

Distraksiyon histiogenezinde değişmeyen prensipler ve değişen implantlar

Unchanging principles and changing implants in distraction histiogenesis

Levent Eralp¹, Melih Civan²

¹İstanbul Üniversitesi İstanbul Tıp Fakültesi, Ortopedi ve Travmatoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul
(Emekli Öğretim Üyesi)

²Başakşehir Çam ve Sakura Şehir Hastanesi, Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, İstanbul

Distraksiyon histiogenezinin tarihsel gelişimi, teknolojinin değişmesine rağmen biyolojik prensiplerin kalıcılığını en iyi yansıtan örneklerden biridir. İlizarov'un tanımladığı gerilim-stres etkisi, yeni kemik oluşumunun hâlâ temel mekanizmasıdır. Zaman içinde halkasal ve monolateral fiksasyonlardan bilgisayar destekli uzaysal sistemlere ve motorize intramedüller çivilere geçilmiş, hasta konforu ve cerrahi hassasiyet artmıştır. Ancak rejeneratın oluşum sürecini belirleyen histolojik ve biyomekanik ilkeler değişmemiştir. Distraksiyon boşluğunda oluşan rejenerat, yeterli stabilite ve uygun hız koşullarında intramembranöz ossifikasyonla olgunlaşır. Düşük hızlarda düzenli trabekül yapısı gelişirken, aşırı hızlarda fibröz doku ve kistik alanlar belirginleşir. Periostun korunması, osteogenezis sürecinde kritik rol oynar; çünkü periost, osteojenik hücreler ve vasküler yapı açısından aktif bir biyolojik kaynaktır. Rejenerat kalitesi, distraksiyon hızı, stabilite, osteotomi tekniği ve çevre doku bütünlüğüyle doğrudan ilişkilidir. Modern implantlar, geçmişte tanımlanan biyolojik yasaların çağdaş uygulamalarıdır. Teknoloji ilerledikçe cerrahi yöntemler rafine hale gelse de, distraksiyon histiogenezinin özü değişmez: kontrollü mekanik gerilim, doku rejenerasyonunu yönlendirir. Bu nedenle uzuv uzatma cerrahisi, yalnızca teknik bir işlem değil, bilimin ve biyomekanikğin sürekliliğini temsil eden bir cerrahi felsefedir.

Anahtar sözcükler: distraksiyon osteogenezi; uzuv uzatma cerrahisi; ilizarov; rejenerat; biyomekanik prensipler; gerilim-stres etkisi

The historical development of distraction histiogenesis is one of the most striking examples demonstrating the permanence of biological principles despite technological change. The tension-stress effect defined by Ilizarov remains the fundamental mechanism of new bone formation. Over time, limb lengthening has evolved from circular and monolateral fixators to computer-assisted spatial systems and motorized intramedullary nails, enhancing both patient comfort and surgical precision. However, the histological and biomechanical principles governing regenerate formation have remained unchanged. Under optimal stability and distraction conditions, the regenerate formed within the distraction gap matures through intramembranous ossification. Slow distraction rates promote organized trabecular structures, whereas excessive rates result in fibrous tissue and cystic voids. Preservation of the periosteum plays a critical role in osteogenesis, as it serves as an active biological source rich in osteogenic cells and vascular structures. Regenerate quality is directly related to distraction rate, stability, osteotomy technique, and the integrity of surrounding tissues. Modern implants represent contemporary applications of the biological laws established in the past. Although technological advances have refined surgical methods, the essence of distraction histiogenesis remains constant: controlled mechanical tension directs tissue regeneration. Thus, limb lengthening surgery is not merely a technical procedure but a surgical philosophy that embodies the continuity of science and biomechanics.

Key words: distraction osteogenesis; limb lengthening surgery; ilizarov; regenerate; biomechanical principles; tension-stress effect

“Milyonlarcası elmanın düşüşünü gördü ancak nedenini sorgulayan yalnızca Newton’du.”
Brauch Bernard

Bilim gözlemle başlar, teknolojiyle gelişir ve zaman içinde bir anlatıya dönüşür. Bu anlatı yalnızca bilgi birikimini değil, aynı zamanda bir anlayış ve felsefenin temelini oluşturur. Yeterince test edilip doğrulanan bilgiler tutarlılık kazandığında metodolojik bir çerçeveye oturur ve içinden evrensel prensipler doğar. Teknoloji değişebilir, yöntemler gelişebilir, kullanılan materyaller dönüşebilir; ancak prensipler zamanın sınavını aşarak varlıklarını korur. Tıpkı matematikten Pi sayısını çıkarmanın imkânsız olması gibi, temel biyolojik ve biyomekanik ilkelerin dışlanması da bilimin bütünlüğünü bozar.

