T.C.

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ

İSTANBUL TIP FAKÜLTESİ

BEYİN VE SİNİR CERRAHİSİ ANABİLİM DALI

Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin Spinal Faset Eklem Enjeksiyonlarında Kullanımının Kadavra Üzerinde Araştırılması

Uzmanlık Tezi

Dr. Ali Ekrem ADIYAMAN

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Pulat Akın SABANCI

İSTANBUL, 2022

ÖNSÖZ

Türkiye tıbbının en köklü kurumlarından biri olan, 2009 yılında bir tıp fakültesi öğrencisi olarak adımımı atmamdan bu yana bana çok şey katan, yuvam olarak gördüğüm İstanbul Tıp Fakültesi'nden Beyin ve Sinir Cerrahisi Uzmanı olarak ayrılmanın heyecanını ve mutluluğunu yaşıyorum. Bu zorlu eğitim sürecinde bilgi ve deneyimlerini aktararak bu ilmi öğrenmemi sağlayan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Orhan Barlas, Prof. Dr. Ali Nail İzgi, rahmetli Prof. Dr. Ömer Faruk Ünal, Prof. Dr. Kemal Tanju Hepgül, Prof. Dr. Altay Sencer, Prof. Dr. Yavuz Aras, Prof. Dr. Aydın Aydoseli, Doç. Dr. Pulat Akın Sabancı, Uzm. Dr. İlyas Dolaş ve Uzm. Dr. Tuğrul Cem Ünal'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmada desteklerini esirgemeyen Radyoloji Anabilim Dalı'ndan Prof. Dr. Serra Sencer ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Barburoğlu'na, Anatomi Anabilim Dalı'ndan Uzm. Dr. Osman Coşkun'a ve bilhassa tez danışmanım olarak bu çalışmanın her sürecinde beni destekleyen, üzerimde emeği büyük olan Doç. Dr. Pulat Akın Sabancı hocama ayrıca şükranlarımı sunuyorum.

Bugünlere gelmemde emeği olan ailem; başta annem Fatma Şengül Adıyaman, babam Sadık Adıyaman, ablam Betül Yavuz ve kız kardeşim Ayşegül Adıyaman'a sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

Bana her adımımda destek olan ve bu tezin her aşamasında en az benim kadar payı olan çok sevdiğim eşim Saliha Büşra Selman-Adıyaman'a ve minik oğlum Kerem Zahit Adıyaman'a sevgilerimi sunuyorum.

Dr. Ali Ekrem ADIYAMAN

Utrecht, 2022

Bu çalışma AO Spine Research Start-Up Grant programı kapsamında desteklenmiştir.

Project no: AOS-Startup-21-037 was supported by AO Foundation, AO Spine is a clinical division of the AO Foundation – an independent medically–guided not–for–profit organization based in Davos, Switzerland.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **2**

İÇİNDEKİLER **4**

TABLOLAR LİSTESİ **7**

ŞEKİLLER LİSTESİ **9**

SEMBOLLER / KISALTMALAR LİSTESİ **11**

ÖZET **12**

Giriş **12**

Gereç ve Yöntemler **12**

Bulgular **13**

Sonuç **13**

ABSTRACT **14**

Introduction **14**

Materials and Methods **14**

Results **15**

Conclusion **15**

1. GİRİŞ VE AMAÇ **16**

2. GENEL BİLGİLER **17**

2.1. Bel, Boyun ve Sırt Ağrısının Epidemiyolojisi **17**

2.2. Bel, Boyun ve Sırt Ağrısı Nedenleri **17**

2.3. Faset Eklem Sendromu **18**

2.4. Faset Eklem Anatomisi ve Fonksiyonları **20**

2.5. Faset Eklem İnnervasyonu 23

2.6. Faset Eklem Sendromunda Patofizyoloji 26

2.7. Faset Eklem Sendromunda Öykü ve Fizik Muayene 27

2.8. Faset Eklem Sendromunda Radyoloji 27

2.9. Faset Eklem Enjeksiyonları 28

2.9.1 Atlantoaksiyel C1-C2 Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği 29

2.9.1. Servikal İntraartiküler Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği 30

2.9.2. Servikal Faset Eklem Medial Dal Bloğu ve Radyofrekans Ablasyon Tedavisi Tekniği 31

2.9.3. Torakal İntraartiküler Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği 33

2.9.4. Torakal Faset Eklem Medial Dal Bloğu ve Radyofrekans Ablasyon Tedavisi Tekniği 34

2.9.5. Lomber İntraartiküler Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği 36

2.9.6. Lomber Faset Eklem Medial Dal Bloğu ve Radyofrekans Ablasyon Tedavisi Tekniği 37

2.10. Faset Eklem Enjeksiyonları Komplikasyonları 38

2.11. Artırılmış Gerçeklik 39

2.12. Tıpta Artırılmış Gerçeklik Kullanımı 42

2.13. Nöroşirürjide Artırılmış Gerçeklik Kullanımı 43

2.13. Faset Eklem Enjeksiyonlarında Artırılmış Gerçeklik Kullanımı 46

2.15. Faset Eklem Enjeksiyonu Tekniğinin Limitasyonları ve Artırılmış Gerçeklik Teknolojisi Çözümü 46

3. GEREÇ VE YÖNTEM 47

3.1. Çalışma gruplarının tasarımı 47

3.2. Artırılmış gerçeklik ile faset eklem enjeksiyonu metodu 47

3.3. İşlem sonrası BT kontrolü 51

4. BULGULAR 53

5. TARTIŞMA 67

6. SONUÇ 70

KAYNAKLAR 71

ÖZGEÇMİŞ 80

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1: Örneklemdeki enjeksiyon özellikleri bilgileri 54

Tablo 2: Deney grubuna göre enjeksiyon özelliklerin karşılaştırması 55

Tablo 3: Anatomik seviyeye göre enjeksiyon skorlarının karşılaştırması 55

Tablo 4: Enjeksiyon skorlarının anatomik seviyelere ve gruplara göre dağılımı 56

Tablo 5: Lomber bölge enjeksiyon skorlarının gruplar arası karşılaştırması 57

Tablo 6: Torakal bölge enjeksiyon skorlarının gruplar arası karşılaştırması 57

Tablo 7: Skorlara ve anatomik seviye grup ve taraf özelliklerine göre enjeksiyonların karşılaştırması 58

Tablo 8: Lomber bölge enjeksiyonlarında deney-kontrol gruplarının taraflara göre karşılaştırması 59

Tablo 9: Torakal bölge enjeksiyonlarında deney-kontrol gruplarının taraflara göre karşılaştırması 60

Tablo 10: Enjeksiyon skorlarının kadavralara göre dağılımı 60

Tablo 11: Deney grubunda enjeksiyon skorlarının kadavralara göre dağılımı 61

Tablo 12: Enjeksiyonların ortalama skorlarının deney ve kontrol grubu arasında t-test ile karşılaştırılması 61

Tablo 13: Enjeksiyonların ortalama skorlarının anatomik seviyeye gore t-test ile karşılaştırılması 62

Tablo 14: Anatomik seviyeye göre deney ve kontrol grubu enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması 62

Tablo 15: Deney ve kontrol grupları içinde anatomik seviyeye göre enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması 63

Tablo 16: Enjeksiyonların ortalama skorlarının anatomik seviyeye gore t-test ile karşılaştırılması 64

Tablo 17: Anatomik seviyeye göre deney ve kontrol grubu enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması 64

Tablo 18: Deney ve kontrol grupları içinde anatomik seviyeye göre enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması 65

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Lomber faset eklemler kaynaklı ağrıların olası yayılımları 19

Şekil 2: Servikal faset eklemler kaynaklı ağrıların olası yayılımları 19

Şekil 3: Lomber faset eklemlerin koronal ve aksiyel kesitte çizimi 21

Şekil 4: Lomber faset eklemler. 21

Şekil 5: Torakal faset eklemler 22

Şekil 6: Servikal faset eklemler 23

Şekil 7: Lomber faset eklemlerin innervasyonu ve her medial dalın kendi seviyesi ve bir alt seviyeyi innerve etmesi 24

Şekil 8: Torakal faset eklemlerin innervasyonu 25

Şekil 9: Servikal faset eklemlerin innervasyonu 26

Şekil 10: Servikal, torakal ve lomber faset eklem enjeksiyonları hedef açıları. 28

Şekil 11: Atlantoaksiyel eklem enjeksiyonu skopi görüntüsü. 29

Şekil 12: Servikal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu 30

Şekil 13: Servikal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu skopi görüntüsü 30

Şekil 14: Servikal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu skopi görüntüsü 32

Şekil 15: Servikal faset eklem medial dal bloğu ve radyofrekans ablasyonu teknikleri 32

Şekil 16: Torakal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu 33

Şekil 17: Torakal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu skopi görüntüsü 33

Şekil 18: Torakal faset eklem medial dal bloğu ve radyofrekans ablasyon tedavisi tekniği ... 35

Şekil 19: Torakal faset eklem medial dal bloğu ve radyofrekans ablasyon tedavisi tekniği ... 35

Şekil 20: Lomber faset eklem intraartiküler enjeksiyonu 36

Şekil 21: Lomber faset eklem intraartiküler enjeksiyonu skopi görüntüsü 36

Şekil 22: Lomber faset eklem medial dal bloğu 37

Şekil 23: Lomber faset eklem medial dal bloğu 38

Şekil 24: Milgram'ın sanal süreklilik diyagramı 39

Şekil 25: Ivan Sutherland'ın geliştirdiği ilk artırılmış gerçeklik gözlüğü 40

Şekil 26: HoloLens 2 (Microsoft Corp. Wermont, WA) 41

Şekil 27: Hololens için geliştirilen bir anatomi uygulaması 42

Şekil 28: Bir artırılmış gerçeklik uygulamasının beyin tümöründe insizyonu belirlemede kullanılması örneği 44

Şekil 29: Bir artırılmış gerçeklik uygulamasıyla anjiyografi masasında hastanın omurgasının görüntülenmesi 45

Şekil 30: İşlem öncesi üzerine işaretler yerleştirilmiş kadavraya BT çekilirken 48

Şekil 31: Üç boyutlu modelleme sonrası kadavranın omurgasının hologramı ve planlanan iğne doğrultuları. 49

Şekil 32: Artırılmış gerçeklik eşliğinde faset eklem enjeksiyonu yapılırken 50

Şekil 33: İşlemi gerçekleştiren cerrahın gözünden hologramın ve iğnelerin görünümü 50

Şekil 34: İşlem sonrası BT görüntülemede iğnelerin yerleşimi örneği 51

Şekil 35: İşlem sonrası BT görüntülemede üç boyutlu olarak iğnelerin yerleşimi 51

SEMBOLLER / KISALTMALAR LİSTESİ

BT: Bilgisayarlı tomografi

MR: Manyetik rezonans görüntüleme

USG: Ultrasonografi

RFA: Radyofrekans ablasyon

AP: Anterior-posterior

DSA: Dijital substraksiyon anjiyografi

G: Gauge

SAP: Superior artiküler proses

İAP: İnferior artiküler proses

AG: Artırılmış gerçeklik

EVD: Eksternal ventriküler drenaj

FDA: Food and Drug Administiration

EKG: Elektrokardiyografi

EEG: Elektroensefalografi

EMG: Elektromyelografi

ÖZET

Giriş

Bel, boyun ve sırt ağrısı tüm dünyada oldukça yaygın bir halk sağlığı sorunudur. Tedavi maliyetlerinde artışa, verimlilik kaybına, engellilik ve kronik ilaç kullanımına yol açar. Her yaştan insanı etkileyebilir ve yaşam boyu prevalansı %50 ile %80 arasında değişmektedir. Omurgalar arası faset eklemlerin dejenerasyonuna bağlı olarak gelişen faset sendromu, omurga ağrılarının en sık nedenlerinden biri olarak kabul edilir. Çalışmalarda bel ağrılarının %15-45'inin, boyun ağrılarının %54-67'sinin ve sırt ağrılarının ortalama %48'inin faset sendromu ile ilişkili olduğunu belirtilmiştir. Faset sendromunun tanısında ve tedavisinde tüm dünyada kullanılan en yaygın metot faset eklem enjeksiyonlarıdır. Faset eklem enjeksiyonları klinik pratikte sıklıkla c-kollu skopi eşliğinde yapılır. C-kollu skopi cihazı X ışını yaymaktadır ve kullanımda radyasyon maruziyeti oluşmaktadır. Ayrıca iki boyutlu bir görüntü üzerinden ayrı bir ekrana bakarak işlem gerçekleştirilmektedir. Ekrandaki iki boyutlu görüntüye bakarak işlemi gerçekleştirmek tecrübe ister ve kolay değildir. Bunlara ek olarak işlemi uygulayan doktor için ayrı bir ekrana bakmak odak noktasında kaymaya yol açabilmektedir. Artırılmış gerçeklik teknolojisi, bilgisayar ortamında oluşturulan iki veya üç boyutlu görsellerin bir telefon, tablet, gözlük vb. cihaz yardımıyla gerçek dünya ile etkileşime girip kullanıcının gözüne yansıtılması teknolojisidir. Bu çalışmada faset eklem enjeksiyonlarını artırılmış gerçeklik gözlüğü ile gerçekleştirerek sonuçlarını c-kollu skopi ile karşılaştırmayı planladık.

Gereç ve Yöntemler

Çalışmamızda 5 adet disseke edilmemiş insan kadavrasını kullandık. Kadavralar işlem için özel markerlarla işaretlendikten sonra tüm spinal BT çekildi. BT verileri 3D Slicer ve Blender adlı açık kaynak kodlu programlar kullanılarak işlendi ve kadavra omurgasının 3 boyutlu modeli oluşturuldu. Unity adlı oyun geliştirme motorunda Vuforia SDK görüntü hedef sistemi kullanılarak her bir işlem için ayrı bir program geliştirildi ve bu programlar Microsoft Visual Studio kullanılarak Microsoft HoloLens 2 adlı artırılmış gerçeklik gözlüğünde çalıştırıldı. Deney grubunda iki kadavraya C7-T1'den L5-S1'e kadar bilateral 18 seviyede toplam 72, üç kadavraya da T12-L1'den L5-S1'e kadar bilateral 6 seviyede toplam 36 adet 20 G spinal iğne (Spinocan, Braun) yerleştirildi. İğneler yerleştirildikten sonra herhangi bir ilaç uygulanmadı ve sadece iğnenin yerleşim yerinin doğruluğunu denetlemek

amacıyla tüm spinal BT çekildi. İğneler çıkartılarak aynı kadavralarda aynı bölgelere kontrol grubu olarak c-kollu skopiyle aynı sayıda iğneler yerleştirilerek kontrol tüm spinal BT çekildi.

Bulgular

Bağımsız bir nöroradyolog tarafından deney grubu ve kontrol grubundaki her bir iğne yerleşim yeri açısından başarısız, başarılı ve mükemmel şeklinde üç aşamalı bir skorlamayla, körlemesine değerlendirilmiştir. Toplam 216 iğnenin 33 tanesi (%15,3) başarısız, 109 tanesi (%50,5) başarılı, 74 tanesi (%34,3) mükemmel şekilde olarak değerlendirilmiştir. Bağımsız örneklem t testi kullanılarak yapılan istatistiksel değerlendirmede kontrol grubundaki 108 enjeksiyona ($\bar{X} = 2.12$, $SS = 0.66$) kıyasla deney grubundaki 108 enjeksiyondaki başarı oranı ($\bar{X} = 2.25$, $SS = 0.68$) çok az daha yüksek olmakla birlikte iki grup arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunamamıştır, $t(214) = 1.51$, $p = .13$.

Sonuç

Artırılmış gerçeklik gözlüğü yardımıyla yapılan faset eklem enjeksiyonu tekniği, klasik yöntem olan c-kollu skopi tekniğiyle kıyaslandığında; kadavralarda uygulamamızda istatistiksel anlamlı fark olmaksızın aynı başarı ve güvenilirlik oranını sağlamaktadır. Artırılmış gerçeklik teknolojisinin klinik kullanımıyla c-kollu skopi ihtiyacı azalabilir. Böylece işlemi uygulayan doktorun ve sağlık personelinin radyasyon maruziyeti azaltılabilir, işlem iki boyutlu bir görüntüden üç boyutlu bir görüntüye taşınarak kolaylaştırılabilir, işlemi uygulayanın tecrübesinin işlemin başarısında oynadığı rol azaltılabilir ve odak kayması problemi ortadan kaldırılabilir.

Anahtar kelimeler: Bel ağrısı, faset eklem enjeksiyonu, artırılmış gerçeklik, HoloLens 2

ABSTRACT

Introduction

Spinal pain is an important public health issue leading to a substantial increase in treatment costs, loss of productivity, disability, and drug use. Spinal pain can affect people of all ages, from adolescents to the elderly; and the lifetime prevalence ranges from 50% to 80%. Facet syndrome, which develops due to degeneration of facet joints, can be considered one of the most common causes of the spinal pain. Studies have found that 15-45% of low back pain, 54-67% of neck pains, and an average of 48% of back pain are associated with facet syndrome. The most common method used in the diagnosis and treatment of facet syndrome worldwide is facet joint injections. Facet joint injections are often performed with c-arm fluoroscopy in clinical practice. The c-arm fluoroscopy device emits X-rays, and radiation exposure occurs in use. In addition, the process is performed by looking at a separate screen on a two-dimensional image. Operating by looking at the two-dimensional image on the screen requires experience and is not easy, and it may shift the doctor's focus. Augmented reality technology, interacting with the real world, can reflect three-dimensional images created in the computer environment to the user's eye. Our study aims to perform facet joint injections with augmented reality headset compared to c-arm fluoroscopy.

Materials and Methods

We used five human cadavers. After the cadavers were marked with unique markers for the procedure, spinal CT was performed. CT data were processed using open-source programs called 3D Slicer and Blender, and a 3D model of the cadaver spine was created. A separate program was developed for each injection using the Unity and Vuforia Engine SDK image target system. These programs were run on the Microsoft HoloLens 2 augmented reality headset. Next, in the experimental group, a total of 72 needles (20 G, Spinocan, Braun) at 18 levels from C7-T1 to L5-S1 for two cadavers and 36 needles for three cadavers at six levels from T12-L1 to L5-S1 were placed. After the needles were placed, no medication was injected, and we performed a spinal CT to test the accuracy of the needle placements. After the needles were removed from the cadavers, facet joint injections were performed using the c-arm fluoroscopy in the control group, and then we performed a spinal CT.

Results

Neuroradiologists independently evaluated each needle placements in the experimental and control groups based on the following scoring: unsuccessful, successful, and excellent. The independent sample t-test indicated that the success rate in 108 injections in the experimental group ($\bar{X}$ = 2.25, *SS* = 0.68) was slightly higher compared to the 108 injections in the control group ($\bar{X}$ = 2.12, *SS* = 0.66) but there was no statistically significant difference among two groups, $t(214) = 1.51$, $p = .13$.

Conclusion

Compared to the c-arm fluoroscopy, the facet joint injections performed with the augmented reality headset provided no statistically significant differences in the success and safety rate in human cadavers. The study can act as a proof of concept to show the feasibility of using AR in facet joint injections. Furthermore, the procedure can be facilitated by moving it from a two-dimensional image to a three-dimensional image. Benefiting from these advantages, AR headsets can effectively improve the quality of the procedure, reduce the dependence on the experience of surgeons by eliminating the problem of focus switching, and reduce the intensity of the radiation exposure of the patient and healthcare personnel.

Keywords: Low back pain, facet joint injection, augmented reality, HoloLens 2

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bel, boyun ve sırt ağrısı tüm dünyada oldukça yaygın bir halk sağlığı sorunudur. Tedavi maliyetlerinde artışa, verimlilik kaybına, engellilik ve kronik ilaç kullanımına yol açar. Çoğu insan hayatında en az bir kez bel, boyun ya da sırt ağrısı yaşar.

Bel, boyun ve sırt ağrılarının nedenleri sıklıkla karmaşıktır, birden fazla patoloji eşlik edebilir. Bunların içinde özellikle faset eklemler pek çok çalışmanın sonucu olarak kronik bel, boyun ve sırt ağrısının önemli bir sebebi olarak kabul edilmektedir. Faset eklem kaynaklı ağrıların tanısında ve tedavisinde faset eklem enjeksiyonları tüm dünyada yaygın olarak kabul görmekte ve kullanılmaktadır.

Faset eklem enjeksiyonları klinik pratikte sıklıkla c-kollu skopi eşliğinde yapılır. C-kollu skopi cihazı X ışını yaymaktadır ve kullanımda radyasyon maruziyeti gerçekleşmektedir. Ayrıca iki boyutlu bir görüntü üzerinden ayrı bir ekrana bakarak işlem gerçekleştirilmektedir. Ekrandaki iki boyutlu görüntüye bakarak işlemi gerçekleştirmek tecrübe ister ve kolay değildir. Ek olarak ameliyat sahasından ayrı bir ekrana bakmak işlemi uygulayan doktorun odak noktasının kaymasına yol açabilmektedir.

Artırılmış gerçeklik teknolojisi, bilgisayar ortamında oluşturulan iki veya üç boyutlu görsellerin bir telefon, tablet, gözlük vb. cihaz yardımıyla gerçek dünya ile etkileşime girip kullanıcının gözüne yansıtılması teknolojisidir. Son yıllarda tıpta kullanımına yönelik araştırmalar giderek artmaktadır.

Çalışmamızda faset eklem enjeksiyonlarını radyasyon içeren c-kollu skopi yerine artırılmış gerçeklik gözlüğü ile yapmayı planladık. Artırılmış gerçeklik gözlüğü ile geliştirdiğimiz tekniği kadavralar üzerinde deneyip, aynı kadavralarda kontrol grubu olarak c-kollu skopiyle de işlem yaparak iğne yerleşim yerlerinin doğruluğunu kıyaslamayı amaçladık.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Bel, Boyun ve Sırt Ağrısının Epidemiyolojisi

Bel, boyun ve sırt ağrısı yaygın bir halk sağlığı sorunudur. Uluslararası Ağrı Çalışmaları Grubunun (IASP) 2017 raporuna göre sırt ve bel ağrısı için anlık global prevalans %7,5 olarak saptanmış ve tüm dünyada yaklaşık 577 milyon insanın anlık olarak yakınmalara sahip olduğu belirtilmiştir.[1] Bel ağrısı, boyun ağrısı da dahil olmak üzere diğer tüm ağrılardan daha sık olarak görülür.[2] Bel ağrısı tüm kas iskelet sistemi hastalıkları arasında hastane başvurularında ilk sırada yer almaktadır ve dünya çapında engelliliğin en önde gelen nedenidir.[2,3]

Gelişmiş ülkelerde orta ve dar gelirli ülkelere göre iki kat daha sık görülmektedir. Benzer şekilde kentsel nüfusta kırsal nüfusa oranla iki kat sık görülmektedir. Dünya genelinde yaşlı popülasyonun giderek artmasına bağlı olarak düşük ve orta gelirli ülkelerde de sıklığı giderek artmaktadır. Kadın ve erkek cinsiyette benzer oranda görülmektedir.[2]

Amerika Birleşik Devletleri'nde bel ağrısının toplam maliyeti yılda 100 milyar doların üzerine çıkar.[4] 2016'da Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir çalışmada bel ağrısı ve boyun ağrısının 134,5 milyar dolarla 154 hastalık arasında en yüksek sağlık harcamasına yol açan durum olduğu saptanmıştır.[5] Almanya'da sadece sırt ve bel ağrısının direkt ve dolaylı yoldan yıllık maliyeti 2006'daki bir çalışmada 48,9 milyar euro olarak bulunmuş ve Almanya'nın 2006 yılı gayrı safi yurt içi hasılasının %2,2'si olarak bildirilmiştir.[6]

Türkiye'de yaşam boyu bel ağrısı insidansı yapılan bir çalışmada %79,4 olarak saptanmıştır.[7]

2.2. Bel, Boyun ve Sırt Ağrısı Nedenleri

Bel, boyun ve sırt ağrılarının nedenleri sıklıkla karmaşıktır, birden fazla patoloji eşlik edebilir. Etiyoloji genellikle kaslar, ligamanlar, intervertebral diskler, sinir kökleri ve faset eklemlerden biri veya birkaçıdır. Özellikle diskle ilişkili bozukluklar kolayca teşhis edilir. Nitekim literatür ve tedavi yaklaşımları da çoğunlukla disk kaynaklı ağrı üzerine kurgulanmıştır. Ancak farklı çalışmalarda faset eklem ve sakroiliyak eklem kaynaklı ağrıların da önemli boyutlarda olduğu ortaya konmuştur.

