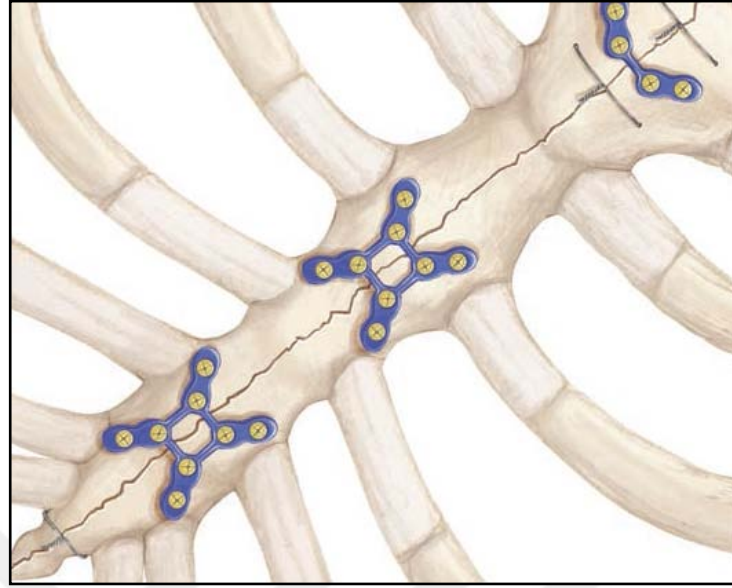
Biyouyumlu bir malzeme olan PEEK'dan üretilen bu bantların bir diğer üstün özelliği de, nikel alerjisi olan hastalarda kullanılabilmesi ve çelikten üretilen kapama malzemelerinin aksine MR çekimleri için güvenli olmasıdır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı olarak ise yüksek maliyeti gösterilmektedir (Grapow *et al.* 2012). ZipFix bantların etkilerinin incelendiği iki klinik çalışmada (Grapow *et al.* 2012; Melly *et al.* 2013) başarılı sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

2.5.9. Titanyum plâklarla sternal kapama

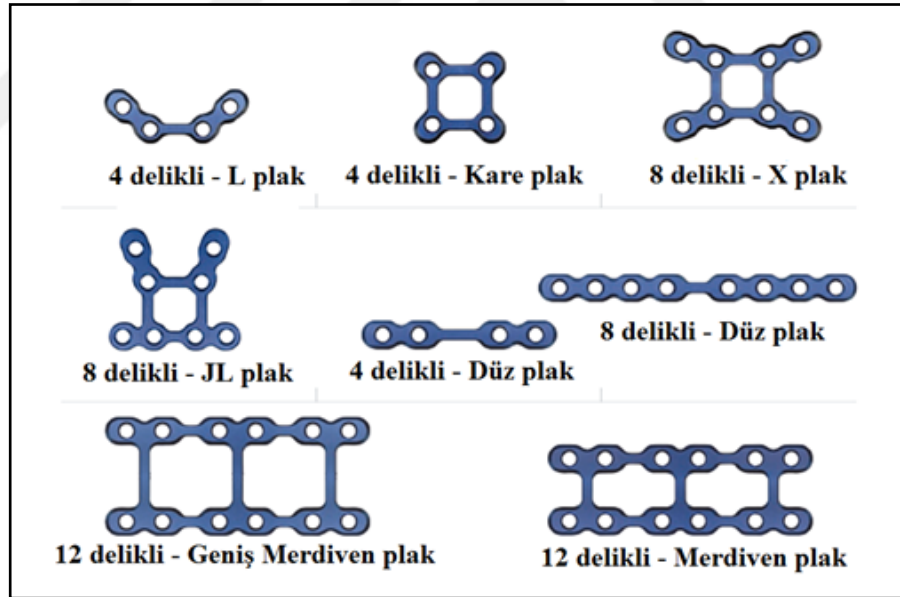
Plâklarla kemikleri sabitleme tekniği ilk olarak 1949 yılında Robert Danis tarafından geliştirilmiştir. Robert Danis bu yöntemle kırık parçaları sıkıştırılıp hareketleri minimize edildiğinde kemik kırıklarının kallus oluşumu olmadan iyileşebileceğini göstermiştir (Mostofi 2005; Dieselman 2011). Bu yöntemin diğer tekniklere göre iyileşme süreci boyunca kemik parçalarını bir arada tutup hareketlerini sınırlandırması ve kırık bölgesindeki kan akışını bozmaması gibi önemli avantajları vardır (Dieselman 2011).

Bu yöntemin yaygın sabitleme tekniği olarak kullanılmadığı tek kemik sternumdur. Bu yöntem çoğunlukla telle kapamanın uygun olmadığı durumlarda, özellikle tellerin kırılma riski taşıdığı kesilebilecek kemik erimesi olan hastalarda tercih edilmektedir (Ahn *et al.* 2009).

Plâklarla sabitlemede öncelikle manubriumdan ksifoide kadar sternum kalınlığı ölçülerek vidalar için açılacak deliğin derinliği ve vidaların yerleşimi her bölge için ayrı ayrı belirlenir. Sonra, sternumun iki parçası penslerle birleştirilir ve plâklar yerlerine yerleştirilerek vidalanır (Şekil 2.22). Sternumun genişliği ve şekline bağlı olarak farklı şekillerdeki plâklardan istenilen tercih edilebilir (Şekil 2.23) (Song *et al.* 2004). Bununla birlikte, kullanılacak plâk tipinin ve sayısının seçimi ile plâkların sternum üzerinde yerleştirileceği yerlerin belirlenmesi cerrahın önsezi ve tecrübesine bağlıdır. Cerrahlar genellikle ilave plâk kullanımının faydalı olduğuna inanarak 5-7 arasında plâk kullanmaktadırlar (Pai *et al.* 2007).



Şekil 2.22. X ve L şekilli titanyum plâklarla yapılan sternal kapama

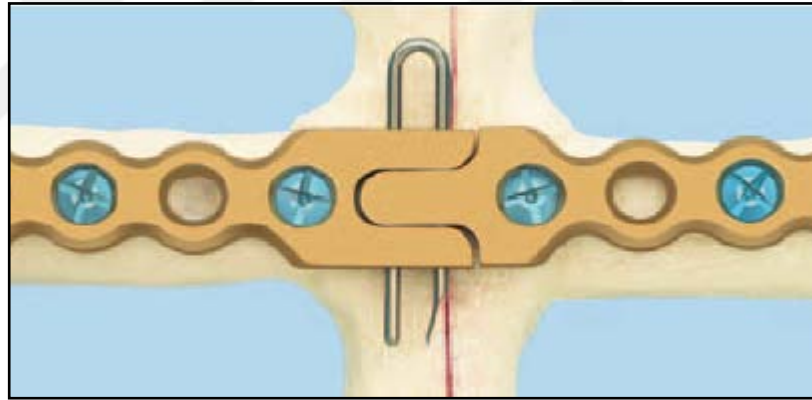


Şekil 2.23. Sternumun kapatılmasında kullanılan farklı şekillerdeki titanyum plâklar

Plâk yönteminin uygulanması, plâkların yerlerine doğru şekilde yerleştirilip vidalanması gerektiğinden, telle kapamaya nazaran biraz daha uzun sürmektedir. Ayrıca, vidaların sternum içindeki uzunluğunun uygun ölçülerde tutulması ve göğüs boşluğuna taşıp organlara zarar vermemesi için iyi bir cerrahi yeteneğe ihtiyaç duyulmaktadır

(Dieselman 2011). Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmamasının diğer nedenleri de plâk ve vida sisteminin çelik tellere oranla çok daha pahalı olması ve acil bir durumda göğüs boşluğuna tekrar müdahale etmenin zorluğudur (Song *et al.* 2004).

Piyasada farklı firmalar tarafından üretilen çeşitli plâk-vida sistemleri bulunmaktadır. Benzer geometrilere sahip bu sistemlerden Synthes firması tarafından üretilen plâklar ve Biomet firmasının SternaLock isimli plâk sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler arasındaki en önemli fark, acil durumlarda tekrar müdahalenin kolaylaşması için Synthes firmasının plâklarında kullandığı acil durum pimleridir (Şekil 2.24). İki parçadan oluşan plâklar bu pimler çıkarılınca ayrılmakta ve plâklar çıkarılmadan göğüs boşluğuna müdahale sağlanmaktadır.



Şekil 2.24. Synthes firmasının plâklarında bulunan acil durum pimi

Literatürde, titanyum plâk yönteminin klinik olarak incelendiği ve olumlu sonuçlar alındığı belirtilen çok sayıda çalışma yer almaktadır (Wu *et al.* 2004; Raman *et al.* 2006; Plass *et al.* 2007; Almadovar *et al.* 2008; Huh *et al.* 2008; Voss *et al.* 2008; Snyder *et al.* 2009; Hirsch *et al.* 2010; Hirose *et al.* 2011; Raman *et al.* 2012; Kim *et al.* 2013; Nazerati *et al.* 2014). Geleneksel tel yöntemiyle titanyum plâk yöntemini biyomekanik deneylerle karşılaştıran iki çalışmada plâkların daha iyi bir kapama sağladığı belirlenmiş (Ozaki *et al.* 1998; Pai *et al.* 2005), bir çalışmada ise (Pai *et al.* 2007), plâk sayısının ve farklı şekillerdeki plâkların en uygun kullanımının belirlenmesi için deneyler yapılmış

ve üç tane X-şekilli plâk ile bir tane kutu-şekilli plağın en etkili kapamayı sağladığı belirlenmiştir.

2.5.10. Sternal Talon sistemiyle sternal kapama

Sternal Talon adı verilen sistem, çelik tel ve plâklara alternatif olarak geliştirilmiş yeni bir sternal kapama yöntemidir (Dieselman 2011). Bu yöntemde, Talon adı verilen ve iki eş parçadan oluşan titanyumdan yapılmış klipsler, kaburgalar arası boşluklara karşılıklı olarak yerleştirilmektedir. Bacak ve ayak kısımlarıyla sternumu saran bu iki eş parça, sternumun üzerinde cırcırlı kilit mekanizması ile birbirlerine kenetlenmektedirler (Şekil 2.25) (Levin *et al.* 2010).



Şekil 2.25. Sternal Talon kullanılarak sternumun kapatılması

Şekil 2.26’da görülen tek ya da çift ayaklı modelleri olan bu parçalar, yerleştirilirken tel veya vidaya ihtiyaç olmadığından kortikal ve süngerimsi kemiğe zarar vermeden sternumu sıkıştırarak birleştirmektedirler. Sternal kapamalarda, bu malzemeden ortalama olarak üç tane kullanılmakla birlikte farklı sayıda parça, farklı kısımlarda kullanılabilir. Bazı cerrahlar ise ek olarak manubrium kısmında çelik teller kullanılmaktadırlar (Levin *et al.* 2010).



Şekil 2.26. Tek ve çift ayaklı Talon modelleri

Talon kullanımında sternumun genişliğinin ve kalınlığının doğru olarak ölçülmesi, farklı boyutlardaki parçalardan hangisinin uygun olduğunu belirleyebilmek için oldukça önemlidir (Levin *et al.* 2010). Sternal Talon sistemi, uygulanması kolay bir yöntem olmakla birlikte, diğer kapama tekniklerinden çok daha pahalı bir yöntemdir (Dieselman 2011).

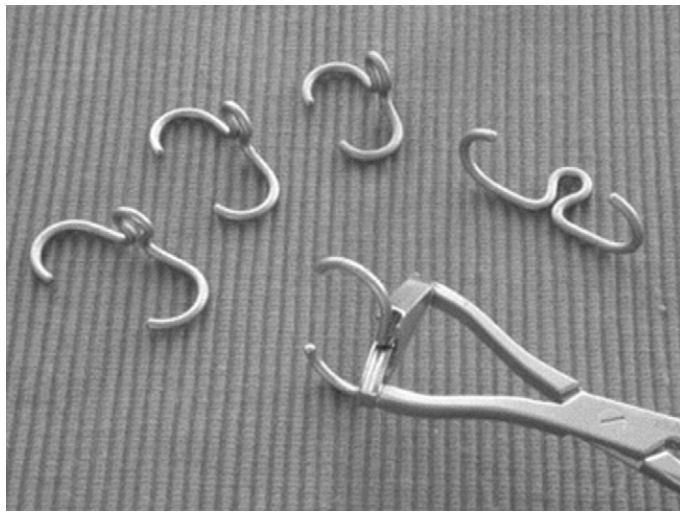
Talon kullanımının etkileri üzerine yapılan üç klinik çalışmada (Levin *et al.* 2010; Delong *et al.* 2014; Nazerali *et al.* 2014) başarılı sonuçlar elde edilmiş, orta-hat dışı bir sternotomi uygulamasında Talon kullanımı inceleyen bir çalışmada ise (Hirsch *et al.* 2010) Talonun yerinden çıktığı ve kapamanın başarısız olduğu belirtilmiştir.

2.5.11. Nitinol sternum kapama klipsleri ile sternal kapama

Şekil hafızalı bir alaşım olan nitinol, nikel ve titanyumun yaklaşık olarak eşit miktardaki birleşiminden oluşan bir malzemedir (Centofanti *et al.* 2002). Şekil hafızalı alaşımlar, deformasyona uğratıldığında, uygulanan sıcaklık ve gerilmelere bağlı olarak daha önceki şekil veya boyutuna geri dönebilme özelliği gösteren metalik malzemelerdir. Şekil hafızası özelliği ve süperelastik özellik, şekil hafızalı alaşımların en önemli iki termo-mekanik özelliğidir (Dilibal 2005).

Şekil hafızası özelliği, alaşıma giren elementlerin oranlarıyla belirlenebilen bir dönüşüm sıcaklığının üzerinde ve altında farklı iki şekil ve kristal yapısına sahip olabilmeleridir. Bu belirlenebilen sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda östenitik yapı (ana faz), altındaki sıcaklıklarda ise martenzitik yapı elde edilir. Alaşım martenzitik yapıda iken şekil değişimine uğradıktan sonra dönüşüm sıcaklığı üzerine ısıtıldığında ana faza dönüşürken ilk şekline geri döner. Süperelastik özellik ise, şekil hafızası özelliğinde olduğu gibi martenzitik faz dönüşümü sonucu oluşan bir özelliktir. Şekil hafızalı alaşım %100 oranında östenitik yapıda iken gerilmeye maruz bırakılarak, martenzitik dönüşümün gerilme etkisi altında oluşması sağlanırsa, gerilme kaldırıldığında malzeme elastik olarak tekrar eski haline döner. Bu durumda alaşımda kalıcı şekil değişimi olmaksızın % 8'e varan birim şekil değişimleri süperelastik olarak geri kazanılır (Dilibal 2005).

Sternal kapamada kullanılan nitinol klipsler özel bir şekle sahiptirler (Şekil 2.27). Bu klipsler, manipülasyon sıcaklığı olan 8 °C 'nin altındaki sıcaklıklarda yumuşak ve şekil verilebilir haldedir. Sıcaklık, başlangıç sıcaklığı denilen 27 °C 'nin üstüne çıktığında şekil hafızası etkisi başlamaktadır. Final sıcaklığı olan 35 °C 'de ise klips orijinal şeklini tam olarak geri kazanır (Centofanti *et al.* 2002).



Şekil 2.27. Farklı boyutlardaki nitinol klipsler ve uygulama aleti

Nitinol klipslerle yapılan sternal kapamada ilk olarak klips çengellerinin yerleştirileceği interkostal boşluklarda cerrahi delikler açılır. Sonra, sternumun iki parçası pens veya tel kullanılarak birbirine yaklaştırılır. Farklı boyutlardaki klipslerden uygun olanın belirlenebilmesi için sternumun genişliği ölçülmeli ve ölçülen değerden 7-8 mm daha küçük olan boyuttaki klips kullanılmalıdır (Centofanti *et al.* 2002).

Kullanılacak klipsler içerisinde soğutulmuş arınık serum fizyolojik solüsyonu bulunan bir kâseye konularak soğutulur. Klips açma forsepti kullanılarak klipsler genişletilir ve interkostal boşlukta açılmış olan cerrahi deliklere yerleştirilir. Son olarak, 45 °C sıcaklıktaki arınık serum solüsyonu kullanılarak klips ısıtılır ve sternumu sıkması sağlanır. Sternumun uzunluğuna ve genişliğine bağlı olarak 3 veya 4 klips kullanılmaktadır (Şekil 2.28) (Anonim 2012c).



Şekil 2.28. Yapay bir sternum modeli üzerine yerleştirilmiş nitinol klipsler

Nitinol klipsler, çelik tellerden daha kalın olduklarından kemiği kesme ihtimalleri daha düşüktür ve sternum üzerindeki yarı-rijit sıkıştırıcı etkileriyle, çelik tellerden daha iyi bir fizyolojik stabilite sağlamaktadırlar. Nitinol klipslerin diğer avantajları aşağıda sıralanmıştır;

- Nitinol, çeliğe kıyasla daha yüksek bir biyouyumluluğa sahiptir.

- Nitinol klipslerin uygulaması ve gerektiği takdirde çıkarılması kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir.
- Kanama oluşması riski çelik tel kullanımına oranla daha düşüktür.
- Nitinol, mıknatıslanma özelliği olmayan bir alaşım olduğundan, MR çekimlerinde bir problem yaratmamaktadır (Centofanti *et al.* 2002; Broadhurst *et al.* 2010).

Nitinol klips kullanımında karşılaşılabilecek sorunlardan biri, klipslerin vücut sıcaklığında sahip oldukları rijitliklerine bağlı olarak, yüksek enerjili bir darbe etkisiyle kırılabilirlerdir. Bununla birlikte, sternuma nadir olarak etkiyebilecek böyle bir kuvvet, çelik telleri de kırabileceği gibi sternumda da kırıklara sebep olabilmektedir (Broadhurst *et al.* 2010).

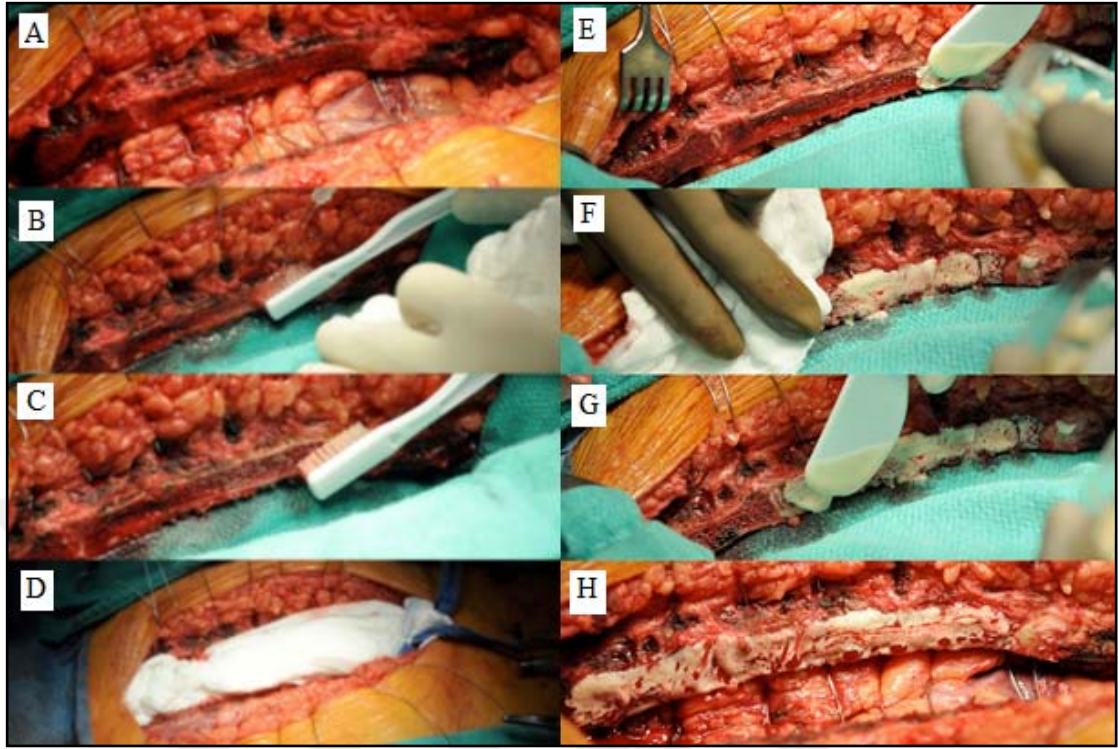
Nitinol klipslerin etkinliğinin incelendiği klinik çalışmaların büyük kısmında başarılı sonuçlar alınmış (Centofanti *et al.* 2002; Negri *et al.* 2002; Reiss *et al.* 2007; Grapow *et al.* 2011; Gucu *et al.* 2012; Nazerali *et al.* 2014; Bejko *et al.* 2015; Sarıkaya *et al.* 2015), bir çalışmada ise hastanın düşmesi sonucunda klipsin kırıldığı belirlenmiş (Broadhurst *et al.* 2010), başka bir çalışmada da kullanılacak klips boyutunun yanlış seçilmesi sonucunda klipslerin yerlerinden çıktığı görülmüştür (Tavlaşoğlu *et al.* 2012).

2.5.12. Kryptonite kemik çimentosu ile sternal kapama

Kryptonite kemik çimentosu, hint yağından elde edilen biyouyumlu bir polimerdir. Doğrudan kemiklere uygulanan bu yapıştırıcı, 24 saat içinde rijit bir kemik tespiti ve stabilitesi sağlamaktadır. Malzemenin sahip olduğu gözenekli ağ dokusu sayesinde, zaman içinde kemikle tam bir birleşme meydana gelmektedir (Fedak *et al.* 2010).

Kemik çimentosu ve çelik tellerin birlikte kullanıldığı sternal kapama uygulamasının adımları aşağıda sıralanmıştır.

- Sternotomi sonrasında, sternumun kenarlarını kaplayan kemik mumu ve diğer hemostatik (kan durdurucu) maddeler kemikten temizlenir.
- Kanamanın durması sağlandıktan sonra, yedi tane çelik tel kaburgalar arası boşluklardan geçirilerek yerleştirilir (Şekil 2.29A). Yediden fazla tel kullanılabileceği gibi daha az sayıda tel kullanımı tavsiye edilmemektedir.
- Teller yerleştirildikten sonra, sternumun her iki parçası antiseptik su ile yıkanır ve kemik parçacıkları, ilik ve yağ gibi ölü dokular tuzlu bir solüsyon ve naylon fırçayla temizlenir. Böylece, yapıştırıcının nüfuz edeceği kemik trabekülünün derin ağ dokusu ortaya çıkarılır (Şekil 2.29B-C).
- Üç ayrı bileşenden oluşan kemik çimentosunun bileşenleri kuvvetli bir şekilde 1 dakika boyunca karıştırılır ve uygulanmadan önce, kıvamın yoğunlaşması için 3 dakika bekletilir. Toplam 5 cm³ hacmindeki karışım hastaların çoğunluğu için yeterlidir. Çimentonun yoğunluğu, karıştırıldıktan sonraki ilk 15 dakikada iki katına çıkmakta ve 8 dakikadan sonra uygulanması zor bir yoğunluğa ulaşmaktadır.
- Çimento uygulanmadan önce kemik yüzeyi gazlı bezle kurulanır (Şekil 2.29D). Bir miktar sternal kanama olması önemsizdir ancak aşırı bir kemik iliği kanaması durumu mekanik dayanımı düşürebilir.
- Yapıştırıcı, ince bir tabaka halinde sternumun iki parçasına da bir spatula yardımıyla uygulanır. Yapıştırıcı, sıvı bir kıvamda olmasına rağmen kemik yüzeyinde kalacak ve göğüs boşluğuna damlamayacaktır (Şekil 2.29E-H).
- Sternumun iki parçası birbirine yaklaştırılır ve teller standart şekilde bükülerek kapama tamamlanır. Yüzeye çıkan fazla yapıştırıcılar temizlenir ve yumuşak dokulara yapışması engellenir (Fedak and Kasatkin 2011).



Şekil 2.29. Sternumun kemik çimentosu kullanılarak kapatılmasının aşamaları (Fedak and Kasatkin 2011)

Çimento 24 saat içinde maksimum polimerizasyona ulaşacaktır. Bununla birlikte kapama işleminden 2-3 saat sonra bağlantı sağlam bir hale gelebilmektedir. Göğse yeni bir müdahale gerekmesi durumunda yapıştırıcı, sternal bir testereyle güvenle kesilebilir (Fedak and Kasatkin 2011).

Literatürde, kemik çimentosunun hem klinik hem de biyomekanik deneylerle incelendiği bir çalışmada başarılı sonuçlar alındığı belirtilmiş (Fedak *et al.* 2010), başka bir klinik çalışmada da kemik çimentosu ile iyi bir kapama sağlandığı söylenmiştir (Fedak and Kasatkin 2011).

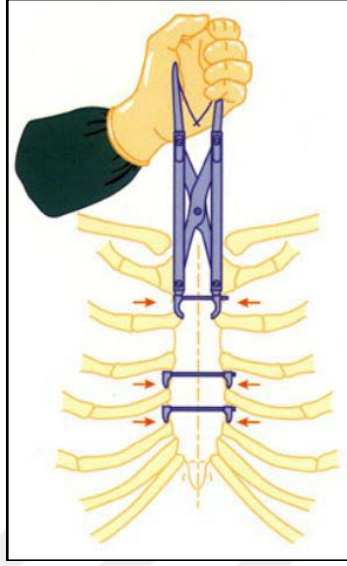
2.5.13. Vitalitec sternum kapama klipsleri ile sternal kapama

Bu yöntem Vitalitec firması tarafından geliştirilen yeni bir sternum kapama tekniğidir. Yöntemde, titanyumdan imâl edilen özel klipsler yardımıyla sternum kapatılmaktadır. Bu klipsler, cırcırlı bir çubuğun iki tarafına yerleştirilmiş kancalardan meydana gelmektedir (Şekil 2.30). Klipslerin çubuk boyu 70 mm olup, kanca yükseklikleri ise 20-25 mm arasında değişmektedir. Klipslerin ucundaki kancalardan biri sabitlenmiş diğeri ise çubuk üzerinde hareket edecek şekilde serbest haldedir (Anonymous 2015b).



Şekil 2.30. Vitalitec sternum kapama klipsleri ve sıkıştırma aleti

Bu tekniğin uygulamasında, klipsler kaburgalar arası boşluklara enine şekilde yerleştirilmekte ve bir forseps yardımıyla klips sıkıştırılarak serbest kancanın hareketi sağlanmaktadır. Klipsin sternumu iyice sıkıp kavraması sağlandıktan sonra hareketli kancanın tarafında kalan fazla çubuk kısmı kesilerek kapama tamamlanmaktadır (Şekil 2.31). Vitalitec klipsleriyle yapılan kapamalar 5 adet klips kullanarak yapılabileceği gibi 2 veya 3 tane klipsin çelik tellerle birlikte kullanılmasıyla da gerçekleştirilebilmektedir. Hastaya acil müdahale gerektiği durumlarda klipsler, çubuk kısımlarından kesilerek veya sabit kancayı çubuğa bağlayan vidanın gevşetilmesiyle çıkarılabilmektedir (Tunçay *et al.* 2014; Anonymous 2015b).



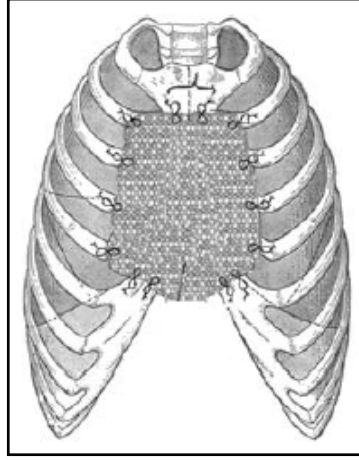
Şekil 2.31. Vitalitec klipsler ile sternumun kapatılması

Literatürde, Vitalitec klipslerin incelendiği tek çalışmada (Tunçay *et al.* 2014), bu yöntemin klinik açıdan başarılı sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

2.5.14. Sternumun kapatılmasında kullanılan diğer yöntemler

Önceki bölümlerde açıklanan yöntemler kadar yaygın olmamakla birlikte, sternumun kapatılmasında kullanılan başka yöntemlerde bulunmaktadır. Bu yöntemler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- **Titanyum hasır (titanyum plâka) yöntemi:** Bu yöntemde titanyumdan yapılmış çok delikli ince bir titanyum hasır, sternumun üzerine kaburga kemiklerinin bir kısmını da kapsayacak şekilde yerleştirilmekte ve titanyum vidalar ya da çelik teller kullanılarak sabitlenmektedir. Dimarakis *et al.* (2005) üç hastanın sternal kapamasında Depuy AcroMed firması tarafından üretilen titanyum hasırı sternum üzerine yerleştirip sternuma ve etrafını saran kaburga kemiklerine çelik tellerle sabitlemiş ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Titanyum hasırın çelik tellerle birlikte uygulaması (Dimarakis *et al.* 2005)

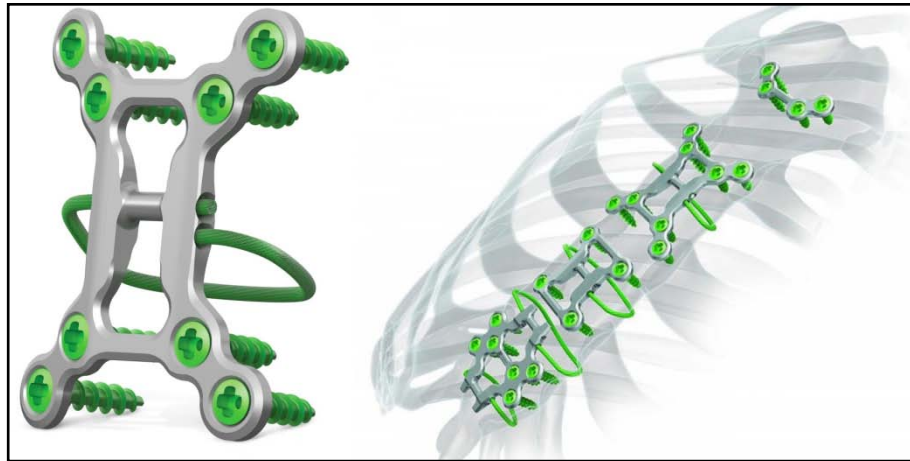
Doğan (2010) ise, sekiz hastanın sternumunu önce figür-8 yöntemi kullanarak çelik tellerle birleştirmiş sonra Leibinger firması tarafından üretilen iki titanyum hasır sternum üzerine yerleştirerek iki taraftan vidalamış ve başarılı sonuçlar almışlardır. Bu yöntemde, damarlara ve göğüs boşluğundaki diğer yapılara zarar vermemek için kullanılacak vida boyunun seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, titanyum ve çeliğin birlikte kullanımının elektromanyetik bir etki oluşturabildiği dikkate alınmalı ve titanyum hasırın akciğerler üzerinde aşırı bir basınç oluşturmaması için hasırın büyüklüğünün doğru olarak seçilmesine de özen gösterilmelidir (Doğan 2010).

- **Waston titanyum klips yöntemi:** Waston firması tarafından üretilen ve iki titanyum parçadan oluşan bu klipsler, şekil ve uygulama açısından Sternal Talon yöntemine benzemektedir (Şekil 2.33). Bu yöntemde de öncelikle sternumun genişliği ölçülerek uygun klips büyüklüğü belirlenmelidir. Sonra, kaburga boşluğuna karşılıklı olarak yerleştirilen parçalar özel bir enstrüman yardımıyla birleştirilip sıkıştırılmakta ve son olarak orta kısımdaki vida döndürülerek klipsler kilitlenmektedir (Anonymous 2016a). Waston klipsler, Talon klipslerden daha ucuz olmakla birlikte, Vitalitec klipslere yakın bir maliyete sahiptirler.



Şekil 2.33. Farklı boyutlardaki Waston sternum kapama klispleri

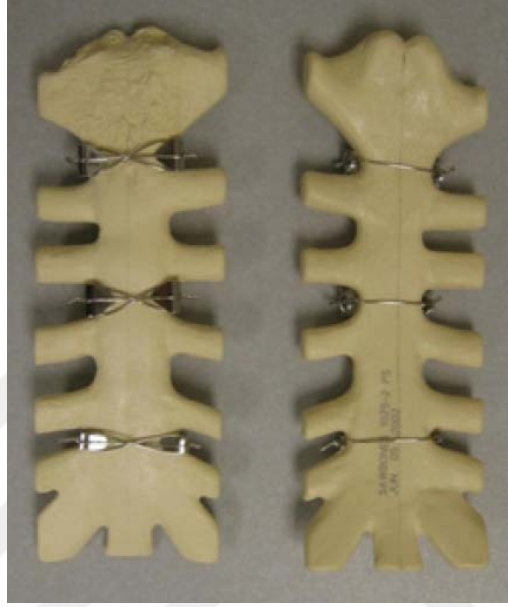
- **Tritium plâk yöntemi:** Pioneer Surgical firması tarafından geliştirilen yeni bir yöntemdir. Bu yöntemde kapamalar, Tritium adı verilen ve farklı şekillerdeki titanyum plâklar ile 1,3 mm çapında titanyum kablonun birlikte kullanıldığı özel bir kablo-plâk sistemi ile yapılmaktadır (Şekil 2.34) (Anonymous 2016b).



Şekil 2.34. Tritium plâk ve bu plâğin sternuma uygulaması

- **Dsf (çelik) plâk:** Yaygın bir kullanımı olmayan bu yöntemle (Şekil 2.35) ilgili literatürde iki çalışma yer almaktadır. Cohen and Griffin (2002) ve Wangsgard *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmalarda bu yöntem, çelik tel ve çelik kablo kullanılarak yapılan figür-8 yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Cohen and Griffin (2002) üç farklı

yükleme etkisinde statik deneylerle, Wangsgard *et al.* (2008) ise yorulma deneyleri ile bu yöntemleri karşılaştırmış ve iki çalışmada da çelik plâk yönteminin, tellerle yapılan figür-8 yöntemine göre daha üstün olduğunu belirlemişlerdir.



Şekil 2.35. Dsf plâkların yapay modeller üzerinde uygulanması (Wangsgard *et al.* 2008)

2.4. Kaynak Özetleri

LeVeen and Piccone (1968), sternumun kapatılmasında çelik tellerin kullanımının zorluğunu ve neden olabileceği ameliyat sonrası komplikasyonları belirterek, naylon bantların kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yöntem önce köpekler üzerinde denenmiş, elde edilen olumlu sonuçlar üzerine 15 hastada kullanılmıştır. Ameliyat sonrası incelemelerde hastalarda bir probleme rastlanmamış ve beş ay sonunda tam kemik birleşiminin sağlandığı tespit edilmiştir. Naylon bantların kullanımının basit olduğu ve başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Taber and Madaras (1969), çelik tellerle yapılan perikostal figür-8 yöntemini 125'den fazla hasta üzerinde uygulamışlar ve hiçbir hastada tellerin kemiği kesmesi kaynaklı sternal ayrılmanın meydana gelmediğini belirlemişlerdir.

Sanfelippo and Danielson (1972), naylon bantların sternumun kapatılmasında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Toplam 50 hastanın 28'inde yalnızca naylon bantlar, 16'sında naylon bantlarla birlikte çelik teller ve 6'sında naylon bantlarla birlikte Tevdek sütürler (teflon kaplamalı polyester iplikler) kullanılmıştır. Bu hastalarda ameliyat sonrası görülen komplikasyonlar, 183'ünde çelik tel ve 12'sinde Tevdek sütür kullanılan toplam 195 hastada görülen komplikasyonlarla karşılaştırılmıştır. Naylon bantların kullanıldığı hastalarda, diğer yöntemlerin kullanıldığı hastalara oranla önemli ölçüde fazla ve farklı komplikasyon belirlenmiştir. Bu nedenle, sternal kapamada naylon bantların kullanımının kabul edilemez olduğu söylenmiştir.

Timmes *et al.* (1973), çelik tellerle yapılan sternal kapama uygulamasında, tellerin ucunun bükülmüş olarak sternum üzerinde kalmasının, rijit bir sabitleme sağlamayacağını ayrıca dokuları delip ağrıya neden olabileceğini belirtmişlerdir. Bu durumu önlemek amacıyla tellerin ucunu, özel bir alet yardımıyla küçük metal bir plâk içinde birleştirecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Standart bükme yöntemine göre daha iyi rijitlik sağladığı belirtilen bu yöntemi, dokuz hasta üzerinde uygulamışlar ve

ameliyat sonrası hiçbir komplikasyon oluşmadığını ve normal kemik iyileşmesinin sağlandığını belirtmişlerdir.

Kalush and Bonchek (1976), çelik bantlarla (sternum band) yapılan sternal kapama işleminin hızlı ve güvenilir bir yöntem olduğunu söylemiş ve özellikle obez hastalarda kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. İkinci, üçüncü ve dördüncü kaburgalar arası boşluklara yerleştirilen üç çelik bantla etkili bir kapama gerçekleştirildiğini ve bu yöntemin kullanıldığı hastalarda ameliyat sonrası sternal ayrılma ve önemli komplikasyonlar görülmediğini belirtmişlerdir.

Johnston *et al.* (1985), sternal kapama işlemi yapılan 1019 hastada çelik tellerle birlikte 5 mm genişliğinde mersilene şeritleri, iki farklı şekilde kullanmışlardır. İlk yöntemde, sternum boyunca tel ve şeritler dönüşümlü olarak kullanılmış, ikinci yöntemde ise manubrium bölgesi telle, kalan kısımlar ise şeritlerle birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, mersilene şeritlerin kullanımının, tellere nazaran pahalı olmakla birlikte, basit ve tatmin edici bir yöntem olduğu belirtilmiştir.

Di Marco *et al.* (1989), çelik tellerle yapılan figür-8 yöntemini 978 hasta üzerinde uygulamışlardır. Manubrium bölgesinde geleneksel şekilde iki tel kullanılmış, kalan kısımlar ise figür-8 yöntemiyle kapatılmıştır. Hastaların 24 tanesinde sternal yara enfeksiyonu oluşmuş fakat hiç birinde sternal ayrılma ya da mediyastinit görülmemiştir. Kolay uygulanabilen, ilave zaman ve donanım gerektirmeyen bu yöntemin güvenli bir sternal kapama sağladığı söylenmiştir.

Sterkenburg *et al.* (1990), polidioksanon sütürlerin sternal kapamada kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, 10 hastayla sınırlanan bir ön çalışma yapmışlardır. Hastaların yedisinde 1 mm çapındaki sütürler kullanılmış, bazı vakalarda sütürlerin bağlanırken kırıldığı ve yara komplikasyonu için herhangi bir risk faktörü bulunmayan bir hastada, ameliyat sonrası beşinci günde tam sternal ayrılma olduğu görülmüştür. Üç hastada ise 2 mm çaplı sütürler kullanılmış ve bir hastada yine tam sternal ayrılma görülmüştür.

Çelik tel ve örülmüş polyester kullanılan hastaların %0,3'ünde sternal ayrılma görülürken, PDS sütür kullanımında bu oranın %20'ye çıktığı belirtilerek, bu sütürlerin sternal kapama için uygun olmadığı söylenmiştir.

Scovotti *et al.* (1991), genişliği 22 mm, kalınlığı 5 mm ve uzunluğu hastanın karakteristiğine bağlı olarak 14-18 cm arasında değişen, delikli çelik çubukların, çelik tellerle birlikte kullanıldığı yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Ayrılmış sternum parçalarının ikisinin de arka kısımlarına, kemik uzunluğunca yerleştirilen bu çelik çubuklar, deliklerinden geçirilen ve sternumun ön kısmında birleştirilen çelik tellerle sabitlenmektedir. Bu yöntem birkaç hastada uygulanmış ve başarılı bir sternal stabilite sağladığı görülmüştür.

Tavilla *et al.* (1991), Robicsek metodunu değiştirerek, ameliyat sonrası şiddetli öksürme nedeniyle tam sternal ayrılma ve sternumda kırılmalar oluşmuş, osteoporotik sternuma sahip üç hasta üzerinde uygulamışlardır. Sternumun iki parçasında dörder çelik telin kullanıldığı yöntemde, ilk tel manubrium bölgesinde kemik içinden geçirilip, ikinci kaburgalar arası boşluktan çıkarılmıştır. Diğer üç telde, her iki parçada benzer şekilde sırayla yerleştirilmiş, karşılıklı gelen teller sternum üzerinde birleştirilmiştir. Ayrıca, manubrium bölgesinde iki ilave tel enine bağlanmıştır. Ameliyat sonrasındaki beş aylık süreçte hiçbir hastada sternal ayrılma görülmemiş ve mükemmel bir sternal birleşme olduğu belirtilmiştir. Kolay ve avantajlı olduğu söylenen yöntemin, özellikle komplike sternal ayrılma ve sternumda çoklu enine kırıklar olması durumunda kullanışlı olduğu söylenmiştir.

Cheng *et al.* (1993), çelik tel (no.5), mersilene şerit, çelik bant ve plastik bant kullanılarak yapılan dört kapama tekniğini mukayese etmişlerdir. İnsan kadavralarından çıkarılan sekiz sternum üzerinde yapılan deneylerde, 50 - 200 N arasında değişen yükler 3 sn'lik 100 tekrar şeklinde uygulanmış ve oluşan yer değiştirmeler ölçülmüştür. Elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinde, eğrinin eğimi metotların karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Geleneksel çelik tel yönteminin, deney sonuçlarına göre en stabil yöntem olduğu görülmüştür.

Chlosta and Elefteriades (1995), elik tellerle yapılan geleneksel sternal kapama işlemine, sternumun iki parçasında enine tellerin altına yerleştirilen ve manubriumdan ksifoide kadar sternumun alt ve st kısmı boyunca uzanan iki telle takviye etmişlerdir. Bu yöntemi 232 hasta içinden, sternal kapamada problem olabileceği düşünülen 32'sinde kullanmışlar ve ameliyat sonrası hiçbir problem oluşmadığını belirtmişlerdir. Bu yöntemin basit, hızlı ve oldukça etkili olduğunu ve metal plâklar yerine tercih edilebileceğini söylemişlerdir.

Keçeligil vd (1995), açık kalp ameliyatı geçiren 92 ocuk hastanın sternal kapamasını PDS sütür kullanarak yapmışlardır. Sütür manubriumda iki defa, gövde kısmında ise interkostal aralıklardan  veya dört defa olmak üzere toplam beş veya altı kez karşılıklı olarak iğne ile geçirilmiştir. En alt uçta sütürün iki ucu, her bir uç kenarda kalacak şekilde kesilip karşılıklı getirilerek beş defa dğmlenmiştir. Uygulama sonrası sternal enfeksiyon oluşan iki hastadan bir hayatını kaybederken diğeri tedavi edilebilmiş, kalan hastalarda ise herhangi bir problem görülmemiştir. Sonuç olarak, PDS sütürün sternal kapamada kullanımının kemik stabilitesi sağlama ve enfeksiyona karşı dirençli olma bakımından başarılı olduğu söylenmiştir.

Ozaki *et al.* (1998), titanyum plâklarla yapılan sabitleme tekniğini, geleneksel elik tel yöntemiyle karşılaştırmışlardır. İnsan kadavralarından alınan sternumlar üzerinde iki aşamalı olarak yapılan deneylerde, ilk olarak dört delikli düz plâklar kullanılarak yapılan sabitleme tel yöntemiyle karşılaştırılmış, ikinci aşamada ise dört delikli H şekilli plâk kullanımı tellerle kıyaslanmıştır. İlk aşamada 10, ikinci aşamada ise 11 sternumun kullanıldığı deneylerde, plâklarla yapılan kapamada er plâk kullanılmış, yükleme ise solunum hareketini yansıtan dört-noktalı eğilme basması şeklinde 22,5 kg'lık tekrarlı yükler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sternal kapama bölgesindeki yanal yer değiştirmeler ölçülmüş ve yöntemlerin sağladığı rijitlik, yük-yer değiştirme eğrisinin eğiminden hesaplanmıştır. H şekilli plâkların, tellere nazaran daha iyi rijitlik sağladığı ve daha az yanal ayrılmaya neden olduğu, düz plâk kullanımıyla tel kullanımı arasında ise, rijitlik ve yanal yer değiştirme açısından belirgin bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, H şekilli plâk kullanımının geleneksel tel yöntemine göre daha üstün

olduğu söylenmiş ayrıca plâk konfigürasyonunun da sternal sabitleme açısından önemli olduğu belirtilmiştir.

Casha *et al.* (1999a), altı farklı sternum kapama yönteminin rijitliklerini statik yanal ayrılma deneyleriyle karşılaştırmışlardır. Deneylerde iki eş parçadan oluşan çelik bir dikdörtgenler prizması parça kullanılmış ve 5 numara tellerle yapılan figür-8, geleneksel tel, çoklu düğüm ve kopan tellerin ek bir parçayla tekrar bağlanması şeklindeki “tamir” yöntemiyle, sterna-band ve ethibond sütür yöntemleri karşılaştırılmıştır. Sterna-band yönteminde çelik parçanın etrafını saracak şekilde bir bant kullanılmış, diğer yöntemlerde ise parçalara açılan karşılıklı ikişer deliğe yerleştirilen tellerle kapamalar yapılmıştır. Figür-8 ve çoklu düğüm yöntemlerinde tek tel, diğer yöntemlerde ise çift tel kullanılmıştır. Deneylerde 10 N değerinde bir ön gerilme verilmiş sonra 2 mm/dk yükleme hızıyla numuneler yanal ayrılma etkisine maruz bırakılmıştır. Her yöntem için 10 tekrar yapılmış ve yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Yük değeri 20-22 kg olduğunda tellerin açılmaya başladığı görülmüş, bu yüzden bu yük değerine karşılık gelen yer değiştirme değerleri yöntemlerin rijitliklerinin karşılaştırılmasında dikkate alınmıştır. En rijit yöntemin çoklu düğüm yöntemi olduğu görülmüş ve bu yöntemi sırasıyla, geleneksel tel, figür-8, sterna-band, tamir ve ethibond sütür yöntemleri takip etmiştir. Ayrıca, oluşturulan bir matematiksel modelle, şiddetli bir öksürme anında sternuma 150 kg’lık bir kuvvet etkiyeceği hesaplanmış ve tellerin 20 kg civarında açılmaya başladığı dikkate alındığında 6 telle yapılan kapamaların riskli olduğu ve sternal kapamaların en az 8 telle geleneksel şekilde veya 4 telle figür-8 ya da çoklu düğüm yöntemiyle yapılması tavsiye edilmiştir.

Casha *et al.* (1999b), geleneksel çelik tel yöntemine tellerin farklı şekilde büküldüğü yeni bir yaklaşım getirmişlerdir. Altı ya da sekiz tane tel transternal şekilde sternum kenarlarından 1,5 cm içeriden ya da dar sternumlarda peristernal şekilde yerleştirilmekte ve önce tellerin aynı taraftaki komşu uçları ikişer ikişer bükülmektedir. Sonra, her iki tarafta bükülen bu tellerin karşılıklı olanları sternum üzerinde birleştirilip birlikte bükülmekte ve oluşan düğüm de 90° bükülerek sternum üzerine yatırılmaktadır. Etkili, basit ve hızlı olduğu söylenen bu teknik, biyomekanik açıdan test edilmiş ve geleneksel

yöntem ile figür-8 yönteminden daha rijit oluğu belirlenmiştir. Ayrıca, tekniğin kullanıldığı 2000'den fazla hastada sternal ayrılma görülme oranı %0,5 olarak tespit edilmiştir.

McGregor *et al.* (1999), mediyan sternotomi uygulanmış ve kapama işlemi 7 çelik telle geleneksel şekilde gerçekleştirilmiş dört insan kadavrası üzerinde dört farklı yükleme şeklinin sternal ayrılma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sternumda, yanal ayrılma ile boyuna ve enine doğrultularda kayma etkisi oluşturacak kuvvetler uygulanmıştır. Ayrıca, öksürme ve hapşıma kaynaklı göğüs içi gerilmelerin etkisini yansıtmak için, havayla şişirilen torbalar göğüs boşluğuna yerleştirilmiştir. En fazla 400 N yük uygulanmış ve sternumdaki yer değiştirmeler sonomikrometri kristalleri yardımıyla ölçülmüştür. Sternumun alt kısımlarında üst kısımlara nazaran daha fazla ayrılma belirlenmiş ve fizyolojik gerilmeler altında, geleneksel telle kapama tekniğinin her zaman yeterli dayanımı sağlayamadığı belirtilmiştir.

Özergin vd (2000), çelik tellerle (no.5) birlikte çelik bantların (sterna-band) bir arada kullanıldığı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde üç tane çelik tel ve iki tane çelik bant, ilk olarak manubrium bölgesinde kullanılan telle başlanarak, değişmeli olarak sternum boyunca yerleştirilmektedir. İlk ve son teller figür-8 şeklinde bağlanırken, ortadaki tel sternumun uzunluğuna bağlı olarak figür-8 veya geleneksel şekilde bağlanmaktadır. Bu yöntem obezite ve diyabet gibi risk faktörlerine sahip 84 hasta üzerinde uygulanmış ve sonuçta hiçbir hastada sternal ayrılma oluşmadığı, sternal yara enfeksiyonu oluşan 4 hastanın ise antibiyotik tedavisi ile iyileştirildiği belirtilmiştir. Basit, etkili ve hızlı olduğu söylenen yöntemin, oluşan gerilmeleri sternal yüzeye eşit şekilde yayarak iyi bir stabilite sağladığı ifade edilmiştir.

Zurbrugg *et al.* (2000), sternal kapamada kullanılan çelik tellerin, sternumun kortikal tabakasını kesmesi durumunda oluşacak gerilme ve ayrılmanın stabil olmayan bir osteosentez oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Sternumdaki kesilmeyi önlemek amacıyla, tellerinin sternumun üst kısmına geçiş yerlerinin iç kısımlarını, tellerin iç kenarlarına 30° açı yapacak şekilde, çelikten yapılmış zımba telleriyle zımbalamış ve

sonra iki kapama telinin ucunu kendi üzerlerinde bükerek, zımba tellerinde hafif bir hareket oluncaya kadar döndürmüşlerdir. Bu yöntemin 100 hasta üzerinde uygulanması sonucunda, hastaların 98'inde stabil bir osteosentez, bir hastada sternumun iyileşmesini engellemeyen yüzeysel bir yara enfeksiyonu, bir hasta da ise mediyastinit belirlenmiştir. Basit ve özellikle küçük sternumu olan ve osteoporotik hastalar için faydalı olduğu belirtilen bu yöntemin ayrıca çok az yumuşak doku hasarı verdiği söylenmiştir.

Casha *et al.* (2001), polyester sütür, çelik telle figür-8, peristernal çelik tel ve çelik bantla (sterna-band) kapama yöntemlerinin etkinliğini ve kemiği kesme etkilerini geleneksel çelik tel yöntemiyle deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Koyun sternumlarının kullanıldığı yorulma deneylerinde numunelere 100 mm/dk devir hızıyla 1-10 kg arasında değişen değerlerde tekrarlı yanal çekme kuvveti uygulanmış ve her çeyrek saniyede bir, yer değiştirme değerleri kaydedilerek döngü-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Yöntemlerin kemiği kesme etkisi, uygulanan en büyük yük için 1. ve 150. döngülerdeki yer değiştirme değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Her yöntem için deneyler sekiz defa tekrarlanarak sonuçlar istatistiksel olarak, geleneksel kapama yönteminin verileriyle karşılaştırılmıştır. Polyester sütür ve figür-8 yöntemlerinde kemiği kesme etkisinin, geleneksel yöntemle göre daha hızlı gerçekleştiği ve bu yöntemlerin direngenliğinin daha düşük olduğu görülmüş, peristernal tel ve çelik bant yöntemlerinin ise geleneksel yöntemden belirgin şekilde daha üstün olduğu belirlenmiştir.

Okutan vd (2001), zımba telleriyle güçlendirilmiş, geleneksel telle sternum kapama yöntemini 20 hasta üzerinde uygulamışlardır. Ortalama 7 adet çelik tel ve toplam 268 adet zımba teli kullanılmış ve ameliyat sonrası yapılan radyografide 252 (%94,02) zımba telinin doğru uygulandığı belirlenmiştir. Sternumda stabil osteosentez ile birlikte yara iyileşmesinin 19 hastada sorunsuz meydana geldiği ve bir hastada yüzeysel yara enfeksiyonu gelişmesine rağmen sternumun iyileşmesine etki etmediği tespit edilmiştir. Bu tekniğin özellikle kemik erimesi olan yaşlı hastalarda faydalı olacağı söylenmiştir.

Centofanti *et al.* (2002), nitinol kapama klipslerini 100 hastanın sternal kapamasında kullanmışlardır. İkinci, beşinci ve altıncı kaburgalar arası boşluğa yerleştirilen üç klipsle yapılan kapamalar sonucunda, ameliyat sonrası hiçbir komplikasyon görülmemiş ve sternal ayrılma meydana gelmemiştir. Birçok avantajı olduğu söylenen bu yarı-rijit yöntemin kolay, güvenli ve etkili bir kapama tekniği olduğu belirtilmiştir.

Cohen and Griffin (2002), sternal kablo, çelik tel (no.5) ve çelik plâk (DSF) malzemelerinden üçer tane kullanılarak yapılan figür-8 yöntemlerini üç farklı yükleme etkisi altında statik deneylerle karşılaştırmışlardır. Deneyler, yoğunluğu 320 kg/m^3 olan toplam 54 poliüretan model üzerinde (her yöntem için her farklı yükleme şartında 6 tekrar) yapılmıştır ve modeller yükleme çenelerinin içine polimetil-metakrilet bir reçineye gömülerek sabitlenmiştir. Deneylerde yükler, yanal ayrılma, boyuna kesme ve enine kesme şeklinde ve 10 mm/dk yükleme hızıyla modeller göçene kadar uygulanmış ve yük-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Yöntemler, direngenlikleri, akma yükleri, akma anındaki yer değiştirme değerleri, çekme dayanımları ve akma sonrası yer değiştirmeleri dikkate alınarak karşılaştırılmışlardır. Çelik plâkların enine kesme ve yanal ayrılma etkisinde diğer yöntemlerden daha rijit bir kapama sağladığı, boyuna kesme etkisi altında belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Genel olarak, çelik plâk ve çelik kablo yöntemlerinin telle yapılan figür-8 yöntemine kıyasla önemli avantajları olduğu belirtilmiştir.

Glennie *et al.* (2002), çelik tellerle yapılan sternal kapamada telin bükülme sayısının telin dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneylerde çapları $0,7 \text{ mm}$ (no.5) ve $0,9 \text{ mm}$ (no.7) olan iki farklı tel kullanılmıştır. Teller, özel olarak hazırlanmış test düzeneğindeki iki ayrı polietilen bloğu birleştirecek şekilde, bloklardaki deliklerden geçirilerek bağlanmış ve teller kopana kadar bloklara yanal çekme kuvveti uygulanmıştır. Tellerin bükülme sayısı 1-10 arasında değişecek şekilde, her bir konfigürasyon farklı tellerle üçer kez test edilmiştir. Tellerin dayanabildiği maksimum kuvvetin üçüncü bükülmeye kadar, bükülme sayısı arttıkça arttığı fakat bu değerden sonra dayanım kuvveti-bükülme sayısı eğrisinin giderek düzleştiği ve inişli çıkışlı bir hal aldığı belirlenmiştir. Tellerin dayanabildiği maksimum kuvvet, çapı $0,7 \text{ mm}$ olan tel

için 613 N olarak telin dokuz kere bükülmesiyle, çapı 0,9 mm olan tel için ise 887 N olarak telin sekiz kere bükülmesiyle elde edilmiştir. Bununla birlikte, bükülme sayısı üç olduğunda, 0,7 mm ve 0,9 mm çaplı tellerin en büyük dayanımlarının, sırasıyla %80 ve %88'i elde edilmiştir. Bu durum dikkate alınarak tellerin üç veya dört kere bükülmesinin yeterli dayanımın sağlanmasında uygun olduğu söylenmiştir.

Negri *et al.* (2002), sternal kapamada, nitinol klips kullanımının sternal ayrılma ve ilgili komplikasyonlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla toplam 1000 hastanın yarısında en az altı çelik tel kullanarak geleneksel şekilde, diğer yarısında ise 2-4 arasında nitinol klips kullanarak sternal kapama işlemini gerçekleştirmiş ve ameliyat sonrası bulguları istatistiksel olarak karşılaştırmışlardır. Çelik tel kullanılan hastalarda, sternal yara enfeksiyonu görülme oranı %6,8, enfeksiyonsuz sternal ayrılma ve yara enfeksiyonu görülen hasta sayısı ise sırasıyla, 14 ve 15 olarak tespit edilmiştir. Klips kullanılan hastalarda ise bu değerler sırasıyla, %2,6, 1 ve 12 olarak belirlenmiştir. Sonuçta, nitinol klipslerin sternal ayrılma ve ilgili komplikasyonları önemli ölçüde azalttığı ve tellere kıyasla daha iyi osteosentez sağladığı söylenmiştir.

Trumble *et al.* (2002), yapay sternum modellerinin biyomekanik deneylerde kadavra sternumları yerine kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. Bu amaçla, yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretan sternum modelleri ve kadavra sternumları, uygulanan sternotomi sonrasında geleneksel çelik tel ve figür-8 yöntemleriyle kapatılmış ve yanal çekme kuvveti uygulanarak kesi hattı üzerindeki yer değiştirmeler ölçülerek karşılaştırılmıştır. Kadavralar üzerindeki deneyler sternumlar çıkarılmadan, özel bir deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Toplam 5 kadavradaki sternumlar, manubriumda iki ve gövdede beş tane çelik tel kullanılarak geleneksel şekilde ve iki tane manubriumda ve dört tane de gövdede olmak üzere toplam 6 talle figür-8 yöntemiyle kapatılmıştır. Sternuma 20-160 N arasında değişen yanal ayrılma kuvveti uygulanmış ve manubrium, gövde ve ksifoid bölgesinde kesi hattı üzerinde oluşan ayrılmalar piezoelektrik kristal dönüştürücüler ile ölçülmüştür. İki kapama yönteminden her biri için 5 yapay sternum modeli de, manubriumda ilave bir tel kullanımı hariç, benzer şekilde kapatılarak yüklemeye tabi tutulmuş ve ayrılma değerleri ölçülmüştür. Deneyler

sonucunda her iki kapama yönteminde de, kadavra ve yapay modellerde ölçülen ayrılmaların benzer olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, poliüretan sternum modellerinin biyomekanik çalışmalarda kullanımının uygun olduğu belirtilmiştir.

Al Ebrahim (2003), geleneksel telle kapama tekniğinin, sternumun her iki tarafında enine tellerin altında sternum boyunca uzanacak şekilde yerleştirilmiş ilave iki telle takviye edildiği bir yöntemi 112 hastanın sternal kapamasında kullanmıştır. Sternal ayrılma ve mediastinit görülme ihtimalinin yüksek olduğu bu yüksek-risk grubundaki hastalarda, öncelikle boyuna teller ksifoid ve manubrium kısımlarında açılan deliklerden geçirilerek, sternumun önü ve arkası boyunca uzatılmış ve ön kısım üzerinde bükülerek sabitlenmiştir. Sonra, enine teller boyuna iki telin etrafını saracak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece boyuna bir destek gibi davranacak olan teller sayesinde, enine tellerin kemiği kesmesi ve kırıklara neden olması engellenmek istenmiştir. Yöntemin kullanıldığı hastaların hiçbirinde sternal ayrılma veya mediastinit görülmemiş, yöntemin hızlı, basit ve başarılı olduğu belirtilmiştir.

Dasika *et al.* (2003), 6 çelik tel ve 7 çelik telle yapılan geleneksel kapama yöntemiyle, 6 telle yapılan figür-8 yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Poliüretandan yapılmış ve bu üç yöntemle sabitlenmiş toplam 15 sternum modeline 400 N' a kadar yanal çekme kuvveti uygulanmış ve manubrium, orta-sternum ve alt-sternum bölgelerindeki ayrılmalar bu bölgelere yerleştirilen potansiyometreler yardımıyla belirlenmiştir. Üç yöntemle yapılan kapamaların hepsinde manubrium en rijit bölge, alt-sternum ise en fazla ayrılmanın olduğu bölge olarak tespit edilmiştir. Farklı yük değerleri uygulanarak yapılan deneylerde, alt-sternum haricindeki bölgelerde üç yöntemin birbirlerine bariz bir üstünlüğü yokken, bu bölgede en az ayrılma değerleri 7 telle yapılan geleneksel kapama yönteminde elde edilmiş ve figür-8 şeklindeki bağlamının, geleneksel bağlama şekline bir üstünlüğü olmadığı belirlenmiştir.

McGregor *et al.* (2003), sternotomide çelik tel kullanıldığında, sternal ayrılmaların tellerin kemiği kesmesi ve sonrasında gevşeyip açılmalarıyla oluştuğunu belirterek, kuvveti kemik üzerinde daha geniş bir alana yaymak amacıyla, tellerin çelik sarmallarla

giydirilmesinin bu durum üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Altı insan kadavrası üzerinde yapılan sternotomi sonrası, önce altı çelik telin tek kullanıldığı, sonra sternumun yanal ve alt kısımlarında 3 mm çaplı çelik sarmallara giydirilmiş tellerin kullanıldığı geleneksel kapama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kadavraların ön göğüs duvarlarının altına şişirilebilir lastik torbalar yerleştirilerek göğüs içi basıncı sağlanmış, sternum orta hattındaki ayrılma miktarı sonomikrometri kristalleri aracılığıyla ölçülmüştür. Standart teller yerine, sarmallarla güçlendirilmiş teller kullanıldığında 0,25 mm' lik ayrılma için gerekli basıncın %140, 1 mm için %103 ve 2 mm için %122 artırılması gerektiği belirlenmiş ve sonuç olarak takviyeli tellerin daha iyi bir stabilite sağladığı söylenmiştir.

Dogan *et al.* (2004), ortopedide sıkça kullanılan sütür ankraj sistemini kadavralar üzerinde yaptıkları çalışmalar sonrasında, bir hastanın sternal kapamasında kullanmışlardır. İki kadavradan alınana sternumlar yapılan sternotomi sonrasında 5 tane sütür ankrajı ve Ethibond sütürler kullanılarak kapatılmış ve uygulanan yaklaşık 70-80 kg'lık kuvvetler sonrasında sternumda herhangi bir stabilite bozulması olmadığı görülmüştür. Bu yöntem aynı şekilde bir hastanın sternal kapamasında kullanılmış ve ameliyat sonrası dönemde herhangi bir komplikasyon olmadığı ve iyi bir sternal stabilite sağlandığı görülmüştür. Bu yöntemin kolay uygulanabilir, güvenli ve etkili olduğu belirtilmiştir.

Elahi *et al.* (2004), çelik tellerle yapılan sternal kapamalarda, tellerin kemiği kesmesi nedeniyle oluşabilecek problemleri belirterek, teldeki gerilmeleri plâk en kesitine aktarmak amacıyla, titanyum plâklarla çelik tellerin birlikte kullanıldığı kompozit bir kapama tekniğini, altı hastanın sternal kapamasında kullanmışlardır. Yöntemde ilk olarak, boyuna iki titanyum plâk sternumun her iki parçasının üzerine, sternum boyunca yerleştirilmiş ve vidalanmıştır. Sonra dört tane çelik tel bu iki plâğın etrafını saracak şekilde geleneksel yöntemle bükülerek sabitlenmiştir. Hastaların hepsinde sternal iyileşmenin hiçbir komplikasyon oluşmadan sağlandığı belirtilmiş ve bu kompozit yöntemin hızlı ve başarılı bir metot olduğu söylenmiştir.

Khasati *et al.* (2004), figür-8 yönteminin geleneksel tel yöntemine bir üstünlüğü olup olmadığını araştırmak amacıyla bir literatür çalışması yapmışlardır. Bu iki yöntemi karşılaştıran yedi farklı çalışmayı incelemiş ve bunların sonuçlarından yola çıkarak, figür-8 yönteminin, geleneksel tel yöntemine bir üstünlüğü olmadığını söylemişlerdir.

Losanoff *et al.* (2004), çelik tellerle (no.5) yapılan 6 farklı kapama yöntemini kadavralardan alınan toplam 53 sternum üzerinde yaptıkları dinamik yanal ayrılma deneyleriyle karşılaştırmışlardır. Numunelerin manubrium kısımlarında her kapama için 3 tane tel kullanılmış ve kapamalar tekli peristernal (4 tel), tekli transsternal (8 tel), dönüşümlü transsternal-peristernal (6 tel), peristernal figür-8 (3 tel), perikostal figür-8 (3 tel) ve Robicsek (2 boyuna ve 5 enine tel) yöntemleri ile yapılmıştır. Numunelere 40 dk. süresince 0,5 mm/sn hızla 0-800 N tekrarlı yanal ayrılma yükü uygulanmış ve yer değiştirmeler deney aletinden alınarak yük-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Tekli peristernal ve dönüşümlü transsternal-peristernal yöntemlerinin diğer yöntemlere kıyasla belirgin şekilde daha stabil bir kapama sağladığı görülmüş ve perikostal figür-8 yönteminin yeterince stabil olmadığı nedeniyle kapamalarda öncelikli tercih olmaması gerektiği vurgulanmıştır.

Riess *et al.* (2004), çelik tellerle yapılan geleneksel sternal kapama metodunda, tellere ek olarak kullanılan çelik bir bandın (sternum band), sternotomi sonrası oluşan sternal ayrılma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İki yıllık bir süreçte sternotomi uygulanan hastalarda, ilk yıl sadece tellerin, ikinci yıl ise tellerle birlikte kaburgalar arası üçüncü boşluğa yerleştirilen bir çelik bandın kullanıldığı sternal kapamalar sonrası elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Çelik bant ilavesinden sonra, hastalarda görülen sternal ayrılma ve sternal yara enfeksiyonlarının, sırasıyla, %2,9'dan %0,9'a ve %0,3'den %0,2'ye düştüğü belirlenmiştir. Sonuç olarak, geleneksel tel yöntemine ilave edilen çelik bir bandın, sternal ayrılmaları belirgin ölçüde azaltan etkili ve güvenilir bir yöntem olduğu söylenmiştir.

Shih *et al.* (2004), sternal kapamada kullanılan çelik tellerin kırılma mekanizmalarını anlamak için hastalardan çıkarılan tellerin yüzey değişimlerini ve kırık uç kısımlarını

inceleyerek analiz etmişlerdir. Sternal kapamaları figür-8 veya geleneksel yöntemle yapılmış beş hastadan, 8 tanesi kırılmış ve 12 tanesi hasarsız toplan 20 adet tel alınarak temizlenmiş, elektron mikroskobu ve enerji ayırmalı x-ışını analizi ile incelenmiştir. Kırık tellerin tamamında büyük enine çatlak oluşumu ve çatlak korozyonu olduğu belirlenmiştir. Enerji ayırmalı x-ışını analizlerinde ise kırık yüzeyinde alüminyum oksit olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, tellerin kırılmasını önlemek için kullanılan çelik kalitesinin iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Wu *et al.* (2004), çelik tellerle sternal kapama gerçekleştirilen fakat sternal birleşmenin sağlanamadığı tespit edilen 6 hasta üzerinde, çelik telleri çıkararak titanyum plâklar (SternaLock) kullanmışlardır. Ameliyat sonrası süreçte hastalarda herhangi bir komplikasyon görülmemiş ve kemik iyileşmesinin sağlandığı tespit edilmiştir. Plâk kullanımının güvenilir bir yöntem olduğu ve biyomekanik çalışmaların plâkların, çelik tellere olan üstünlüğünü ortaya koyduğunu belirtmişlerdir.

Bruhin *et al.* (2005), geleneksel tel yöntemi ile figür-8 yöntemini ANSYS programında yaptıkları sonlu elemanlar analizleri karşılaştırmışlardır. Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden alınan bir göğüs kafesinin kullanıldığı çalışmada, malzemeler doğrusal elastik olarak modellenmiş ve sternumda yanal ayrılma, boyuna kesme ve enine kesme etkisi oluşturacak şekilde, göğüs kafesine dönme ve yer değiştirme değerleri uygulanmıştır. Kapama malzemeleri ve sternum arasında sürtünmeli kontak tanımlanmış ve sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınmıştır. Yanal ayrılma yüklemesinde geleneksel tel yöntemiyle yapılan kapamanın yeterli olduğu, diğer yükleme şekillerinde ise figür-8 yönteminin sternumda oluşan yer değiştirmeleri, geleneksel yöntemine göre daha iyi sınırlandığı belirtilmiştir. Ayrıca, yanal ayrılma yüklemesinde en büyük yer değiştirme değerlerinin ksifoid bölgesinde olduğu belirlenmiştir.

Dimarakis *et al.* (2005), sternotomi sonrasında sternal ayrılma ve sternal yara oluşumu görülen üç hastanın yeniden yapılan sternal kapamalarında, titanyum hasır kullanmışlardır. Önceki kapamalarda kullanılan çelik teller çıkarıldıktan sonra, hastanın özelliklerine göre büyüklüğü belirlenen titanyum hasırlar sternum üzerine yerleştirilip

sternuma ve etrafını saran kaburga kemiklerine çelik tellerle sabitlenmiştir. Hastaların tamamında sternal stabilitenin sağlandığı görülmüş, yöntemin basit ve güvenilir olduğu belirtilmiştir.

Kiessling *et al.* (2005), ameliyat sonrası oluşan sternal ayrılmaların kalp ameliyatlarının en büyük problemi olduğunu ve özellikle obez hastalarda bu durumun ciddiyetini belirterek, bu hastalarda çift çelik tel yöntemiyle geleneksel çelik tel yöntemini karşılaştırmışlardır. Toplam 100 hastanın yarısında üç tane çift çelik telle birlikte üç tane tekli tel, diğer yarısında ise altı tane tekli çelik tel kullanılmıştır. Ameliyat sonrası altı aylık periyotta, çift tel kullanılan hastalardan birinde, diğer grupta ise altı hastada sternal ayrılma belirlenmiştir. Sonuç olarak çift çelik tel yönteminin, obez hastalardaki ameliyat sonrası sternal ayrılmaların önlenmesinde etkili ve başarılı bir yöntem olduğunu söylemişlerdir.

Mediyan sternotomi sonrası yüksek riskli kalp hastalarında ağırlı sternal yara komplikasyonlarında ki görülme sıklığının, daha iyi sternotomi tekniklerine duyulan ihtiyacı ortaya koyduğunu belirten Pai *et al.* (2005), titanyum plâkların yara bölgesindeki hareketi, tellere nazaran daha iyi azaltacağı ve daha hızlı iyileşme sağladığı düşüncesiyle bu iki malzemenin uygulamasını karşılaştırmışlardır. Eşit iki parçaya ayrılmış yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretan sternum modelleri yedi adet telle geleneksel şekilde veya üç tane X şekilli plâk (SternaLock) kullanılarak sabitlenmiş ve yanıl ayrılma testine tâbi tutulmuştur. Her iki tarafından sekizer noktadan bilgisayar kontrollü test cihazına bağlanan modele, bu noktaların her birine eşit dağılacak şekilde toplam 180 N yük, 12,7 mm/dk yükleme hızı ile uygulanmıştır. Karşılıklı yedişer noktadan işaretlenen modeldeki ayrılmalar dijital görüntü analizi ile hesaplanmış ve sonuçta plâklarla yapılan kapamanın, geleneksel tel yöntemine kıyasla, yanıl hareketi daha iyi engellediği belirlenmiştir.

Eğileten vd (2006), ameliyat sonrası dönemde sternal komplikasyon gelişme riski yüksek olan hastalarda, Robicsek ve figür-8 yöntemlerini kombine ederek kullanmış ve komplikasyon gelişme riskini incelemişlerdir. Yöntemde ilk olarak, manubriumdan

başlayıp ksifoide kadar çelik bir tel, bir kostokondral bileşkenin üstünden, ardışık bileşkenin ise altından geçirilerek yerleştirilmiş ve işlem sternumun diğer tarafında da yapılmıştır. Sonra, sternum figür-8 yöntemiyle kapatılmıştır. Yöntemin kullanıldığı 20 hastadan elde edilen bulgular, benzer riskleri taşıyan ve sadece figür-8 yöntemi kullanılan 20 hastadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kontrol grubunda iki hastada sternal ayrılma görülürken, kombine yöntemin kullanıldığı hastaların sadece birinde sternal komplikasyon geliştiği ve yöntemin ameliyat süresi ve kanama miktarında anlamlı bir artışa neden olmadığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, yöntemin sternum üzerindeki gerilmeyi azalttığı ve iyi bir sternal stabilite sağladığı söylenmiştir.

Luciani *et al.* (2006b), beden yüzey alanı $1,5 \text{ m}^2$ 'den daha küçük olan ve sternal komplikasyonlara sebep olabilecek yüksek risk faktörlerinden en az birine sahip 366 hastada PDS sütür ve çelik tel kullanımının etkileri karşılaştırılmıştır. Sternal kapama, 181 hastada dört tane PDS sütür kullanılarak, 185 hastada ise üç tane çelik tel kullanılarak figür-8 yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ameliyat sonrası dönemde oluşabilecek sternal komplikasyonlara yönelik olarak yapılan incelemelerde, çelik tel kullanılan dört hastada sternal ayrılma, üç hastada ise yüzeysel yara oluşumu ile karşılaşmış, PDS sütür kullanılan hiçbir hastada ise bu komplikasyonlar görülmemiştir. Sonuç olarak, beden yüzey alanı küçük ve yüksek risk faktörlerine sahip hastalarda PDS sütür kullanımı tavsiye edilmiş ve bu sütürlerin sternal komplikasyonlara karşı hastayı koruyabileceği belirtilmiştir.