Uzatma cerrahisi de bu evrensel prensiplerin modern tıptaki en önemli örneklerinden biridir. Ortopedi ve travmatolojinin en dinamik alanlarından biri olan bu disiplin, biyomekanik kurallara ve uygun doku histolojisine dayanır. Kullanılan implantlar yıllar içinde büyük değişimler göstermiş olsa da uzatma cerrahisinin dayandığı biyolojik ve cerrahi prensipler büyük ölçüde aynı kalmıştır. Newton’un evrensel yerçekimi yasalarının modern fiziğin gelişimiyle anlamını yitirmemesi gibi distraksiyon histiogenezinin temel ilkeleri de uzatma cerrahisinde değişmeden günümüze ulaşmıştır.

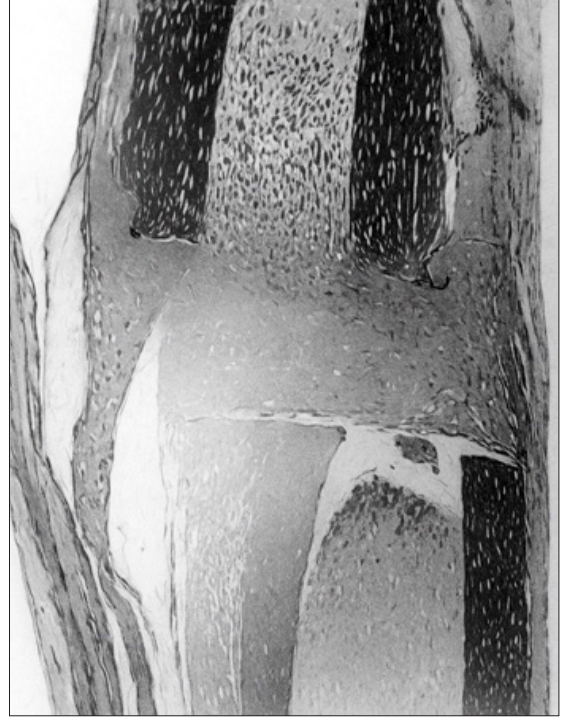
REJENERAT KAVRAMI VE HİSTOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Uzatma cerrahisinde osteotomi sonrası yaklaşık 7-10 günlük bekleme süresi tamamlandıktan ve stabil bir distraksiyon uygulandığında, bu aralıkta oluşan dokunun radyolojik görünümüne rejenerat adı verilir. Rejenerat radyolojik olarak yeni kemik dokusu izlenimi verir. Ancak mikroskop altında incelendiğinde, bu dokunun oluşum sürecinin görüldüğünden çok daha karmaşık olduğu ortaya çıkar.^[1]

Oluşumun erken fazında aralık, yeterince farklılaşmamış fibröz doku ile doludur (Şekil 1). Bu öncül doku, fragman kenarlarından başlayan ve sarkıt benzeri uzantılar şeklinde görülen kemik oluşumlarına dönüşür. Her iki kemik ucunun ortasında ise belirgin bir fibrokartilajinöz hat gelişir (Şekil 2). Zaman ilerledikçe, yeterli stabilite ve düzenli bir distraksiyon altında, yeni kemik oluşumları tüm alana yayılır. Bununla birlikte, Z şeklinde görülen kartilajinöz bant ortada varlığını sürdürür (Şekil 3).^[2]

FİBRÖZ INTERZONE VE FARKLI UZAMA HIZLARININ REJENERAT KALİTESİNE ETKİSİ

Bir eksternal fiksator ile uzatma yapıldığında, distraksiyon boşluğunun ortasında transvers bir hat belirir. Bu hatta *interzone* adı verilir ve distraksiyon alanındaki yeni kemik oluşumunun büyüme plağına benzer şekilde işlev