Kontrollü çalışmalarda bel ağrılarının %27-40 oranında faset eklemler kaynaklı olduğu bildirilmiştir.[8] Disk herniasyonu olmayan diskojenik ağrıların, faset eklem ve sakroiliyak eklem kaynaklı ağrıların sadece radyolojik görüntülemelerle tespiti oldukça

zordur ve atlanabilmektedir. Bu nedenle açıklanamayan kronik bel, boyun ve sırt ağrılarında faset eklemler önemli bir odak olarak dikkat çekmektedir.

2.3. Faset Eklem Sendromu

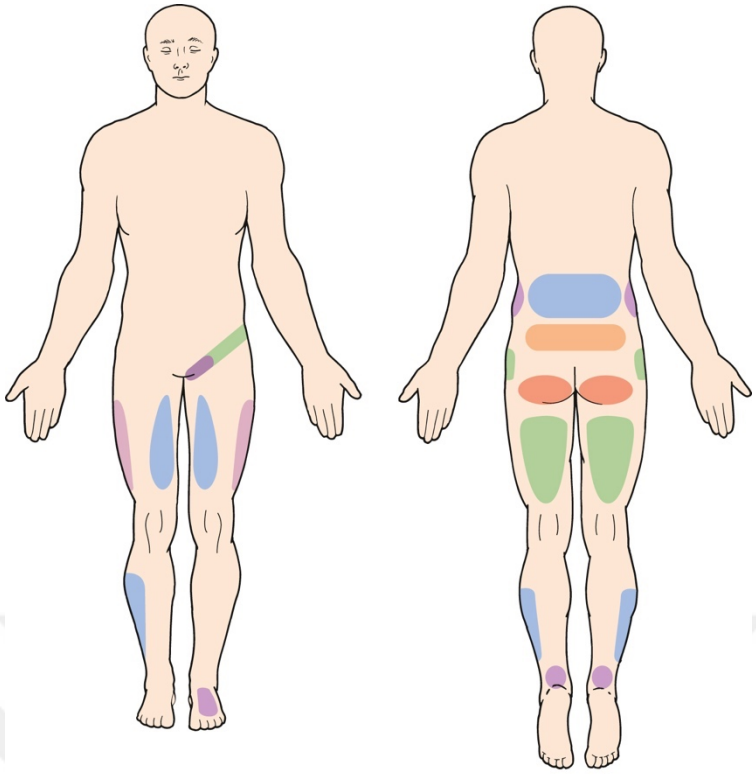
Faset eklemlerden bel ağrısının kaynağı olarak ilk kez 1911 yılında Goldthwait bahsetmiştir.[9] 1927'de Putti kadavra diseksiyonlarında faset eklemlerdeki dejeneratif değişiklikleri ve lokal inflamasyonu göstermiştir.[10] Zygoapofizyel (faset) eklem sendromu terimini ilk olarak 1933 yılında Ghormhley radikülopati olmayan lumbosakral ağrıyı tanımlamak için kullanmıştır.[11]

Bagley ve arkadaşları faset eklemleri sırt ve bel ağrısının %80'e varan nedeni olarak düşünmüşlerdir.[12] Mooney ve Robertson, ilk kez faset eklem sendromunu tanımlayarak intraartiküler lokal anestetik ve steroid uygulamasını gerçekleştirmiş ve uyguladıkları hastalarda %20 oranında bel ve bacak ağrısında azalma raporlamışlardır.[13] Dreyfuss ve arkadaşları 1997'de faset eklem medial dal bloğunu ilk kez tanımlamıştır.[14] Kaplan ve arkadaşları medial dal bloğunun hipertonik saline göre üstünlüğünü ve faset eklem kaynaklı ağrıları %90 oranında ortadan kaldırabildiğini bildirmiştir.[15]

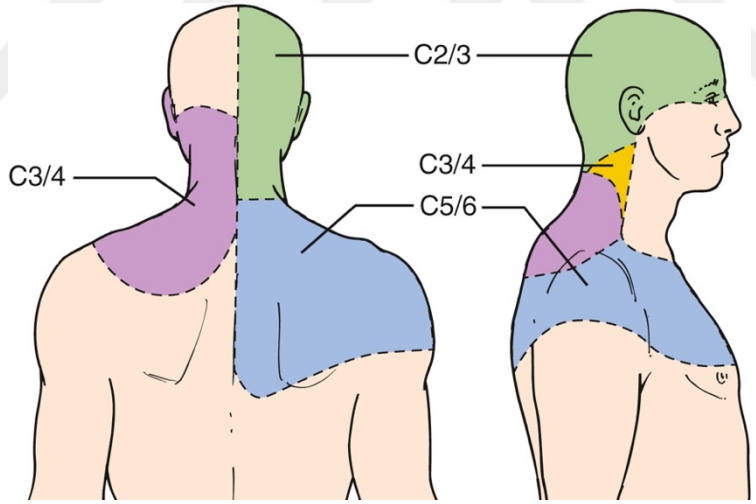
Faset eklem kaynaklı ağrı tanımının destek görmesinin en güçlü nedeni; non-spesifik bel ağrılarının büyük çoğunluğunun faset ekleme yönelik yapılan ağrı girişimleri sonucunda ortadan kalkması olmuştur.[16]

Faset eklem kaynaklı ağrının en sık nedeni olarak faset eklem osteoartriti düşünülmektedir.[17] Faset osteoartritinin temel bileşenleri olarak kabul edilen değişiklikler: Osteofit formasyonu, artiküler proses hipertrofisi, artiküler kartilaj incelmesi, vakum fenomeni, sinoviyal ve subkondral kistler, eklem kapsülü kalsifikasyonu olarak gösterilmiştir.[18]

Faset eklemler bel, boyun ve sırt haricinde potansiyel bir omuz, bacak hatta baş ağrısı kaynağı olabilirler. Şekil 1 ve 2'de faset eklem ağrılarının olası yayılımları gösterilmiştir.



Şekil 1: Lomber faset eklemler kaynaklı ağrıların olası yayılımları



Şekil 2: Servikal faset eklemler kaynaklı ağrıların olası yayılımları

Özellikle osteofit ya da faset kisti vakalarında faset ağrısı ayağa kadar uzanım gösterip radikülopatiyi taklit edebilir. Nörojenik kladikasyon görülebilir. Ağrı genellikle sabah uyanınca şiddetlidir. Hareketsiz dönemleri ya da ekstansiyon ve rotasyon hareketlerini takiben kötüleşir. Faset eklem palpasyonu ile tetiklenir.[19]

Faset eklem osteoartritinde görüntülemeye bağlı olarak bazı evrelemeler yapılmak istenmiştir ancak görüntüleme ve klinik arasında net bir korelasyon kurulamamıştır. Öykü, fizik muayene ve görüntülemeler sonucunda faset eklem ağrı kaynağı olarak düşünülebilir ancak tanının doğruluğu kesin değildir.[20]

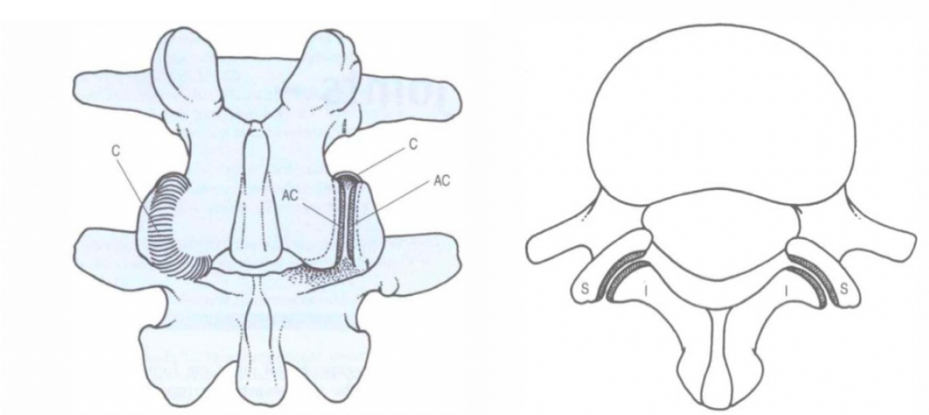
Faset eklem kapsülü ve çevre yapılarda bolca nosiseptif reseptörün bulunması, hasta gruplarında ve gönüllülerde yapılan çalışmalarda faset eklemlerin kimyasal ve elektrik stimülatörlerle uyarılmasıyla bel ve bacak ağrısı oluşması, lokal anestezi altında yapılan spinal cerrahilerde faset eklem kapsülü uyarıldığında ağrı oluşması ve özellikle kronik bel ağrılı hastalarda faset eklem bloklarından fayda görme oranının yüksek olması faset eklem kaynaklı ağrının non-spesifik bel, boyun ve sırt ağrısındaki önemini bize göstermektedir.[21]

Non-spesifik bel, boyun ve sırt ağrılarında faset eklem kaynaklı ağrı düşünüldüğünde tedavi amacıyla uygulanan faset eklem enjeksiyonları tanının kesinleşmesinin en iyi yoludur.

2.4. Faset Eklem Anatomisi ve Fonksiyonları

Faset eklemler diğer bir adıyla zigoapofizyel eklemler; vertebra gövdesinin posterolateralinde yerleşmiş, her bir seviyede üstteki vertebranın inferior artikuler prosesi ve alttaki vertebranın superior artikuler prosesinin birbiriyle yaptığı gerçek bir sinoviyal eklemdir. İntervertebral diskle birlikte her seviyede üç eklemli bir yapı oluştururlar. Bu üçlü yapı intervertebral diskleri stabilize eder ve belli hareketlere izin verir.[22]

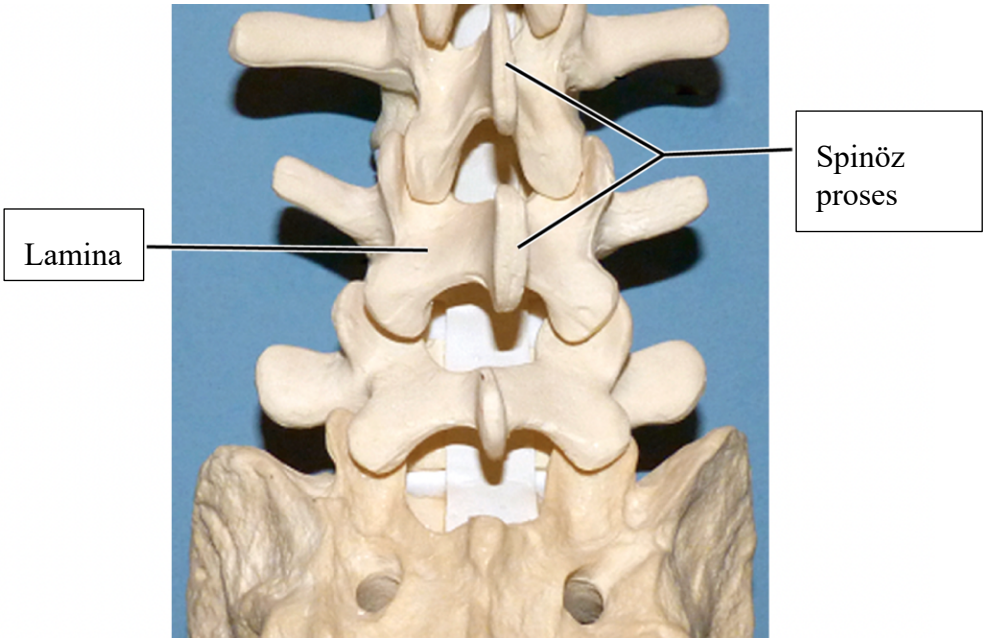
Her bir faset eklem gerçek bir sinoviyal eklem yapısı olarak bir eklem aralığı, sinoviyal membran, hyalin kıkırdak eklem yüzeyleri ve bir fibröz kapsülden oluşur. Eklem aralığı servikal bölgede 0,5-1 mL, lomber bölgede 1-1,5 mL hacimdediler. Fibröz kapsül lomber fasetlerde yaklaşık 1 mm kalınlığındadır. Fibröz kapsül eklem hareketine maksimum direnç uygulaması için iki artiküler proses arasında transvers bir uzanımda yerleşmiş kollajen liflerden oluşmaktadır.[23] (Şekil 3)



Şekil 3: Lomber faset eklemlerin koronal ve aksiyel kesitte çizimi

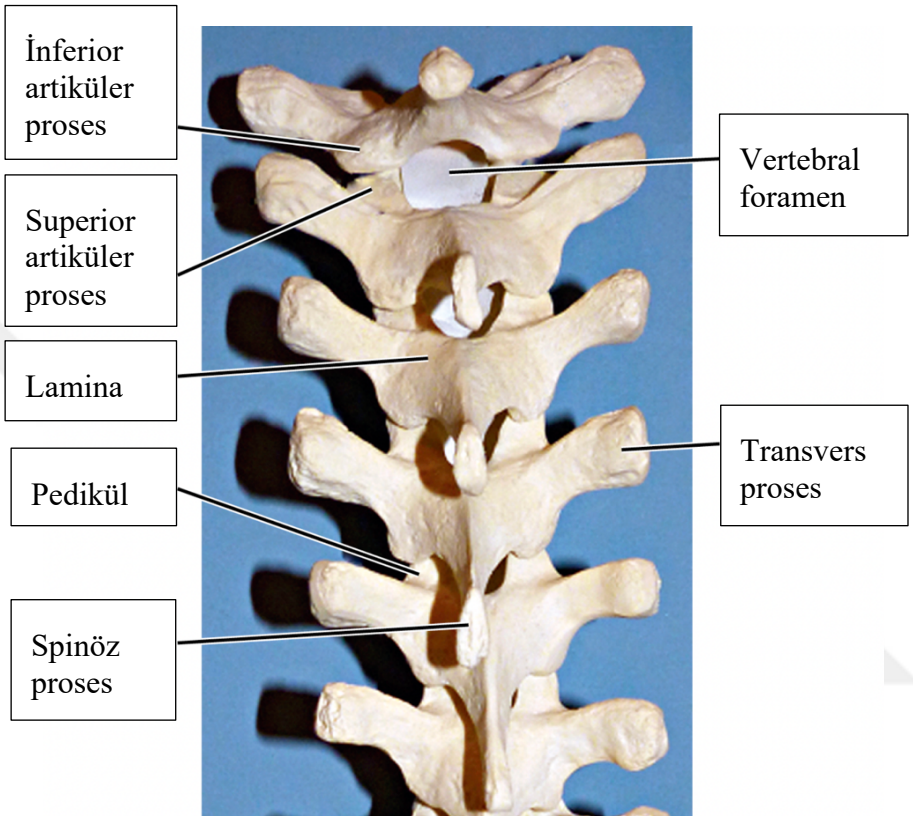
Faset eklemin hareket kısıtlayıcı rolünü belirleyen şey eklem yüzeylerinin sagittal ve koronal düzlemlere göre konumudur.

Lomber faset eklemlerin açısı değişkendir ancak inferior artikuler proses anterolaterale, superior artikuler proses posteromediale bakar şekilde sagittal eksenin lateralinde dizilirler. Lomber bölgede üst seviyedeki faset eklemler daha çok sagittal eksende konumlanır ve aksiyal rotasyona direnç gösterir.[24] Alt lomber faset eklemler ise daha çok koronal yönde konumlanır ve fleksiyona ve kayma kuvvetlerine karşı direnç sağlar. (Şekil 4)



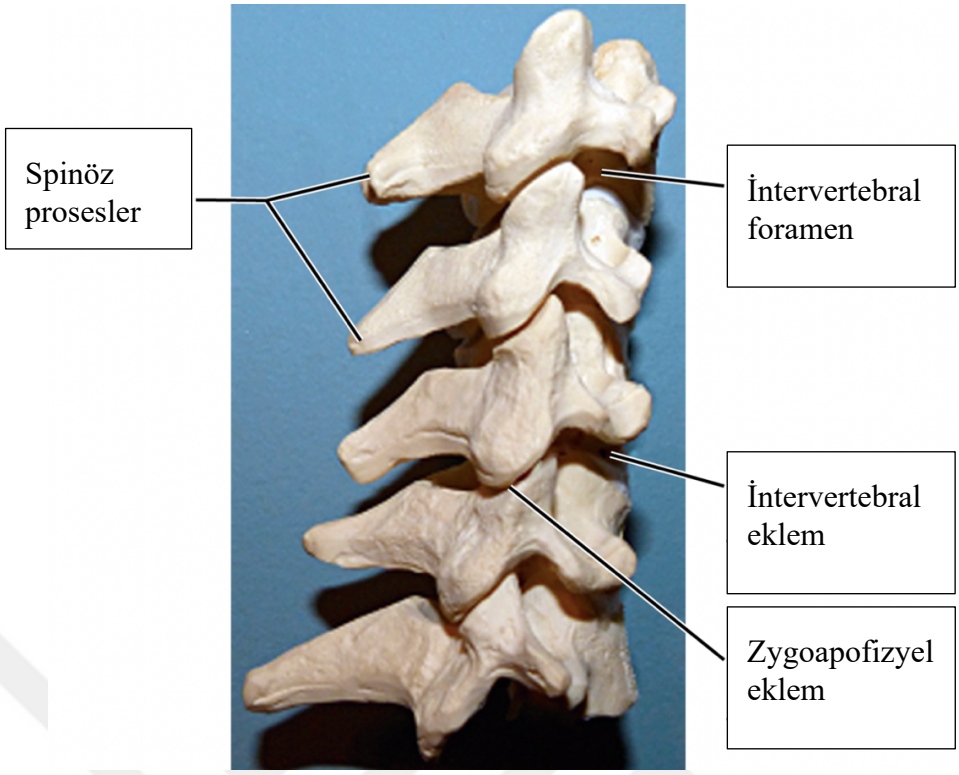
Şekil 4: Lomber faset eklemler.

Torakal faset eklemler en dikey yerleşimli olandır. Aksiyal rotasyon olmaksızın lateral fleksiyona izin verirler. Koronal yerleşimden lomber bölge bileşkesine geçişe doğru sagittal bir yönelime geçerler.[25] (Şekil 5)



Şekil 5: Torakal faset eklemler

Servikal bölgedeki faset eklemler koronal yerleşimlidir (Şekil 6). Faset kapsülleri zayıftır ve harekete izin verir.[26] Servikal faset eklemler üstte ve altta farklılık göstermektedir. Servikal fasetler arasında en sık ağrı kaynağı olarak kabul edilen C2-C3 faset eklemi sagittalde 70 derece, aksiyelde 45 derece açıda hizalıdır. Bu konumlamayla rotasyonu engeller ve C2 vertebrayı atlantoaksiyel eklem rotasyonuna bir pivot olarak sabitler. En çok etkilenen ikinci alan C5-C6 faset eklemi olup, servikal omurgaların en hareketli bölgesidir ve faset eklemler bu seviyeden itibaren posterolateral pozisyona geçmeye başlarlar.[27]



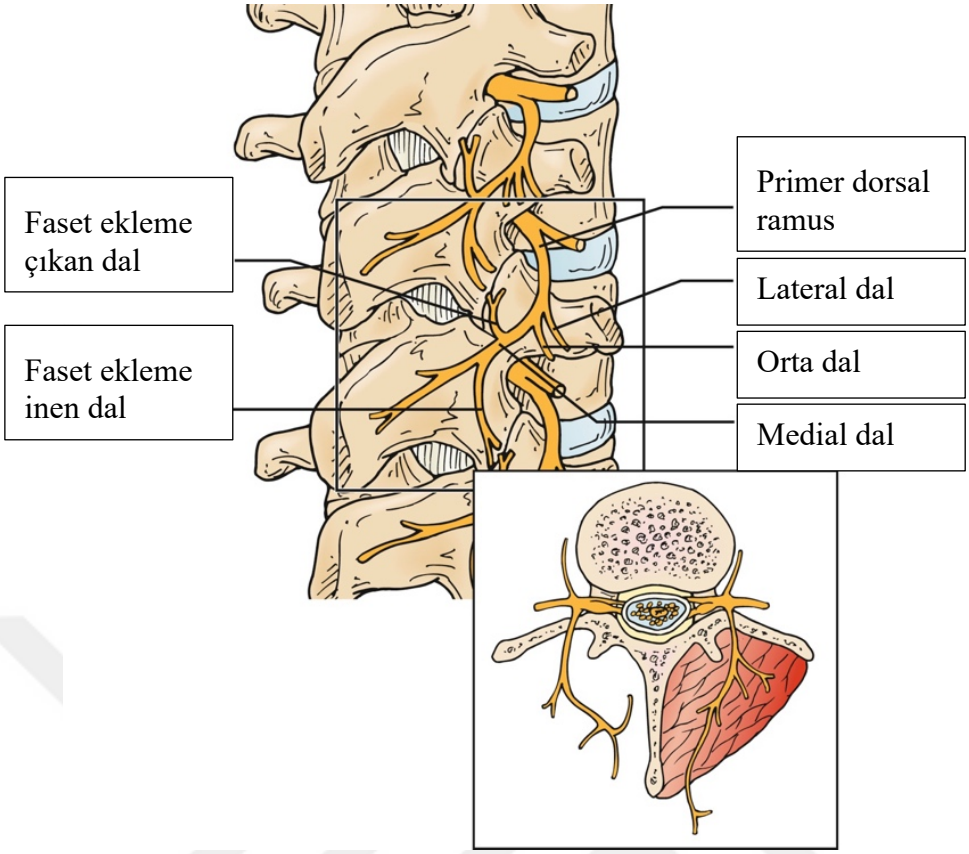
Şekil 6: Servikal faset eklemler

2.5. Faset Eklem İnnervasyonu

Dorsal köklerin terminal bölümü olan medial dal faset eklemlerin duyusal innervasyonunu sağlar. Dorsal kök; lateral, orta ve medial dallara ayrılır. Lomber bölgedeki lateral dal paraspinöz kasların, deri ve sakroilyak eklemin innervasyonunu sağlar. Orta dal longissimus kasını innerve eder. Medial dal en büyükleridir; faset eklemi, multifidus kasını, interspinal kası-ligamanını ve nöral arkın periostunu innerve eder.