Raman *et al.* (2006), sternotomi sonrası mediastinit görülme ihtimali yüksek olan ve sternal kapamalarında titanyum plâk (SternaLock) kullanılan 320 hastanın bulgularını, geleneksel tel yöntemi kullanılan benzer risk grubundaki 215 hastanın bulgularıyla karşılaştırmışlardır. Sternumun alt ve üst kısımları iki tane telle figür-8 yöntemiyle sabitlenmiş, orta kısımlarda ise iki tane titanyum plâk kullanılmıştır. Mediastinit, titanyum plâk kullanılan hastaların hiçbirinde görülmezken diğer grupta, ikisi ölümle sonuçlanan 28 vaka görülmüştür. Ayrıca titanyum plâk kullanılan hastaların beşinde enfeksiyonsuz sternal ayrılma belirlenmiştir. Sonuçta plâk yönteminin güvenilir ve etkili

olduğu ayrıca, yüksek-riskli hastalarda mediastinit oluşumunu engellediği söylenmiştir.

Usui *et al.* (2006), 350 hastanın sternal kapamasında 1 mm çaplı PDS sütürler kullanmışlardır. Şeker hastalığı ve obezite gibi yara iyileşmesine karşı risk faktörlerine sahip üç hastada ameliyattan birkaç hafta sonra sternal ayrılma belirlenmiş, yapılan incelemelerde sütürlerin düğümlerinde açılma olmadan hepsinin kırıldığı görülmüştür. Sütürlerin, başlangıçta yeterli bir çekme dayanımına sahip olmasına rağmen vücut içinde kullanımından sonra bu değer giderek azaldığı ve kemik kenarlarında etkiyen kayma gerilmelerinin de sütürde hasara neden olabileceği belirtilerek, özellikle obez ve KOAH olan hastalarda PDS sütür kullanımının güvenilir olmadığı söylenmiştir.

Zeitani *et al.* (2006), mediyen ve paramediyen (sternumun %75 oranda asimetrik kesilmesi) sternotomi uygulamalarının etkilerini yoğunluğu 320 kg/m³ olan poliüretan sternum modelleri üzerinde yaptıkları statik yanıl ayrılma deneyleri ile karşılaştırmışlardır. Toplam 6 tane model kullanılan deneylerde kapamalar 5 tane çelik telle (no.5) geleneksel şekilde yapılmıştır. Modeller, üzerlerinde toplam 6 tane delik açılarak yükleme çenelerinde bu deliklerden geçirilen çelik tellerle tutturulmuş ve 2 mm/dk yükleme hızıyla kırılana kadar yüklenmiştir. Yer değıştirmeler, sternumların üzerine yerleştirilen 3 tane gerinim ölçer ile belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, paramediyen sternotomi uygulamasında daha düşük göçme yükü değeri belirlenmiş ve daha büyük yer değıştirmeler oluştuğu görülmüştür.

Bhattacharya *et al.* (2007), sternal kapamada çelik tellerle birlikte çelik bant (sternum band) kullanımının yara iyileşmesi üzerindeki etkilerinin araştırmışlardır. İki yıl süresince, toplam 765 hastada uygulanan mediyen sternotomi sonrasında, 370 hastada sadece çelik tel, 395 hastada ise çelik tellerle birlikte çelik bantlar kullanılarak sternum kapatılmıştır. Sadece tellerle yapılan kapamaların büyük kısmı, manubriyumda 3 ve gövdede 4 tane olmak üzere toplam 7 telle geleneksel şekilde yapılmış, sternumun kırılğan ya da yumuşak olduğı hastalarda ise Robicsek yöntemi kullanılmıştır. Çelik bant kullanımında ise çoğunlukla, kaburgalar arası ikinci boşlukta yer alan tel yerine bir

tane çelik bant yerleştirilmiş, osteoporotik ve yumuşak sternumlarda ise ikinci ve üçüncü kaburga boşluğundaki teller yerine birer tane bant yerleştirilmiştir. Sadece çelik tel kullanılan hastaların 14'ünde (%3,78), oluşan komplikasyonlar nedeniyle yeniden sternal kapama yapılırken, çelik bant kullanılan hastaların sadece 3'ünde (%0,76) yeniden kapamaya ihtiyaç duyulmuştur. Komplikasyon oluşumunun ana nedeninin sterilizasyon kaynaklı enfeksiyonlar olmadığı, tellerin hareketi nedeniyle sternumda oluşan stabilite bozukluğu sonucunda perikardiyal sıvının dışarı sızması olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, çelik bant kullanımının enfeksiyon oluşma ihtimalini azalttığı, tellere göre daha rijit bir sabitleme ve daha iyi bir yara iyileşmesi sağladığı belirtilmiştir.

Losanoff *et al.* (2007), çift çelik telle ve tek telle (no.5) yapılan geleneksel kapama yöntemlerini kadavralardan alınan toplam 16 insan sternumu üzerinde yapılan dinamik deneylerle karşılaştırmışlardır. Geleneksel tek tel yöntemiyle yapılan kapamada manubrium kısmında üç, kalan bölgelerde de 4 tane tek tel kullanılmış, çift tel yönteminde ise manubrium kısmında üç ve en altta bir tane olmak üzere 4 tek tel, 3 tane çift tel ile birlikte kullanılmıştır. Numunelere 40 dk. boyunca 0,5 mm/sn hızla 0-800 N tekrarlı yanıl ayrılma yükü uygulanmış ve yer değıştirmeler deney aletinden alınan verilerle belirlenmiştir. Çift tel uygulamasında, tek tel yöntemine oranla daha az yer değıştirmenin meydana geldiğı görülmüş ve daha iyi bir stabilite sağlandığı belirtilmiştir.

Pai *et al.* (2007), titanyum plâkların kullanımının yara bölgesindeki hareketi daha iyi kısıtlaması ve ameliyat sonrası komplikasyonları azaltması nedeniyle, tellere nazaran daha iyi bir yöntem olduğunu belirtmiş ancak bu plâkların sayısının ve sternum üzerindeki en etkin yerleşiminin nasıl olması gerektiğı konusundaki yetersiz bilgi sebebiyle kullanımının sınırlı olduğunu söylemişlerdir. En uygun plâk yerleşimini bulmak amacıyla, piyasada bulunabilen X-şekilli ve kutu-şekilli plâkların (SternaLock) beş farklı kombinasyonunu, yoğunluğu 320 kg/m³ olan poliüretan sternum modelleri üzerinde karşılaştırmışlardır. Karşılıklı sekizer noktasından üniform olarak en fazla 360 N'luk toplam yükle yüklenen modeller yanıl ayrılma testine tabi tutulmuş ve karşılıklı

yedişer noktadan işaretlenen modeldeki ayrılmalar dijital görüntü analizi ile hesaplanmıştır. Plâkların kombinasyonları, dört tane X-şekilli, iki X-şekilli ile birlikte bir kutu-şekilli, üç X-şekilli ile birlikte bir kutu-şekilli, üç X-şekilli ve son olarak üç X-şekilli yerleşimin aralıkları daha büyük olanı şeklinde oluşturulmuştur. Sonuçta, üç X-şekilli plâk ile bir kutu-şekilli plağın birlikte kullanıldığı durumun, ayrılmaya karşı en etkin dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, beklenenin aksine, X-şekilli plâk sayısı üçten dörde çıkarıldığında sternumun hem üst hem de alt kısımlarında daha fazla ayrılma belirlenmiştir.

Plass *et al.* (2007), mediyan sternotomi sonrası sternumda ayrılma oluşan ve sternal yara enfeksiyonu meydana gelen üç hastanın yeniden yapılan sternal kapamalarında titanyum plâk (Synthes) kullanmışlardır. Sternum boyunca, kaburgaların üzerine de gelecek şekilde yerleştirilen enine plâkların boyutları ve adedi, her bir hastanın sternumunun özelliklerine göre belirlenmiştir. Operasyonların sorunsuz bir şekilde gerçekleştiği ve ameliyat sonrası dönemlerde bir problemle karşılaşmadığı belirtilerek yöntemin kolay uygulanabilir ve güvenli olduğu söylenmiştir.

Reiss *et al.* (2007), mediyan sternotomi sonrasında sternal yara enfeksiyonu oluşmuş 16 hastanın sternal kapamasında nitinol klips kullanarak bu malzemenin etkilerini incelemişlerdir. Sternal enfeksiyon oluşum riskini arttıran diyabet ve obezite gibi risk faktörlerine sahip hastaların ameliyat sonrası gözlemlerinde, sternumun stabilitesinin başarılı bir şekilde sağlandığı ve sorunsuz bir yara iyileşmesi olduğu görülmüştür. Bu kapama yönteminin kolay uygulanabilir olduğu ve komplikasyonlara neden olmadığı belirtilmiştir.

Almadovar *et al.* (2008), mediyan sternotomi uygulaması sonrasında derin sternal yara enfeksiyonu oluşan iki hastanın yeniden yapılan sternal kapamalarında enine titanyum plâklar (Synthes) kullanmışlardır. Kapamalar üç adet enine plâkla gerçekleştirilmiş, bir hastada ilave olarak manubrium kısmında yıldız-şekilli plâk kullanılmıştır. Enine plâkların uzunluğu, her kaburgada en az üçer vidalama yapılabilecek şekilde belirlenmiş ve güvenlik pimleri sternum orta hattının üzerinde kalacak şekilde plâklar yerleştirilip

vidalanmıştır. Ameliyat sonrası beş ay süren incelemelerde herhangi bir komplikasyonla karşılaşılmamış ve sternum stabilitesinin sağlandığı görülmüştür. Yöntemin güvenli ve kolay uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Huh *et al.* (2008), sternotomi sonrasında sternal ayrılma ve mediastinit oluşan 14 hastanın yeniden yapılan sternal kapamalarında enine titanyum plâklar (Synthes) kullanmışlardır. Kapamalar genellikle, manubriumda kullanılan bir tane yıldız-şekilli plâk ve gövdeye yerleştirilen sayıları 3-5 arasında değişen plâklar kullanılarak yapılmıştır. Ameliyat sonrasında plâklarda kırık tespit edilen bir hastada, plâklarla yeniden sternal kapama yapılmış, bir hastada seroma oluşumu ve bir hastada ise enfeksiyon görülmüştür. Ameliyat sonrasında ortalama 15,5 ay süren incelemeler sonucunda ise bütün hastalarda ameliyat sonrası ağrının en düşük seviyede kaldığı ve sternal stabilitenin sağlandığı belirlenmiştir. Sternal plâkların, kemik kalitesinin düşük olduğu, kırık oluşmuş ya da akut veya kronik stabilite bozukluğu meydana gelmiş hastalarda telle kapama yöntemine karşı etkili bir alternatif olduğu söylenmiştir.

Schimmer *et al.* (2008), yaşları 75'in üzerinde olan 84 hastanın sternal kapamalarında geleneksel çelik telle kapama yöntemi ve Robicsek yöntemlerini kullanmışlar ve bu yöntemlerin sternal ayrılma ve derin sternal yara enfeksiyonu oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Benzer karakteristiklere sahip bu hastaların 43'ünde en az altı çelik tel kullanılarak geleneksel kapama, 41'inde ise Robicsek yöntemiyle kapama gerçekleştirilmiştir. Ameliyat sonrası dönemde yapılan incelemelerde Robicsek yöntemi kullanılan hastaların hiçbirinde sternal ayrılma veya yara enfeksiyonu ile karşılaşılmamış, geleneksel kapama yapılan hastalarda ise her iki komplikasyon da ikişer hastada görülmüştür. Sonuç olarak, Robicsek yönteminin yaşlı hastalarda sternal ayrılma ve derin yara enfeksiyonu oluşumu riskini azalttığı söylenmiştir.

Voss *et al.* (2008), çelik tellerle yapılan sternal kapama işleminde başarı sağlanamayan 15 hastada üzerinde titanyum plâk (Synthes) kullanmışlardır. Hastaların altısında çelik tellerle birlikte, kaburga kemikleri üzerine kadar gelen, iki uzun titanyum plâk enine yerleştirilerek kullanılmış ve sternumun üst kısmında H-şekilli, alt kısmında ise yıldız-

şekilli küçük plâklarla desteklenmiştir. Diğer hastalarda ise, sternumun iki yanında, sternum boyunca uzanan iki titanyum plâk yerleştirilmiş, bu plâklar küçük enine plâklar ve çelik veya titanyum teller kullanılarak birbirlerine sabitlenmiştir. Operasyon sonrasında, enine plâk yerleştirilen hastaların üçünde solunum esnasında oluşan ağrılar dışında, plâk kaynaklı bir problem görülmemiştir. Titanyum plâk kullanımının, sternumun tekrar kapatılmasında etkili ve uygulanabilir bir yöntem olduğu, özellikle uzunlamasına plâk kullanımının, diğer yöntemle kıyasla daha kolay uygulandığı ve daha az komplikasyona neden olduğu söylenmiştir.

Wangsgard *et al.* (2008), çelik tellerin kullanıldığı figür-8 yöntemiyle, çelik kabloların kullanıldığı figür-8 ve çelik plâklı dinamik sabitleme yöntemlerinin yorulma performanslarını karşılaştırmışlardır. Yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretandan yapılmış sternum modelleri, yanal ayrılma ve boyuna kesme oluşturacak şekilde, kırılıncaya kadar tekrarlı yüklere maruz bırakılmıştır. Yanal ayrılma deneyinde 25-700 N arasında değişen yükler 10 Hz frekansıya, boyuna kesmede ise $\pm 300 \text{ N}$ 'luk yükler 1Hz frekans değeriyle uygulanmıştır. Her yöntem için, sternumun kapama işlemi, malzemelerden üçer tane kullanılarak yapılmış ve her yöntem için beşer deneme yapılmıştır. Sonuçta, çelik kablolu figür-8 yönteminin, bu metotlar içinde en dayanıklısı olduğu ayrıca en zayıf yönteminde çelik telli figür-8 yöntemi olduğu belirlenmiştir.

Zeitani *et al.* (2008), geleneksel çelik tel yöntemiyle, tellerin kemiği kesme etkisini azaltmak için sternumun iki parçasına boyuna şekilde yerleştirilen ve kalınlığı 0,7 mm olan titanyum levhaların çelik tellerle birlikte kullanıldığı yöntemi dinamik ve statik deneylerle karşılaştırmışlardır. Deneylerde 320 kg/m^3 yoğunluktaki poliüretan modeller kullanılmış ve kapamalar 5 çelik telle (no.5) geleneksel şekilde yapılmıştır. Statik deneyler 2 mm/dk yükleme hızıyla 16 model üzerinde, dinamik deneyler ise 0-500 N yük, 200 mm/dk yükleme hızıyla 6 model üzerinde yanal ayrılma yüklemesi şeklinde modeller göçene kadar uygulanmıştır. Yer değiştirmeler, sternum üzerinde üç noktaya yerleştirilen yer-değiştirme ölçerler yardımıyla belirlenmiş ve yük-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Statik deneylerde, sadece tel kullanımında göçme yükü $580 \pm 35 \text{ N}$, titanyum levha takviyesinde ise $1200 \pm 47 \text{ N}$ olarak bulunmuş, dinamik deneylerde

belirlenen göçme için gerekli tekrar sayısı ise her iki yöntem için sırasıyla, 2250 ± 35 döngü ve 3855 ± 48 döngü olarak belirlenmiştir. Ayrıca, levha takviyesi yapıldığında daha düşük yer değiştirmeler olduğu görülmüştür. Titanyum levha takviyeli geleneksel kapamanın yanal yüklere karşı dayanımı arttırdığı ve tellerin kemiği kesme etkisini azalttığı vurgulanmıştır.

Fawzy *et al.* (2009), altı çelik tel veya altı çelik kabloyla geleneksel şekilde yapılan kapamalarla, bu yöntemlere ilaveten altıncı kaburgaya yerleştirilen bir plâğın (Synthes) kullanıldığı ve son olarak dört tane plâğın kullanıldığı beş farklı sternum kapama yöntemini 18 insan kadavrası üzerinde yaptıkları deneylerle karşılaştırmışlardır. Göğüs içi boşluğuna yerleştirilen plastik torbalar, sternum orta hattında 2 mm'lik ayrılmalar oluşana kadar havayla şişirilmiş ve her yöntem için basınç-yer değiştirme ilişkisi belirlenmiştir. Yer değiştirmeler hesaplanmasında piyezoelektrik kristaller kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, kablo veya tellere yapılan plâk ilaveli yöntemle yalnızca plâkların kullanıldığı yöntem arasında belirgin bir fark olmadığı fakat bu üç yöntemin de, yalnızca tellerin kullanıldığı diğer iki metoda göre, sternal stabiliteyi önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir.

Kun and Xiubin (2009), bir literatür çalışmasıyla, sternal kapamada kullanılan malzeme ve yöntemlerin kritiğini yaparak bu alandaki yenilikleri araştırmışlardır. Sonuç olarak, hiçbir alternatif malzemenin yetersiz biyomekanik özelliklerinden dolayı, çelik tellerin yerini alamadığını belirtmiş ve kendi deneyimlerine dayanarak, dört tane tek veya çift tel kullanılarak yapılan peristernal kapamanın en uygun kapama yöntemi olduğunu söylemişlerdir.

Ooi *et al.* (2009), nitinol klipslerin kullanımında, uygun klips büyüklüğünü belirlemek için yapılan sternal genişliğin ölçülmesi işlemini sternotomi öncesinde yaparak alternatif bir teknik ortaya koymuşlardır. Sternotomi sonrası yapılan genişlik ölçümlerinde, sternumun deforme olması ve kırıkların oluşması gibi etkenlere bağlı olarak hatalar olabileceği belirtilmiş ve sternotomi öncesinde ölçüm yapılmasıyla doğru değerlerin elde edileceği söylenmiştir. Sternumun orta hattının doğru olarak

belirlenmesine ve ameliyat süresinin kısılmasına da katkı sağladığı söylenen bu teknik elliden fazla hastada uygulanmış ve hiçbir komplikasyonla karşılaşmadığı belirtilmiştir.

Snyder *et al.* (2009), sternal kapamada titanyum plâk (SternaLock) kullanımının, yüksek-risk grubundaki hastalarda sternal yara komplikasyonlarını azaltabileceğini belirterek, plâkların çelik tellerle birlikte kullanıldığı 30 hastanın ameliyat sonrası bulgularını, geleneksel tel yöntemi kullanılan benzer risk grubundaki 129 hastanın bulgularıyla karşılaştırmışlardır. Ameliyat sonrası erken dönemde, sternal yara komplikasyonları, plâk kullanılan hastalarda görülmezken, tel kullanılan 12 hastada meydana gelmiştir. Otuz günden sonraki dönemde ise, her iki gruptaki birer hastada bu durum belirlenmiştir. Plâk kullanımının, bu tip hastalarda ameliyat sonrası erken dönemde, tellerden daha iyi fayda sağladığı fakat geç dönemde yara komplikasyonlarını engelleyemediği belirtilmiştir. Ayrıca, plâk kullanımının hastanede yatış süresini ortalama bir gün azalttığı görülmüştür.

Tekümit vd (2009), mediyan sternotomi uygulanan 6211 erişkin hastanın tıbbi kayıtları üzerinde yapılan istatistiksel çalışmayla, figür-8 ve geleneksel çelik tel yöntemlerini mukayese etmişlerdir. Hastaların 2598'inde figür-8 yöntemi, 3613'ünde ise geleneksel tel yöntemi kullanılmış, sternal ayrılma gelişiminin sıklığı, sırasıyla %1,46 ve %1,43 olmak üzere birbirine yakın çıkmıştır. Sonuç olarak, mikrobik olmayan sternal ayrılma ve sonrası seyir bağlamında bu iki kapama tekniği arasında fark olmadığının düşünüldüğü belirtilmiştir.

Bek *et al.* (2010), ameliyat sonrası sternal ayrılma görülme ihtimali yüksek olan hastalarda kullanılabilecek, çelik tellerle yapılan yeni bir kapama tekniği geliştirmişlerdir. Geleneksel telle kapama yönteminde kaburgalar arası boşluktan geçirilen tellerin sternumu keserek sternal ayrılmalara neden olduğu belirtilmiş ve bu yeni yöntemde, tellerin kostokondral eklemelerden geçirilmesiyle bu durumun engellenmesine çalışılmıştır. Tekniğin uygulanmasında ilk olarak üç tane telle manubrium bölgesi sabitlenmekte, sonra beş tane münferit tel sternum boyunca

kostokondral eklemelerden geçirilerek bağlanmaktadır. Yüksek risk grubundaki 150'den fazla hastada kullanılan bu yeni tekniğin, geleneksel yöntemle nazaran daha az kanamaya neden olduğu ve ameliyat süresini kısalttığı görülmüş, ayrıca hastaların hiçbirinde sternal ayrılma meydana gelmediği belirtilmiştir.

Broudhurst *et al.* (2010), osteoporotik sternuma sahip, yüksek-risk grubundaki bir hastanın sternal kapamasında çelik tellerle birlikte nitinol klipsler kullanmışlardır. Sternum önce çelik teller kullanılarak birleştirilmiş, sonra iki adet klips kullanılarak kapama tamamlanmıştır. Sorunsuz geçen iyileşme sürecinin yedinci gününde hastanın düşerek sternuma darbe alması sonucunda tellerin tamamı ve bir tane klips kırılmış ayrıca kemikte de kırıklar meydana gelmiştir. Sternumdaki kırıklardan dolayı klipslerin yerleştirilmesine uygun ortam olmadığından, ikinci kapama çelik telli figür-8 yöntemiyle yapılmış ve başarılı olunmuştur. Sonuç olarak, nitinol klips kullanımının sternal kapamada etkili bir yöntem olduğu fakat sternuma şiddetli kuvvetlerin etkimesi durumunda bu klipslerinde kırılabileceği belirtilmiştir.

Doğan (2010), daha önce çelik tellerle sternal kapama uygulanmış ve ameliyat sonrası komplike sternal ayrılmaların meydana geldiği 8 hastada, çelik tellerle birlikte titanyum hasır ve vida kullanarak sternal ayrılmaların düzeltilmesine yönelik farklı bir cerrahi yaklaşım sunmuştur. Öncelikle figür-8 yöntemi kullanılarak, çelik tellerle sternum kapatılmış sonra iki titanyum hasır sternum üzerine yerleştirilerek iki taraftan vidalanmıştır. Uygulama sonrasında, sternal stabilitenin tüm hastalarda başarıyla sağlandığı ve iki yıl süren klinik takiplerde herhangi bir komplikasyon görülmediği belirtilmiştir.

Fedak *et al.* (2010), çelik tellerle birlikte kemik çimentosu kullanmanın sternal kapama üzerindeki etkisini yaptıkları biyomekanik ve klinik çalışmalarla araştırmışlardır. Kadavralardan elde edilen sternumlar üzerinde yapılan mediyan sternotomi sonrasında, dört kadavrada yedi tel kullanılarak geleneksel sternal kapama yapılmış, beş kadavrada ise kemik çimentosu geleneksel yöntemle beraber kullanılmıştır. Numunelere 0,5 Hz frekansında 10 N'dan başlayarak artan değerlerde 30 tekrarlı yanal çekme kuvveti

uygulanmış ve lineer yer değiştirme sensörleri kullanılarak kesi hattı üzerindeki yer değiştirmeler ölçülmüştür. Deneyler sonucunda, kemik çimentosu kullanılan numunelerde daha düşük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Patalojik yer değiştirme olarak ifade edilen 2 mm'den daha büyük yer değiştirmelerin sadece çelik tel kullanıldığında 600 N'luk yüklemde olduğu ve tam ayrılmanın 900 N'da gerçekleştiği görülmüş, kemik çimentosu takviyesinde ise bu yer değiştirme değerinin ve tam sternal ayrılmanın, uygulanan en büyük yük olan 1200 N'da dahi oluşmadığı belirlenmiştir. Klinik çalışmada ise, yedi hastada sadece çelik tel, sekiz hastada ise kemik çimentosu ve çelik tel birlikte kullanılmıştır. Ameliyat sonrası 90 gün süren takip döneminde hiçbir hastada herhangi bir komplikasyon görülmemiş ve sağlıklı bir kemik iyileşmesi sağlandığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, kemik çimentosunun geleneksel sternum kapama yönteminin mekanik stabilitesini arttırdığı vurgulanmıştır.

Hirsch *et al.* (2010), orta-hat dışında yapılan sternotomi sonrasında obez bir hastanın sternal kapamasında, sternal komplikasyon oluşma riskini dikkate alarak, çift tellerle birlikte Talon kullanmışlar ve ameliyat sonrası beşinci günde hastada sternal ayrılma oluştuğunu belirlemişlerdir. Yapılan incelemede Talonun yerinden çıktığı ve tellerin tamamının sternumdan ayrıldığı görülmüştür. İkinci kez yapılan sternal kapamada titanyum plâklar (Synthes) kullanılmış ve komplikasyonsuz bir şekilde sternumun stabilitesinin sağlandığı görülmüştür. Orta-hat dışında yapılan sternotomilerde, sternum boyunca kuvvet dağılımının eşit olmadığı belirtilerek, bu durumda Talon kullanımına dikkat edilmesi gerektiği söylenmiştir.

Levin *et al.* (2010), sternotomi uygulanan 42 hastada, kapama metodu olarak sternal Talon kullanmış ve bu yöntemin etkilerini incelemişlerdir. Yüksek-risk grubundaki bu hastalarda, ortalama olarak 3 tane Talon kullanılmıştır. Ameliyat sonrası dönemde, hiçbir hastada enfeksiyon yada sternal ayrılma görülmemiştir. Etkili ve güvenli olduğu belirtilen bu yöntemin, geleneksel telle kapama yöntemine bir alternatif olabileceği belirtilmiştir.

Fedak and Kasatkin (2011), otuzdan fazla hastanın sternal kapamasında çelik tellerle birlikte Kryptonite kemik çimentosu kullanmışlardır. Yöntemin uygulanmasında ilk olarak, 7 tane tel sternum boyunca yerleştirilmiş sonra sternumun her iki parçasının iç yan yüzleri uygun şekilde temizlenerek çimento sürülmüş ve sternum birleştirilip teller geleneksel şekilde bağlanmıştır. Hastaların tamamında herhangi bir sternal komplikasyon veya çimento kaynaklı yan etki görülmemiş ve sternal stabilitenin sağlandığı söylenmiştir. Kryptonite kemik çimentosu takviyeli kapamanın iyileşme sürecini hızlandırabileceği ve sternal komplikasyonları önleyebileceği belirtilmiştir.

Grapow *et al.* (2011), aort kapak replasmanı ameliyatlarında uygulanan ve sternumun kısmi olarak ikiye ayrıldığı mini sternotomi işlemi sonrasında sternal kapama için tel kullanımının zorluğunu belirterek, 48 hastada kapama için nitinol klips kullanmışlardır. Hastaların büyük kısmında iki nitinol klips ve bir çelik tel, bazılarında ise sadece üç tane nitinol klips kullanılarak kapama gerçekleştirilmiştir. Ameliyat sonrası dönemde 45 hastada sternal iyileşme problemsiz olarak gerçekleşmiş, 2 hastada kanama problemi nedeniyle operasyon tekrarlanmış ve 1 hastada ise sternal enfeksiyon görülmüştür. Sonuç olarak, bu tekniğin hızlı uygulanabilir, basit ve güvenilir bir yöntem olduğu söylenmiştir.

Hirose *et al.* (2011), titanyum plâklarla (SternaLock) yapılan kapama yönteminin hastaların iyileşme süreci üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, sternal kapamaları titanyum plâklarla yapılan 89 hastanın ameliyat öncesi ve sonrası verileri, geleneksel çelik tel yöntemi kullanılan 133 hastanın verileriyle karşılaştırılmıştır. Çelik tellerle kapama manubriumda 2-3 adet, gövdede ise 5-6 adet tel kullanılarak toplam 6-8 telle geleneksel şekilde yapılmış, plâkla kapamada ise manubriumda 2 ve ksifoidde kullanılan 1 çelik telle birlikte en az üç tane plâk kullanılmıştır. Plâkla kapama grubunun yaş ortalamasının diğer gruptan daha düşük olduğu, erkek ve obez hasta sayısının ise çelik tel grubundan fazla olduğu görülmüştür. Ameliyat sonrasında, rijit kapama grubundaki bir hastada sternal enfeksiyon görülmüş, diğer grupta ise bu durumla karşılaşılmamıştır. Entübasyon süresi, yoğun bakımda kalış süresi ve ameliyat sonrası hastanede toplam kalış süresi değerlerinin ise plâkla kapama grubunda belirgin

şekilde düşük olduğu belirlenmiştir. Plâklarla kapama yönteminin genç erkek hastalarda ve obez hastalarda, hastanın iyileşme sürecini hızlandırdığı söylenmiştir.

Grapow *et al.* (2012), ZipFix bantlarla yapılan sternal kapama yönteminin etkinliğini klinik bir çalışmayla araştırmışlardır. Mediyen sternotomi uygulanmış 50 hastanın 37'sinde sternal kapama yalnız beş tane ZipFix bant kullanılarak, 13 hastada ise dört banda ilaveten bir çelik tel kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ameliyattan sonraki 30 günlük sürede yapılan gözlemlerde, antibiyotik kullanımına bağlı olarak iki hastada oluşan mediyastinit nedeniyle bantların çıkarılması gerekmiş, diğer hastalarda ise herhangi bir problemle karşılaşılmamıştır. Sonuç olarak ZipFix bantların sternal kapamada etkili ve güvenilir bir yöntem olduğu belirtilmiş, hızlı ve kolay uygulanabilir olmaları sayesinde, geleneksel telle kapama yöntemine karşı iyi bir alternatif oldukları vurgulanmıştır.

Gucu *et al.* (2012), mediyen sternotomi sonrasında enfeksiyonsuz sternal ayrılma oluşan 10 hastanın yeniden yapılan sternal kapmalarında nitinol klips kullanmışlardır. Ameliyat sonrasında 2-6 ay süresince yapılan gözlemlerde, kapama yöntemine bağlı olarak gelişen herhangi bir komplikasyona rastlanmamıştır. Nitinol klipslerin, enfeksiyonsuz sternal ayrılma nedeniyle yapılan ikincil kapamalarda kullanımının güvenilir, basit ve etkili olduğu belirtilmiştir.

Kamiya *et al.* (2012), sternal kapamada kullanılan çelik tel sayısının sternal komplikasyonlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Geleneksel çelik tel veya figür-8 yöntemi kullanılan 4466 hastanın sternal kapamalarında kullanılan tel sayısı belirlenmiş ve ameliyat sonrası veriler incelenerek istatistiksel bir çalışma yapılmıştır. Figür-8 yöntemi kullanılan hastalardaki her bir tel iki tel olarak sayılmış ve tüm hastalarda kullanılan ortalama tel sayısının 7-8 olduğu görülmüştür. Hastaların 106'sında sternal komplikasyonlar oluşurken, bu komplikasyonlara bağlı ölüm oranı %2,8 olmuştur. Yapılan istatistiksel çalışma sonucunda, tüm hasta grubu için tel sayısının sternal komplikasyonlar üzerindeki bir etkisi olmadığı görülmüş fakat KOAH, diyabet ve böbrek yetmezliği gibi hastalıklara sahip yüksek risk grubundaki hastalarda tel sayısının

komplikasyonlar üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yüksek risk grubundaki hastalarda sternal komplikasyon oluşum ihtimalini azaltmak için yedi veya sekiz tel kullanımının gerekli olduğu, dokuz veya daha fazla telin ise ekstra bir faydasının olmadığı ifade edilmiştir.

Raman *et al.* (2012), geleneksel çelik tel yöntemiyle titanyum plâk yöntemini (SternaLock) 140 hasta üzerinde yaptıkları istatistiksel çalışmayla, sternal iyileşme ve ameliyat sonrasındaki ağrı şiddeti üzerinden karşılaştırmışlardır. Sternal yara enfeksiyonu için yüksek risk oluşturan diyabet, KOAH ve obezite gibi faktörlerden en az ikisine sahip hastalardan oluşturulan grubun yarısında tel yarısında da plâk kullanılmıştır. Plâk kullanımında, manubriumda 1 adet L şeklinde, gövdede ise 2 tane X şeklinde plâk kullanılmış, telle kapama ise no.6 tellerle, hasta ağırlığının her 10 kg için 1 tel olacak şekilde, en az yedi telle yapılmıştır. Her iki yöntemde de, manubriumda 2 ksifoidde ise 1 tane ilave tel kullanılmıştır. Ameliyat sonrası farklı dönemleri kapsayan incelemeler sonucunda titanyum plâkların, geleneksel yöntemle göre daha az ameliyat sonrası ağrıya neden olduğu ve daha iyi sternal iyileşme sağladığı belirlenmiştir.

Tavlaşoğlu *et al.* (2012), nitinol klipslerle yapılan sternal kapama sonrasında sternal ayrılma ve yara enfeksiyonu görülen bir vakayı incelemişlerdir. Ameliyat sonrası geç dönemde söz konusu komplikasyonlar oluşan diyabetik hastanın röntgenlerinde, kapamada kullanılan dört klipsten birinin yerinden çıkarak kaburgalar arası boşluğa kaydığı, diğer üçünün ise ksifoid kısmında üst üste geçtiği görülmüştür. Yapılan ameliyatta bu klipslerin, sternal genişliğin yanlış ölçülmesine bağlı olarak gereğinden büyük seçildiği belirlenmiştir. Sternumun tekrar kapatılması ise Robicsek tekniği ve iki klipsin birlikte uygulanması ile başarıyla gerçekleştirilmiştir. Klips büyüklüğünün uygun olarak seçilmesi için sternal genişliğin doğru olarak ölçülmesi gerektiği ve bunun içinde kumpas yerine Backhaus pensi kullanımının daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Almdahl *et al.* (2013), geleneksel çelik tel yöntemiyle figür-8 yöntemini karşılaştırmak amacıyla 9957 hastanın ameliyat sonrası verileri üzerinde istatistiksel bir çalışma yapmışlardır. Hastaların 7835'inde figür-8, kalan hastalarda ise geleneksel çelik

yöntemi 0,9 mm (no.7) teller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel yöntemin büyük kısmı altı telle yapılmış, bazı hastalarda ise ilave bir veya iki tel kullanılmıştır. Figür-8 yönteminin büyük kısmı ise beş telle yapılmış, kalan hastaların çoğunda 4 tel kullanılmıştır. Ameliyat sonrası 30 günlük dönemde oluşan ve enfeksiyonel olmayan sternal ayrılmalar dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmış, derin yara enfeksiyonu olan hastalar bu enfeksiyon sternal kaynamayı, kullanılan yöntemden bağımsız olarak doğrudan etkileyeceğinden çalışmaya dahil edilmemiştir. Geleneksel yöntem grubunun 14'ünde (%0,66), diğer grup hastalarının ise 5'inde (%0,06) tellerin kemiği kesmesi kaynaklı sternal ayrılma tespit edilmiştir. Sonuç olarak, figür-8 yönteminin geleneksel yöntemden belirgin şekilde üstün olduğu söylenmiştir.

Elfström and Grunditz (2013), çelik tel, ZipFix bant ve Talon klipslerle yapılan toplam beş farklı sternum kapama tekniğini (6 çelik tel, 4 ZipFix bant, 3 Talon, 4 ZipFix bant + 1 tel, 3 Talon + 1 tel) ANSYS (LS-DYNA) programında yaptıkları sonlu elemanlar analizleri karşılaştırmışlardır. Malzemeler doğrusal elastik olarak modellenmiş, sternuma 800 N değerinde yanıl ayrılma yükü uygulanmış ve yer değıştirme değeri ile gerilmeler karşılaştırılmıştır. Kapama yöntemlerinin hepsinde, malzeme özellikleri çelik (316L), PEEK ve titanyum olarak değıştirilmiş ve kapama malzemesinin farklı bir materyalden üretilmesi durumunda oluşacak etki incelenmiştir. Sonuç olarak, titanyum özellikli ZipFix bant ve çelik tellerle yapılan geleneksel tekniğin en iyi sonuçları verdiği belirtilmiş ve en büyük yer değıştirmelerin sternumun alt bölgesinde oluştuğu ifade edilmiştir.

Kim *et al.* (2013), ilk sternal kapamaları çelik tellerle yapılan ve ameliyat sonrası sternal ayrılma oluştuğu görülen 17 hastanın ikincil kapamalarını titanyum plâklarla yapmışlar ve bu yöntemin etkisini araştırmışlardır. Hastalarda ortalama 5 tane plâk ve 19 tane vida kullanılmıştır. Ameliyat sonrası dönemde 1 hasta sepsis nedeniyle hayatını kaybetmiş, 3 hastada görülen çeşitli komplikasyonlar başarıyla tedavi edilmiş ve 13 hastada sorunsuz iyileşme gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, titanyum plâk kullanımının sternal ayrılma tedavisinde etkili bir yöntem olduğu söylenmiştir.

Melly *et al.* (2013), ZipFix bant yöntemiyle çelik tellerle yapılan figür-8 yöntemini toplam 593 hastanın ameliyat sonrası dönemlerini inceleyerek karşılaştırmışlardır. Hastaların 95'inde ZipFix bant, kalan 498 hastada ise figür-8 yöntemi kullanılmış, ameliyat sonrası enfeksiyon ZipFix bant grubunda 5, figür-8 grubunda ise 31 hastada görülmüştür. Enfeksiyon görülme oranında, iki grup arasında istatistiksel olarak önemli bir fark olmadığı belirlenmiş, her iki grupta da benzer ameliyat sonrası komplikasyonlar tespit edilmiştir. Ayrıca, ZipFix bant yönteminin toplam ameliyat süresini 11 dk. azalttığı belirlenmiş ve sonuç olarak bu yöntemin hızlı, kolay uygulanabilir ve güvenli olduğu ifade edilmiştir.

Delong *et al.* (2014), ilk sternal kapamaları çelik tellerle yapılan ve sonrasında akut mediastinit ve/veya sternal ayrılma oluşan 24 hastanın ikincil kapamalarında Talon kullanmışlardır. Kullanılacak Talon adedine sternumun durumuna göre karar verilmiş ve hastaların 1'inde 5 tane, 2'sinde 4 tane, 14'ünde 3 tane, 5'inde 2 tane ve 2'sinde 1 tane Talon kullanılmıştır. Hastaların 23 tanesinde sternal kaynama sağlanmış, bu hastaların 4 tanesinde oluşan çeşitli komplikasyonlar ilaç tedavisiyle giderilmiştir. Bir hastada ise manubriumun alt kısmında kaynama olmadığı görülmüştür. İncelemede dikkate alınan hasta sayısının azlığı nedeniyle istatistiksel olarak anlamlı analizler yapılamasa da, mediastinit ve sternal ayrılma kaynaklı ikincil kapamalarda Talon kullanımının etkili ve güvenilir bir yöntem olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, Talon kullanımının basitliği ve düşük komplikasyon oranı ile öne çıkmasına rağmen çok yüksek maliyetli olduğu ve yatay kırıklar olması durumunda kullanımın uygun olmadığı belirtilmiştir.

Malhotra *et al.* (2014), sternal kapamaları çelik tel veya polyester sütür ile yapılan 200 hastanın bazı ameliyat sonrası komplikasyonlarını dikkate alarak bu yöntemleri karşılaştırmışlardır. Hastaların yarısında 4 tane no.5 çelik tel, yarısında ise 4 tane no.5 polyester sütür kullanılarak figür-8 yöntemiyle sternum kapatılmıştır. Diyabet, tüberküloz vb. kronik hastalıkları olan hastalar çalışmaya dâhil edilmemiş ve iki grupta benzer karakteristiklere sahip hastalardan oluşturulmuştur. Ameliyat sonrası incelemelerde, yara enfeksiyonu oluşumu ve hastalardaki ağrı seviyeleri incelenmiştir.

Polyester sütür kullanımının,   elik telden daha fazla yara enfeksiyonu ve buna bağlı komplikasyonlar ile daha yüksek ağrı seviyelerine sebep olduğu görülmüştür.

Nazerali *et al.* (2014), rijit sternal kapama yöntemlerinden olan titanyum plâk (SternaLock), Talon, nitinol klips ve Lactosorb (absorbe edilebilen bir plâk-vida sistemi) yöntemlerinin etkinliğini 57 hasta üzerinde yaptıkları incelemelerle araştırmışlardır. Hastaların %87,3'  nde SternaLock, %12,7'sinde Talon, %1,8'inde nitinol ve %1,8'inde Lactosorb yöntemleri kullanılmıştır. Ameliyat sonrasında bütün hastalarda mediyastinit oluşmadığı ve kemik iyileşmesinin sağlandığı görülmüş, bu yöntemlerin yüksek-risk grubu hastalarında mediyastinitin önlenmesinde ve sternal kaynama oluşmaması veya yanlış kaynama tedavilerinde güvenle kullanılabileceği söylenmiştir.

Tunçay *et al.* (2014), sternal ayrılma görülen 6 hastanın ikincil kapamalarında Vitalitec sternal kapama klipsini   elik tellerle birlikte kullanmış ve erken dönem sonuçları, ameliyat sonrası ağrı ve sternum sağlamlığı açısından değerlendirmişlerdir. Hastaların ilk kapamaları 6-7 telle (no.5 veya no.6) yapılmış, ikincil kapamalarda ise 2 veya 3 tane Vitalitec klips tellerle birlikte kullanılmıştır. Klipslerle yapılan kapamalarda kemik iyileşmesinin sağlandığı ve erken ameliyat sonrası ağrının azaldığı ifade edilmiş, bu yöntemin   elik tel yönteminden daha etkin olduğu ve daha iyi klinik sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Bejko *et al.* (2015), 1122 hastanın sternal kapamalarında geleneksel   elik tel veya nitinol klips yöntemlerini kullanarak bu tekniklerin etkinliğini karşılaştırmışlardır. Sternal iyileşme açısından yüksek-risk grubunda bulunan bu hastaların yarısında 2-4 adet nitinol klips, kalan yarısında ise 5-6 adet tel kullanılmıştır. Ameliyat sonrası dönemde sternal yara komplikasyonlarının nitinol klips kullanılan hastalarda diğer gruptan daha az oluştuğu g  r  lm  ştir. Ayrıca, yöntemlerin maliyeti ve genel hastane masrafları dikkate alınarak bir maliyet analizi yapılmış ve klipslerin tellerden pahalı olmasına rağmen diğer maliyetler dikkate alındığında toplam masrafın nitinol klips kullanımında azaldığı belirlenmiştir.

Koshiyama and Yamazaki (2015), absorbe olabilen sternal bir pim kullanımının sternumun üç yöndeki hareketi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneylerde, yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretan bloklar ($40\text{mm} \times 50\text{mm} \times 12\text{mm}$) kullanılmış, iki eş parçaya ayrılan bu bloklar iki çelik telle enine şekilde veya iki çelik tele ilave olarak bir sternal pim kullanılarak birleştirilmiştir. Hidroksiapatit/polilaktik asid kullanılarak üretilen ve $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 23\text{mm}$ boyutlarındaki sternal pim, modelin her iki parçasının iç kısımlarında açılan 3mm çapındaki deliklere yerleştirilmiştir. Modeller yanal ayrılma, boyuna kesme ve enine kesme etkisi oluşacak şekilde 1 mm/dk yükleme hızıyla yüklenmiş ve 1mm yer değiştirme oluşturan yükler belirlenmiştir. Her yöntem için deneyler üç yönde de 6 defa tekrarlanmış ve sonuçlar istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Boyuna kesmede 1mm yer değiştirme için yük değerleri sadece tel kullanımında $51,6 \pm 9,5 \text{ N}$, pim ilavesinde ise $138,8 \pm 8,3 \text{ N}$, enine kesmede ise sırasıyla $83,1 \pm 26,6 \text{ N}$ ve $148 \pm 12 \text{ N}$ olarak bulunmuştur. Yanal ayrılmada ise yük değerleri her iki yöntem için birbirine yakın ($266,9 \pm 50,6 \text{ N}$ ve $273,2 \pm 49,3 \text{ N}$) çıkmıştır. Sonuç olarak, ilave pim kullanımının yanal ayrılma etkisinde bir katkısının olmadığı, diğer yönlerdeki yük etkilerinde ise stabiliteyi arttırdığı belirtilmiştir.

Sarikaya *et al.* (2015), ilk sternal kapamaları geleneksel çelik tel yöntemiyle yapılan ve sternal ayrılma oluşan 68 hastanın yeniden kapamalarında nitinol klips ve Robicsek tekniğini kullanarak bu yöntemleri karşılaştırmışlardır. Hastaların 26'sından nitinol klipsler en az 4 tane olacak şekilde uygulanmış, 42 hastada ise Robicsek yöntemi kullanılmıştır. Nitinol klips kullanımında ameliyat süresinin belirgin şekilde kısaldığı belirlenmiş, ameliyat sonrası erken dönem bulgularının ise her iki yöntem içinde benzer olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, nitinol klipslerin sternumun sadece birincil kapamasında değil ameliyat sonrası oluşan sternal ayrılmaların tedavisinde de güvenle kullanabileceği söylenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak, deneylerde kullanılan sternum modelleri, karşılaştırılan kapama teknikleri ve yapılan deneyler açıklanacak, ikinci kısımda ise sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılan kapama teknikleri ve yapılan analizler detaylı olarak anlatılacaktır.

3.1. Deneylerde Kullanılan Sternum Modelleri

Sternum kapama yöntemlerinin etkinliğinin araştırıldığı biyomekanik çalışmalarda, insan ve hayvan kadavralarından elde edilen sternumların yanında poliüretandan yapılmış yapay sternum modelleri de kullanılmaktadır (Dieselman 2011).

İnsan kadavralarından elde edilen sternumlar, yapısı ve boyutları dikkate alındığında deneyler için en uygun modellerdir (Dieselman 2011). Bununla birlikte, gerçek sternumlar arasında kemik yoğunluğu, sternal büyüklük ve sternal kalınlık açısından oldukça fazla çeşitlilik olabilmektedir (Cohen and Griffin 2002). Ayrıca, kadavralardan elde edilen bu sternumlar oldukça pahalıdır (Dieselman 2011).

Hayvanlardan elde edilen sternumlar ucuz olmalarının yanında, temin edilmeleri insan kadavralarına kıyasla daha kolaydır (Dieselman 2011). İnek, köpek, domuz ve koyun sternumları laboratuvar çalışmalarında kullanılmakla birlikte, bu sternumlar büyüklük ve şekil açısından insan sternumundan oldukça farklıdır (Cohen and Griffin 2002). Ayrıca, sternal kapama için geliştirilen standart ürünlerde, hayvan kemiklerinde kullanılabilecek şekilde dizayn edilmemiştir (Dieselman 2011).

Poliüretandan yapılan sternum modelleri de deneylerde sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 3.1). Sternumdan başka kemikler için de üretilen bu yapay modellerin biyomekanik deneylerde kullanımının uygunluğunu belirlemek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Trumble *et al.* (2002) tarafından yapılan çalışmada, kadavralardan alınan

sternumlar ve yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretan modeller geleneksel çelik tel ve figür-8 yöntemleri uygulanarak, modellerde oluşan yer değiştirmeler üzerinden karşılaştırılmış ve yapay modellerin kullanımının uygun olduğu belirlenmiştir. Hale *et al.* (1999), farklı yoğunluktaki poliüretan parçalarla, insan sternumuna benzer yapıya sahip domuz kaburgalarından küçük deney parçaları üretmiş ve çelik bir teli bu modellerin içinden geçirerek çekme testi uygulamıştır. Elde edilen yük yer değiştirme eğrilerinden hareketle, uygun yoğunlukta yapay modellerin kemikle benzer mekanik özellikler gösterdiğini söylemişlerdir. Mehmanparast *et al.* (2012) ise, farklı yoğunluktaki poliüretan modelleri omur kemiği ile karşılaştırmışlardır. Yapılan testlerde, yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretan modellerin elstisite modülü ve akma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin insan kemiğine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

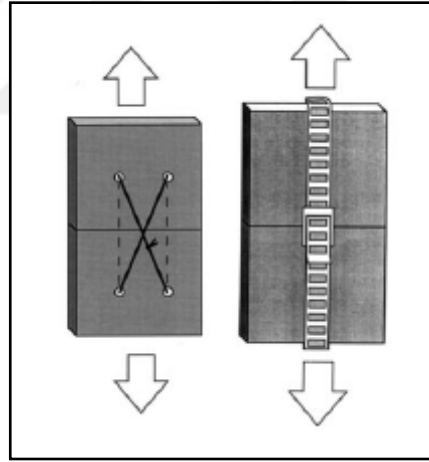


Şekil 3.1. Poliüretandan üretilen yapay sternum modeli

Yapay sternum modellerinin sahip olduğu üniform yoğunluk ve geometri, deneylerde kullanılacak parçalarının tasarımında ve deney sonuçları arasında istatistiksel anlamlılık kurulmasında faydalı olmaktadır (Dieselman 2011). Bununla birlikte poliüretan modellerin homojenliği, sternumun kabuksu-süngerimsi kemik yapısını ve ksifoid kısmının kıkırdaksı yapısını temsil etmemekte ve bu modeller büyük mekanik yüklere karşı koyamamaktadır (Pai *et al.* 2005).

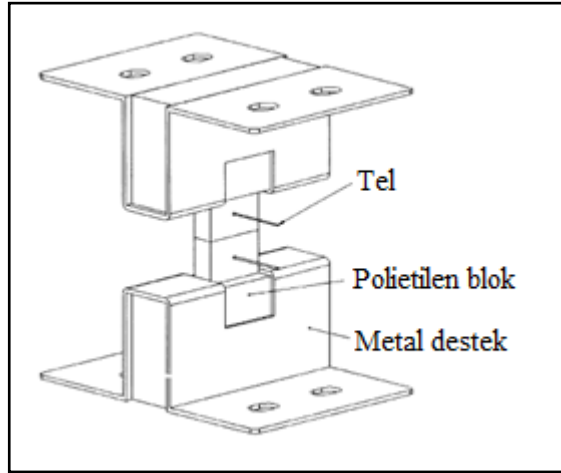
Yoğunluğu 320 kg/m^3 ve 160 kg/m^3 olan iki farklı sternum modeli bulunmaktadır. Bunlardan, yoğunluğu 320 kg/m^3 olan model, sternum kapama tekniklerinin incelendiği çok sayıda çalışmada kullanılmıştır (Cohen and Griffin 2002; Trumble *et al.* 2002; Dasika *et al.* 2003; Pai *et al.* 2005; Zeitani *et al.* 2006; Pai *et al.* 2007; Wangsgard *et al.* 2008; Zeitani *et al.* 2008). Düşük yoğunluktaki ve zayıf kemik yapısını temsil eden modelin kullanımının ise bir çalışmayla (Dieselman 2011) sınırlı kaldığı görülmüştür.

Bu malzemelerden farklı olarak, Casha *et al.* (1999a) farklı çelik tel bağlama tekniklerini ve çelik bant yöntemini biyomekanik açıdan karşılaştırdıkları çalışmalarında Şekil 3.2’de görülen, çelikten yapılmış iki bloktan oluşan bir model kullanmışlardır. Yanal çekme kuvveti uygulanan bu bloklara çelik teller, iki bloğa açılan deliklerden geçirilmişken, çelik bant iki bloğu da saracak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Deneysel bir çalışmada kullanılan çelik bloklar

Gelennie *et al.* (2002) ise, çelik tellerle yapılan kapamada tellerin bükülme sayısının, tellerin dayanımı üzerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında polietilenden yapılmış iki bloktan oluşan bir model kullanmışlardır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Polietilen bloklar kullanılarak hazırlanan deney düzeneği

Bu çalışmada yapılan deneylerde ise Sawbones firması tarafından üretilen ve yoğunluğu 320 kg/m^3 olan poliüretandan yapılmış sternum modelleri kullanılmıştır. İnsan veya hayvan kemikleri, yukarıda açıklandığı gibi, teminlerinin zorluğu ve kemiklerdeki çeşitliliğin deney sonuçlarını etkileme ihtimali nedeniyle tercih edilmemiştir. Toplam 120 adet sternum modeli üzerinde Atatürk Üniversitesi Tıp Fakültesinde, Kalp ve Damar Cerrahisi Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Abdurrahim Çolak tarafından median sternotomi prosedürü uygulanmış ve modeller deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Medyan sternotomi uygulanmış sternum modelleri

3.2. Deneylerde Karşılaştırılan Sternum Kapama Teknikleri

Bu çalışmada altı değişik malzemenin kullanıldığı toplam on farklı sternum kapama tekniği karşılaştırılmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Deneylerde karşılaştırılan sternum kapama teknikleri

<i>Malzeme</i>	<i>Teknik</i>
Çelik tel (no.5)	▪ Geleneksel tel yöntemi (7 çelik tel) ▪ Figür-8 yöntemi (3 figür-8 tel + 2 tel)
Çelik bant + Çelik tel	▪ 2 çelik bant + 5 tel ▪ 3 çelik bant + 4 tel
Çelik kablo + Çelik tel	▪ 3 figür-8 kablo + 2 tel
PEEK bant (cırcır kilitli bant) + Çelik tel	▪ 2 PEEK bant + 5 tel ▪ 3 PEEK bant + 4 tel
Titanyum klips + Çelik tel	▪ 3 titanyum klips + 4 tel
Titanyum plâk + Çelik tel	▪ 1 plâk (X-şekilli) + 5 tel ▪ 2 plâk (X-şekilli) + 3 tel

Bu malzemelerin seçilmesinde, literatürdeki çalışmalar, malzemelerin bulunabilirliği ve maliyetleri dikkate alınmıştır. Genel olarak, yurt dışından ithal edilen bu kapama malzemelerinin ve poliüretan sternum modellerin yüksek maliyetleri nedeniyle bütün yöntemlerin karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Yeni bir kapama malzemesi olan titanyum klipsler haricindeki malzemeler sternumun kapatılmasında yoğun olarak kullanıldığından öncelikle bu çalışmaya dâhil edilmişlerdir. Deneylerde kullanılmayan malzemeler ve tercih edilmeme nedenleri aşağıda açıklanmıştır.

- Piyasada titanyumdan üretilen Talon, Waston ve Vitalitec adında birbirine benzer üç farklı sternum kapama klipsi bulunmaktadır. Maliyetleri çok yüksek olan bu klipslerden sadece birinin deneylerde kullanılmasına karar verilmiştir.
- Nitinol klipsler, malzeme özellikleri nedeniyle vücut sıcaklığı olan 36-37 °C derece sıcaklıkta orijinal şekillerini tam olarak geri kazanmakta ve gerekli kapamayı sağlamaktadır. Laboratuvar şartlarında bu durumun tam olarak sağlanamayacağı ve yanlış sonuçlar oluşabileceği düşüncesiyle bu yöntem deneylere dâhil edilememiştir.
- Çiftli çelik teller, mersilene şeritler ve pds sütürler literatürde yer almakla birlikte, yaygın olarak kullanılmadıkları ve teminlerinin zor olması sebebiyle çalışmaya dâhil edilmemişlerdir.
- Kemik çimentosunun, poliüretan modellerle kullanımı uygun olmadığı için deneylerde kullanımı tercih edilmemiştir.
- Tellerle yapılan farklı kapama yöntemlerinden ise en çok kullanılan figür-8 ve geleneksel kapama yöntemleri çalışmaya dâhil edilmiş, diğer yöntemler incelenmemiştir.

Mevcut malzemelerle kapamaların nasıl yapılacağı konusunda ise literatürdeki ameliyat uygulamaları ile Atatürk Üniversitesi Tıp Fakültesi'nde cerrahlar tarafından tercih edilen yöntemler de dikkate alınarak, malzemelerin mekanik etkilerini ortaya koyacak tekniklerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu incelemeler sonucunda kapama teknikleri için yapılan tercihler aşağıda açıklanmıştır.

- Çelik tellerle yapılan sternal kapamalar, sürekli yeni alternatifler geliştirilmesine rağmen en yaygın kapama yöntemi olma özelliğini korumaktadır. Bu durum, tellerin en düşük maliyetli kapama malzemesi olmasından ve uygulama kolaylığından

kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, tellerle yapılan en yaygın kapama yöntemleri olan geleneksel tel ve figür-8 yöntemlerinin incelenmesine karar verilmiştir.

- Ameliyatlarda, ksifoid ve manubriumda kemiğin durumuna göre en az birer adet tel kullanıldığı dikkate alınarak, kapama yöntemlerinin tamamında manubrium ve ksifoid bölgelerinde birer çelik tel transsternal şekilde yerleştirilmiştir.
- Çelik bant, PEEK bant ve titanyum klipsler tel kullanımına gerek kalmadan, gövdede beş adet olarak kullanılabilirler. Bununla birlikte, bu durum maliyeti oldukça arttıracığı için klinik uygulamalarda çoğunlukla tercih edilmemektedir. Bu çalışmada da bu malzemelerin tellerle birlikte kullanıldığı kapamaların etkinliğinin incelenmesine karar verilmiştir. İki ve üç adet çelik bant veya PEEK bandın tellerle birlikte kullanımı ile üç adet titanyum klipsin tellerle birlikte kullanımının etkisi araştırılmıştır.
- Çelik kablolarla yapılan kapamalar, genel kullanımları doğrultusunda gövdede 3 adet figür-8 şeklinde bağlanarak gerçekleştirilmiştir.
- Farklı şekillerde üretilen titanyum plâklardan kullanarak çok sayıda, farklı biçimlerde sternal kapama yapılabilir. Ayrıca, küçük boyutlardaki plâklar sayesinde manubriumda ve ksifoid bölgesine yakın yerlerde de plâklar uygulanabilmekte böylece tel kullanımına gerek kalmamaktadır. Böyle bir kullanımda, en pahalı kapama malzemelerinden biri olan titanyum plâkların uygulamaları çok daha maliyetli olmaktadır. Sadece üç veya daha fazla sayıda plâğın kullanıldığı ve bunların farklı konfigürasyonlarının etkisini inceleyen bir çalışma Pai *et al.* (2007) tarafından yapılmış ve bu çalışmada üç tane X-şekilli plâklarla yapılan kapamanın en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir. Bu çalışmada ise çelik tellerle birlikte bir veya iki adet X-şekilli plâğın sternum gövdesinde kullanımının sternal kapamaya etkisi araştırılmıştır.

Malzemelerin yapay sternum modelleri üzerine uygulamaları ise gerekli montaj enstrümanlarının temini ile birlikte Yrd. Doç. Dr. Abdurrahim Çolak tarafından gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırılan tekniklerle ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

3.2.1. Geleneksel tel yöntemi

Geleneksel tel yönteminin uygulamasında toplam 7 adet çelik tel kullanılmıştır. Beş tane tel gövdede peristernal şekilde, birer tel ise manubrium ve ksifoid bölgesinde transsternal şekilde bağlanmıştır (Şekil 3.5). Manubrium ve ksifoid bölgesindeki teller, sternumda açılan 2 cm aralıklı ve 1,5 mm çapındaki deliklerin içerisinden geçirilerek yerleştirilmiştir. Manubriumda ki delikler sağ taraf ilk kaburga çıkıntısı hizasında, ksifoid de ki delikler ise sternumun alt uç kısmından 2,5 cm yukarıda olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu bölgelerdeki teller, diğer yöntemlerde de aynı şekilde uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Geleneksel tel yöntemiyle sternumun kapatılması

3.2.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi

Figür-8 yönteminde, çelik teller gövdede 3 tane peristernal figür-8 oluşturacak şekilde bağlanmış ve manubrium ile ksifoid bölgesinde birer tel transsternal şekilde uygulanmıştır (Şekil 3.6 - 3.7).



Şekil 3.6. Çelik tellerle figür-8 tekniğinin uygulanışı



Şekil 3.7. Figür-8 tekniğiyle kapatılmış sternumlar

3.2.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi

Çelik kablolarla figür-8 yöntemi, tellerle yapılan figür-8 yöntemine benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Kabloların bağlanmasında ürün için özel olarak üretilen montaj enstrümanı kullanılmıştır (Şekil 3.8 – 3.9).



Şekil 3.8. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin uygulanışı



Şekil 3.9. Çelik kablolarla yapılan figür-8 yöntemiyle kapatılmış sternumlar

3.2.4. Çelik bantlarla yapılan kapama yöntemleri

Çelik bantlarla yapılan kapamalar iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk yöntemde, birinci ve beşinci kaburga boşluklarına 2 adet bant, ikinci, üçüncü ve dördüncü boşluklara ise çelik teller peristernal şekilde yerleştirilmiştir. İkinci yöntemde ise 3 adet bant birinci, üçüncü ve beşinci boşluklarda, iki adet tel ise ikinci ve dördüncü boşluklarda kullanılmıştır. Bantların uygulanmasında, özel montaj enstrümanı kullanılmıştır (Şekil 3.10 – 3.11 – 3.12).



Şekil 3.10. Çelik bant yönteminin uygulanışı



Şekil 3.11. Üç çelik bant ve dört tane tel kullanılarak sternumun kapatılması



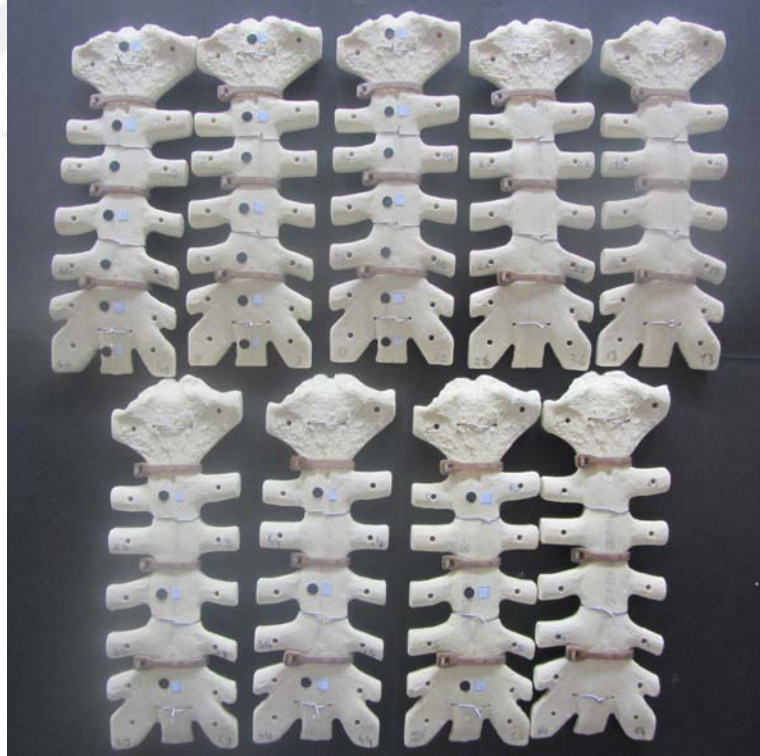
Şekil 3.12. İki çelik bant ve beş tane tel kullanılarak sternumun kapatılması

3.2.5. PEEK bantlarla yapılan kapama yöntemleri

Bu yöntem, çelik bantlarla iki ayrı şekilde yapılan kapamaya benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk yöntemde, birinci ve beşinci kaburga boşluklarına 2 adet PEEK bant (cırcır kilitli bant), ikinci, üçüncü ve dördüncü boşluklara ise çelik teller peristernal şekilde yerleştirilmiştir. İkinci yöntemde ise 3 adet PEEK bant birinci, üçüncü ve beşinci boşluklarda, iki adet tel ise ikinci ve dördüncü boşluklarda kullanılmıştır. PEEK bantların uygulanmasında özel montaj tabancası kullanılmıştır (Şekil 3.13 – 3.14 – 3.15).



Şekil 3.13. PEEK bant yönteminin uygulanışı



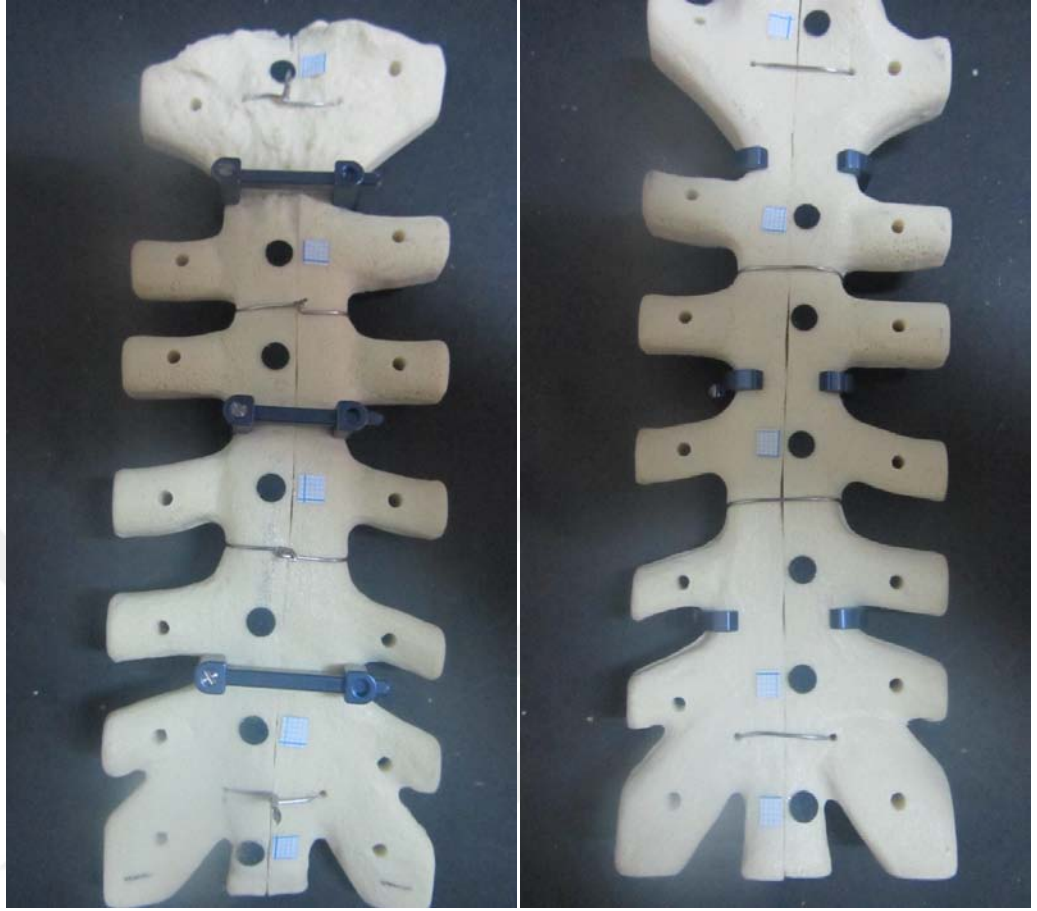
Şekil 3.14. Üç tane PEEK bant ve dört tane tel kullanılarak sternumun kapatılması



Şekil 3.15. İki tane PEEK bant ve beş tane tel kullanılarak sternumun kapatılması

3.2.6. Titanyum klips yöntemi

Titanyum klips yöntemi üç tane çelik bant veya PEEK bant kullanılarak yapılan kapamalara benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Üç adet titanyum klips birinci, üçüncü ve beşinci kaburga boşluklarında kullanılmış, iki adet tel ise ikinci ve dördüncü boşluklarda peristernal olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.16). Farklı boyutlarda üretilen klipslerden, sternumun kalınlığı ölçülerek modellere uygun olan klipsler seçilmiştir.

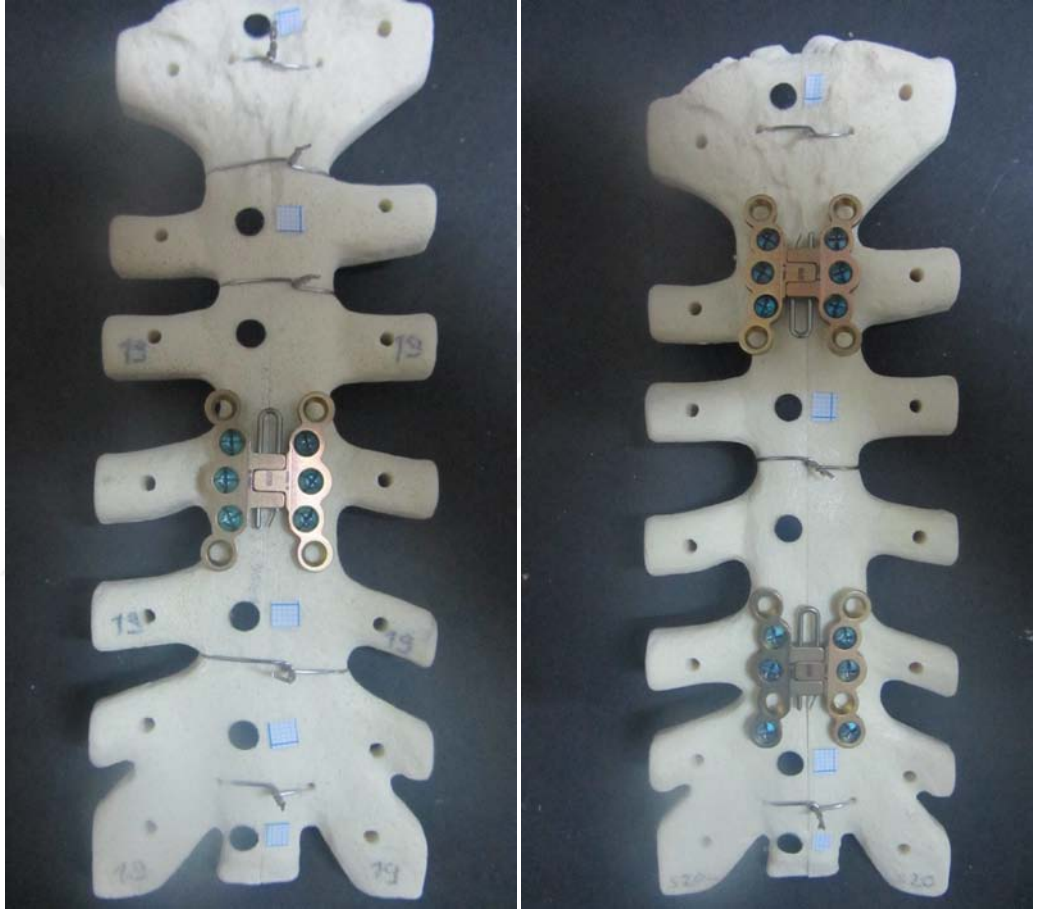


Şekil 3.16. Üç tane titanyum klips ve dört tane tel kullanılarak sternumun kapatılması

3.2.7. Titanyum plâklarla yapılan kapama yöntemleri

Sternumun kapatılmasında kullanılan farklı şekil ve boyutlarda birçok titanyum plâk bulunmaktadır. Yapay sternum modellerinin boyutları, plâk maliyetleri ve plâkların kullanıldığı literatür çalışmaları dikkate alınarak, bu plâklardan X-şekilli olanlarının deneylerde kullanılmasına karar verilmiştir. Titanyum plâklarla iki farklı şekilde kapama yapılmıştır. İlk olarak, bir adet plâk üçüncü ve dördüncü kaburga boşlukları arasına yerleştirilmiş ve 3 mm çapında altı adet titanyum vida kullanılarak sabitlenmiştir. Birinci, ikinci ve üçüncü kaburga boşluklarında ise çelik teller peristernal şekilde bağlanmıştır (Şekil 3.17a). İkinci kapama şeklinde ise, bir plâk dördüncü ve beşinci kaburga boşlukları arasına, diğer plâk ise birinci ve ikinci kaburga boşlukları arasına yerleştirilmiş ve altışar vida ile plâklar sabitlenmiştir. Üçüncü kaburga

boşluğunda ise çelik bir tel kullanılmıştır (3.17b). Vidaların iyi şekilde yerleşebilmesi için plâklar, özel bir enstrüman kullanılarak sternumun şekline göre hafifçe eğilmiştir. Kullanılan vidaların uzunluğu, uygulanacakları bölgedeki sternum kalınlığı ölçülerek belirlenmiştir.