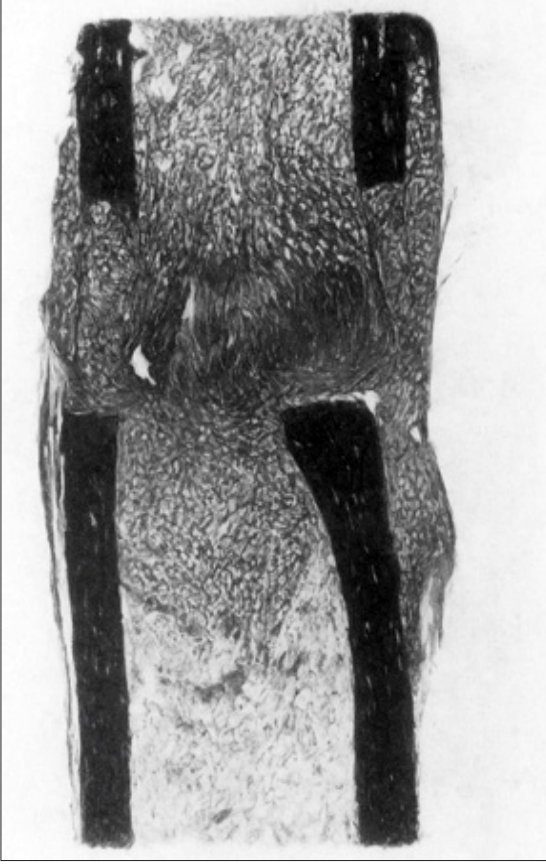


Şekil 1. Günlük 0,5 milimetre (mm) hızında longitudinal distraksiyon altında erken evreye ait fotomikrograf. Osteotomi boşluğu büyük ölçüde farklılaşmamış fibröz doku ve fibrokartilajinöz elemanlarla doludur. Bu aşamada damar invazyonu, anjiyogenez veya mineralize kemik oluşumu henüz izlenmemektedir. Osteosit farklılaşması gerçekleşmemiş olup, doku yalnızca sonraki iyileşme sürecine iskelet sağlayacak immatür bağ dokusu görünümündedir.^[1]

gördüğü kabul edilir. İntramedüller cihazlarla yapılan uzatmalarda ise bu alanın gözlemlenmesi daha güçtür.^[2]

Başlangıçta zikzak görünümlü olan bu hat, zamanla kalınlaşır ve yoğunlaşarak tüm distraksiyon boşluğuna yayılır. Bu durum, rejeneratın tümünde ossifikasyonun başladığını gösterir. Ancak bu değişim çoğunlukla distraksiyon fazı tamamlanmadan ortaya çıkmaz.

Farklı uzatma hızlarında distraksiyon boşluğunda belirgin histolojik farklılıklar gözlemlenmiştir. Li ve ark., aynı toplam uzama miktarına farklı hızlarla ulaşılan hayvan modellerinde, en düşük hız olan 0,3 mm/gün ritminde, konsolidasyon aşamasına geçilmesine rağmen neredeyse tüm boşluğu dolduran intramembranöz ossifikasyon saptamışlardır.^[3] Bu çalışmada uzunlamasına uzanan trabeküllerin zaman zaman mikrokırıklarla devamlılık gösterdiği ve doku elongasyonunun tüm boşluk boyunca yayıldığı gözlenmiştir (Şekil 4). Uzatma ritmi 0,7 mm/gün olduğunda distraksiyon boşluğunda



Şekil 2. Aktif distraksiyon fazına ait fotomikrograf. Osteotominin proksimal ve distal uçlarında intramembranöz ossifikasyon zonları belirgin olup yeni kemik trabekülleri distraksiyon boşluğuna doğru uzanmaktadır. Orta bölge ise hâlâ fibrokartilajinöz doku ile doludur ve geçici bir matriks görevi görmektedir. İlerleyen kemik uçlarına komşu alanlarda artmış hücresellik ve erken vasküler yapılar dikkat çekmektedir. Bu görünüm, ortada fibrokondrogenezisle periferde aktif osteogenezisin eş zamanlı olarak varlığını göstermektedir.[1]

bağ dokuyla dolu, yer yer kıkırdak adacıklarıyla çevrelenmiş boşluklar izlenmiştir (Şekil 5). 1,3 mm/gün hızında ise distraksiyon aralığında kistik bir görünüm oluşmuş, çevresinde kıkırdak ve bağ doku adaları gözlenmiştir (Şekil 6). Son olarak 2,7 mm/gün hızında rejenerat yalnızca proksimal ve distal kemik uçlarında zayıf şekilde gelişmiş, merkezi boşluk ise düzensiz fibröz doku ile dolu bulunmuştur (Şekil 7).