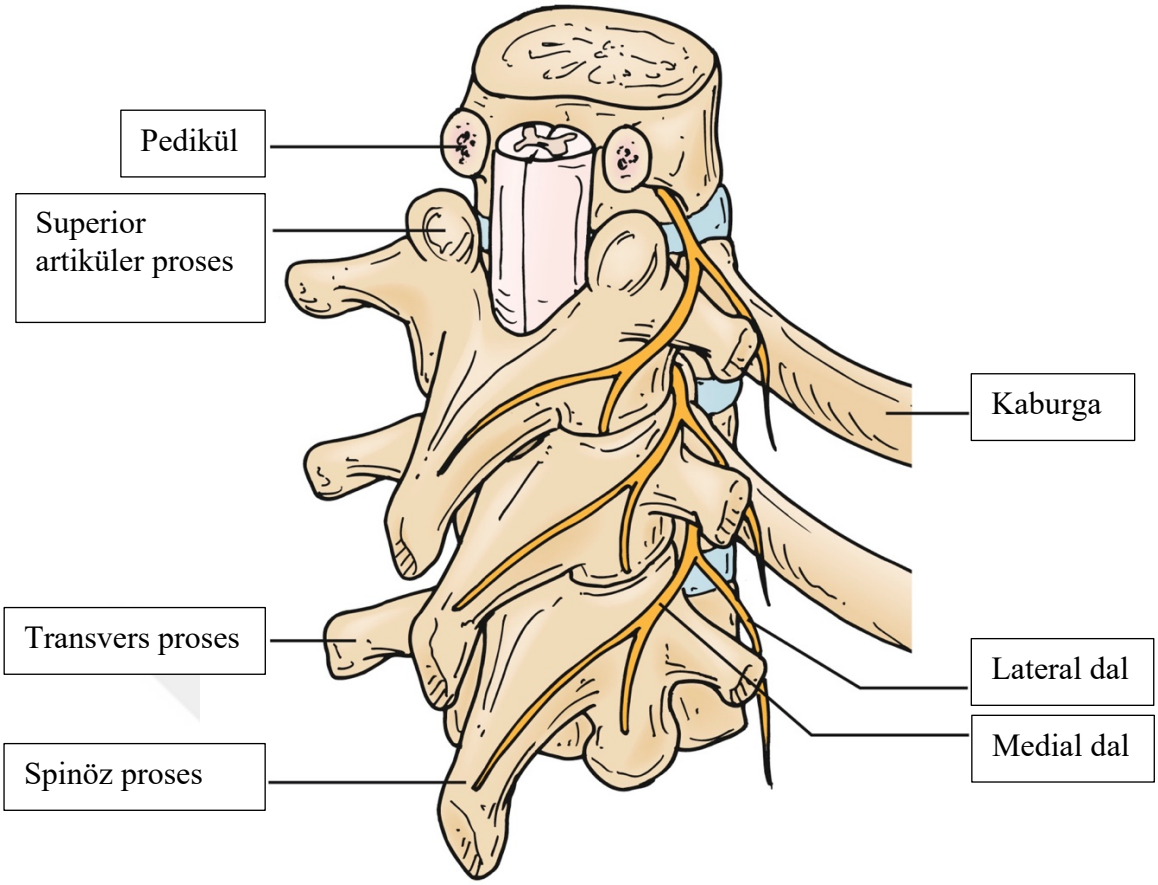
Her faset eklem iki medial dal tarafından innerve edilir; kendi seviyesi ve bir üst seviyeden kaynaklanan sinir tarafından. Yani her medial dal kendi seviyesine ve bir alt seviyeye uzanarak innervasyon sağlar (Şekil 7).

Medial dal lomber omurgada sıklıkla varyasyon göstermeden aynı konumda yer alır. Posterior primer ramustan ayrılır, altta kalan transvers proses ile superior artikuler prosesin birleştiği yerde kıvrılır. Transvers prosesin intertransvers ligamanının dorsal yaprağını çaprazlar ve mamilloaksiller ligamanın altında ilerler. Laminayı geçerken dallara ayrılır. Bazen mamilloaksiller ligamanın kendisi kalsifiye olup sinirin sıkışmasına neden olabilir.[14]



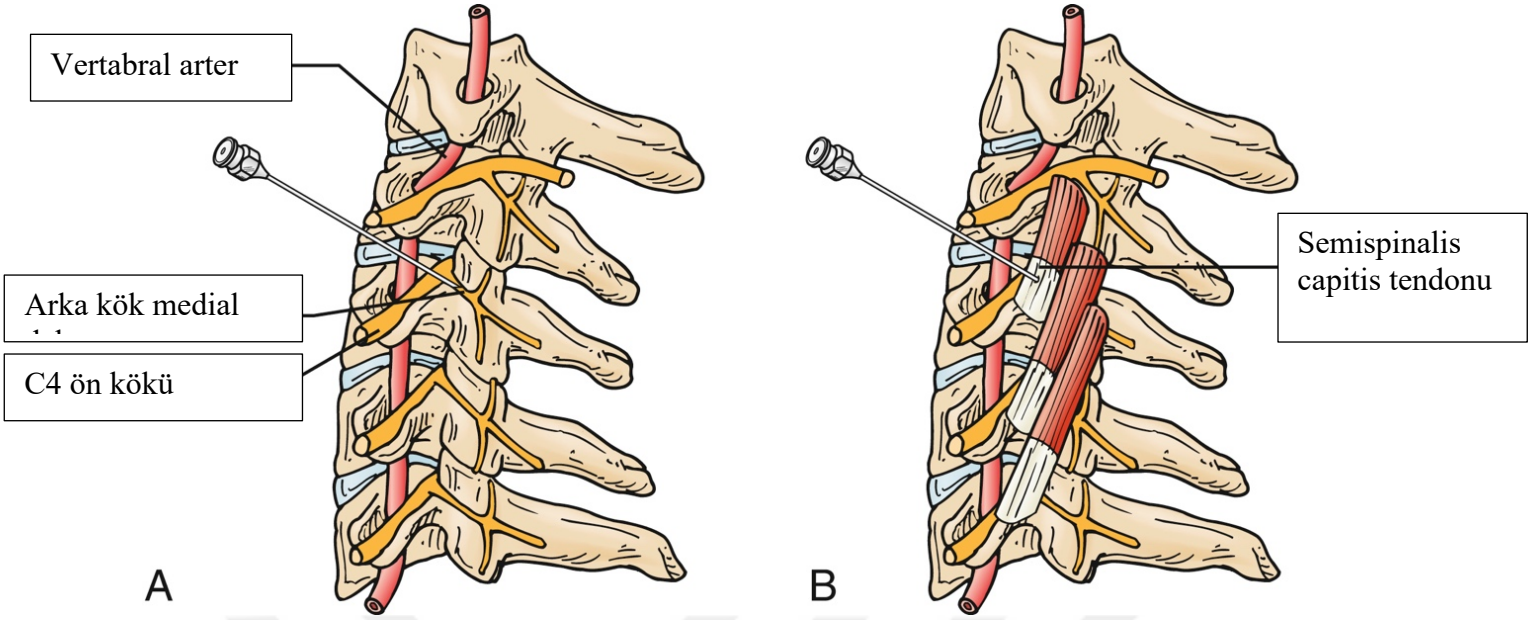
Şekil 7: Lomber faset eklemlerin innervasyonu ve her medial dalın kendi seviyesi ve bir alt seviyeyi innerve etmesi

Torakal omurga faset eklemleri lomber omurgada olduğu gibi iki taraflı olarak medial dallar tarafından innerve edilir. Bazı anatomik çalışmalarda dorsal ramusun bölünmeden doğrudan faset ekleme dal gönderebildiği de gösterilmiştir. Medial dalların uzanımı seviyeye göre farklılık gösterir. Alt torakal omurgada lomber bölgeye benzer şekilde seyreder ve optimal blokaj bölgesi aynıdır. Daha yüksek seviyelerde sinirin uzanımı değişim gösterir, bazı çalışmalarda T4-T8 arasında sinirin kemiğe temas etmeden doğrudan intertransvers aralıkta seyrettiği gösterilmiştir. Bu da medial dal bloklarını zorlaştırır. Orta ve üst torakal faset eklemler için medial dal bloğunun optimal lokalizasyonu transvers prosesin supralateral köşesidir.[28](Şekil 8)



Şekil 8: Torakal faset eklemlerin innervasyonu

Servikal fasetlerin innervasyonu daha çeşitli ve karmaşıktır. Toplam sekiz adet servikal sinir kökü vardır. C3-C4 ve C7-T1 seviyelerinde torakal ve lomber bölgere benzer şekilde, aynı seviye ve bir üst seviyenin iki yanlı dorsal kök medial dalları tarafından innervasyon gerçekleştirilir. C7 ve C8 hariç faset eklem etrafında kıvrılırlar.[29] Daha üst seviyelerin medial dalları fasya ve semispinalis tendonuyla periosta sıkıca bağlıdır böylece sinirin konumu daha öngörülebilirdir. C2-C3 ekleminin innervasyonunun çoğu C3 dorsal ramus tarafındandır. C3 dorsal ramus büyüğü üçüncü oksipital sinir olarak adlandırılan iki dala ayrılır. C2 dorsal ramus, en büyüğü büyük oksipital sinir olarak adlandırılan beş kadar dala ayrılır. C2 ve C3 dorsal dallarındaki patolojiler oksipital baş ağrılarının yaygın birer kaynağıdır.[30] (Şekil 9)



Şekil 9: Servikal faset eklemlerin innervasyonu

Faset eklemler tüm seviyelerde zengin bir şekilde kapsüllü, kapsülsüz ve serbest sinir uçları içerirler.[31] Kadavra çalışmalarında faset eklemlerde substance-P ve kalsitonin gen ilişkili peptid duyarlı sinir uçları gösterilmiştir.[32] Prostoglandinler, interlökin 6 ve tümör nekrozis faktör-α spinal cerrahi geçiren hastaların faset eklem kıkırdaklarında gösterilmiştir.[32] Çalışmalarda bu mediyatörlerin ventral eklem kapsülü yoluyla sızıntısının lomber dar kanaldaki radiküler semptomlardan kısmen sorumlu olabileceği gösterilmiştir.[33]

Ayrıca subkondral kemik ve faset eklemlerin intraartiküler inklüzyonlarında da sinir uçları gösterilmesi eklem kapsülü dışındaki yapıların da potansiyel ağrı kaynağı olabileceği anlamına gelmektedir.[34]

2.6. Faset Eklem Sendromunda Patofizyoloji

Faset eklem artropatisi ve faset eklem kaynaklı ağrı, kamçı tipi yaralanma ve majör spinal travmalar haricinde sıklıkla travmaya bağlı değildir.[35] Sıklıkla uzun süren dejenerasyon, tekrarlayan zorlanma ve minör travmalar neden olarak kabul edilir. Genellikle uzun süreli inflamasyon neticesinde yaşlı hastalarda görülür. Ağrı ile inflamasyon ve dejenerasyon derecesi arasında zayıf bir ilişki vardır.[36]

Kadavra çalışmaları lomber omurgadaki en büyük hareket ve zorlanma derecesini L4-L5 ve L5-S1 faset eklemlerinde olduğunu göstermiştir. İleri derecede fleksiyon ile bu eklemlerde gerilim maksimuma çıkar. L3-L4'te kontralateral germe ile en yüksek gerilim kuvveti oluşurken L1-2 ve L2-3'te tam tersi görülür. Seviyelerden birinde füzyon gelişirse komşu seviyede dejenerasyon hızlanır.

2.7. Faset Eklem Sendromunda Öykü ve Fizik Muayene

Birçok çalışma, öykü ve fizik muayeneye göre tanısal faset eklem bloklarına yanıtı tahmin etmeye çalışmıştır. Klinik semptomlar ve ağrının yayılım modalitesi fikir verse de özgüllük çok zayıftır.[22]

Lomber bölgede, üst faset eklemleri ağrıyı yan, kalça ve üst lateral uyluğa gönderme eğilimindedir. Daha düşük seviyeler için, genellikle posterolateral uylukta ve bazen de baldırda ağrı hissedilir.[21] (Şekil 1)

Servikal omurgada üst faset artropatisi genellikle arka üst boyun ve oksipital bölgede hissedilen ağrı olarak kendini gösterir. Orta servikal faset eklemleri içeren patoloji, alt boyun ve supraklaviküler bölgeye yayılma eğilimi gösterirken, alt servikal fasetojenik ağrı tipik olarak boyun tabanında ve skapular bölgede ağrıya neden olur.[21] (Şekil 2)

2.8. Faset Eklem Sendromunda Radyoloji

Kronik bel, boyun ve sırt ağrılı hastalara rutin pratikte çoğunlukla pek çok radyolojik tetkik uygulanır. Ancak faset eklem kaynaklı ağrılarda radyolojinin yeri ve klinikle korelasyonu sınırlıdır. Yapılan lomber bilgisayarlı tomografi (BT) tetkiklerinde faset eklem artopatisi saptanma oranı çalışmalarda %40 ile %85 arasında bildirilmiştir.[37] Servikal ve torakal görüntüleme yapılan olgularda da benzer sonuçlar saptanmıştır.[38]

Görüntüleme modaliteleri arasında faset eklem artropatisini saptamak ve evrelemek için direkt grafi, BT ve MR tetkikleri kullanılmıştır. Yumuşak doku ve kemik arası kontrast farkının daha yoğun olması nedeniyle BT'nin MR'a göre faset eklem dejenerasyonunu daha iyi gösterdiği kabul görmektedir.[18,39] Faset eklem dejenerasyonunda BT tetkikinde görülen değişiklikler; osteofit formasyonu, artiküler proses hipertrofisi, artiküler kartilaj incelmesi, vakum fenomeni, sinoviyal ve subkondral kistler, eklem kapsülü kalsifikasyonu olarak gösterilmiştir.[18]

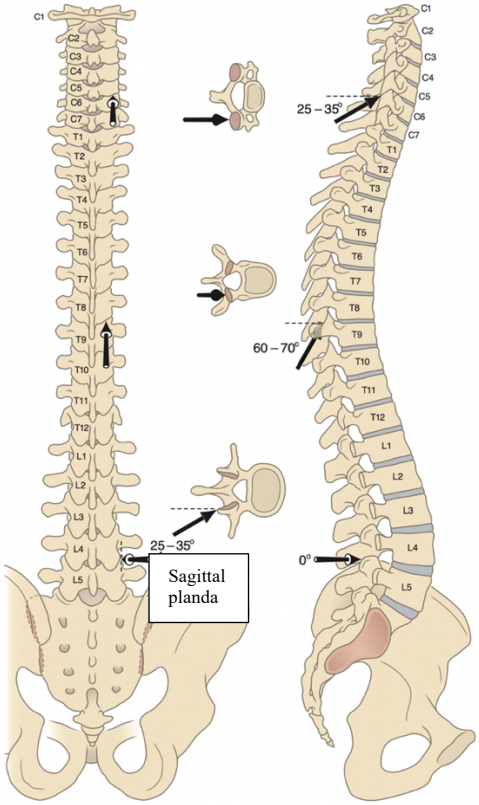
MR tetkiki faset eklemlerdeki eklem içi efüzyon ve jukstafaset kistlerini görüntülemede BT'ye göre daha üstün bulunmuştur. Bununla birlikte MR tetkiki eklemlerin kemik korteksini ve sklerozu göstermede BT'ye göre daha zayıf kalmaktadır. Ek olarak kıkırdak kalınlığını ölçmede MR'ın artefakt ve parsiyel hacim etkisi nedeniyle geride kaldığı belirtilmektedir.[40]

Faset eklem enjeksiyonları için C kollu skopi kılavuzluğu standart yöntem olarak kabul edilmekle birlikte ultrasonografi (USG) eşliğinde yapılması da kabul edilmekte ve giderek yaygınlaşmaktadır. Radyofrekans ablasyonda USG kullanımı daha sınırlıdır. Körlemesine enjeksiyonlarla yapılan randomize kontrollü çalışmalarda USG'nin etkinliğinin anlamlı olarak yüksek olduğu gösterilmiştir.[41]

2.9. Faset Eklem Enjeksiyonları

Faset eklem enjeksiyonu olarak tanımlanan iki temel teknik vardır. Bunlar faset eklem intraartiküler enjeksiyonu ve dorsal kök medial dal bloğudur. İki tekniğin de servikal, torakal ve lomber bölgede ayrı ayrı uygulaması vardır (Şekil 10). Ayrıca enjeksiyonların haricinde tedavi amacıyla bu bölgelere radyofrekans ablasyon (RFA) uygulanmaktadır.

Faset eklem kaynaklı bel ağrısı tanısında eklem içi faset enjeksiyonlarının yerini büyük ölçüde medial dal blokları almıştır. İntraartiküler lokal anestezik ve steroid yapılan faset eklem enjeksiyonları genellikle süre bakımından sınırlı bir rahatlamaya yol açarken, radyofrekans ablasyon genellikle daha uzun süreli ağrı rahatlaması ile sonuçlanır.[42]

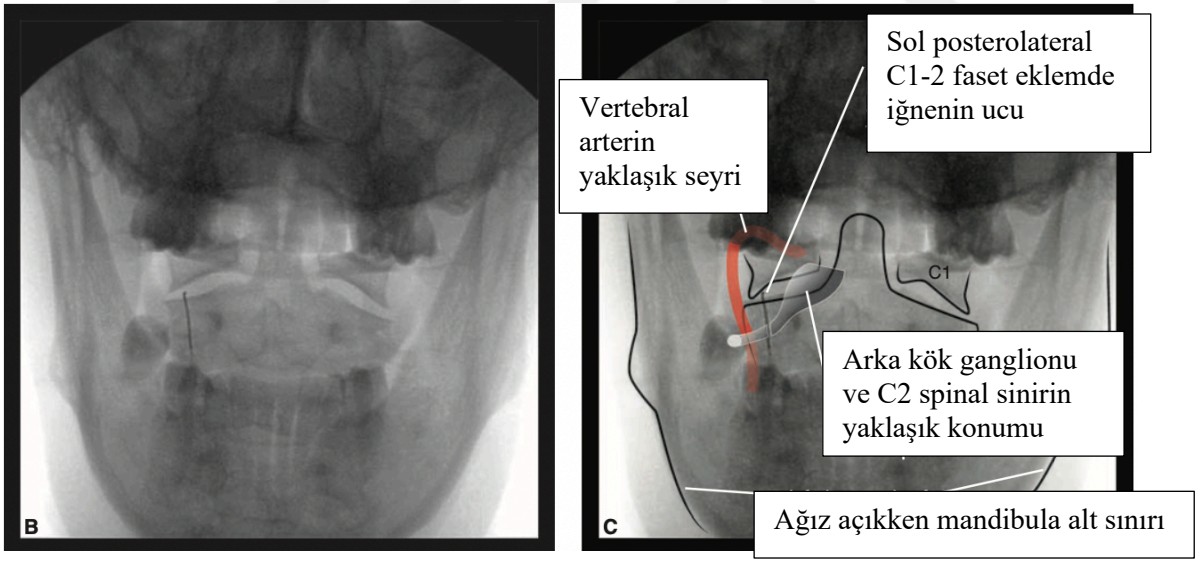


Şekil 10: Servikal, torakal ve lomber faset eklem enjeksiyonları hedef açıları.

2.9.1 Atlantoaksiyel C1-C2 Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği

Atlantoaksiyel eklemde sıklıkla osteoartrit gelişebilir. Vertebral arter, atlantoaksiyel eklemin lateral yüzüne yakın yer alır ve C2 dorsal kök ganglionu ve spinal sinir, eklemin medial ve orta kısımları üzerinde uzanır.[43]

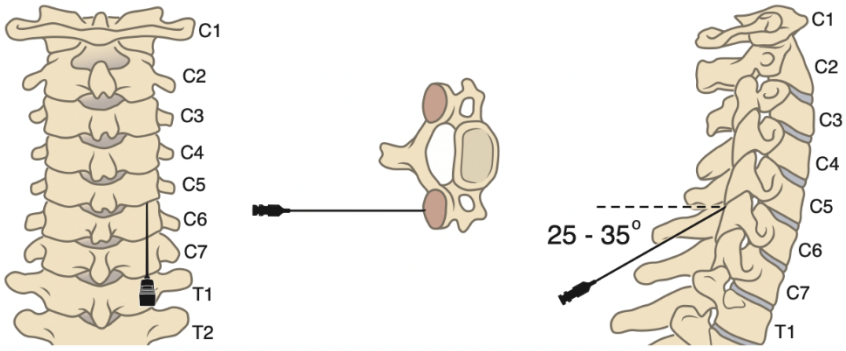
Hasta, anterior-posterior (AP) görüntüde C1–C2 ekleminin lateral yönünün görüntülenmesine izin vermek için baş nötr, ağız açık olacak şekilde yüzüstü pozisyonlanır. Cilt steril bir şekilde hazırlanır ve örtülür. Cilt ve ciltaltı dokular %1 lidokain ile uyuşturulur. İğne, AP görünümünde eklemin medial üçte ikisi ve lateral üçte birinin bileşkesine, vertebral arterin yaralanmasını ve medialde C2 spinal sinir ile teması önlemek için yönlendirilir. Eklem yüzeyi ile temas sağlandığında skopinin c-kolu laterale döndürülmeli ve iğne posterior eklem kapsülüne ulaşacak şekilde ilerletilmelidir. Lokal anestezik ve/veya steroid enjeksiyonundan önce vasküler enjeksiyonu dışlamak için devamlı floroskopi veya DSA altında radyografik kontrast enjekte edilmelidir.[42,43] Atlantoaksiyel enjeksiyon sırasında intraarteriyel partikül steroid enjeksiyonunu takiben masif inme de bildirilmiştir. Bu nedenle partiküler olmayan steroid kullanımına özellikle dikkat edilmelidir.[44]



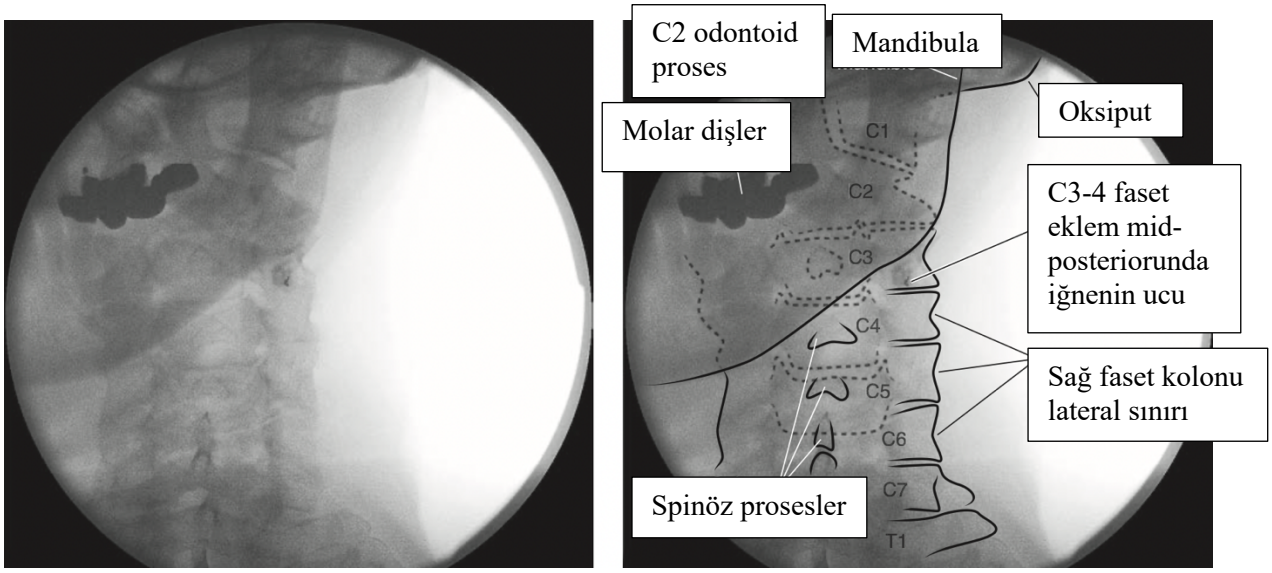
Şekil 11: Atlantoaksiyel eklem enjeksiyonu skopi görüntüsü.