(a)

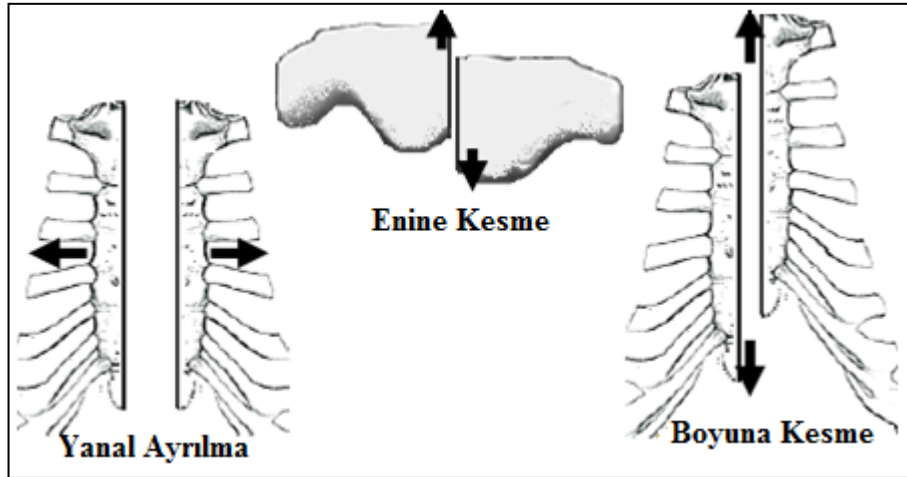
(b)

Şekil 3.17. (a) Bir tane plâk ve beş tane çelik tel, (b) iki tane plâk ve üç tane çelik tel kullanılarak sternumun kapatılması

3.3. Yüklerin Uygulanması

Sternum kapama tekniklerinin karşılaştırıldığı deneyler, dinamik testler ve statik testler olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Cohen and Griffin 2002). Dinamik testlerde sternum, solunum hareketi süresince sternuma etkiyen yükleri yansıtacak şekilde yanal yönde tekrarlı yüklere maruz bırakılmaktadır. Statik testlerde ise, sternuma değerı giderek artacak şekilde bir yük uygulanmaktadır. Bu farklı test metotlarıyla, yükün uygulandığı yöne bağlı olarak, sternum kapama tekniklerinin farklı göçme mekanizmalarının belirlenmesi mümkündür (Dieselman 2011).

Sternal sabitleme üzerine yapılan çalışmaların çoğunda, şekil 3.18’de görülebilen üç farklı yönde hareket oluşturacak yk uygulaması üzerinde yoğunlaşılmıştır; yanal ayrılma, boyuna kesme (rostral-caudal) ve enine kesme (anterior-posterior) (McGregor *et al.* 1999; Pai 2005).



şekil 3.18. Biyomekanik çalışmalarda dikkate alınan yükleme şekillleri (Pai 2005)

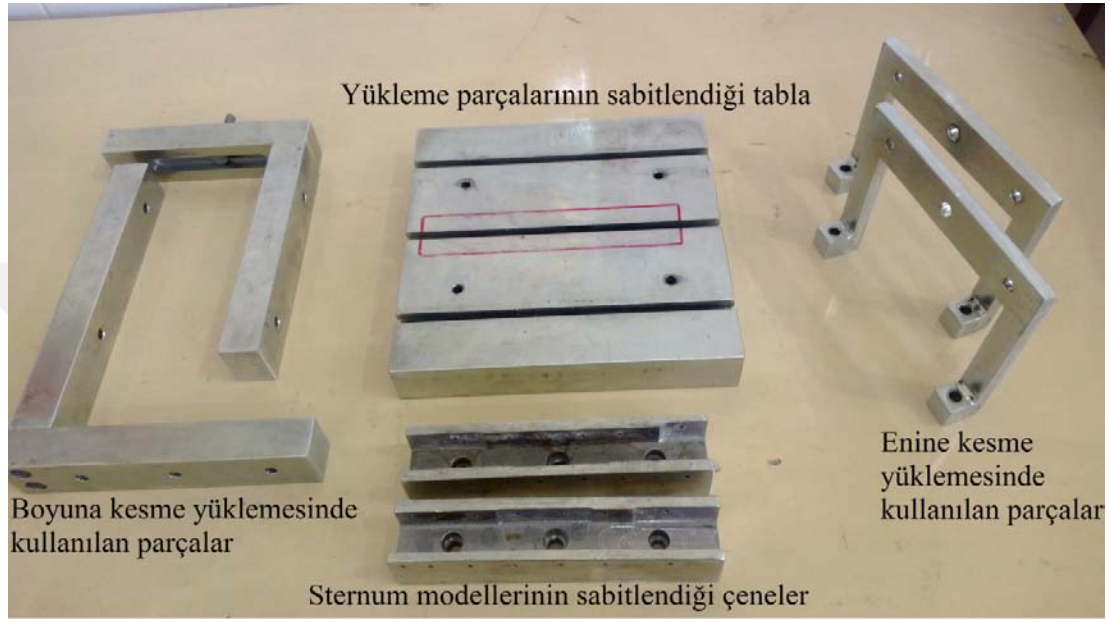
Yanal ayrılma yüklemesi, solunum ve öksürme hareketi sırasında göğüs boşluğunun genişleyerek sternum parçalarını birbirinden ayıracak şekilde etkiyen kuvvetleri yansıtılmaktadır ve tekrarlı yükleme veya giderek artan yüklerle statik yükleme şeklinde yapılmaktadır (Dasika *et al.* 2003; Wangsgard *et al.* 2008).

Boyuna ve enine kesme şeklindeki hareketler ise, hastanın bir tarafının üzerine uzanması, tek koluyla vücudunu desteklemesi veya ani hareket etmesi sırasında oluşan kuvvetlerin etkisini yansıtmaktadır. Örnek olarak, hastanın ayaktayken aniden kayıp bir yere tutunması sonucunda vücut ağırlığının bir kısmı kollar tarafından taşınacak ve yük, bedenin üst kısmındaki eklem ve kaslara iletilecek, dolayısıyla sternumu da etkileyecektir. Bu kuvvetlerin kısa süreli ve yüksek enerjili olmaları dolayısıyla, tekrarlı yorulma deneyi yerine, giderek artan yüklerle statik testler yapılır. Bu yönlerde oluşan göçme mekanizmaları, ellerini kullanmadan oturamayan obez hastalarda oldukça yaygındır (Wangsgard *et al.* 2008; Dieselman 2011).

Literatürdeki sternum kapama yöntemlerinin karşılaştırıldığı mevcut çalışmalar incelendiğinde deneylerde en çok statik yanal ayrılma etkisinin uygulandığı görülmektedir (Casha *et al.* 1999a; McGregor *et al.* 1999; Cohen and Griffin 2002; Glennie *et al.* 2002; Trumble *et al.* 2002; Dasika *et al.* 2003; Pai *et al.* 2005; Zeitani *et al.* 2006; Pai *et al.* 2007; Zeitani *et al.* 2008). Az sayıdaki çalışmada ise boyuna ve enine kesme etkisi statik deneylerle uygulanmıştır (McGregor *et al.* 1999; Dieselman 2011). Yanal ayrılma etkisi dinamik deneylerde de en çok dikkate alınan yükleme şekli olmuş (Casha *et al.* 2001; Losanoff *et al.* 2004; Losanoff *et al.* 2007; Wangsgard *et al.* 2008; Dieselman 2011), Wangsgard *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmada ise boyuna kesme yüklemesinin dinamik etkisi de incelenmiştir.

Bu çalışmada ki deneyler ise, mevcut çalışmalar ve hastalar üzerinde yapılan diğer klinik incelemeler dikkate alınarak, statik olarak üç farklı yükleme etkisinin incelenmesi şeklinde yapılmıştır. Sternumda, enine ve boyuna kesme etkisi oluşturan yüklerin fizyolojik olarak ani ve kısa süreli olarak etkidiği dikkate alınmış, yanal ayrılma yüklemesinde ise solunum hareketini yansıtacak düşük ve tekrarlı bir yükleme yerine, şiddetli bir öksürme ya da hastanın yere düşmesi gibi bir etkiyi yansıtacak şekilde statik bir yüklemenin yapılmasına karar verilmiştir.

Deneyleerde istenilen yüklemelerin yapılabilmesi için, deneylerin yapılacağı yükleme cihazına uygun olacak şekilde farklı yükleme parçaları tasarlanmış ve yaptırılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Yüklemlerin uygulanmasından kullanılan özel parçalar

Sternum modellerinin çenelere bağlanması konusunda ise literatürde iki farklı yöntem kullanıldığı görülmüştür. Bunlardan ilki, çalışmaların çoğunda kullanılan vidalarla sabitleme yöntemidir (Losanoff *et al.* 2004; Pai *et al.* 2007; Dieselman 2011). Bazı çalışmalarda ise sternumun çeşitli yapıştırıcılarla çeneye tutturulduğu görülmüştür. Wangsgard *et al.* (2008) yapıştırıcı olarak poliüretan reçinenin, Cohen and Griffin (2002) ise polietil-metakrilet reçinenin içine sternumu gömmek suretiyle deneyleri gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada yapılacak deneyler için de yapıştırıcı kullanımının etkisini görmek amacıyla üç farklı firmanın ürettiği epoksi bazlı yapıştırıcılar ile denemeler yapılmıştır. Bu yapıştırıcılarla, modellerin sadece kaburga çıkıntıları üzerinden yapıştırılması ile istenilen dayanım sağlanmamış, modeller kesme etkisinde, yapıştırıcılardan kolayca sıyrılıp çıkmışlardır. Modellerin kaburga çıkıntıları boyunca yapıştırıcıya gömülmesi

durumunda ise istenilen dayanım elde edilmiştir. Bununla birlikte, yapıştırıcı kullanılması durumunda, yapıştırıcının kürünü tamamlaması için oda sıcaklığında 24 saat, ortam sıcaklığı artırıldığında ise en az 6 saat beklemesi gerekmektedir. Bu durum deneylerin yapılış hızını oldukça yavaşlatacaktır. Ayrıca, yapıştırıcının çenelerin içine düzgün ve üniform bir şekilde uygulanması ve deneylerden sonra sternumun çıkarılıp çenelerin temizlenmesi oldukça zor olmaktadır. Bu durumlar dikkate alındığında sternumların çenelere sabitlenmesinde vida kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla, sternum modellerinde ki karşılıklı yedişer kaburga çıkıntısının uç kısımlardan 1 cm mesafede 3 mm çapında delikler açılmıştır. Modellerin uygun yerlerden ve aynı hizadan delinebilmesi için 3 boyutlu yazıcı kullanılarak kemik modelinin kalıbı çıkarılmış ve bütün modeller bu kalıp yardımıyla delinmiştir (Şekil 3.20). Yük uygulama çeneleri de uygun noktalardan delinerek, modeller toplam 14 vida yardımıyla çenelere sabitlenmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.20. Sternum modellerinin delinmesinde kullanılan kalıplar



Şekil 3.21. Sternum modellerinin çenelere vidalarla sabitlenmesi

3.3.1. Yükleme hızı

Deneylerde, yüklerin uygulanmasında dikkate alınması gereken önemli bir parametre olan yükleme hızının belirlenmesinde mevcut literatür çalışmalarından faydalanılmıştır. Farklı özelliklerde ve boyutlardaki malzemelerin bir arada kullanıldığı sternum kapama yöntemlerinin incelendiği çalışmalar için yükleme şartlarına dair bir standart olmadığı, ayrıca mevcut çalışmalarda da çok farklı yükleme hızlarının kullanıldığı görülmüştür. Gerçek hayatta, hastanın nefes alıp vermesi, öksürmesi, bir tarafı üzerine yaslanması veya düşmesi gibi durumlarda sternuma etkiyen yükler çok farklı olmaktadır. Hastanın şiddetli bir şekilde öksürmesi veya düşmesi durumunda sternuma ani ve çok şiddetli yükler etkiyecektir ve bu durum normal bir öksürme ya da yavaş bir şekilde uzanmanın etkisinden daha tehlikeli olacaktır. Bu nedenle yüksek bir yükleme hızının tercih edilmesinin uygun olduğu düşünülmüş fakat mevcut çalışmalardaki değerlerden uzaklaşmak doğru bulunmamıştır.

Casha *et al.* (1999a), tarafından yapılan ve çelik prizmaların kullanıldığı yanal açılma deneyleri ile Zeitani *et al.* (2006) ve Zeitani *et al.* (2008) tarafından yapılan ve

poliüretan modellerin kullanıldığı yanal ayrılma deneylerinde yükleme hızı 2 mm/dk olarak uygulanmıştır. Pai *et al.* (2005) ve Pai *et al.* (2007) tarafından poliüretan modeller üzerinde yapılan yanal ayrılma yüklemesinde ise 12,6 mm/dk yükleme hızı tercih edilmiştir. Poliüretan modeller üzerinde yanal ayrılma ile boyuna ve enine kesme deneyleri yapan Cohen and Griffin (2002) ise yükleme hızını 10 mm/dk olarak uygulanmıştır.

Mevcut çalışmalardaki 2 mm/dk değeri çok düşük olduğu fikriyle kabul edilmemiş, 10-12,6 mm/dk değerlerinden ise, Cohen and Griffin (2002) tarafından yapılan çalışmada farklı yükleme durumları da dikkate alındığı için literatürle karşılaştırılabilir olması açısından 10 mm/dk değerinin yükleme hızı olarak uygulanmasına karar verilmiştir.

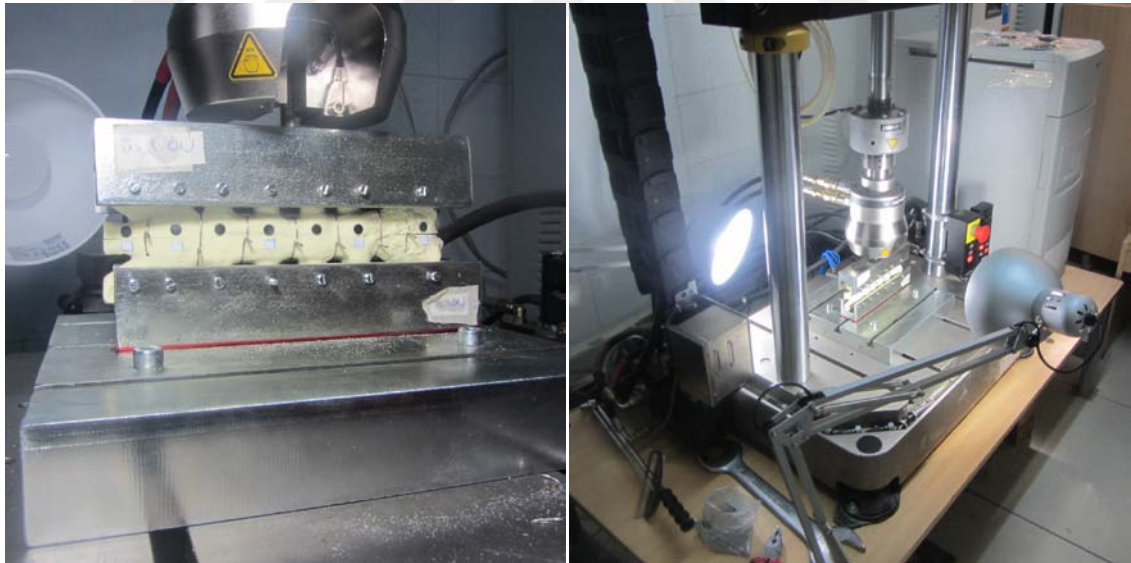
3.4. Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Deneylerin tamamı Instron 8872 deney aleti kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak yanal ayrılma deneyi sonra sırasıyla, boyuna kesme ve enine kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçek deneyler yapılmadan önce, çelik tellerle (no.2) geleneksel şekilde kapatılmış toplam 9 adet deneme numunesi hazırlanmış ve her yükleme durumu için öncelikle üçer tane hazırlık deneyi gerçekleştirilmiştir. Üç farklı yükleme durumunda bütün kapama yöntemleri için deneyler üçer defa tekrarlanmış ve toplamda 90 adet deney gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 10 mm/dk olarak uygulanmış, yanal ayrılma yüklemesinde çift kamerayla, diğer yüklemelerde ise tek kamerayla, saniyede iki resim olacak şekilde deneyler kaydedilmiştir. Görüntülerin alınmasında SONY XCD-SX910 CCD siyah-beyaz dijital kamera ve bu kameraya uygun lensler kullanılmıştır.

3.4.1. Yanal ayrılma deneyi

Yanal ayrılma deneyinde öncelikle, özel olarak yaptırılan çelik tabla deney aletine vidalanmış ve kemik modelini tutan parçalardan, alt çenenin yeri belirlenerek bu tablaya

sabitlenmiştir. Deneyler süresince bu iki parça sabit kalmış ve kemik modelleri öncelikle alt çeneye kaburga çıkıntılarında ki yedi noktadan vidalanarak sabitlenmiştir. Sonra, üst çene kemik modeli üzerine yerleştirilmiş ve gerekli vidalama işlemi yapılmıştır (Şekil 3.22). Üst çenenin ortasında yer alan ve yükleme hücresinin tutacağı pin özel bir yapıştırıcı ile çeneye iyice sabitlenerek hareketi engellenmiştir. Bu pin yükleme hücresine tutturulduktan sonra sitemde herhangi bir problem olup olmadığı kontrol edilmiş ve son olarak görüntü analizi ile yer değiştirme ölçümlerinin yapılabilmesi için ön ve arka kameralar ile lambaların yerleri ayarlanmış ve deneylere başlanmıştır. Deneylere numunelerde kırılma meydana gelip yük boşalincaya kadar devam edilmiştir. Her bir deneyden sonra cihazdan yük-yer değiştirme verileri ile görüntüler kaydedilmiş, numunelerin son halleri fotoğraflanmış ve yeni deney numunesinin montajına başlanmıştır. On farklı kapama yönteminin hepsi için üçer tekrar gerçekleştirilerek bu yükleme durumu için toplam 30 deney yapılmıştır.

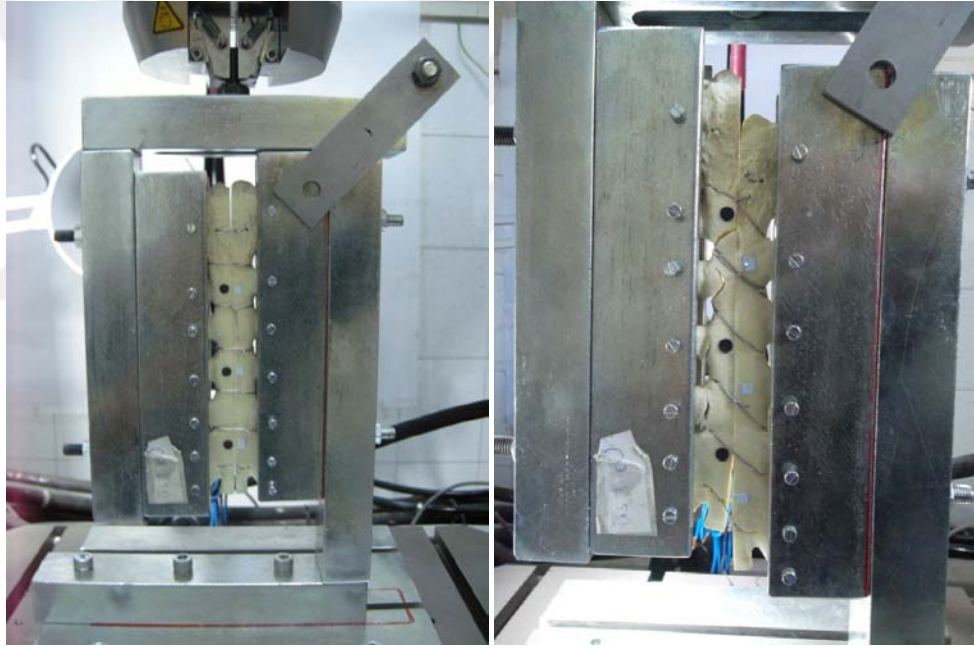


Şekil 3.22. Yanal ayrılma deneyi

3.4.2. Boyuna kesme deneyi

Boyuna kesme deneylerinde ilk olarak, yüklemenin kemik modelinin orta hattı üzerinde yapılabilmesi için bu yüklemeye özel olarak yaptırılan L şeklinde parçaların

bağlanacağı yerler belirlenmiş ve parçaların biri tablaya, yükleme hücresinin tutacağı vida ise diğer parçaya sabitlenmiştir. Kemiği tutacak çeneler de bu parçalara vidalanmıştır. Kemik modeli ilk olarak yükün uygulanacağı parçaya daha sonrada sabit parçaya yanılma yüklemesinde olduğu gibi vidalarla sabitlenmiştir. Yük uygulanırken sistemde istenmeyen dönme ve hareketlerin oluşmaması ve hareketin düşey ekseninde kalması için çelik bir parça ile sistem sağ üst köşeden sıkıştırılmıştır (Şekil 3.23). Görüntü analizi ile yer değiştirme ölçümü için sadece ön taraftan görüntü alınmıştır. Kapama yöntemlerinin hepsi için üçer tekrar gerçekleştirilerek bu yükleme durumu için toplam 30 deney yapılmıştır.

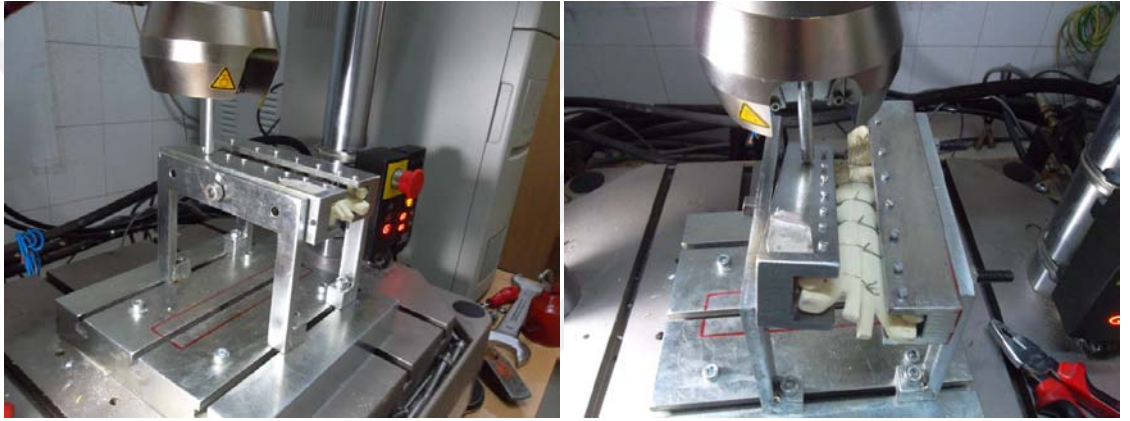


Şekil 3.23. Boyuna kesme deneyi

3.4.3. Enine kesme deneyi

Enine kesme deneyinde öncelikle, istenilen noktadan yükleme yapılabilmesi için, sternum modelinin yerleştirildiği çeneleri tutacak parçaların yerleri belirlenmiştir. Kesme yükü, sternumun sağ tarafında birinci kaburga boşluğunun orta hizasından uygulanmıştır. Yük uygulama yerinin belirlenmesinde, bu yükleme durumunun da

incelendiği Cohen and Griffin (2002) tarafından yapılan çalışma dikkate alınmıştır. Sternumların yerleştirildiği çenelerden biri diğer parçaya üç adet vidayla tamamen sabitlenmiş, diğer çene ise ortadan bir pim etrafında serbestçe dönebilecek şekilde diğer parçaya tutturulmuştur. Yükleme hücresine yerleştirilen bir pim yardımıyla sternumun sağ tarafını tutan parçaya düşey bir kuvvet uygulanarak serbest şekilde dönmesi sağlanmış ve sistemde kırılma olana kadar deneylere devam edilmiştir (Şekil 3.24). Bu yükleme durumu için de toplam 30 deney yapılmıştır.



Şekil 3.24. Enine kesme deneyi

3.5. Görüntü Analizi ile Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi

Yanal ayrılma ve boyuna kesme deneylerinde deney aletinden alınan verilerin yanı sıra modellerde oluşan yer değiştirmelerin ölçülmesi için görüntü analizi yöntemi de kullanılmıştır. Bu amaçla MATLAB ortamında bir kod yazılmıştır. Bu kod genel olarak, bir fotoğraftaki belirli bir çap aralığındaki daireleri tespit ederek bunların koordinatını belirlemektedir. Bu işlem fotoğrafların tamamı için sırayla yapılmakta ve dairelerin koordinatlarındaki değişim ölçülerek yer değiştirmeler belirlenmektedir. Bu amaçla siyah kartondan kesilen 5,5 mm çapında daireler kullanılmıştır. Piksel olarak belirlenen yer değiştirmelerin milimetreye çevrilebilmesi için modeller üzerinde farklı noktalara ölçekli kâğıt parçaları yapıştırılmış ve gerçek yer değiştirmeler belirlenmiştir. Deneylerden önce, ölçekli kâğıtlar üzerinde denemeler yapılmış ve yazılan kodun doğru

sonuçlar verdiği teyit edilmiştir. Bütün deneylerde bir saniyede iki görüntü alınacak şekilde kameralar ayarlanmış ve yüklemeyle birlikte görüntü alımına başlanarak deneylerin sonuna kadar devam edilmiştir.

Yanal ayrılma yüklemesinde sternumun ön ve arka tarafında her bir kaburga çıkıntısı hizasında yedişer adet daire yerleştirilmiştir. Böylece, hem sternumun farklı bölgelerindeki yer değiştirmeler hem de özellikle titanyum plâk ve titanyum klips kullanımında oluşabilecek sternumun ön ve arka taraflarındaki farklı ayrılmaların incelenmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi için kullanılan daireler

Boyuna kesme yüklemesinde ise sternumun ön kısmına üç adet daire yapıştırılmıştır ve sadece ön taraftan görüntü alınmıştır (Şekil 3.26). Deney sırasında sternumunda kısmi kırılmalar olması durumunda daha doğru bir yer değiştirme değeri ölçülebilmesi için farklı yerlere yerleştirilen bu üç dairenin ortalama yer değiştirme değeri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.26. Boyuna kesme yüklemesinde görüntü analizi için kullanılan daireler

Yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemeleri için görüntü analizi ile yer değiştirmelerin ölçülmesinin adımları sırasıyla aşağıda verilmiştir;

- Fotoğraflar bulundukları klasörden sırayla çağırılır.
- Siyah daireler “imfindcircles” komutu yardımıyla bulunur ve bu dairelerin yarıçapları ile koordinatları, resmin sol üst köşesi merkez alınarak piksel olarak hesaplanıp bir matrise atanır.
- MATLAB, daireleri büyüklük sırasına göre sıralamaktadır. Bu durumun karışıklık yaratmaması için koordinat matrisindeki veriler, yanal ayrılımda dairelerin x-ekseni koordinatlarına göre, boyuna kesme deneyinde ise y-ekseni koordinatlarına göre tekrar sıralanır.
- Her fotoğraf için bu işlemler yapılarak, dairelerin y-ekseni koordinatları ayrı bir matrise atanır. Her bir dairenin y-ekseni koordinatlarındaki farklar hesaplanarak yer değiştirmeler piksel olarak bulunmuş olur. Boyuna kesme yüklemesinde sternuma yapıştırılan üç dairenin yer değiştirmelerinin ortalaması nihai yer değiştirme olarak alınır.

- Sternumun üzerine yerleştirilen ölçekli kâğıtlar resimlerde incelenerek bir pikselin kaç milimetre değerinde olduğu belirlenir ve piksel olarak bulunmuş olan yer değiştirmeler milimetreye çevrilir.
- Elde edilen yer değiştirme değerleri, deney aletinden alınan yük değerleri ile eşleştirilerek yük-yer değiştirme eğrileri elde edilir.

3.6. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneyler sonucunda deney aletinden alınan veriler kullanılarak, incelenen kapama yöntemlerinin ortalama yük-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen akma yükü, direngenlik, kopma yükü ve kopma uzaması değerleri kullanılarak kapama yöntemlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, mevcut yük-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde, yöntemlerin farklı davranışları sonucunda birbirinden farklı yük-yer değiştirme eğrilerine sahip oldukları görülmüş ve belirgin akma bölgelerinin oluşmadığı belirlenmiştir. Genel olarak, bir sistemin akma noktası yük-yer değiştirme eğrisinin doğrusallığının sona erdiği yerdir. Bu noktadan sonra sistemde kalıcı hasarlar oluşacaktır ve bu noktada ki yük değeri sistemin akma yükü değeridir. Sistemde plastik (kalıcı) şekil değiştirmelerin oluşmaya başlaması için daha büyük yük değerlerinin etkimesi gerektiğini göstereceğinden, akma yükü değerinin büyük olması arzulanmaktadır (Cohen and Griffin 2002).

Akma bölgesinin belirlenebilmesi için öncelikle yük-yer değiştirme eğrilerine uygun olacak farklı dereceden polinom ve hiperbol eğrileri uydurulmuştur. Bu eğrilerde de belirgin akma bölgeleri olmadığı görülmüş ve eğri denklemlerinin ikinci türevleri yardımıyla akma yükleri hesaplanmak istenmiş fakat istenen sonuçlar elde edilememiştir.

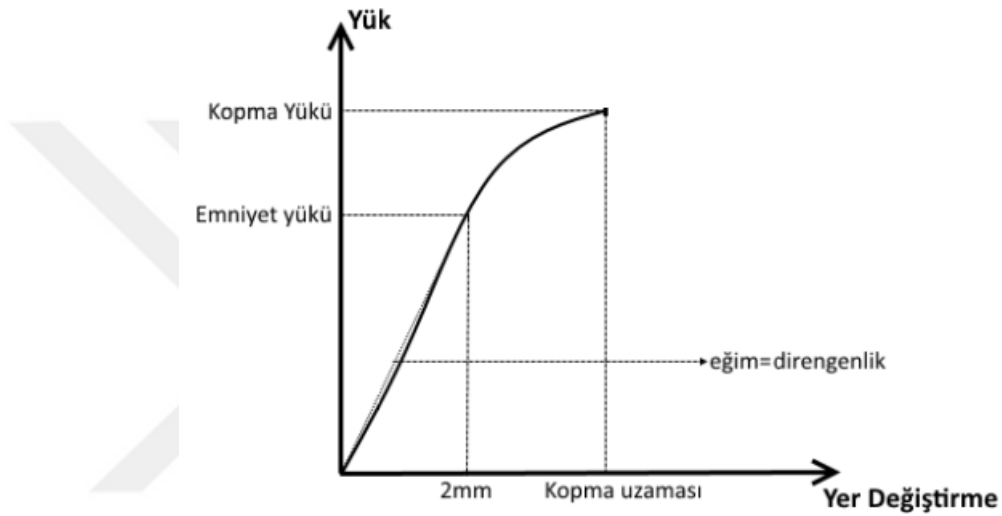
Aynı amaçla, sternum kapama yöntemlerinin karşılaştırıldığı mevcut literatür çalışmaları incelenmiştir. Cohen and Griffin (2002) tarafından yapılan ve üç farklı sternum yönteminin karşılaştırıldığı çalışmada yöntemlerin akma bölgeleri ve akma

yükleri belirlenmiş fakat yük-yer değiştirme eğrileri ve herhangi bir kabul yapılıp yapılmadığı hakkında bilgi verilmemiştir. Bu çalışmada ayrıca, yöntemlerin karşılaştırılmasında, yöntemlerin direngenliği, göçme yükleri ve toplam yer değiştirme değerleri dikkate alınmıştır. Casha *et al.* (1999) ise altı farklı yöntemi çelik parçalar üzerinde karşılaştırdıkları çalışmada, çelik tellerin düğümlerinin 20 kg yük etkisinde açılmaya başladığını belirlemişler ve bu değere karşılık gelen yer değiştirme değeri ile göçme yüklerini, yöntemlerin karşılaştırılmasında kullanmışlardır. Literatürdeki diğer çalışmalarda ise, yöntemler karşılaştırılırken göçme yükü değerleri kullanılmış (Zeitani *et al.* 2006; Zeitani *et al.* 2008; Dieselam 2011) veya belirli bir yer değiştirme değerine (2 mm) denk gelen yük miktarı (McGregor *et al.* 1999; Trumble *et al.* 2002) ya da uygulanan belirli bir kuvvete karşılık gelen yer değiştirme değerleri kullanılmıştır (Dasika *et al.* 2003; Pai *et al.* 2005; Pai *et al.* 2007).

Sonuç olarak, akma bölgesinin belirlenmesinde bir kabul yapılması gerektiği fikrine varılmıştır. İlk olarak sternuma etkiyen fizyolojik yüklerin belirlenmesine yönelik olarak yapılan çalışmalar incelenmiş ve belirli bir yük değerinin akma yükü olarak alınması ve buna karşılık gelen yer değiştirmelerin karşılaştırılması düşünülmüştür. Ancak, Bölüm 2.2’de ayrıntılı olarak açıklandığı üzere bu konuda oldukça farklı değerler matematiksel olarak hesaplanmış veya deneysel olarak belirlenmiştir. Bu nedenle bu yüklerden birinin kullanımı yerine farklı bir alternatif aranmıştır. Böylece 2 mm’lik yer değiştirmeye karşılık gelen yük değerinin (emniyet yükü), akma yükü yerine dikkate alınmasına karar verilmiştir. Bu yer değiştirme değerinin kabulünde, farklı kaynaklarda kemik iyileşmesinin gerçekleşmesi için kritik değer 2 mm olduğunun belirtilmesi dikkate alınmıştır (Claes *et al.* 1997; Fedak *et al.* 2010; Stacy *et al.* 2014). İki parça arasında 2 mm değerinin üzerinde yer değiştirmeler olması durumunda kemik iyileşmesi gerçekleşmeyecektir. Bu davranış, akma bölgesi ve kritik akma yükü kavramlarına benzer bir durum olduğundan 2 mm, kritik yer değiştirme değeri olarak kabul edilmiştir. Bu yer değiştirmeye karşılık gelen yük değeri de, kemik iyileşmesi için kritik yük (emniyet yükü) olarak kabul edilerek yöntemlerin karşılaştırılmasında akma yükü değerinin yerine kullanılmıştır. Akma yükü değerinde olduğu gibi, kritik yer

değiştirme değerinin oluşması için daha fazla yük uygulanması gerektiğini gösterdiği için emniyet yükünün de büyük olması arzulanmaktadır.

Genelleştirilmiş yük-yer değiştirme eğrisi ve yöntemlerin karşılaştırılmasında kullanılan değerler Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Yük-yer değiştirme eğrisi ve karşılaştırma parametreleri

Yük-yer değiştirme eğrisinin başlangıcındaki doğrusal kısmın eğimi yöntemin direngenlik değerini vermektedir. Direngenlik, sistemde birim elastik (geri dönebilir) yer değiştirme oluşması için uygulanması gereken yük değerini göstermektedir. Direngenlik değeri yüksek olan bir sistem, düşük direngenlik değeri olan sisteme nazaran daha az hareket edecektir. Tam direngen bir sistemde ise, yükleme etkisinde herhangi bir hareket oluşmayacaktır. Genel olarak, yükleme etkisinde sternumda daha az hareket oluşacağı için yüksek direngenlik değerleri arzulanmaktadır (Cohen and Griffin 2002). Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde direngenlik değeri olarak, yük-yer değiştirme eğrisinin başlangıç noktası ile emniyet yükü değeri arasında ki kısmının eğimi dikkate alınmıştır.

Kopma yükü (maksimum yük), sistemin nihai dayanımının ölçüsüdür. Sistemde kırılmaya (göçmeye) neden olan yük değeridir ve sistemin yüksek kopma yükü değerine sahip olması istenmektedir (Cohen and Griffin 2002). Karşılaştırılan yöntemlerin göçme yüklerinin belirlenmesinde, sternumda oluşan ilk kırılma anındaki yük değeri dikkate alınmıştır. Deneylerden elde edilen grafikler incelendiğinde, modellerde ani (gevrek) kırılmaların olduğu görülmüş ve dolayısıyla kopma yüklerinin ayrıca, sistemin maksimum yükü olduğu belirlenmiştir. Bazı deneylerde, kapama malzemesinin kopması sebebiyle, yük-yer değiştirme eğrisinde ani düşüşler olmuş fakat bu durum göçme yükünün kontrolünde dikkate alınmamış ve sternumda oluşan ilk kırılma değeri göçme yükü olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, ilk kırılmadan sonra deneyler durdurulmamış ve nihai göçmeye kadar deneye devam edilmiştir. Bu durumda, bazı deneylerde ilk kırılmadan sonra sistemde diğer kırılmalar oluşmadan daha büyük yük değerlerine ulaşılmış fakat bu değerler de göçme yükünün belirlenmesinde dikkate alınmamıştır.

Kopma uzaması değeri ise, sistemde kopma (göçme) meydana geldiği anda oluşan toplam yer değiştirme değeridir ve sistemdeki hareketliliği gösteren bu değer küçük olması istenmektedir (Cohen and Griffin 2002). Deneylerde kopma uzaması değeri olarak, modellerde meydana gelen ilk kırılma anındaki yer değiştirme değerleri dikkate alınmıştır.

3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri

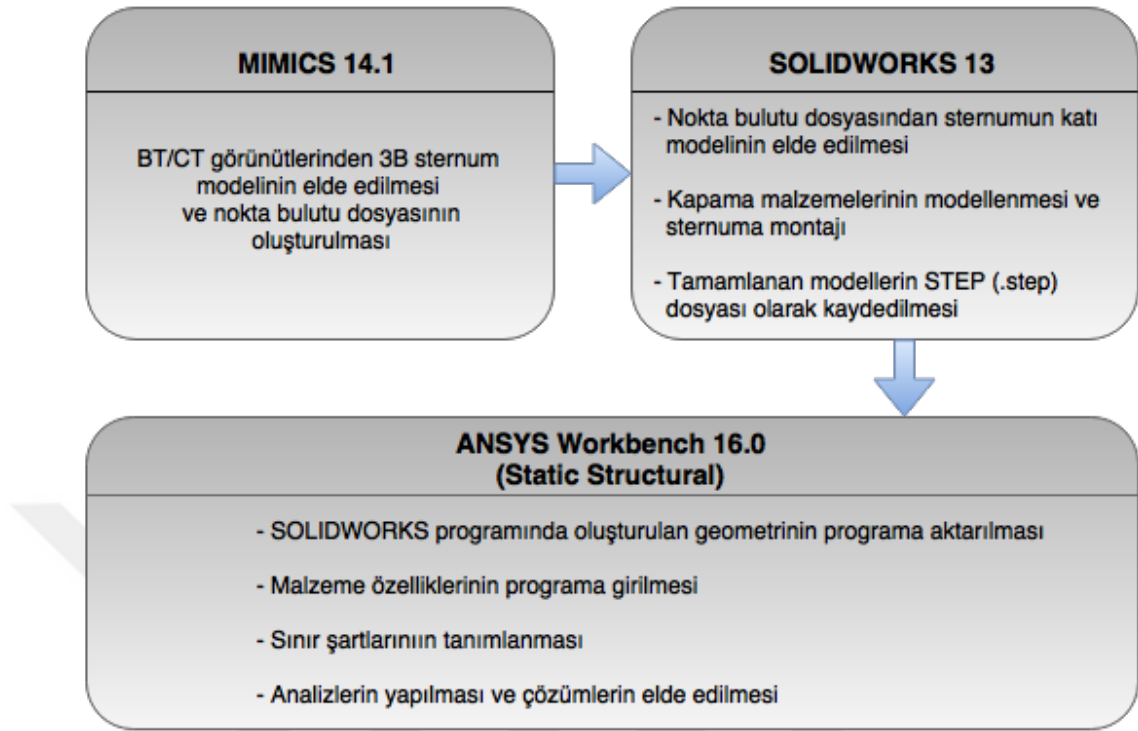
Sternumun kapatılmasında kullanılan yöntemlerin mekanik davranışlarının incelenmesi ve bu yöntemlerin karşılaştırılması için yapılan çalışmaların çoğunluğu, deneysel ve klinik incelemeler şeklinde olup, bu amaçla yapılan sayısal (bilgisayar modeli) çalışmaların sayısı oldukça azdır (Elfström and Grunditz 2013; Bruhin *et al.* 2005). Kapama yöntemlerinin, farklı malzemelerin birlikte kullanılması ile yüzleri bulan sayısı, deneylerde uygulanacak farklı yükleme şekilleri, kullanılacak sternum sayısı ve kapama yöntemlerinin maliyeti dikkate alındığında bu yöntemlerin kapsamlı bir şekilde deneysel olarak karşılaştırılması maliyetler açısından çok zorlayıcı olmaktadır. Bu nedenle, deneysel çalışmalar ışığında kapama yöntemlerinin gerçek davranışlarını

yansıtacak şekilde doğru modellerin oluşturulması ve sayısal analizlerin yapılması, kapama yöntemlerinin incelenmesini kolaylaştıracaktır. Ancak, bilgisayar simülasyonlarının gerçek testlerle uyumlu olduğunun gerçekleşmesine ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, çelik tel, çelik bant ve PEEK bant kullanılarak yapılan ve deneylerde karşılaştırılmamış toplam on bir farklı kapama tekniğinin yanal ayrılma yükü etkisindeki davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Kapama tekniklerinin gerçek davranışlarını yansıtacak, doğru sayısal modellerin oluşturulabilmesi için ilk olarak, deneylerde incelenen geleneksel tel, üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinin modelleri oluşturularak analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda deneysel verilere yakın bulgular elde edilmiş ve deneylerde test edilemeyen yöntemler, referans alınan bu yöntemlere benzer şekilde modellenmiştir. ANSYS Workbench programı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde incelenen yöntemler Çizelge 3.2’de verilmiş ve analizlerde izlenen yol Şekil 3.28’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılan sternum kapama teknikleri

<i>Malzeme</i>	<i>Teknik</i>
Çelik tel (no.5)	▪ 7 çelik tel (geleneksel tel yöntemi) ▪ 9 çelik tel (ksifoid ve manubrium bölgesinde ikişer tel kullanımı)
Çelik bant + Çelik tel	▪ 3 çelik bant + 4 tel (gövdede iki tel) ▪ 3 çelik bant + 2 tel (gövdede tel yok) ▪ 4 çelik bant + 3 tel (gövdede bir tel) ▪ 4 çelik bant + 2 tel (gövdede tel yok) ▪ 5 çelik bant + 2 tel (gövdede tel yok) ▪ 2 çelik bant + 7 tel (gövdede üç tel) ▪ 3 çelik bant + 6 tel (gövdede iki tel)
PEEK bant + Çelik tel	▪ 3 PEEK bant + 4 tel (gövdede iki tel) ▪ 3 PEEK bant + 2 tel (gövdede tel yok) ▪ 4 PEEK bant + 3 tel (gövdede bir tel) ▪ 4 PEEK bant + 2 tel (gövdede tel yok) ▪ 5 PEEK bant + 2 tel (gövdede tel yok)



Şekil 3.28. Modelleme ve sonlu elemanlar analizlerinde yapılan işlemler

3.7.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir analiz şeklidir (Topcu ve Taşgetiren 1998). Farklı bir ifadeyle bu yöntem, parçadan bütüne gitme prensibine dayanmaktadır. Sonlu eleman; iki veya üç boyutlu yapıların bir parçası veya bir bölgesidir (Liu and Quek 2003).

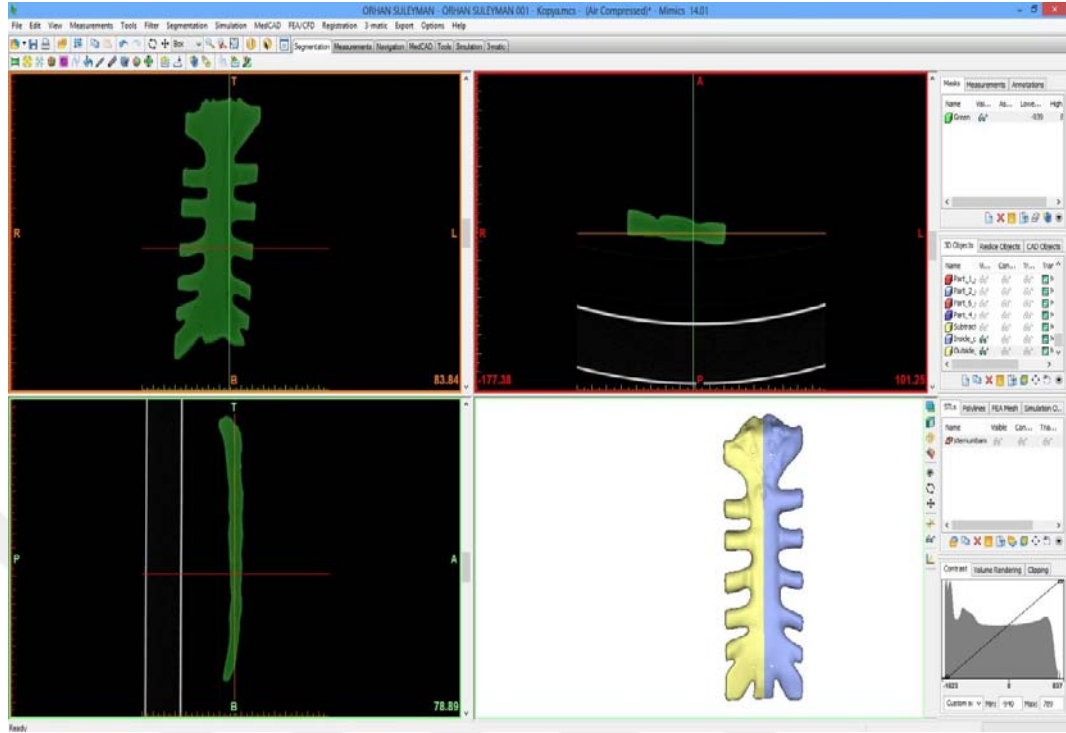
Bu yöntem ilk olarak 1950 yılında uzay mühendisliğinde kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemin ana fikrini oluşturan ilk makale ise 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır. Teknolojinin ilerlemesi ve bilgisayarların geliştirilmesiyle birlikte 1970'lerde daha yaygın bir şekilde kullanılan bu yöntem günümüzde makine, inşaat, elektrik, uçak ve hidrodinamik gibi farklı mühendislik alanlarının yanında, tıpta ortopedi, kalp ve damar cerrahisi ile estetik cerrahi dallarında da kullanılmaktadır (Fish and Belytschko 2007). Elastik ve sürekli ortamlara sonlu elemanlar yönteminin

uygulanmasında; yapının parçalara ayrılması, uygun bir interpolasyon seçimi, direngenlik matrisi ve yük vektörleri ile eleman denklemlerinin birleştirilmesiyle toplam denge denklemlerinin elde edilmesi, bilinmeyen düğümsel yer değiştirmeler için çözüm yöntemlerinin kullanılması ve sonuçların bulunması adımları uygulanmaktadır (Güler 2013).

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan yazılımlardan biri ANSYS programıdır. Bu program, model üzerinde analiz yapılırken, en yüksek von Mises gerilmelerinin elde edilmesine izin verdiği gibi, gerilmelerin yoğunlaşmasını, bulunduğu yerleri ve sebep oldukları yer değiştirmelerin grafiksel olarak gösterilmesini de sağlamaktadır (Güler 2013).

3.7.2. Sternum kapama yöntemlerinin bilgisayar modellerinin oluşturulması

Sonlu elemanlar analizlerinde, deneylerde kullanılan poliüretan sternum modelinin 0,1 mm aralıklı çekilen bilgisayarlı tomografi (BT/CT) görüntülerinden elde edilen üç boyutlu (3B) katı modeli kullanılmıştır. Tomografiden elde edilen DICOM (.dcm) formatındaki görüntüler MIMICS 14.1 programı kullanılarak 3B katı model haline getirilmiştir (Şekil 3.29).

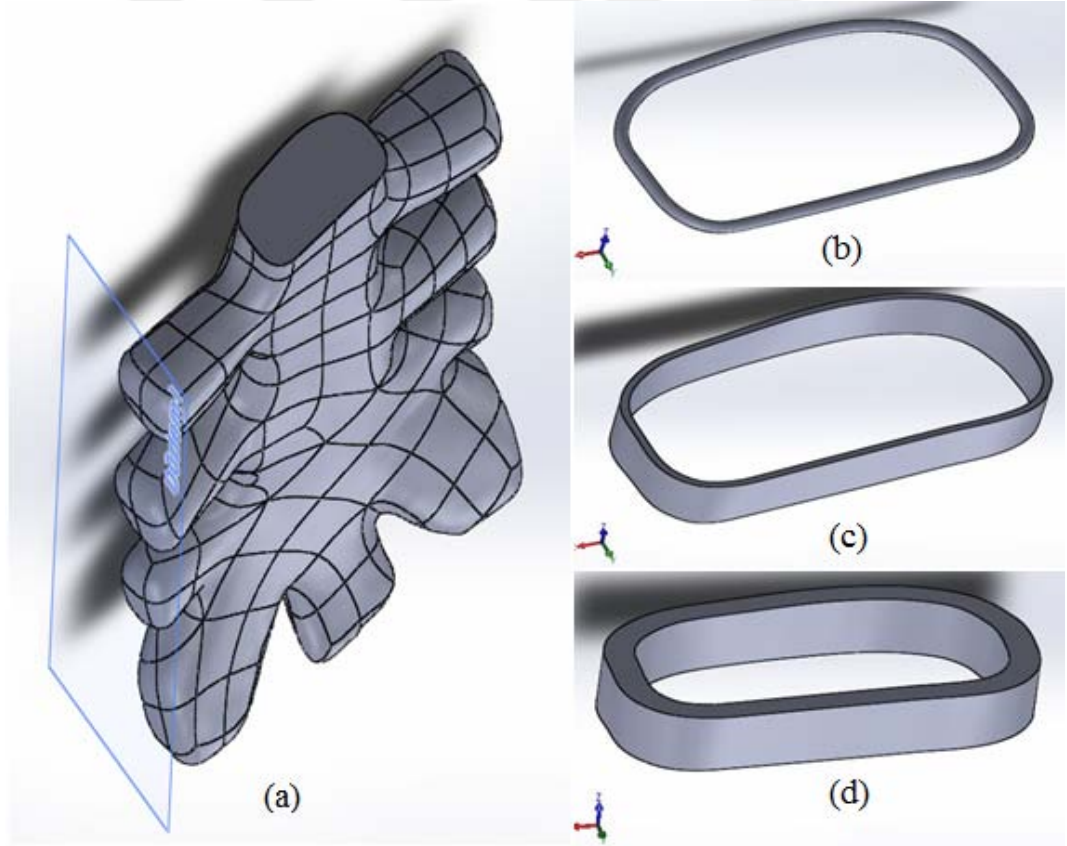


Şekil 3.29. BT görüntüleri ile MIMICS programında sternum geometrisinin oluşturulması

MIMICS programından nokta bulutu (point cloud) dosya formatında alınan 3B modeller, SOLIDWORKS 2013 programına aktarılmış ve katı yüzey modeli oluşturacak şekilde görüntüler işlenmiş ve geometride ki boşluklar ile kusurlar düzeltilmiştir (Şekil 3.30). Çelik tel, çelik bant ve PEEK bantların modellenmesi ve sternuma montajı da SOLIDWORKS programında gerçekleştirilmiştir. Bu kapama malzemelerinin esnekliği ve kesitlerinin inceliği sebebiyle, kapama esnasında kemiğin şekline göre deforme olmaları dikkate alınmış ve sternumu uygun bir biçimde sarabilmeleri için mümkün olduğunca sternumun yüzey geometrisine benzer şekilde modellenmişlerdir. Bu amaçla, malzemelerin yerleşeceği her bir kaburga boşluğundan kesitler alınmış ve bu kesitlerde kemiğe teğet olarak çizilen eğriler yardımıyla malzemeler modellenmiştir (Şekil 3.31). Çelik teller çapları 0,787 mm (no.5), çelik bantlar genişliği 4,5 mm ve kalınlığı 0,5 mm, PEEK bantların genişliği ve kalınlığı ise sırasıyla, 4,2 mm ve 2 mm olacak şekilde modellenmiştir.

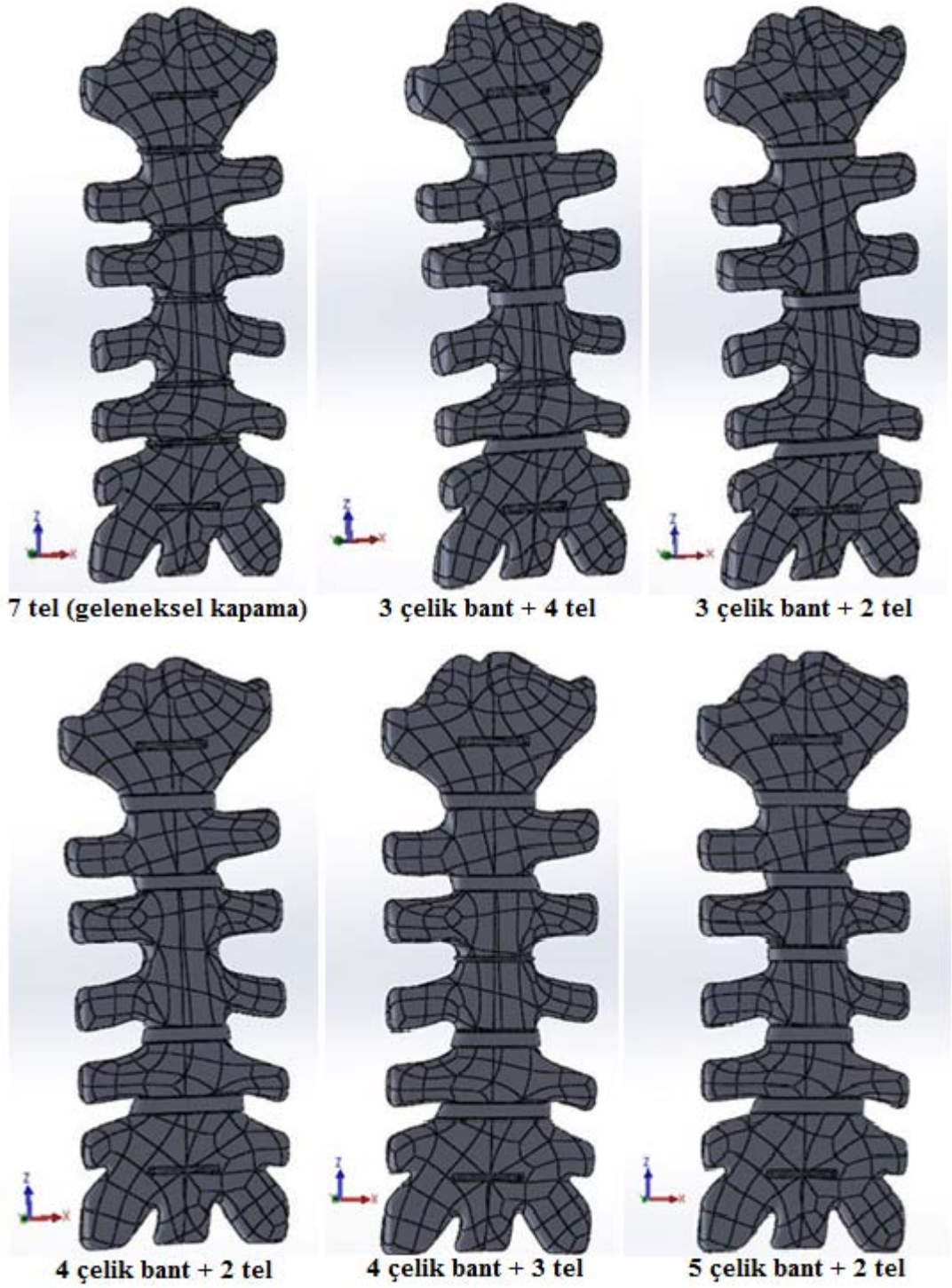


Şekil 3.30. Sternumun Solidworks programında oluşturulmuş katı modeli

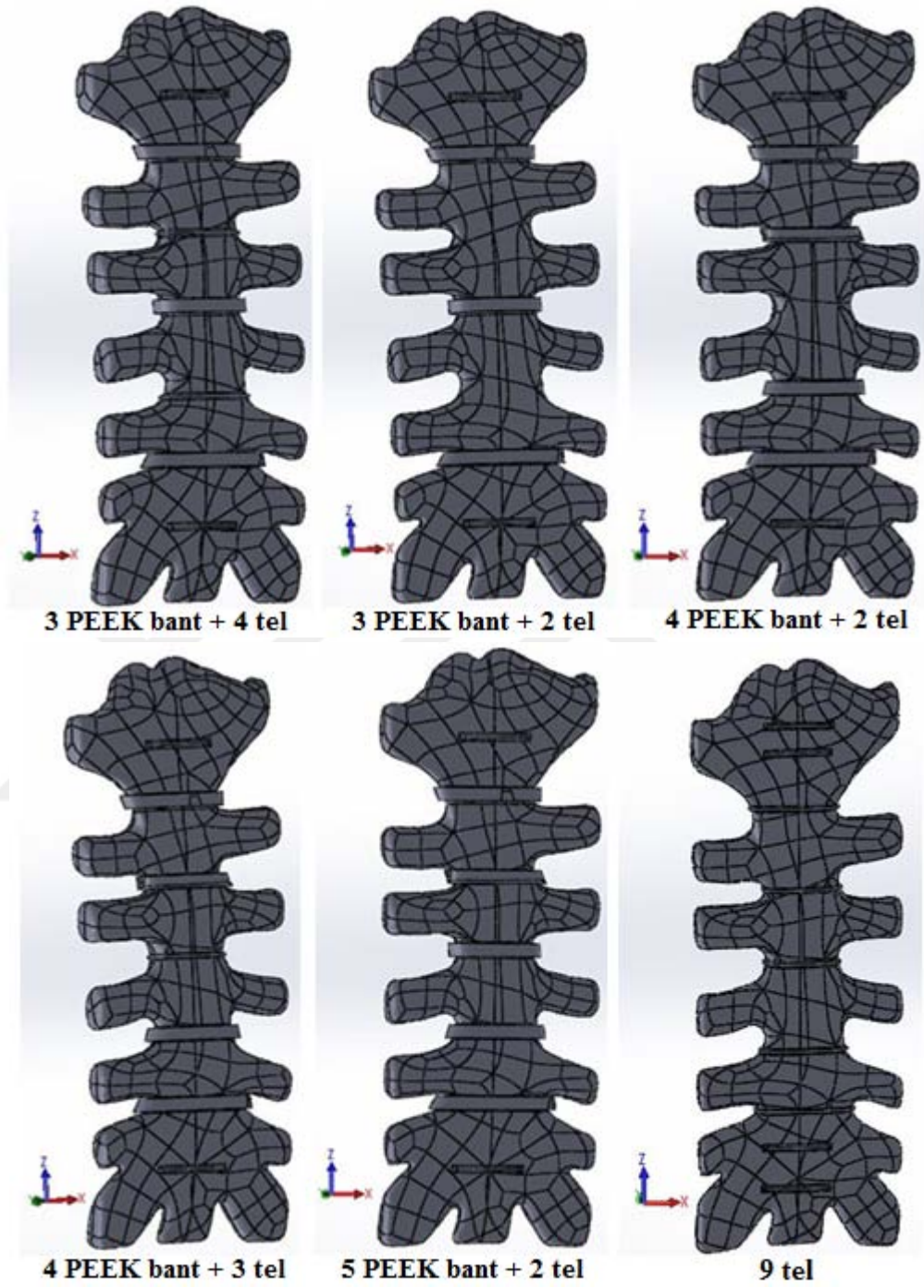


Şekil 3.31. (a) Kapama malzemeleri modellenirken dikkate alınan bir sternum kesiti ve bu kesite göre modellenen, (b) çelik tel, (c) çelik bant, (d) PEEK bant

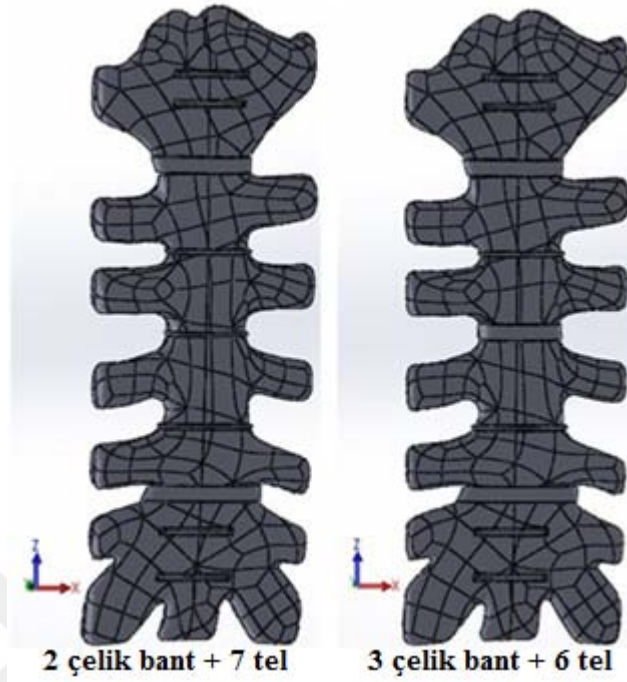
Sonlu elemanlar analizlerinde incelenen sternum kapama yöntemlerinin bilgisayar modelleri Şekil 3.32’de gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Sonlu elemanlar analizleriyle incelenen sternum kapama yöntemleri



Şekil 3.32. (devam)



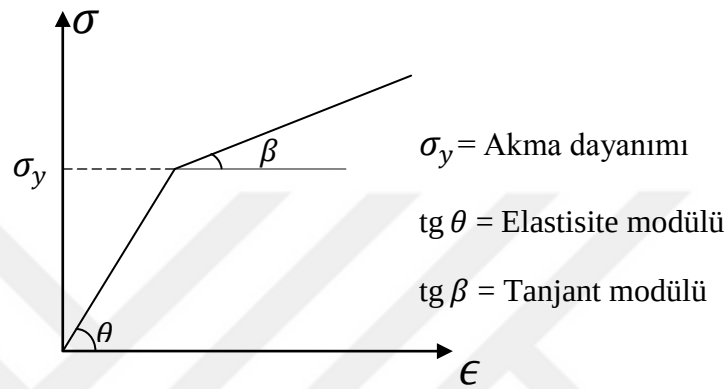
Şekil 3.32. (devam)

3.7.3. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve sınır şartlarının uygulanması

Kapama malzemelerinin sternuma montajları tamamlandıktan sonra, hazırlanmış olan modeller STEP (.step) formatında kaydedilmiş ve ANSYS Workbench programına aktarılmıştır. Kapama yöntemlerinin analizleri, ANSYS Workbench yazılımının içinde bulunan Static Structural analiz sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde ilk olarak malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bruhin *et al.* (2005) ve Elfström and Grunditz (2013) tarafından yapılan ve kapama yöntemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelendiği çalışmalarda, malzemelerin doğrusal elastik olarak tanımlandığı görülmüştür. Bununla birlikte, yapılan deneylerde yüklemeye birlikte çelik tellerin ve çelik bantların sternumu kesmeye ve ezmeye başladığı belirlendiği için malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri de bilineer (çift doğrusal) (bilinear isotropic hardening - akma yükü ve tanjant modülü) olarak tanımlanmış ve tüm malzeme özellikleri elasto-plastik ve izotropik olarak kabul edilmiştir (Şekil 3.33). Malzemelerin,

tanjant modülü haricinde ki özelliklerinin belirlenmesinde dikkate alınan kaynaklar ve malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Kaynaklarda yer almayan tanjant modülü değerleri ise elastisite modülü değerlerinin %10’u olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3.33. ANSYS programında tanımlanan elasto-plastik malzeme özellikleri

Çizelge 3.3. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Poisson Oranı (ν)	Akma Dayanımı (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
Sternum (poliüretan) (Anonymous 2016c)	320	0,210	0,3	8,4	21
Çelik tel-Çelik bant (316L) (Elfström and Grunditz 2013; Anonymous 2016d)	8000	193	0,27	290	19300
PEEK bant (polietereter – keton) (Elfström and Grunditz 2013; Anonymous 2016e)	1331	4,34	0,39	115	434

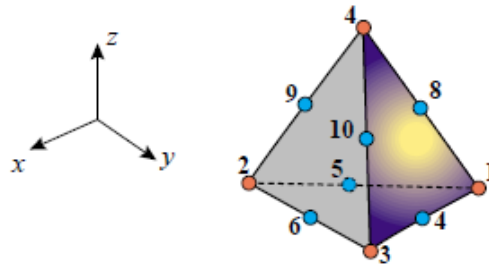
ANSYS Workbench programı doğrusal olmayan analizlerin çözümünde, Newton-Raphson iterasyon yöntemini kullanmakta ve iteratif çözümlerin gerçek davranışa yakınsamasıyla çözümler elde edilmektedir (Anonymous 2013d). Akma oluşumunun

belirlenmesinde ise von Mises akma kriteri (von Mises biçim değıştirme enerjisi varsayımı) dikkate alınmaktadır (Anonymous 2016g). Von Mises gerilmesi, sünek malzemelerde akma kriterinin belirlenmesinde kullanılmakta ve cisimdeki mevcut üç boyutlu gerilme halini tek bir sayısal değeri ile karakterize eden bir gerilmeyi (eşdeğer gerilme) ifade etmektedir. Bu gerilme değeri, elemanın akma dayanımını aştığı anda akma meydana gelmekte ve plastik şekil değıştirmeler oluşmaya başlamaktadır (Güler 2013). Von Mises eşdeğer gerilmesinin genel ifadesi Denklem 3.1’de gösterilmiş, asal gerilmelere bağılı olarak hesaplanması ise Denklem 3.2’de verilmiştir.

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (3.1)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.2)$$

Modellerdeki bütün parçaların hacimsel olarak sonlu sayıda elemana bölünmesinde (mesh), Tetrahedron (dört yüzlü üçgen) mesh yöntemi ve Patch Independent algoritması kullanılmıştır. Bu yöntemle yapılan mesh, 10 düğüm noktasına sahip Tetrahedral 10 (Tet 10) eleman tipini kullanmaktadır (Şekil 3.34). Bu elemanlar, bütün düğüm noktalarında üç serbestlik derecesine (x,y ve z yönlerinde noktasal ötelenme) sahiptirler ve gerilmeler bu düğüm noktalarından hesaplanmaktadır (Anonymous 2013d; Anonymous 2016f).



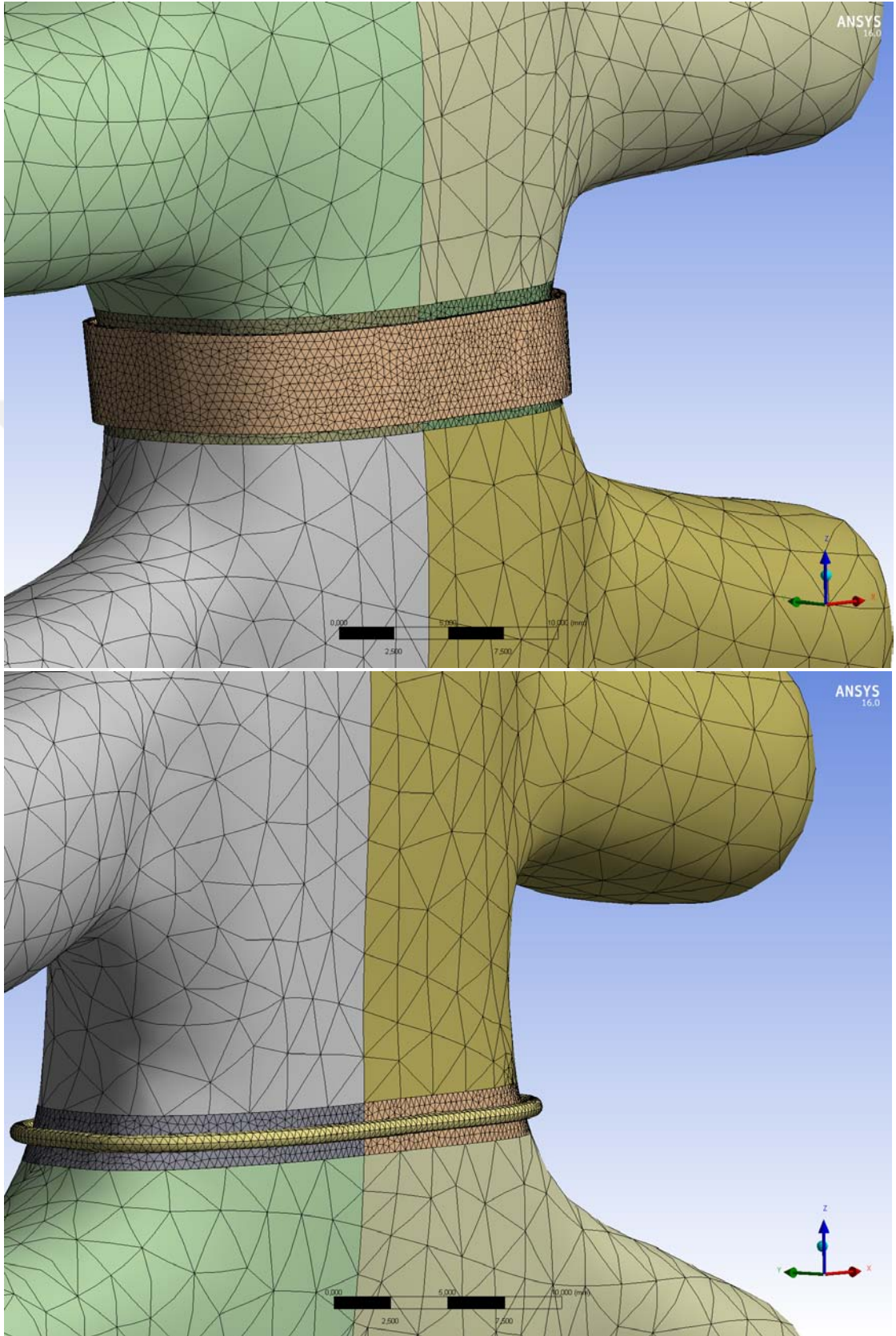
Şekil 3.34. On düğüm noktasına sahip tetrahedral eleman (Anonymous 2016f)

Mesh işlemi yapılırken, kapama malzemelerinin sternuma temas ettiği kontak bölgelerinde sternum gövdesine kıyasla daha küçük elemanlar kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Yapılan mesh kalitesinin değerlendirilmesinde programda tanımlanan farklı parametrelerden Skewness değeri dikkate alınmıştır. Eleman formunun eşkenar üçgene ne kadar yakın olduğunu gösteren bu parametreye bağlı olarak eleman kalitesinin değişimi Çizelge 3.4’de verilmiştir. Kullanılan eleman sayısı analiz süresi üzerinde oldukça etkilidir. Bununla birlikte hassas sonuçların elde edilebilmesi de eleman kalitesine bağlıdır (Anonymous 2013e). Bu nedenlerle kontak bölgelerinde eleman kalitesinin <0,25 olmasına dikkat edilmiş, diğer bölgelerde ise 0,5 değerinin aşılması amaçlanmıştır (Şekil 3.35).

Çizelge 3.4. Eleman kalitesinin skewness değerine göre değişimi (Anonymous 2013e)

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

$$Skewness = \frac{Optimum\ Eleman\ Boyutu - Eleman\ Boyutu}{Optimum\ Eleman\ Boyutu}$$

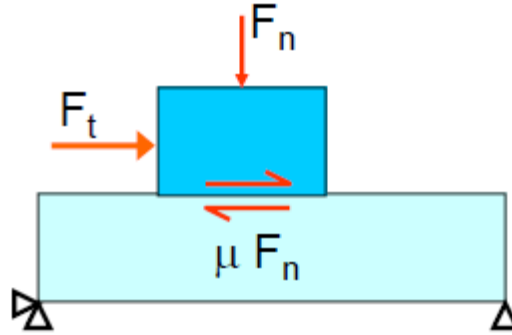


Şekil 3.35. Sternum gövdesi ve kontak bölgelerindeki genel mesh yapısı

Sternumun iki parçası arasındaki ve kapama malzemeleri ile sternum arasındaki temas bölgeleri sürtünmeli (frictional) kontak olarak seçilmiş ve sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınmıştır. Bu değerin belirlenmesinde, literatürle uyumluluk açısından, geleneksel tel ve figür-8 yöntemlerini ANSYS programında yaptıkları SEY analizleriyle karşılaştıran Brahın *et al.* (2005) tarafından yapılan çalışma dikkate alınmıştır. Sürtünmeli kontak, Coulomb sürtünme kanununa göre çalışmaktadır (Anonymous 2013d). Coulomb yasasına göre, μ sürtünme katsayısı, F_n normal kuvvet ve F_t teğetsel kuvvet olmak üzere, Şekil 3.36’da gösterilen sistemde kayma oluşmaması için Denklem 3.1’de verilen şartın sağlanması gerekmektedir (Anonymous 2016g).

$$F_t \leq \mu \cdot F_n$$

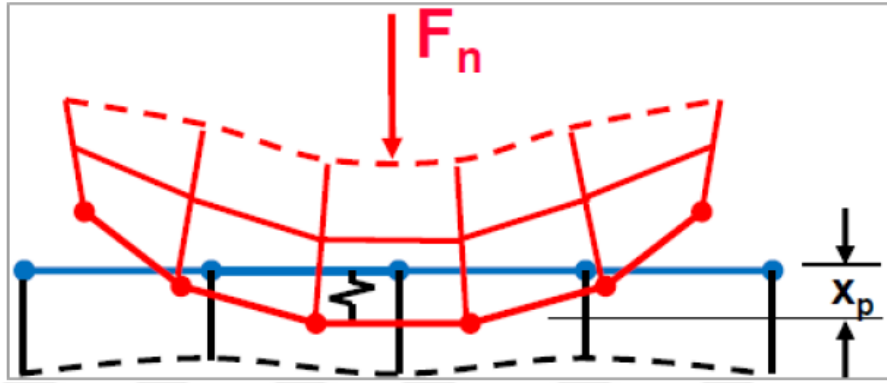
(3.3)



Şekil 3.36. Sürtünme etkisindeki blok sistemi

Coulomb sürtünme yasası genel olarak doğrusal olmayan bir davranışı yansıtmaktadır. Hareketin doğrultusuna ters yönde etkiyen sürtünme kuvveti, hareketin genliğinin zamana bağlı olarak azalmasına sebep olacaktır. Hareket halindeki cisim zaman ilerledikçe yavaşlayacak ve ilk denge konumundan tamamen farklı bir noktada duracak, yani farklı bir noktada dengeye ulaşacaktır. Bu durum, tek bir denge noktasına sahip doğrusal sistemlerin aksine, doğrusal olmayan bir davranışı göstermektedir (Elmer 1997).

ANSYS programı, sürtünmeli kontak seçiminde analizler için Pure Penalty, Augmented Lagrange ve Normal Lagrange isimli üç farklı kontak formülasyonu seçeneği sunmaktadır. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılanlar, Pure Penalty ve Augmented Lagrange yöntemleridir. Bu yöntemler Ceza (penalty) esaslı iki yöntem olup, aralarında ki temel fark, kontak kuvvetinin hesaplanma şeklinden kaynaklanmaktadır (Şekil 3.37) (Anonymous 2013d).



Şekil 3.37. Kontak bölgesinde penetrasyon oluşumu

$$\text{Pure Penalty: } F_n = k_n \cdot X_p \quad (3.4)$$

$$\text{Augmented Lagrange: } F_n = k_n \cdot X_p + \lambda \quad (3.5)$$

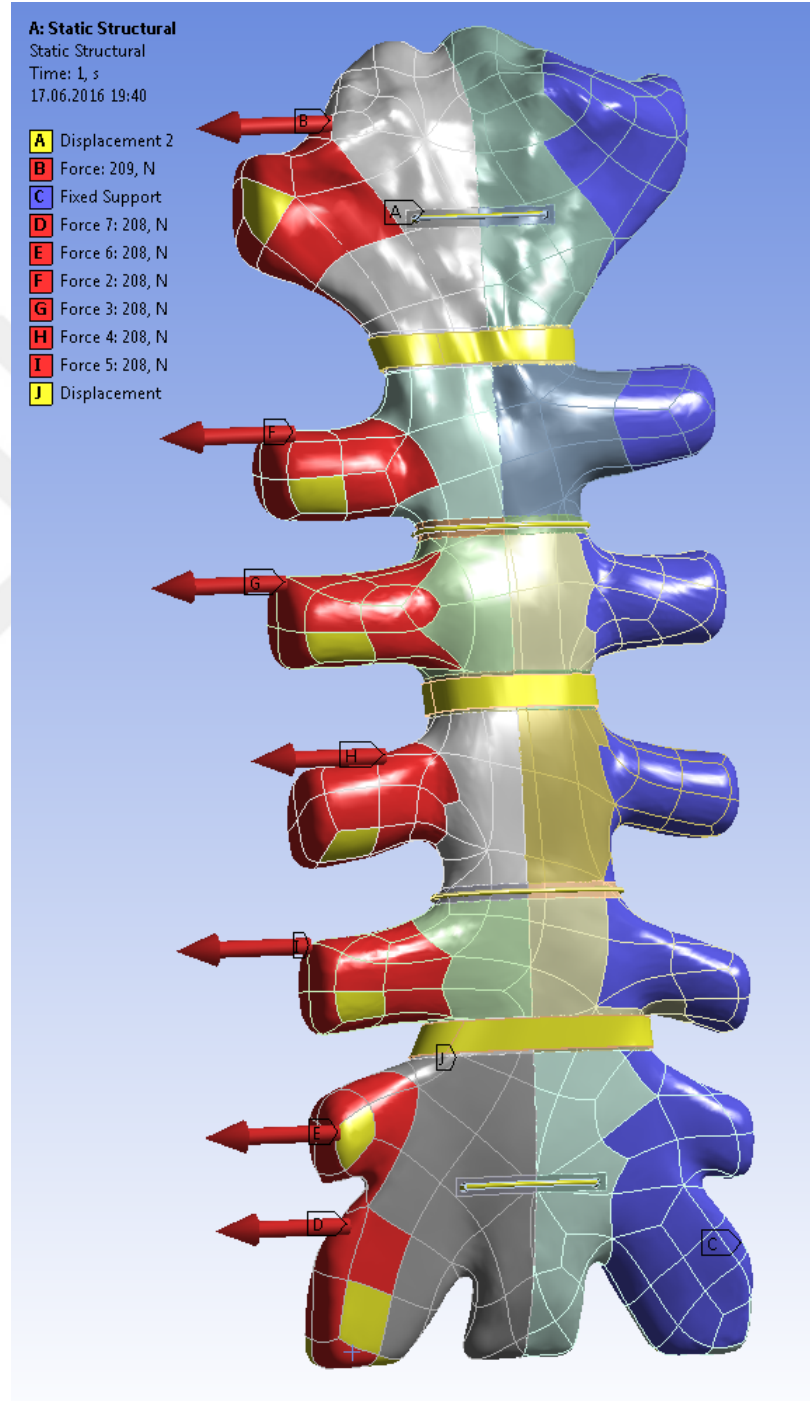
Pure Penalty yönteminde (Denklem 3.4) F_n kontak (normal) kuvvetinin, k_n (contact stiffness) değeri ile kontak bölgesinde ki penetrasyonu gösteren X_p değerine bağlı olduğu görülmektedir. Augmented Lagrange yönteminde ise (Denklem 3.5) kontak kuvvetinin hesabında ilave olarak λ (Lagrange çarpanı) değeri kullanılmaktadır. Bu nedenle k_n değerinin etkisi Augmented Lagrange yönteminde daha düşüktür. Her iki yöntem de kontak bölgesinde penetrasyon oluşumuna izin vermekte ancak, Augmented Lagrange yönteminde kontrollü bir penetrasyon varken, Pure Penalty yönteminde penetrasyon oluşumunda bir sınır değeri bulunmamaktadır (Anonymous 2013d, Anonymous 2016g). Deneylerde görülen, tellerin kemik üzerindeki kesme etkileri dikkate alınarak analizlerde Pure Penalty formülasyonunun kullanılmasına karar

verilmiştir. ANSYS Workbench programında sürtünmeli kontak analizlerinde, standart yöntem olarak varsayılan bu formülasyonda k_n değeri penetrasyonlar üzerinde oldukça etkilidir (Anonymous 2016g). Yakınsama problemlerinin aşılması ve deneylerde oluşan penetrasyonlara uygunluk açısından, analizlerde k_n değeri, bütün kapama malzemeleri (çelik tel, çelik bant ve PEEK bant) için 0,1 olarak alınmıştır.

Kontak bölgelerinde, kapama malzemeleri ile sternum arasında ki Interface Treatment (ara yüzey davranışı) opsiyonu ise Adjust to Touch olarak seçilmiştir. Bu opsiyon kontak çiftleri arasındaki boşlukları kapatarak parçaları tam temas eder hale getirmekte, ayrıca mevcut penetrasyonları da ortadan kaldırmaktadır (Anonymous 2016g). Kapama malzemelerinin SOLIDWORKS programında yapılan montajlarında, parçalar arasında kalan küçük boşlukların etkisini önlemek amacıyla bu opsiyonun kullanımı tercih edilmiştir.

Sınır şartlarının uygulanmasında ise deneylerde yapılan yüklemeye benzeyen bir sistemin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Sternum modeli sol taraftaki yedi kaburga çıkıntısından sabitlenmiş, sağ taraf kaburga çıkıntılarında ise yatay eksen (x-ekseni) bir çekme yükü uygulanmıştır. Ayrıca, sternum modeli ve kapama malzemelerinin y-ekseni ve z-eksenindeki hareketleri engellenmiştir. Geleneksel tel, üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinde, görüntü analizleri sonucunda bulunan emniyet yükü değerleri modellere uygulanmış ve elde edilen emniyet yükleri, direngenlik değerleri ile sternum gövdesindeki yer değiştirmeler deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırılan diğer yöntemlere ise, yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi ile belirlenen en büyük emniyet yükü olan 1457 N değerindeki çekme yükü uygulanmış ve yöntemlerin yük-yer değiştirme eğrileri çizilerek emniyet yükleri ile direngenlikleri hesaplanmış ve sternum gövdesindeki yer değiştirmeler belirlenmiştir. Sadece, manubrium ve ksifoidde ilave tellerin kullanıldığı 9 tel, 2 çelik bant + 7 tel ve 3 çelik bant + 6 tel yöntemlerinde 1457 N yük değeri uygulandığında sternumda 2 mm yer değiştirme değeri elde edilemediğinden, bu yöntemlere 2380 N değerinde bir yük uygulanmış ve bu yükleme durumundan alınan verilerle yük-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Analizlerde uygulanan sınır şartları Şekil 3.38’de gösterilmiştir. Analizler

HP Z420 iş istasyonunda yapılmış (Intel Xeon E5-1680 v2 3 GHz 8 çekirdek işlemci – 64 GB RAM) ve her bir analiz ortalama olarak 3-3,5 saat sürmüştür.



Şekil 3.38. Sonlu elemanlar analizlerinde modellere uygulanan sınır şartları

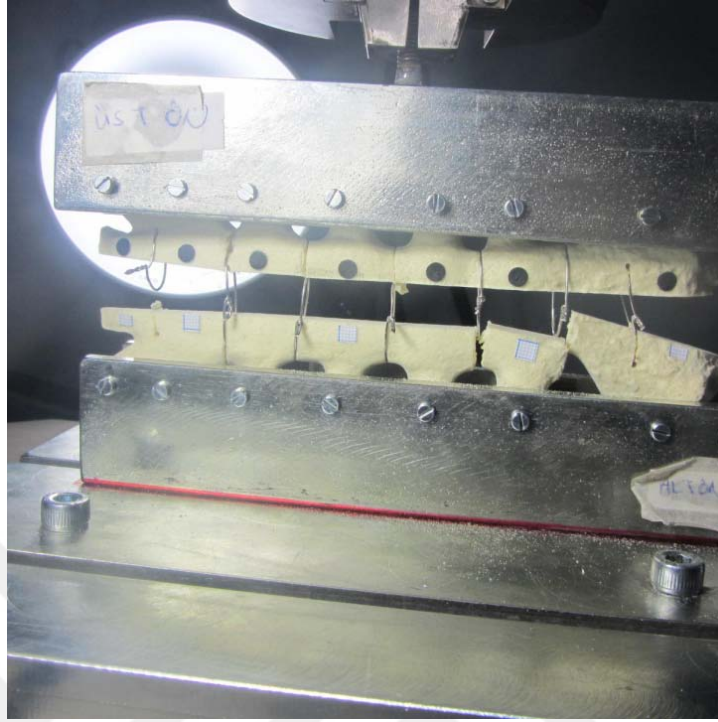
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan deneylerden ve sonlu elemanlar yöntemi analizlerinden elde edilen bulgular sunulacak ve incelenen sternum kapama tekniklerinin bu bulgular ışığında karşılaştırması yapılacaktır.

4.1. Yanal Ayrılma Deneyi Bulguları

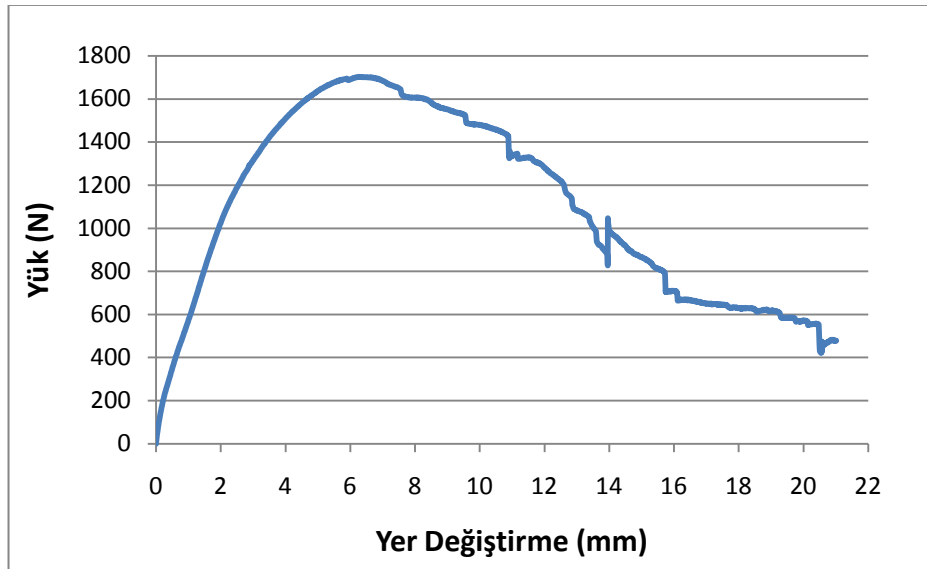
4.1.1. Geleneksel tel yöntemi

Geleneksel tel yöntemiyle yapılan deneylerde, üç modelin hepsinde ilk olarak ksifoide yerleştirilen telin kemiği keserek sıyrıldığı görülmüştür. İki modelde ikinci sıyrılma manubriuma yerleştirilen telde olmuş, sonrasında diğer tellerde sıyrılarak kemik kırılmıştır. Bir modelde ise birinci kaburga boşluğuna yerleştirilen tel tam olarak sıyrılmadan, kemik bu noktadan kırılmış daha sonra ikinci kaburga boşluğunda benzer şekilde kırılma olmuş ve diğer tellerde kemikten sıyrılmıştır (Şekil 4.1). Deneylerin hiçbirinde tellerde herhangi bir açılma veya kopma meydana gelmemiştir.



Şekil 4.1. Geleneksel tel yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması

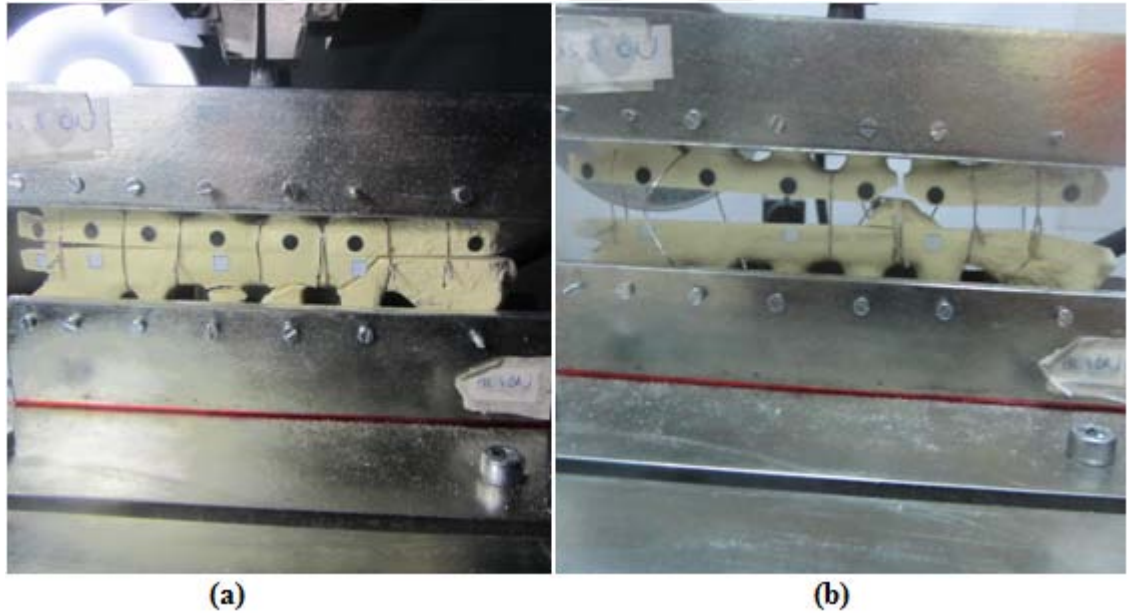
Deney cihazından elde edilen verilerle oluşturulmuş ortalama yük-yer değiştirme eğrisi aşağıda verilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Geleneksel tel yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

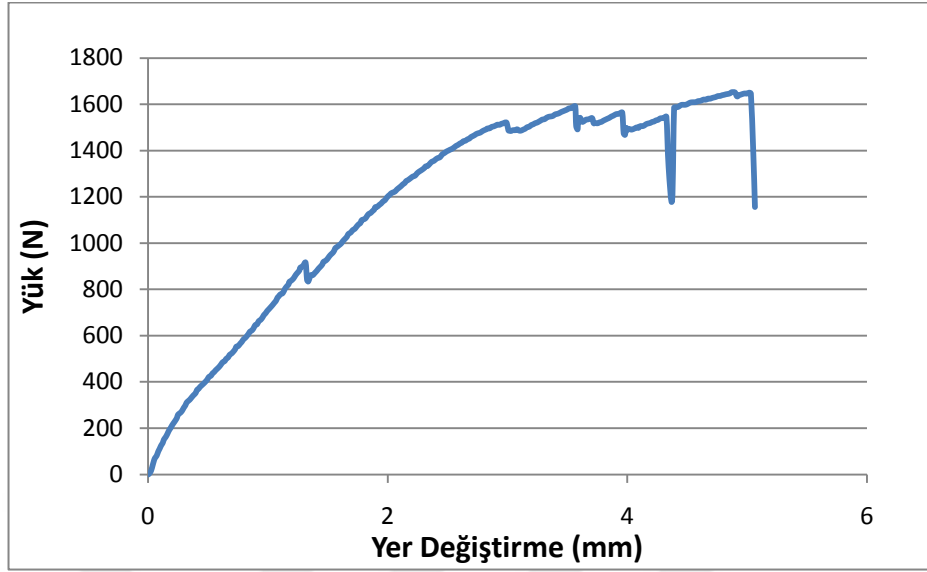
4.1.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi

Bu yöntemde yapılan ilk iki deneyde, özellikle ksifoid ve manubrium bölgelerinde tellerin kemiği kestiği görülmüş ancak teller sıyrılmadan ilk deneyde dördüncü kaburga-gövde birleşiminden, ikinci deneyde ise üçüncü kaburga-gövde birleşimi ve dördüncü çıkıntı hizasından kemik kırılmıştır (Şekil 4.3a). Üçüncü deneyde ise modelin dördüncü ve beşinci kaburga boşluklarına uygulanan figür-8 telinin düğüm bölgesinde kopma meydana gelmiştir. Kopmanın etkisiyle bu tel tamamen açılmış, ksifoid bölgesindeki tel sıyrılarak çıkmış ve nihai olarak kemik, ikinci kaburga boşluğu ve manubrium bölgesinden kırılmıştır (Şekil 4.3b).



Şekil 4.3. Çelik tellerle figür-8 yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları

Deney cihazından elde edilen verilerle oluşturulmuş ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Çelik tellerle figür-8 yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

4.1.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerin tamamında ilk önce manubrium ve özellikle ksifoid bölgesindeki teller kemiği kesmeye başlamış, sonrasında kemik beşinci kaburga çıkıntısında vida bölgesinden kırılmıştır. Yükleme devam ettikçe iki deneyde ikinci, üçüncü ve dördüncü kaburga çıkıntılarında sternumun sabitlendiği vida bölgesinde (Şekil 4.5a), bir deneyde ise ikinci kaburga-gövde birleşiminde kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.5b).



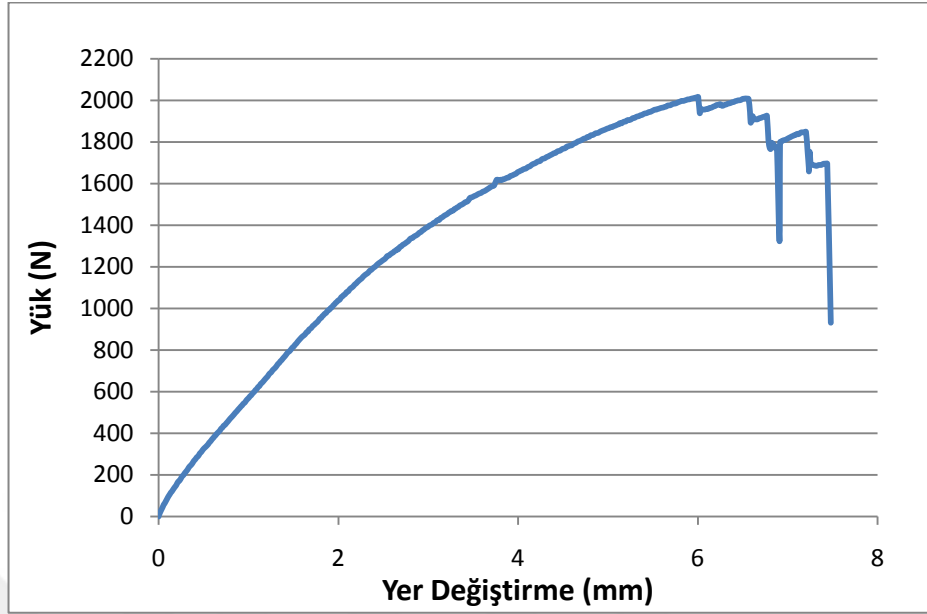
(a)



(b)

Şekil 4.5. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları

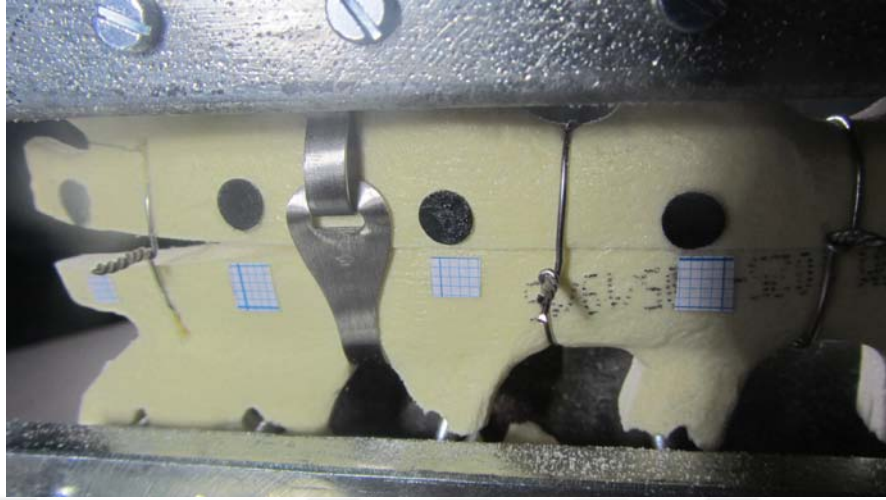
Deney cihazından elde edilen verilerle oluşturulmuş ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

4.1.4. İki çelik bant yöntemi

İki çelik bant ve beş tane telin kullanıldığı bu yöntemde, yüklemeyle birlikte ksifoid ve manubrium bölgesinde ki teller kemiği kesmeye başlamış, özellikle ksifoid bölgesinde daha fazla kesme etkisi görülmüştür. Deneylerin tamamında ilk kırılmalar sırasıyla, beşinci ve dördüncü kaburga çıkıntısında vida bölgesinde olmuş, sonrasında ikinci kaburga çıkıntısı, iki deneyde vida bölgesinden (Şekil 4.7a), bir deneyde ise gövde kısmından kırılmıştır (Şekil 4.7b).



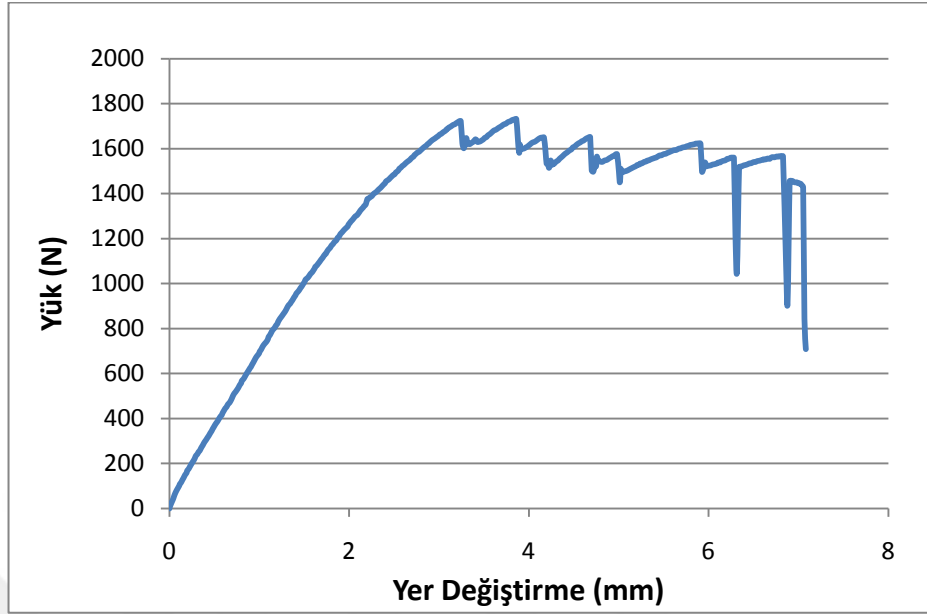
(a)



(b)

Şekil 4.7. İki çelik bant yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları

Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. İki çelik bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

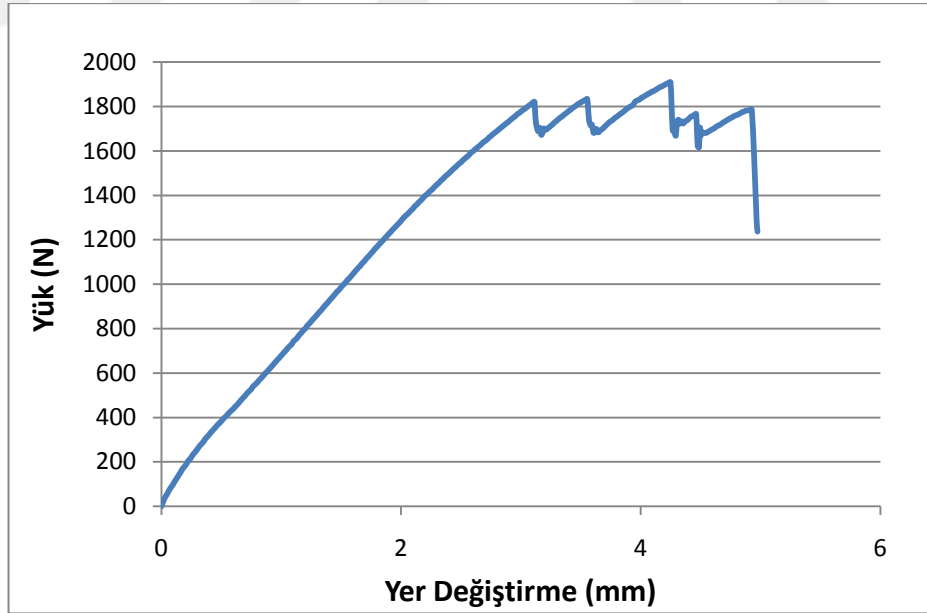
4.1.5. Üç çelik bant yöntemi

Deneylerin tamamında ilk olarak ksifoid bölgesinde bulunan tel kemiği kesmiş ve bu bölgede açılmalar meydana gelmeye başlamış, manubrium bölgesinde ise ksifoide kıyasla daha az bir kesme etkisi ve açılma görülmüştür. Sistemin göçmesi ise ilk olarak beşinci kaburga çıkıntısının, daha sonra üçüncü ve dördüncü kaburga çıkıntılarının vida bölgesinden kırılmasıyla meydana gelmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Üç çelik bant yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması

Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi aşağıda verilmiştir (Şekil 4.10).



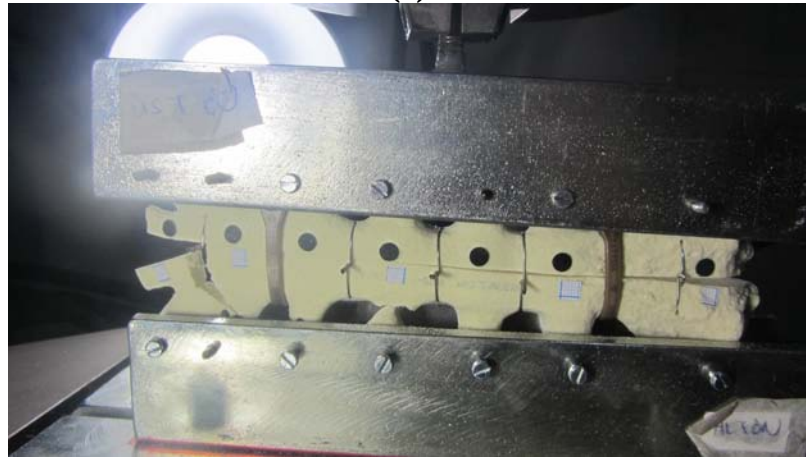
Şekil 4.10. Üç çelik bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

4.1.6. İki PEEK bant yöntemi

Deneilerin tamamında ilk olarak, özellikle ksifoid ve manubrium bölgesinde tellerin kemiği kestiği görülmüş ve ilk deneyde üçüncü boşluktaki tel düğüm bölgesinden kopmuştur. Yüklemedeki artışla beraber ilk olarak beşinci kaburga çıkıntısında vida bölgesinde, sonra dördüncü kaburga-gövde birleşiminde kırılmalar olmuştur. Bu noktadan sonra, ilk deneyde birinci kaburga boşluğuna yerleştirilen PEEK bant kilit kısmından sıyrılarak açılmış ve sonrasında üçüncü boşluktaki tel kemiği tamamen kesmiştir (Şekil 4.11a). Diğer deneylerde ise ksifoid kısmındaki telin hemen altında, gövdede kırılmalar oluşmuştur (Şekil 4.11b).



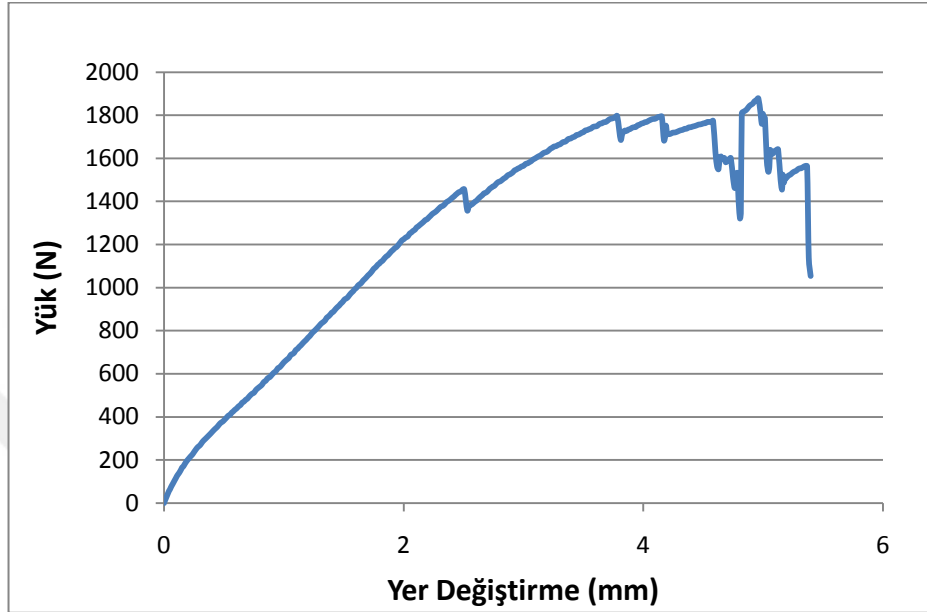
(a)



(b)

Şekil 4.11. İki PEEK bant yönteminin yanıl ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları

Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi aşağıda verilmiştir (şekil 4.12).



şekil 4.12. İki PEEK bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

4.1.7. Üç PEEK bant yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerde ilk olarak ksifoid daha sonra manubrium bölgesindeki teller kemiği kesmeye başlamış ve kemikteki ilk kırılma beşinci kaburga çıkıntısında vida bölgesinde oluşmuştur. Daha sonra üç deneyde de farklı durumlar gözlenmiştir. İlk deneyde, beşinci kaburga çıkıntısındaki kırılmanın ardından birinci kaburga boşluğundaki PEEK bant kilit kısmından sıyrılıp açılmış, sonrasında ikinci kaburga çıkıntısı hizasında gövdede kırılma meydana gelmiştir (şekil 4.13a). İkinci deneyde ise dördüncü kaburga çıkıntısında vida bölgesinde ve ardından üçüncü kaburga çıkıntısı hizasında gövdede kırılma oluşmuştur (şekil 4.13b). Son deneyde ise dördüncü kaburga-gövde birleşim yerinde kırılma olmuş sonrasında birinci kaburga boşluğundaki PEEK bant açılmış ve kemiğin üçüncü kaburga çıkıntısı hizasında gövdede kırılma meydana gelmiştir (şekil 4.13c).



(a)



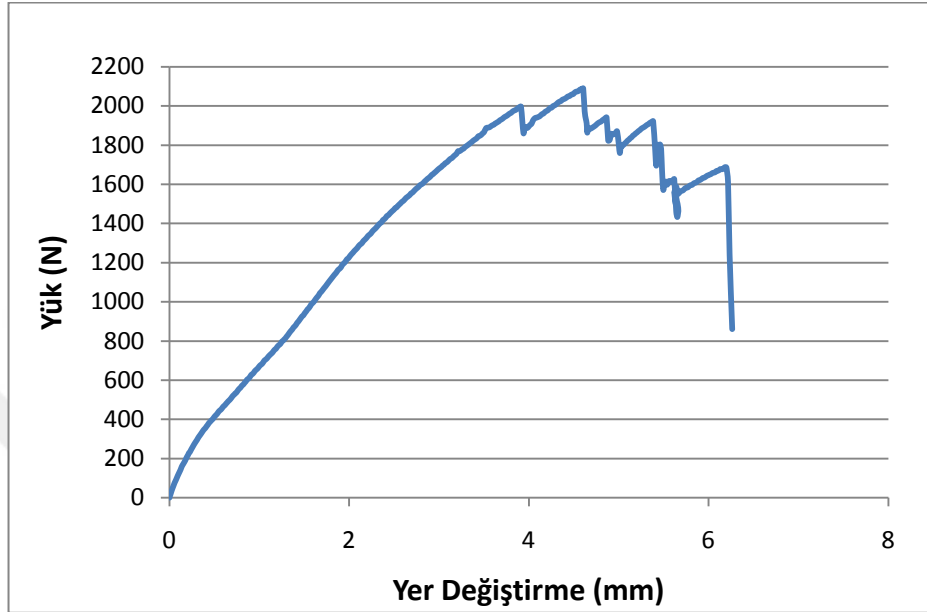
(b)



(c)

Şekil 4.13. Üç PEEK bant yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları

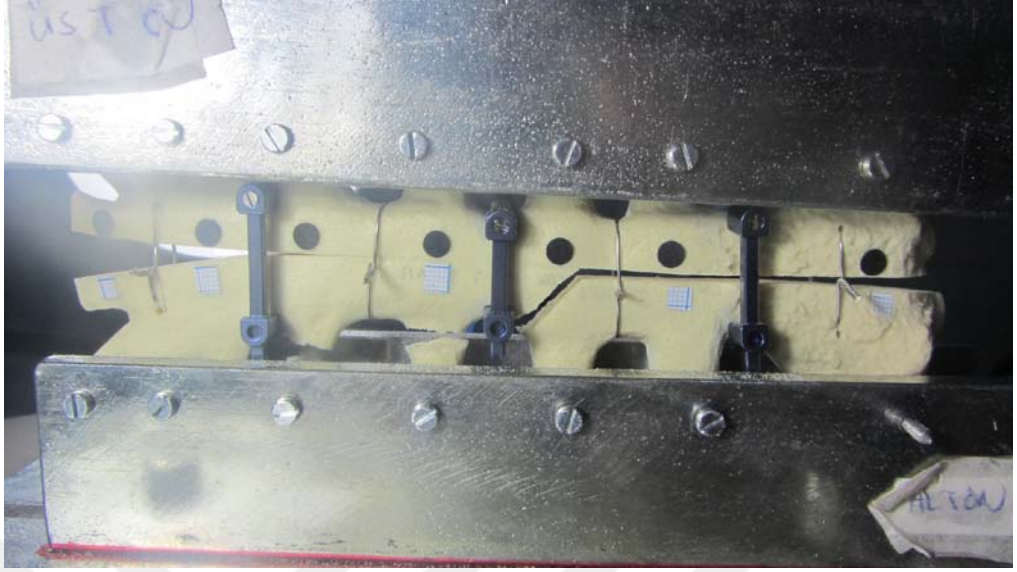
Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi aşağıda verilmiştir (şekil 4.14).



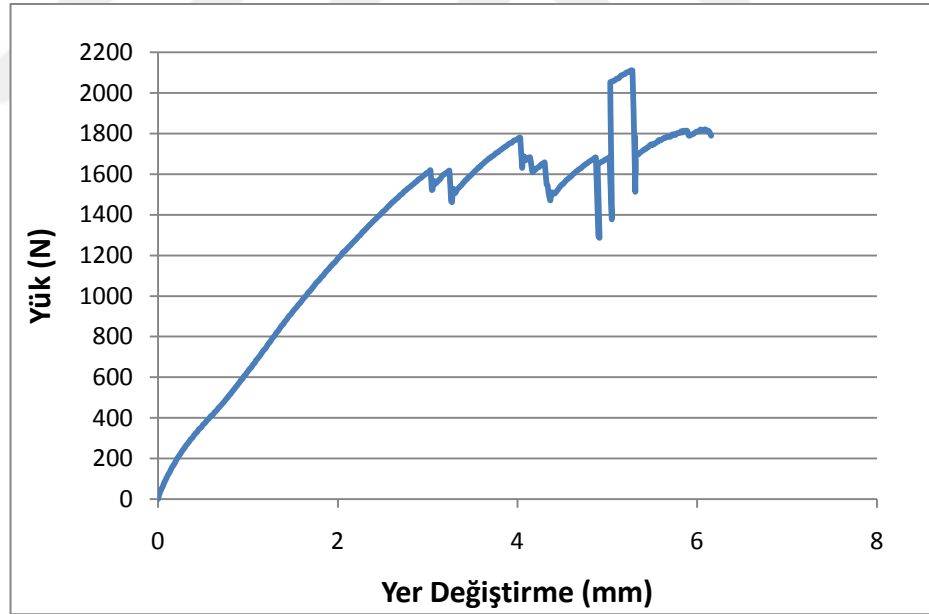
şekil 4.14. Üç PEEK bant yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

4.1.8. Titanyum klips yöntemi

Üç adet titanyum klips ve dört tane telin kullanıldığı bu yöntemle yapılan deneylerin hepsinde benzer göçme mekanizmalarının olduğu görülmüştür. Tellerin kesme etkisi en çok ksifoid ve sonrasında manubrium bölgesinde olmuş ve ilk olarak bu bölgelerde ayrılmalar meydana gelmiştir. Sonra, beşinci kaburga çıkıntısı vida bölgesinden kırılmış ve bunu takiben dördüncü kaburga-gövde birleşiminde ve üçüncü kaburga çıkıntısı hizasında gövdede kırılma meydana gelmiştir (şekil 4.15). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Titanyum klips yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması



Şekil 4.16. Titanyum klips yönteminin yanal ayrılma yüklemesi için yük-yer değiştirme eğrisi

4.1.9. Tek titanyum plâk yöntemi

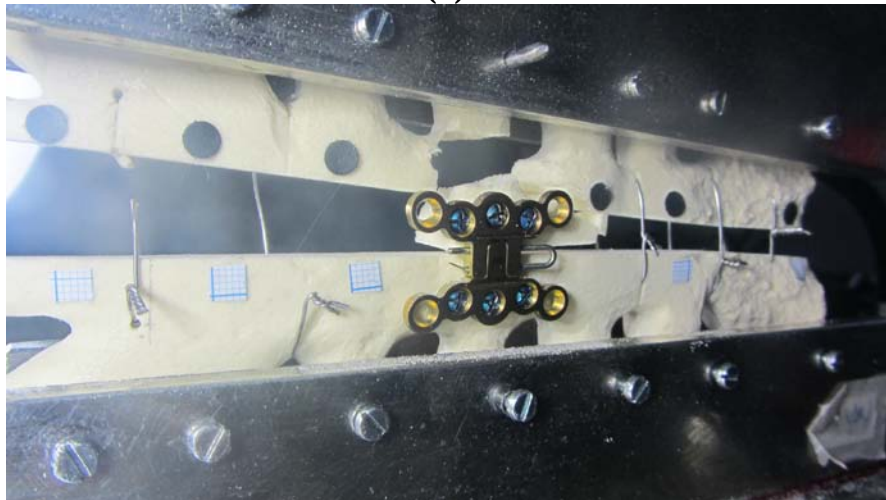
Bu yöntemin incelendiği deneylerde ilk olarak tellerin kemiği kesmesiyle özellikle ksifoid ve manubrium bölgelerinde kesi hattında ayrılmaların olduğu görülmüş, sonrasında ilk deneyde dördüncü ve beşinci kaburga çıkıntısından kemik kırılmıştır (Şekil 4.17a). İkinci deneyde, plâğın yerleştirildiği noktada kemikte kırılma meydana gelmiş (Şekil 4.17b), üçüncü deneyde ise önce beşinci kaburga boşluğuna yerleştirilen tel, düğüm noktasından kopmuş ve sonrasında plâğın olduğu noktada kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.17c). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



(a)

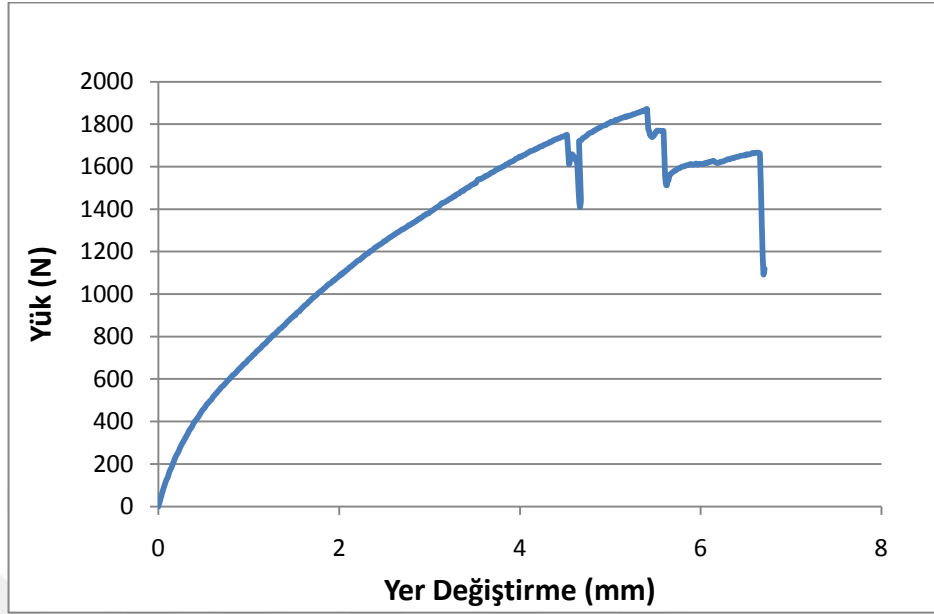


(b)



(c)

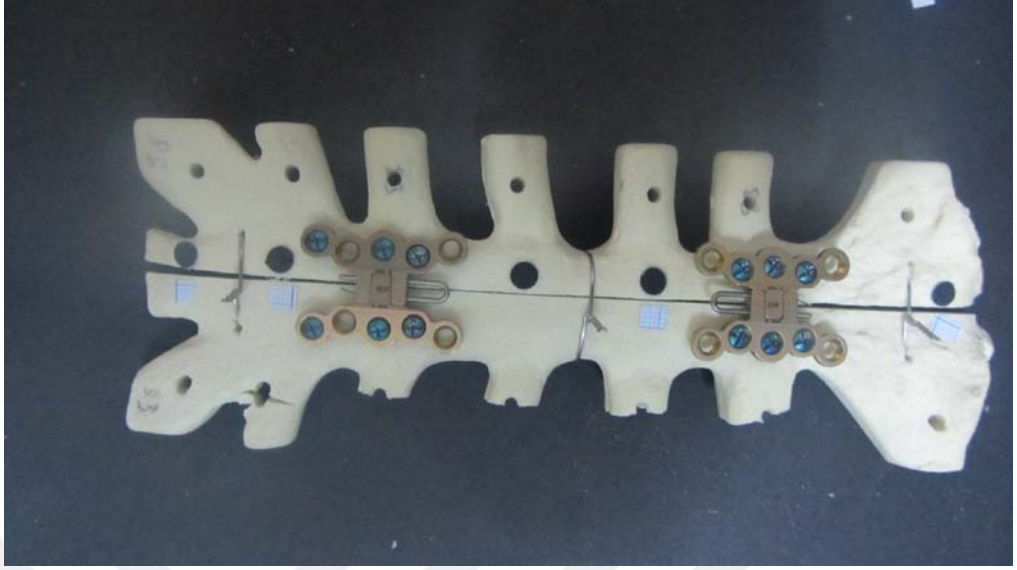
Şekil 4.17. Tek titanyum plâk yönteminin yanal ayrılma yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.18. Tek titanyum plâk yönteminin yanıl ayrılma yüklemesi için yük-yer değıştirme eğrisi

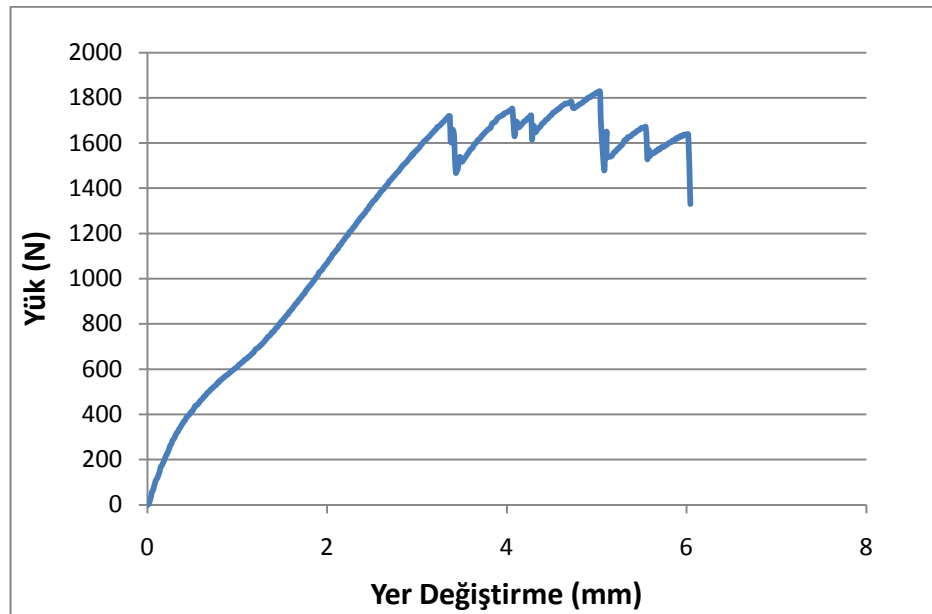
4.1.10. İki titanyum plâk yöntemi

Bu yöntemin incelendiğı deneylerin tamamında, önce ksifoid ve manubriumda bulunan tellerin kemiğı kesmeye başladığı, daha sonra beşinci kaburga çıkıntısında vida bölgesinde sternumun kırıldığı görülmüştür. Bunun ardından dördüncü, üçüncü ve ikinci kaburga çıkıntılarında kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. İki titanyum plâk yönteminin yanıl ayrılma yükü etkisinde göçme mekanizması

Denevlerden elde edilen ortalama yük-yer değıştirme eğrisi Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. İki titanyum plâk yönteminin yanıl ayrılma yüklemesi için yük-yer değıştirme eğrisi

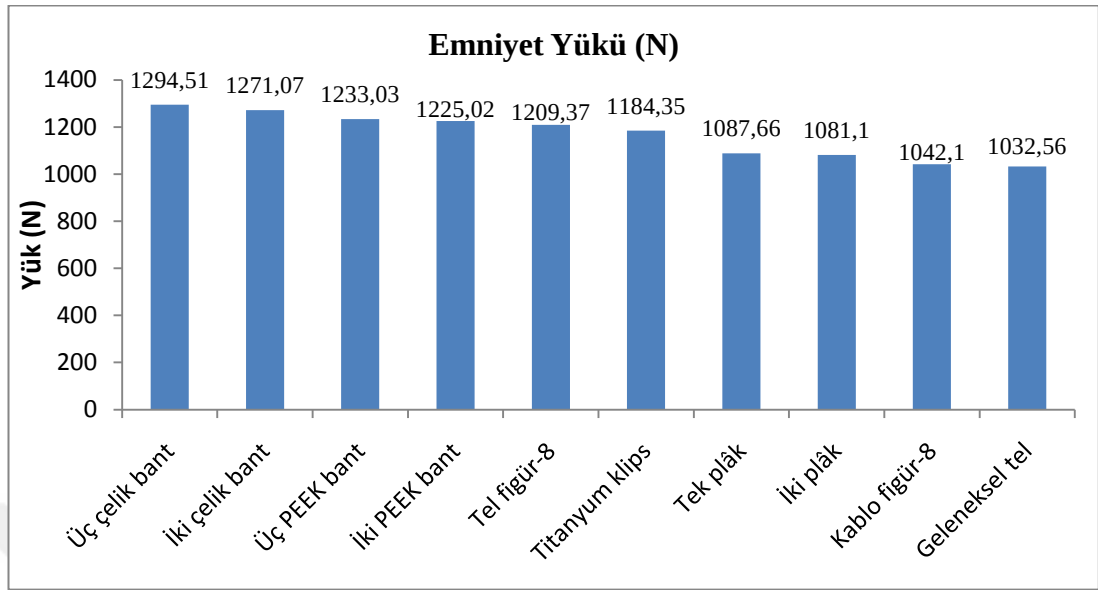
4.1.11. Yanal ayrılma deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Yanal ayrılma deneyinden elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir kapama yönteminin emniyet yükü, direngenliği, kopma yükü ve kopma uzaması değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler toplu olarak Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Yanal ayrılma yüklemesi deney sonuçları

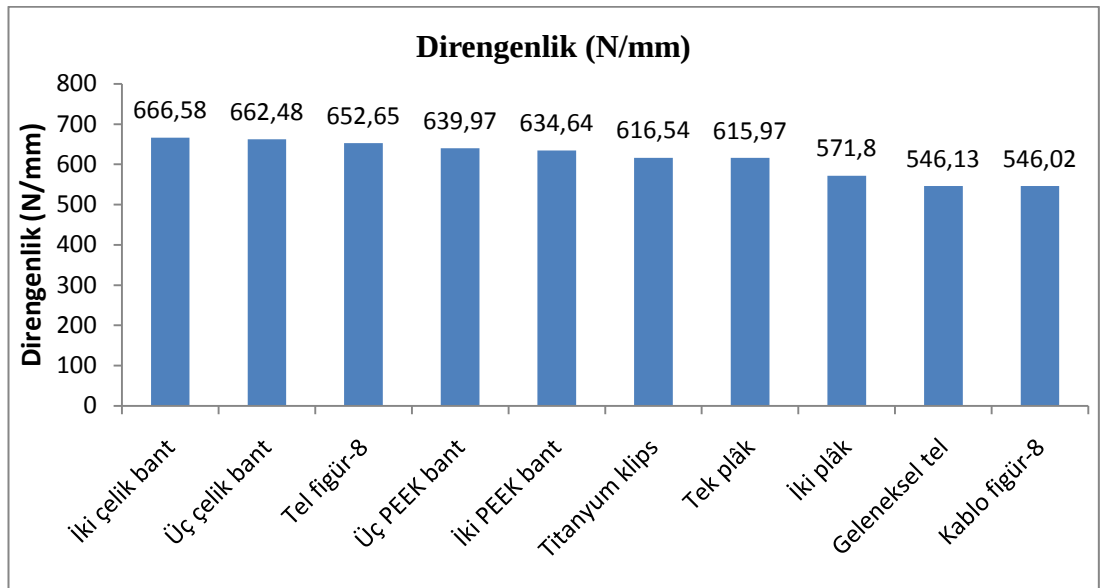
Yöntem	Emniyet Yükü (N)	Direngenlik (N/mm)	Kopma Yükü (N)	Kopma Uzaması (mm)
Geleneksel tel	1032,56	546,13	1702,9	6,28
Çelik tellerle figür-8	1209,37	652,65	1591,2	3,55
Çelik kablolarla figür-8	1042,1	546,02	2016,2	6,01
İki çelik bant	1271,07	666,58	1722,9	3,24
Üç çelik bant	1294,51	662,48	1820,7	3,11
İki PEEK bant	1225,02	634,64	1796,8	3,78
Üç PEEK bant	1233,03	639,97	1996,5	3,91
Titanyum klips	1184,35	616,54	1618,9	3,24
Tek titanyum plâk	1087,66	615,97	1749,5	4,52
İki titanyum plâk	1081,1	571,8	1718,2	3,35
Ortalama ± standart sapma	1166,1±96,8	615,3±45,6	1773,4±141,3	4,1±1,16

İncelenen kapama yöntemlerinin emniyet yükü (2 mm yer değiştirmeye karşılık gelen yük) değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.21’de verilmiştir. En büyük emniyet yükü değeri üç çelik bant yönteminde elde edilmiş, bunu iki çelik bant ve üç PEEK bant yöntemleri takip etmiştir. Çelik tellerle figür-8, titanyum klips ve iki PEEK bant yöntemlerinin emniyet yükleri birbirine oldukça yakın çıkmış, en küçük emniyet yükü ise geleneksel tel yönteminde bulunmuştur. Tek plâk ve iki plâk yöntemlerinin emniyet yüklerinin ise birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.21. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin emniyet yükleri

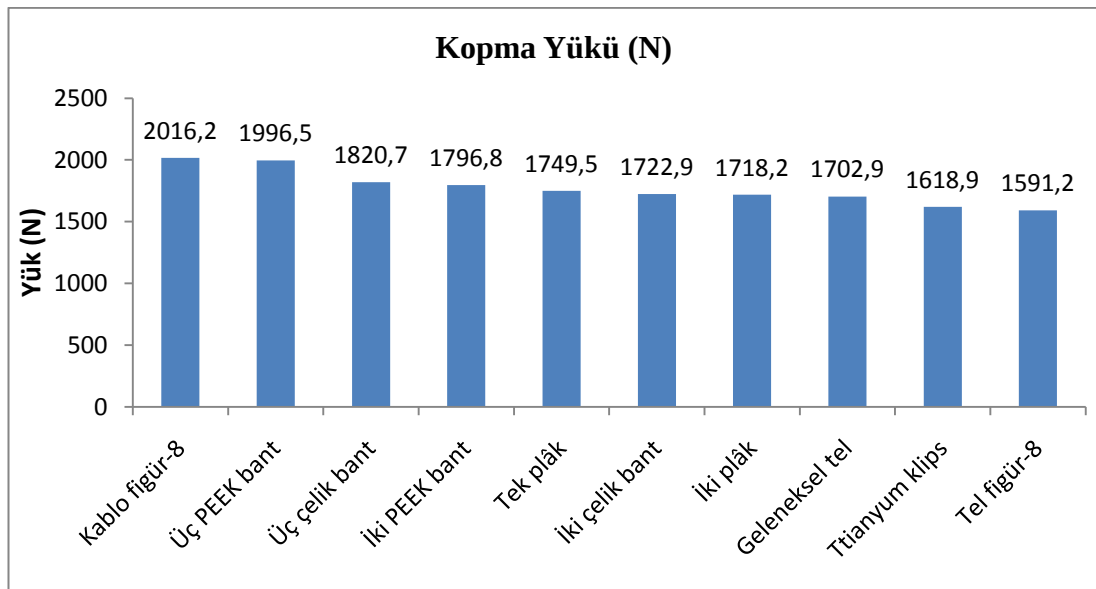
Kapama yöntemlerinin direngenlik değerleri Şekil 4.22’de verilmiştir. En direngen yöntemin, iki çelik bant yöntemi olduğu belirlenmiş, bu yöntemi sırasıyla üç çelik bant ve çelik tellerle figür-8 yöntemleri takip etmiştir. En düşük direngenlik değerleri ise kablolarla figür-8 ve geleneksel tel yöntemlerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.22. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin direngenlikleri

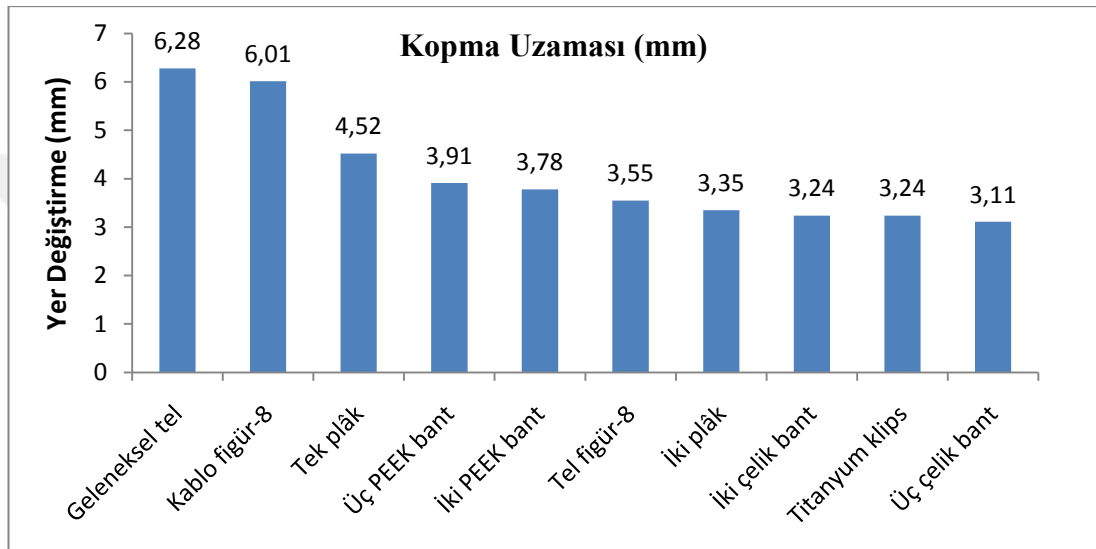
Üç çelik bant yönteminin emniyet yükü, iki çelik bant yönteminden daha yüksek olmasına rağmen, direngenlik değeri iki çelik bant yönteminden düşük çıkmıştır. Bu durumun, direngenlik değerinin hesaplandığı bölgede ki (eğrinin başlangıç noktası ile emniyet yükü değeri arasında kalan kısmı) dalgalanmalardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu dalgalanmalar nedeniyle, bu bölgeye yerleştirilen doğrunun eğiminde söz konusu farklılıklar oluşmaktadır. Emniyet yükü değerleri sıralaması ile direngenlik değerleri sıralamasında oluşan benzer farklılıkların da bu durumdan kaynaklandığı görülmüştür.

Kopma yükü değerlerinin karşılaştırılması ise Şekil 4.23’de verilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında ise en dayanıklı yöntemin, emniyet yükü ve direngenliği en düşük yöntemlerden biri olan kablolarla yapılan figür-8 yöntemi olduğu görülmüş, ikinci sıradaki üç PEEK bant yönteminin göçme yükü değeri de kablo yöntemine oldukça yakın çıkmıştır. Üçüncü sıradaki üç çelik bant yöntemini, sırasıyla iki PEEK bant ve tek plâk yöntemleri takip etmiş, en zayıf yöntemin ise çelik tellerle yapılan figür-8 yöntemi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.23. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma yükü değerleri

Karşılaştırılan yöntemlerin kopma uzaması değerleri Şekil 4.24’de verilmiştir. En küçük uzama değeri üç çelik bant yönteminde bulunmuş, bu yöntemi takip eden iki çelik bant ve titanyum klips yöntemlerinin kopma uzaması değerleri aynı çıkmıştır. En büyük uzama değerleri ise geleneksel tel ve kablolarla yapılan figür-8 yönteminde elde edilmiştir.



Şekil 4.24. Yanal ayrılma yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma uzaması değerleri

4.2. Boyuna Kesme Deneyi Bulguları

4.2.1. Geleneksel tel yöntemi

Bu yöntemin incelendiği deneylerde ilk olarak ksifoid bölgesine yerleştirilen telin kemiği kesmeye başladığı görülmüştür. İlk deneyde beşinci kaburga boşluğundaki tel düğüm noktasından kopmuş, ksifoid bölgesindeki tel tamamen sıyrılmış sonrasında ise bütün teller kemiği kesmeye başlamış, birinci ve ikinci kaburga hizasında sol gövdede kırılmalar olmuştur (Şekil 4.25a). İkinci ve üçüncü deneyde ilk kırılma ksifoid bölgesinde telin kemiği kesmesiyle oluşmuş sonrasında, ikinci deneyde manubriumda ki tel kopmuş ve kırılmalar sırasıyla üçüncü, dördüncü, beşinci ve birinci kaburga

boşlukları hizasında (Şekil 4.25b), üçüncü deneyde ise beşinci, dördüncü ve üçüncü kaburga boşlukları hizasında gövdede olmuştur. Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.26’da gösterilmiştir.

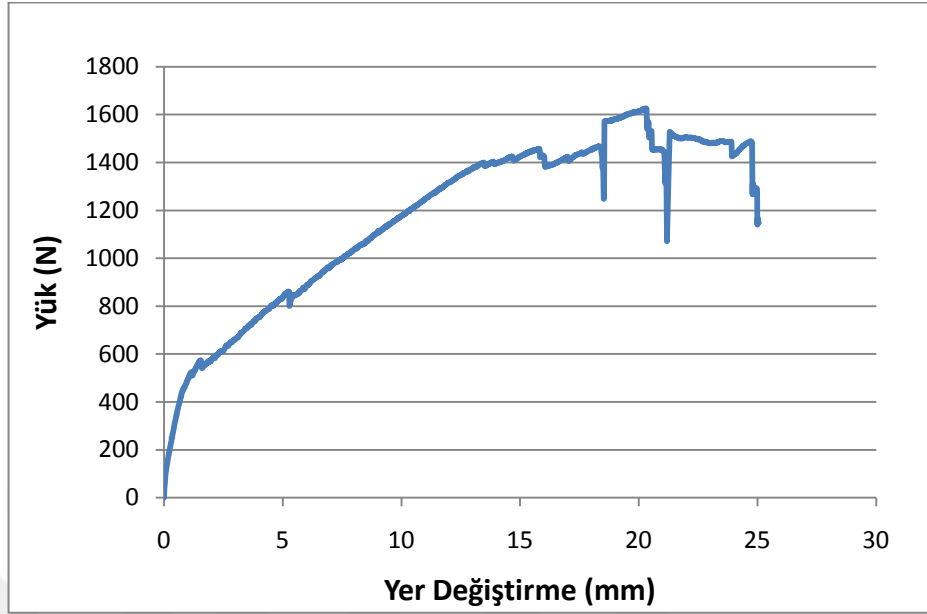


(a)



(b)

Şekil 4.25. Geleneksel tel yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



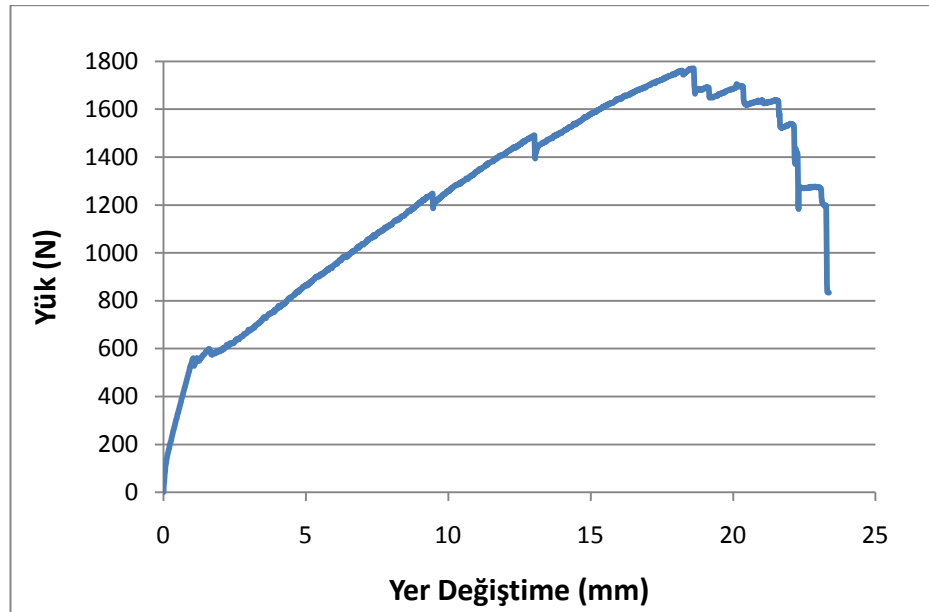
Şekil 4.26. Geleneksel tel yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerde manubrium ve ksifoid bölgesindeki tellerin kemiği kesmeye başlamasından sonra, iki deneyde manubriumda bulunan tel düğüm noktasından kopmuştur. Bununla birlikte bütün deneylerde benzer göçme mekanizmaları oluşmuş, ilk olarak sağdaki üçüncü, dördüncü ve beşinci kaburga-gövde birleşim bölgeleri kırılmış sonrasında ikinci kaburga boşluğu hizasında gövdede kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.27). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Çelik tellerle figür-8 yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde göçme mekanizması



Şekil 4.28. Çelik tellerle figür-8 yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi

Deneylerde yüklemeyle birlikte manubrium ve ksifoid bölgesinde bulunan teller kemikleri kesmeye başlamış, sonrasında iki deneyde kırılmalar kemiğin sağ tarafında ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci kaburga-gövde birleşiminde (Şekil 4.29a), birinde ise kemiğin sol tarafında ikinci, üçüncü ve dördüncü birleşim bölgelerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.29b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.30’da gösterilmiştir.



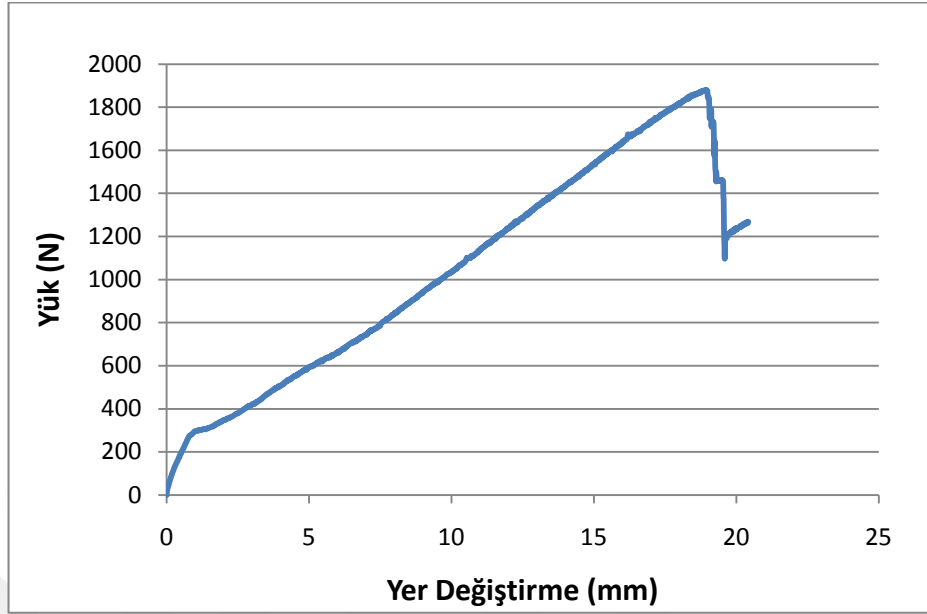


(a)



(b)

Şekil 4.29. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.30. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.4. İki çelik bant yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerde ilk olarak manubrium ve ksifoid bölgelerindeki teller kemiği kesmeye başlamıştır. Yükleme ilerledikçe, iki deneyde sağda üçüncü, dördüncü ve beşinci kaburga-gövde birleşimlerinde ve solda ikinci kaburga boşluğu hizasında gövdede kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.31a). Bir deneyde ise, üçüncü boşluktaki telde kopma, sağda beşinci ve solda ikinci, üçüncü ve dördüncü kaburga-gövde birleşimleri ile dördüncü boşluk civarında gövdede kırılma oluşmuştur (Şekil 4.31b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.32’de gösterilmiştir.

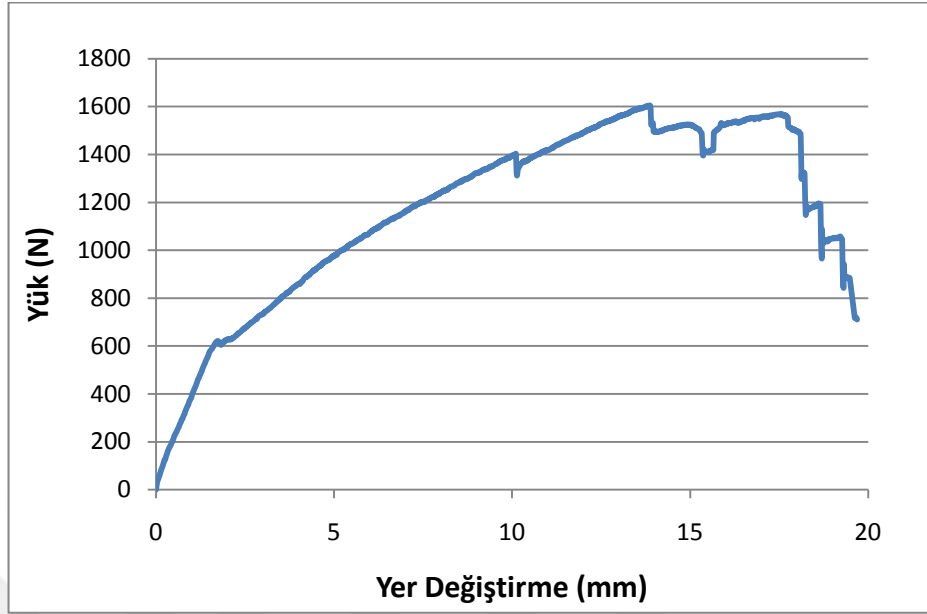


(a)



(b)

Şekil 4.31. İki çelik bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.32. İki çelik bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.5. Üç çelik bant yöntemi

Bu yöntemin boyuna kesme deneylerinde ilk olarak ksifoid ve manubrium bölgesindeki teller kemiği kesmeye başlamış sonra kemik, bir deneyde sol taraf ikinci kaburga-gövde birleşiminden ve üçüncü boşluk hizasında gövdeden kırılmıştır (Şekil 4.33a). İki deneyde ise sağ taraftaki kaburga-gövde birleşimlerinin tamamında ve üçüncü boşluktaki çelik bandın hizasında gövdede kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.33b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.34’de gösterilmiştir.

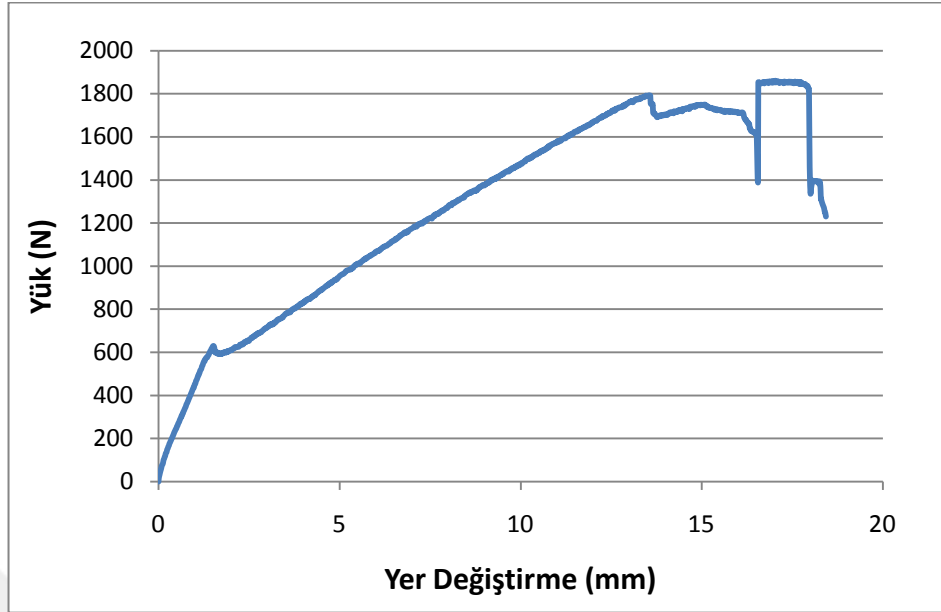


(a)



(b)

Şekil 4.33. Üç çelik bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.34. Üç çelik bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.6. İki PEEK bant yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerde ilk olarak ksifoid ve manubriumda bulunan teller kemiği kesmeye başlamıştır. İki deneyde sağda ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci, solda ikinci kaburga-gövde birleşimlerinde ve üçüncü boşluk civarında gövdede kırılmalar olmuştur (Şekil 4.35a). Deneylerin birinde ise birinci boşluktaki PEEK bant kilit kısmından sıyrılıp açılmış ve sonrasında sırasıyla, sol dördüncü ve sağ beşinci kaburga-gövde birleşimleri kırılmış, ardından ikinci boşluktaki PEEK bant açılmış ve solda dördüncü boşlukta gövdede kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.35b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.36’da gösterilmiştir.