2.9.1. Servikal İntraartiküler Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği

Hasta yüzüstü pozisyonda yatırılır. Skopinin C kolu faset eklemlerle aynı hizaya gelmesi için 25-30 derece kaudale çevrilir. Cilt steril olarak hazırlanır ve örtülür. C2-T1 arasındaki uygun seviye işaretlenir. Cilt ve ciltaltı %1 lidokain ile uyuşturulur. 22 veya 25 Gauge (G) boyutunda 3,5 inçlik spinal iğne, eklem boşluğunun yüzeyi ile temas sağlanana kadar tekrar tekrar görüntülenerek yavaşça ilerletilir. Son aşamada iğne arka eklem kapsülüne lateral görüntü altında hafifçe ilerletilir. Kontrast kullanımı gerekli değildir. Bu seviyelerde faset eklemin sadece 0,5 mL hacimde olduğu için kontrast vermek yerine direkt olarak lokal anestezik ve steroid kullanımı tavsiye edilir.[43] (Şekil 12 ve 13)



Şekil 12: Servikal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu



Şekil 13: Servikal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu skopi görüntüsü

2.9.2. Servikal Faset Eklem Medial Dal Bloğu ve Radyofrekans Ablasyon Tedavisi Tekniği

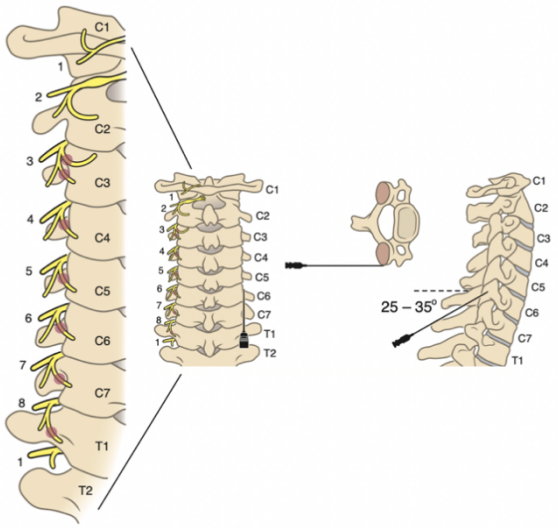
Servikal medial dallar Superior Artiküler Proses (SAP) ve İnferior Artiküler Proses (İAP) arasındaki orta çizgi boyunca uzanır. Medial dal bloğu, posterior veya lateral yaklaşımdan yapılabilir. Ancak lateral yaklaşım omurilik yaralanması açısından daha risklidir ve dikkatli bir şekilde yapılmalıdır.[42]

RFA için de kanül lateral veya posterior yaklaşım kullanılarak yerleştirilebilir. Cheng ve arkadaşları lateral yaklaşımda posterior yaklaşıma göre daha iyi sonuçlar elde ettiklerini bildirmiştir.[45]

Posterior yaklaşımda hasta prone pozisyonda uzanır. Faset eklemlerin ve eklem sütunlarının (lateral mass) aynı hizada görecek şekilde C-kol kaudal olarak döndürülür.

Lateral yaklaşım için hasta, nötr bir hizalamayı korumak için boynunun altına bir yastık ile lateral dekübit pozisyonunda yatırılır. C-kolu AP pozisyonlanıp sol ve sağ eklem sütunlarının doğrudan birbiri üzerine hizalanacak şekilde açılandırılır. Cilt steril bir şekilde hazırlanır ve örtülür. Uygun seviye T1 veya C2'den sayılarak bulunur. Doğru seviye belirlendikten sonra, %1 lidokain ile lokal anestezi uygulanır. 22-25 G 3,5 inç spinal iğne eklem sütununun ve üst ve alt eklem yüzeylerinin ortasında olacak şekilde iki planda yavaşça ilerletilir.[43]

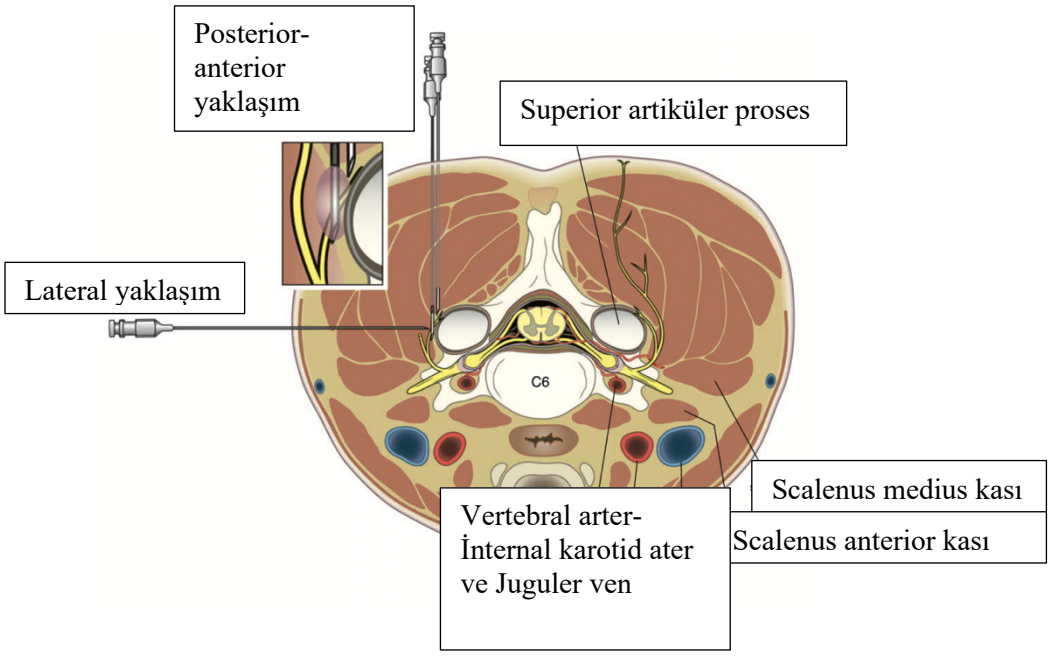
Posterior yaklaşımda iğne eklem aralığında faset eklem sütununun lateral kenarına, lateral yaklaşımda oluşan trapezoid şeklin ortasına oturtulur. AP ve lateral doğrulama alınır. Kontrast kullanımına gerek yoktur. Her bir faset ekleme 0,5 mL hacimde lokal anestezik ve steroid karışımı uygulanır.[43]



Şekil 14: Servikal faset eklem medial dal bloğu skopi görüntüsü

RFA, medial dal bloklarıyla aynı yöntem kullanılarak radyofrekans kanülleriyle gerçekleştirilir. RFA için 5 mm aktif uçlu iğneler kullanılır. Lateral veya posterior yaklaşımdan yerleştirilebilir. İğne ucu medial dal boyunca yerleştirilmelidir.

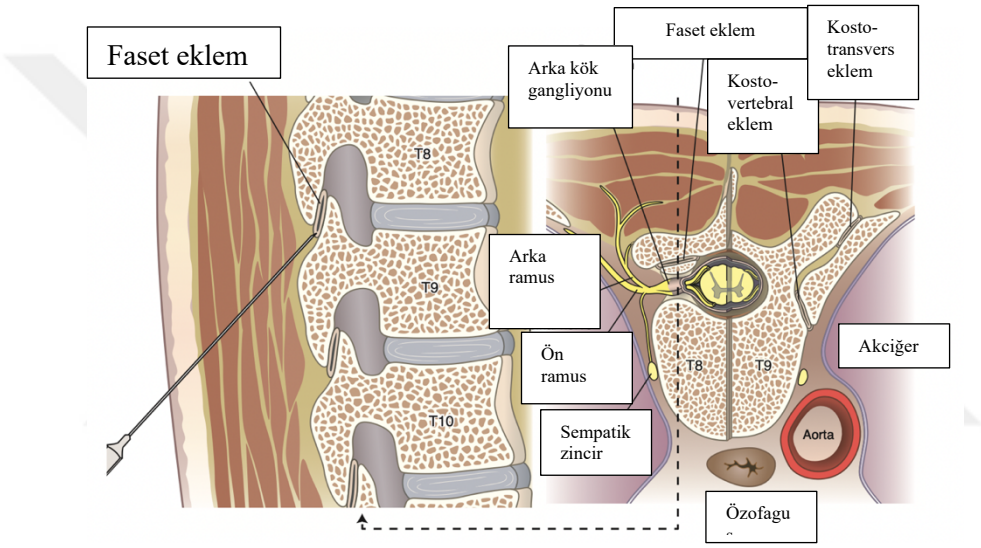
Lateral görüntüleme, iğne ucunun SAP'in tabanında konumlandığından ve foramen içine ilerlemediğinden emin olmak için yararlıdır. Duyusal ve motor stimülasyon testleri yapılır. Hastadan bir değişiklik (ağrı, karıncalanma, 0,5V'de 50 Hz'de stimülasyon sırasında basınç ve 1,5V'de 2 Hz'de motor stimülasyon) olursa bildirmesi istenir. Kanül tam olarak bu konumda kalmalıdır, her seviyeye %1 lidokain ile anestezi uygulanır ve 80°C'de 60 ila 90 saniye boyunca lezyon oluşturulur.[43]



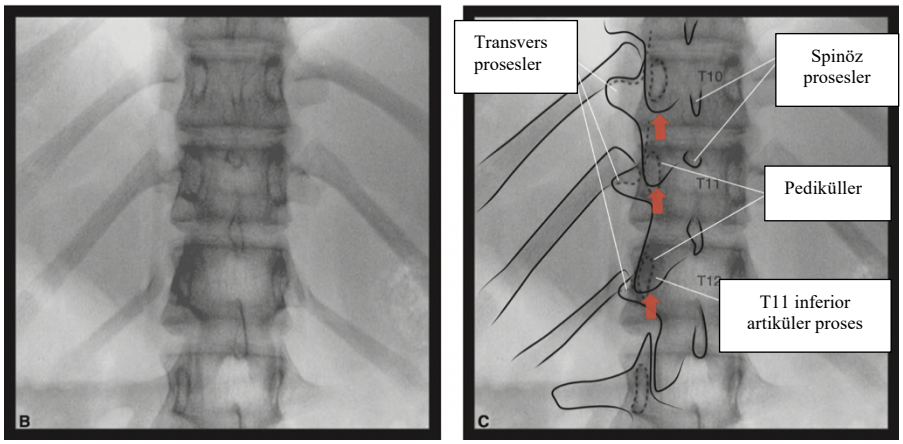
Şekil 15: Servikal faset eklem medial dal bloğu ve radyofrekans ablasyonu teknikleri

2.9.3. Torakal İntraartiküler Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği

Torakal enjeksiyonlar çok daha az uygulanır. Torakal faset eklemler dik açılıdır ve eklem boşluğunu görselleştirmek daha zordur. Hasta prone pozisyonlanır. C kolu kaudal olarak 50-60 derece açılandırılır. Cilt steril bir şekilde hazırlanır ve örtülür. T12'den sayılarak seviye belirlenir. Doğru seviye belirlendikten sonra, %1 lidokain ile lokal anestezi uygulanır ve 22-25 G 3.5 inçlik bir iğne eklem aralığının alt kısmına yavaş ve eş eksenli olarak ilerletilir. Torakal faset ekleminin dik açısı nedeniyle iğne eklemin sadece alt ve en arka yönüne ilerletilebilir. Lateral görüntüleme toraks içi yapılar nedeniyle sınırlıdır. Torakal faset eklem tipik olarak 1 mL'den fazla hacimde değildir. Kontrast kullanımı önerilmez. İğne pozisyonu kontrol edildikten sonra lokal anestezik ve steroid enjekte edilir.[43]



Şekil 16: Torakal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu



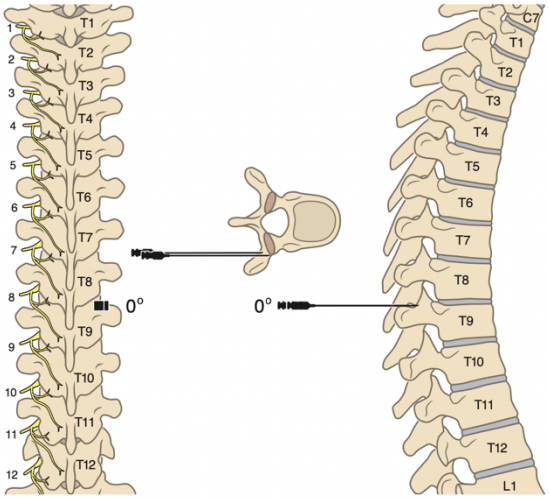
Şekil 17: Torakal intraartiküler faset eklem enjeksiyonu skopi görüntüsü

2.9.4. Torakal Faset Eklem Medial Dal Bloğu ve Radyofrekans Ablasyon Tedavisi Tekniği

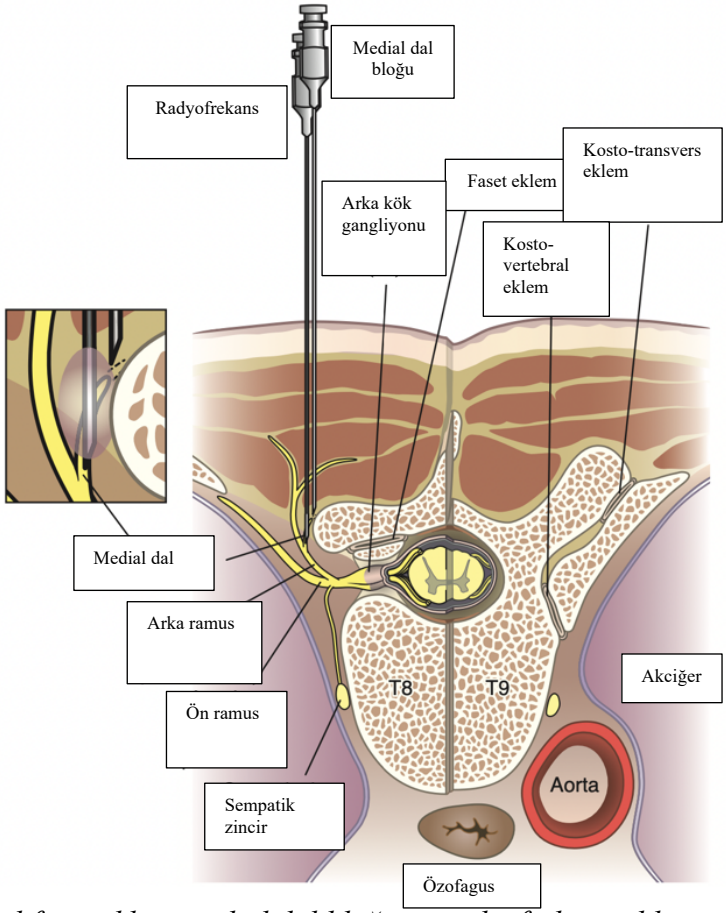
Torasik faset eklem innervasyonu T4'ten T8'e kadar tartışmalıdır.[28] Başarı oranı servikal ve lombere kıyasla özellikle RFA için torakalde daha düşüktür.[43] Yakın zamanda yapılan bir çalışmada T4-T8 arası faset eklem innervasyonunun farklılık gösterdiği, çoğunlukla medial dal yerine doğrudan dorsal ramustan innerve olduğu ve sinirin kemik yapılara uzak seyrettiği bildirilmiştir.[46] Medial dal transvers prosesin üst ve lateralinden, transvers prosesin arka yüzeyleri boyunca mediale ve inferiora yönelimli olarak geçer. T5'ten T8'e ise medial dal transvers prosesin superolateral köşesinin üstünden geçer.

Geleneksel teknik şöyledir: Hasta yüzüstü yatırılır. Cilt steril bir şekilde hazırlanır ve örtülür. C kollu skopi yerleştirilip T1'den geriye doğru sayılarak veya T12'den yukarıya doğru sayılarak doğru seviye belirlenir. 22-25 G 3,5 inç spinal iğne kemik ile temas sağlanana kadar transvers prosesin superolateral kenarına doğru iki planda yavaşça ilerletilir. Kontrolün ardından yaklaşık 0,5-1 mL lokal anestezik ve steroid uygulanır.[43]

RFA yine medial dal bloklarına benzer bir şekilde radyofrekans kanülleri kullanılarak gerçekleştirilir. 5-10 mm aktif uçlu bir iğne kullanılır ve posterior yaklaşımdan yerleştirilir. İğne ucu sinirin medial dalının seyri boyunca yerleştirilmelidir; lateral görüntüleme, iğne ucunun SAP'in tabanında konumlandığından ve foramen içine ilerlemediğinden emin olmak için yararlıdır. Duyusal ve motor yanıt için testler yapılır. Hastaya uyaran verilince oluşan bir değişiklik (ağrı, karıncalanma, 0,5 V'ta 50 Hz'de stimülasyon sırasında basınç ve 1,5 V'de 2 Hz'de motor stimülasyonu) sorgulanır. Sorun yoksa her seviyeye 0,5 ml %2 lidokain ile anestezi uygulanır ve lezyonlar 80°C'de 60 ila 90 saniye boyunca oluşturulur.[43]



Şekil 18: Torakal faset eklem medial dal bloğu ve radyofrekans ablasyon tedavisi tekniği

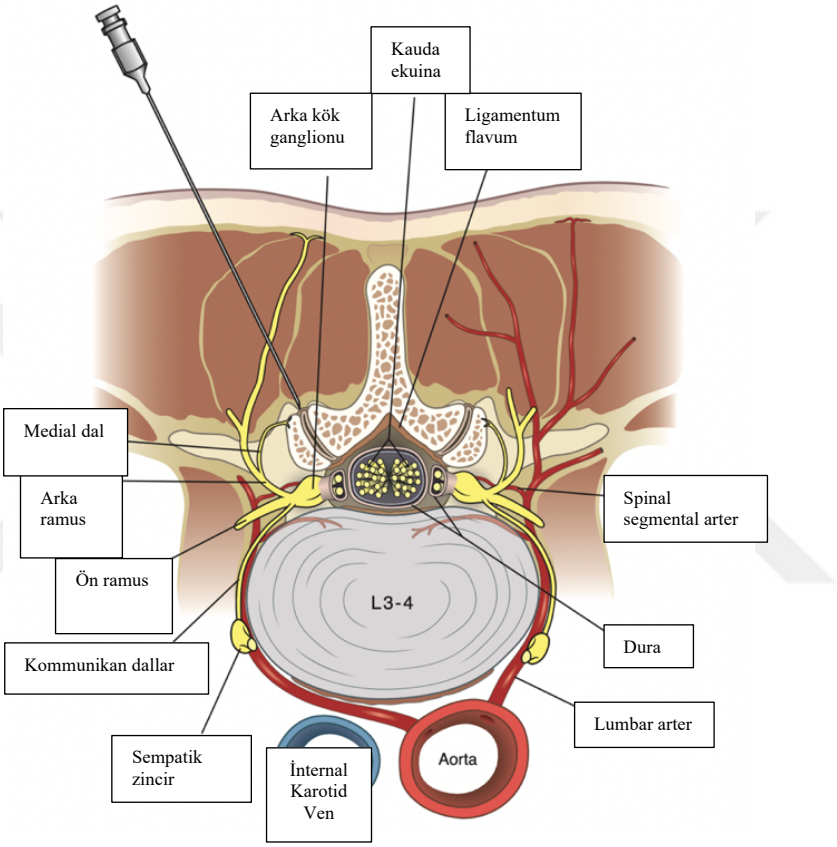


Şekil 19: Torakal faset eklem medial dal bloğu ve radyofrekans ablasyon tedavisi tekniği

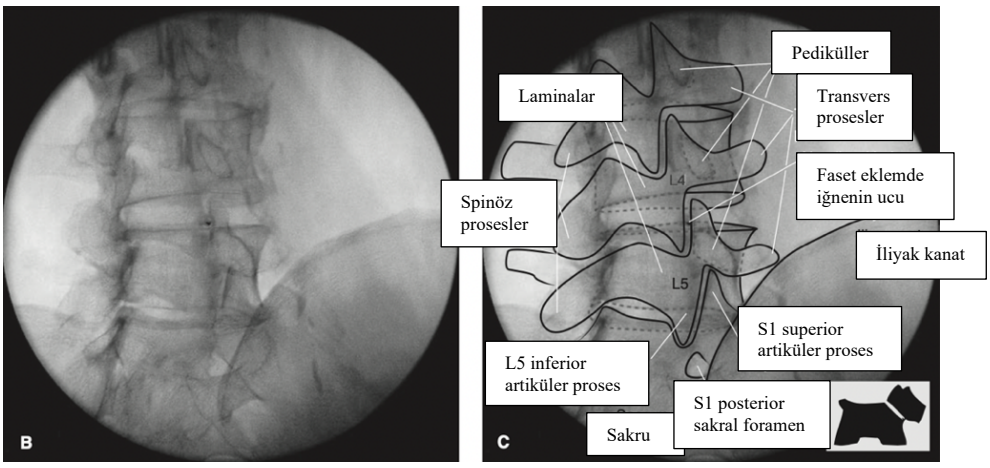
2.9.5. Lomber İntraartiküler Faset Eklem Enjeksiyonu ve Tekniği

Hasta yüzüstü pozisyonlanır. Steril bir şekilde hazırlanır ve örtülür. C kolu kaudal açı olmaksızın ipsilateral oblik 25-35 derece açılandırılıp "İskoç köpeği" görüntüsü elde edilir.

L4-5 bağlantısından sayılarak uygun seviye saptanır. Lokal anestezi uygulanarak yine 22-25 G 3,5 inçlik spinal iğne eklem yüzeyine temas edene kadar ilerletilir. Kontrast uygulaması gerekli değildir. 1,5 mL hacimde lokal anestezik, steroid karışımı uygulanır.[42]



Şekil 20: Lomber faset eklem intraartiküler enjeksiyonu

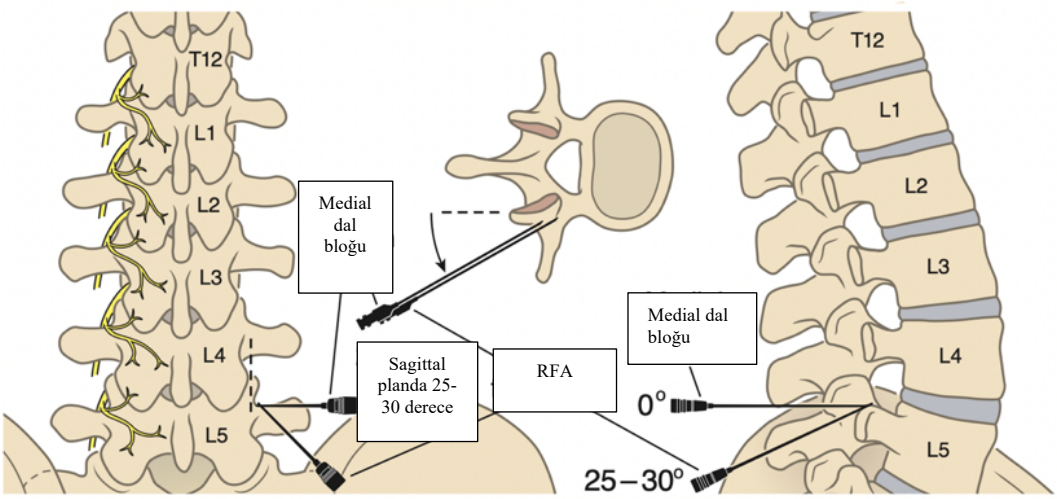


Şekil 21: Lomber faset eklem intraartiküler enjeksiyonu skopi görüntüsü

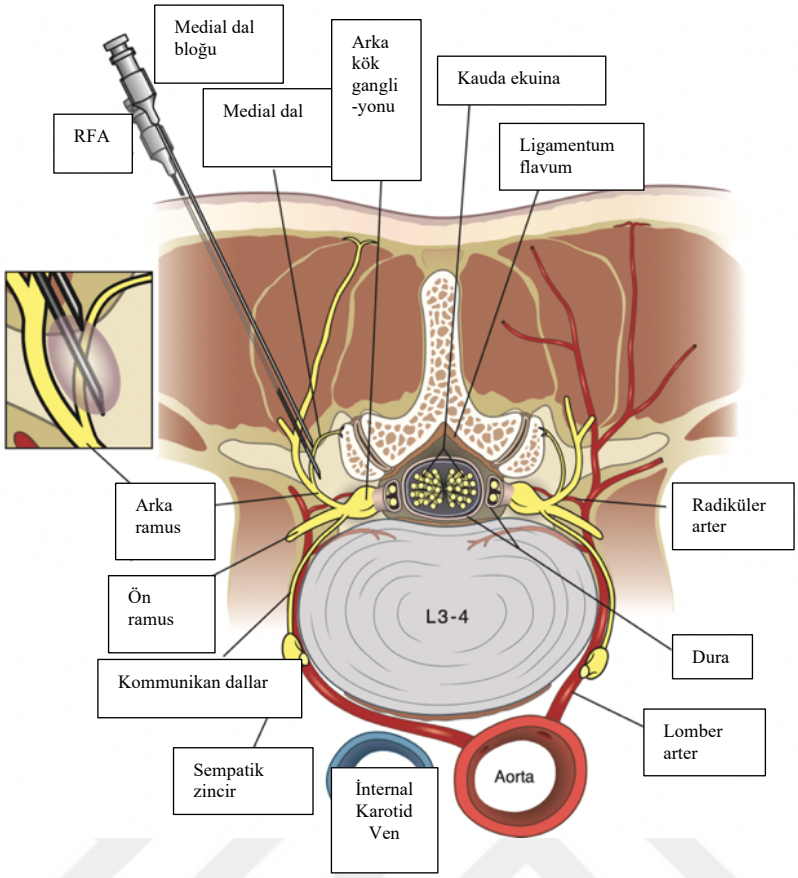
2.9.6. Lomber Faset Eklem Medial Dal Bloğu ve Radyofrekans Ablasyon Tedavisi Tekniği