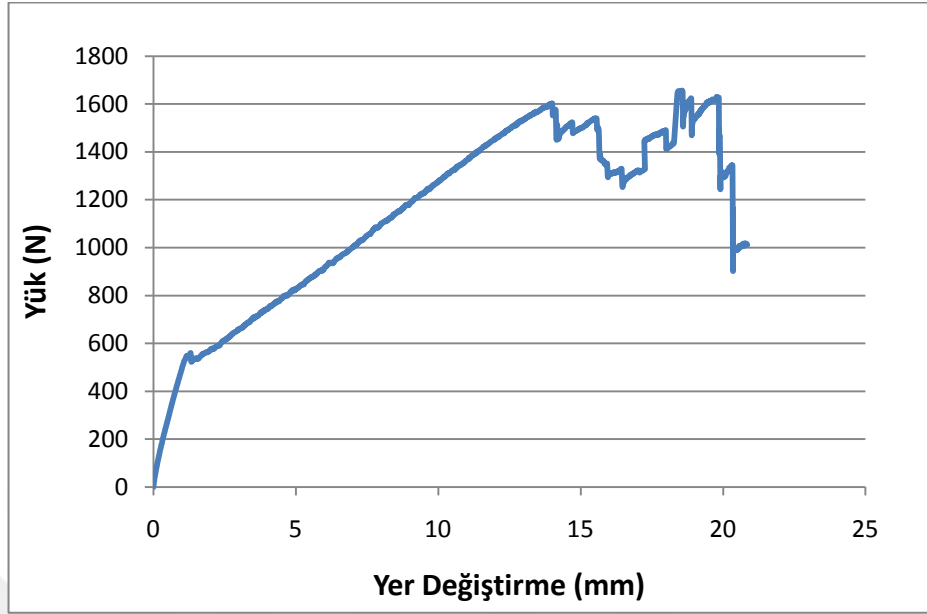


(a)



(b)

Şekil 4.35. İki PEEK bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



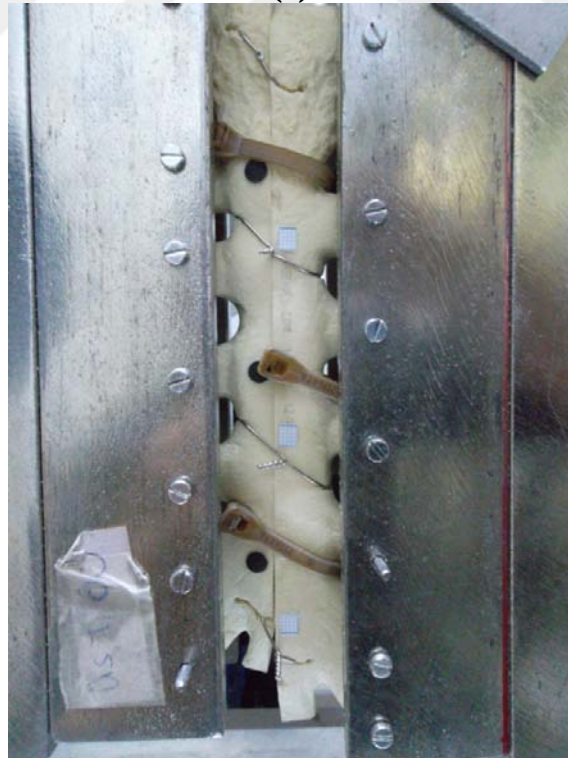
Şekil 4.36. İki PEEK bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.7. Üç PEEK bant yöntemi

Deneylerde manubrium ve ksifoid bölgesindeki tellerin kesme etkisinin ardından ilk olarak, iki deneyde sağ tarafta üçüncü, dördüncü, beşinci ve ikinci kaburga-gövde birleşimlerinde kırılmalar olmuştur (Şekil 4.37a). Bir deneyde ise üçüncü boşluktaki PEEK bant açılmış ve ksifoid bölgesinde kırılma meydana gelmiş, ardından birinci boşluktaki PEEK bant açılmış ve solda beşinci ile dördüncü kaburga çıkıntılarının vida bölgelerinde kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.37b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.38'de gösterilmiştir.

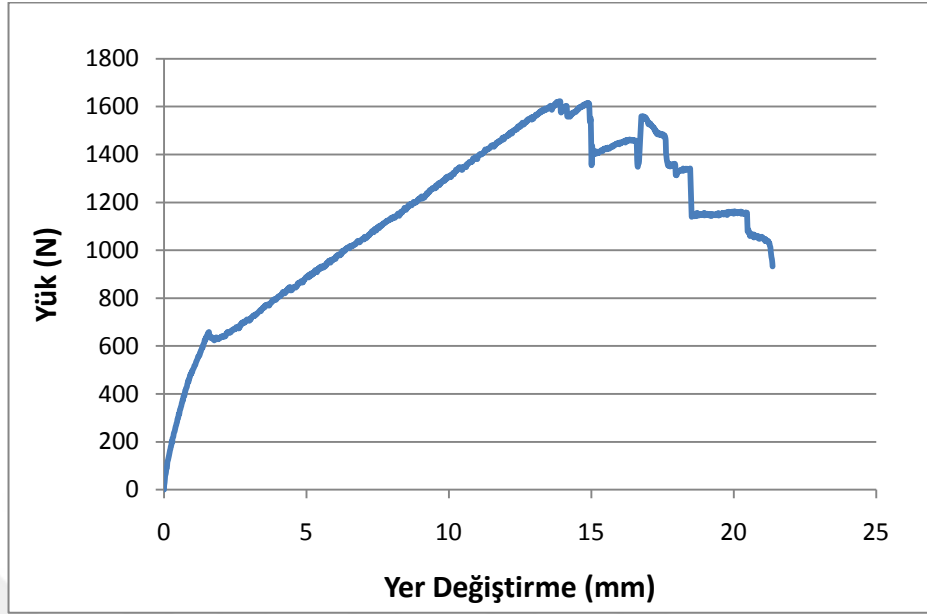


(a)



(b)

Şekil 4.37. Üç PEEK bant yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.38. Üç PEEK bant yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.8. Titanyum klips yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerde özellikle ksifoid bölgesinde teller kemiği kesmeye başlamış, sonra iki deneyde sağ tarafta beşinci, dördüncü ve üçüncü, solda ise ikinci, üçüncü ve dördüncü kaburga-gövde birleşimleri ile dördüncü kaburga boşluğu hizasında gövdede kırılmalar oluşmuştur (Şekil 4.39a). Bir deneyde ise sadece sağ tarafta beşinci ve dördüncü kaburga-gövde birleşimleri ile üçüncü boşluk civarında gövdede kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.39b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.40'da gösterilmiştir.

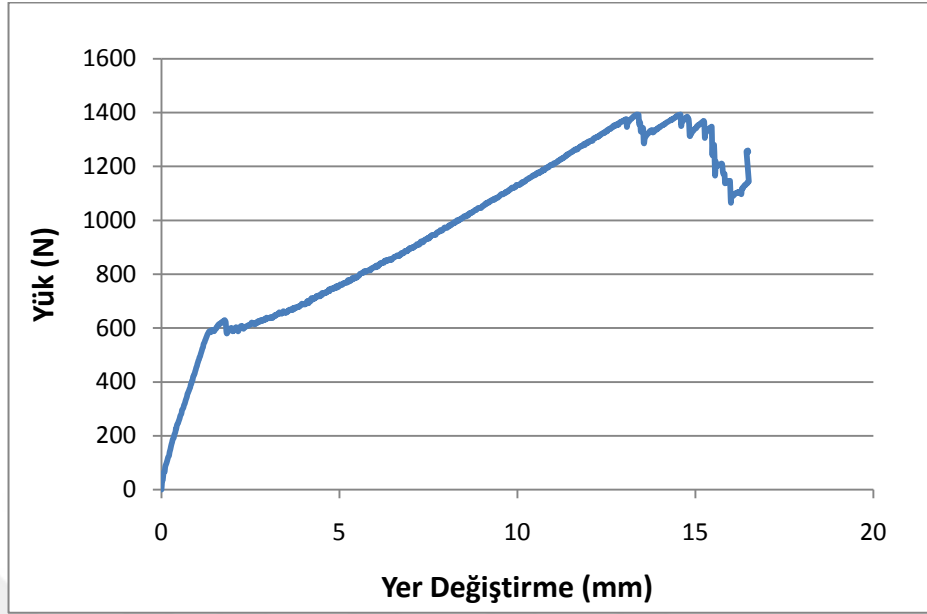


(a)



(b)

Şekil 4.39. Titanyum klips yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.40. Titanyum klips yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.9. Tek titanyum plâk yöntemi

Bu yöntemde, yüklemeyle birlikte ksifoid bölgesinde ki tel kemiği kesmeye başlamış ve iki deneyde önce beşinci kaburga–gövde birleşiminde, sonra plâğın sol üst kısmında gövdede kırılma olmuştur (Şekil 4.41a). Bir deneyde ise beşinci ve altıncı kaburga–gövde birleşimi ile plâğın sol üst kısmında gövde de kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.41b). Sternumdaki bütün tellerin kemiği kestiği görülmüştür. Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.42’de gösterilmiştir.

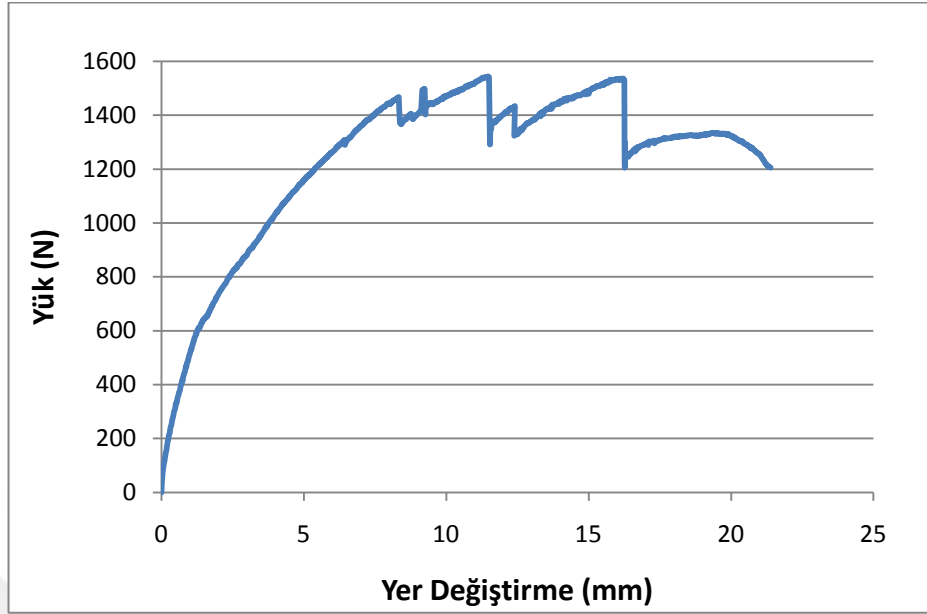


(a)



(b)

Şekil 4.41. Tek titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.42. Tek titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.10. İki titanyum plâk yöntemi

Bu yöntemde yapılan deneylerde ilk olarak manubrium ve ksifoid bölgesindeki teller kemiği kesmeye başlamıştır. Yüklemeyle birlikte plâkların da dönmeye başladığı ve vidaların kemiği kestiği görülmüştür. İlk deneyde, birinci plâğın vidaları kemiği kesmiş ayrıca sağ tarafta üçüncü, dördüncü ve altıncı kaburga-gövde birleşimlerinde kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.43a). İkinci deneyde de birinci ve ikinci plâğın vidaları kemiği tamamen kesmiş, üçüncü deneyde ise ikinci plâk vidaları kemiği kesmiş ve sol taraf üçüncü, dördüncü ve beşinci kaburga-gövde birleşimlerinde kırılma oluşmuştur (Şekil 4.43b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.44’de gösterilmiştir.

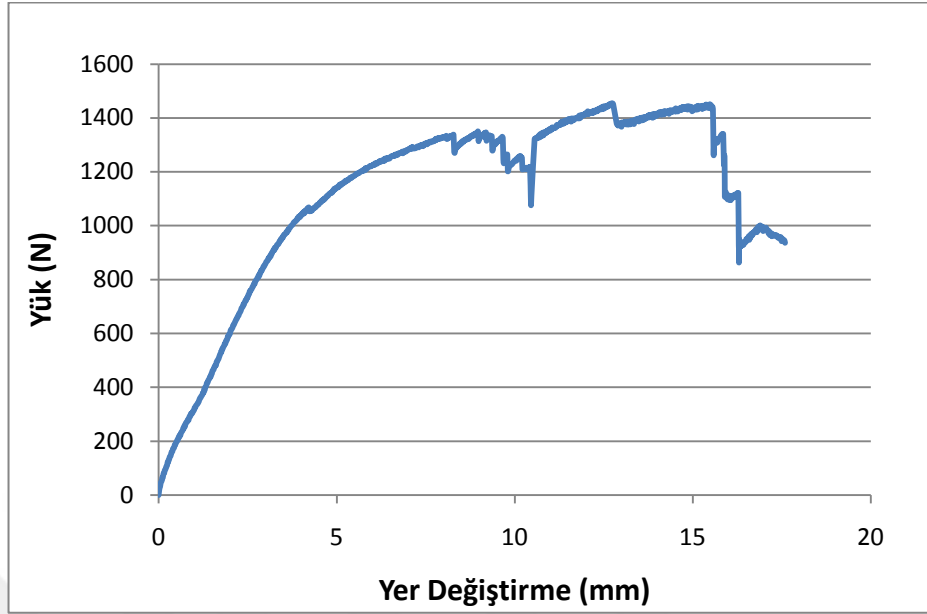


(a)



(b)

Şekil 4.43. İki titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.44. İki titanyum plâk yönteminin boyuna kesme yüklemede yük-yer değiştirme eğrisi

4.2.11. Boyuna kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

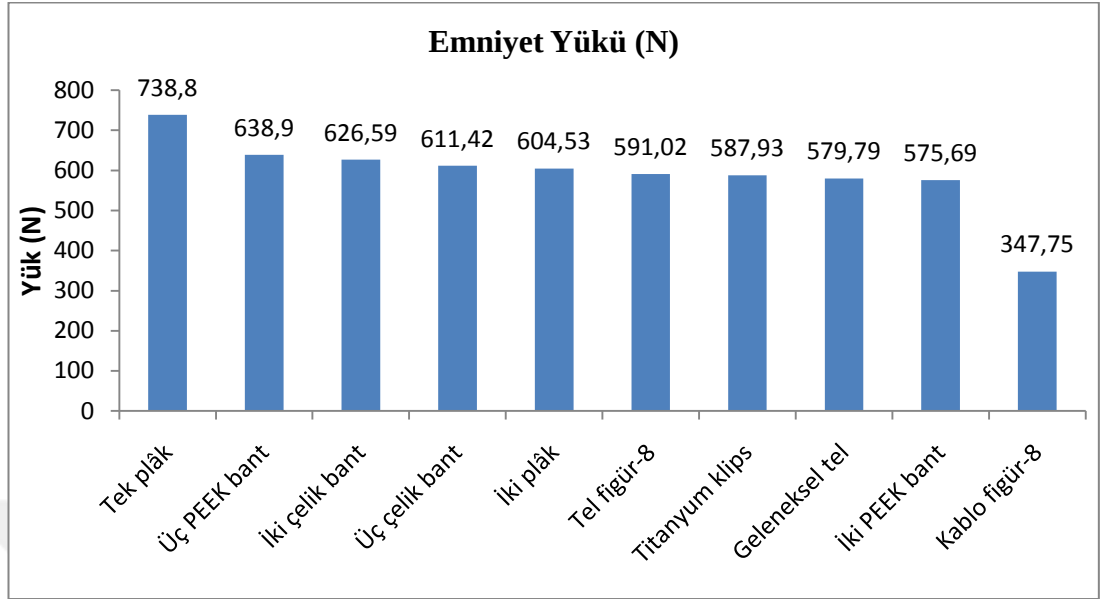
Boyuna kesme deneylerinden elde edilen grafiklerin tamamında yük-yer değiştirme eğrisinin bilineer (çift doğrusal) bir forma sahip olduğu görülmüştür. Tek titanyum plâk ve iki titanyum plâk dışındaki yöntemlerde daha belirgin olan bu durumun, sternumu kaburga boşluklarından saran kapama malzemelerinin yüklemeyle birlikte, malzemelere uygulanan ön gerilme ve temas noktalarındaki sürtünmenin etkisiyle, önce sternumla beraber harekete zorlanması ve daha sonra sternum parçaları arasındaki sürtünmenin aşılması ve malzemelerin kemik üzerindeki kesme ve gömülme etkilerinin artmasıyla, sistemin farklı davranışlar sergilemesinden kaynaklandığı görülmüştür. Plâkların kullanıldığı kapamalarda ise, sternumun içine gömülen vidaların etkisiyle bu durum, özellikle iki titanyum plâk yönteminde, çok daha düşük seviyede meydana gelmiştir.

Boyuna kesme deneyinden elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir kapama yönteminin emniyet yükü, direngenliği, kopma yükü ve kopma uzaması değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler toplu olarak Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Boyuna kesme yüklemesi deney sonuçları

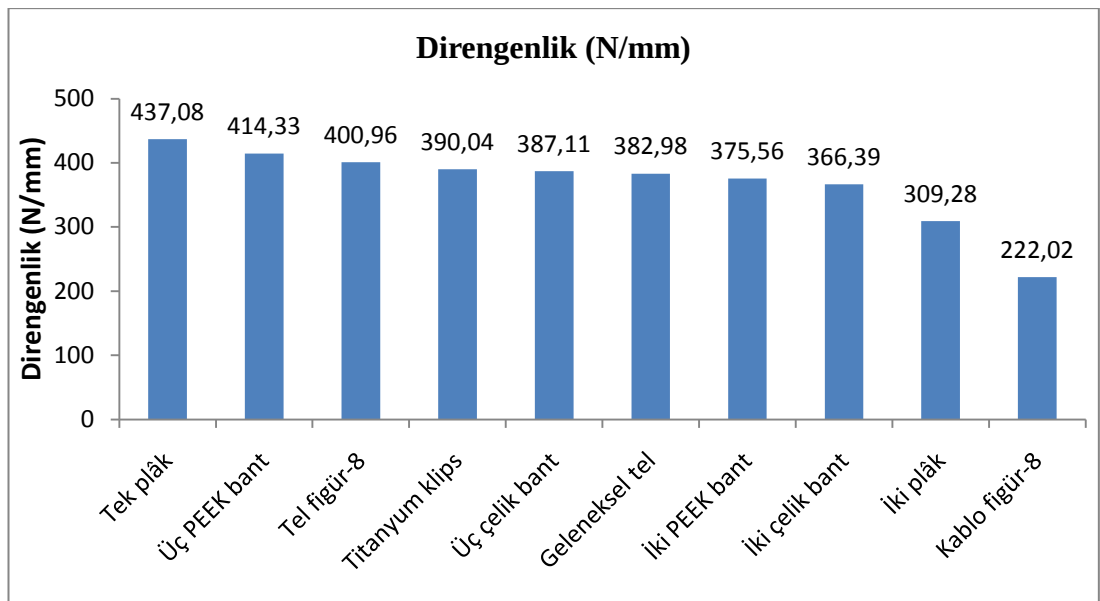
Yöntem	Emniyet Yüğü (N)	Direngenlik (N/mm)	Kopma Yüğü (N)	Kopma Uzaması (mm)
Geleneksel tel	579,79	382,98	1458,2	15,79
Çelik tellerle figür-8	591,02	400,96	1771,1	18,62
Çelik kablolarla figür-8	347,75	222,02	1880,5	18,92
İki çelik bant	626,59	366,39	1605,7	13,87
Üç çelik bant	611,42	387,11	1791,9	13,58
İki PEEK bant	575,69	375,56	1602,5	14
Üç PEEK bant	638,9	414,33	1622,4	13,91
Titanyum klips	587,93	390,04	1393,3	13,35
Tek titanyum plâk	738,8	437,08	1467,5	8,33
İki titanyum plâk	604,53	309,28	1338,4	8,28
Ortalama ± standart sapma	590,2±97,5	368,6±61,4	1593,2±180,6	13,9±3,6

İncelenen kapama yöntemlerinin, boyuna kesme etkisinde emniyet yüğü değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.45’de verilmiştir. En büyük emniyet yüğü değeri tek plâk yönteminde elde edilmiş, bu yöntemi üç PEEK bant ve iki çelik bant yöntemleri takip etmiştir. En düşük emniyet yükünün ise kablolarla yapılan figür-8 yönteminde olduğu belirlenmiştir.



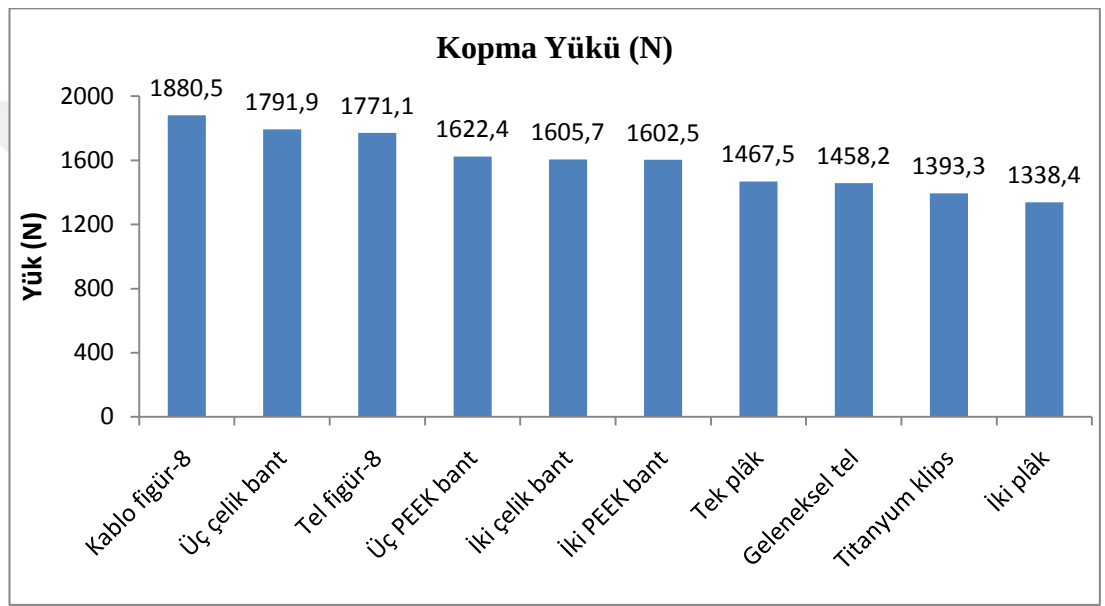
Şekil 4.45. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin emniyet yükleri

Kapama yöntemlerinin direngenlik değerleri Şekil 4.46’da verilmiştir. En direngen yöntemin tek plâk yöntemi olduğu belirlenmiş, bu yöntemi sırasıyla iki PEEK bant ve tellerle figür-8 yöntemleri takip etmiştir. En düşük direngenlik değeri ise kablolarla figür-8 yönteminde elde edilmiştir.



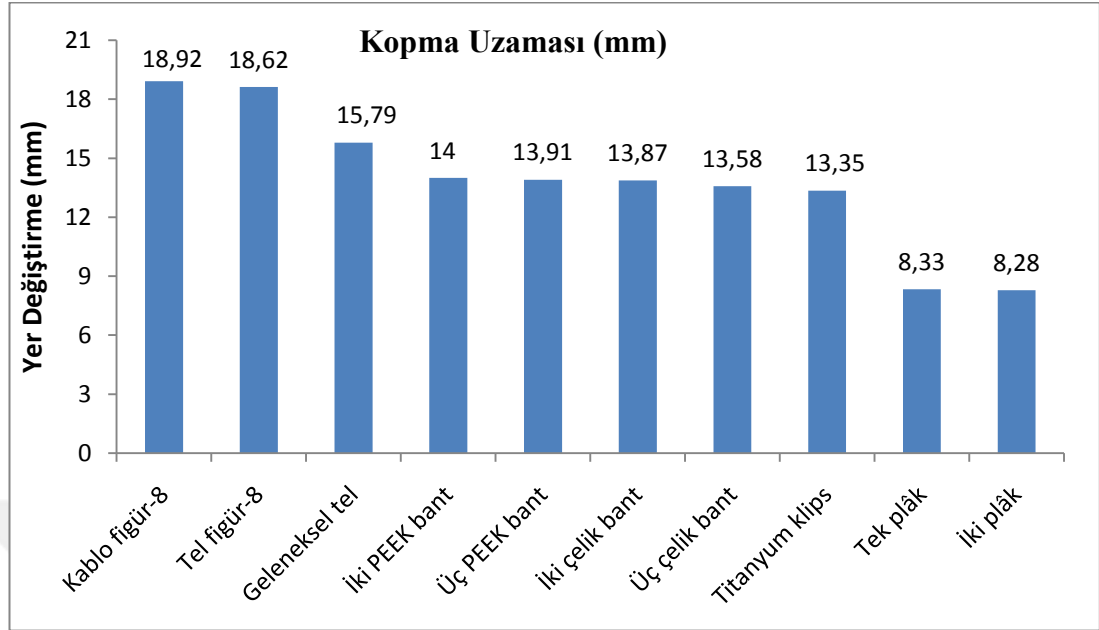
Şekil 4.46. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin direngenlikleri

Kopma yükü değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.47’de verilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında ise en dayanıklı yöntemin kablolarla yapılan figür-8 yöntemi olduğu görülmüş, ikinci ve üçüncü sıradaki üç çelik bant ve tel figür-8 yöntemlerinin göçme yükü değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Bu yöntemleri, üç PEEK bant ve iki çelik bant yöntemleri takip etmiş, kopma yükü en düşük yöntemlerin ise iki plâk ve titanyum klips yöntemleri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.47. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma yükü değerleri

Karşılaştırılan yöntemlerin kopma uzaması değerleri ise Şekil 4.48’de verilmiştir. En küçük iki uzama değeri sırasıyla, iki plâk ve tek plâk yöntemlerinde bulunmuş, bu yöntemleri titanyum klips yöntemi takip etmiştir. En büyük uzama değerleri ise kablolarla yapılan figür-8 ve tellerle yapılan figür-8 yöntemlerinde görülmüştür.

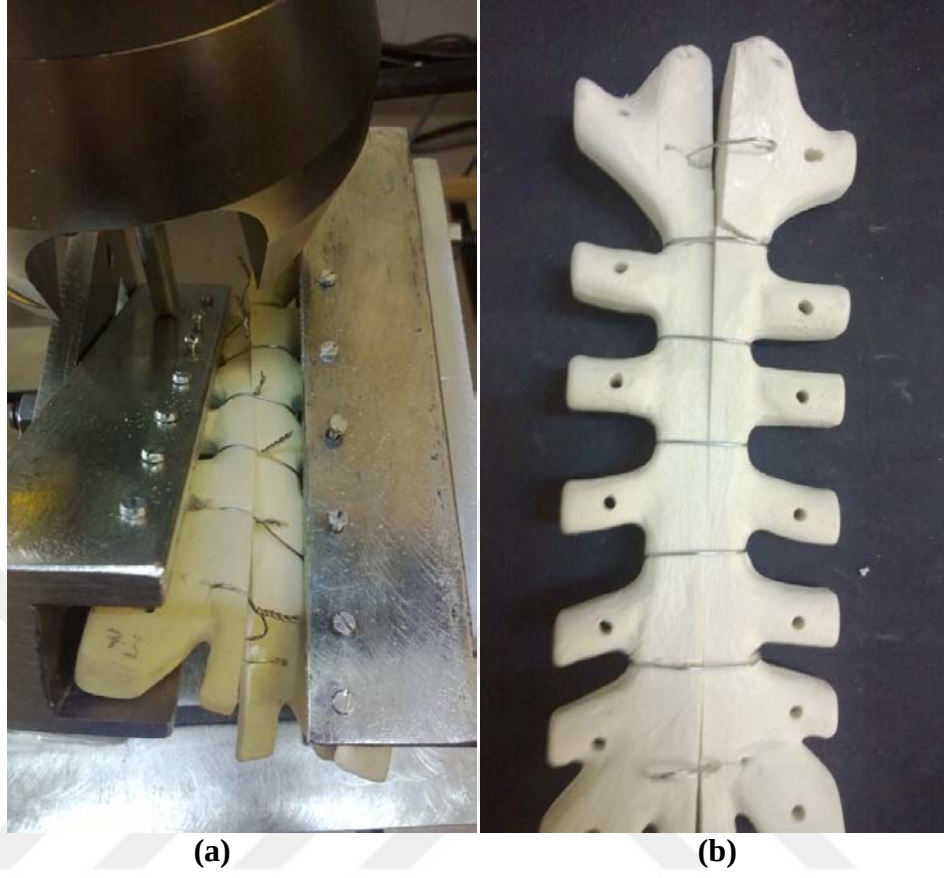


Şekil 4.48. Boyuna kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma uzaması değerleri

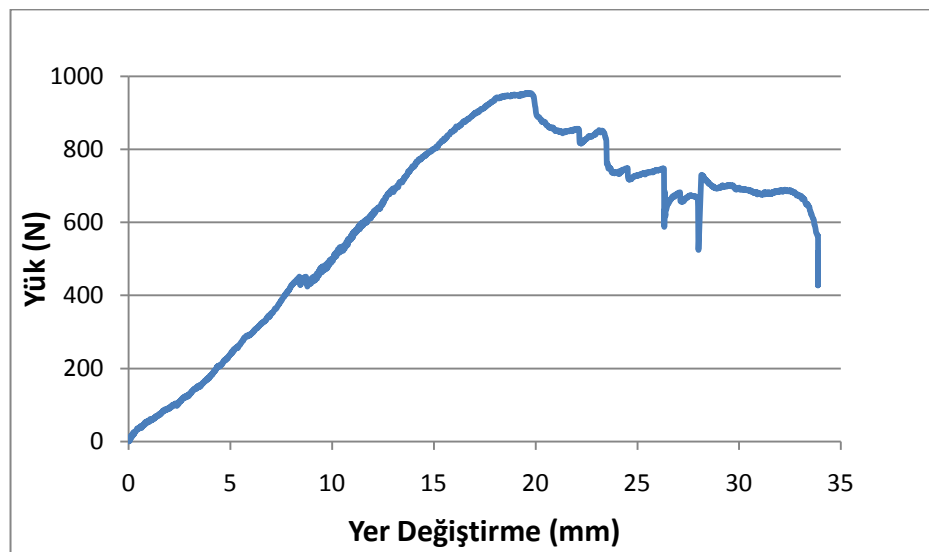
4.3. Enine Kesme Deneyi Bulguları

4.3.1. Geleneksel tel yöntemi

Bu yöntemin incelendiği deneylerde ilk olarak manubrium ve ksifoid bölgesinde bulunan tellerin kemiği kesmeye başladığı görülmüş ve üç deneyde de bu teller tamamen kemikten sıyrılmıştır. İki deneyde kemik, sol taraf birinci kaburga boşluğundan (Şekil 4.49a), bir deneyde ise sol taraf birinci ve beşinci boşluklardan kırılmıştır (Şekil 4.49b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.50’de gösterilmiştir.



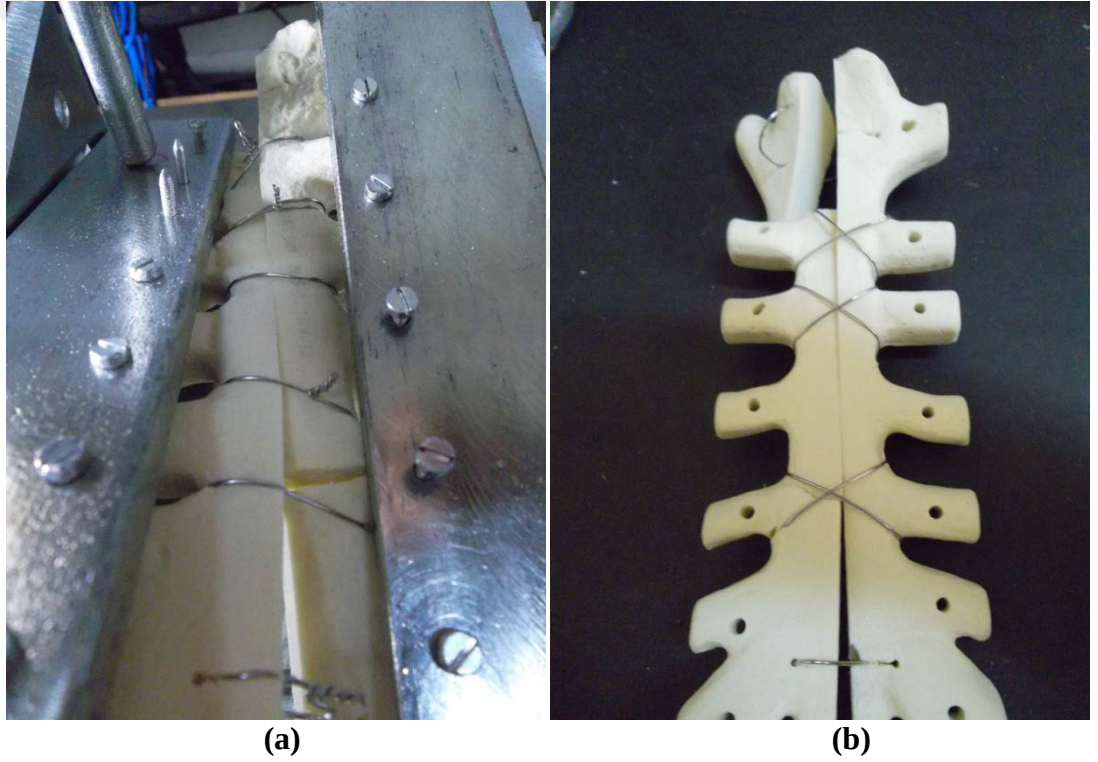
Şekil 4.49. Geleneksel tel yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



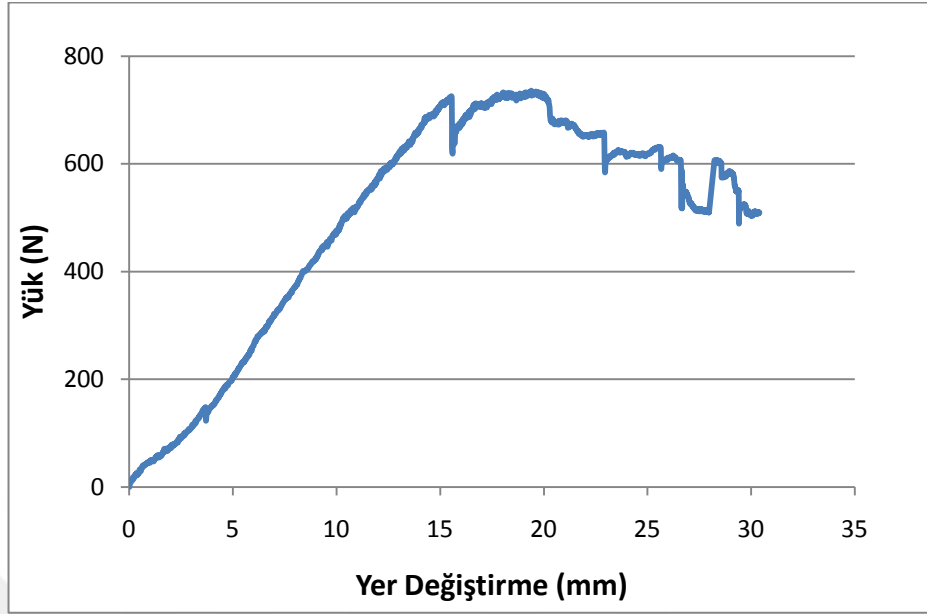
Şekil 4.50. Geleneksel tel yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.2. Çelik tellerle figür-8 yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerde, ilk olarak manubrium ve ksifoid bölgesinde teller kemiği kesmeye başlamış, sonrasında iki deneyde bu teller kemikten tamamen sıyrılmış ve sol taraf beşinci kaburga hizasından kemik kırılmıştır (Şekil 4.51a). Bir deneyde ise manubrium bölgesinde ki tel kırılmış ve kemiğin sol tarafında beşinci ve birinci kaburga hizasında kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.51b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.52’de gösterilmiştir.



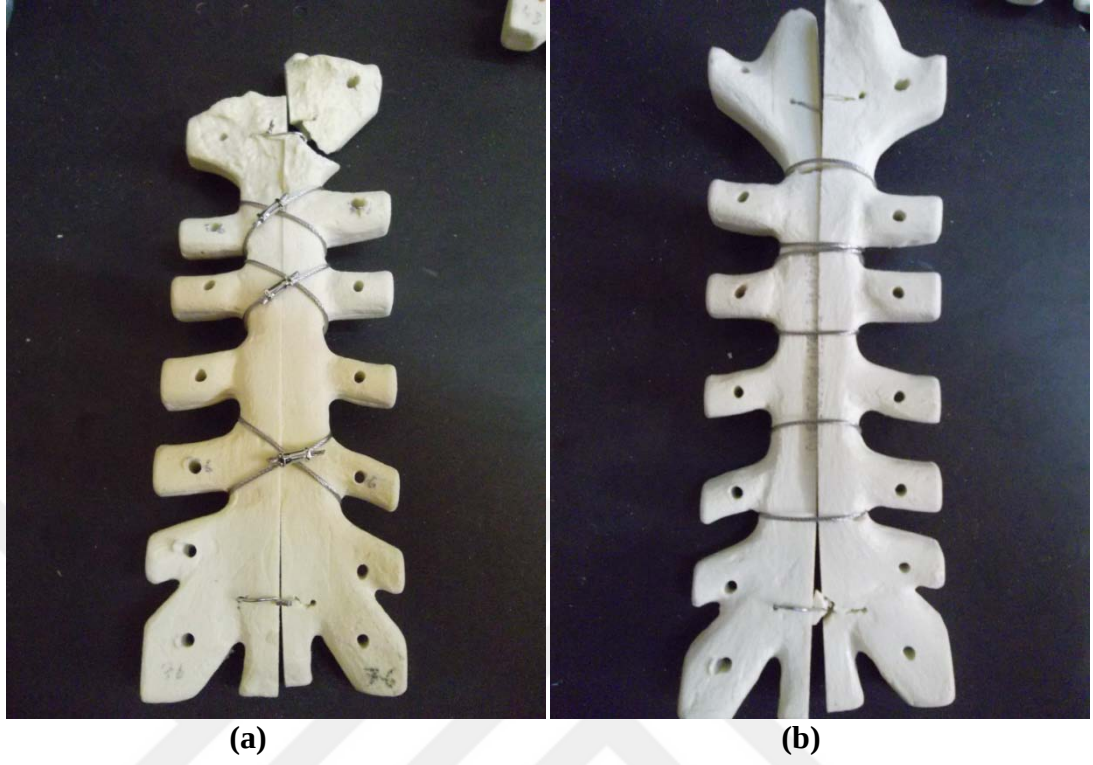
Şekil 4.51. Çelik tellerle figür-8 yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



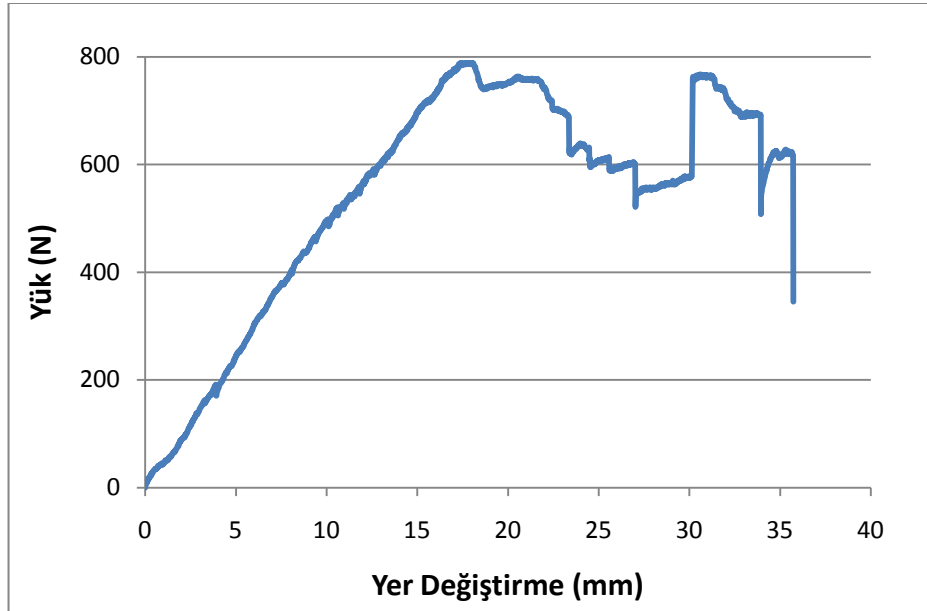
Şekil 4.52. Çelik tellerle figür-8 yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.3. Çelik kablolarla figür-8 yöntemi

Bu yöntemin incelendiği deneylerin ilkinde ksifoid ve manubrium bölgesinde teller kemiği kesmeye başlamış, sonrasında manubriumda ki telin hizasından kemik kırılmıştır (Şekil 4.53a). İkinci ve üçüncü deneylerde ise, ksifoid ve manubriumda teller kemiği tamamen keserek sıyrılmış ve kemik, sol birinci ve sağ beşinci kaburga boşluğu hizasından kırılmıştır (Şekil 4.53b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.54’da gösterilmiştir.



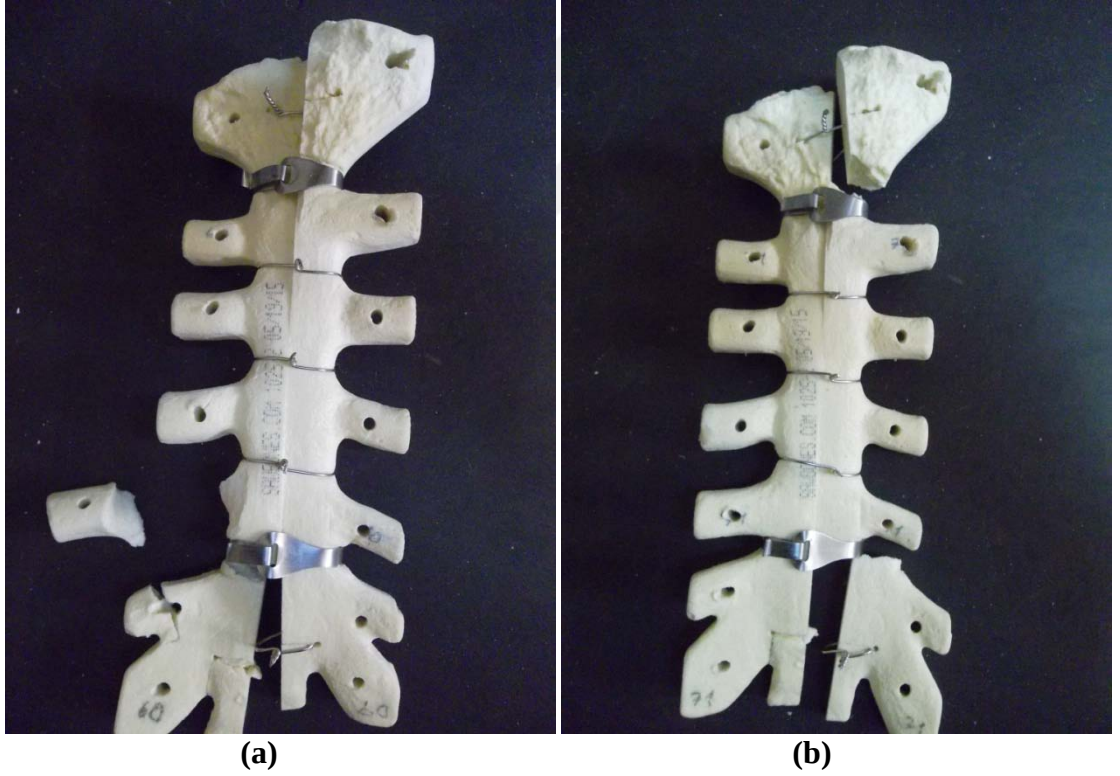
Şekil 4.53. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



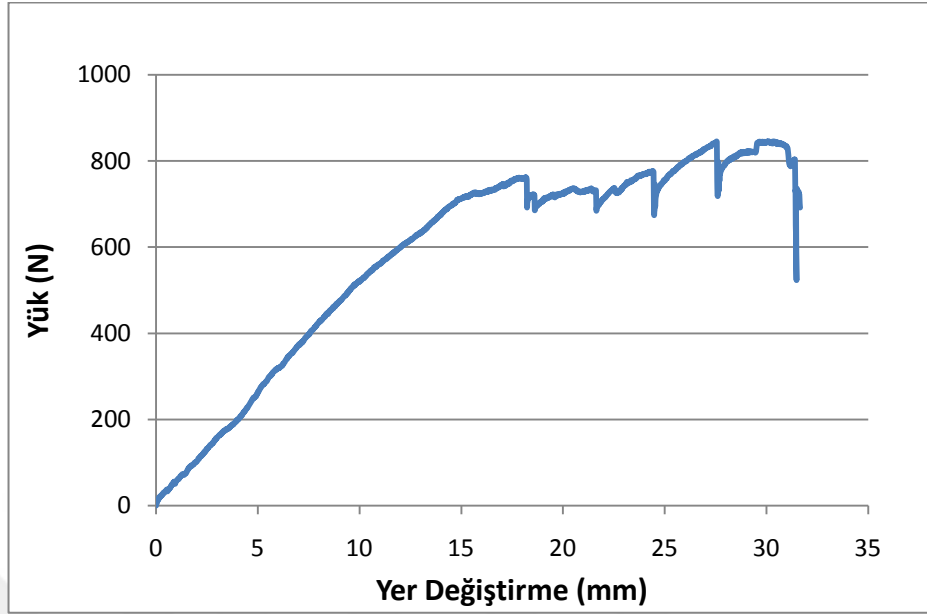
Şekil 4.54. Çelik kablolarla figür-8 yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.4. İki çelik bant yöntemi

İki çelik bant yönteminin ilk deneyinde ksifoid ve manubriumda bulunan teller kemikten sıyrılmış, sol taraf birinci boşlukta ve sonrasında beşinci ve altıncı kaburga-gövde birleşimleri ile sağ taraf beşinci boşlukta kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.55a). İkinci ve üçüncü deneylerde ise manubrium ve ksifoide yerleştirilen tellerin sıyrılmasının ardından sol taraf birinci ve beşinci boşluklardan kemik kırılmıştır (Şekil 4.55b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.56'da gösterilmiştir.



Şekil 4.55. İki çelik bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



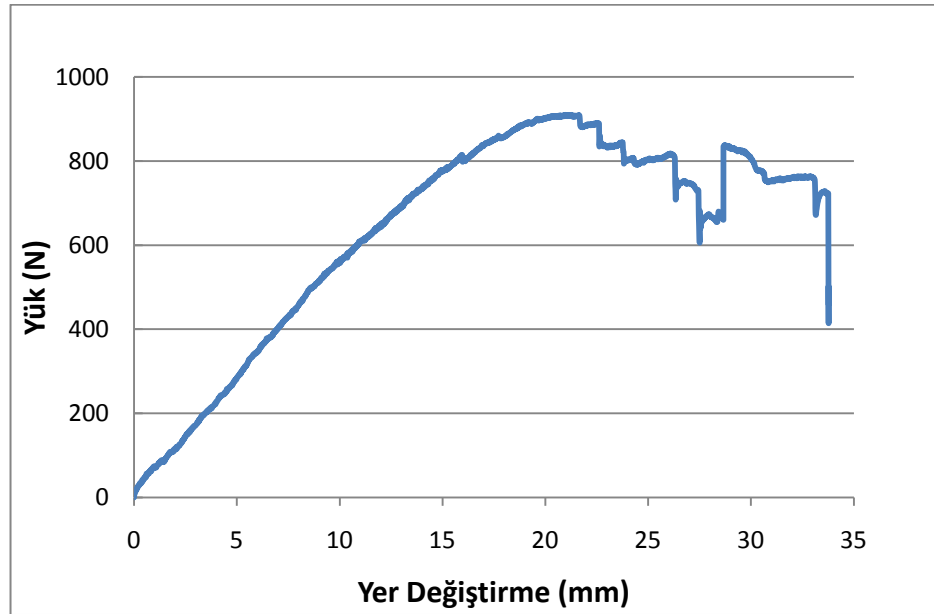
Şekil 4.56. İki çelik bant yönteminin enine kesme yüklemede yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.5. Üç çelik bant yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerin tamamında ilk olarak, manubrium ve ksifoid bölgesinde ki teller kemikten sıyrılmış, sonra sol taraf birinci ve sağ taraf beşinci kaburga boşluklarından kemik kırılmıştır (Şekil 4.57). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.58’de gösterilmiştir.



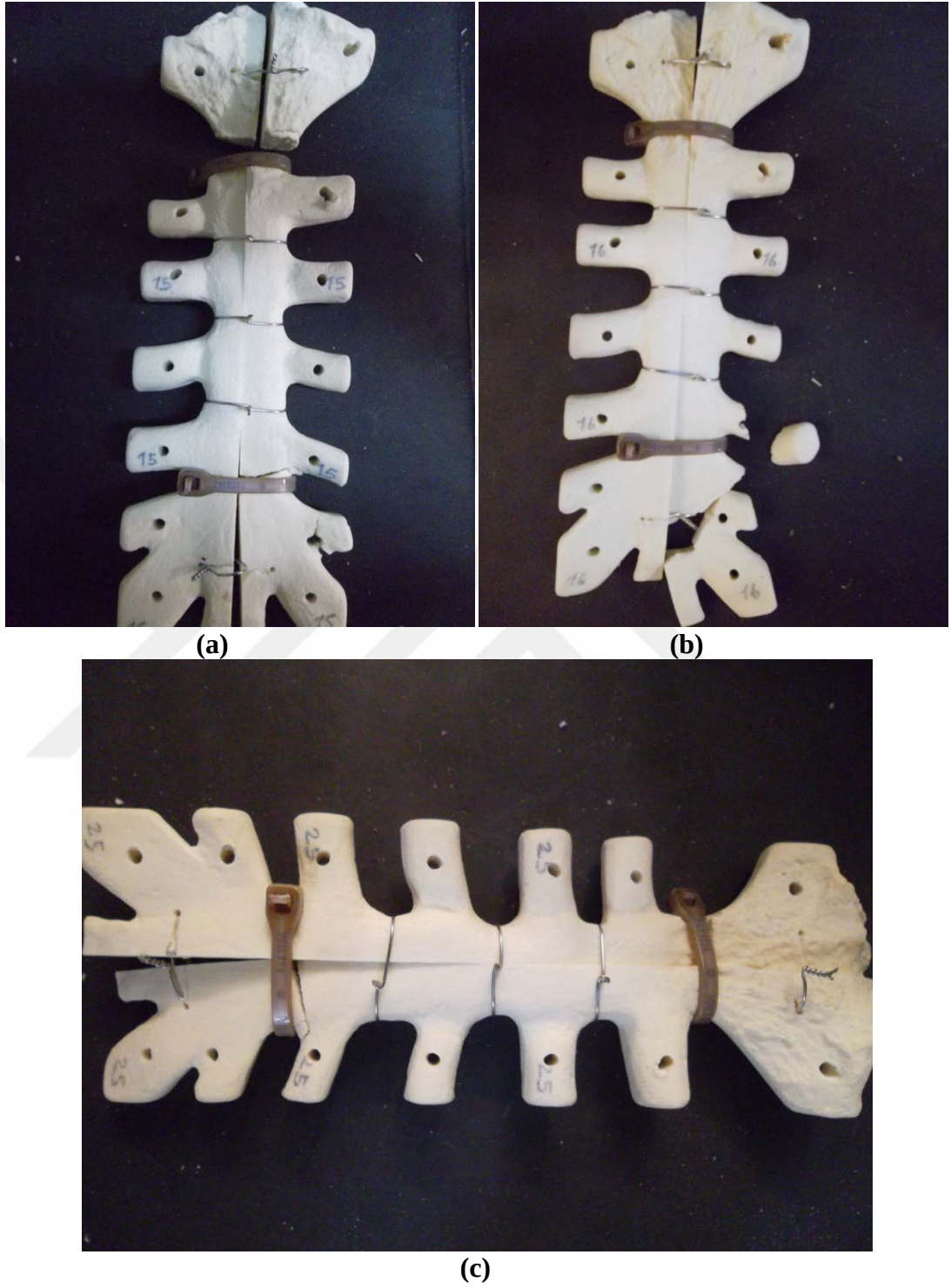
Şekil 4.57. Üç çelik bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde göçme mekanizması



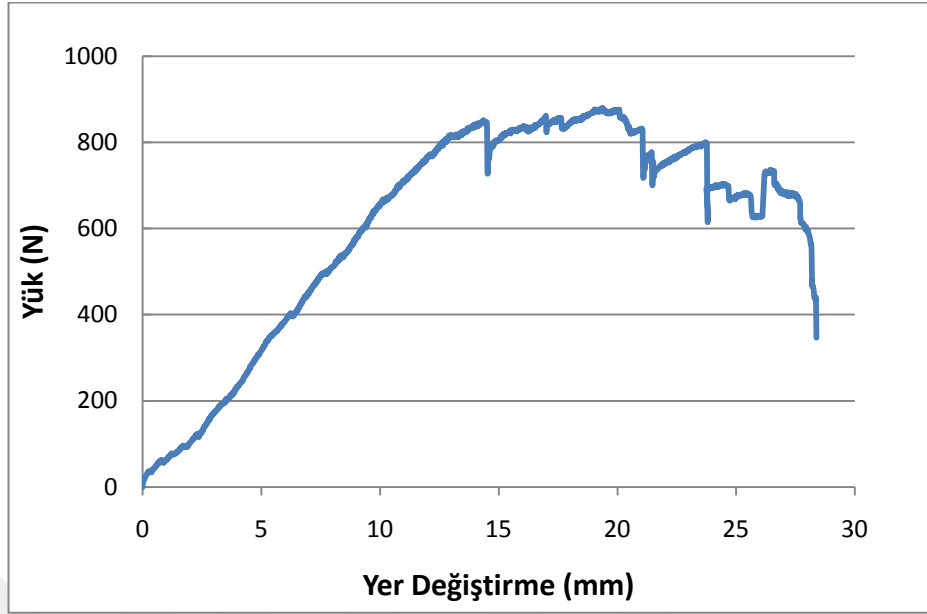
Şekil 4.58. Üç çelik bant yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.6. İki PEEK bant yöntemi

Bu yöntemin ilk deneyinde, manubrium ve ksifoid bölgesindeki teller kemikten sıyrılmış, beşinci kaburga boşluğu sol tarafta ve birinci boşlukta kemiğin tamamında kırılma olmuştur (Şekil 4.59a). İkinci deneyde, manubriumda bulunan tel kemiği kesmiş, ksifoid bölgesinde kesmeyle birlikte kırılma meydana gelmiş ve sol taraf beşinci kaburga vida bölgesinden kırılmıştır (Şekil 4.59b). Üçüncü deneyde ise, manubriumda bulunan tel düğüm noktasından kırılmış, ksifoid bölgesinde tel sıyrılmış ve kemik sol taraf beşinci ve sağ taraf birinci kaburga boşluklarından kırılmıştır (Şekil 4.59c). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.60'da gösterilmiştir.



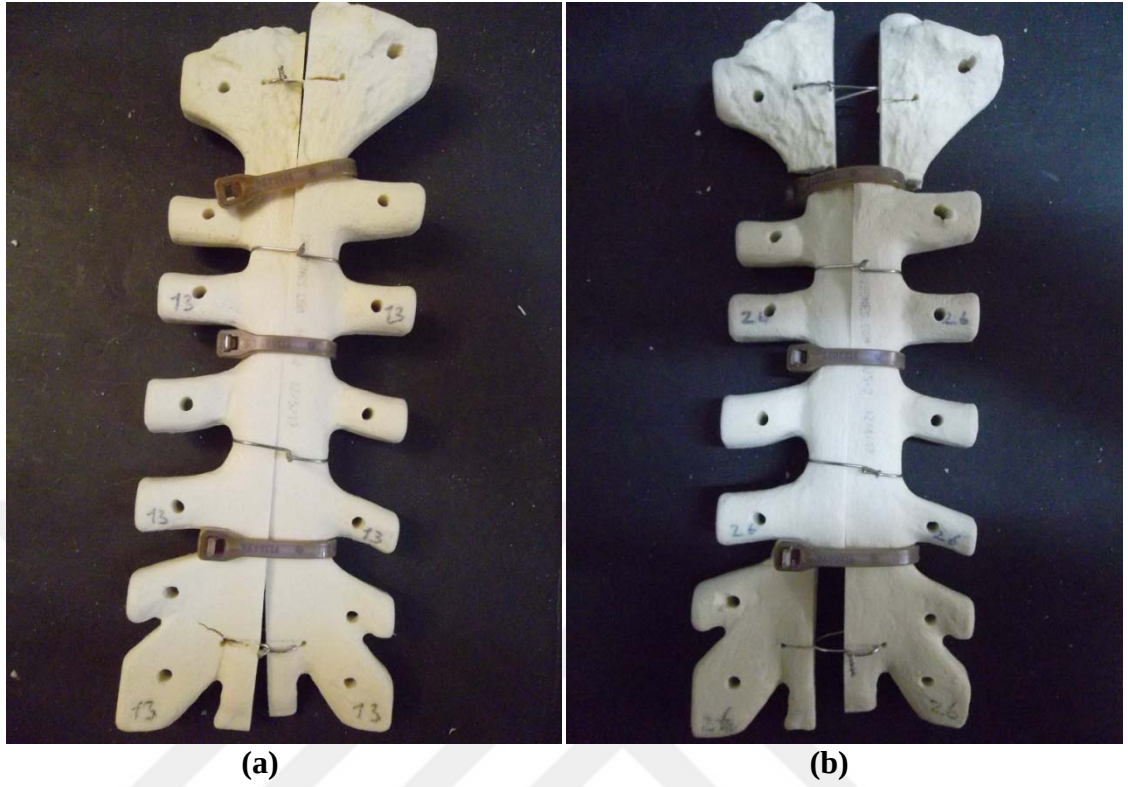
Şekil 4.59. İki PEEK bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



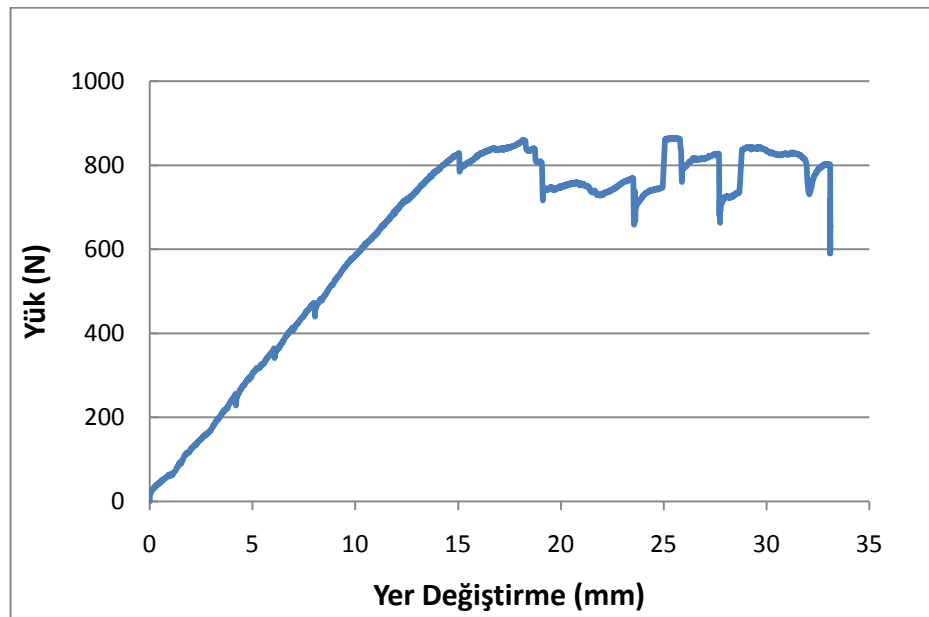
Şekil 4.60. İki PEEK bant yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.7. Üç PEEK bant yöntemi

Bu yöntemle yapılan enine kesme deneylerinin ilkinde, manubrium ve ksifoidde teller kemiği kesme başlamış ve manubriumda ki tel tamamen sıyrılırken, ksifoid bölgesinde kırılma meydana gelmiş, sonrasında birinci boşluktaki PEEK bant kilit kısmından açılmış ve sol taraf beşinci kaburga boşluğundan kemik kırılmıştır (Şekil 4.61a). İkinci ve üçüncü deneylerde, manubrium ve ksifoid bölgesinde teller kemikten sıyrılmış ve kemik, birinci kaburga boşluğundan ve sağ taraf beşinci boşluktan kırılmıştır (Şekil 4.61b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.62’de gösterilmiştir.



Şekil 4.61. Üç PEEK bant yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



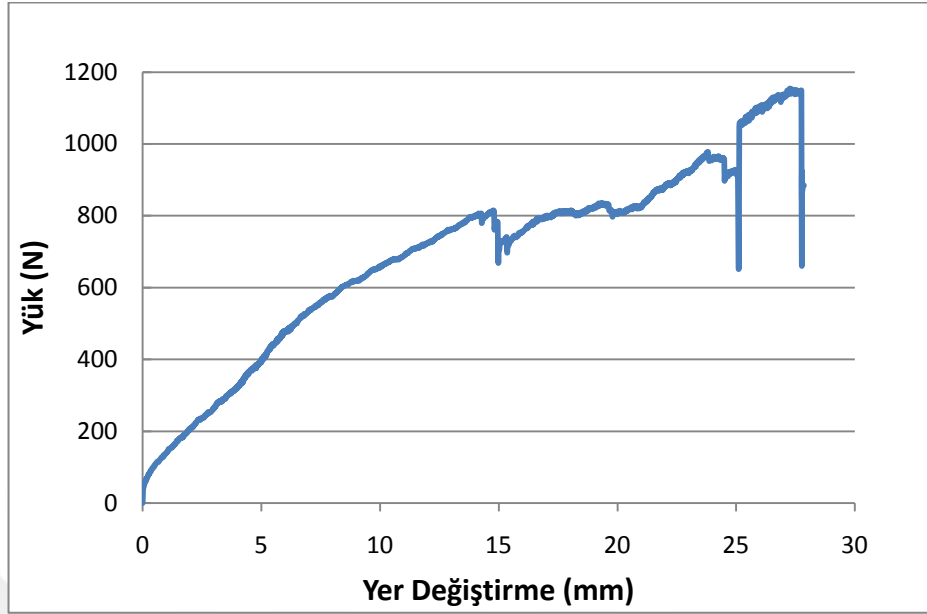
Şekil 4.62. Üç PEEK bant yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.8. Titanyum klips yöntemi

Titanyum klipslerin kullanıldığı ilk deneyde ksifoid ve manubriumda bulunan teller kemikten sıyrılmış ve sonrasında sternum sol taraf birinci kaburga boşluğundan kırılmıştır (Şekil 4.63a). İkinci deneyde, manubrium ve ksifoid bölgesindeki sıyrılmalardan sonra sol taraf birinci kaburga boşluğu hizasında gövdede ve sağ taraf beşinci boşlukta gövdede ve kaburga çıkıntısında kırılma olmuştur (Şekil 4.63b). Üçüncü deneyde ise ksifoidde bulunan tel kemikten sıyrılmış, manubriumda tel kemiği kesmeye başladıktan sonra kırılma meydana gelmiş, sonrasında sol taraf birinci ve sağ taraf beşinci kaburga boşluklarından kemik kırılmıştır (Şekil 4.63c). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.64’de gösterilmiştir.



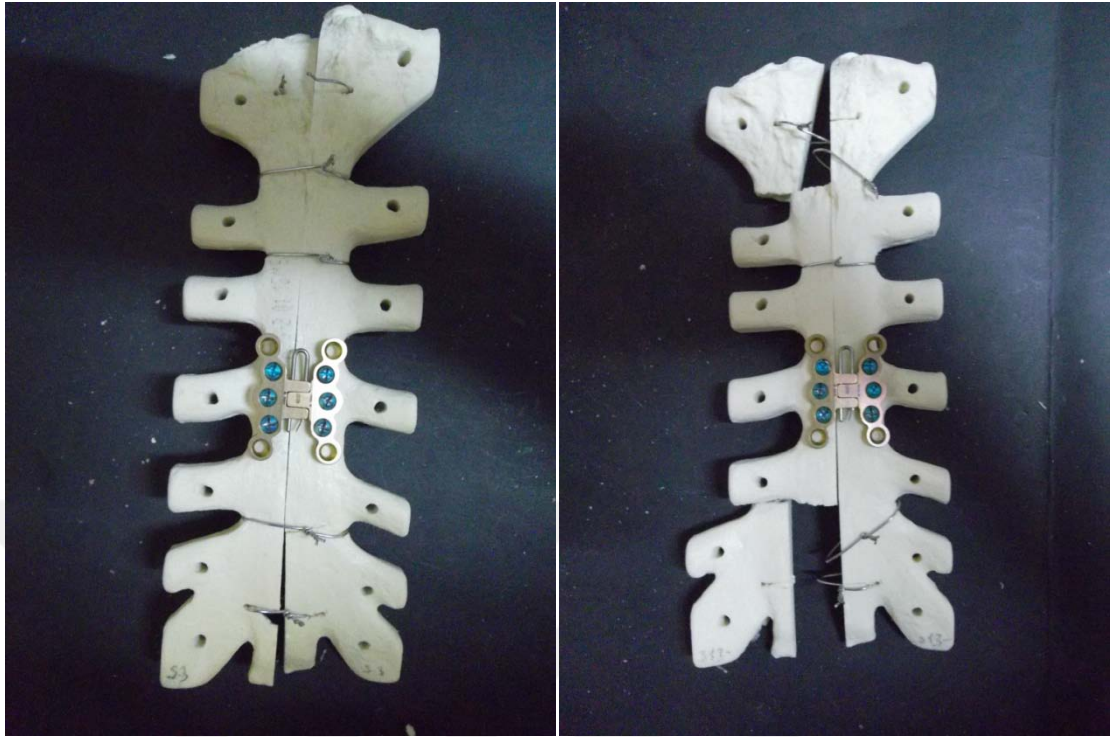
Şekil 4.63. Titanyum klips yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.64. Titanyum klips yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.9. Tek titanyum plâk yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerin ilkinde, ksifoid bölgesinde bulunan tel kemikten sıyrılmış, manubriumda bulunan tel ise düğüm noktasından kopmuş ve kemik sol taraf birinci kaburga boşluğundan kırılmıştır (Şekil 4.65a). İkinci ve üçüncü deneylerde ilk olarak manubrium ve ksifoid bölgesinde teller kemiği kesmiş, ikinci deneyde sağ taraf birinci ve beşinci (Şekil 4.65b), üçüncü deneyde ise sol taraf birinci kaburga boşluğunda kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.65c). Ayrıca yüklemeye birlikte, vidaların kemikten sıyrılmaya başladığı görülmüştür. Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.66’da gösterilmiştir.



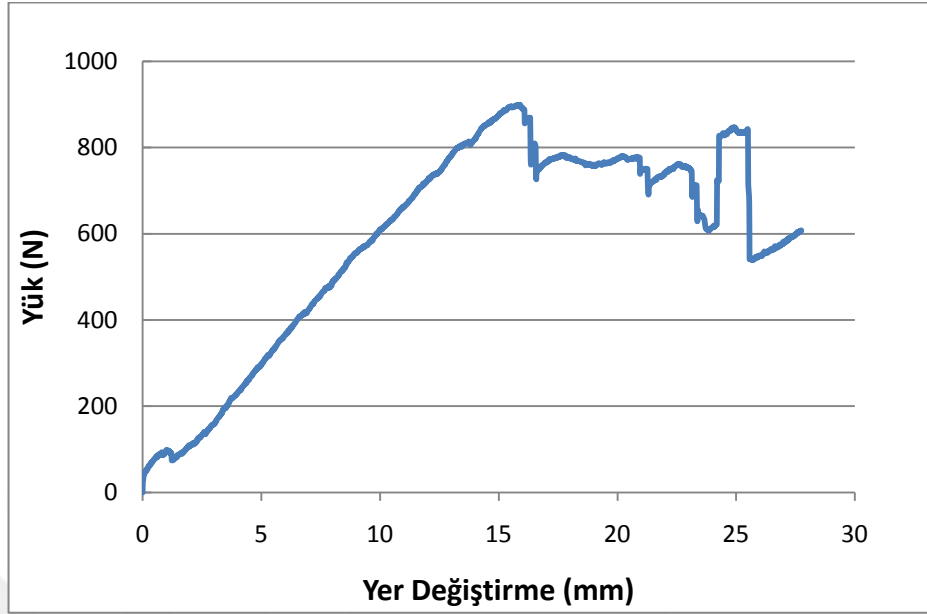
(a)

(b)



(c)

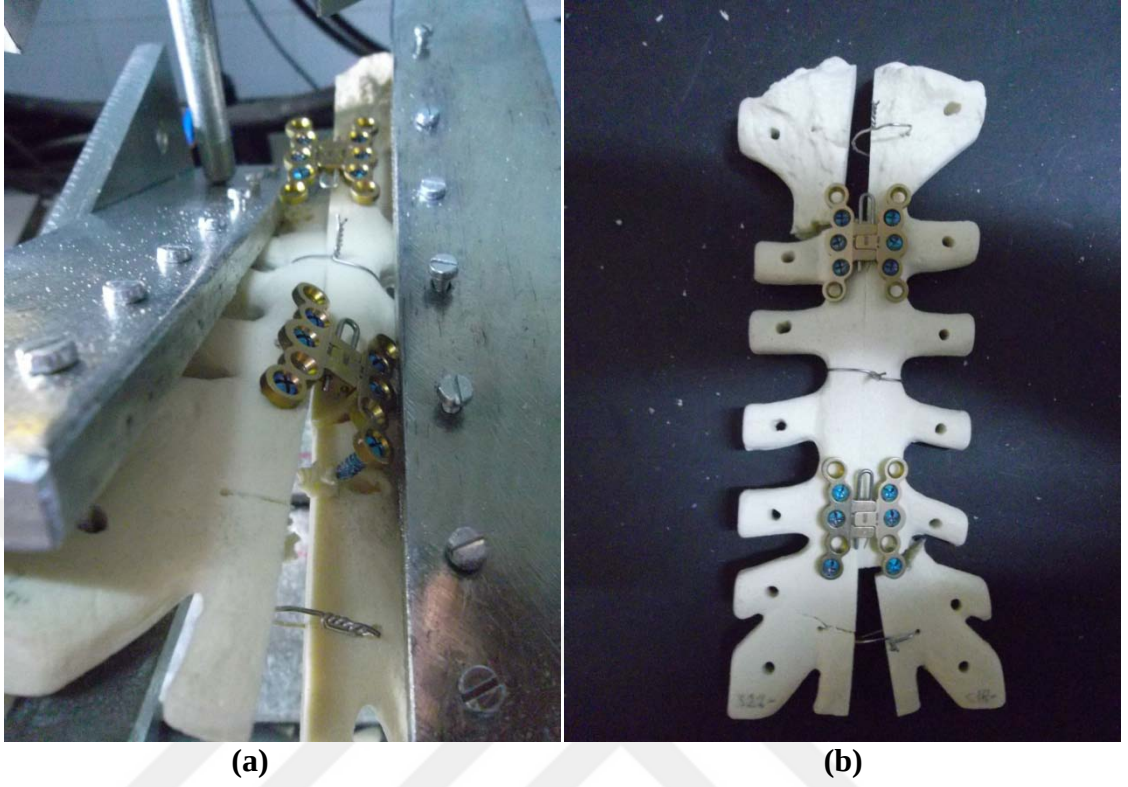
Şekil 4.65. Tek titanyum plâk yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



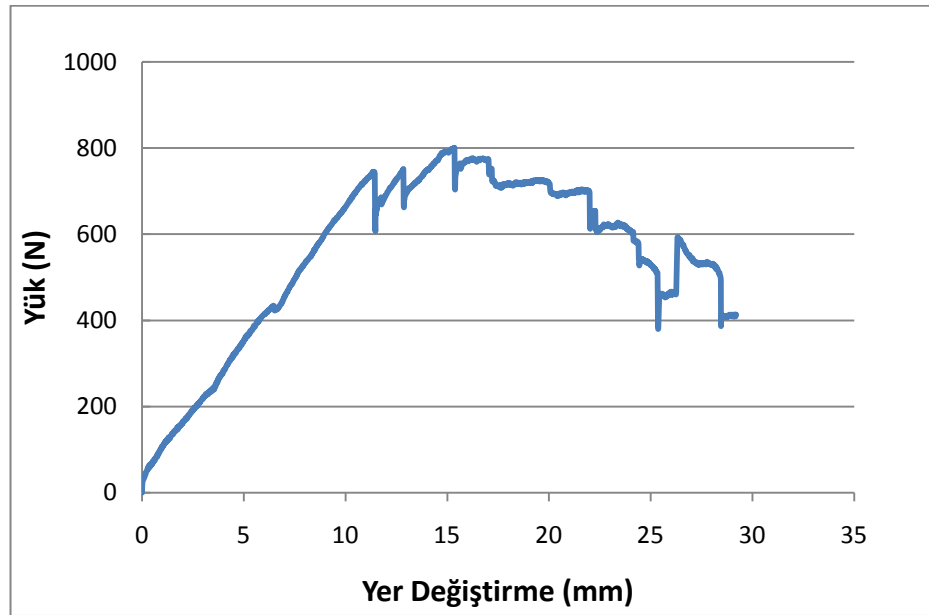
Şekil 4.66. Tek titanyum plâk yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

4.3.10. İki titanyum plâk yöntemi

Bu yöntemle yapılan deneylerin tamamında, plâk vidalarının yüklemeyle birlikte kemikten sıyrılmaya başladığı görülmüştür. İlk deneyde manubrium ve ksifoid bölgelerindeki teller kopmuş ve birinci plâk sağ taraftan ikinci plâkta sol taraftan kemikten sıyrılmıştır (Şekil 4.67a). İkinci ve üçüncü deneylerde ise tellerin sıyrılmasının ardından, sağ taraf birinci ve sol taraf beşinci kaburga boşluklarında kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.67b). Deneylerden elde edilen ortalama yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.68’de gösterilmiştir.



Şekil 4.67. İki titanyum plâk yönteminin enine kesme yükü etkisinde farklı göçme mekanizmaları



Şekil 4.68. İki titanyum plâk yönteminin enine kesme yüklemesinde yük-yer değiştirme eğrisi

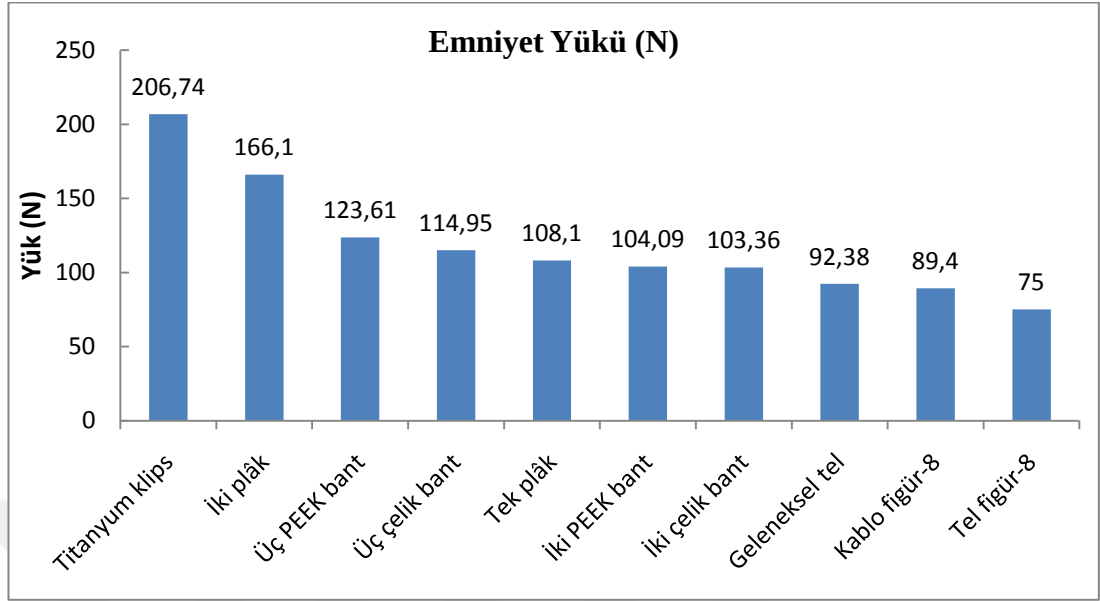
4.3.11. Enine kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Enine kesme deneyinden elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir kapama yönteminin emniyet yükü, direngenliği, kopma yükü ve kopma uzaması değeri hesaplanmıştır. Bu değerler toplu olarak Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Enine kesme yüklemesi deney sonuçları

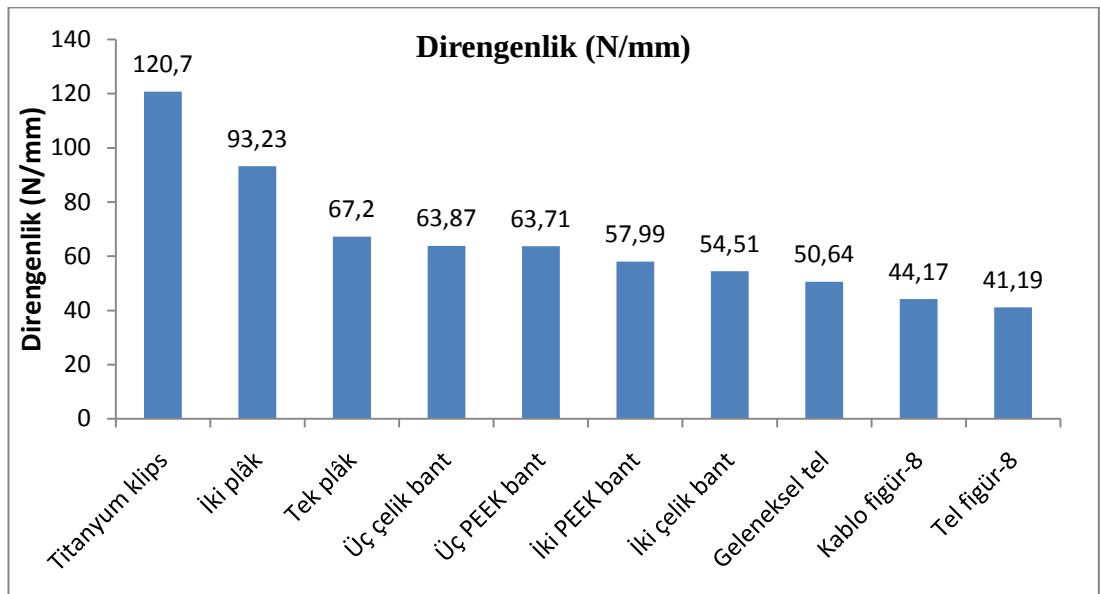
Yöntem	Emniyet Yükü (N)	Direngenlik (N/mm)	Kopma Yükü (N)	Kopma Uzaması (mm)
Geleneksel tel	92,4	50,64	955,1	19,62
Çelik tellerle figür-8	75	41,19	725,5	15,54
Çelik kablolarla figür-8	89,4	44,17	788,6	17,85
İki çelik bant	103,4	54,51	726,7	15,65
Üç çelik bant	114,9	63,87	815	15,96
İki PEEK bant	104,1	57,99	851,2	14,36
Üç PEEK bant	123,6	63,71	829,3	15,04
Titanyum klips	206,7	120,7	814,6	14,79
Tek titanyum plâk	108,1	67,2	899,5	15,9
İki titanyum plâk	166,1	93,23	800,7	15,36
Ortalama ± standart sapma	118,4±39,5	65,7±24,2	820,6±70,5	16±1,58

İncelenen kapama yöntemlerinin, enine kesme etkisinde emniyet yükü değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.69’da verilmiştir. En büyük emniyet yükü değeri titanyum klips yönteminde elde edilmiş, bu yöntemi iki plâk ve üç PEEK bant yöntemleri takip etmiştir. En düşük emniyet yükünün ise tellerle ve kablolarla yapılan figür-8 yöntemlerinde olduğu belirlenmiştir.



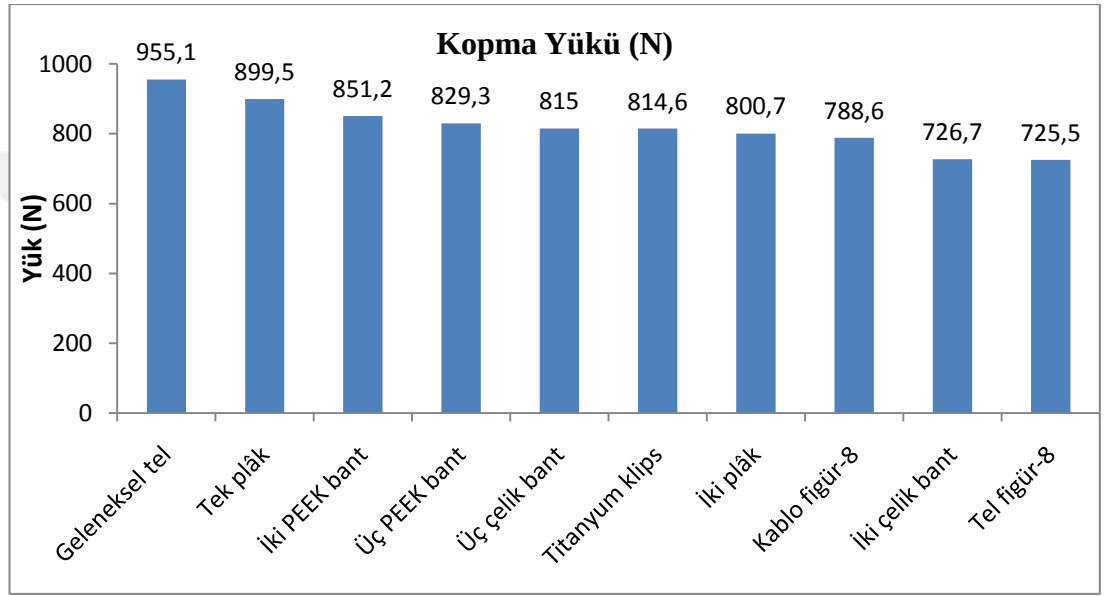
Şekil 4.69. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin emniyet yükleri

Kapama yöntemlerinin direngenlik değerleri Şekil 4.70’de verilmiştir. En direngen yöntemin titanyum klips yöntemi olduğu belirlenmiş, bu yöntemi sırasıyla iki plâk ve tek plâk yöntemleri takip etmiştir. En düşük direngenlik değeri ise tellerle ve kablolarla yapılan figür-8 yöntemlerinde elde edilmiştir.



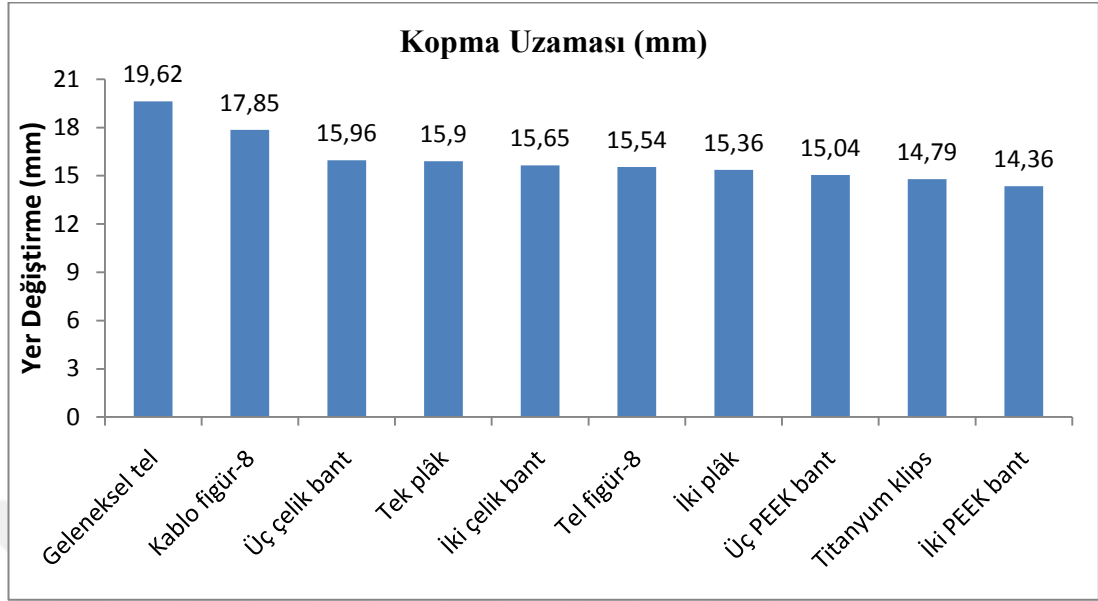
Şekil 4.70. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin direngenlikleri

Kopma yükü değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.71’de verilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında ise en dayanıklı yöntemin geleneksel tel yöntemi olduğu görülmüş, ikinci sırada tek plâk yöntemi, üçüncü sırada ise iki PEEK bant yöntemi yer almıştır. En düşük kopma yükü ise çelik tellerle yapılan figür-8 ve iki çelik bant yöntemlerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.71. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma yükü değerleri

Karşılaştırılan yöntemlerin kopma uzaması değerleri ise Şekil 4.72’de verilmiştir. En küçük iki uzama değeri sırasıyla, iki PEEK bant ve titanyum klips yöntemlerinde bulunmuş, bu yöntemleri üç PEEK bant yöntemi takip etmiştir. En büyük uzama değerleri ise geleneksel tel ve kablolarla yapılan figür-8 yöntemlerinde görülmüştür.



Şekil 4.72. Enine kesme yükü etkisinde kapama yöntemlerinin kopma uzaması değerleri

4.4. Kapama Yöntemlerinin Mekanik Özelliklerine Göre Karşılaştırılması

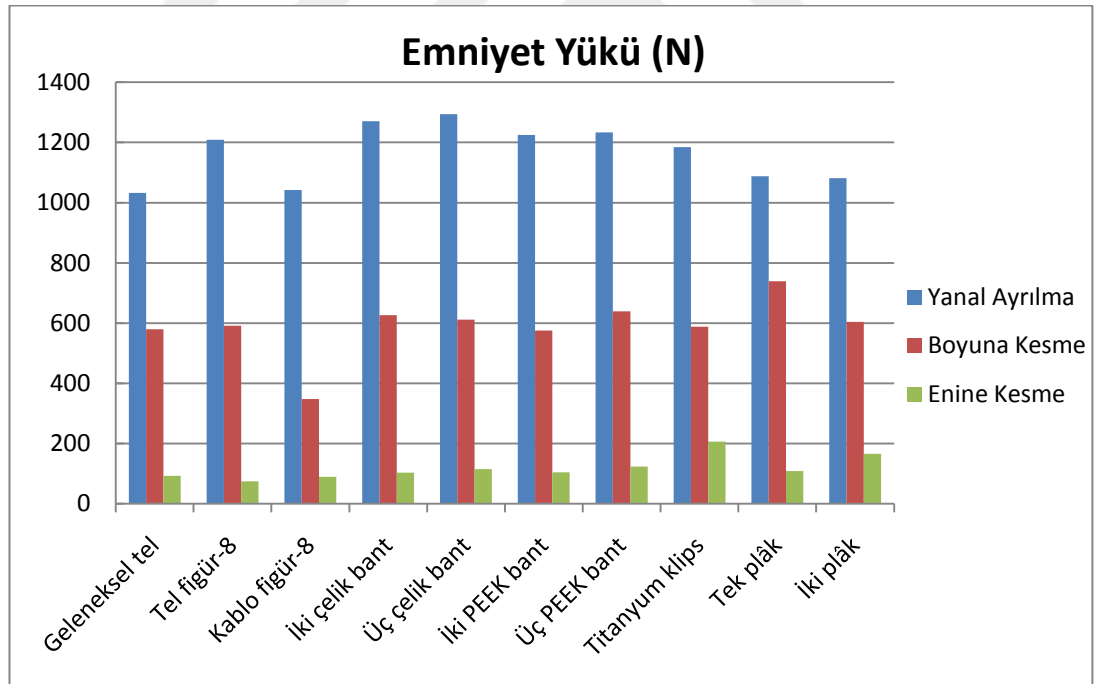
Bu bölümde, deneylerden elde edilen emniyet yükü, direngenlik, kopma yükü ve kopma uzaması değerleri dikkate alınarak sternum kapama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bütün yöntemleri içeren toplu karşılaştırmaların yanında, iki ya da üç yöntemin kendi aralarındaki kıyaslamalarına da yer verilmiştir.

4.4.1. Yöntemlerin emniyet yüklerine göre karşılaştırılması

Yapılan deneylerden elde edilen emniyet yükü değerleri ve yöntemlerin bu yük değerlerine göre sıralaması Çizelge 4.4’de verilmiştir. Ayrıca, yöntemlerin emniyet yüklerine göre sıralaması Şekil 4.73’de grafiksel olarak gösterilmiş ve değerlendirmeler maddeler halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Yöntemlerin emniyet yükü değerlerine göre oluşan sıralama

Emniyet Yükü (N)						
Yöntem	Yanal Ayrılma	Sıra	Boyuna Kesme	Sıra	Enine Kesme	Sıra
Geleneksel tel	1032,56	10	579,79	8	92,4	8
Çelik tellerle figür-8	1209,37	5	591,02	6	75	10
Çelik kablolarla figür-8	1042,1	9	347,75	10	89,4	9
İki çelik bant	1271,07	2	626,59	3	103,4	7
Üç çelik bant	1294,51	1	611,42	4	114,9	4
İki PEEK bant	1225,02	4	575,69	9	104,1	6
Üç PEEK bant	1233,03	3	638,9	2	123,6	3
Titanyum klips	1184,35	6	587,93	7	206,7	1
Tek titanyum plâk	1087,66	7	738,8	1	108,1	5
İki titanyum plâk	1081,1	8	604,53	5	166,1	2

**Şekil 4.73.** Farklı yükleme durumları için yöntemlerin emniyet yüklerinin karşılaştırılması

(1) Emniyet yükleri dikkate alındığında her yükleme durumu için farklı bir yöntemin en iyi değere sahip olduğu görülmüştür. Yanal ayrılmada üç çelik bant, boyuna kesmede

tek plâk, enine kesme yüklemesinde ise titanyum klips yönteminin emniyet yükü değeri en büyük çıkmıştır. Bu yöntemlerden üç çelik bant yöntemi, boyuna ve enine kesme yüklemelerinde dördüncü sırada, tek plâk yöntemi ise yanal ayrılmada yedinci, enine kesme de ise beşinci sırada yer almıştır. Titanyum klips yöntemi ise yanal ayrılmada altıncı, boyuna kesmede yedinci sırada yer almıştır.

(2) Emniyet yükü en düşük olan yöntemlerin, yanal ayrılmada geleneksel tel, boyuna kesmede kablo figür-8 ve enine kesmede ise tellerle figür-8 yöntemleri olduğu belirlenmiştir. Geleneksel tel ve kablo figür-8 yöntemleri bütün yüklemelerde en zayıf üç yöntem içinde yer almıştır. Boyuna kesme yüklemesinde en düşük emniyet yüküne sahip ikinci yöntem olan iki PEEK bant yöntemi ile bunu takip eden geleneksel tel, titanyum klips ve tellerle figür-8 yöntemlerinin ise emniyet yükleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır

(3) Üç PEEK bant yönteminin emniyet yükü, iki PEEK bant yönteminden boyuna ve enine kesme yüklemelerinde belirgin şekilde daha iyi çıkmış, yanal ayrılma yüklemesinde ise oldukça yakın emniyet yükü değerlerine sahip oldukları görülmüştür.

(4) Üç çelik bant yöntemiyle iki çelik bant yöntemi karşılaştırıldığında, yanal ayrılma ve enine kesmede üç çelik bant yönteminin, boyuna kesmede ise iki çelik bant yönteminin daha yüksek emniyet yükü değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

(5) İki çelik bant ve iki PEEK bant yöntemleri incelendiğinde, yanal ayrılma ve boyuna kesmede iki çelik bant yönteminin daha iyi emniyet yükü değerlerine sahip olduğu belirlenmiş, enine kesme yüklemesinde ise bu iki yöntemin emniyet yükleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

(6) Üç çelik bant, üç PEEK bant ve üç titanyum klipsin kullanıldığı yöntemler karşılaştırıldığında yanal ayrılma ve boyuna kesme deneylerinde üç çelik bant ve üç PEEK bant yönteminin titanyum klips yönteminden daha iyi emniyet yükü değerlerine

sahip olduğu görülmüştür. Enine kesme deneyinde ise titanyum klips yönteminde, diğerk yöntemlerden daha yüksek emniyet yükü değeri elde edilmiştir.

(7) Tek ve iki plâk kullanımları karşılaştırıldığında ise yanal ayrılma yüklemesinde birbirine yakın emniyet yükü değeri bulunmuş, boyuna kesmede tek plâk yönteminde, enine kesmede ise iki plâk yönteminde daha yüksek emniyet yükleri elde edilmiştir.

(8) Çelik tellerle figür-8 yöntemi yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemelerinde geleneksel tel ve kablo figür-8 yönteminden daha iyi emniyet yüklerine sahipken, enine kesme yüklemesinde bu yöntemlerin gerisinde kalmıştır. Geleneksel tel ve kablo figür-8 yöntemlerinin emniyet yükleri, yanala ayrılma ve enine kesmede birbirine oldukça yakın çıkmış, boyuna kesmede ise geleneksel tel yönteminin emniyet yükü daha iyi çıkmıştır.

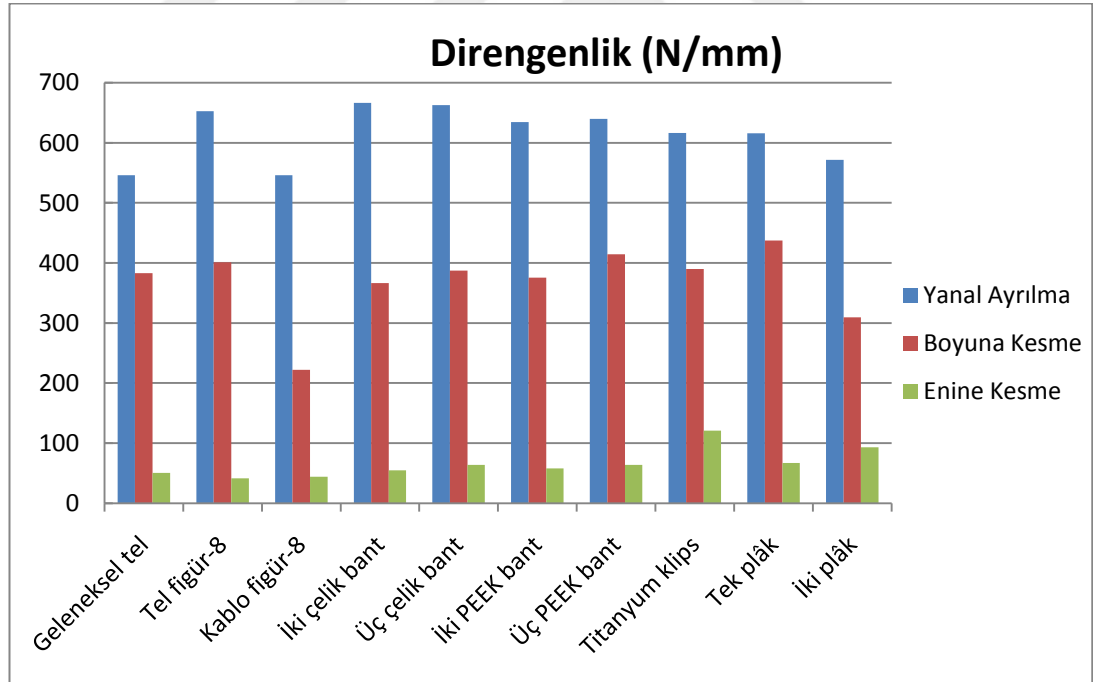
Genel olarak emniyet yükleri bakımından, geleneksel tel, kablo figür-8 ve tel figür-8 yöntemleri ile diğerk yöntemler arasında belirgin bir fark olduğu ve bu yöntemlerin diğerk yöntemlerden daha zayıf kaldığı tespit edilmiştir. Diğerk yöntemler ise yükleme durumuna göre değışen davranışlar göstermişler, aralarından üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemleri yanal ayrılma ve boyuna kesmede ilk üç, enine kesmede ise ilk dört yöntem arasında kalarak en istikrarlı davranışı sergilemişlerdir.

4.4.2. Yöntemlerin direngenlik değeriğine göre karşılaştırılması

Yapılan deneylerden elde edilen direngenlik değeri ve yöntemlerin bu değeriğe göre sıralaması Çizelge 4.5’de verilmiştir. Ayrıca, yöntemlerin direngenliklerine göre sıralaması Şekil 4.74’de grafiksel olarak gösterilmiş ve değeriendirmeler maddeler halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Yöntemlerin direngenlik değerlerine göre oluşan sıralama

Direngenlik (N/mm)						
Yöntem	Yanal Ayrılma	Sıra	Boyuna Kesme	Sıra	Enine Kesme	Sıra
Geleneksel tel	546,13	9	382,98	6	50,64	8
Çelik tellerle figür-8	652,65	3	400,96	3	41,19	10
Çelik kablolarla figür-8	546,02	10	222,02	10	44,17	9
İki çelik bant	666,58	1	366,39	8	54,51	7
Üç çelik bant	662,48	2	387,11	5	63,87	4
İki PEEK bant	634,64	5	375,56	7	57,99	6
Üç PEEK bant	639,97	4	414,33	2	63,71	5
Titanyum klips	616,54	6	390,04	4	120,7	1
Tek titanyum plâk	615,97	7	437,08	1	67,2	3
İki titanyum plâk	571,8	8	309,28	9	93,23	2

**Şekil 4.74.** Farklı yükleme durumları için yöntemlerin direngenlik değerlerinin karşılaştırılması

(1) Yöntemlerin direngenlik değerleri incelendiğinde, emniyet yükü sonuçlarına benzer sonuçlar olduğu görülmüştür. Emniyet yükü için, boyuna kesme ve enine kesme

yüklemelerinde ilk sırada yer alan tek plâk ve titanyum klips yöntemleri bu yükleme şartlarındaki direngenlik değerlerinde de en yüksek değerlere sahip olmuşlardır. Bu yöntemlerden tek plâk yöntemi, yanal ayrılmada yedinci, enine kesmede üçüncü sırada, titanyum klips yöntemi ise, yanal ayrılmada altıncı, boyuna kesmede ise dördüncü sırada yer almıştır. Yanal ayrılmada yüklemesinde ise, emniyet yükü değeri en yüksek olan üç çelik bant yöntemi direngenlik değerinde ikinci sırada kalmış, ancak direngenlik değeri en yüksek çıkan iki çelik bant yöntemiyle birbirlerine çok yakın direngenlik değerlerine sahip oldukları görülmüştür. İki çelik bant yöntemi boyuna kesmede sekizinci, enine kesmede ise yedinci sırada kalmış, üç çelik bant yöntemi ise boyuna kesmede beşinci, enine kesmede dördüncü sırada yer almıştır.

(2) En düşük direngenlik değerleri boyuna kesmede kablolarla figür-8, enine kesmede çelik tellerle figür-8 yöntemlerinde elde edilmiş, yanal ayrılmada ise son iki sıradaki geleneksel tel ve kablolarla figür-8 yöntemlerinin direngenlikleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

(3) Üç PEEK bant yöntemiyle iki PEEK bant yönteminin direngenlikleri, yanal ayrılma ve enine kesmede birbirine oldukça yakın çıkmış, boyuna kesmede ise üç PEEK bant yönteminin direngenliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

(4) Üç çelik bant ve iki çelik bant yöntemleri karşılaştırıldığında yanal ayrılmada oldukça yakın değerler bulunmuş, boyuna ve enine kesmede ise üç çelik bant yöntemi daha iyi direngenlik değerlerine sahip olmuştur.

(5) İki çelik bant ve iki PEEK bant yöntemleri incelendiğinde yanal ayrılmada iki çelik bant yönteminin, boyuna ve enine kesmede ise iki PEEK bant yönteminin direngenlik değerleri daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, yöntemler arasındaki farkın oldukça az olduğu görülmüştür.

(6) Üç çelik bant, üç PEEK bant ve titanyum klips yöntemlerinin direngenlikleri karşılaştırıldığında yanal ayrılmada üç çelik bant yöntemi diğer yöntemlerden daha üstün çıkmıştır. Boyuna kesmede, üç PEEK bant yöntemi en büyük direngenliğe sahipken titanyum klips ve üç çelik bant yönteminin direngenlikleri birbirine çok yakın çıkmış, enine kesmede ise titanyum klips yönteminin diğerlerinden belirgin şekilde üstün olduğu görülmüş, üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinin direngenlikleri de birbirlerine çok yakın çıkmıştır.

(7) Tek plâk yöntemi ile iki plâk yöntemi karşılaştırıldığında, yanal ayrılma ve boyuna kesmede tek plâk yönteminin daha yüksek direngenlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiş, enine kesmede ise iki plâk yönteminin direngenliği daha yüksek çıkmıştır.

(8) Geleneksel tel, kablo figür-8 ve tel figür-8 yöntemleri enine kesme deneyinde son sıralarda yer almıştır. Kablo figür-8 yöntemi diğer yüklemelerde de son sırada kalmıştır. Tellerle figür-8 yöntemi ise yanal ayrılma ve boyuna kesmede üçüncü sırada yer almış ve diğer yöntemlerden daha iyi bir direngenliğe sahip olmuştur. Geleneksel tel yöntemi ise boyuna kesmede altıncı sırada, yanal ayrılmada da dokuzuncu sırada kalmıştır.

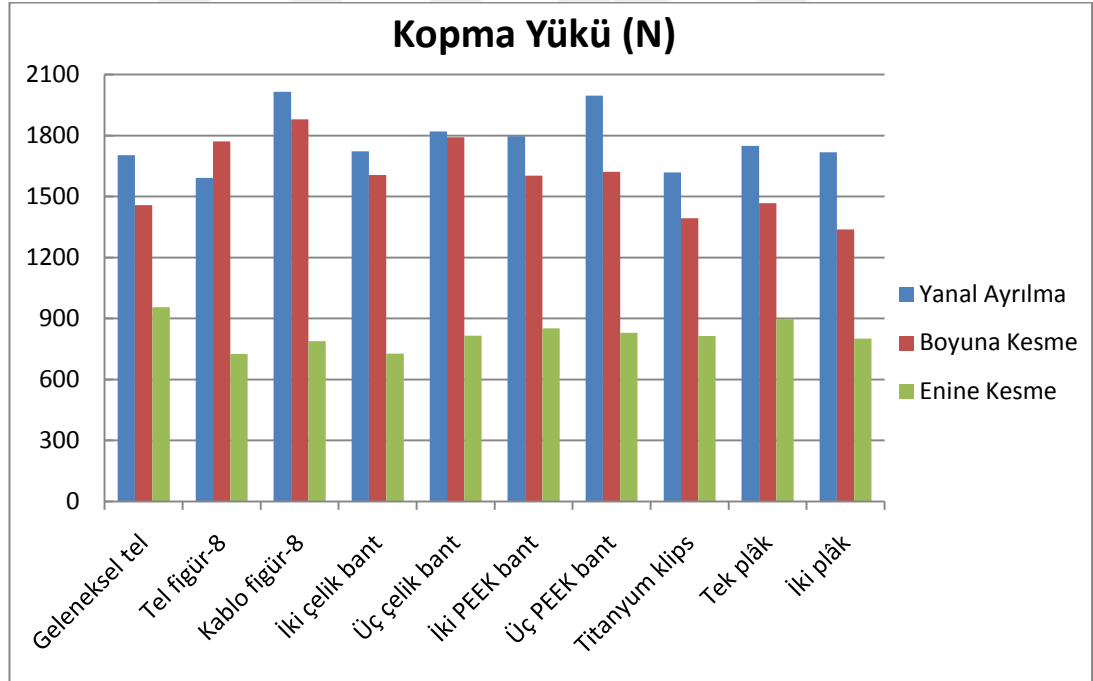
Genel olarak direngenlik değerleri bakımından en zayıf yöntemin kablolarla figür-8 olduğu görülmüş, diğer yöntemler ise farklı yükleme durumlarında farklı davranışlar sergilemişlerdir. Titanyum klips, üç çelik bant, üç PEEK bant ve tek plâk yöntemlerinin ise bütün yükleme durumlarında diğer yöntemlere kıyasla daha istikrarlı bir davranış ortaya koydukları görülmüştür.

4.4.3. Yöntemlerin kopma yüklerine göre karşılaştırılması

Yapılan deneylerden elde edilen kopma yükü değerleri ve yöntemlerin bu değerlere göre sıralaması Çizelge 4.6'da verilmiştir. Ayrıca, yöntemlerin kopma yüklerine göre sıralaması Şekil 4.75'de grafiksel olarak gösterilmiş ve değerlendirmeler maddeler halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Yöntemlerin kopma yükü değerlerine göre oluşan sıralama

Kopma Yüğü (N)						
Yöntem	Yanal Ayrılma	Sıra	Boyuna Kesme	Sıra	Enine Kesme	Sıra
Geleneksel tel	1702,9	8	1458,2	8	955,1	1
Çelik tellerle figür-8	1591,2	10	1771,1	3	725,5	10
Çelik kablolarla figür-8	2016,2	1	1880,5	1	788,6	8
İki çelik bant	1722,9	6	1605,7	5	726,7	9
Üç çelik bant	1820,7	3	1791,9	2	815	5
İki PEEK bant	1796,8	4	1602,5	6	851,2	3
Üç PEEK bant	1996,5	2	1622,4	4	829,3	4
Titanyum klips	1618,9	9	1393,3	9	814,6	6
Tek titanyum plâk	1749,5	5	1467,5	7	899,5	2
İki titanyum plâk	1718,2	7	1338,4	10	800,7	7

**Şekil 4.75.** Farklı yükleme durumları için yöntemlerin kopma yüklerinin karşılaştırılması

(1) Yöntemlerin kopma yükleri karşılaştırıldığında, yanal ayrılma ve boyuna kesmede en büyük kopma yükleri kablo figür-8 yönteminde elde edilmiş, bu yöntemi boyuna

kesmede üç çelik bant ve tel figür-8, yanal ayrılmada ise üç PEEK bant ve üç çelik bant yöntemleri takip etmiştir. Kablo figür-8 yönteminin enine kesme yüklemesinde ki kopma yükü ise sekizinci sırada yer almıştır. Enine kesmede ise geleneksel tel yöntemi en büyük kopma yüküne sahip olmuş, bu yöntemi tek plâk ve iki PEEK bant yöntemleri takip etmiştir. Geleneksel tel yönteminin kopma yükü değeri, diğer deneylerde sekizinci sırada kalmıştır.

(2) En düşük kopma yükleri, yanal ayrılma ve enine kesme yüklemesinde tel figür-8 yönteminde, boyuna kesmede ise iki plâk yönteminde elde edilmiştir. Enine kesme yüklemesinde en düşük kopma yüküne sahip ikinci yöntem olan iki çelik bant yönteminin kopma yükü de tel figür-8 yöntemine çok yakın çıkmıştır.

(3) Üç PEEK bant ve iki PEEK bant yöntemlerinin kopma yükleri karşılaştırıldığında, üç PEEK bant yönteminin yanal ayrılma ve boyuna kesmede, iki PEEK bant yönteminin de enine kesme yüklemesinde daha yüksek kopma yüklerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, boyuna ve enine kesme yüklemelerinde bu yöntemlerin kopma yükleri arasındaki fark büyük olmamakla birlikte, yanal ayrılmada üç PEEK bant yönteminin kopma yükü iki PEEK bant yönteminden oldukça büyük çıkmıştır.

(4) Üç çelik bant ve iki çelik bant yöntemleri kıyaslandığında, bütün yükleme durumlarında üç çelik bant yönteminde daha yüksek kopma yükleri elde edilmiştir.

(5) İki çelik bant ve iki PEEK bant yöntemleri karşılaştırıldığında, yanal ayrılma ve enine kesmede iki PEEK bant yönteminin daha yüksek kopma yüklerine sahip olduğu, boyuna kesmede ise bu iki yöntemin kopma yüklerinin çok yakın çıktığı görülmüştür.

(6) Üç çelik bant, üç PEEK bant ve titanyum klips yöntemleri kıyaslandığında, boyuna kesme deneyinde sıralama, büyükten küçüğe doğru üç çelik bant, üç PEEK bant ve titanyum klips şeklinde olmuştur. Yanal ayrılma ve enine kesmede ise sıralama, büyükten küçüğe doğru üç PEEK bant, üç çelik bant ve titanyum klips şeklinde olmuş,

bununla birlikte enine kesme deneyinde bu yöntemlerin kopma yükleri arasındaki farkın çok az olduğu görülmüştür.

(7) Tek plâk ve iki plâk yöntemleri karşılaştırıldığında, bütün yükleme durumlarında tek plâk yönteminin daha yüksek kopma yükü değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

(8) Geleneksel tel, tellerle figür-8 ve kablolarla figür-8 yöntemleri karşılaştırıldığında ise yükleme şekillerine bağlı olarak oldukça farklı sonuçlar bulunmuştur. Yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemelerinde kablo figür-8 yöntemi en yüksek kopma yükü değerlerine sahipken, geleneksel tel yöntemi bu yükleme durumlarında sekizinci sırada yer almış, tellerle figür-8 yöntemi ise boyuna kesmede üçüncü sıradayken yanal ayrılmada son sırada kalmıştır. Enine kesme yüklemesinde ise diğer yüklemelerde ilk sırada olan kablo figür-8 yöntemi sekizinci sırada yer almış, tellerle figür-8 yöntemi son sırada kalırken, geleneksel tel yöntemi en yüksek kopma yükü değerine sahip olmuştur.

Kopma yükü değerleri belirlenirken, kemikte meydana gelen ilk kırılma anı dikkate alınmıştır. Bu kırılma bazı deneylerde kemiğin yükleme çenelerine vidalandığı kaburga çıkıntılarında, bazılarında ise kemik gövdesinde meydana gelmiştir. Kopma yüklerine bakıldığında ilk dikkat çeken unsur emniyet yükü ve direngenlik değerleri en düşük yöntemlerden olan kablo figür-8 yönteminin yanal ayrılma ve boyuna kesmede en büyük kopma yükü değerlerine sahip olmasıdır. Bu durumun, kabloların montaj enstrümanının, diğer yöntemlerdeki kadar rijit bir kapama sağlamaması sonucunda kemiğe genel bir hareketlilik kazandırması sonucunda olduğu düşünülmektedir. Enine kesme deneyinde ise geleneksel tel yöntemi en yüksek kopma yüküne sahipken, diğer yükleme durumlarında son sıralarda kalmıştır. Genel olarak, dikkate alınan diğer değişkenlerde olduğu gibi kopma yükü değeri içinde, yükleme şartlarının farklı sonuçlar doğurduğu belirlenmiştir.

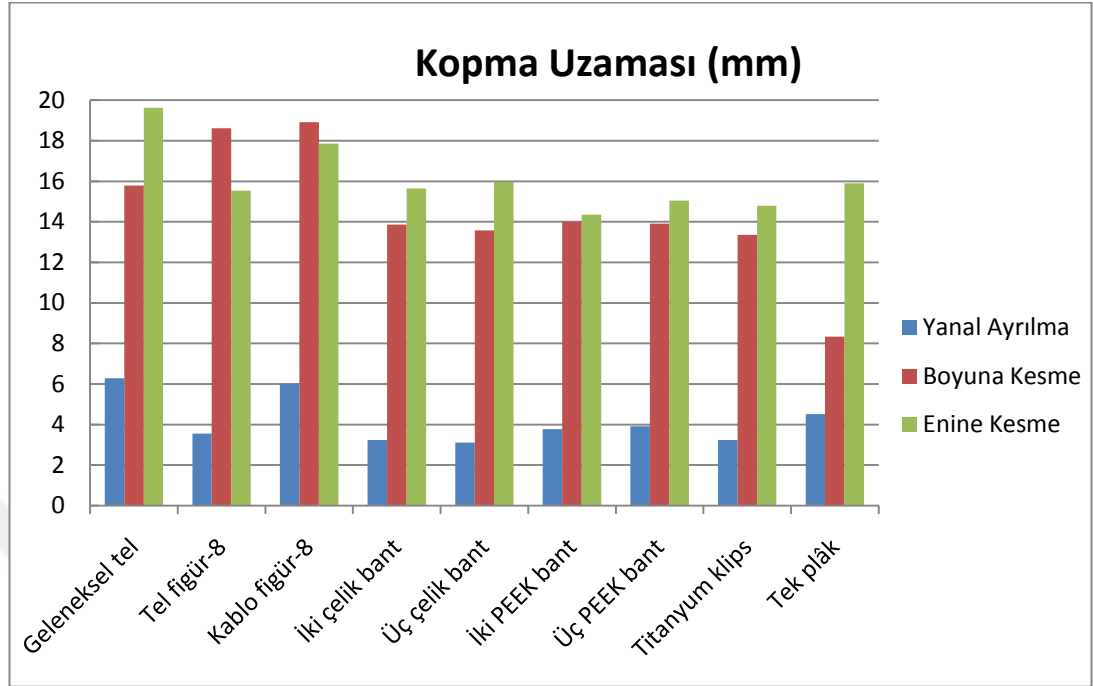
Kopma yükleri açısından en istikrarlı yöntemler ise yanal ayrılmada ilk üç, boyuna kesmede ilk dört ve enine kesmede ilk beş yöntem arasında yer alan üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemleri olmuştur.

4.4.4. Yöntemlerin kopma uzamalarına göre karşılaştırılması

Yapılan deneylerden elde edilen kopma uzaması değerleri ve yöntemlerin bu değerlere göre sıralaması Çizelge 4.7’de verilmiştir. Ayrıca, yöntemlerin kopma uzamalarına göre sıralaması Şekil 4.76’da grafiksel olarak gösterilmiş ve değerlendirmeler maddeler halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Yöntemlerin kopma uzaması değerlerine göre oluşan sıralama

Kopma Uzaması (mm)						
Yöntem	Yanal Ayrılma	Sıra	Boyuna Kesme	Sıra	Enine Kesme	Sıra
Geleneksel tel	6,28	1	15,79	3	19,62	1
Çelik tellerle figür-8	3,55	6	18,62	2	15,54	6
Çelik kablolarla figür-8	6,01	2	18,92	1	17,85	2
İki çelik bant	3,24	8	13,87	6	15,65	5
Üç çelik bant	3,11	10	13,58	7	15,96	3
İki PEEK bant	3,78	5	14	4	14,36	10
Üç PEEK bant	3,91	4	13,91	5	15,04	8
Titanyum klips	3,24	9	13,35	8	14,79	9
Tek titanyum plâk	4,52	3	8,33	9	15,9	4
İki titanyum plâk	3,35	7	8,28	10	15,36	7



Şekil 4.76. Farklı yükleme durumları için yöntemlerin kopma uzamalarının karşılaştırılması

(1) Yöntemlerin kopma uzamaları karşılaştırıldığında, en küçük uzama değerleri her yükleme durumu için farklı bir yöntemde elde edilmiştir. Yanal ayrılma üç çelik bant yöntemi, boyuna kesmede tek plâk ve iki plâk yöntemleri, enine kesmede ise iki PEEK bant yöntemi en küçük uzama değerlerine sahip olmuştur. Boyuna kesmede en iyi değerlere sahip olan tek plâk ve iki plâk yöntemleri ile diğer kapama yöntemleri arasında oldukça belirgin bir fark oluşmuştur. Titanyum klips yöntemi bütün yükleme şartlarında en küçük uzama değerlerine sahip ilk üç yöntem arasında yer almıştır.

(2) En büyük uzama değerlerine bakıldığında, yanal ayrılma ve enine kesmede geleneksel tel ve kablo figür-8 yöntemleri en büyük uzama değerlerine sahip olmuşlar, boyuna kesmede ise kablo figür-8 ve tel figür-8 yöntemleri ilk iki sırada yer almışlardır. Bütün yükleme durumlarında, en büyük uzamaya sahip ilk iki yöntem ile kalan yöntemler arasında oldukça belirgin farklar olduğu görülmüştür.

(3) Üç PEEK bant ve iki PEEK bant yöntemleri karşılaştırıldığında, yanal ayrılma ve enine kesmede iki PEEK bant yönteminde, boyuna kesmede ise üç PEEK bant yönteminde daha düşük uzama değerleri bulunmuş olmakla birlikte, özellikle yanal ayrılma ve boyuna kesmede, bu iki yöntemin kopma uzamaları arasındaki farkın çok küçük olduğu görülmüştür.

(4) İki çelik bant ve üç çelik bant yöntemleri kıyaslandığında, uzama değerleri birbirine çok yakın olmakla beraber, yanal ayrılma ve boyuna kesmede üç çelik bant, enine kesmede ise iki çelik bant yönteminin daha küçük kopma uzaması değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

(5) İki çelik bant ve iki PEEK bant yöntemlerinin kopma uzamaları incelendiğinde, yanal ayrılma ve boyuna kesmede iki çelik bant yönteminde, enine kesmede ise iki PEEK bant yönteminde daha küçük uzama değerleri elde edildiği görülmüştür.

(6) Üç PEEK bant, üç çelik bant ve titanyum klips yöntemleri karşılaştırıldığında, boyuna ve enine kesmede titanyum klips yöntemi, yanal ayrılmada ise üç çelik bant yöntemi en düşük kopma uzaması değerlerine sahip olmuşlardır. Boyuna kesmede, üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinin yer değiştirmeleri birbirlerine oldukça yakın çıkmış, enine kesmede üç çelik bant, yanal ayrılmada ise üç PEEK bant yönteminin kopma uzamaları diğer iki yöntemden daha büyük çıkmıştır.

(7) İki plâk ve tek plâk yöntemleri karşılaştırıldığında, bütün yükleme durumlarında iki plâk yönteminde daha küçük kopma uzaması değerleri elde edilmekle birlikte, boyuna ve enine kesmede uzama değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

(8) Geleneksel tel, tel figür-8 ve kablo figür-8 yöntemleri karşılaştırıldığında, yanal ayrılma ve enine kesmede en düşük uzama değerleri tellerle figür-8 yönteminde, en büyük değerler ise geleneksel tel yönteminde elde edilmiştir. Boyuna kesmede ise en

küçük uzama geleneksel tel yönteminde bulunmuş, tel figür-8 ve kablo figür-8 yöntemlerinin uzama değerleri de oldukça yakın çıkmıştır.

Sonuç olarak, kopma uzamaları açısından en zayıf yöntemlerin geleneksel tel ve kablo figür-8 yöntemleri olduğu görülmüştür. Boyuna kesmede tek plâk ve iki plâk yöntemlerinin uzamaları diğer yöntemlerden belirgin şekilde düşük çıkmış, üçüncü sıradaki titanyum klips yöntemi ile bu yöntemi takip eden üç çelik bant, iki çelik bant, üç PEEK bant ve iki PEEK bant yöntemlerinin uzama değerleri de birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Diğer deneylerde ise en büyük uzama değerlerine sahip ilk iki yöntem ile diğer yöntemler arasında belirgin farklar oluşmuştur. Genel olarak titanyum klips yöntemi bütün yükleme şartlarında en küçük kopma uzaması değerlerinde ilk üç sırada yer aldığından en istikrarlı yöntem olarak kabul edilmiş, bu yöntemi üç çelik bant yöntemi takip etmiştir.

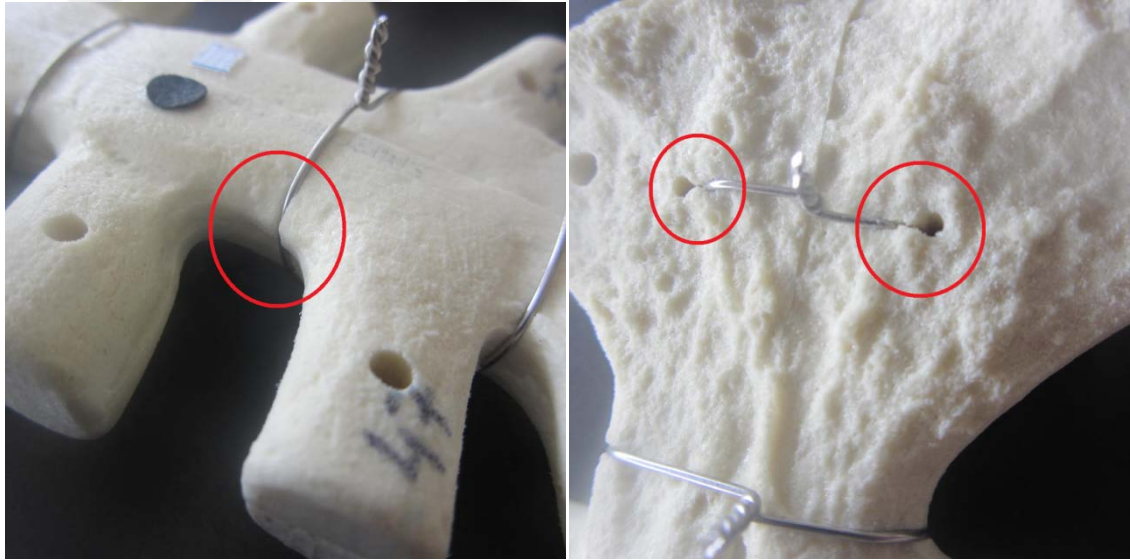
4.5. Yöntemlerin Karşılaştırılmasında Dikkate Alınan Diğer Değişkenler

Sternum kapama yöntemleri karşılaştırılırken en önemli değişken yöntemin ne kadar rijit ve stabil bir kapama sağladığıdır. Bununla birlikte yöntemin uygulama çabukluğu, uygulama kolaylığı, maliyeti ve sternumun yeniden açılması durumunda bunun maliyeti ve süresinin ne kadar olacağı gibi dikkate alınması gereken başka değişkenlerde bulunmaktadır. Özellikle çelik tellerle yapılan kapamalar ile diğer yöntemler arasındaki büyük maliyet farklılığı, kapama yöntemi tercih edilirken maliyetin birinci sırada dikkat edilen unsur olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada incelenen kapama yöntemlerinin bu ikincil değişkenlere göre karşılaştırılması aşağıda verilmiştir.

4.5.1. Çelik tellerle yapılan sternal kapamalar

Çelik tellerle yapılan kapamalar en düşük maliyetli yöntemlerdir. Ayrıca çelik tellerin, özellikle geleneksel tel ve figür-8 yönteminde uygulamasının kolay ve hızlı olması bu malzemenin en yaygın kullanılan yöntem olarak kalmasını sağlamıştır. Teller,

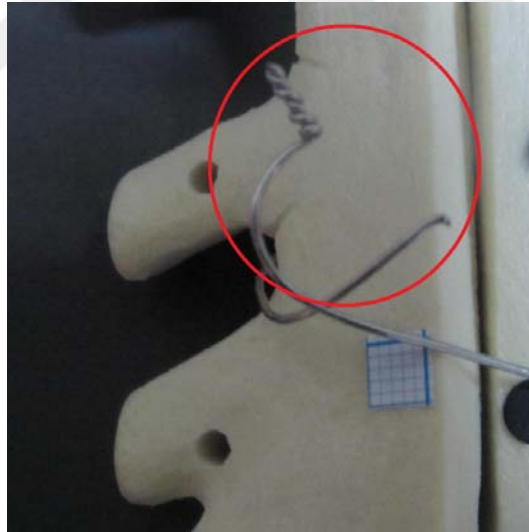
peristernal ya da transsternal olarak kolayca yerleştirilebilmekte ve ilave bir montaj enstrümanı olmadan, standart bir tel portegüsü yardımıyla hızlı bir şekilde düğümlenebilmektedir. Portegü kullanımı sayesinde cerrahlar uyguladıkları gerilmeyi daha iyi hissettiklerini söylemektedirler. Hastaya tekrar müdahale edilmesi gerektiğinde ise teller kolayca kesilip çıkarılabilmektedir. Bununla birlikte, kapamalarda en çok kullanılan 0,787 mm çapındaki no.5 teller, küçük kesit alanlarının etkisiyle kemiği kolayca kesmektedirler. Tecrübeli bir cerrah tarafından çelik tellerle kapatılan yapay sternumlar incelendiğinde, tellerin bağlanırken kemiği kesmeye başladığı görülmüştür (Şekil 4.77). Bu durum hem hastaya rahatsızlık verecektir, hem de sternuma gelen kuvvetlerin etkisiyle kemiğin daha kolay bir şekilde kesilmesine neden olacaktır. Özellikle kemik erimesi, obezite, KOAH vb. hastalıklara sahip yüksek risk grubundaki hastalarda, sternumun kapatılmasında başlayan bu kesme etkisi, zayıf kemik yapısı ile birlikte çok hızlı bir şekilde ilerleyip kemik stabilitesini bozacak ve ameliyat sonrası komplikasyonlara neden olabilecektir.



Şekil 4.77. Çelik tellerin bağlama esnasında sternumu kesmesi

Çelik tellerde gözlemlenen diğer bir problemde tellerin kırılması olmuştur. Yapılan deneylerde toplam 13 defa tellerin düğüm bölgelerinden kırılarak koptuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.78). Bu kırılmaların tamamı, sistemde emniyet yükü aşıldıktan sonra

meydana gelmiştir. Ayrıca, deneylerden önce tellerin bağlanması sırasında da tellerde kopmalar meydana gelmiştir. Bu durumun tellerin bükülmesiyle düğüm bölgesindeki kesitin incilmesi ve burada oluşan gerilme yığılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tellerin düğümlerinde ise belirgin bir açılmanın olmadığı görülmüştür. Glennie *et al.* (2002), tellerde açılma olmaması için tellerin üç veya dört defa bükülmesinin yeterli dayanımı sağladığını söylemişlerdir. Bu çalışmadaki uygulamalarda ise ortalama olarak beş veya altı defa bükülen tellerde belirgin bir açılma oluşmadığı görülmüştür. Ayrıca, tellerin sternum üzerindeki kesme etkisi nedeniyle, düğümlerde önemli açılmaların oluşması mümkün gözükmemekte, kemiğin kesilmesinin ve tellerin kırılmasının en önemli problemler olduğu düşünülmektedir. Tellerdeki kırılmalar, bütün yükleme durumlarında ve geleneksel ya da figür-8 bağlama şekillerinin tamamında meydana gelmiştir.



Şekil 4.78. Düğüm noktasından kırılıp açılan çelik tel

4.5.2. Çelik kablolarla yapılan figür-8 kapaması

Çelik kablolarla sternumun kapatılması özel bir montaj enstrümanı ile yapılmakta ve kapamalar geleneksel tel ve tellerle figür-8 yönteminden daha uzun sürmektedir. Uygulama enstrümanı tek kişinin kapamayı yapmasına imkân vermemekte, ikinci bir

kişinin yardımı gerekmektedir. Kullanımı nispeten zor olan bu enstrümanın üzerinde, uygulanan gerilmeyi gösteren basit bir gösterge olmasına rağmen yeterli gerginliğin sağlanıp sağlanmadığı da oldukça zor anlaşılmakta ve göstergedeki en üst seviye aşılsa bile tellerle yapılan figür-8 yöntemi kadar rijit bir bağlama sağlanamamaktadır (Şekil 4.79). Ancak, bu durumun ve kablo kesit alanının (1,1 mm çap) tellerden daha büyük olmasının da etkisiyle, kabloların montaj aşamasında kemiği kesme etkisinin oldukça az olduğu görülmüş ve yeterli bir kapama sağlandığı belirlenmiştir (Şekil 4.80).



Şekil 4.79. Çelik kabloların montaj enstrümanının üzerindeki gerilme göstergesi

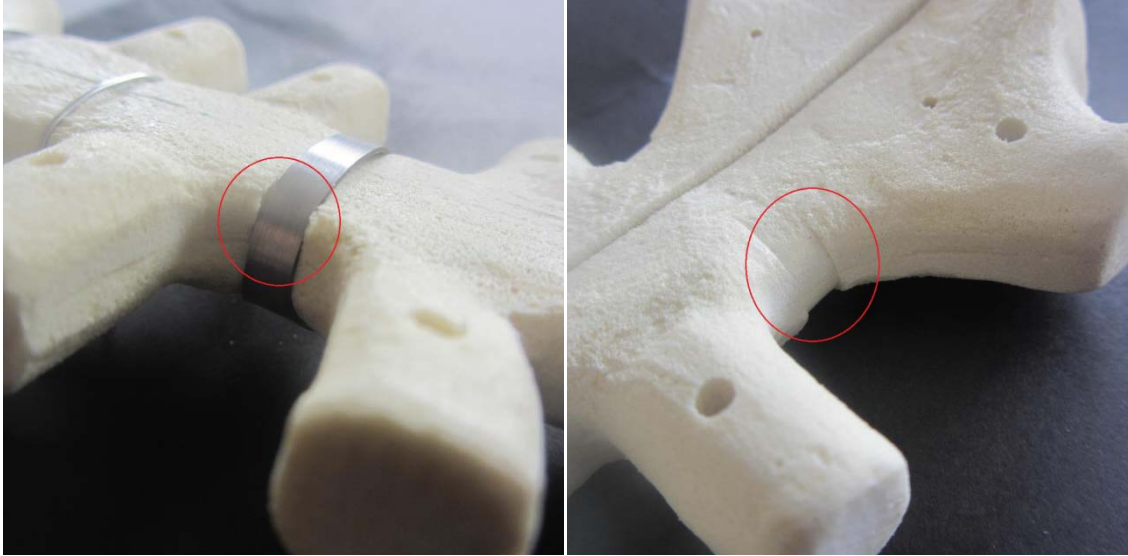


Şekil 4.80. Çelik kabloların montaj sonrası görüntüsü

Deneyleerde, kabloların kilit mekanizmaları ile ilgili herhangi bir problem oluşmamış ve kablolarda açılma veya kırılma meydana gelmemiştir. Sternuma tekrar müdahale edilmesi durumunda ise kabloların kesilip çıkarılması gerekmekte ve tekrar kullanımları mümkün olmamaktadır. Piyasada dörtlü paketler halinde satılan kablolardan genel olarak bir kapamada üç tane kullanılmakta ve maliyet tellerden çok daha yüksek olmaktadır.

4.5.3. Çelik bantlarla yapılan sternal kapamalar

Çelik bantların uygulaması, montaj enstrümanı yardımıyla tek kişi tarafından yapılabilmekte ve uygulama süresi, tellerle yapılan kapama yöntemlerine kıyasla biraz daha kısa olmaktadır. Bu enstrüman kullanılırken kabloların aksine, uygulanan gerilme kolayca arttırılabilmektedir. Bu durum yeterli sıkılıkta bir montajın yapılmasını sağlamakla birlikte, aşırı bir kuvvet uygulanması durumunda bantlar kemiği kolayca ezmekte ve bantların kenar kısımları kemiği kesmektedir (Şekil 4.81).



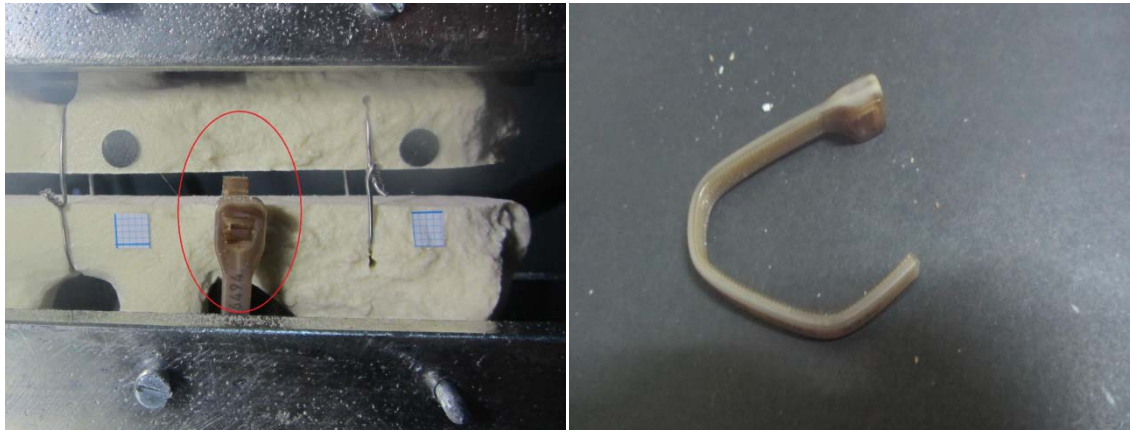
Şekil 4.81. Çelik bantların montaj sırasında sternumu kesmesi ve ezmesi

Basit ve etkili bir kilit mekanizmasına sahip olan çelik bantlarda, deneyler yapılırken kilit problemi yaşanmamış ve herhangi bir açılma oluşmadığı görülmüştür. Sternuma

ikinci bir müdahale gerektiği durumlarda bantlar kesilerek çıkarılmakta ve tekrar kullanılamamaktadır. Üç tane çelik bant kullanılması durumunda kapama maliyeti kablolarla figür-8 ve üç PEEK bant yönteminden düşük olmakla birlikte, çelik tellerle yapılan kapamalardan oldukça fazla olmaktadır.

4.5.4. PEEK bantlarla yapılan sternal kapamalar

PEEK bantların uygulanmasında kullanılan enstrüman ile bu bantların montajı hızlı bir şekilde tek kişi ile yapılabilir. Montaj süresi çelik bantlarla yapılan kapamalara yakın olmaktadır. Montaj enstrümanı ayrıca, aşırı bir kuvvet uygulanmasına müsaade etmemekte ve çelik bantlara kıyasla daha az sıkı olmakla beraber yeterli bir sabitleme sağlanmaktadır. PEEK bantlar, kesitlerinin kalınlığı ve malzeme özelliği etkisiyle çelik bantlar kadar kemiği iyi sarmamaktadır. Bu bantların kullanımı ile ilgili esas problemin ise bantların kilit mekanizması olduğu görülmüştür. Cırcırlı bir kilit mekanizmasına sahip olan bu bantlardan yedi tanesi, deneyler esnasında kilit kısmından sıyrılarak açılmıştır (Şekil 4.82).



Şekil 4.82. Yanal ayrılma deneyinde kilit kısmından sıyrılıp açılan PEEK bantlar

Sıyrılmaların hepsi, sistemde emniyet yükü aşıldıktan sonra meydana gelmiş ve bütün yükleme şartlarında bu duruma rastlanmıştır. Sternuma ikincil bir müdahale gerekmesi durumunda PEEK bantlar kesilip çıkarılmakta ve tekrar kullanılamamaktadır. Bu

yöntemin maliyeti, üç adet PEEK bant kullanılması durumunda üç çelik bant yönteminden daha pahalı ve çelik kablo yöntemine oldukça yakın olmaktadır.

4.5.5. Titanyum klipslerle yapılan sternal kapamalar

Titanyum klipslerin montajında, doğru klips büyüklüğünün belirlenmesi için ilk olarak sternum kalınlığının, klipsin kullanılacağı bütün boşluklarda ölçülmesi gerekmektedir. Bu durum kapama süresinin uzamasına neden olmaktadır. Klipsler yerleştirildikten sonra sıkıştırma enstrümanı yardımıyla kolay bir şekilde sabitlenmektedir. Klipsin çubuk kısmındaki fazlalığın kesilmesi ise bir miktar güç gerektirmektedir. Klipslerin montajı tek bir kişi tarafından yapılabilmektedir. Deneyler sırasında titanyum klipslerin kilit mekanizmasında bir problem görülmemiş, klips parçalarında herhangi bir deformasyon oluşumu tespit edilmemiştir. Sternuma ikincil bir müdahale gerektiği durumda klipsin çubuk kısmı kesilerek ya da sabit uçtaki vida sökülerek, klipsler çıkarılabilmektedir. Vidanın sökülmesi durumunda klips yeniden kullanılabilmekte ancak çubuğun fazla kısmı ilk uygulamada kesileceğinden, klipsin yeniden montajı kolay olmayacaktır. Titanyum klipsler en yüksek maliyetli kapama yöntemlerindendir. Bir klipsin maliyeti, çelik bant, PEEK bant ve çelik kablo gibi malzemelerin yaklaşık dört-beş katı değerindedir.

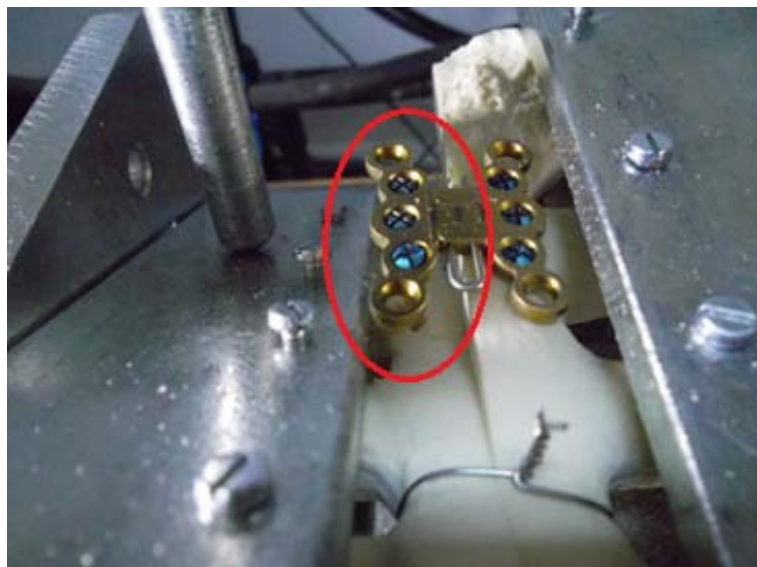
4.5.6. Titanyum plâklarla yapılan sternal kapamalar

Titanyum plâkların uygulamasında, farklı plâk şekillerinden hangilerinin seçileceği sternumun genişliği de dikkate alınarak yapılmalı ve kullanılacak vida boylarının tespiti içinde sternumun kalınlığı, plâkların uygulama bölgelerinden ölçülmelidir. Kullanılacak plâklar ve uygun boyuttaki vidalar belirlendikten sonra, plâkların sternum yüzeyine uygun şekilde oturması için özel bir enstrümanla eğilerek plâklara şekil verilmesi ve vidalama işleminin dikkatlice yapıp kapamanın tamamlanması gerekmektedir. Diğer yöntemlerin uygulaması kadar pratik olmayan bu süreç kapama süresinin oldukça uzamasına neden olmaktadır. Titanyum plâk yönteminin deneylerdeki davranışı

incelendiğinde, özellikle boyuna kesme deneylerinde yüklemeyle birlikte, plâkların hareket doğrultusunda dönmeye zorlandığı ve vidaların sternumu kesmeye başladığı görülmüştür. Yüklemedeki artışla beraber bu noktalarda kırılmaların olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.83). Enine kesme deneylerinde ise yüklemeyle birlikte vidaların sternumdan sıyrılıp çıkmaya başladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.84).



Şekil 4.83. Boyuna kesme yüklemesinde plâk vidalarının sternumu kesmesi



Şekil 4.84. Enine kesme yüklemesinde plâk vidalarının sternumdan sıyrılması

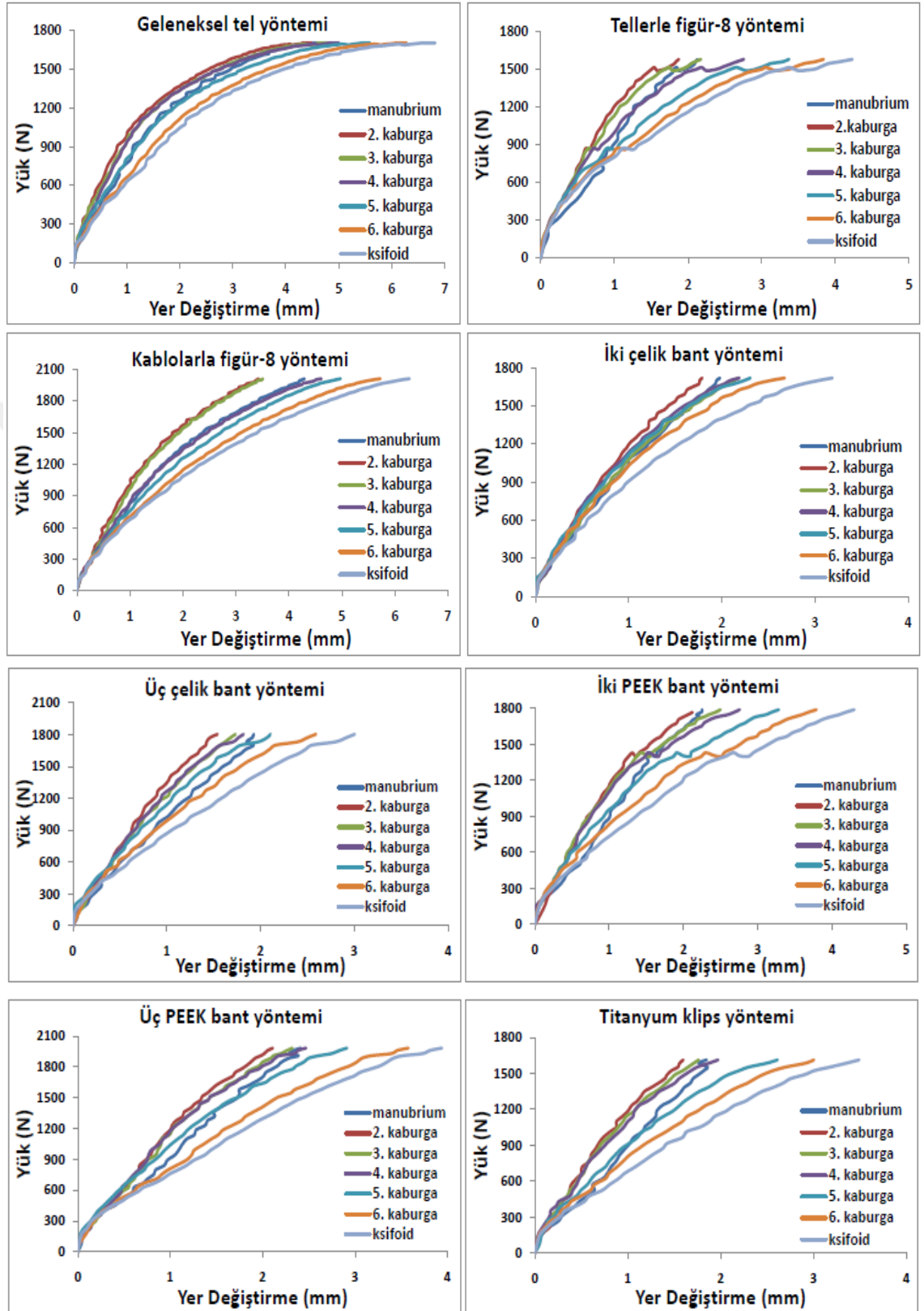
Sternuma yeniden müdahale gerektiğinde, Synthes firmasının plâkları, orta kısımlarındaki güvenlik piminin çıkarılmasıyla kolayca tekrar müdahale imkânı vermektedir. SternaLock plâkların kullanımı durumunda ise vidaların çıkarılması ya da plâğın kesilmesi gerekmektedir. Titanyum plâkların maliyeti ise kullanılacak plâk tipi ve vida sayısına göre değişmekle birlikte, tek bir plâğın maliyeti diğer yöntemlerle yapılan kapamanın toplam maliyetini aşabilmektedir. Kapamada kullanılacak tek bir titanyum vidanın maliyeti ise bir çelik bandın maliyetinden fazla olmaktadır.

4.6. Görüntü Analizi Sonuçları

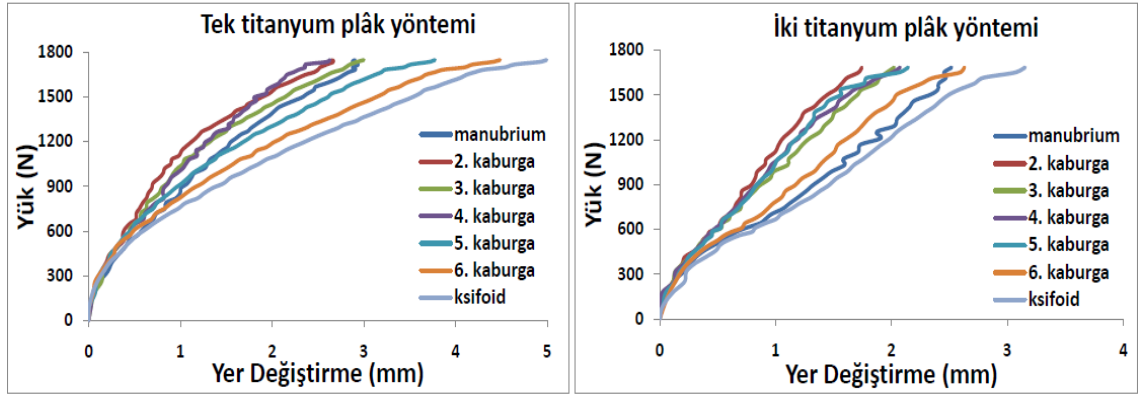
Yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemelerinde, deneylerde kaydedilen görüntüler kullanılarak sternum gövdesinde oluşan yer değiştirmeler görüntü analizi ile belirlenmiştir. Yükleme şekillerine göre elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.6.1. Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi sonuçları

Yanal ayrılma yüklemesinde, sternum gövdesinde yedi farklı noktada oluşan yer değiştirmeler görüntü analizi ile hesaplanmıştır. İncelenen kapama yöntemleri için, yedi kaburga çıkıntısı hizasında ölçülen bu yer değiştirme değerleri kullanılarak oluşturulan yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.85’de gösterilmiş ve elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir.