Medial dal lomber bölgede transvers proses ile SAP arası olukta yer alır. Hasta yüzüstü yatırılır. Sterilizasyon ve örtme işleminin ardından C kollu skopi yine ipsilateral oblik açıyla "İskoç köpeği" görüntüsü elde edilecek şekilde konumlandırılır. Lokal anestezi uygulaması ardından 22-25 G'luk 3,5 inçlik spinal iğne transvers proses-SAP bileşimi noktası hedeflenerek kemiğe temas edene kadar yavaşça ilerletilir. Her seviyede 0,5 mL lokal anestezik uygulanması önerilir.[42]

RFA uygulaması medial dal bloğuna benzer ancak C kolu oblik açılandırılmadan, yalnızca 25-30 derece kaudale açılandırılarak RFA kanülünün medial dala paralel konumlandırılması önerilir. 10 mm aktif uçlu bir iğne kullanılır. Posterior yaklaşımla iğne ucu transvers proses-SAP birleşimine, sinirin uzanım hattı boyunca yerleştirilir. Lateral görüntülemeyle iğnenin kemiğe dayandığından ve foramende olmadığından emin olunur. Duyusal ve motor yanıt için testler yapılır. Hastaya uyaran verilince oluşan bir değişiklik (ağrı, karıncalanma, 0,5 V'ta 50 Hz'de stimülasyon sırasında basınç ve 1,5 V'de 2 Hz'de motor stimülasyonu) sorgulanır. Sorun yoksa her seviyeye %1 lidokain ile anestezi uygulanır ve lezyonlar 80°C'de 60 ila 90 saniye boyunca oluşturulur.[43]



Şekil 22: Lomber faset eklem medial dal bloğu



Şekil 23: Lomber faset eklem medial dal bloğu

2.10. Faset Eklem Enjeksiyonları Komplikasyonları

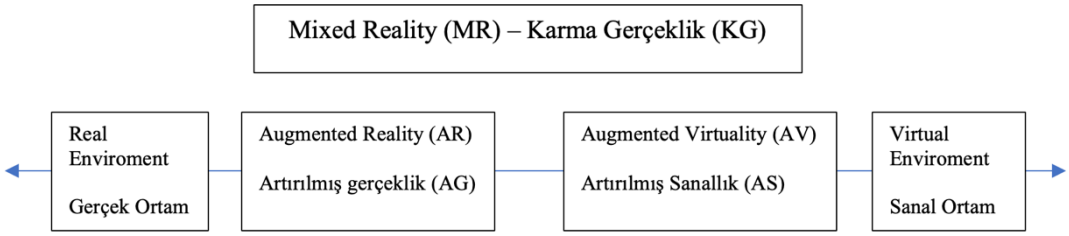
Faset eklem intraartiküler enjeksiyonlarında komplikasyonlar oldukça nadirdir. Enfeksiyon gibi genel komplikasyonlar oluşabilir. Servikal bölgede iğne eklem boşluğuna ilerletilirken ağrı oluşabilir. Literatürde ciddi komplikasyonlar olarak; spinal kord hasarı[47], fazla hacimde lokal anestezi uygulanması ve spinal kanala kaçması sonucu yüksek spinal anestezi, C3-C6 seviyesinde fazla hacimde lokal anestezik uygulanması sonrası frenik sinir felci bildirilmiştir.[48]

Tanısal medial dal bloklarının sıklıkla komplikasyonu bildirilmemiştir. Enjeksiyon bölgesinde ağrı ve enfeksiyon gelişebilir.[42]

RFA sonucu spinal sinirin ve/veya omuriliğin kalıcı hasarı gelişebilir. Lezyondan önce yapılan testlerle bu komplikasyon ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Bazı hastalarda RFA'dan birkaç gün ile bir hafta kadar sonrası bir ağrı geliştiği bildirilmiştir. Bazı hastalarda bu durum dizestezi veya allodini şeklinde gelişebilir. Ancak sıklıkla bu durum haftalar içinde düzelmektedir.[43]

2.11. Artırılmış Gerçeklik

Artırılmış gerçeklik (AG); bilgisayar ortamında oluşturulan iki ya da üç boyutlu sanal nesnelerin gerçek zamanlı olarak, direkt ya da indirekt yolla gerçek dünyayla etkileşime girecek şekilde görüntülenmesidir.[49] Artırılmış gerçeklik ile gerçek ve sanal nesneleri birleştirmek ve etkileşime sokmak mümkündür. Daha geniş bir kavramla "Karma Gerçeklik" Milgram tarafından "sanal süreklilik" diyagramında (Şekil 24) tanımlanmıştır.[50]



Şekil 24: Milgram'ın sanal süreklilik diyagramı

Buna göre sanal dünya ve gerçek dünyanın tamamına karma gerçeklik (mixed reality) ya da uzatılmış gerçeklik (extended reality) olarak tanımlanır. Bu spektrumda daha çok sanal dünyaya yakın olan kısım sanal gerçeklik (virtual reality), daha çok gerçek dünyaya yakın olan kısmı artırılmış gerçeklik (augmented reality) olarak adlandırılır.

Sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik benzer teknolojilerden gelişmiş ve iç içe geçen kavramlar olmakla birlikte temel olarak sanal gerçeklikte dış ortamdan kopma ve tamamen sanal bir ortamda var olmak şeklinde özetlenebilecek bir gerçeklik yaratılırken; artırılmış gerçeklikte gerçek dünyadan kopmadan, gerçek dünyanın üzerine bilgisayarda üretilmiş sanal objeler/hologramlar eklenmektedir.[51]

Artırılmış gerçekliğin ilk ortaya çıkışı; görüntü yönetmeni Morton Heilig'in sinemayı, tüm duyuları etkileyerek izleyiciyi ekranın içine çekme becerisine sahip olacak bir sanat olarak düşündüğü 1950'lere dayanmaktadır. Heilig 1955'te yazdığı *Geleceğin Sineması* kitabında tanımladığı *Sensoroma* adlı cihazın prototipini 1962'de hayata geçirmiştir.[49]

Günümüzde artırılmış ve sanal gerçeklik deyince akla gelen başa takılan cihazların/gözlüklerin (head mounted display) ilk örneğini Ivan Sutherland 1968'de üretmiştir.[52] (Şekil 25)

Şekil 25: Ivan Sutherland'ın geliştirdiği ilk artırılmış gerçeklik gözlüğü

1975'te Myron Krueger, kullanıcıların ilk kez sanal nesnelerle etkileşime girmesine izin veren bir oda olan *Videoplace* cihazını yaratmıştır.[49] 1992'de Louis Rosenberg, *Virtual Fixtures* adı verilen artırılmış gerçeklik sistemini geliştirmiştir. Amerikan Hava Kuvvetlerinde kullanılan bu sistemin insan performansını artırıcı etkisini göstermişlerdir.[53] 1993'te Steven Feiner, Blair MacIntyre ve Doree Seligmann, *KARMA (Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance)* adlı artırılmış gerçeklikle onarım ve bakım talimatları veren sistemin prototipi üzerine ilk büyük makaleyi sunmuştur.[54]

1997'de Ronald Azuma; gerçek ve sanal ortamı üç boyutlu olarak birleştiren ve gerçek zamanlı olarak etkileşime girilebilen bir sistem olarak tanımlayarak geniş çapta kabul gören ilk artırılmış gerçeklik tanımını yazmıştır.[51] Azuma ve arkadaşları; artırılmış gerçekliğin başa takılan ekran (head mounted display) gibi belirli bir ekran teknolojisiyle veya görme duyusu ile sınırlı olmadığını, artırılmış gerçekliğin potansiyel olarak tüm duyulara uygulanabilir; kokuyu, dokunmayı ve duymayı da artırabilir olduğunu belirtmişlerdir.[55]

2000 yılında ilk dış mekan mobil artırılmış gerçeklik oyunu olan *ARQuake* Bruce Thomas tarafından geliştirilmiştir.[56] 2000 yılında Hirokazu Kato tarafından *ARToolkit* adlı açık kaynak kodlu ücretsiz yazılım kütüphanesi geliştirilmiştir.[57]

2005 yılında cep telefonlarına yönelik ilk artırılmış gerçeklik uygulaması *AR Tennis* geliştirilmiştir. 2007 yılında ilk akıllı telefonun (Iphone 3G) çıkması ve ilerleyen yıllarda büyük bir yaygınlık kazanmasıyla artırılmış gerçeklik farklı bir boyut kazanmış, bunu 2008 yılında ilk android işletim sistemine sahip akıllı telefon ve 2010 yılında ilk tablet (iPad) izlemiştir.[49]

2009 yılında basılı medyada bir dergide ilk kez artırılmış gerçeklik kullanılmıştır. 2013 yılında Volkswagen MARTA (Mobile Augmented Reality Technical Assistance) isimli artırılmış gerçeklik uygulamasını teknisyenlerine adım adım tamir komutları verecek şekilde geliştirmiştir.

2013 yılında Google Glass sınırlı sayıda üretilen modern anlamdaki ilk artırılmış gerçeklik gözlüğü olmuştur. 2016 yılında Microsoft HoloLens 1'i üretmiştir. HoloLens 1, Google Glass'a göre daha iyi bir artırılmış gerçeklik deneyimi sunmakla birlikte daha büyük ve daha ağır olmuştur. Başta ticari olarak satılmamıştır. Yine 2016'da akıllı telefonlar için üretilen *Pokémon Go* adlı oyun tüm dünyada milyonlarca insan tarafından oynanmış ve pek çok kişinin artırılmış gerçeklikle tanışmasına neden olmuştur.

2018 yılında Microsoft HoloLens 2 adlı yeni sürümü geliştirmiştir ve halen piyasadaki en gelişmiş artırılmış gerçeklik sistemine sahip gözlük olarak kabul edilmektedir.[58,59] (Şekil 26)

Şekil 26: HoloLens 2 (Microsoft Corp. Wermont, WA)

Artırılmış gerçeklik teknolojisi günümüzde tıp, eğitim, üretim, savunma sanayi, eğlence sektörü gibi pek çok alanda giderek yaygınlaşarak kulanılmaktadır.

2021 yılında Facebook şirketinin ismini Meta yapması ve birçok teknoloji devi firmanın bu konuya yatırım yaptığını açıklamasıyla giderek popülerleşen *Metaverse* kavramı, sanal gerçeklik/artırılmış gerçeklik teknolojilerini ve bu teknolojiler ışığında kurulacak sanal evrenleri tanımlayan bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Gartner adlı ABD merkezli araştırma şirketi 2022 raporunda; 2026'da dünya nüfusunun dörtte birinin günde en az bir saatini Metaverse'te geçireceğini belirtmektedir. Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojilerinin telefon, tablet ve gözlük gibi araçlarla hayatımızın pek çok alanının vazgeçilmez bir parçası haline geleceği öngörülmektedir.[60]

2.12. Tıpta Artırılmış Gerçeklik Kullanımı

Tıpta artırılmış gerçeklik/sanal gerçeklik teknolojisinin kullanımının ilk örnekleri öncelikle anatomi eğitiminde olmuştur.[61] Özellikle anatomi eğitiminin vazgeçilmezi konumdaki kadavraların yerine artırılmış gerçeklik/sanal gerçeklik teknolojisiyle üretilmiş içeriklerin konulması hem kadavralara ulaşmadaki zorluğu ve maliyeti ortadan kaldıracak hem de her öğrencinin eşit şartlarda doğru bilgiye ulaşımını kolaylaştıracak bir gelişme olarak görülmüştür. Ayrıca üç boyutlu sanal görsellerin istenilen her an her konumdan incelenebilmesi kadavralara göre ciddi bir avantaj sağlamaktadır. (Şekil 27)

Şekil 27: Hololens için geliştirilen bir anatomi uygulaması

Hasta muayenesinin veya girişimsel bir tıbbi işlemin öğrenme sürecindeki öğrenciler ve asistanlara gerçek hastalardan önce sanal hastalar üzerinde yapılması bir diğer kullanım alanı olmuştur.

Tıp eğitimi haricinde sağlık uygulamalarında artırılmış gerçeklik kullanımı konusunda da çalışmalar yapılmıştır. Literatürde Nöroşirürji, Ortopedi, KBB, Üroloji, Genel Cerrahi, Çocuk Cerrahisi, Oftalmoloji, Girişimsel Kardiyoloji gibi alanlarında özellikle endoskopik ve kapalı işlemlerde artırılmış gerçeklik kullanımına dair pek çok çalışma vardır.[62] Ameliyatlardan önce preoperatif planlamada, hastaları bilgilendirmede, ameliyat esnasında peroperatif navigasyon amacıyla, hasta bilgilerinin (vital değerler, EEG, EMG gibi monitörizasyon değerleri) anlık takibinde artırılmış gerçeklik kullanılmıştır.[63]

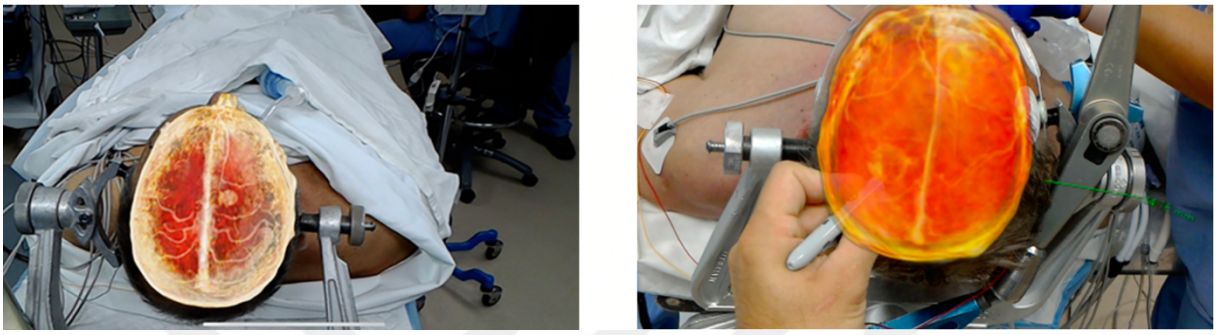
2.13. Nöroşirürjide Artırılmış Gerçeklik Kullanımı

Nöroşirürjide; kranyal ve spinal cerrahide artırılmış gerçeklik teknolojisi özel bir yer alır. Artırılmış gerçeklik teknolojisinin en temel sorunlarından birisi bilgisayarda oluşturulan görüntülerin gerçek zamanlı olarak uzayda uygun konuma tanımlanması (registiration) problemidir. Bu esnada kaymalar olabilmektedir.[58] Nöroşirürji; kafatasının kapalı bir kutu olması, ameliyatlarda çivili başlık kullanımı nedeniyle hedefin sabit olması gibi nedenlerden ötürü, tıpkı nöronavigasyon sistemlerinde olduğu gibi artırılmış gerçeklik teknolojisinin kullanımı açısından da en ideal branşlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte nöroşirürjide önemli bir yer kaplayan nöronavigasyon sistemlerinin yerini artırılmış gerçeklik tabanlı nöronavigasyon sistemlerinin alması olasıdır. Bu hem görüntüyü iki boyuttan üç boyuta çıkartacak hem de cerrahın ikinci bir ekrana dönüp bakmasına gerek bırakmadan görüntüyü ve gerekli verileri ameliyat sahasına hastanın üzerine gerçek zamanlı olarak getirecektir.[64]

Literatürde tarihsel olarak mikroskop entegre artırılmış gerçeklik uygulamaları ile başlayan çalışmalar; akıllı telefon, tablet ve son yıllarda geliştirilen artırılmış gerçeklik gözlükleriyle yapılan çalışmalar şeklinde ilerlemektedir.[62]

Rae ve arkadaşları yine 2018 yılında HoloLens 1'de bir uygulama geliştirerek kronik subdural hematom maketi üzerinde burrhole yeri belirlemede kullanmışlar ve 10 mm'den az sapma payı hedefini %98 oranında gerçekleştirdiklerini raporlamışlardır.[65]

Michael E. Ivan ve arkadaşları HoloLens 1 cihazında Novarad OpenSight uygulamasını ve nöronavigasyonu kıyaslayarak beyin tümörlerinde tümörün lokalizasyonunu, insizyonun ve kranyotominin yerini belirlemeye çalışmışlar. Elle rejistirasyon tekniği kullanmalarına rağmen sonuçları onbir hastanın beşinde mükemmel, beşinde kabul edilebilir bulunmuştur.[66] (Şekil 28)



Şekil 28: Bir artırılmış gerçeklik uygulamasının beyin tümöründe insizyonu belirlemede kullanılması örneği

Li ve arkadaşları acil şartlarda yatak başında körlemesine yapılan eksternal ventriküler drenaj (EVD) uygulamasını artırılmış gerçeklik yardımıyla yapılmasına yönelik çalışmalarında HoloLens 1'de elle rejistirasyon tekniğini kullanmışlar; 4.34 ± 1.63 mm hata payı raporlamışlardır.[67]

Schneider ve arkadaşları 2021'de EVD uygulamasını HoloLens 1 ile iki ayrı teknik kullanarak uygulamışlar ve Vuforia Engine kullanarak yaptıklarının daha iyi sonuçlandığını belirtmiş, Ortalama sapmayı 10,9 mm ± 4,3 mm olarak bildirmişlerdir.[68]

Artırılmış gerçeklik uygulamalarının spinal cerrahide yapılan en sık çalışmaları pedikül vidası yerleşimi hakkında olmuştur.[69]

Yoon ve arkadaşları 2017'de Google Glass'ı spinal navigasyon sistemlerinin görüntüsünü izlemek için on hastada kullanmış ve güvenle kullanılabileceğini bildirmişlerdir.[70]

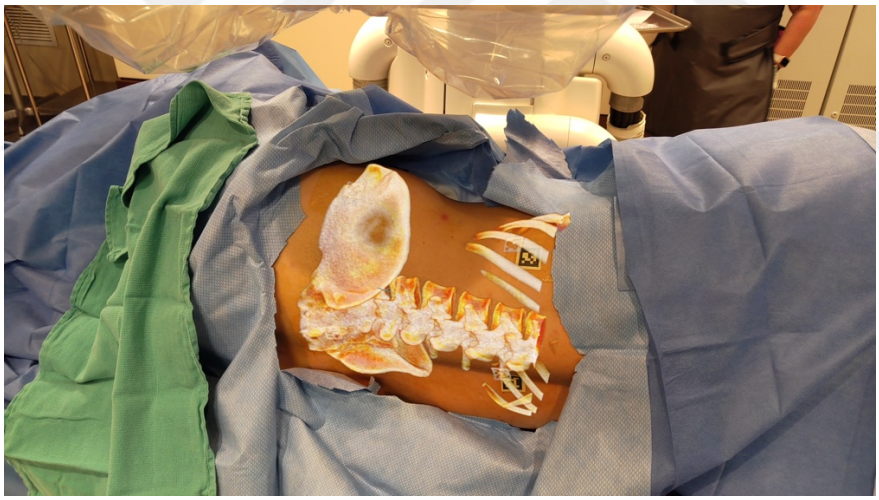
Liu ve arkadaşları 2019'da opak agar içindeki lomber vertebra modellerine HoloLens 1 ile perkütan pedikül vidası yollamayı simüle ederek kirschner teli yollamışlar. Skopi eşliğinde yollananlarla artırılmış gerçeklikle yollananlarda anlamlı fark saptamamışlardır.[71]

Müller ve arkadaşları da benzer bir çalışmada lomber kadavra gövdelerini agar jele gömüp yirmi kadavraya HoloLens 1 ile, on kadavraya da altın standart olarak spinal nöronavigasyonla kirschner teli yollamış ve pedikül vidası giriş yeri ve yönelim açısından anlamlı fark saptamamışlardır.[72]

Gibby ve arkadaşları 2018'de lomber vertebra maketini opak bir silikonla kaplayarak HoloLens 1'de OpenSight adlı uygulamayla pedikül vidasını simüle edecek şekilde kirschner teli yollayamışlar. Ve 4 ila 7 mm'lik vidalar üzerinde yapılan hesaplamada hepsinin pedikül içinde kaldığını göstermişlerdir.[73]

Novarad şirketinin OpenSight isimli ticari uygulaması 2018'de FDA onayı alarak ilk kez insan üzerinde kullanım onayı alan artırılmış gerçeklik uygulaması olmuştur. (Şekil 29)

2019'da HoloLens 1 ile OpenSight uygulamasını kullanarak kadavrada perkütan pedikül vidası yollayan Urakov ve arkadaşları, 19 vidadan 7'sinin hatalı gittiğini bildirmişler ancak artırılmış gerçeklik teknolojisinin yapılacak iyileştirmelerle gelecek vadettiğini belirtmişlerdir.[74]



Şekil 29: Bir artırılmış gerçeklik uygulamasıyla anjiyografi masasında hastanın omurgasının görüntülenmesi

Liebmann ve arkadaşları 2019'da HoloLens 1'in kendi yüzey tarama özelliğini kullanarak geliştirdikleri uygulamayla lomber vertebra maketinin yüzeyini tanıtıp pedikül vidası doğrultusunda kirschner teli yollamışlar. Giriş noktasının sapması 5 mm, gönderme açısındaki sapma 6,5 dereceye kadar bulmuşlardır.[75]

Augmedics'in Xvision artırılmış gerçeklik gözlüğü sistemi de FDA onayı almış, önce kadavrada sonra insanda lomber pedikül vidası uygulaması ve spondilektomi ameliyatları başarılı şekilde yapılmış ve yayınlanmıştır.[76-78]

2.13. Faset Eklem Enjeksiyonlarında Artırılmış Gerçeklik Kullanımı

Artırılmış gerçeklik teknolojisinin spinal girişimlerde kullanılması fikri son yıllarda ortaya çıkmıştır ve ideal bir sistem geliştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir. Literatürde bugüne kadar artırılmış gerçeklikle faset eklem enjeksiyonu yapılmasına dair üç çalışma vardır:

Agten ve arkadaşları 2018'de bir lomber vertebra maketini agar jele gömüp HoloLens 1'de elle rejistirasyon tekniği uygulayarak faset eklem enjeksiyonu yapmayı denemişler. %97,5 oranında başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.[79]

Heinrich ve arkadaşları 2019'da tüm girişimsel işlemleri simüle edecek şekilde bir makette hedef noktaya iğne yollama ve sapma hesaplama çalışması yapmışlardır. HoloLens 1'de Vuforia Engine kullanarak yaptıkları maket çalışmasının sonucunda eşleşmede yeterli başarıyı sağladıklarını, klinik çalışmalarla ilerletilmesi gerekliliğini belirtmişlerdir.[80]

Gibby ve arkadaşları 2020'de HoloLens 1'de Novarad OpenSight uygulamasını kullanarak maketlerde ve on hastada faset eklem enjeksiyonu, torakal epidural girişim ve lomber ponksiyon yapmış ve başarılı sonuçlar bildirmiştir.[81]

2.15. Faset Eklem Enjeksiyonu Tekniğinin Limitasyonları ve Artırılmış Gerçeklik Teknolojisi Çözümü

Faset eklem enjeksiyonları klinikte yaygın olarak c kollu skopi kullanılarak yapılır. Bu nedenle işlemi yapan hekim ayrı bir ekrana bakarak ve iki boyutlu bir görüntüyü esas alarak işlemi gerçekleştirir. Bu nedenle işlemi yapan hekimin tecrübesi önem kazanmaktadır. Ayrıca floroskopi işleminde hasta, hekim ve yardımcı sağlık personeli radyasyona maruz kalmaktadır. Hasta hayatında bir ya da birkaç kez bu işlemi yaşar ve maruz kaldığı radyasyon tolere edilebilir düzeydedir. Ancak her gün birçok hastaya bu işlemi uygulayan doktor ve sağlık personelinin maruz kaldığı radyasyon ciddi anlamda risk teşkil etmektedir.