Şekil 4.85. Yanal ayrılma deneylerinde görüntü analizi ile elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri



Şekil 4.85. (devam)

• Yük-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, karşılaştırılan bütün yöntemlerde en büyük yer değiştirme değerlerinin ksifoid bölgesinde olduğu belirlenmiştir. Bu bölgeyi, iki plâk yönteminde manubrium bölgesindeki, diğer bütün yöntemlerde ise altıncı kaburga hizasında oluşan yer değiştirmeler takip etmiştir. Bu durum ksifoid bölgesinde kullanılan tek bir çelik telin kapamalarda yetersiz kaldığını göstermektedir. Özellikle, beşinci kaburga boşluğu ile ksifoid arasında kalan kısımda oluşan yer değiştirmeler, burada ilave tel kullanımının önemini göstermektedir. Geleneksel tel, tellerle figür-8, kablolarla figür-8 ve tek plâk yöntemlerinde üçüncü sırada beşinci kaburga çıkıntısındaki yer değiştirmeler yer alırken, çelik bant, PEEK bant ve titanyum klipslerle yapılan kapamalarda ise manubrium bölgesi üçüncü sırada yer almıştır. Bu durum beşinci kaburga boşluğuna yerleştirilen klips veya bantların bu bölgedeki yer değiştirmeleri, tel kullanımına kıyasla azalttığını göstermektedir. İki titanyum plâk yönteminde ise dördüncü ve beşinci kaburga boşlukları arasında yerleştirilen plâğın bu bölgelerdeki yer değiştirmeleri sınırladığı görülmüş ve en büyük yer değiştirmenin olduğu ksifoid bölgesini, ikinci sırada manubrium bölgesi takip etmiş ve üçüncü sırada altıncı kaburga hizası yer almıştır. Bu sonuçlar, ksifoid bölgesinde olduğu gibi manubrium bölgesinde de birden fazla tel kullanılmasının faydalı olacağını göstermektedir.

• En küçük yer değiştirme değerleri, bütün yöntemlerde ikinci kaburga hizasında elde edilmiştir.

- Emniyet yükünün belirlenmesinde dikkate alınan 2 mm yer değiştirme değerinin, bütün yöntemlerde ilk olarak ksifoid bölgesinde olduğu görülmüştür. Bu bölgedeki yer değiştirme değeri dikkate alınarak belirlenen emniyet yükleri ve direngenlik değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir. Kapama yöntemlerinin bu değerlere göre sıralaması, deney aleti verilerinden oluşturulan sıralamaya benzer şekilde olmuştur.

Çizelge 4.8. Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri

Yöntem	Emniyet Yükü (N)				Direngenlik (N/mm)			
	Görüntü Analizi	Sıra	Deney Aleti	Sıra	Görüntü Analizi	Sıra	Deney Aleti	Sıra
Geleneksel tel	1050,7	10	1032,6	10	565,5	10	546,1	10
Ç. tel figür-8	1211,9	7	1209,4	5	663,2	4	652,7	3
Kablo figür-8	1088,6	9	1042,1	9	593,9	9	546,2	9
İki çelik bant	1404,9	2	1271,1	2	796,3	1	666,6	1
Üç çelik bant	1457,1	1	1294,5	1	782,8	2	662,5	2
İki PEEK bant	1233,4	5	1225,1	4	656,7	5	634,6	5
Üç PEEK bant	1317,3	3	1233,1	3	698,7	3	639,9	4
Titanyum klips	1232,3	6	1184,4	6	627,2	8	616,5	6
Tek tit. plâk	1105,1	8	1087,7	7	643,8	6	615,9	7
İki tit. plâk	1253,3	4	1081,1	8	638,2	7	571,8	8

Elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerlerinin, deney aletinden alınan verilere kıyasla daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu fark, özellikle üç çelik bant, iki çelik bant, üç PEEK bant ve iki titanyum plâk yöntemlerinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu yöntemlerden ilk üçünün ayrıca en direngen yöntemler oldukları dikkate alındığında, bu farkın yükleme çenelerinin hareketi ve sternumların çeneye vidalandığı noktalarda meydana gelen esnemelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. İki titanyum plâk yönteminde ki farklılığın ise bu etkenlerin yanında, sternumun ön ve arka yüzeyinde oluşan yer değiştirme farkından kaynaklandığı görülmüştür. İki titanyum plâk yönteminde, sternumun arka yüzeyinden alınan görüntüler incelendiğinde emniyet yükü ve direngenlik değerinin sırasıyla, 1128,8 N ve 604,4 N/mm olduğu belirlenmiştir.

- Karşılaştırılan kapama yöntemlerinde, sternumun ön ve arka yüzeylerinden alınan yer değiştirme değerlerine göre emniyet yükleri hesaplandığında, titanyum klips, tek titanyum plâk ve iki titanyum plâk yöntemleri haricindeki bütün yöntemlerde çok yakın sonuçlar çıktığı görülmüştür (Çizelge 4.9). Titanyum klips yönteminde görülen küçük farklılığın, klipslerin sternumu tam olarak sarmayan yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte bu yöntemde ön ve arka yüzeyler arasındaki yer değiştirme farkının çok büyük olmadığı da görülmektedir. Plâklarla yapılan kapamalarda ise plâk-vida sisteminin sternumu sarmayan, tek taraflı uygulama biçiminden kaynaklanan bir şekilde, sternumların arka yüzeylerinde daha büyük yer değiştirmelerin olduğu belirlenmiştir. Beş adet tel ve bir tane plâğın kullanıldığı tek plâk yönteminde bu durum daha düşük seviyelerde kalırken, iki titanyum plâk yönteminde ön ve arka yüzeyden hesaplanan emniyet yükleri oldukça farklı çıkmıştır. Kopma anında, tek plâk ve iki plâk yöntemiyle kapatılan sternumların ön ve arka yüzeylerinde belirlenen yer değiştirme değerlerinde de, bu farklılık belirgin şekilde görülmektedir.

Çizelge 4.9. Yanal ayrılma yüklemesinde sternumun ön ve arka yüzeylerindeki yer değiştirmelere göre belirlenen emniyet yükleri

Yöntem	Emniyet Yüğü (N)	
	Sternumun Ön Yüzeyi	Sternumun Arka Yüzeyi
Geleneksel tel	1050,7	1044,4
Ç. tellerle figür-8	1211,9	1207,2
Ç. kablolarla figür-8	1088,6	1083,5
İki çelik bant	1404,9	1400,2
Üç çelik bant	1457,1	1454,6
İki PEEK bant	1233,4	1229,9
Üç PEEK bant	1317,3	1314,7
Titanyum klips	1232,3	1218,4
Tek titanyum plâk	1105,1	1088,1
İki titanyum plâk	1253,3	1128,8

- Görüntü analizi sonucunda belirlenen kopma uzaması değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Kopma uzaması olarak, kemiğin ilk kırıldığı anda sternumda meydana gelen en büyük yer değiştirme değeri dikkate alınmış ve bütün yöntemlerde bu değerlerin ksifoid bölgesinde oluştuğu görülmüştür.

Çizelge 4.10. Yanal ayrılma yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen kopma uzaması değerleri

Yöntem	Kopma Uzaması (mm)			
	Görüntü Analizi	Sıra	Deney Aleti	Sıra
Geleneksel tel	6,82	1	6,28	1
Ç. tellerle figür-8	4,23	5	3,55	6
Ç. kablolarla figür-8	6,28	2	6,01	2
İki çelik bant	3,19	8	3,24	8
Üç çelik bant	3,01	10	3,11	10
İki PEEK bant	4,29	4	3,78	5
Üç PEEK bant	3,89	6	3,91	4
Titanyum klips	3,49	7	3,24	9
Tek titanyum plâk	4,99	3	4,52	3
İki titanyum plâk	3,15	9	3,35	7

Üç çelik bant, iki çelik bant, iki titanyum plâk ve üç PEEK bant yöntemlerinde, deney aleti verilerinden daha küçük kopma uzamaları oluştuğu görülmüş, diğer yöntemlerde ise daha büyük kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Bu farklılığın, sternumda kırılma meydana gelmeden önce ksifoid bölgesindeki telin kemiği sıyrılma seviyesinde kesmesinden kaynaklandığı görülmüştür. Üç çelik bant, iki çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinde, bu yöntemlerin sağladığı direngenlik sayesinde telin kesme etkisi daha düşük seviyelerde kalmıştır. İki titanyum plâk yönteminde ise plâk sisteminin davranışının etkisiyle ön yüzeyde, deney verilerinde daha düşük bir yer değiştirme değeri (3,15 mm) oluşmuşken, arka yüzeydeki yer değiştirme miktarı (3,48 mm) deney aleti verilerinden daha büyük çıkmıştır. Diğer yöntemlerde ise tel, kemiği çok derin bir şekilde kesmiş ve bazı deneylerde tamamen sıyrılarak, deney aleti verilerinden daha büyük yer değiştirme değerlerinin oluşmasına neden olmuştur.

- İki titanyum plâk ve tek titanyum plâk yöntemlerinde, yukarıda bahsedildiği gibi, sternumun ön ve arka yüzeylerinde farklı yer değiştirme değerleri olduğu görülmüştür. Bu iki yöntemde, ön yüzeyden hesaplanan emniyet yüküne karşılık gelen ön ve arka yüzeylerdeki yer değiştirme değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir. İki titanyum plâk yönteminde sternum gövdesinde (2, 3, 4 ve 5. kaburgalar) yaklaşık %50 oranında yer değiştirme farkı olduğu, ksifoid, manubrium ve 6. kaburga bölgelerinde ise bu farkın %15-%20 değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemde ayrıca, kritik yer değiştirme değeri olan 2 mm değerine sternumun ön yüzünde bir bölgede, arka yüzünde ise dört farklı bölgede ulaşıldığı görülmüştür. Tek titanyum plâk yönteminde ise yer değiştirme farkları gövdede %20-%30 seviyesinde iken diğer bölgelerde %7-%15 aralığında çıkmıştır. Plâkların uygulama şeklinden kaynaklanan bu durum dikkate alındığında her iki yöntem için emniyet yükü, direngenlik ve kopma uzaması değerleri arasında Çizelge 4.12’de gösterilen farklılık oluşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, titanyum plâk kullanımında ön ve arka yüzeylerdeki yer değiştirme farklarının, kemik iyileşmesi açısından olumsuz sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.11. Tek plâk ve iki plâk yöntemlerinde sternumun ön ve arka yüzeylerinde oluşan yer değiştirmelerin karşılaştırılması

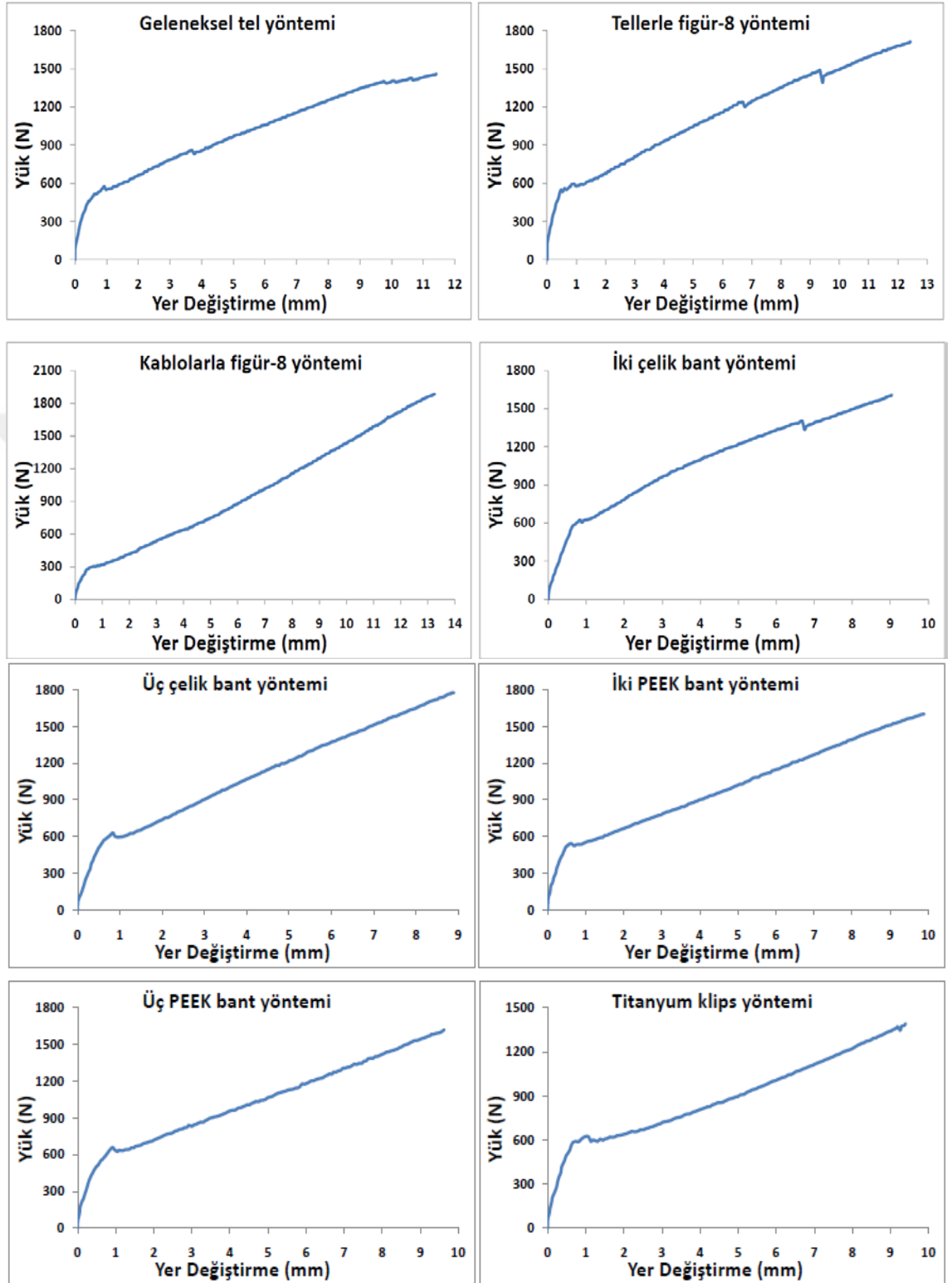
Yöntem	Emn. Yükü (N)		Yer Değiştirme (mm)						
			Ksif.	6. kab.	5. kab.	4. kab.	3. kab.	2.kab.	Manu.
İki titanyum plâk	1253,3	Ön	2,00	1,69	1,25	1,22	1,38	1,12	1,87
		Arka	2,31	2,03	1,86	1,84	2,00	1,70	2,22
		Fark	%15	%20	%48,8	%50,8	%44,9	%51,8	%18,7
Tek titanyum plâk	1105,1	Ön	2,01	1,77	1,40	1,18	1,13	0,98	1,38
		Arka	2,22	1,90	1,68	1,51	1,50	1,29	1,58
		Fark	%11	%7,4	%20	%27,9	%32,7	%31,6	%14,5

Çizelge 4.12. Tek plâk ve iki plâk yöntemlerinde sternumun ön ve arka yüzeylerinden elde edilen emniyet yükü, direngenlik ve kopma uzaması değerleri

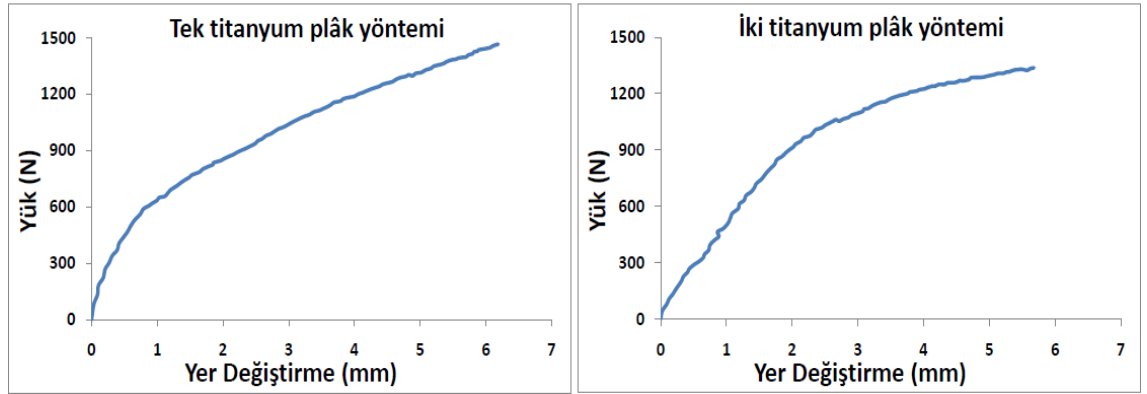
Yöntem	Emniyet Yüğü (N)		Direngenlik (N/mm)		Kopma Uzaması (mm)	
	Ön	Arka	Ön	Arka	Ön	Arka
Tek titanyum plâk	1105,1	1088,1	643,8	616	4,99	5,48
İki titanyum plâk	1253,3	1128,8	638,2	572,9	3,15	3,47

4.6.2. Boyuna kesme yüklemede görüntü analizi sonuçları

Boyuna kesme deneyinde, görüntü analizi ile sternumun ön yüzeyinde ölçülen yer değiştirme değerleri kullanılarak oluşturulan yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.86’da gösterilmiştir. Bu eğrilerden hesaplanan emniyet yükü, direngenlik ve kopma uzaması değerleri ve bu değerlerin deney aleti verileri ile karşılaştırılması ise Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.86. Boyuna kesme deneylerinde görüntü analizi ile elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri



Şekil 4.86. (devam)

Çizelge 4.13. Boyuna kesme yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri

Yöntem	Emniyet Yükü (N)				Direngenlik (N/mm)			
	Görüntü Analizi	Sıra	Deney Aleti	Sıra	Görüntü Analizi	Sıra	Deney Aleti	Sıra
Geleneksel tel	664,03	8	579,79	8	427,76	6	382,98	6
Ç. tel f-8	679,63	6	591,02	6	456,9	4	400,96	3
Ç. kablo f-8	419,36	10	347,75	10	254,84	10	222,02	10
İki çelik bant	786,03	2	626,59	3	411,26	8	366,39	8
Üç çelik bant	738,89	3	611,42	4	471,59	3	387,11	5
İki PEEK bant	674,62	7	575,69	9	427,48	7	375,56	7
Üç PEEK bant	721,86	4	638,9	2	476,65	2	414,33	2
Titanyum klips	639,86	9	587,93	7	440,99	5	390,04	4
Tek tit. plâk	856,02	1	738,8	1	524,03	1	437,08	1
İki tit. plâk	688,76	5	604,53	5	371,32	9	309,28	9

Çizelge 4.14. Boyuna kesme yüklemesinde görüntü analizi ile elde edilen kopma uzaması değerleri

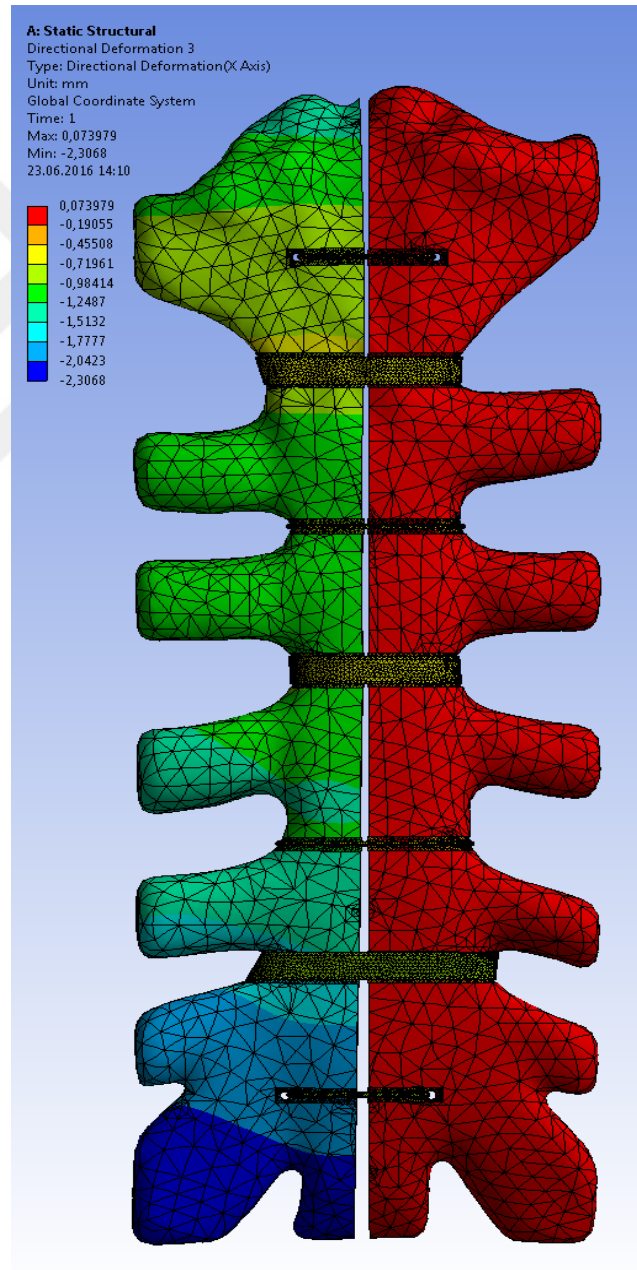
Yöntem	Kopma Uzaması (mm)			
	Görüntü Analizi	Sıra	Deney Aleti	Sıra
Geleneksel tel	11,4	3	15,8	3
Ç. tellerle figür-8	13,3	2	18,6	2
Ç. kablolarla figür-8	13,4	1	18,9	1
İki çelik bant	9,04	7	13,9	6
Üç çelik bant	8,9	8	13,6	7
İki PEEK bant	9,9	4	14	4
Üç PEEK bant	9,6	5	13,9	5
Titanyum klips	9,4	6	13,4	8
Tek titanyum plâk	6,2	9	8,3	9
İki titanyum plâk	5,7	10	8,3	10

Kapama yöntemlerinin tamamında görüntü analizi ile elde edilen emniyet yükü ve direngenlik değerleri deney aleti verilerinden daha büyük, kopma uzaması değerleri ise daha küçük çıkmıştır. Yanal ayrılma yüklemesinde olduğu gibi bu durumun, yükleme çenelerinin hareketi ile sternum yüzeyindeki hareketin farklılığı ve sternumların vidalandığı noktalarda oluşan esnemelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte yöntemlerin emniyet yükü, direngenlik ve kopma uzaması değerlerine göre sıralamasında, deney aleti verilerine göre oluşan sıralamaya oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

4.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları

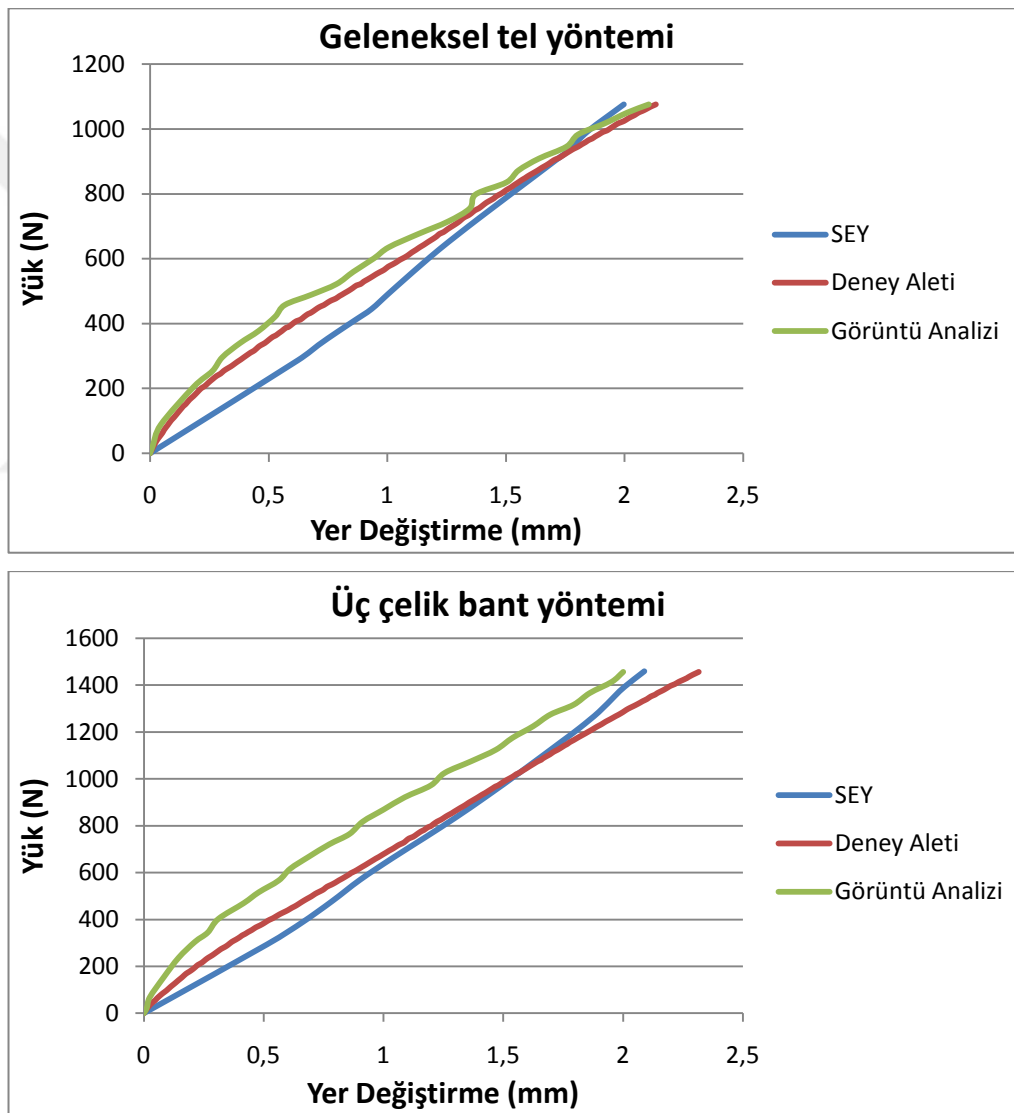
Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde ilk olarak, geleneksel tel, üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinde elde edilen sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlere, görüntü analizlerinden elde edilen emniyet yükleri olan, üç çelik bant için 1457 N, üç PEEK bant için 1317 N ve geleneksel tel yöntemi için 1051 N yük uygulanmış ve yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinde kritik yer değiştirme değerine (2 mm) bu yüklemelerde

ulaşılırken, geleneksel tel yönteminde sternumun herhangi bir bölgesinde bu yer değıştirme değeri oluşmamıştır. Bu nedenle, geleneksel tel yönteminde sternuma daha büyük bir kuvvet (1100 N) uygulanarak tekrar analizi yapılmıştır. Üç çelik bant yöntemi için 1457 N'luk yük etkisinde, sternum gövdesinde oluşan yer değıştirmeler Şekil 4.87'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle incelenen diğer yöntemlerde elde edilen analiz sonuçları ise EK 1'de toplu olarak verilmiştir.

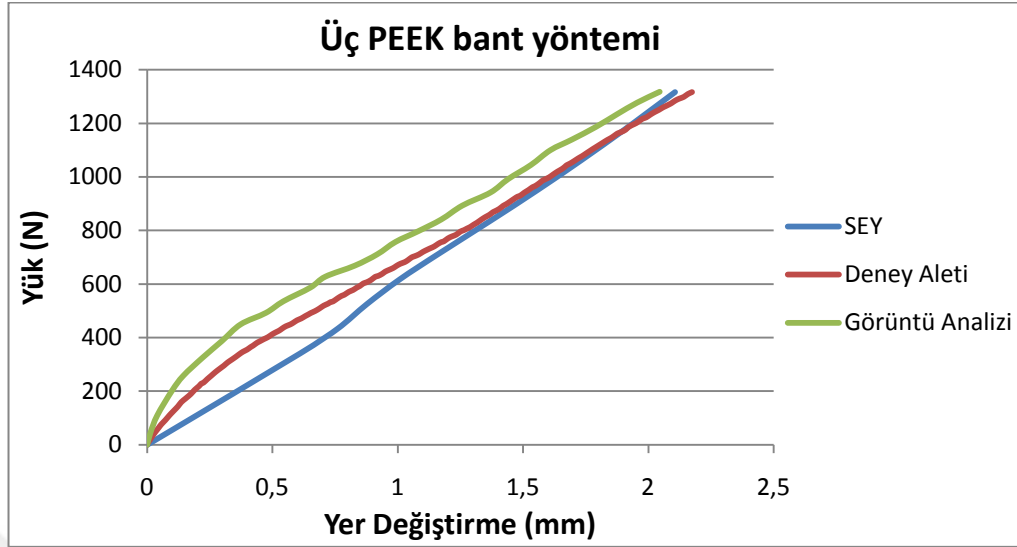


Şekil 4.87. Üç çelik bant yönteminde emniyet yükü etkisinde oluşan yer değıştirmeler

Yük-yer değiştirme grafikleri, görüntü analizlerinde dikkate alınan bölgelerin analizlerde incelenmesi ile en büyük yer değiştirme değerine göre çizilmiştir. Bu grafikler kullanılarak, yöntemlerin emniyet yükleri ve direngenlikleri hesaplanmıştır. Ayrıca, sternum gövdesinde oluşan yer değiştirmeler de görüntü analizi sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu üç yöntem için SEY analizi ile deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri şekil 4.88 ve şekil 4.89’da verilmiştir.



şekil 4.88. Geleneksel tel ve üç çelik bant yöntemlerinin SEY analizi ve deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 4.89. Üç PEEK bant yönteminin SEY analizi ve deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Yöntemlerin emniyet yükleri ve direngenlik değerlerinin hesabında grafikler üzerinde belirlenen 2 mm değeri ve buna karşılık gelen yük değeri dikkate alınmıştır. Bu şekilde belirlenen emniyet yükü ve direngenlik değerlerinin, deney aleti verileri ve görüntü analizi sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 4.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Geleneksel tel, üç çelik bant ve üç PEEK bant tekniklerinin farklı yöntemlerle belirlenen direngenlik ve emniyet yükü değerleri

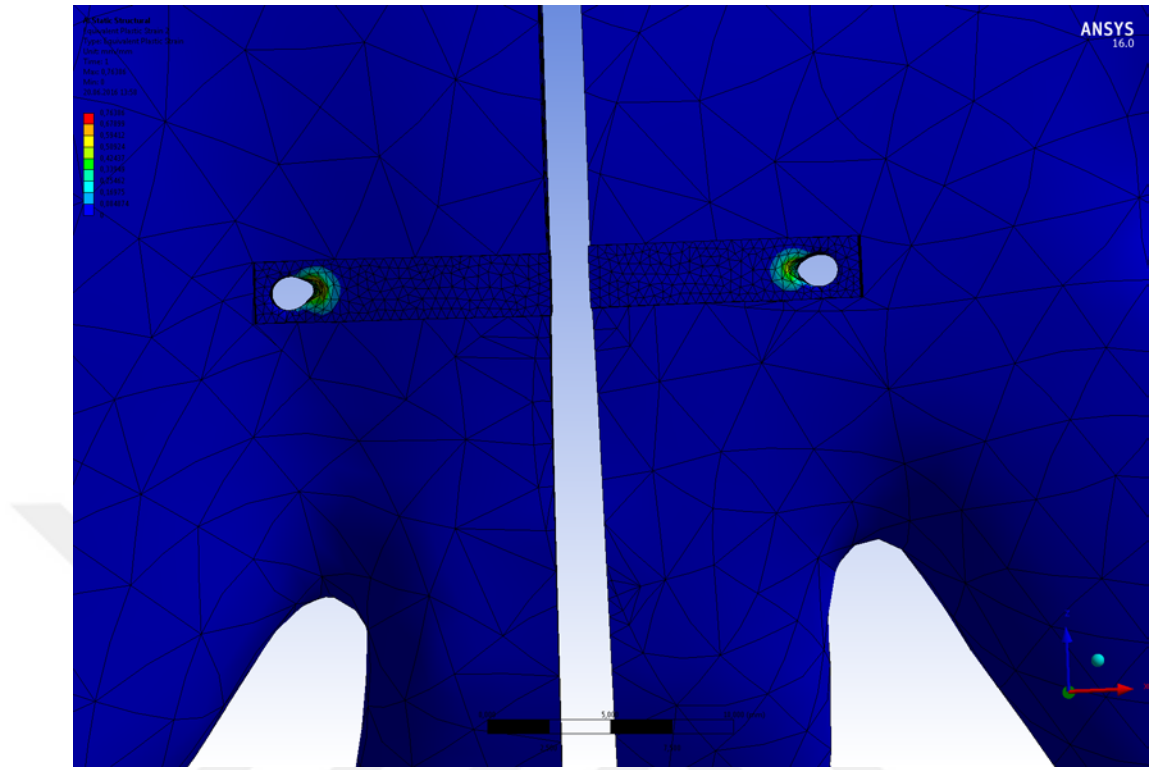
Yöntem	Emniyet Yükü (N)			Direngenlik (N/mm)		
	Görüntü analizi	Deney aleti	SEY	Görüntü analizi	Deney aleti	SEY
Geleneksel tel yöntemi	1050,7	1032,6	1076	565,5	546,1	509,8
Üç çelik bant yöntemi	1457,1	1294,5	1383	782,8	662,5	660,6
Üç PEEK bant yöntemi	1317,3	1233,1	1234,4	698,7	639,9	602,2

Yöntemlere, görüntü analizi sonuçlarında ulaşılan emniyet yükü değerleri uygulandığında, sternum gövdesinde yedi farklı noktada oluşan yer değiştirmelerin, görüntü analizi sonuçları ile kıyaslaması Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. SEY analizleri ve deneylerden elde edilen yer değiştirme değerleri

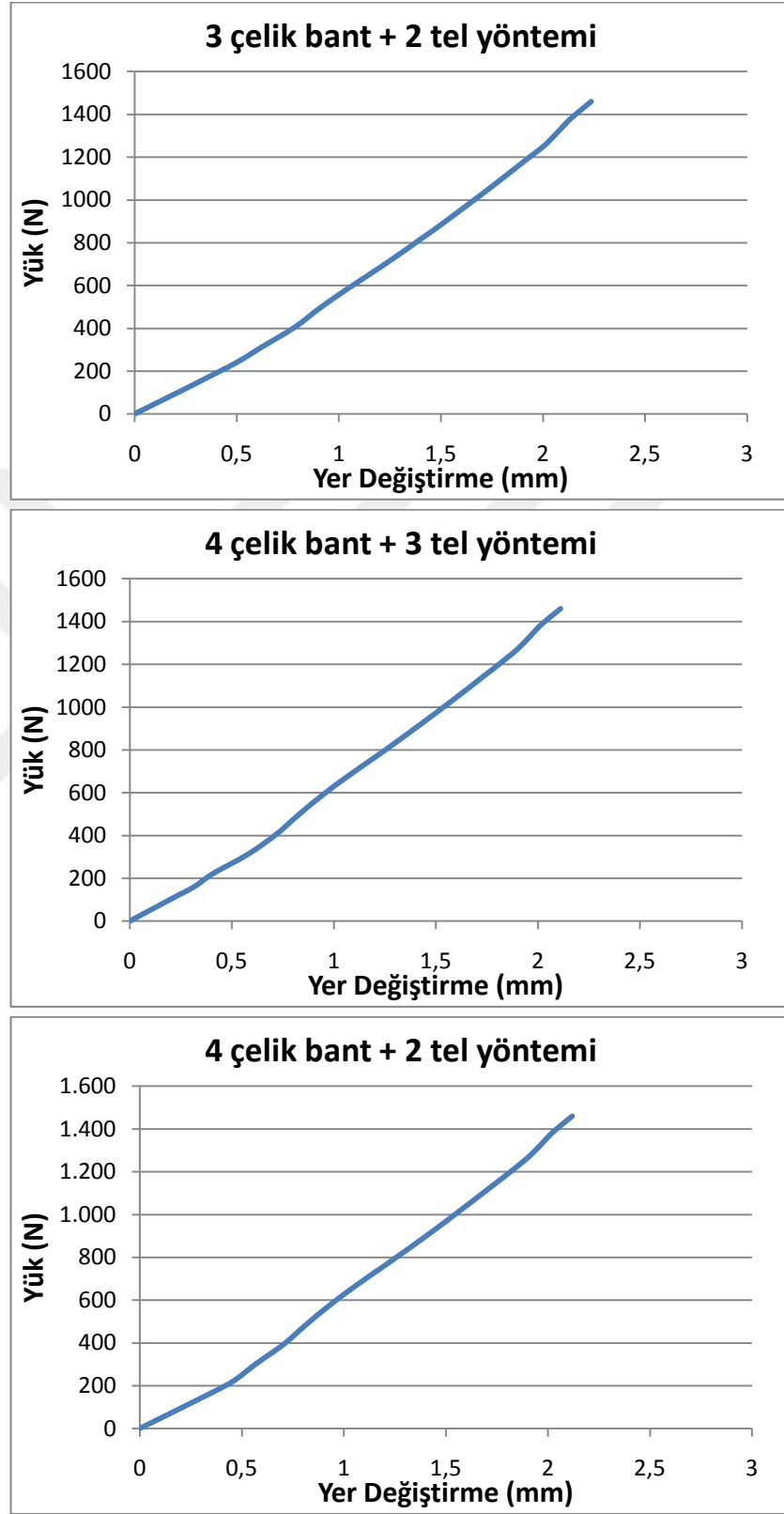
Yöntem		Yer Değiştirme (mm)						
		Ksif.	6. kab.	5. kab.	4. kab.	3. kab.	2.kab.	Manu.
Geleneksel tel yöntemi	Deney	2,00	1,83	1,47	1,18	1,19	1,08	1,43
	SEY	1,94	1,73	1,35	1,21	1,1	0,95	1,33
Üç çelik bant yöntemi	Deney	2,00	1,72	1,38	1,21	1,25	1,11	1,54
	SEY	2,08	1,79	1,41	1,21	1,11	1,09	1,38
Üç PEEK bant yöntemi	Deney	2,00	1,81	1,38	1,2	1,18	1,13	1,47
	SEY	2,11	1,84	1,55	1,41	1,22	1,12	1,32

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda bulunan emniyet yükü, direngenlik ve yer değiştirme değerlerinin, deneylerden elde edilen sonuçlara yakın çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca, deneylerde görülen tellerin kesme etkisinin SEY analizlerinde de benzer şekilde olduğu, kritik yer değiştirme değerinin de ilk olarak ksifoid bölgesinde meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4.90).

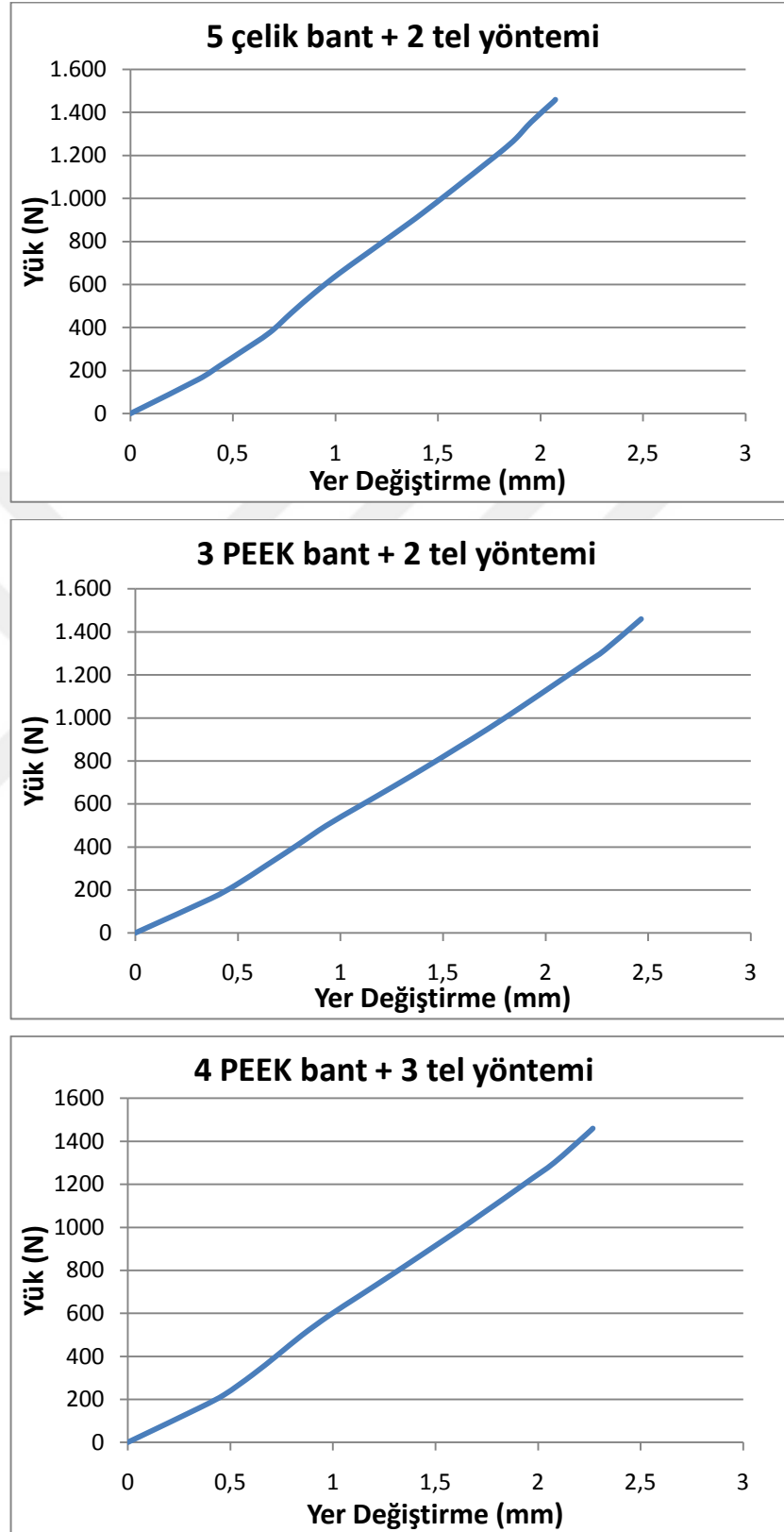


Şekil 4.90. Ksifoid bölgesinde kullanılan telin kemiği kesme etkisi

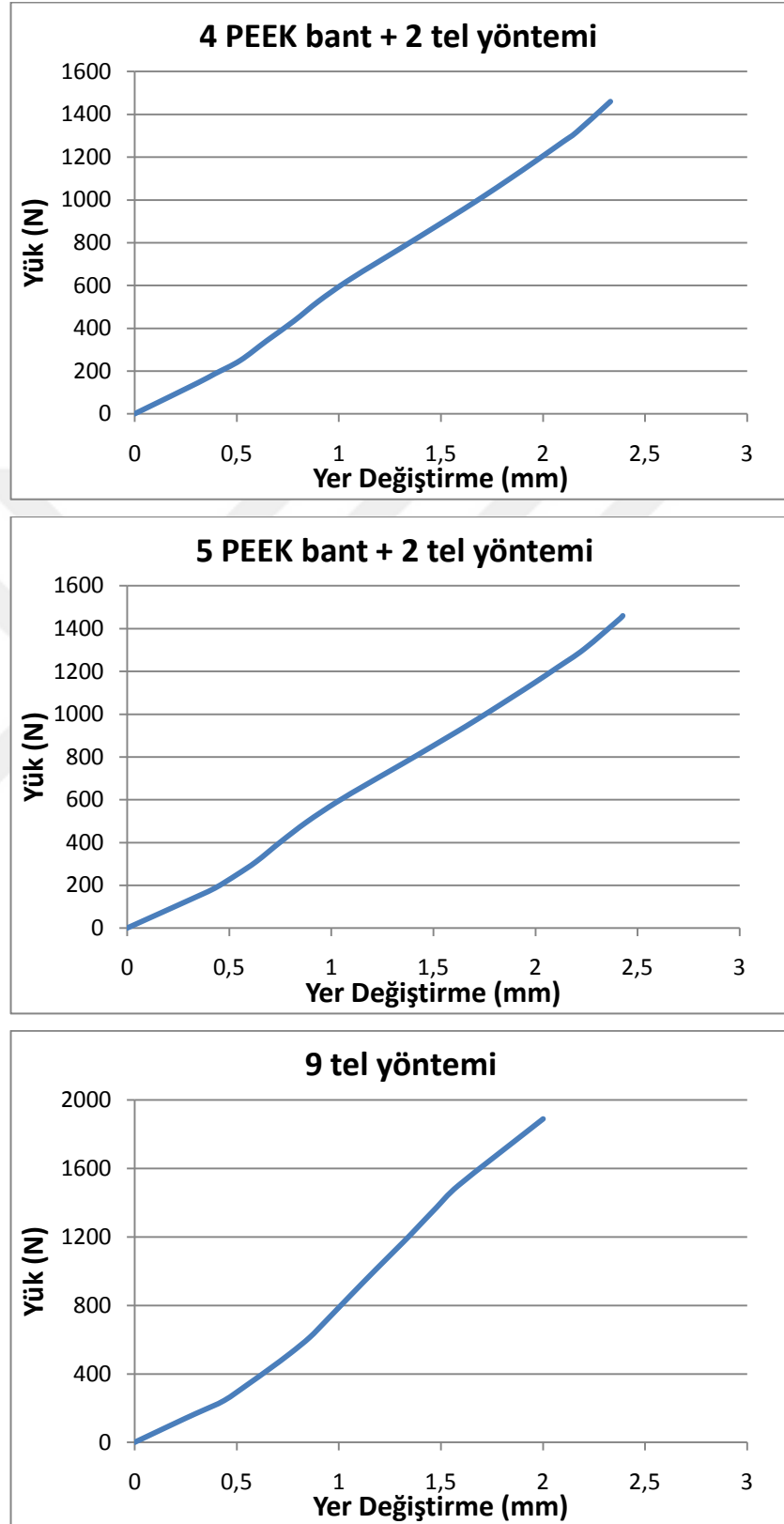
Sayısal modellerin, kapama yöntemlerinin gerçek davranışlarını doğru olarak yansıttığını gösteren bu bulgular sonucunda, deneyle testi yapılmamış toplam 11 farklı kapama yöntemi SEY analizleri ile incelenmiştir. Bu yöntemlere, yanal ayrılma deneylerinde elde edilen en büyük emniyet yükü değeri olan 1457 N'luk bir yük uygulanmıştır. Analizler sonucunda 9 tel, 2 çelik bant + 7 tel ve 3 çelik bant + 6 tel yöntemlerinin dışındaki kapama yöntemlerinde, kritik yer değiştirme değerine (2 mm) ulaşıldığı görülmüştür. Bu yöntemlerde ise yer değiştirme değerleri mevcut yüklemde oldukça küçük çıkmıştır. Bu nedenle, söz konusu yöntemlerde 2 mm'lik yer değiştirmeye ulaşmak amacıyla daha büyük bir yük değeri (2380 N) uygulanmış ve bu yöntemlerin yük-yer değiştirme eğrileri bu yüklemeye göre çizilmiştir. Yöntemlerin analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.91'da verilmiştir. Analiz sonuçları EK 1'de toplu olarak gösterilmiştir.



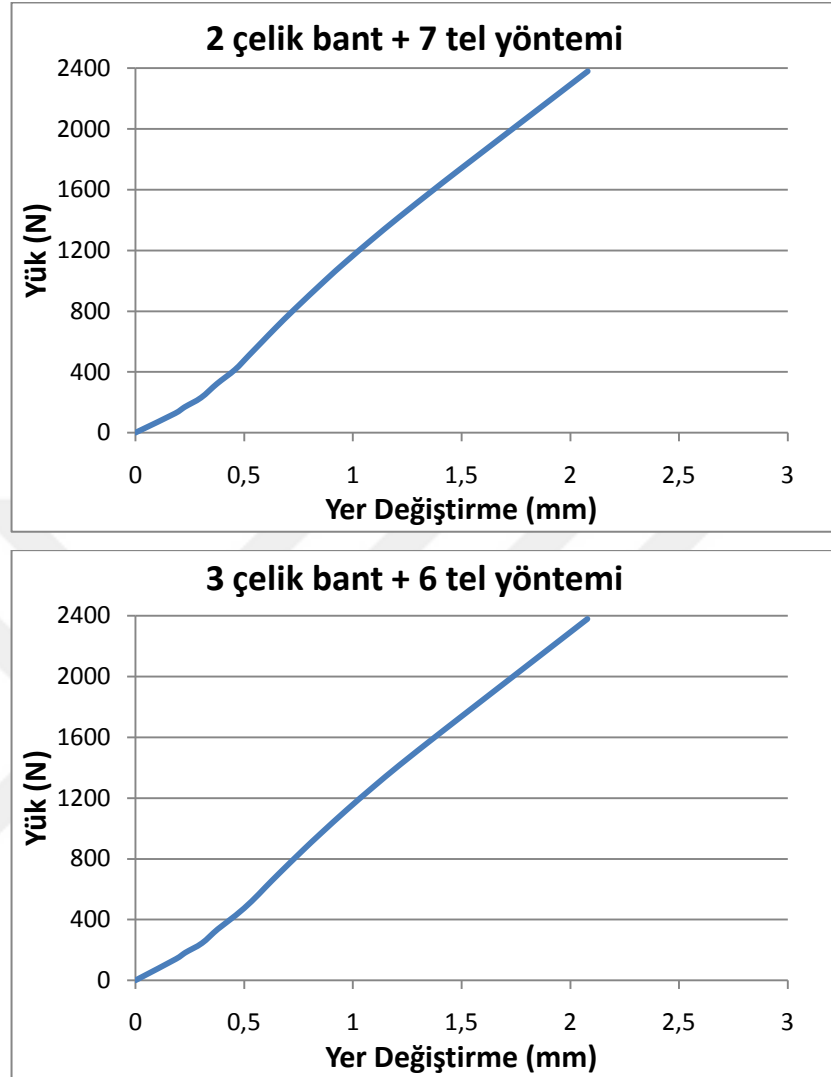
Şekil 4.91. SEY analizleri ile karşılaştırılan yöntemlerin yük-yer değiştirme eğrileri



Şekil 4.91. (devam)



Şekil 4.91. (devam)



Şekil 4.91. (devam)

Yük-yer değiştirme eğrileri kullanılarak yöntemlerin emniyet yükleri ve direngenlik değerleri hesaplanmıştır. Analizi yapılan bütün yöntemler için elde edilen bu değerler Çizelge 4.17’de verilmiştir. Yöntemlerin tamamına 1457 N değerinde yük uygulanması durumunda, sternum gövdesinde belirlenen yer değiştirme değerleri de Çizelge 4.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. SEY analizlerinde karşılaştırılan yöntemlerin emniyet yükü ve direngenlik değerleri

Yöntem	Emniyet Yüğü (N)	Direngenlik (N/mm)
7 tel (Geleneksel tel) yöntemi	1076	509,8
9 tel yöntemi	1889,8	843,6
3 bant + 4 tel (Üç çelik bant) yöntemi	1383	660,6
3 çelik bant + 2 tel yöntemi	1257,2	589
4 çelik bant + 3 tel yöntemi	1364,9	647,6
4 çelik bant + 2 tel yöntemi	1357,7	644,9
5 çelik bant + 2 tel yöntemi	1393,3	661,9
2 çelik bant + 7 tel yöntemi	2320,2	1130,6
3 çelik bant + 6 tel yöntemi	2320	1126,1
3 PEEK bant + 4 tel (Üç PEEK bant) yöntemi	1234,4	602,2
3 PEEK bant + 2 tel yöntemi	1119,5	537,9
4 PEEK bant + 3 tel yöntemi	1251,8	602,7
4 PEEK bant + 2 tel yöntemi	1203,7	583,6
5 PEEK bant + 2 tel yöntemi	1147,4	560,7

Çizelge 4.18. SEY analizleri sonucunda 1457 N yük değeri için bulunan yer değiştirme değerleri

Yöntem	Yer Değiştirme (mm)						
	Ksif.	6. kab.	5. kab.	4. kab.	3. kab.	2.kab.	Manu.
7 tel (Geleneksel tel) yöntemi	2,24	1,93	1,59	1,56	1,37	1,15	1,89
9 tel yöntemi	1,27	1,1	1,36	1,62	1,48	1,2	0,75
3 bant + 4 tel (Üç çelik bant) yöntemi	2,08	1,79	1,41	1,21	1,11	1,09	1,38
3 çelik bant + 2 tel yöntemi	2,24	2,01	2,11	1,81	1,76	1,72	2,03
4 çelik bant + 3 tel yöntemi	2,11	1,83	1,35	1,21	1,05	1,01	1,29
4 çelik bant + 2 tel yöntemi	2,13	1,87	1,42	1,66	1,41	1,1	1,3
5 çelik bant + 2 tel yöntemi	2,06	1,78	1,31	1,12	1,00	0,97	1,37
2 çelik bant + 7 tel yöntemi	1,25	1,07	1,33	1,41	1,33	1,1	0,77
3 çelik bant + 6 tel yöntemi	1,29	1,06	1,29	1,41	1,24	1,03	0,78
3 PEEK bant + 4 tel (Üç PEEK bant) yöntemi	2,28	2,04	1,72	1,63	1,32	1,17	1,36
3 PEEK bant + 2 tel yöntemi	2,47	2,23	2,55	2,29	1,89	1,78	1,37
4 PEEK bant + 3 tel yöntemi	2,25	1,98	1,73	1,37	1,23	1,19	1,34
4 PEEK bant + 2 tel yöntemi	2,33	2,1	1,84	1,87	1,67	1,26	1,41
5 PEEK bant + 2 tel yöntemi	2,4	2,15	1,69	1,23	1,21	1,17	1,42

Elde edilen emniyet yükü, direngenlik ve yer değiştirme değerlerine göre yapılan değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

• Deneysel çalışmalarda yanal ayrılma yüklemesi için en iyi emniyet yükü ve direngenlik değerleri üç çelik bant yönteminde elde edilmiştir. Analizler sonucunda ise en büyük emniyet yükü ve direngenlik değerlerine, 2 çelik bant + 7 tel yöntemi ile 3 çelik bant + 6 tel yöntemlerinde ulaşılmış, bu yöntemleri 9 çelik telle yapılan kapama yöntemi takip etmiştir. Bu üç yöntem ile diğer yöntemler arasında oldukça büyük bir fark olduğu görülmektedir. Deneysel olarak da incelenmiş olan, üç çelik bant, iki çelik bant ve geleneksel tel yöntemlerine, manubrium ve ksifoid bölgesinde birer telin ilave edildiği bu üç yöntemden elde edilen sonuçlar, kullanılan ilave tellerin etkisini ortaya koymaktadır. Bu üç yöntemde, emniyet yükü değerleri olan 1889,8 N ve 2320 N değerindeki yükler uygulandığında elde edilen yer değiştirmeler Çizelge 4.19'da verilmiştir. Dokuz tel ve 2 çelik bant + 7 tel yöntemlerinde, kritik yer değiştirme değerinin ilk olarak 4. kaburga hizasında olduğu görülmekte, 3 çelik bant + 6 tel yönteminde ise bu değer ilk olarak ksifoid bölgesinde meydana gelmektedir. Sternum gövdesinde kullanılan bant sayısı artırıldığında, gövdedeki yer değiştirmelerin azaldığı, manubrium ile ksifoid bölgesinde ki yer değiştirmelerde ise belirgin bir farkın olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.19. SEY analizlerinde en iyi sonuçları veren üç yöntemin kendi emniyet yükleri etkisinde yer değiştirme değerleri

Yöntem	Yük (N)	Yer Değiştirme (mm)						
		Ksif.	6. kab.	5. kab.	4. kab.	3. kab.	2. kab.	Manu.
9 tel	1889,8	1,75	1,47	1,73	2,01	1,84	1,47	0,9
2 bant + 7 tel	2320,2	1,98	1,71	1,89	2,00	1,94	1,44	0,99
3 bant + 6 tel	2320	2,01	1,67	1,82	1,89	1,66	1,38	1,1

• Çelik bantlarla yapılan ve manubrium ile ksifoidde ilave tellerin kullanılmadığı diğer kapamalarda, en büyük emniyet yükü ve direngenlik değeri ise beş çelik bant yönteminde bulunmuştur. En küçük yer değiştirme değerleri de beş çelik bant

yönteminde elde edilmiştir. Bununla birlikte, 3 çelik bant + 2 tel yöntemi dışındaki diğer çelik bant yöntemlerinin emniyet yükü ve direngenlik değerleri arasında büyük farklılıklar oluşmadığı görülmüştür.

- Üç çelik bant yönteminde gövdede kullanılan iki tel çıkarılarak yapılan 3 çelik bant + 2 tel yönteminde, emniyet yükü ve direngenlik değerleri üç çelik bant yöntemine kıyasla belirgin şekilde küçük çıkmış, yer değiştirme değerlerinde ise belirgin bir artış olmuştur.

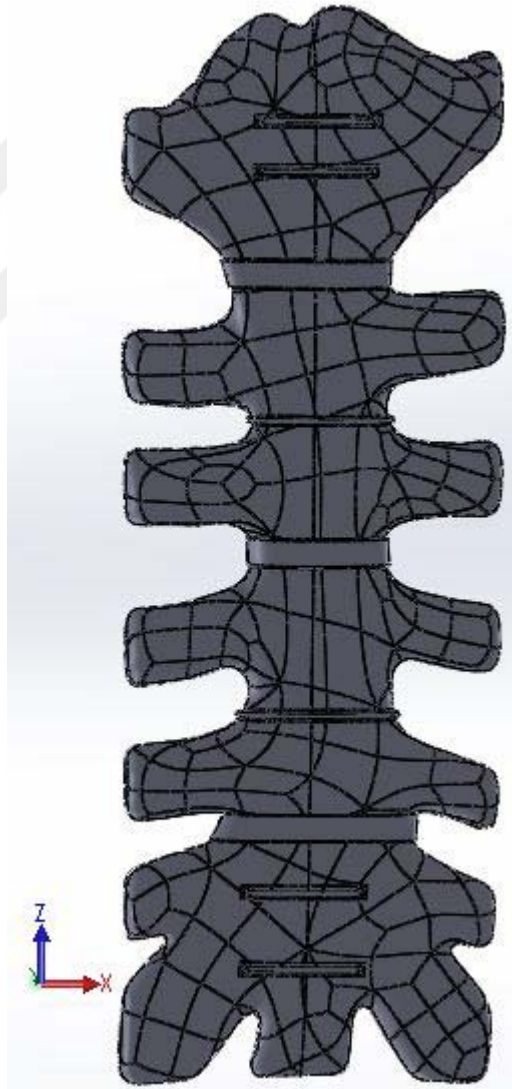
- Dört çelik bantın kullanıldığı 4 çelik bant + 3 tel ve 4 çelik bant + 2 tel yöntemlerinde, üç çelik bant yöntemine göre daha düşük emniyet yükü ve direngenlik değerleri elde edilmiştir. 4 çelik bant + 3 tel yönteminde, 6. kaburga ve ksifoid bölgesinde, üç çelik bant yönteminden daha büyük, diğer bölgelerde ise daha küçük yer değiştirmeler oluşmuştur. Ksifoid bölgesindeki oluşan bu büyük yer değiştirmeler, yöntemin emniyet yükü ve direngenliğinin üç çelik bant yönteminden daha düşük çıkmasına neden olmuştur. 4 çelik bant + 2 tel yönteminde ise manubrium hariç bütün bölgelerde, üç çelik bant yönteminden daha büyük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Dört çelik bantla yapılan yöntemler arasında ise emniyet yükü ve direngenlik değerleri oldukça yakın çıkmıştır. Bununla birlikte, 4 çelik bant + 2 tel yönteminde üçüncü kaburga boşluğunda tel kullanılmadığından, 3. ve 4. kaburga bölgesindeki yer değiştirme değerleri, 4 çelik bant + 3 tel yönteminden daha büyük çıkmış, diğer bölgelerde ise benzer yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

- Çelik bant veya PEEK bant kullanılarak yapılan benzer kapamalar birbiriyle kıyaslandığında, yöntemlerin tamamında çelik bantların daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

- PEEK bantlarla yapılan kapamalarda emniyet yükü ve direngenlik açısından en zayıf yöntemin 3 PEEK bant + 2 tel yöntemi olduğu görülmüştür. En büyük yer değiştirme değerleri de, sternumun ikinci ve dördüncü kaburga boşluklarında tellerin kullanılmadığı bu yöntemde elde edilmiştir.

- Dört PEEK bant kullanılarak yapılan kapamalarda, üçüncü boşlukta kullanılan telin önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Bu telin kullanıldığı 4 PEEK bant + 3 tel yönteminde, 4 PEEK bant + 2 tel yöntemine kıyasla daha düşük yer değiştirmeler meydana gelmiş ve daha büyük emniyet yükü ve direngenlik değerleri elde edilmiştir.
- Beş PEEK bantla yapılan kapamalarda ise, dört PEEK bant kapamalarına kıyasla daha düşük emniyet yükü ve direngenlik değerleri elde edilmiştir. Bu durumun gövdede kullanılan PEEK bantların, gövdedeki yer değiştirmeleri sınırlarken, ksifoid bölgesi üzerinde daha büyük yer değiştirmelere neden olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Bu yöntemdeki yer değiştirmeler incelendiğinde, sternum gövdesinde diğer yöntemlere kıyasla daha küçük yer değiştirmeler oluşurken, ksifoid ve 6. kaburga hizasında daha büyük yer değiştirmelerin olduğu görülmüştür. Beş çelik bantla yapılan kapamalarda ise böyle bir durum oluşmamış ve bu yöntemde, bantlarla yapılan diğer kapamalara kıyasla, manubrium bölgesi hariç en düşük yer değiştirmeler meydana gelmiştir.
- Geleneksel tel yöntemiyle dokuz tel yöntemi kıyaslandığında, dokuz tel yönteminin çok daha iyi bir kapama sağladığı görülmektedir.
- Dokuz tel yönteminde, ilave tellerin kullanılmadığı çelik bant ve PEEK bant yöntemlerine kıyasla ksifoid, manubrium ve 6. kaburga bölgelerinde daha düşük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, sternum gövdesindeki diğer noktalarda, bantlarla yapılan kapamalarda bulunan değerlerden daha büyük yer değiştirme değerleri olduğu da tespit edilmiştir.
- Analiz sonuçlarının genel bir değerlendirmesi yapıldığında, manubrium ve ksifoid bölgesinde ikişer adet tel kullanımının önemi açıkça görülmektedir. Bu ilave teller kullanılmadığında, gövde kısmında kullanılan çelik bant veya PEEK bant sayısının artışının gövdedeki yer değiştirmeleri azaltmakla birlikte, emniyet yükü ve direngenlik açısından çok büyük bir etkisi olmadığı görülmektedir. Dokuz çelik telle yapılan kapamada, ilave tel kullanılmayan bant yöntemlerinin tamamından daha iyi sonuçlar

elde edilmesi de ksifoid ve manubrium bölgelerinde kullanılan ilave tellerin önemini göstermektedir. Karşılaştırılan yöntemler arasında, ilave tellerin kullanıldığı dokuz tel, iki çelik bant ve üç çelik bant yöntemleri en iyi teknikler olarak ön plana çıkmaktadır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar (tellerde meydana gelebilecek kopmalar ve farklı yüklemelerdeki yöntemlerin davranışları) ve maliyetler de dikkate alındığında 3 çelik bant + 6 tel yöntemi en optimum sternum kapama tekniği olarak gözükmemektedir (Şekil 4.92).



Şekil 4.92. Üç çelik bant ve altı çelik telle yapılan sternal kapama

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Göğüs ve kalp-damar cerrahisinde, göğüs boşluğuna ulaşmak için kullanılan en yaygın yöntem olan mediyan sternotomi uygulaması oldukça tehlikeli ve ölümcül ameliyat sonrası komplikasyonlara sebep olabilmektedir. Sternumun iki parçaya ayrılıp sonra çeşitli bağlama teknikleri ile tekrar birleştirildiği bu yöntemde, komplikasyonların önlenmesi ve iyi bir kemik iyileşmesinin sağlanması için sternumun rijit ve stabil bir şekilde kapatılması gerekmektedir. Bu amaçla birçok farklı malzeme kullanılmış ve onlarca yöntem geliştirilmiştir. Uygulanacak kapama yönteminin seçiminde, yöntemlerin mekanik özelliklerinin yanında özellikle maliyetleri de etkili olmaktadır. Çelik tellerle yapılan kapamalar, düşük maliyetleri ve uygulama kolaylıkları nedeniyle en çok kullanılan kapama yöntemi olma özelliğini korumaktadırlar. Bununla birlikte, çelik tellerin gerekli kapamayı sağlamada yetersiz kaldığını ortaya koyan çeşitli klinik ve deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca, en iyi kapama yöntemini bulmaya yönelik yapılan çalışmalar sonucunda da, en güvenilir kapamayı hangi yöntemin sağladığı konusunda bir fikir birliği oluşmamıştır. Bu nedenlerle, mevcut yöntemlerin incelendiği birçok klinik ve deneysel çalışma yapılmakta, ayrıca yeni yöntemler geliştirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında ise, daha önce incelenmemiş toplam yirmi bir farklı sternum kapama tekniğinin etkinliği, deneysel çalışmalar veya sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle incelenmiştir. Altı değişik sternum kapama malzemesi kullanılarak yapılan, toplam on farklı kapama tekniğinin incelendiği deneylerde, yapay sternum modelleri kullanılmış ve yanal ayrılma yüklemesiyle beraber, literatürde çok az sayıda ki çalışmada uygulanmış olan boyuna ve enine kesme yüklemeleri de dikkate alınmıştır. Kapama yöntemleri, bu deneylerden elde edilen emniyet yükü, direngenlik, kopma yükü ve kopma uzaması değerleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin karşılaştırılmasında bu mekanik özellikler ile birlikte yöntemlerin maliyetleri, uygulama hızı ve kolaylığı ile deneyler sırasında gözlemlenen davranışları da dikkate alınmıştır. Ayrıca, yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemelerinde sternumda oluşan yer değiştirmeler görüntü analizi yöntemiyle belirlenmiş ve elde edilen bu sonuçlarda

yöntemlerin karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Deneysel olarak karşılaştırılmamış ve üç farklı kapama malzemesi ile yapılan on bir farklı sternum kapama tekniğinin yanal ayrılma yükü etkisindeki davranışı ise ANSYS Workbench programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle incelenmiştir. Mevcut literatür çalışmalarından farklı olarak bu analizlerde, kapama malzemelerinin deneylerde gözlemlenen davranışlarından yola çıkarak, malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri de dikkate alınmış ve kapama yöntemlerinin gerçek davranışlarını doğru olarak yansıtan sayısal modeller ortaya konmuştur. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

5.1. Sonuçlar

- Sternumun kapatılmasında kullanılan malzemeler arasında en düşük maliyet çelik tellere aittir. Malzemelerin birim fiyatları dikkate alındığında çelik telleri takip eden malzemeler sırasıyla, çelik bant, PEEK bant, çelik kablo, titanyum klips ve titanyum plâk-vida sistemi şeklindedir. Bu çalışmada kullanılmayan fakat fiyat araştırması yapılan yöntemlerden olan Sternal Talon klipslerin, en pahalı kapama malzemesi olduğu belirlenmiştir. Waston klipslerin maliyetinin Vitalitec klipslere çok yakın olduğu, Nitinol klipslerin ise PEEK bantlar ile Vitalitec klipsler arasında bir maliyete sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada incelenen ve çelik tellerle birlikte farklı malzemelerin kullanıldığı kapama yöntemlerinin maliyetlerinin sıralaması, ucuzdan pahalıya doğru aşağıda verilmiştir.

- Geleneksel çelik tel yöntemi – Çelik tellerle figür-8 yöntemi
- İki çelik bant yöntemi
- İki PEEK bant yöntemi
- Üç çelik bant yöntemi
- Üç PEEK bant yöntemi – Çelik kablolarla figür-8 yöntemi
- Tek titanyum plâk yöntemi
- Titanyum klips yöntemi
- İki titanyum plâk yöntemi

• Çelik teller, standart bir tel portegüsü kullanılarak hızlı bir şekilde bağlanabilmektedir. Bununla birlikte, çelik bant ve PEEK bantların montaj enstrümanları pratik kullanımları sayesinde, bu bantların çelik tellerden daha hızlı bir şekilde uygulanmasına imkân vermektedir. Çelik kablo, titanyum klips ve titanyum plâkların montajları ise diğer yöntemlerden belirgin şekilde daha uzun sürmektedir. Deneylerde karşılaştırılan sternum kapama tekniklerinin uygulama kolaylıkları ve hızları dikkati alındığında, en hızlı ve kolay yöntemden başlayacak şekilde aşağıdaki sıralama oluşmuştur.

- Üç çelik bant yöntemi – Üç PEEK bant yöntemi
- İki çelik bant yöntemi – İki PEEK bant yöntemi
- Geleneksel çelik tel yöntemi – Çelik tellerle figür-8 yöntemi
- Titanyum klips yöntemi
- Çelik kablolarla figür8 yöntemi
- Tek titanyum plâk yöntemi
- İki titanyum plâk yöntemi

• Hastaya tekrar müdahale edilmesi gerektiğinde, titanyum plâklar orta kısımlarında yer alan acil durum piminin çıkarılmasıyla kolayca iki parçaya ayrılmakta ve böylece tekrar kullanılabilirler. Bu çalışmada kullanılan titanyum klipslerin tekrar kullanımı ise bağlantı bölgesinde bulunan vidanın çıkarılması sonrasında mümkün olabilmektedir ancak, klipsin yeniden montajı, çubuk kısmın önceden kesilmiş olmasından dolayı çok zor olacaktır. Kapamada kullanılan diğer malzemeler ise ihtiyaç halinde kolayca kesilip çıkarılabilmekte ancak, tekrar kullanımları mümkün olmamaktadır. Çelik bant, titanyum klips ve titanyum plâkların kesilmesi, kesitlerinin kalınlığından dolayı, çelik tel ve PEEK bantlara kıyasla daha zor olmaktadır. Malzemenin tekrar kullanılabilirliği ve müdahale hızı dikkate alındığında, göğüs boşluğuna ikincil bir müdahale gerektiğinde en avantajlı malzemenin titanyum plâklar olduğu görülmektedir.

- Geleneksel tel ve tellerle figür-8 yöntemleri karşılaştırıldığında, enine kesme durumu haricinde, geleneksel tel yönteminin figür-8 yönteminden daha zayıf kaldığı belirlenmiştir. Enine kesme etkisinde ise geleneksel tel yönteminin figür-8 yönteminden daha iyi bir kapama sağladığı tespit edilmiştir.
- Çelik kablo ve çelik tellerle yapılan figür-8 yöntemleri kıyaslandığında, emniyet yükü ve direngenlik açısından yanal ayrılma ve boyuna kesmede tellerle figür-8 yönteminin, enine kesmede ise kablolarla figür-8 yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kopma yükleri dikkate alındığında ise kablolarla figür-8 yöntemi daha üstün değerlere sahipken, kopma uzamasında tellerle figür-8 yöntemi daha küçük uzama değerlerine sahip olmuştur.
- Üç çelik bant yönteminin iki çelik bant yönteminden, üç PEEK bant yönteminin de iki PEEK bant yönteminden daha iyi bir sternal kapama sağladığı tespit edilmiştir.
- Tek plâk ve iki plâk yöntemleri karşılaştırıldığında, yanal ayrılma ve boyuna kesme etkisinde tek plâk, enine kesmede ise iki plâk yöntemi daha iyi bir kapama sağlamıştır.
- Üç çelik bant, üç PEEK bant ve titanyum klips yöntemleri karşılaştırıldığında, farklı yükleme etkilerinin her birinde farklı bir yöntemin daha iyi bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Emniyet yükü ve direngenlik değerleri dikkate alındığında, yanal ayrılmada üç çelik bant, boyuna kesmede üç PEEK bant, enine kesmede ise titanyum klips yöntemleri en iyi kapamayı sağlamışlardır.
- Yanal ayrılma ve boyuna kesme yüklemelerinde yapılan görüntü analizleri sonucunda, yöntemlerin emniyet yükü, direngenlik ve kopma uzaması değerleri genel olarak, deney aleti verilerinden daha büyük çıkmıştır. Bu durum, yer değiştirmelerin doğrudan sternum gövdesinden ölçülmesinden kaynaklanmaktadır. Görüntü analizleri kullanılarak, yöntemlerin mekanik özelliklerine göre karşılaştırılmasında, deney aleti bulgularından elde edilen sıralamalara çok yakın sonuçlar bulunmuştur.

- Yanal ayrılma yüklemesinde, görüntü analizi ile sternumun farklı bölgelerinden yapılan ölçümler sonucunda en büyük yer değiştirmelerin ksifoid, altıncı kaburga ve manubrium bölgelerinde olduğu görülmüştür. Sternumun ön ve arka yüzlerinde oluşan yer değiştirmeler karşılaştırıldığında özellikle iki titanyum plâk yönteminde belirgin farklar olduğu görülmüş, tek titanyum plâk ile titanyum klips yöntemlerinde de farklılıklar tespit edilmiştir.

- Bu çalışmada, deneysel olarak karşılaştırılan yöntemler arasında genel bir değerlendirme yapıldığında, kablolarla figür-8 yöntemi ile geleneksel tel yönteminin en yetersiz kapama yöntemleri olduğu görülmüştür. Deneylerde uygulanan farklı yükleme durumları ve değerlendirme ölçütlerinin tamamı için, herhangi bir yöntem en iyi olarak ön plana çıkmamıştır. Çelik tellerle yapılan figür-8, titanyum klips, iki çelik bant ve iki PEEK bant yöntemleri ile titanyum plâklarla yapılan kapamalar, yükleme tipine göre oldukça değişken davranışlar göstermişler ve bazı durumlarda en iyi değerlere sahipken diğerlerinde son sıralarda yer almışlardır. Üç çelik bant yöntemi ile üç PEEK bant yöntemi ise bütün yükleme durumlarında diğer yöntemlerden daha istikrarlı bir davranış sergilemişlerdir. Bu iki yöntem karşılaştırıldığında ise kilit mekanizmasında herhangi bir problem görülmeyen ve maliyeti daha düşük olan üç çelik bant yönteminin, deney sonuçlarına göre en iyi kapama tekniği olduğu belirlenmiştir.

Yanal ayrılma yüklemesinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesinden elde edilen sonuçlar ise aşağıda verilmiştir.

- Manubrium ve ksifoid bölgesinde ikişer adet tel kullanılmasının, birer tel kullanımına kıyasla kapama yönteminin dayanımı oldukça arttırdığı görülmektedir. Geleneksel tel ve üç çelik bant yöntemlerine bu teller ilave edildiğinde, emniyet yükü ve direngenlik değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiş, tellerin kullanıldığı bölgelerde ki yer değiştirme değerleri de oldukça azalmıştır.

- Çelik bant ve PEEK bantlarla yapılan benzer kapamalarda çelik bantlar daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Üç çelik bant ve üç PEEK bant yöntemlerinde, sternum gövdesine uygulanan iki adet telin çıkarılması durumunda, tellerin uygulandığı bölgelerde ki yer değiştirme değerlerinde belirgin artışlar olmuştur. Sternum gövdesinde dört adet bant ve bir adet tel kullanılarak yapılan kapamalarda da, gövdede kullanılan telin çıkarılması durumunda daha büyük yer değiştirme değerleri tespit edilmiştir.
- Çelik bant ve PEEK bantlarla yapılan kapamalarda, kullanılan bant sayısındaki artışın sternum gövdesindeki yer değiştirmeleri azaltmakla birlikte, ksifoid ve manubrium bölgesindeki yer değiştirmelere olumlu bir etkileri olmadığından, emniyet yükü ve direngenlik değerleri üzerinde de önemli bir etkilerinin olmadığı görülmüştür.

5.2. Öneriler

- Sternum kapama yöntemlerinin etkinliğinin incelendiği deneysel çalışmalar statik ve dinamik deneyler olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Dinamik deneylerde, solunum hareketinin etkisini yansıtan düşük yük değerlerindeki uygulamaların yerine, sürekli ve şiddetli bir öksürük etkisini yansıtacak kısa süreli ve yüksek frekanslı büyük yük değerlerinde ki yüklemelerin yapılması daha uygun olacaktır. Ayrıca, hastanın bir yere tutunması, bir tarafının üzerine yaslanması ya da düşmesi sonucunda sternuma etkiyebilecek kısa süreli ve yüksek şiddetli kuvvetleri yansıtacak statik deneylerin yapılması, kapama yöntemlerinin etkinliğinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Bununla birlikte, günlük hayatta sternuma devamlı etki eden solunum hareketini yansıtacak dinamik bir yüklemenin ilk olarak belirli bir süre uygulanması ve sonrasında yüksek kuvvetli bir statik bir yüklemenin gerçekleştirilmesinin de gerçek hayattaki duruma daha uygun olabileceği düşünülmektedir.

- Literatürdeki mevcut deneysel çalışmaların büyük kısmında yanal ayrılma yüklemesinin etkileri araştırılmıştır. Bununla birlikte, yapılan bu çalışmada kapama yöntemlerinin boyuna ve enine kesme şeklinde etkiyen yüklere karşı dayanımının yanal ayrılma etkisine kıyasla çok daha düşük olduğu görülmüştür. Hastanın günlük hayatındaki ani ve şiddetli hareketlerinin etkisini yansıtan bu yüklemelerin, kapama yöntemlerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda daha fazla dikkate alınması gerekmektedir.
- Sternuma fiziksel olarak etkiyebilecek en büyük kuvvet değerinin ne olduğu konusunda bir fikir birliği bulunmamaktadır. Öksürme nedeniyle oluşabilecek en büyük kuvvetin belirlenmesine yönelik yapılan teorik ve deneysel çalışmaların sonucunda oldukça farklı değerler elde edilmiştir. Hastaya, hem şiddetli bir öksürük nedeniyle hem de günlük aktivitelerinde dolayı etkiyebilecek en büyük yük değerinin ve yükün etkime şeklinin bulunması, yöntemlerin karşılaştırıldığı deneysel çalışmaların gerçekçiliği açısından oldukça faydalı olacaktır. Ayrıca, kapama yöntemlerinin karşılaştırıldığı statik deneylerde birbirinden farklı yükleme hızı değerleri kullanılmaktadır. Deney sonuçlarını doğrudan etkileyen bu değişkenin değerinin ne olması gerektiği konusunda da bir çalışma söz konusu değildir. Sternuma etkiyen yükler araştırılırken, bu yüklerin etki süreleri ve şiddetleri doğrultusunda dikkate alınması gereken yükleme hızı değerlerinin de belirlenmesi deneysel çalışmalar için yararlı olacaktır.
- Yöntemlerin karşılaştırıldığı çalışmaların çoğunda, ameliyat uygulamalarından farklı olarak manubrium ve ksifoid bölgesine transsternal şekilde yerleştirilen teller kullanılmamakta, incelenen kapama malzemesi sadece sternumun gövde kısmına uygulanmakta ve yüklemeler bu kısımdaki kaburga çıkıntılarında yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan karşılaştırmaların yerine gerçek uygulamalara benzer deneylerin yapılması yöntemlerin gerçek davranışlarının anlaşılması açısından daha uygun olacaktır. Ayrıca, deneylerde sternumun yükleme çenelerine sabitlenmesi vidalarla ya da reçine içine gömülerek yapılmaktadır. Bu iki farklı yöntemden hangisinin gerçek sternum hareketini daha iyi yansıttığının araştırılması, yapılan deneylere genel bir standart getirilmesi açısından faydalı olacaktır.

- Çelik teller kullanılırken, tellerin kemiği kesme etkisi ve düğüm noktalarında meydana gelebilecek kırılmalar dikkate alınmalıdır. Bu nedenle çapı 0,787 mm olan no.5 tellerin yerine, çapı 0,9 mm olan no.7 tellerin kullanımı tercih edilebilir. Glennie *et al.* (2002) tarafından yapılan çalışmada tek bir no.7 telin yanılma etkisinde çekme dayanımı 887 N, no.5 telin ise 613 N olarak bulunmuştur. Bu iki malzemenin klinik ve deneysel davranışlarını karşılaştıran çalışmalar, yöntemlerin etkilerini görmek açısından faydalı olacaktır.
- PEEK bantların en zayıf yönlerinin cırcırlı kilit mekanizmaları olduğu görölmüştür. Deneylerde birçok kez bantlar, kilit kısımlarından sıyrılıp açılmışlardır. PEEK bantların kilit mekanizmalarının iyileştirilmesi ile genel olarak iyi sonuçlar alınan bu yöntemin etkinliği artırılabilir.
- Çelik kablolarla figür-8 yönteminin, deneyler sonucunda en zayıf yöntem olduğu görölmüştür. Bu durumun özellikle, kullanılan uygulama enstrümanının istenilen seviyede bir gerilme uygulamaya izin vermemesi kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kullanımı pratik olmayan ve kapama süresini de uzatan bu montaj enstrümanının geliştirilmesinin, çelik kablolarla daha iyi kapamaların yapılmasına imkân vereceği düşünülmektedir.
- Çelik bantların uygulanmasında en önemli problem, montaj esnasında bantların kemiğin kesmesi ve ezmesi olmuştur. Bu nedenle, bantların montaj enstrümanı kullanılırken aşırı bir gerilme uygulamamaya dikkat edilmelidir. Bu enstrümanın üzerine, uygulanan gerilmeyi gösterecek bir ölçeğin yerleştirilmesi faydalı olabilecektir. Çelik bantların kilit mekanizmalarında ise herhangi bir problem olmadığı belirlenmiştir.
- Titanyum klipslerin uygulanmasında, doğru klips büyüklüğünün seçilmesi iyi bir kapamanın sağlanabilmesi için oldukça önemlidir. Bu nedenle sternumun kalınlığının ölçülmesi dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Titanyum klipslerin oldukça yüksek olan maliyetleri en önemli dezavantajları olarak gözükmemektedir.

- Titanyum plâklar en pahalı kapama malzemesi olmalarının yanında, montaj sürelerinin uzunluğu ve zorluğu gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Kullanılan vidaların kemik üzerindeki kesme etkisi ve kemikten sıyrılıp çıkmaları da deneylerde görülen diğer problemler olmuştur. Plâklarla yapılan kapamaların görüntü analizleri sonucunda ise, özellikle iki plâk kullanımında sternumun ön ve arka yüzlerinde belirgin yer değiştirme farkları olduğu görülmüştür. Bu durum da kemik iyileşmesini olumsuz yönde etkileyecektir. Sahip oldukları güvenlik pimi sayesinde sternuma ikincil müdahaleyi oldukça kolaylaştıran ve tekrar kullanım açısından en avantajlı yöntem olan plâklar, maliyetleri ve diğer zayıf yönleri dikkate alındığında tercih edilebilirlik olarak diğer yöntemlerin arkasında kalmaktadırlar.

- Kapama yöntemlerinin sayısal analizleri yapılırken, malzemelerin doğrusal olmayan özelliklerinin de tanımlanması gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda görülen, çelik tel ve çelik bant gibi kapama malzemelerinin kemik üzerindeki kesme ve ezme etkilerinin doğru olarak yansıtılabilmesi için bu özellikler dikkate alınmalıdır. Tellerde ve PEEK bantlarda görülen kopma ve sıyrılma durumlarının da incelenebilmesi için malzemeler, kilit mekanizmalarını içerecek şekilde daha detaylı bir şekilde modellenenebilir ayrıca, montaj esnasında uygulanan öngerilmeler de dikkate alınarak çok daha iyi modeller ortaya konabilir. Boyuna kesme ve enine kesme yüklemeleri için de gerçekçi sayısal modellerin geliştirilmesi, oldukça maliyetli olan deneysel çalışmalara karşı, kapama yöntemlerinin incelenmesinde sayısal analizlerin yaygınlaşmasını sağlayacaktır.

- Bu çalışmada yapılan deneyler ve incelemelerin sonucunda, karşılaştırılan yöntemler arasından üç PEEK bant yöntemi ile üç çelik bant yönteminin diğer yöntemlerden daha iyi bir sternal kapama sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu iki yöntem arasında tercih yapılması gerektiği durumlarda, kilit sistemindeki problemler ve maliyetinin biraz daha fazla olması nedeniyle PEEK bantların yerine çelik bantların tercih edilmesi daha avantajlı olacaktır. Ayrıca, deneylerin tamamında bütün yöntemlerde manubrium ve ksifoid bölgesinde birer çelik tel kullanılmış ve bu tellerin gelen yükleri karşılamakta yetersiz kaldığı ve kemiği hızlı bir şekilde kestikleri görüntü analizi ile belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi analizleri de, manubrium ve ksifoid bölgesinde ikişer adet tel

kullanımının kapama yöntemini önemli bir biçimde güçlendirdiğini ortaya koymuş ve yanal ayrılma etkisinde, çelik bantların PEEK bantlardan daha iyi bir kapama sağladığını göstermiştir. Yapılan deneyler ve sayısal analizlerin nihai sonucu olarak, manubrium ve ksifoid bölgesinde ikişer telin, sternum gövdesinde ise üç çelik bant ve iki telin kullanıldığı, 3 çelik bant + 6 tel yönteminin, maliyetlerde dikkate alındığında en optimum kapamayı sağladığı belirlenmiştir. Bu kapama yönteminin, manubrium ve ksifoid bölgesindeki tel sayısının arttırılmasıyla daha iyi bir hale geleceği düşünülmektedir. Maliyet üzerinde önemli bir etkisi olmayacak olan bu ilaveler, tellerde oluşan gerilmeleri düşürecek ve tellerin kopma ihtimali ile kemiği kesme etkilerini de azaltacaktır. Tel sayısının arttırılmasının olumsuz etkileri ise, ameliyat süresinin uzaması ve hastadaki kanamanın artması şeklinde olacaktır. Maliyetin önemli olmadığı durumlarda ise, gövdede kullanılan bant sayısının arttırılması bu bölgedeki yer değiştirmeleri sınırlandıracağı ve gövdedeki tellerde görülen kopma ihtimalini azaltacağı için tercih edilebilir bir seçenek olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahn, J., Christakis, A., Dieselman, J. and Sandefer, A., 2009. Design of an optimized rigid fixation system for the osteoporotic sternum. B.Sc. Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.
- Al Ebrahim, K., 2003. Reinforced sternal closure: the bilateral straight longitudinal wire technique. *The Asian Cardiovascular & Thoracic Annals*, 11 (1), 90-91.
- Alhalawani, A.M.F. and Towler, M.R., 2013. A review of sternal closure techniques. *Journal of Biomaterials Applications*, 28 (4), 483-497.
- Almdahl, S.M., Halvorsen, P., Veel, T. and Rynning, S.E., 2013. Avoidance of noninfectious sternal dehiscence: figure-of-8 wiring is superior to straight wire closure. *Scandinavian Cardiovascular Journal*, 47 (4), 247-250.
- Almodovar, L.F.L., Bustos, G., Lima, P., Canas, A., Paredes, I. and Buendia, J.A., 2008. Transverse plate fixation of sternum: a new sternal-sparing technique. *The Annals of Thoracic Surgery*, 86 (3), 1016-1017.
- Anonim, 2012a. www.tkd-online.org/UKSP/UKSP_Giris.pdf (05.06.2012).
- Anonim, 2012b. <http://www2.tbmm.gov.tr/d24/7/7-1885sgc.pdf> (05.06.2012).
- Anonim, 2012c. <http://www.protip.com.tr/?sf=a32> (09.05.2012).
- Anonymous, 2013a. <http://www.synthes.com/MediaBin/US%20DATA/Product%20Support%20Materials/Technique%20Guides/CMF/MXTGSternalZipFixJ10267B.pdf> (20.05.2013).
- Anonymous, 2013b. <http://www.drikotmedical.com/products/pioneer-sternal-cable-system> (20.05.2013).
- Anonymous, 2013c. <http://www.pioneersurgical.com/cardiothoracic/Cable-System/Pioneer-Sternal-Cable-System/> (20.05.2013).
- Anonymous, 2013d. Ansys mechanical APDL theory reference (Ansys Release 15.0), Ansys Inc, Canonsburg, PA, USA.
- Anonymous, 2013e. Ansys meshing user's guide (Ansys Release 15.0), Ansys Inc, Canonsburg, PA, USA.
- Anonim, 2014a. <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18855> (25.04.2015).
- Anonim, 2014b. <http://www.hurriyet.com.tr/avrupa/27505656.asp> (25.04.2015).
- Anonymous, 2015a. <http://www.sternaband.com/> (12.05.2015).
- Anonymous, 2015b. http://www.pusulamed.com/dw/vitalitec_sternal.pdf (13.05.2015).
- Anonymous, 2016a. http://milmet.com.tr/urun_detay.php?q=4b495bde4cf0760583b84597a942af35 (20.05.2016).
- Anonymous, 2016b. http://www.rtix.com/en_us/products/product-implant/tritium-scp-system (20.05.2016).
- Anonymous, 2016c. http://www.sawbones.com/UserFiles/Docs/biomechanical_catalog.pdf (20.05.2016).
- Anonymous, 2016d. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1336be6d0c594b55afb5ca8bf1f3e042> (20.05.2016).

- Anonymous, 2016e.
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=76851b692e094aa59a0469d76aacef6a> (20.05.2016).
- Anonymous, 2016f.
<http://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/AFEM.d/AFEM.Ch10.d/AFEM.Ch10.pdf> (25.05.2016).
- Anonymous, 2016g.
http://inside.mines.edu/~apetrell/ENME442/Labs/1301_ENME442_lab6_lecture.pdf (30.05.2016).
- Bakalova, L., Chung, S., Shapiro, H. and Skowran, R., 2010. Development of a bilateral rigid sternum closure testing system. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.
- Bejko, J., Bottio, T., Tarzia, V., Franceschi, M., Bianco, R., Gallo, M., Castoro, M., Bortolussi, G. and Gerosa, G., 2015. Nitinol flexigrip sternal closure system and standard sternal steel wiring: insight from a matched comparative analysis. *Journal of Cardiovascular Medicine*, 16 (2), 134-138.
- Bek, E.L., Yun, K.L., Kochamba, G.S. and Pfeffer, T.A., 2010. Effective median sternotomy closure in high-risk open heart patients. *The Annals of Thoracic Surgery*, 89 (4), 1317-1318.
- Bhattacharya, S., Sau, I., Mohan, M., Hazari, K., Basu, R. and Kaul, A., 2007. Sternal bands for closure of midline sternotomy leads to better wound healing. *The Asian Cardiovascular & Thoracic Annals*, 15 (1), 59-63.
- Broadhurst, J., Moorjani, N. and Ohri, S., 2010. Traumatic fracture of nitinol thermoreactive sternal clips. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 10 (3), 465-466.
- Bruhin, R., Stock, U.A., Drücker, J.P., Azhari, T., Wippermann, J., Albes, J.M., Hintze, D., Eckardt, S., Könke, C. and Wahlers, T., 2005. Numerical simulation techniques to study the structural response of the human chest following median sternotomy. *The Annals of Thoracic Surgery*, 80 (2), 623-630.
- Casha, A.R., Yang, L., Kay, P.H., Saleh, M. and Cooper, G.J., 1999a. A biomechanical study of median sternotomy closure techniques. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 15 (3), 365-369.
- Casha, A.R., Ashraf, S.S., Kay, P.H. and Cooper, G.J., 1999b. Routine sternal closure using interlocking multitwisted wires. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 16 (3), 353-355.
- Casha, A.R., Gauci, M., Yang, L., Saleh, M., Kay, P.H. and Cooper, G.J., 2001. Fatigue testing median sternotomy closures. *The European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 19 (3), 249-253.
- Centofanti, P., La Torre, M., Barbato L., Verzini, A., Patane, F. and Di Summa, M., 2002. Sternal closure using semirigid fixation with thermoreactive clips. *The Annals of Thoracic Surgery*, 74 (3), 943-945.
- Cheng, W., Cameron, D.E., Warden, K.E., Fonger, J.D. and Gott, V.L., 1993. Biomechanical study of sternal closure techniques. *The Annals of Thoracic Surgery*, 55 (3), 737-740.
- Chlost, W.F. and Elefteriades, J.A., 1995. Simplified method of reinforced sternal closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 60 (5), 1428-1429.

- Claes, L., Augat, P., Suger, G. and Wile, H.J., 1997. Influence of size and stability of the osteotomy gap on the success of fracture healing. *Journal of Orthopaedic Research*, 15 (4), 577-584.
- 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.
- Dalton, M.L., Conally, S.R. and Sealy, W.C., 1992. Julian's reintroduction of Milton's operation. *The Annals of Thoracic Surgery*, 53 (3), 532-533.
- 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.
- DeLong, M.R., Hughes, D.B., Gaca, J.G., Fischer, J.P., Bond, J.E., Hargrove, W.C., Atluri, P., Levin, L.S. and Erdmann, D., 2014. Sternal talon offers a solution for secondary sternum osteosynthesis in patients with nonunion. *The Annals of Thoracic Surgery*, 98 (5), 1804-1808.
- Di Marco, R.F., Lee, M.W., Bekoe, S., Grant, K.J., Woelfel, G.F. and Pellegrini, R.Y., 1989. Interlocking figure-of-8 closure of the sternum. *The Annals of Thoracic Surgery*, 47 (6), 927-929.
- Dieselman, J.C., 2011. Comparison of alternative rigid sternal fixation techniques. MS Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.
- Dilibal, S., 2005. Nikel-titanyum şekil bellekli alaşım üretimi ve şekil bellek eğitimi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dimarakis, I., Oswal, D. and Nair, U.R., 2005. Single stage sternal reconstruction using titanium mesh for dehiscence following open-heart surgery. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 4 (1), 49-51.
- Doğan, Ö.F., 2010. Surgical treatment of complicated sternal non-union using multiperforated titanium plates. *Turkish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 18 (3), 172-176.
- Dogan, O.F., Oznur, A. and Demircin, M., 2004. A new technical approach for sternal closure with suture snchors (Dogan Technique). *The Heart Surgery Forum*, 7 (4), 328-332.
- Egol, K.A., Kubiak, E.N., Fulkerson, E., Kummer, F.J. and Koval, K.J., 2004. Biomechanics of locked plates and screws. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 18 (8), 488-493.
- Eğileten, Z.B., Kahraman, D., Eryılmaz, S., Uysalel, A. ve Özyurda, Ü., 2006. Sternal komplikasyonlar açısından risk taşıyan hastalarda profilaktik 8-figürü ve Robicsek metodu kombinasyonu. *Türkiye Klinikleri Journal of Medical Sciences*, 26 (1), 51-55.
- Elahi, M.M., Mitra, A., Mir, H., Nott, R. and Spears, J., 2004. Composite plate and wire fixation for complicated sternal closure. *Annals of Plastic Surgery*, 53 (3), 217-221.
- Elfström, A. and Grunditz, A., 2013. Evaluation of sternum closure techniques using finite element analysis. MS Thesis, The Royal Institute of Technology, Flemingsberg, Sweden.
- Elmer, F.J., 1997. Nonlinear dynamics of dry friction. *Journal of Physics A General Physics*, 30 (17), 6057-6063.

- Erk, Z., 2012. Konvansiyonel sternum kapama yöntemi ile sternal band kapama sisteminin karşılaştırılması, Uzmanlık Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Tıp Fakültesi, Isparta, Türkiye.
- 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).
- 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
- Fedak, P.W.M. and Kasatkin, A., 2011. Enhancing sternal closure using kryptonite bone adhesive: technical report. *Surgical Innovation*, 18 (4), 8-11.
- Fish, J. and Belytschko, T., 2007. A first course in finite elements. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1-9.
- Franco, S., Herrera, A.M., Atehortua, M., Velez, L., Botero, J., Jaramillo, J.S., Velez, J.F. and Fernandez, H., 2009. Use of steel bands in sternotomy closure: implications in high-risk cardiac surgical population. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 8 (2), 200-205.
- Glennie, S., Shepherd, D.E.T. and Jutley, R.S., 2002. Strength of wired sternotomy closures: effect of number of wire twists. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 2 (1), 3-5.
- Grapow, M., Rüter, F., Melly, L., Winkler, B., Eckstein, F. and Matt, P., 2011. Simplified closure of ministernotomy using thermoreactive sternal clips. *The Asian Cardiovascular & Thoracic Annals*, 19 (5), 367-369.
- Grapow, M., Melly, L., Eckstein, F. and Reuthebuch, O., 2012. A new cable-tie based sternal closure system: description of the device, technique of implantation and first clinical evaluation. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 7 (1), 59-63.
- Gucu, A., Toktas, F., Eris, C., Ata, Y. and Turk, T., 2012. Nitinol thermoreactive clips for secondary sternal closure in cases of noninfective sternal dehiscence. *Texas Heart Institute Journal*, 39 (4), 513-516.
- Güler, M. S., 2013. Dolgu malzemesi özellikleri, dolgu geometrisi ve çalışma şartlarının dolgulu dişteki gerilme dağılımına etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle (sey) incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Hale, J.E., Anderson, D.D. and Johnson, G.A., 1999. A polyurethane foam model for characterizing suture pull-through properties in bone. 23rd Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, University of Pittsburgh.
- 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 Matthew, J.W., 2008. Transverse sternal plating in secondary sternal reconstruction. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 136 (6), 1476-1480.

- Johnston, R.H., Rinaldi, R.G., Vaughan, G.D. and Bricker, D., 1985. Mersilene ribbon closure of the median sternotomy: an improvement over wire closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 39 (1), 88-89.
- Kalush, S.L. and Bonchek, L.I., 1976. Peristernal closure of median sternotomy using stainless steel bands. *The Annals of Thoracic Surgery*, 21 (2), 172-173.
- Kamiya, H., Al-maisary, S.S.A., Akhyari, P., Ruhparwar, A., Kallenbach, K., Lichtenberg, A. and Karck, M., 2012. The number of wires for sternal closure has a significant influence on sternal complications in high-risk patients. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 15, 665-670.
- Keçeligil, H.T., Kolbakır, F., Kalaç, R. ve Erk, M.K., 1995. Pediatrik vakalarda sternotominin loop pds suturele kapatılması. *Türk Göğüs Kalp Damar Cerrahisi Dergisi*, 3 (1), 93-94.
- Khasati, N., Sivaprakasam, R. and Dunning, J., 2004. Is the figure-of-eight superior to the simple wire technique for closure of the sternum?. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 3 (1), 191-194.
- Kılıçoğlu, S.S., 2002. Mikroskopi düzeyinde kırık iyileşmesi. *Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Mecmuası*, 55 (2), 143-150.
- Kiessling, A.H., Isgro, F., Weisse, U., Möltner, A., Saggau, W. and Boldt, Y., 2005. Advanced sternal closure to prevent dehiscence in obese patients. *The Annals of Thoracic Surgery*, 80 (4), 1537-1539.
- Kim, W.K., Kim, J.B., Kim, G.S., Jung, S., Choo, S.J., Chung, C.H. and Lee, J.W., 2013. Titanium plate fixation for sternal dehiscence in major cardiac surgery. *The Korean Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 46 (4), 279-284.
- Koshiyama, H. and Yamazaki, K., 2015. Absorbable sternal pins improve sternal closure stability within a small deviation. *General Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 63 (6), 331-334.
- Kun, H. and Xiubin, Y., 2009. Median sternotomy closure: review and update research. *Journal of Medical Colleges of PLA*, 24 (2), 112-117.
- LeVeen, H.L. and Piccone, V.A., 1968. Nylon-band chest closure. *Archives of Surgery*, 96 (1), 36-39.
- Levin, L.S., Miller, A.S., Gajjar, A.H., Bremer, K.D., Spann, J., Milano, C.A. and Erdmann, D., 2010. An innovative approach for sternal closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 89 (6), 1995-1999.
- Liu, G.R. and Quek, S.S., 2003. *The finite element method: a practical course*, Butterworth Heinemann, Oxford, 1-11.
- Losanoff, J.E., Richman, B.W., Jones, J.W., 2002. Disruption and infection of median sternotomy: a comprehensive review. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 21 (5), 831-839.
- Losanoff, J.E., Collier, A.D., Wagner-Mann, C.C., Richman, B.W., Huff, H., Hsieh, F., Diaz-Arias, A. and Jones, J.W., 2004. Biomechanical comparison of median sternotomy closures. *The Annals of Thoracic Surgery*, 77 (1), 203-209.
- Losanoff, J.E., Basson, M.D., Gruber, S.A., Huff, H. and Hsieh, F., 2007. Single wire versus double wire loops for median sternotomy closure: experimental biomechanical study using a human cadaveric model. *The Annals of Thoracic Surgery*, 84 (4), 1288-1293.

- Luciani, N., Anselmi, A. and Possati, G., 2006a. Adjusting the indication to polydioxane suture for elective sternal closure. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 132 (5), 1243-1244.
- Luciani, N., Anselmi, A., Gandolfo, F., Gaudino, M., Nasso, G., Piscitelli, M., and Possati, G., 2006b. Polydioxanone sternal sutures for prevention of sternal dehiscence. *Journal of Cardiac Surgery*, 21 (6), 580-584.
- Malhotra, A., Garg, P., Bishnoi, A.K., Pendro, V., Sharma, P., Upadhyay, M. and Gandhi, S., 2014. Is steel wire closure of sternotomy beter than polyester suture closure?. *Asian Cardiovascular&Thoracic Annals*, 22 (4), 409-415.
- 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.
- McGregor, W.E., Payne, M., Trumble, D.R., Farkas, K.M. and Magovern, J.A., 2003. Improvement of sternal closure stability with reinforced steel wires. *The Annals of Thoracic Surgery*, 76 (5), 1631-1634.
- Mehmanparast, H.N., Mac-Thiong, J.M. and Petit, Y., 2012. Compressive properties of a synthetic bone substitute for vertebral cancellous bone. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6 (5), 452-455.
- Melly, L., Gahl, B., Meinke, R., Rueter, F., Matt, P., Reuthebuch, O., Eckstein, F.S. and Grapow, M.T.R., 2013. A new cable-tie-based sternal closure device: infectious considerations. *Interactive Cardiovascular and Thoracic Surgery*, 17 (2), 219-223.
- 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.
- Negri, A., Manfredi, J., Terrini, A., Rodella, G., Bisleri, G., El Quarra, S. and Muneretto, C., 2002. Prospective evaluation of a new sternal closure method with thermoreactive clips. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 22 (4), 571-575.
- Okutan, H., Yavuz, T., Ulasan, V., Tenekeci, C., Öcal, A., İbrişim, E. ve Kutsal, A., 2001. Açık kalp cerrahisi sonrası yaşlı hastalarda yeni bir sternum kapama tekniği ile ilgili deneyimler. *Turkish Journal of Geriatrics*, 4 (2), 55-58.
- Ooi,A., Franklin, D. and Ohri, S., 2009. Improved technique of nitinol sternal clip application. *The Annals of Thoracic Surgery*, 87 (6), 1971-1972.
- 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.
- Özergin, U., Durgut, K., Özpınar, C., Görmüş, N., Sunam, G.S., Yüksek, T. ve Solak, H., 2000. New technique for reinforced sternal closure. *Asian Cardiovascular & Thoracic Annals*, 8 (1), 76-77.
- Öztekin, Ö., 2011. Sternotomi ve torakotomi uygulamasının respiratuvar kas gücü üzerine etkileri. *Uzmanlık Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi, İzmir*.
- Pai, S., 2005. In vivo characterization of respiratory forces on the sternal midline following median sternotomy. MS Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.

- 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.
- 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.
- Plass, A., Grünenfelder, J., Reuthebuch, O., Vachenauer, R., Gauer, J.M., Zünd, D. 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.
- 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.
- Raman, J., Lehmann, S., Zehr, K., DeGuzman, B.J., Aklog, L., Garrett, E., MacMohan, H., Hatcher, B.M. and Wong, M.S., 2012. Sternal closure with rigid plate fixation versus wire closure: a randomized controlled multicenter trial. *The Annals of Thoracic Surgery*, 94 (6), 1854-1861.
- Reiss, N., Schuett, U., Kemper, M., Bairaktaris, A. and Koerfer, R., 2007. New method for sternal closure after vacuum-assisted therapy in deep sternal infections after cardiac surgery. *The Annals of Thoracic Surgery*, 83 (6), 2246-2247.
- Riess, F.C., Awwad, N., Hoffmann, B., Bader, R., Helmold, H.Y., Loewer, C., Riess, A.G. and Bleese, N., 2004. A steel band in addition to 8 wire cerclages reduces the risk of sternal dehiscence after median sternotomy. *The Heart Surgery Forum*, 7 (6), 387-392.
- Robicsek, F., Fokin, A., Cook, J. and Bhatia, D., 2000. Sternal Instability After Midline Sternotomy. *The Thoracic and Cardiovascular Surgeon*, 48 (1), 1-8.
- Sanfelippo, P.M. and Danielson, G.K., 1972. Nylon bands for closure of median sternotomy incisions: an unacceptable method. *The Annals of Thoracic Surgery*, 13 (4), 404-406.
- Sarıkaya, S., Aksay, E., Özen, Y., Dedemoğlu, M., Özgür, M.M., Büyükbayrak, F. and Kırallı, K., 2015. Thermoreactive nitinol clips: propensity score comparison with robicsek technique. *The Asian Cardiovascular & Thoracic Annals*, 23 (4), 399-405.
- Schimmer, C., Sommer, S.P., Bensch, M., Bohrer, T., Aleksic, I. and Leyh, R., 2008. Sternal closure techniques and postoperative sternal wound complications in elderly patients. *The European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 34 (1), 132-138.
- Scovotti, C.A., Ponzzone, C.A. and Leyro-Diaz, R.M., 1991. Reinforced sternal closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 51 (5), 844-845.
- Selthofer, R., Nikolic, V., Mrcela, T., Radic, R., Leksan, I., Rudez, I. and Selthofer, K., 2006. Morphometric analysis of the sternum. *Collegium Antropologicum*, 30 (1), 43-47.
- Shields, T.W., Locicero, J., Ponn, R.B. and Rusch, V.W., 2004. *General Thoracic Surgery*, 6th edition. Lippincott Williams & Wilkins, 3040, USA.

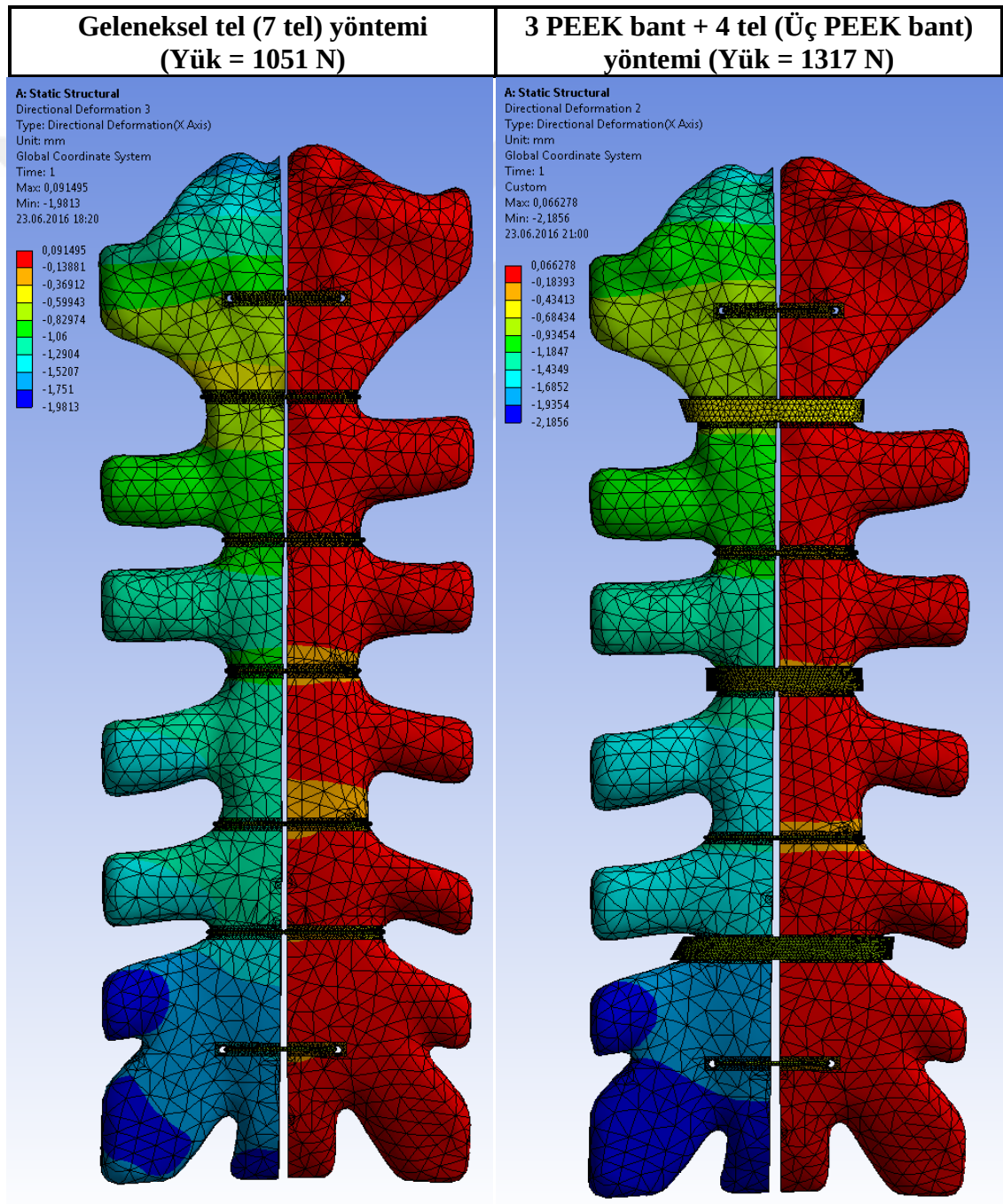
- Shih, C.C., Shih, C.M., Su, Y.Y. and Lin, S.J., 2004. Potential risk of sternal wires. *The European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 25 (5), 812-818.
- Snyder, C.W., Graham, L.A., Byers, R.E. and Holman, W.L., 2009. Primary sternal plating to prevent sternal wound complications after cardiac surgery: 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.
- Stacy, G.S., Ahmed, O., Richardson, A., Hatcher, B.M., Macmahon, H. and Raman, J., 2014. Evaluation of sternal bone healing with computed tomography and a quantitative scoring algorithm. *The Open Medical Imaging Journal*, 9 (8), 29-35.
- Standring, S., 2008. *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*, 40th edition. Churchill Livingstone, 1576, UK.
- Sterkenburg, S.M.M., Riviere, A.B. and Vermeulen, F.E.E., 1990. Sternal fixation with resorbable suture material. *European Journal of Cardiothoracic Surgery*, 4 (6), 345.
- Taber, R.E. and Madaras, J., 1969. Prevention of sternotomy wound disruptions by use of figure-of-eight pericostal sutures. *The Annals of Thoracic Surgery*, 8 (4), 367-369.
- Tavilla, G., van Son, J.A.M., Verhagen, A.F. and Lacquet, L.K., 1991. Modified Robicsek technique for complicated sternal closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 52 (5), 1179-1180.
- Tavlaşoğlu, M., Kürklüoğlu, M., Arslan, Z., and Durukan, A.B., 2012. Detachment and dislocation of thermoreactive clips from sternum in late postoperative period due to misuse. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 14 (4), 491-493.
- Tekümit, H., Cenal, A.R., Tataroğlu, C., Uzun, K. ve Akıncı, E., 2009. Comparison of figure-of-eight and simple wire sternal closure techniques in patients with non-microbial sternal dehiscence. *The Anatolian Journal of Cardiology*, 9 (5), 411-416.
- Timmes, J.J., Wolvek, S., Fernando, M., Bas, M. and Rocko, J., 1973. A new method of sternal approximation. *The Annals of Thoracic Surgery*, 15 (5), 544-546.
- Topçu, M. ve Taşgetiren, S., 1998. Mühendisler için sonlu elemanlar metodu. Mühendislik Fakültesi Matbaası, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- 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.
- Tunçay, A., Akçalı, Y., Özmen, R., Gazioğlu, Ö. and Serhatlıoğlu, F., 2014. Vitalitec international, the sternal closure device: a novel closure technique for sternal dehiscence. *Journal of Clinical & Experimental Investigations*, 5 (4), 534-538.
- Usui, A., Oshima, H., Akita, T. and Ueda, Y., 2006. Polydioxane (PDS) cord has insufficient reliability to securely close the sternum. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 131 (5), 1174-1175.
- 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.

- 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.
- White, T.D., Black, M.T. and Folkens, P.A., 2011. *Human Osteology*. Academic Press, 689, USA.
- 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., Peppo, A.P., Moscarelli, M., Wolf, L.G., Scafuri, A., Nardi, P., Nanni, F., Di Marzio, E., De Vico, P. and 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.
- Zurbrugg, H.R., Freestone, T., Bauer, M. and Hetzer, R., 2000. Reinforcing the conventional sternal closure. *The Annals of Thoracic Surgery*, 69 (6), 1957-1958.

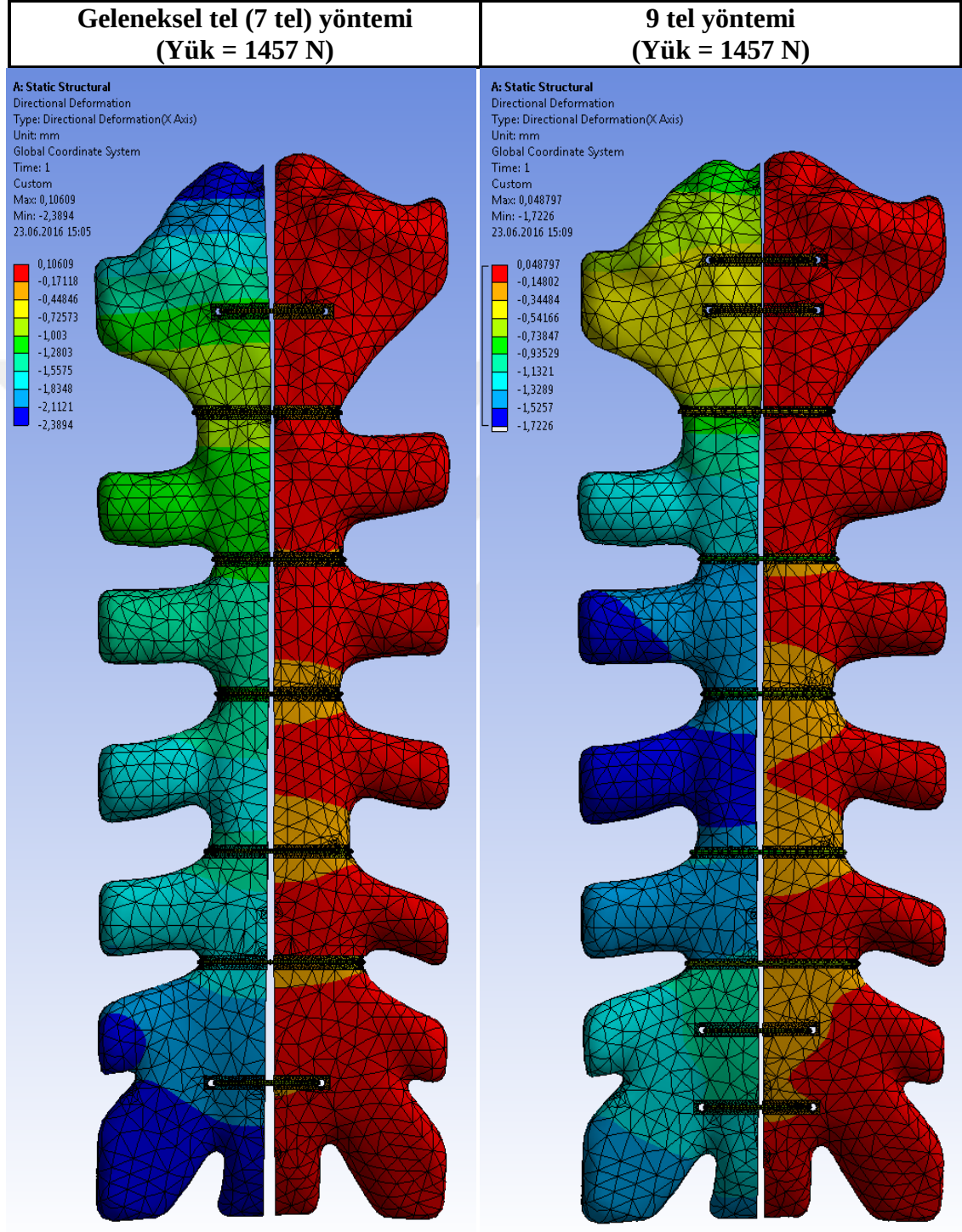
EKLER

EK 1

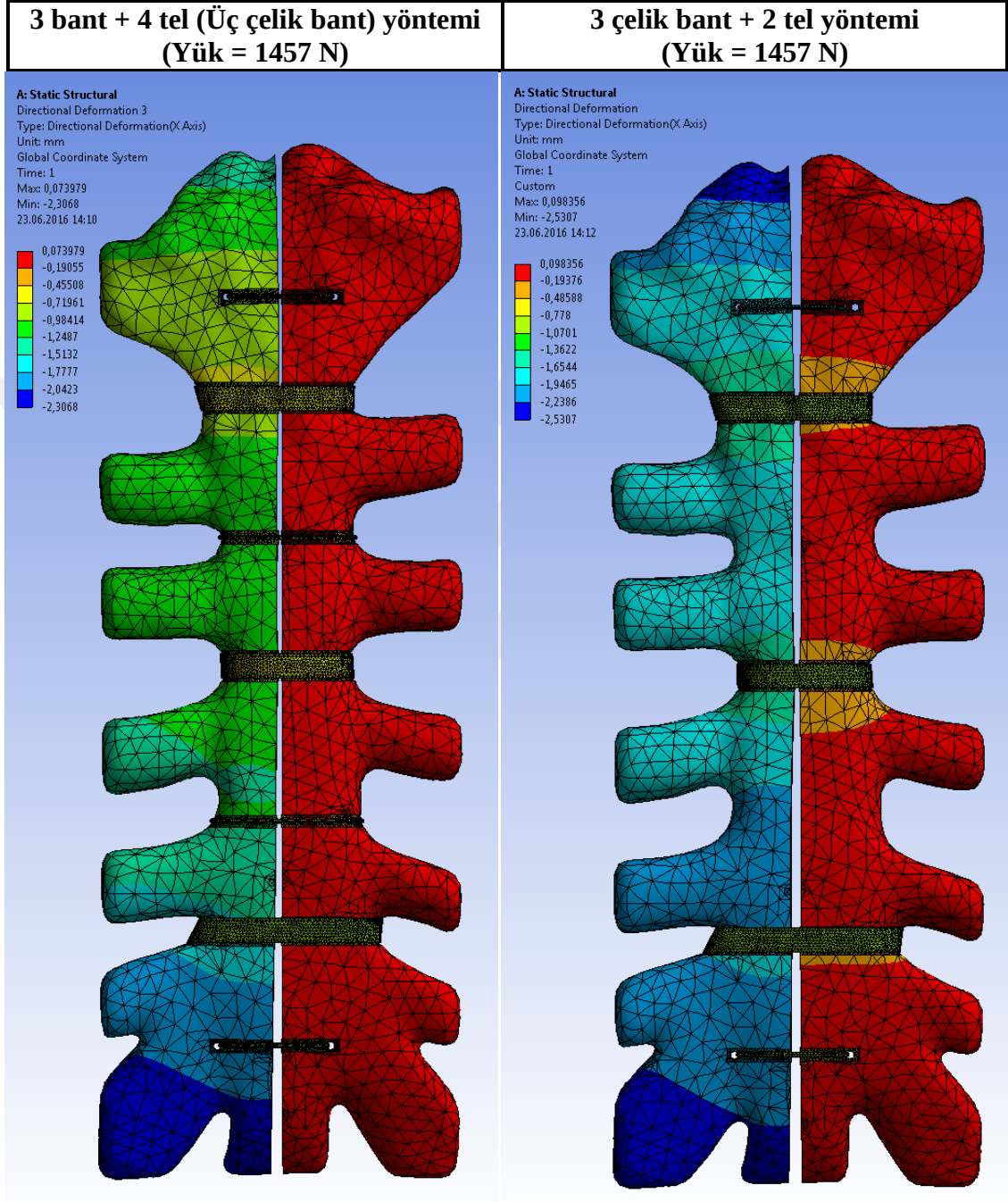
SEY analizlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri (Kısım 1-10)



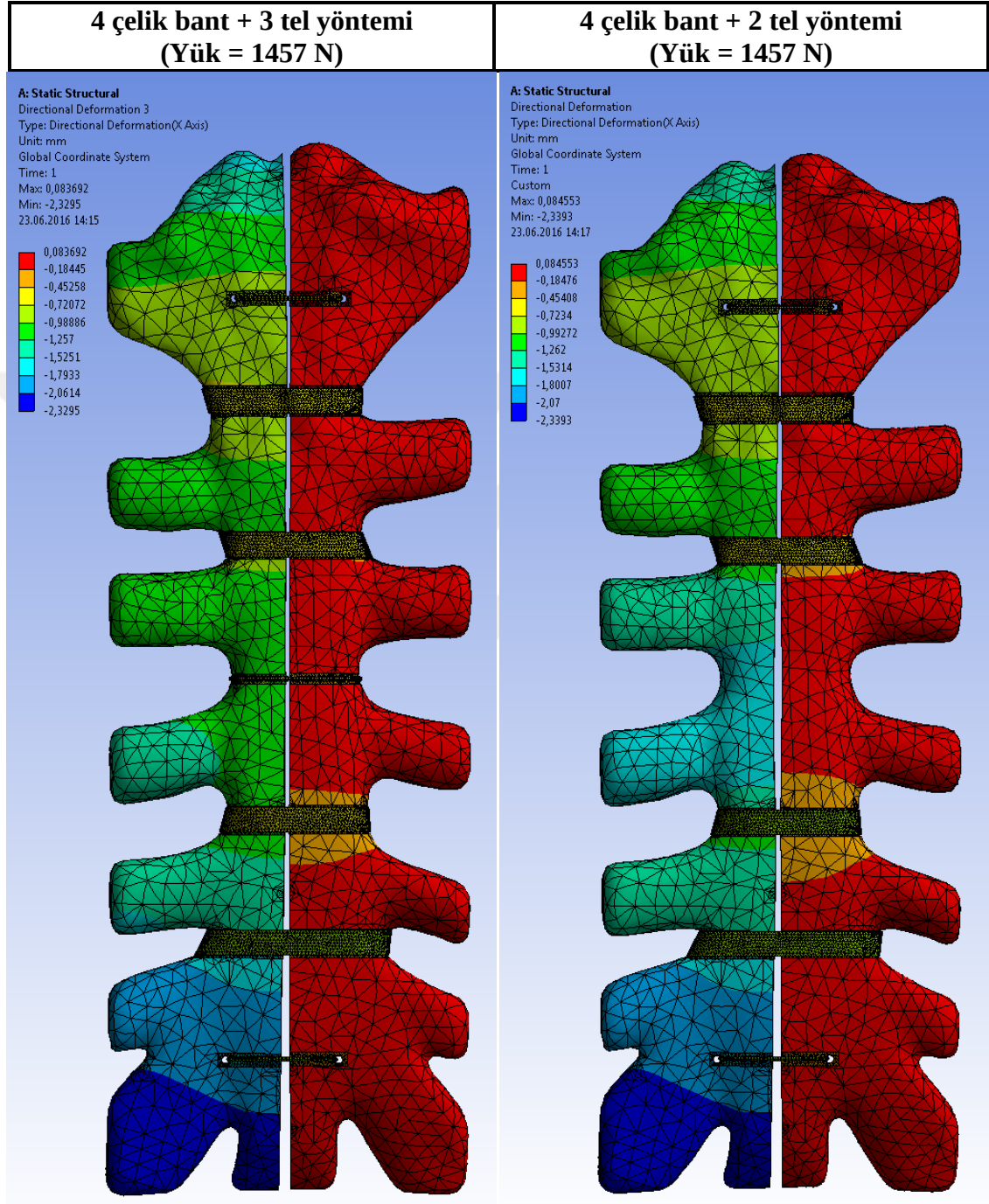
SEY analizlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri (Kısım 2-10)



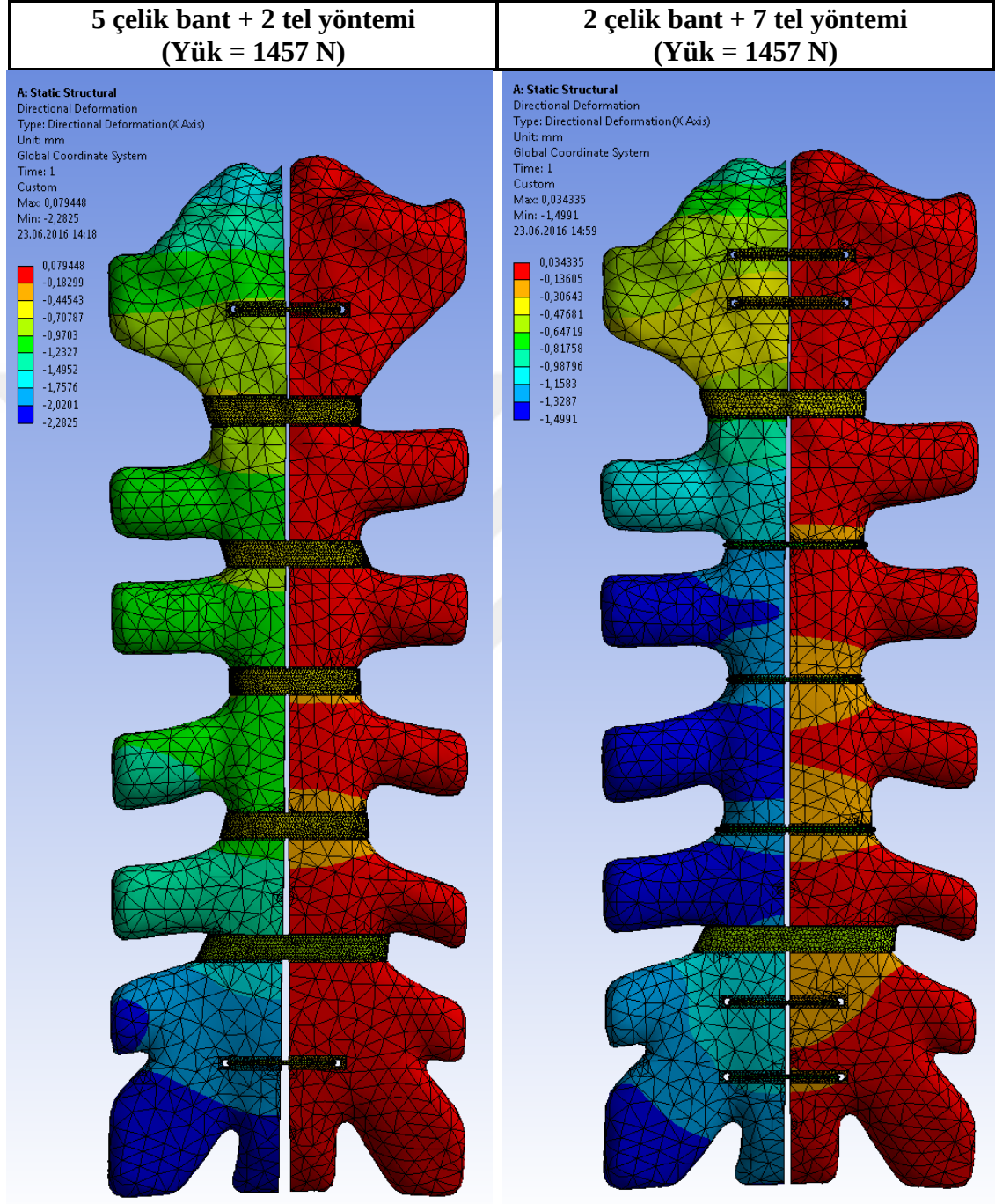
SEY analizlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri (Kısım 3-10)



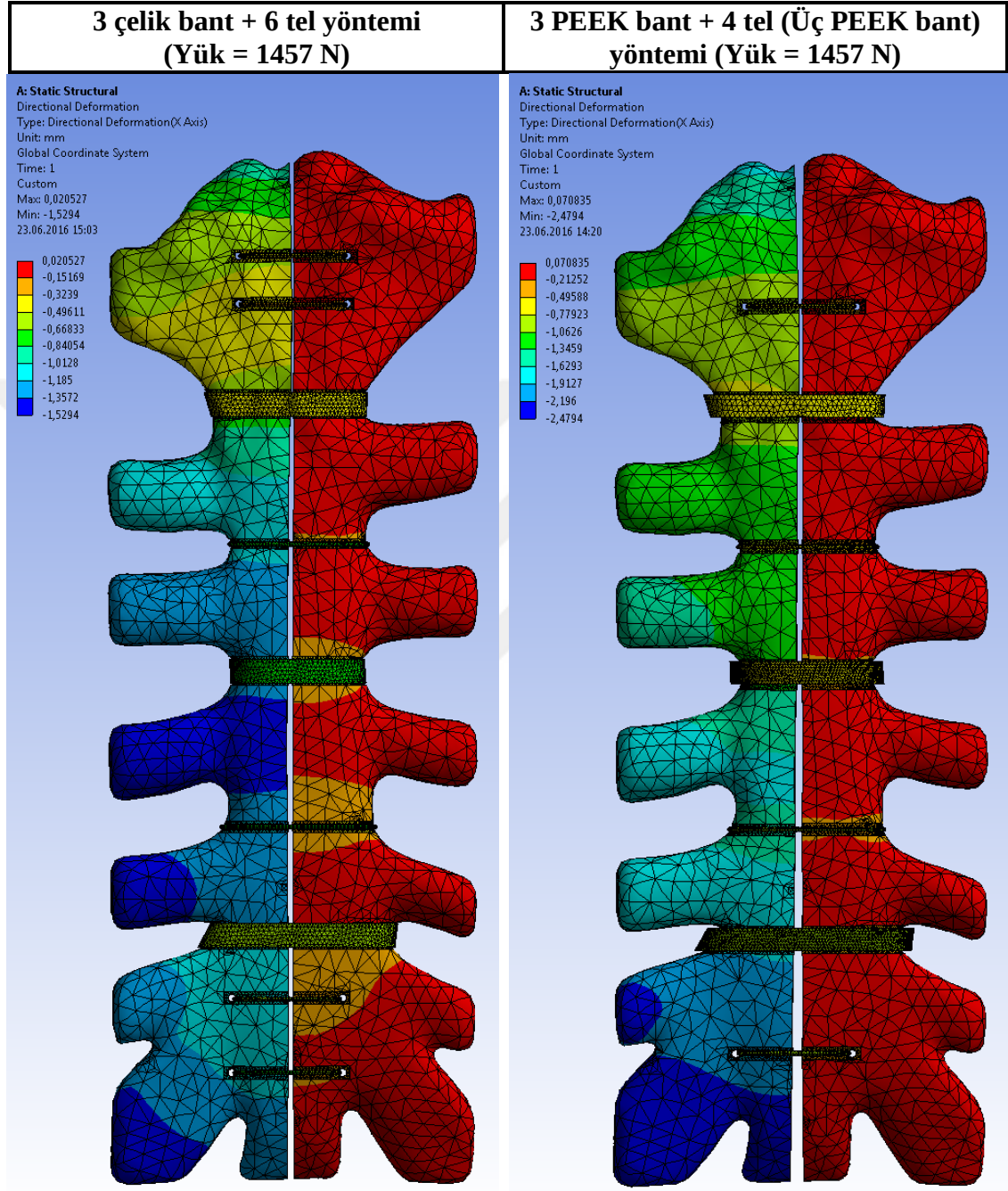
SEY analizlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri (Kısım 4-10)



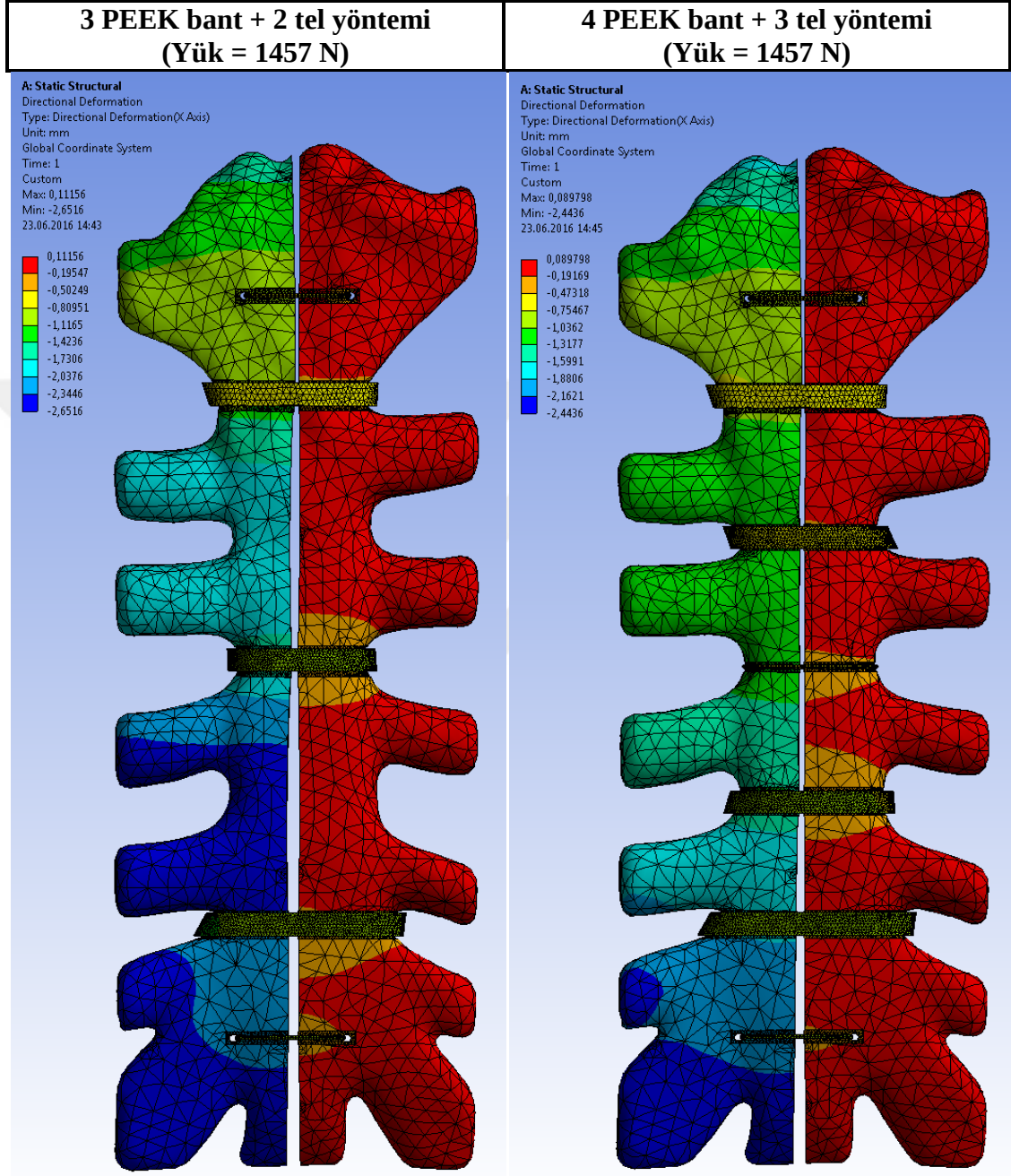
SEY analizlerinde elde edilen yer değıştirme değeri (Kısım 5-10)



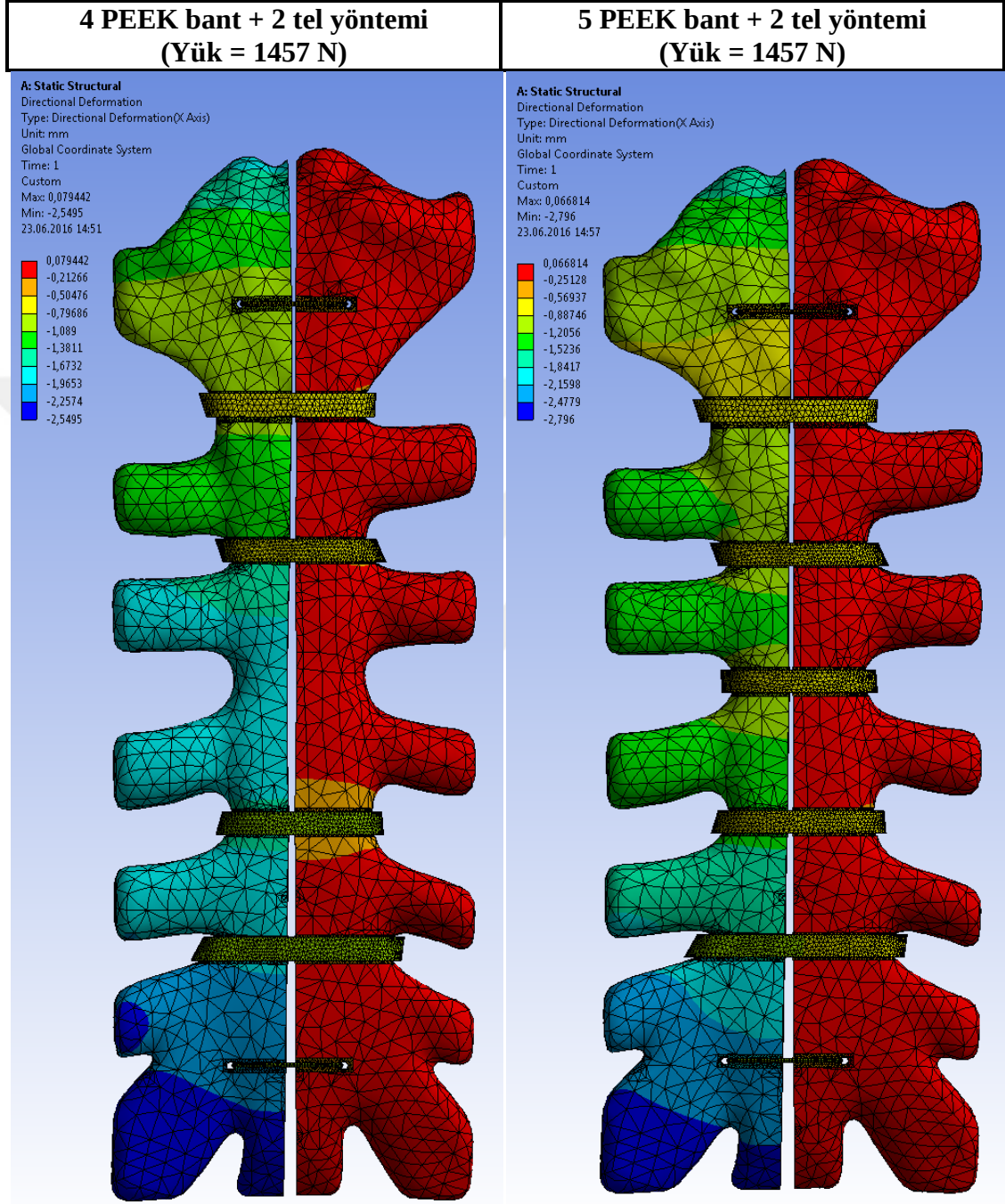
SEY analizlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri (Kısım 6-10)



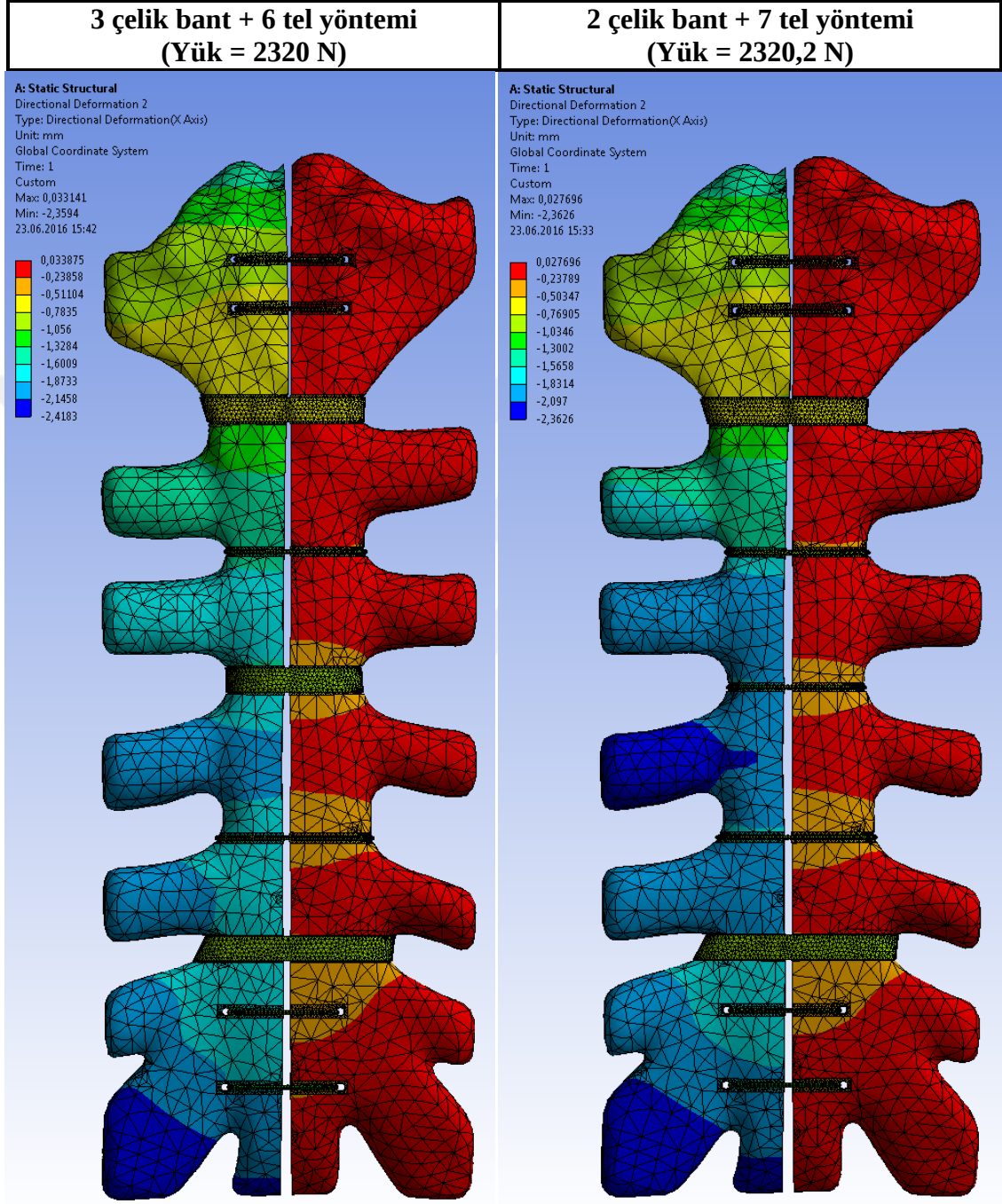
SEY analizlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri (Kısım 7-10)

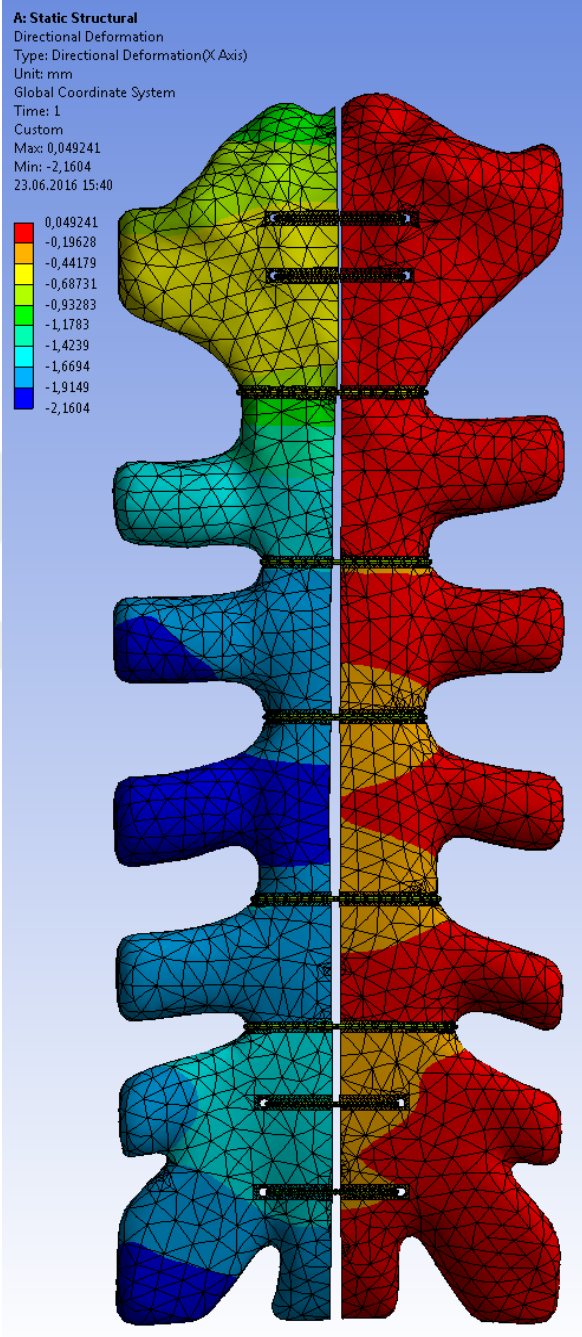


SEY analizlerinde elde edilen yer değıştirme değeri (Kısım 8-10)



SEY analizlerinde elde edilen yer değıştirme değeri (Kısım 9-10)



SEY analizlerinde elde edilen yer değiştirme değerleri (Kısım 10-10)**9 tel yöntemi
(Yük = 1889,8 N)**

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2003 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2007 yılında mezun oldu. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimini tamamladı ve aynı yıl doktora eğitimine başladı.

2007 yılından bu yana Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.