Bu iki temel probleme çözüm olarak geliştirdiğimiz artırılmış gerçeklik gözlüğü yardımıyla yapılan faset eklem enjeksiyonu uygulamasıyla:

1) Hekim ve yardımcı sağlık personelinin maruz kaldığı radyasyon azalacak,
2) Hekim işlemi ayrı bir ekrana bakarak yapmak yerine görüntüyü hasta üzerine görecek, böylece bakış açısını değiştirmesi gerekmeyecek,
3) İşlem iki boyutlu tecrübe gerektiren bir görüntü yerine üç boyutlu bir görüntüde, çok daha kolay bir şekilde gerçekleştirilecektir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışmamız Aralık 2021- Şubat 2022 tarihleri arasında İstanbul Üniversitesi İstanbul Tıp Fakültesi'nde beş adet disseke edilmemiş kadavra üzerinde yapıldı.

3.1. Çalışma gruplarının tasarımı

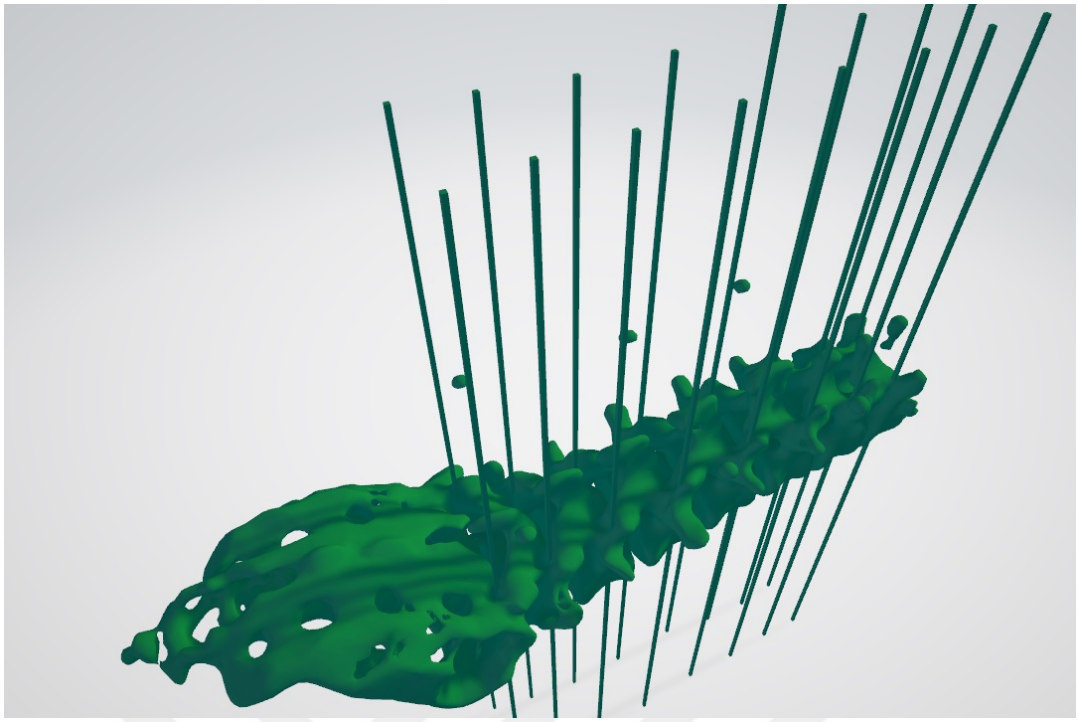
Çalışmamızda intraartiküler faset eklem enjeksiyonu tekniğini c-kollu skopiye alternatif olarak görüntü hedefi sistemi üzerine kurulu bir artırılmış gerçeklik gözlüğü ile yapmak hedeflendi. Kadavranın her beşine hem kontrol grubu olarak c-kollu skopi eşliğinde klasik yöntemle, hem de artırılmış gerçeği gözlüğü (Microsoft HoloLens 2, Microsoft Corp, Redmond, WA, USA) kullanılarak geliştirdiğimiz yazılımla işlem uygulandı. Her iki grupta da iğneler doğru konuma yerleştirilip herhangi bir medikasyon uygulanmadı. İğneler yerleştirildikten sonra kontrol bilgisayarlı tomografi (BT) çekilerek iğnelerin konumunun doğruluğu değerlendirildi ve puanlandı. İki grubun sonuçları arasında istatistiksel anlamlı bir fark olup olmadığı araştırıldı.

3.2. Artırılmış gerçeklik ile faset eklem enjeksiyonu metodu

Kadavralara artırılmış gerçeklik gözlüğü için hedef noktası olarak kullanılmak üzere skapula hizasında sırt bölgesine dört adet, lomber bölgeye dört adet olmak üzere toplam sekiz adet EKG elektrodu (3M 2228) ve sakrum üzerine özel olarak üretilmiş alüminyum plak (120x70x2 mm, alüminyum 5083 alaşım, 50g) yerleştirilerek prone pozisyonda 1 mm kalınlıkta kesitlerle tüm spinal vertebra BT tetkiki yapıldı (Siemens Healthineers, Erlangen, Germany 120kV W:400 HU C:60HU). (Şekil 30) Kullanılan alüminyum plakanın eni ve boyunun 12x7 cm olmasının nedeni artırılmış gerçeklik gözlüğü için hedef olarak kullandığımız görüntünün 12x7 cm boyutlarında olmasıydı.

Şekil 30: İşlem öncesi üzerine işaretler yerleştirilmiş kadavraya BT çekilirken

İşlem öncesi BT çekildikten sonra görüntüler Extreme PACS sisteminden DICOM dosya formatında alınarak çalışmayı yapacağımız bilgisayara aktarıldı. 3D Slicer (Slicer 4.11.20210226, 3D Slicer Community) adlı açık kaynak kodlu, ücretsiz program kullanılarak kadavranın diğer dokuları bilgisayar ortamında ayrıştırılarak, omurgasının üç boyutlu bilgisayar modeli oluşturuldu. OBJ formatında çıktı alınan üç boyutlu omurga modeli Blender (Blender Foundation, Netherlands) adlı açık kaynak kodlu, ücretsiz uygulamayla gerçek boyutunda boyutlandırılıp poligon sayıları azaltılarak artırılmış gerçeklik gözlüğüne uygun hale getirildi. Ayrıca her bir faset eklem enjeksiyonunda hedeflediğimiz bölge olan eklem aralığına ulaşmak için gerekli olan iğne doğrultusu bilgisayar ortamında oluşturularak modelin üzerine ışın şeklinde eklendi. Her bir kadavra için ayrı ayrı modeller oluşturuldu. (Şekil 31)



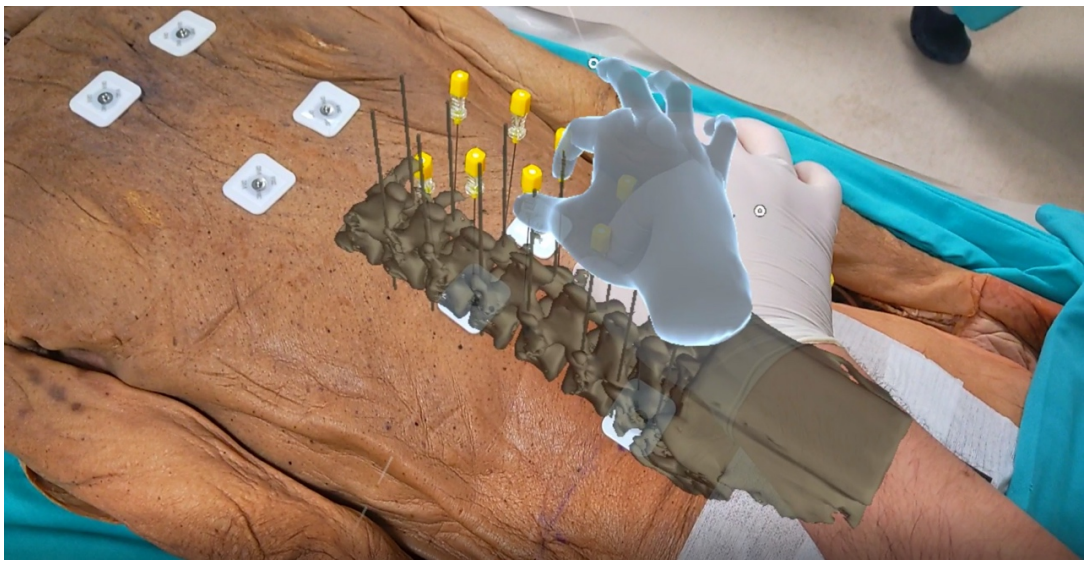
Şekil 31: Üç boyutlu modelleme sonrası kadavranın omurgasının hologramı ve planlanan iğne doğrultuları.

Unity (Unity 2020.03.20f1, Unity Technologies, Unity Software Inc., San Francisco, USA) adlı oyun geliştirme uygulamasında, Vuforia (Vuforia Engine 10.3, PTC Inc., Boston, Massachusettes, USA) yazılım geliştirme kiti kullanılarak her bir kadavra için görüntü hedefi sistemi kullanılarak ayrı birer uygulama geliştirildi. Oluşturulan Unity temelli uygulamalar, Microsoft Visual Studio üzerinden Microsoft HoloLens 2 cihazına kuruldu. Geliştirilen uygulamayla, kadavra omurgalarının bilgisayarda oluşturulan hologram görüntüleri belirlenen görsel hedefler baz noktası olarak alınarak HoloLens 2 ile kadavra üzerinde gerçek konumlu olarak görüntülendi.

Görüntü detaylarını daha kaliteli şekilde oluşturabilmek adına her iki kadavranın omurgasında alt torakal-lomber-sakral ve servikal-üst torakal şeklinde iyi ayrı parça şeklinde hologramlar oluşturuldu ve enjeksiyon işlemleri ayrı ayrı yapıldı. Enjeksiyonları lomber faset eklem enjeksiyonlarında ikiyüz vakaya yakın sayıda tecrübesi olan bir tıpta uzmanlık son sınıf öğrencisi (A.E.A.) gerçekleştirdi. 20 G'luk spinal iğneler (Spinocan ®, 20 G 3,5 in. 90mm, Braun, Germany) hedef nokta olan faset eklem aralıklarına hologramdaki doğrultular esas

alınarak gönderildi. Her kadavrada C7-T1 faset ekleminden L5-S1 faset eklemine kadar toplam 18 seviyede bilateral toplam 36 iğne yerleştirildi. (Şekil 32 ve 33)

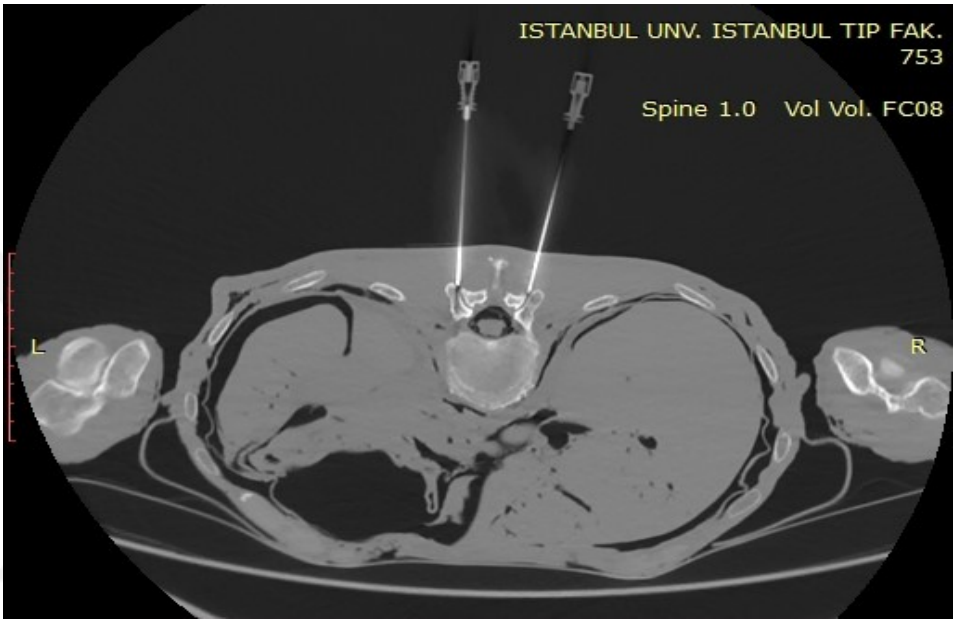
Şekil 32: Artırılmış gerçeklik eşliğinde faset eklem enjeksiyonu yapılırken



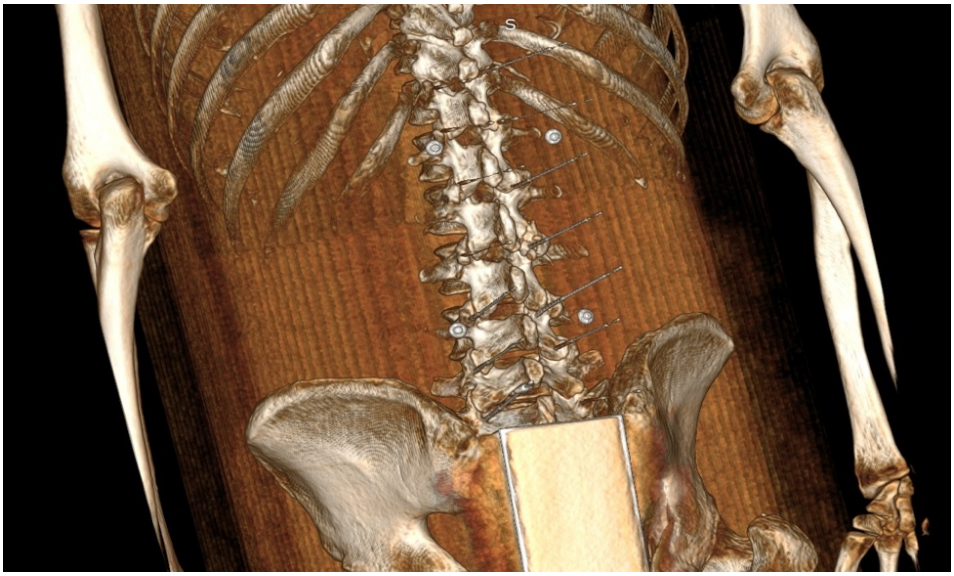
Şekil 33: İşlemi gerçekleştiren cerrahın gözünden hologramın ve iğnelerin görünümü

3.3. İşlem sonrası BT kontrolü

İğnelerin yerleştirildikten sonraki konumlarını görmek için kadavralara tüm spinal BT tetkiki yapıldı. İşlem sonrası BT'ler alanında uzman bir nöroradyolog (M.B.) tarafından, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak incelenerek üç ayrı skorla puanlandı. Tam eklem aralığına yerleşmiş iğneler mükemmel, eklem aralığında olmayan ancak faset eklem yüzeyinde olanlar kabul edilebilir, faset eklem yüzeyinden tamamen uzakta olanlar başarısız olarak skorlandı.



Şekil 34: İşlem sonrası BT görüntülemede iğnelerin yerleşimi örneği



Şekil 35: İşlem sonrası BT görüntülemede üç boyutlu olarak iğnelerin yerleşimi

Kontrol grubundaki iki kadavraya c-kollu skopi cihazı (Siemens Arcadis Varic, Germany) kullanılarak klasik yöntemle aynı 20 G spinal iğne kullanılarak faset eklem intraartiküler enjeksiyonu işlemi uygulandı. İşlem sonrası yine kontrol BT tetkiki yapılarak görüntüler yine aynı bağımsız bir radyolog tarafından puanlandı.

4. BULGULAR

Toplam beş adet kadavra kullanıldı. Her kadavraya öncelikle deney grubunda artırılmış gerçeklik gözlüğü ile işlem uygulanıp, iğne yerleşimlerinin tespiti için kontrol BT çekilerek iğneler çıkartıldı. Hemen ardından kontrol grubu olarak klasik yöntemle c-kollu skopi kullanılarak iğneler yerleştirildi ve tekrar kontrol BT çekildi.

Deneyde ilk etapta planımız servikal, torakal ve lomberde tüm seviyelerde işlem uygulamak şeklindeydi. Ancak servikal omurganın daha hareketli oluşu; kadavranın BT'den işlem masasına taşınma esnasında pozisyonunun değişebilmesi nedeniyle servikal enjeksiyonlar çalışmadan çıkartıldı.

Deney grubunda ve kontrol grubunda toplam beş kadavradan iki kadavraya C7-T1'den başlayarak L5-S1 seviyesine kadar iki yanlı toplam 72'şer enjeksiyon, üç kadavraya ise sadece T12-L1 seviyesinden L5-S1 seviyesine kadar iki yanlı toplam 36'şar enjeksiyon yapıldı. Üç kadavrada yalnız lomber seviyelere işlem yapılmasının nedeni lomber vertebra sayısının torakal vertebra sayısından az olması ve klinik pratikte lomber faset eklem uygulamalarının torakale göre çok daha yaygın ve önemli olması olmuştur. Böylece tüm enjeksiyonlardaki başarı oranının klinik kullanımı daha az olan torakal enjeksiyonlar nedeniyle etkilenmemesi ve lomber enjeksiyonların sayısının artırılarak grubun kendi içinde yapılacak istatistik hesapta yeterli sayıya ulaşılmak istenmiştir.

Deney grubunda 108 adet, kontrol grubunda 108 adet olmak üzere toplam 216 iğne yerleştirilmiştir. Toplam 216 iğne, her seviyede sağ ve sol faset eklemlere eşit sayıda 108'er adet yerleştirilmiştir. İğnelerin 120 tanesi lomber seviyelere, 96 tanesi torakal seviyelere uygulanmıştır (Tablo 1).

Bağımsız nöroradyoloji uzmanı (M.B.) değerlendirdiği görüntünün hangi grupta olduğunu bilmediği halde deney grubu ve kontrol grubundaki her bir iğneyi yerleşim yeri açısından başarısız, başarılı ve mükemmel şeklinde üç aşamalı bir skorlama sistemiyle puanlayarak değerlendirmiştir. Değerlendirme sonucunda toplam 216 iğnenin 33 tanesi (%15,3) başarısız, 109 tanesi (%50,5) başarılı, 74 tanesi (%34,3) mükemmel şekilde pozisyonlanmış olarak değerlendirilmiş ve puanlanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1: Örneklemdeki enjeksiyon özellikleri bilgileri

		Toplam (N=216)
Grup	Deney	108 (%50,0)
	Kontrol	108 (%50,0)
Anatomik Seviye	Lomber	120 (%55,6)
	Torakal	96 (%44,4)
Taraf	Sol	108 (%50,0)
	Sağ	108 (%50,0)
Skor	Başarısız	33 (%15,3)
	Başarılı	109 (%50,5)
	Mükemmel	74 (%34,3)

İğne yerleşimlerindeki başarı oranlarının deney ve kontrol gruplarına göre dağılımı ise Tablo 2'de özetlenmiştir. Başarısız yerleşimli toplam 33 iğneden 15 tanesi deney grubunda, 18 tanesi kontrol grubunda yer almaktadır. Başarılı yerleşimli toplam 109 iğneden 50 tanesi deney grubunda, 59 tanesi kontrol grubunda, mükemmel yerleşimli 74 iğneden 43 tanesi deney grubunda, 31 tanesi kontrol grubunda yer almaktadır.

Tablo 2'de ayrıca deney grubu ve kontrol grubu içindeki iğnelerin başarı skorlarına göre yüzde dağılımları da özetlenmiştir. Deney grubundaki 108 iğneden 15'i (%13,9) başarısız, 50'si (%46,3) başarılı, 43'ü (%39,8) mükemmel olarak değerlendirilmiştir. Kontrol grubundaki 108 iğnenin 18'i (%16,7) başarısız, 59'u (%54,6) başarılı, 31'i (%28,7) mükemmel olarak skorlanmıştır.

Tablo 2: Deney grubuna göre enjeksiyon özelliklerin karşılaştırması

		Deney (N=108)	Kontrol (N=108)	Toplam (N=216)
Anatomik Seviye	Lomber	60 (%55,6)	60 (%55,6)	120 (%55,6)
	Torakal	48 (%44,4)	48 (%44,4)	96 (%44,4)
Skor	Başarısız	15 (%13,9)	18 (%16,7)	33 (%15,3)
	Başarılı	50 (%46,3)	59 (%54,6)	109 (%50,5)
	Mükemmel	43 (%39,8)	31 (%28,7)	74 (%34,3)

Enjeksiyonlarında başarı skorlarının anatomik seviyelere göre dağılımı göz önüne alındığında 33 başarısız iğnenin 13'ü lomber, 20'si torakal seviyede; 109 başarılı iğnenin 57'si lomber, 52'si torakal seviyede; 74 mükemmel yerleşimli iğnenin 50'si lomber, 24'ü torakal seviyede yer almaktadır. (Tablo 3 ve 5) Oranlara bakacak olursak: Lomber seviyedeki 120 enjeksiyonun 13'ü (%10,8) başarısız, 57'si (%47,5) başarılı, 50'si (%41,7) mükemmel yerleşimlidir. Torakal seviyedeki 96 enjeksiyonun 20'si (%20,8) başarısız, 52'si (%54,2) başarılı, 24'ü (%25,0) mükemmel yerleşimli olarak değerlendirilmiştir. (Tablo 3)

Tablo 3: Anatomik seviyeye göre enjeksiyon skorlarının karşılaştırması

		Lomber (N=120)	Torakal (N=96)	Toplam (N=216)
Skor	Başarısız	13 (%10,8)	20 (%20,8)	33 (%15,3)
	Başarılı	57 (%47,5)	52 (%54,2)	109 (%50,5)
	Mükemmel	50 (%41,7)	24 (%25,0)	74 (%34,3)

Enjeksiyonlardaki başarı skorlarının hem anatomik seviyeye hem de gruplara göre değerlendirilmesi Tablo 4'te özetlenmiştir: Lomber seviyedeki başarısız 13 iğnenin 3'ü deney grubunda, 10'u kontrol grubunda; başarılı 57 iğnenin 26'sı deney grubunda, 31'i kontrol grubunda; mükemmel yerleşimli 50 iğnenin 31'i deney grubunda, 19'u kontrol grubunda yer almaktadır. Torakal seviyedeki başarısız 20 iğnenin 12'si deney grubunda, 8'i kontrol grubunda; başarılı yerleşimli 52 iğnenin 24'ü deney grubunda, 28'i kontrol grubunda; mükemmel yerleşimli 24 iğnenin 12'si deney grubunda, 12'si kontrol grubunda yer almaktadır.

Tablo 4: Enjeksiyon skorlarının anatomik seviyelere ve gruplara göre dağılımı

	Deney (N=108)		Kontrol (N=108)		Toplam (N=216)	
	Lomber (N=60)	Torakal (N=48)	Lomber (N=60)	Torakal (N=48)	Lomber (N=120)	Torakal (N=96)
Başarısız	3 (%5,0)	12 (%25,0)	10 (%16,7)	8 (%16,7)	13 (%10,8)	20 (%20,8)
Başarılı	26 (%43,3)	24 (%50,0)	31 (%51,7)	28 (%58,3)	57 (%47,5)	52 (%54,2)
Mükemmel	31 (%51,7)	12 (%25,0)	19 (%31,7)	12 (%25,0)	50 (%41,7)	24 (%25,0)

Deney grubunda lomber seviyedeki 60 enjeksiyondan başarısız 3 tane (%5), başarılı 26 tane (%43,3), mükemmel skorda 31 tane (%51,7); torakal seviyedeki 48 enjeksiyondan başarısız 12 tane (%25,0), başarılı 24 tane (%50,0), mükemmel 12 tane (%25,0) değerlendirilmiştir (Tablo 4, 5 ve 6).

Kontrol grubunda lomber seviyedeki 60 enjeksiyondan 10'u (%16,7) başarısız, 31'i (%51,7) başarılı, 19'u (%31,7) mükemmel olarak; torakal seviyedeki 48 enjeksiyondan 8'i (%16,7) başarısız, 28'i (%58,3) başarılı, 12'si (%25,0) mükemmel olarak skorlanmıştır (Tablo 4, 5 ve 6).

Tablo 5: Lomber bölge enjeksiyon skorlarının gruplar arası karşılaştırması

Grup	Başarısız (N=13)	Başarılı (N=57)	Mükemmel (N=50)	Toplam (N=120)
Deney	3 (%23,1)	26 (%45,6)	31 (%62,0)	60 (%50,0)
Kontrol	10 (%76,9)	31 (%54,4)	19 (%38,0)	60 (%50,0)

Tablo 6: Torakal bölge enjeksiyon skorlarının gruplar arası karşılaştırması

Grup	Başarısız (N=20)	Başarılı (N=52)	Mükemmel (N=24)	Toplam (N=96)
Deney	12 (%60,0)	24 (%46,2)	12 (%50,0)	48 (%50,0)
Kontrol	8 (%40,0)	28 (%53,8)	12 (%50,0)	48 (%50,0)

Taraf açısından yapılan değerlendirmede sağ taraf faset eklemlere yapılan 108 enjeksiyonun 15'i başarısız, 53'ü başarılı, 40'ı mükemmel; sol tarafa yapılan 108 enjeksiyondan 18'i başarısız, 56'sı başarılı, 34'ü mükemmel olarak değerlendirilmiştir. (Tablo 7)

Toplamda başarısızlardan 18'i (%54,5) solda, 15'i (%45,4) sağda; başarılılardan 56'sı solda (%51,4), 53'ü (%48,6) sağda; mükemmellerden 34'ü (%45,9) solda, 40'ı (%54,1) sağda yer almaktadır. (Tablo 7)

Tablo 7: Skorlara ve anatomik seviye grup ve taraf özelliklerine göre enjeksiyonların karşılaştırması

		Başarısız (N=33)	Başarılı (N=109)	Mükemmel (N=74)	Toplam (N=216)
Grup	Deney	15 (%45,5)	50 (%45,9)	43 (%58,1)	108 (%50,0)
	Kontrol	18 (%54,5)	59 (%54,1)	31 (%41,9)	108 (%50,0)
Taraf	Sol	18 (%54,5)	56 (%51,4)	34 (%45,9)	108 (%50,0)
	Sağ	15 (%45,5)	53 (%48,6)	40 (%54,1)	108 (%50,0)
Anatomik Seviye	Lomber	13 (%39,4)	57 (%52,3)	50 (%67,6)	120 (%55,6)
	Torakal	20 (%60,6)	52 (%47,7)	24 (%32,4)	96 (%44,4)

Klinik kullanımı daha yaygın olduğu için değerlendirmede kendi içinde ayrıca dikkate alacağımız lomber bölge enjeksiyonlarında taraf ve gruplara göre başarı skorlarına baktığımızda: Deney grubundaki başarısız 3 enjeksiyondan 1'i solda 2'si sağ tarafta; kontrol grubundaki başarısız 10 enjeksiyondan 7'si sol tarafta, 3'ü sağ tarafta yer almaktadır. Deney grubundaki başarılı 26 enjeksiyondan 13'ü sol, 13'ü sağ tarafta; kontrol grubundaki başarılı 31 enjeksiyondan 14'ü sol, 17'si sağ tarafta yerleşmektedir. Deney grubundaki mükemmel yerleşimli 31 enjeksiyondan 16'sı sol, 15'i sağ tarafta; kontrol grubundaki mükemmel yerleşimli 19 enjeksiyondan 9'u sol, 10'u sağ tarafta yerleşimlidir. (Tablo 8)

Tablo 8: Lomber bölge enjeksiyonlarında deney-kontrol gruplarının taraflara göre karşılaştırması

	Deney (N=60)		Kontrol (N=60)		Toplam (N=120)	
	Sol (N=30)	Sağ (N=30)	Sol (N=30)	Sağ (N=30)	Sol (N=60)	Sağ (N=60)
Başarısız	1 (%3,3)	2 (%6,7)	7 (%23,3)	3 (%10,0)	8 (%13,3)	5 (%8,3)
Başarılı	13 (%43,3)	13 (%43,3)	14 (%46,7)	17 (%56,7)	27 (%45,0)	30 (%50,0)
Mükemmel	16 (%53,3)	15 (%50,0)	9 (%30,0)	10 (%33,3)	25 (%41,7)	25 (%41,7)

Torakal bölge enjeksiyonlarında taraf ve gruplara göre başarı skorlarına baktığımızda: Deney grubundaki başarısız 12 enjeksiyondan 7'si solda 5'i sağ tarafta; kontrol grubundaki başarısız 8 enjeksiyondan 3'ü sol tarafta, 5'i sağ tarafta yer almaktadır. Deney grubundaki başarılı 24 enjeksiyondan 13'ü sol, 11'ü sağ tarafta; kontrol grubundaki başarılı 28 enjeksiyondan 16'sı sol, 12'si sağ tarafta yerleşmektedir. Deney grubundaki mükemmel yerleşimli 12 enjeksiyondan 4'ü sol, 8'i sağ tarafta; kontrol grubundaki mükemmel yerleşimli 12 enjeksiyondan 5'i sol, 7'si sağ tarafta yerleşimlidir. (Tablo 9)

Tablo 9: Torakal bölge enjeksiyonlarında deney-kontrol gruplarının taraflara göre karşılaştırması

	Deney (N=48)		Kontrol (N=48)		Toplam (N=96)	
	Sol (N=24)	Sağ (N=24)	Sol (N=24)	Sağ (N=24)	Sol (N=48)	Sağ (N=48)
Başarısız	7 (%29,2)	5 (%20,8)	3 (%12,5)	5 (%20,8)	10 (%20,8)	10 (%20,8)
Başarılı	13 (%54,2)	11 (%45,8)	16 (%66,7)	12 (%50,0)	29 (%60,4)	23 (%47,9)
Mükemmel	4 (%16,7)	8 (%33,3)	5 (%20,8)	7 (%29,2)	9 (%18,8)	15 (%31,3)

Kadavraları işlemlerin uygulanma sırasına göre numaralandırarak başarı oranlarını karşılaştırdığımızda; Başarılı ve mükemmel skorların oranlarında düzenli bir artış, başarısız enjeksiyon oranlarında düzenli bir azalma görülmektedir. (Tablo 10)

Tablo 10: Enjeksiyon skorlarının kadavralara göre dağılımı

	Kadavra 1 (N = 72)	Kadavra 2 (N = 24)	Kadavra 3 (N = 72)	Kadavra 4 (N = 24)	Kadavra 5 (N = 24)	Toplam (N=216)
Başarılı/ Mükemmel	59 (%81,9)	20 (%83,3)	60 (%83,3)	21 (%87,5)	23 (%95,8)	183 (%84,7)
Başarısız	13 (%18,1)	4 (%16,7)	12 (%16,7)	3 (%12,5)	1 (%4,2)	33 (%15,3)

Sadece deney grubundaki kadavraların başarı skorlarındaki değişime baktığımızda; ilk kadavrada %88,9 olan başarı oranı 2. Kadavrada %91,7'ye yükselmiş, 3. Kadavrada %72,2'ye gerilemiştir. Ancak 4. Ve 5. Kadavralarda başarı oranı %100 olmuştur.

Tablo 11: Deney grubunda enjeksiyon skorlarının kadavralara göre dağılımı

	Kadavra 1 (N = 36)	Kadavra 2 (N = 12)	Kadavra 3 (N = 36)	Kadavra 4 (N = 12)	Kadavra 5 (N = 12)	Toplam (N=108)
Başarılı/ Mükemmel	32 (%88,9)	11 (%91,7)	26 (%72,2)	12 (%100)	12 (%100)	93 (%86,1)
Başarısız	4 (%11,1)	1 (%8,3)	10 (%27,8)	0 (%0)	0 (%0)	15 (%13,9)

İstatistiksel analizde R Studio programı (R Project, The R Foundation, Boston, USA) kullanılmıştır. Deney ve kontrol grubu enjeksiyon skorlarında fark olup olmadığını incelemek için bağımsız örneklem t-testi kullanılmıştır. T-test sonuçlarının gruplar arası karşılaştırması Tablo 12'de gösterilmiştir. Sonuçlara göre, kontrol grubundaki 108 enjeksiyona ($\bar{X}$ = 2.12, *SS* = 0.66) kıyasla deney grubundaki 108 enjeksiyonun başarı oranı ($\bar{X}$ = 2.25, *SS* = 0.68) çok az daha yüksek olsa da iki grup arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır, $t(214) = 1.51$, $p = .13$. Bu sonuçlara göre; deney grubunun skorları kontrol grubuna göre daha yüksek olmakla birlikte aradaki fark istatistiksel olarak anlamlı değildir.

Tablo 12: Enjeksiyonların ortalama skorlarının deney ve kontrol grubu arasında t-test ile karşılaştırılması

	Deney (N=108)		Kontrol (N=108)		*df*	*t*	*p*
	Ort.	*SS*	*Ort.*	*SS*			
Skor	2.26	0.68	2.12	0.66	214	1.51	0.133

Not. *Ort*: ortalama, *SS*: standart sapma

Tablo 13: Enjeksiyonların ortalama skorlarının anatomik seviyeye gore t-test ile karşılaştırılması

	Lomber (N=120)		Torakal (N=96)		*df*	*t*	*p*
	Ort.	*SS*	*Ort.*	*SS*			
Skor	2.31	0.65	2.04	0.67	214	2.91	0.004

Not. *Ort*: ortalama, *SS*: standart sapma

Anatomik seviyeye göre skorların farklı olup olmadığını incelemek için bağımsız örneklem t-testi kullanılmıştır. Anatomik seviyeye göre karşılaştırma Tablo 13'te gösterilmiştir. Buna göre; deney ve kontrol grubunu beraber ele aldığımızda lomber bölge enjeksiyonları ($\bar{X}$ = 2.31, *SS* = 0.67), torakal bölge enjeksiyonlarına kıyasla ($\bar{X}$ = 2.04, SS = 0.66), istatistiksel olarak anlamlı derecede daha iyi puanlar göstermiştir $t(214) = 2.91$, $p < 0.05$. Bu sonuca göre; çalışmamızdaki lomber bölge enjeksiyonları, torakal bölge enjeksiyonlarına oranla daha iyi sonuçlar göstermiştir.

Tablo 14: Anatomik seviyeye göre deney ve kontrol grubu enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması

		Deney		Kontrol		*df*	*t*	*p*
		Ort.	*SS*	*Ort.*	*SS*			
Anatomik Seviye	Lomber	2.46	0.59	2.15	0.68	118	2.70	0.007
	Torakal	2.00	0.71	2.08	0.64	94	-0.59	0.55

Not. *Ort*: ortalama, *SS*: standart sapma

Lomber bölge enjeksiyonları torakal bölgeye göre daha sık kullanılmaktadır. Bu nedenle lomber bölge enjeksiyonları ve torakal bölge enjeksiyonları kendi içlerinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Tablo 14).

Lomber bölge enjeksiyonları kendi içinde değerlendirildiğinde deney grubu ($\bar{X}$ = 2.46, *SS* = 0.59), kontrol grubuna ($\bar{X}$ = 2.15, *SS* = 0.68) göre istatistiksel olarak anlamlı derecede daha başarılıdır $t(118) = 2.70$, $p < 0.05$. Torakal bölge enjeksiyonlarında ise kontrol grubu ($\bar{X}$ = 2.08, *SS* = 0.64) ve deney grubu ($\bar{X}$ = 2.00, *SS* = 0.71) arasında istatistiksel anlamlı bir fark bulunmamıştır $t(94) = 0.75$, $p = 0.55$.

Bu bilgiler doğrultusunda çalışmamızda; sadece lomber bölge enjeksiyonları ele alındığında deney grubu kontrol grubuna göre istatistiksel anlamlı oranda başarılı bulunmuştur.

Tablo 15: Deney ve kontrol grupları içinde anatomik seviyeye göre enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması

		Lomber		Torakal		*df*	*t*	*p*
		Ort.	*SS*	*Ort.*	*SS*			
Grup	Deney	2.46	0.59	2.00	0.71	106	3.70	0.000
	Kontrol	2.15	0.68	2.08	0.64	106	-0.59	0.61

Not. *Ort*: ortalama, *SS*: standart sapma

Deney ve kontrol grubu skorlarında anatomik seviyeye göre fark olup olmadığını incelemek için deney ve kontrol grubu kendi içinde değerlendirilmiştir (Tablo 15). Deney grubunda lomber bölge ($\bar{X}$ = 2.46, *SS* = 0.59) ve torakal bölge ($\bar{X}$ = 2.00, *SS* = 0.71) enjeksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ve lomber bölge enjeksiyonları daha başarılıdır $t(106) = 3.70$, $p < 0.05$. Kontrol grubunda ise lomber bölge ($\bar{X}$ = 2.15, *SS* = 0.68) ve torakal bölge ($\bar{X}$ = 2.08, *SS* = 0.64) arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır $t(106) = 0.51$, $p = 0.61$.

Bu bilgiler doğrultusunda deney grubunda lomber bölge enjeksiyonları torakal bölge enjeksiyonlarından istatistiksel olarak anlamlı derecede daha başarılı olmuştur. Kontrol grubunda ise lomber bölge enjeksiyonları torakal bölge enjeksiyonlarından daha başarılı olsa da bu fark istatistiksel olarak anlamlı değildir.

Tablo 16: Enjeksiyonların ortalama skorlarının anatomik seviyeye gore t-test ile karşılaştırılması

	Sağ (N=108)		Sol (N=108)		*df*	*t*	*p*
	Ort.	*SS*	*Ort.*	*SS*			
Skor	2.31	0.67	2.14	0.68	214	-0.90	0.36

Not. *Ort*: ortalama, *SS*: standart sapma

Skorların sağ ve sol taraf açısından farklı olup olmadığını incelemek için bağımsız örneklem t-testi kullanılmıştır. T-test sonuçlarının gruplar arası karşılaştırması Tablo 16'da gösterilmiştir. Buna göre, sağ tarafa uygulanan enjeksiyonlar ($\bar{X}$ = 2.23, *SS* = 0.67) ile sol tarafa uygulanan enjeksiyonlar ($\bar{X}$ = 2.15, SS = 0.68) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır $t(214) = -0.90$, $p = 0.36$. Buna göre, sağ ve sol taraf enjeksiyon skorları birbirine yakındır.

Tablo 17: Anatomik seviyeye göre deney ve kontrol grubu enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması

		Sağ		Sol		*df*	*t*	*p*
		Ort.	*SS*	*Ort.*	*SS*			
Anatomik Seviye	Lomber	2.33	0.62	2.28	0.69	118	-0.41	0.67
	Torakal	2.10	0.72	1.97	0.63	94	-0.90	0.37

Not. *Ort*: ortalama, *SS*: standart sapma

Anatomik seviyeye göre sağ ve sol taraf enjeksiyonlarının skorlarında fark olup olmadığını incelemek için lomber bölge enjeksiyonları ve torakal bölge enjeksiyonları kendi içinde değerlendirilmiştir. Anatomik seviyeye göre sağ ve sol taraf enjeksiyon skorlarının karşılaştırılması Tablo 17'te gösterilmiştir. Lomber bölge enjeksiyonlarında sağ taraf ($\bar{X}$ = 2.33, *SS* = 0.62) ve sol taraf ($\bar{X}$ = 2.28, *SS* = 0.69) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir, $t(118) = -0.41$, $p = 0.67$. Torakal seviye enjeksiyonlarında sağ taraf ($\bar{X}$ = 2.10, *SS* = 0.72) sol taraftan ($\bar{X}$ = 1.97, *SS* = 0.63) daha başarılı olsa da bu fark istatistiksel olarak anlamlı değildir $t(94) = -0.90$, $p = 0.37$.

Buna göre, lomber ve torakal bölge enjeksiyonları kendi içinde incelendiğinde sağ ve sol taraf skorları istatistiksel olarak birbirinden farklı değildir.

Tablo 18: Deney ve kontrol grupları içinde anatomik seviyeye göre enjeksiyon skorlarının t-test ile karşılaştırılması

		Sağ		Sol		*df*	*t*	*p*
		Ort.	*SS*	*Ort.*	*SS*			
Grup	Deney	2.29	0.69	2.22	0.69	106	-0.55	0.57
	Kontrol	2.16	0.66	2.07	0.67	106	-0.72	0.47

Not. *Ort*: ortalama, *SS*: standart sapma

Deney ve kontrol grupları içinde sağ ve sol taraf skorları arasında fark olup olmadığını incelemek için deney grubu ve kontrol grubu kendi içinde değerlendirilmiştir. Deney ve kontrol grubu skorlarının sağ ve sol tarafa göre karşılaştırılması Tablo 18'de gösterilmiştir. Deney grubu enjeksiyonları kendi içinde değerlendirildiğinde sağ taraf ($\bar{X}$ = 2.29, *SS* = 0.69) ve sol taraf ($\bar{X}$ = 2.22, *SS* = 0.69) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir, $t(106) = -0.55$, $p = 0.57$. Kontrol grubu enjeksiyonlarında da sağ taraf ($\bar{X}$ = 2.16, *SS* = 0.66) ve sol taraf ($\bar{X}$ = 2.07, *SS* = 0.66) arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır $t(106) = -0.72$, $p = 0.47$.

Bu bilgiler doğrultusunda deney ve kontrol grupları içinde sağ ve sol taraf enjeksiyon skorları birbirinden farklı değildir.

Son olarak, faklı kadavralardaki enjeksiyon skorlarının ortalamalarını karşılaştırmak için ANOVA testi kullanılmıştır. Kadavralar arasında enjeksiyon skorların ortalamalarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir, $F(4, 211) = 2.01$, $p = 0.09$. Ancak çalışmamızda ilk kadavradan beşinci kadavraya doğru başarılı ve mükemmel skorların oranlarında düzenli bir artış, başarısız enjeksiyon oranlarında düzenli bir azalma gözlenmektedir (Tablo 10).

5. TARTIŞMA

Faset eklem enjeksiyonları ve RFA tedavisi; akut veya kronik bel, boyun ve sırt ağrılı hastaların tanısında ve tedavisinde tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. 2015'te Boswell ve arkadaşlarının yayınladığı sistematik derleme yazısında lomber faset eklem enjeksiyonlarının etkinliği hakkında level I, torakal ve servikal faset eklem enjeksiyonlarının etkinliği hakkında level II seviyesinde kanıt bulunduğunu bildirilmiştir.[82]

Faset eklem enjeksiyonları ve faset eklem RFA tedavisi, klinik pratikte sıklıkla c-kollu skopi eşliğinde uygulanmaktadır. Bu da işlemi uygulayan doktorun, işlem sahasından ve iğneden ayrı bir konumdaki ekrana bakarak, bu ekrandaki iki boyutlu bir görüntüyü esas alıp buna göre iğnenin konumunu belirlemesi anlamına gelir. Deneyimi az uygulayıcılar için iki boyutlu skopi görüntüsü üzerinden işlem yapmak hiç de kolay değildir. Öğrenme sürecinde ve sonrasında skopi eşliğinde yapılan enjeksiyonlarının ne ölçüde doğru yerleşimli olduğuna yönelik bir çalışmaya da literatürde rastlanmamıştır. İğne konumunun yerleşiminde c-kollu skopideki iki boyutlu görüntüyü esas almak ve uygulayıcının bu konudaki tecrübesi, enjeksiyonların başarı oranlarını etkileyecek önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

C-kollu skopideki bir diğer problem literatürde "odak kayması" olarak ifade edilen işlem sahasından ayrı bir ekrana bakma gereksinimidir. İşlem esnasında uygulayıcı doktor iğneyi doğru konumla buluşturana dek pek çok kez skopi çekilmesini isteyebilir. Her defa işlem sahasına ve ekrana ayrı ayrı bakması gerekir. Böylece doktorun dikkati sadece işlem sahasında odaklanmak yerine ekrana bakmakla dağılmaktadır.

Bir diğer temel sorun ise c-kollu skopinin X ışını kullanımı temeline dayanarak çalışan ve radyasyon içeren bir işlem olmasıdır. Hayatında bir ya da birkaç kez c-kollu skopiyle yapılan bir işleme maruz kalan bir hasta için radyasyon dozu kabul edilebilir düzeyde olmakla birlikte bu işlemi her gün defalarca kez uygulayan doktor ve sağlık çalışanları için maruz kalınan radyasyon dozunun tehlikeli boyutlara ulaşabilmesi söz konusudur.

C-kollu skopiden salınan X ışınlarına maruziyet uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. İşlemin uygulandığı masanın başında bizzat çalışan ve ekstremiteleriyle korunmasız bir şekilde iğneyi tutan doktorlar en yüksek dozda radyasyona maruz kalmaktadır.

Artırılmış gerçeklik teknolojisi son yıllarda giderek yaygınlaşmakta, pek çok alanda olduğu gibi tıpta da kullanımı giderek artmaktadır. Artırılmış gerçeklik teknolojisi cep telefonu, bilgisayar, tablet gibi cihazlarla uygulanabildiği gibi artırılmış gerçeklik gözlüğü (head mounted display) vasıtasıyla da kullanımı mümkündür. Çalışmamızda piyasada bulunan

en gelişmiş teknik özelliklere sahip artırılmış gerçeklik gözlüğü Microsoft HoloLens 2 kullanılmıştır. Literatürde çok yakın tarihli çalışmalarda dahi artırılmış gerçeklik teknolojisinin ameliyatlardaki uygulamalarında sıklıkla HoloLens 1 kullanılmıştır. HoloLens 2'nin teknik özelliklerindeki iyileştirmeler ve HoloLens 1'e olan üstünlüğü nedeniyle çalışmamızın sonuçları önem taşımaktadır.

Artırılmış gerçeklik teknolojisi giderek gelişmektedir ve gelecekte ameliyatlardaki navigasyon teknolojisinin yerini alacağı öngörülmektedir. Ancak hala hologramlarda gerçek dünyaya kıyasla sapma payı vardır ve yapılan çalışmalar bu sapma payını minimalize etmeye yöneliktir. Biz de çalışmamızda "Vuforia Engine" görüntü hedef sistemini kullanarak kadavraların omurga hologramlarını, gerçek dünyadaki birebir konumuna eşleyip faset eklem enjeksiyonlarını bu görüntü üzerinden yaptık. Böylece sapma payının kabul edilebilir düzeyde olup olmadığını, faset eklem enjeksiyonlarının artırılmış gerçeklik gözlüğü Microsoft HoloLens 2 ile güvenli bir şekilde yapılıp yapılamayacağını bulmayı hedefledik.

Bu teknik sayesinde:

1) Skopiyle maruz kalınan radyasyonun ortadan kaldırılması veya azaltılması,
2) İşlemin iki boyutlu bir görüntü yerine üç boyutlu bir hologram üzerinden daha kolayca uygulanabilmesi,
3) İşlemi uygulayan doktorun ikinci bir ekrana bakmak zorunda kalmaması ve odak sapması probleminin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

Deneyimizi kurgularken amacımız artırılmış gerçeklik grubunun en az skopi grubu kadar iyi olup olmadığını sorgulamak olmuştur.

Çalışmamızın sonuçlarında artırılmış gerçeklik teknolojisi kullanılarak işlem yapılan deney grubunun başarı oranı klasik yöntem olan c-kollu skopi kullanılan kontrol grubuna kıyaslandığında az farkla önde olup, istatistiksel anlamlı fark bulunmamıştır. Deney grubu ve kontrol grubu arasında istatistiksel anlamlı fark bulunmaması artırılmış gerçeklikle faset eklem enjeksiyonlarının başarıyla ve güvenle uygulanabileceğini desteklemektedir.

Alt gruplara ayrı ayrı bakıldığında sadece torakal bölge enjeksiyonlarında deney gruplarının başarı oranları kontrol gruplarının başarı oranlarına kıyasla az farkla önde olup istatistiksel anlamlı fark saptanmamıştır. Sadece lomber seviyelere baktığımızda ise deney grubu kontrol grubuna göre istatistiksel olarak anlamlı derecede daha iyidir.

Deney grubunda ve kontrol grubunda lomber seviyelerdeki başarı oranı torakal seviyelerdekine göre istatistiksel anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. Bu sonuçta muhtemel

neden; işlemi uygulayan doktorun (A.E.A.) lomber enjeksiyonlarda daha önce 200'e yakın sayıda vakada tecrübesi olmakla birlikte pratikte kullanımı sınırlı olan torakal faset eklem enjeksiyonunda tecrübesiz oluşu olmuştur. Çalışmanın başlarında yapılan kontrol grubu torakal enjeksiyonlarla sonunda yapılan kontrol grubu torakal enjeksiyonlar arasında başarı oranında fark vardır ve başarı oranı giderek artmaktadır, çünkü uygulayıcı çalışma esnasında tecrübe kazanmıştır.

Artırılmış gerçeklik gözlüğü ile yapılan enjeksiyonlarda deneyin başlarında yapılan işlemlerle sonlarında yapılan işlemlerde başarı oranlarında anlamlı bir fark izlenmemiştir. Çünkü artırılmış gerçeklik teknolojisiyle yapılan enjeksiyonlarda tecrübesiz birinin bile işlemi gerçekleştirmesi oldukça kolaydır. Hedef üç boyutlu olarak görülmektedir ve çalışmamızda geliştirdiğimiz teknikle faset eklemleri hedefleyen doğrultulara yerleştirilen kılavuz çizgilerin iğneyle takip edilmesi yeterli olmaktadır.

Çalışmamız sonucunda değerlendirilebilecek bir diğer problem ise kontrol grubundaki başarısız enjeksiyonlardır. Klinik pratikte c-kollu skopi yaygın kullanıma sahiptir ancak iki boyutlu görüntü üzerinde hedefe ulaşıldığı düşünülse de çalışmamızda görüldüğü üzere iğnenin üç boyutlu uzayda yerleşimi yanlış olabilmektedir. Bunda işlemi gerçekleştiren kişinin klinik tecrübesi elbette önem taşımaktadır. Ancak sağlık hizmetleri sunumunda dünyanın her yerinde aynı tecrübe ve bilgi birikimine sahip uzmanlar yetiştirilmesi olası değildir. Literatürde c-kollu skopiyle yerleştirilen iğnelerin konumunun BT ile kontrol edildiği bir çalışmanın olmaması da bize günlük pratikte de bu işlemde iğnelerin bazen sehven hatalı konumlanabileceğini düşündürmektedir ve bu konu sorgulamaya açıktır. Faset eklem enjeksiyonlarının farklı çalışmalarda ve klinik pratikte kişiden kişiye değişen başarı oranlarına sahip olması "İğneler c-kollu skopi eşliğinde yeterince doğru konumlanamıyor olabilir mi?" sorusunu aklımıza getirmektedir.

Çalışmamızın bazı eksik yanları da bulunmaktadır: Artırılmış gerçeklik teknolojisi mevcut en gelişmiş ekipman ve yazılımla dahi hala tek başına klinik kullanımda yeterli değildir. Hâlâ sapma payı mevcuttur, hologram stabilitesi yeterli değildir, işlem esnasında kaymalar yaşanabilmektedir. Çalışmamızda işlemlerin tek merkezde, tek uygulayıcı tarafından gerçekleştirilmesi bir diğer zayıf yandır. Bu teknoloji çoklu merkezlerde farklı tecrübelerdeki uygulayıcılar tarafından çift kör olarak uygulanabilir ve sonuçlarımız geliştirilebilir.

6. SONUÇ

Çalışmamızın sonucu göstermektedir ki geliştirdiğimiz artırılmış gerçeklik gözlüğü yardımıyla yapılan faset eklem enjeksiyonu tekniği, klasik yöntem olan c-kollu skopi tekniğiyle kadavralarda kıyaslandığında istatistiksel anlamlı fark olmaksızın aynı başarı ve güvenilirlik oranını sağlamaktadır.

Artırılmış gerçeklik teknolojisi c-kollu skopinin yerini tamamen almasa da klinik kullanımıyla skopi ihtiyacını azaltabilir. Böylece işlemi uygulayan doktorun ve sağlık personelinin radyasyon maruziyeti azaltılabilir, işlem iki boyutlu bir görüntüden üç boyutlu bir görüntüye taşınarak kolaylaştırılabilir, işlemi uygulayanın tecrübesinin işlemin başarısında oynadığı rol azaltılabilir, odak kayması problemi ortadan kaldırılabilir.

Uzun vadede artırılmış gerçeklik teknolojisindeki donanımsal ve yazılımsal gelişmelerle c-kollu skopinin yerini alarak bu işlemin altın standart uygulama metodu haline gelebilir.

KAYNAKLAR

1. Wu A, March L, Zheng X, et al. Global low back pain prevalence and years lived with disability from 1990 to 2017: estimates from the Global Burden of Disease Study 2017. Ann Transl Med 2020;8(6):299. (In eng). DOI: 10.21037/atm.2020.02.175.

2. Andersson GAAoOS. The burden of musculoskeletal diseases in the United States : prevalence, societal, and economic cost. Rosemont, IL: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2008.

3. Hartvigsen J, Hancock MJ, Kongsted A, et al. What low back pain is and why we need to pay attention. Lancet 2018;391(10137):2356-2367. (In eng). DOI: 10.1016/s0140-6736(18)30480-x.

4. Dagenais S, Caro J, Haldeman S. A systematic review of low back pain cost of illness studies in the United States and internationally. Spine J 2008;8(1):8-20. (In eng). DOI: 10.1016/j.spinee.2007.10.005.

5. Dieleman JL, Cao J, Chapin A, et al. US Health Care Spending by Payer and Health Condition, 1996-2016. Jama 2020;323(9):863-884. (In eng). DOI: 10.1001/jama.2020.0734.

6. Wenig CM, Schmidt CO, Kohlmann T, Schweikert B. Costs of back pain in Germany. Eur J Pain 2009;13(3):280-6. (In eng). DOI: 10.1016/j.ejpain.2008.04.005.

7. İlhan MN, Aksakal FN, Kaptan H, et al. Birinci Basamakta Yaşam Boyu Bel Ağrısı Sıklığı ve ilişkili Sosyal ve Mesleksel Risk Etmenleri. Gazi Medical Journal 2010;21(3) (In tur).

8. Datta S, Lee M, Falco FJ, Bryce DA, Hayek SM. Systematic assessment of diagnostic accuracy and therapeutic utility of lumbar facet joint interventions. Pain Physician 2009;12(2):437-60. (In eng).

9. Goldthwait JE. The Lumbo-Sacral Articulation; An Explanation of Many Cases of "Lumbago," "Sciatica" and Paraplegia. The New England Journal of Medicine;164:356-372.

10. V. P. New conceptions in the pathogenesis of sciatic pain. Lancet 1927(2):53-60.

11. Ghormley Rk. Low Back Pain: With Special Reference To The Articular Facets, With Presentation Of An Operative Procedure. Journal of the American Medical Association 1933;101(23):1773-1777. DOI: 10.1001/jama.1933.02740480005002.

12. Badgley CE. The articular facets in relation to low-back pain and sciatic radiation. Journal of Bone and Joint Surgery, American Volume 1941;23:481-496.

13. Mooney V, Robertson J. The facet syndrome. Clin Orthop Relat Res 1976(115):149-56. (In eng).

14. Dreyfuss P, Schwarzer AC, Lau P, Bogduk N. Specificity of lumbar medial branch and L5 dorsal ramus blocks. A computed tomography study. Spine (Phila Pa 1976) 1997;22(8):895-902. (In eng). DOI: 10.1097/00007632-199704150-00013.

15. Kaplan M, Dreyfuss P, Halbrook B, Bogduk N. The ability of lumbar medial branch blocks to anesthetize the zygapophysial joint. A physiologic challenge. Spine (Phila Pa 1976) 1998;23(17):1847-52. (In eng). DOI: 10.1097/00007632-199809010-00008.

16. Falco FJ, Manchikanti L, Datta S, et al. An update of the systematic assessment of the diagnostic accuracy of lumbar facet joint nerve blocks. Pain Physician 2012;15(6):E869-907. (In eng).

17. Kalichman L, Li L, Kim DH, et al. Facet joint osteoarthritis and low back pain in the community-based population. Spine (Phila Pa 1976) 2008;33(23):2560-5. (In eng). DOI: 10.1097/BRS.0b013e318184ef95.

18. Carrera GF, Haughton VM, Syvertsen A, Williams AL. Computed tomography of the lumbar facet joints. Radiology 1980;134(1):145-8. (In eng). DOI: 10.1148/radiology.134.1.7350594.

19. Manchikanti L, Singh V, Pampati V, et al. Evaluation of the relative contributions of various structures in chronic low back pain. Pain Physician 2001;4(4):308-16. (In eng).

20. Hancock MJ, Maher CG, Latimer J, et al. Systematic review of tests to identify the disc, SIJ or facet joint as the source of low back pain. Eur Spine J 2007;16(10):1539-50. (In eng). DOI: 10.1007/s00586-007-0391-1.

21. Cohen SP, Raja SN. Pathogenesis, diagnosis, and treatment of lumbar zygapophysial (facet) joint pain. Anesthesiology 2007;106(3):591-614. (In eng). DOI: 10.1097/00000542-200703000-00024.

22. editors HTB. Essentials of pain medicine: Fourth edition. Philadelphia, Pennsylvania : Elsevier, 2018.

23. Bogduk N. Clinical anatomy of the lumbar spine and sacrum: Fourth edition. Edinburgh ; New York : Elsevier/Churchill Livingstone, 2005.

24. Lewin T, Moffett B, Vidik A. The morphology of the lumbar synovial interveertebral joints. Acta Morphol Neerl Scand 1962;4:299-319. (In eng).

25. Masharawi Y, Rothschild B, Dar G, et al. Facet orientation in the thoracolumbar spine: three-dimensional anatomic and biomechanical analysis. Spine (Phila Pa 1976) 2004;29(16):1755-63. (In eng). DOI: 10.1097/01.brs.0000134575.04084.ef.

26. Michael P. Steinmetz SHBECB. Benzel's spine surgery : techniques, complication avoidance, and management: Fifth edition Philadelphia, PA : Elsevier, 2021.

27. Panjabi MM, Oxland T, Takata K, Goel V, Duranceau J, Krag M. Articular facets of the human spine. Quantitative three-dimensional anatomy. Spine (Phila Pa 1976) 1993;18(10):1298-310. (In eng). DOI: 10.1097/00007632-199308000-00009.

28. Chua WH, Bogduk N. The surgical anatomy of thoracic facet denervation. Acta Neurochir (Wien) 1995;136(3-4):140-4. (In eng). DOI: 10.1007/bf01410616.

29. Barnsley L, Lord S, Bogduk N. Comparative local anaesthetic blocks in the diagnosis of cervical zygapophysial joint pain. Pain 1993;55(1):99-106. (In eng). DOI: 10.1016/0304-3959(93)90189-v.

30. Lord SM, Barnsley L, Wallis BJ, Bogduk N. Third occipital nerve headache: a prevalence study. J Neurol Neurosurg Psychiatry 1994;57(10):1187-90. (In eng). DOI: 10.1136/jnnp.57.10.1187.

31. Cavanaugh JM, Ozaktay AC, Yamashita HT, King AI. Lumbar facet pain: biomechanics, neuroanatomy and neurophysiology. J Biomech 1996;29(9):1117-29. (In eng). DOI: 10.1016/0021-9290(96)00023-1.

32. Kallakuri S, Singh A, Chen C, Cavanaugh JM. Demonstration of substance P, calcitonin gene-related peptide, and protein gene product 9.5 containing nerve fibers in human cervical facet joint capsules. Spine (Phila Pa 1976) 2004;29(11):1182-6. (In eng). DOI: 10.1097/00007632-200406010-00005.

33. Igarashi A, Kikuchi S, Konno S. Correlation between inflammatory cytokines released from the lumbar facet joint tissue and symptoms in degenerative lumbar spinal disorders. J Orthop Sci 2007;12(2):154-60. (In eng).
DOI: 10.1007/s00776-006-1105-y.

34. Beaman DN, Graziano GP, Glover RA, Wojtys EM, Chang V. Substance P innervation of lumbar spine facet joints. Spine (Phila Pa 1976) 1993;18(8):1044-9. (In eng). DOI: 10.1097/00007632-199306150-00014.

35. Lord SM, Barnsley L, Wallis BJ, Bogduk N. Chronic cervical zygapophysial joint pain after whiplash. A placebo-controlled prevalence study. Spine (Phila Pa 1976) 1996;21(15):1737-44; discussion 1744-5. (In eng).
DOI: 10.1097/00007632-199608010-00005.

36. Jackson RP, Jacobs RR, Montesano PX. 1988 Volvo award in clinical sciences. Facet joint injection in low-back pain. A prospective statistical study. Spine (Phila Pa 1976) 1988;13(9):966-71. (In eng). DOI: 10.1097/00007632-198809000-00002.

37. Murtagh FR. Computed tomography and fluoroscopy guided anesthesia and steroid injection in facet syndrome. Spine (Phila Pa 1976) 1988;13(6):686-9. (In eng).

38. Castinel BH, Adam P, Milburn PD, et al. Epidemiology of cervical spine abnormalities in asymptomatic adult professional rugby union players using static and dynamic MRI protocols: 2002 to 2006. Br J Sports Med 2010;44(3):194-9. (In eng). DOI: 10.1136/bjsm.2007.045815.

39. Fujiwara A, Tamai K, Yamato M, et al. The relationship between facet joint osteoarthritis and disc degeneration of the lumbar spine: an MRI study. Eur Spine J 1999;8(5):396-401. (In eng). DOI: 10.1007/s005860050193.

40. Leone A, Aulisa L, Tamburrelli F, Lupparelli S, Tartaglione T. [The role of computed tomography and magnetic resonance in assessing degenerative arthropathy of the lumbar articular facets]. Radiol Med 1994;88(5):547-52. (In ita).

41. Wen CB, Li YZ, Sun L, et al. [A clinical trial of ultrasound-guided facet joint block in the lumbar spine to treat facet joint related low back pain]. Sichuan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban 2014;45(4):712-6. (In chi).

42. Steinmetz MPBEC. Benzel's spine surgery: techniques, complication avoidance, and management, 2017.

43. J.P. R. Facet injection: intra-articular injection, medial branch block, and radiofrequency treatment. Atlas of Image-Guided Intervention in Regional Anesthesia and Pain Medicine 2012:80-117.

44. Rathmell JP, Benzon HT, Dreyfuss P, et al. Safeguards to prevent neurologic complications after epidural steroid injections: consensus opinions from a multidisciplinary working group and national organizations. Anesthesiology 2015;122(5):974-84. (In eng). DOI: 10.1097/aln.0000000000000614.

45. Cheng J. GL, Yano S. Comparative long term outcomes of lateral versus posterior approach to cervical facet medial branch radiofrequency ablation. Pain Med, 2013;14:586.

46. Joshi A, Amrhein TJ, Holmes MA, Talsma J, Shonyo M, Taylor AB. The Source and the Course of the Articular Branches to the T4-T8 Zygapophysial Joints. Pain Medicine 2019;20(12):2371-2376. DOI: 10.1093/pm/pnz116.

47. Rathmell JP, Michna E, Fitzgibbon DR, Stephens LS, Posner KL, Domino KB. Injury and liability associated with cervical procedures for chronic pain. Anesthesiology 2011;114(4):918-26. (In eng). DOI: 10.1097/ALN.0b013e31820fc7f2.

48. Manchikanti L, Staats PS, Singh V, et al. Evidence-based practice guidelines for interventional techniques in the management of chronic spinal pain. Pain Physician 2003;6(1):3-81. (In eng).

49. Furht B. Handbook of Augmented Reality: Springer Publishing Company, Incorporated, 2011.

50. Milgram P, Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Trans Information Systems 1994;vol. E77-D, no. 12:1321-1329.

51. Azuma RT. A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 1997;6(4):355-385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.

52. Sutherland IE. A head-mounted three dimensional display. Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I. San Francisco, California: Association for Computing Machinery; 1968:757–764.

53. Rosenberg LB. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium1993:76-82.

54. Feiner S, MacIntyre B, Seligmann D. Knowledge-based augmented reality. Communications of the ACM1993:52.

55. Azuma R, Baillot Y, Behringer R, Feiner S, Julier S, Macintyre B. Recent advances in augmented reality. IEEE Comput Graphics Appl. Computer Graphics and Applications, IEEE 2001;21:34-47. DOI: 10.1109/38.963459.

56. Piekarski W, Thomas B. ARQuake: the outdoor augmented reality gaming system. Commun ACM 2002;45(1):36–38. DOI: 10.1145/502269.502291.

57. Kato H, Billinghurst M, Poupyrev I, Imamoto K, Tachibana K. Virtual object manipulation on a table-top AR environment. Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000):111-119.

58. Andrews CM, Henry AB, Soriano IM, Southworth MK, Silva JR. Registration Techniques for Clinical Applications of Three-Dimensional Augmented Reality Devices. IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine 2021;9:1-14. DOI: 10.1109/JTEHM.2020.3045642.

59. Qian L, Barthel A, Johnson A, et al. Comparison of optical see-through head-mounted displays for surgical interventions with object-anchored 2D-display. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 2017;12(6):901-910. DOI: 10.1007/s11548-017-1564-y.

60. Predicts 2022: 4 Technology Bets for Building the Digital Future. *Reterived from* https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-07-gartner-predicts-25-percent-of-people-will-spend-at-least-one-hour-per-day-in-the-metaverse-by-2026

61. Kamphuis C, Barsom E, Schijven M, Christoph N. Augmented reality in medical education? Perspectives on Medical Education 2014;3(4):300-311. DOI: 10.1007/s40037-013-0107-7.

62. Yoon JW, Chen RE, Kim EJ, et al. Augmented reality for the surgeon: Systematic review. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 2018;14(4):e1914. DOI: 10.1002/rcs.1914.

63. Eckert M, Volmerg JS, Friedrich CM. Augmented Reality in Medicine: Systematic and Bibliographic Review. JMIR Mhealth Uhealth 2019;7(4):e10967. (Review) (In English). DOI: 10.2196/10967.

64. Cartucho J, Shapira D, Ashrafian H, Giannarou S. Multimodal mixed reality visualisation for intraoperative surgical guidance. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 2020;15(5):819-826. DOI: 10.1007/s11548-020-02165-4.

65. Rae E, Lasso A, Holden M, Morin E, Levy R, Fichtinger G. Neurosurgical burr hole placement using the Microsoft HoloLens2018.

66. Ivan ME, Eichberg DG, Di L, et al. Augmented reality head-mounted display-based incision planning in cranial neurosurgery: a prospective pilot study. Neurosurg Focus 2021;51(2):E3. (In eng). DOI: 10.3171/2021.5.Focus20735.

67. Li Y, Chen X, Wang N, et al. A wearable mixed-reality holographic computer for guiding external ventricular drain insertion at the bedside. Journal of Neurosurgery JNS 2019;131(5):1599-1606. (In English). DOI: 10.3171/2018.4.Jns18124.

68. Schneider M, Kunz C, Pal'a A, Wirtz CR, Mathis-Ullrich F, Hlaváč M. Augmented reality-assisted ventriculostomy. Neurosurg Focus 2021;50(1):E16. (In eng). DOI: 10.3171/2020.10.Focus20779.

69. Casari FA, Navab N, Hruby LA, et al. Augmented Reality in Orthopedic Surgery Is Emerging from Proof of Concept Towards Clinical Studies: a Literature Review Explaining the Technology and Current State of the Art. Curr Rev Musculoskelet Med 2021;14(2):192-203. (In eng). DOI: 10.1007/s12178-021-09699-3.

70. Yoon JW, Chen RE, Han PK, Si P, Freeman WD, Pirris SM. Technical feasibility and safety of an intraoperative head-up display device during spine instrumentation. Int J Med Robot 2017;13(3) (In eng). DOI: 10.1002/rcs.1770.

71. Liu H, Wu J, Tang Y, et al. Percutaneous placement of lumbar pedicle screws via intraoperative CT image-based augmented reality-guided technology. J Neurosurg Spine 2019:1-6. (In eng). DOI: 10.3171/2019.10.Spine19969.

72. Müller F, Roner S, Liebmann F, Spirig JM, Fürnstahl P, Farshad M. Augmented reality navigation for spinal pedicle screw instrumentation using intraoperative 3D imaging. The Spine Journal 2020;20(4):621-628. DOI: 10.1016/j.spinee.2019.10.012.

73. Gibby JT, Swenson SA, Cvetko S, Rao R, Javan R. Head-mounted display augmented reality to guide pedicle screw placement utilizing computed tomography. Int J Comput Assist Radiol Surg 2019;14(3):525-535. (In eng). DOI: 10.1007/s11548-018-1814-7.

74. Urakov TM, Wang MY, Levi AD. Workflow Caveats in Augmented Reality–Assisted Pedicle Instrumentation: Cadaver Lab. World Neurosurgery 2019;126:e1449-e1455. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.03.118.

75. Liebmann F, Roner S, von Atzigen M, et al. Pedicle screw navigation using surface digitization on the Microsoft HoloLens. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 2019;14(7):1157-1165. DOI: 10.1007/s11548-019-01973-7.

76. Molina CA, Theodore N, Ahmed AK, et al. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: a cadaveric proof-of-concept study. J Neurosurg Spine 2019:1-8. (In eng). DOI: 10.3171/2018.12.Spine181142.

77. Liu A, Jin Y, Cottrill E, et al. Clinical accuracy and initial experience with augmented reality-assisted pedicle screw placement: the first 205 screws. J Neurosurg Spine 2021:1-7. (In eng). DOI: 10.3171/2021.2.Spine202097.

78. Molina CA, Dibble CF, Lo SL, Witham T, Sciubba DM. Augmented reality-mediated stereotactic navigation for execution of en bloc lumbar spondylectomy osteotomies. J Neurosurg Spine 2021:1-6. (In eng). DOI: 10.3171/2020.9.Spine201219.

79. Agten CA, Dennler C, Rosskopf AB, Jaberg L, Pfirrmann CWA, Farshad M. Augmented Reality-Guided Lumbar Facet Joint Injections. Invest Radiol 2018;53(8):495-498. (In eng). DOI: 10.1097/rli.0000000000000478.

80. Heinrich F, Schwenderling L, Becker M, Skalej M, Hansen C. HoloInjection: augmented reality support for CT-guided spinal needle injections. Healthc Technol Lett 2019;6(6):165-171. (In eng). DOI: 10.1049/htl.2019.0062.

81. Gibby J, Cvetko S, Javan R, Parr R, Gibby W. Use of augmented reality for image-guided spine procedures. European Spine Journal 2020;29(8):1823-1832. DOI: 10.1007/s00586-020-06495-4.

82. Boswell MV, Manchikanti L, Kaye AD, et al. A Best-Evidence Systematic Appraisal of the Diagnostic Accuracy and Utility of Facet (Zygapophysial) Joint Injections in Chronic Spinal Pain. Pain Physician 2015;18(4):E497-533. (In eng).