Uzatma hızı arttıkça, merkezi boşlukların genişlediği ve çevrelerindeki kıkırdak adacıklarının hacimce büyüdüğü görülmektedir. Yeni kemik oluşumuna izin vermeyecek kadar hızlı ritimlerde, özellikle proksimal uçta belirgin olmak üzere, sadece osteotomi hattına yakın bölgelerde kemikleşme izlenir. Bu durumda, geniş distraksiyon aralığı bağ doku, fibrin pıhtısı ve yer yer nekrotik dokular ile doludur. İlizarov'un kendi çalışmaları ve farklı hayvan modelleri (köpek, kuzu, tavşan vb.) üzerinde

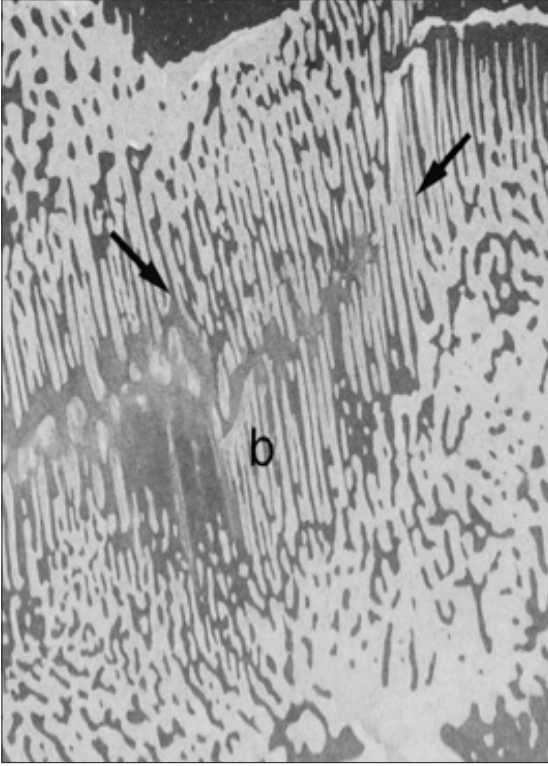


Şekil 3. Konsolidasyon evresine ait fotomikrograf. Distraksiyon boşluğu, merkezi fibrokartilajinöz dokunun yerini alan yeni oluşmuş örgülü (woven) kemik ile köprülenmiştir. Proksimal ve distal fragmanlar arasında trabeküler süreklilik sağlanmış olup tüm rejenerat boyunca mineralizasyon belirgindir. Histolojik görünüm, fibröz ve kartilajinöz öncül dokunun matür kemik dokusuna dönüşümünü göstermekte ve İlizarov'un tanımladığı gerilim-stres (tension-stress) ile indüklenen osteogenezis prensibini doğrulamaktadır.[1]

yapılan birçok araştırma, 0,5-1 mm/gün hızındaki uzatma protokollerinde intramembranöz ossifikasyon yoluyla yeni kemik oluşumunun en uygun şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Kıkırdak adacıklarının ise uzatma hızı ve mekanik instabiliteyle doğru orantılı olarak yoğunlaştığı ve hacimsel olarak büyüdüğü ortaya konmuştur.

MATURASYON FAZI

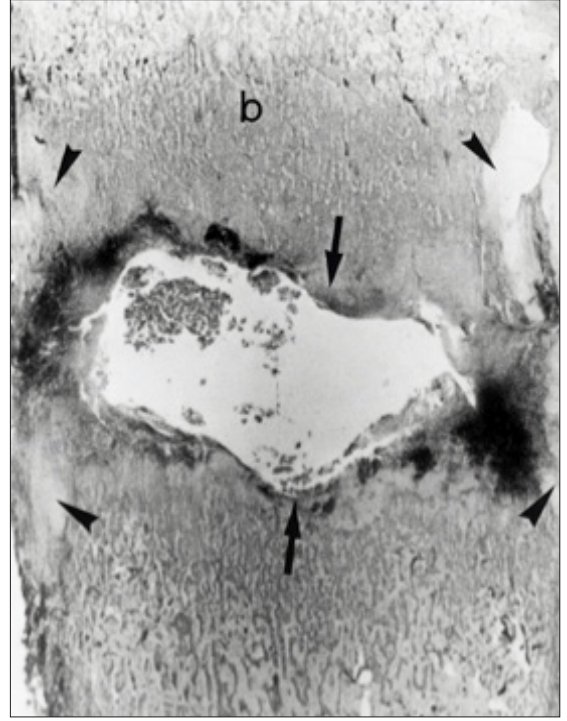
Distraksiyon fazında oluşan uzama dokusu büyük oranda tip I ve tip II kollajen içerir. Zamanla kalsiyum hidroksiapatit kristalleri kollajen fibriller arasında birikmeye başlar. Bu mineral depolanması, kollajen fibrillerin sertleşmesini ve dayanıklılığını artırır. Kalsiyum hidroksiapatit kristalleriyle mineralize olmuş kollajen fibrilleri kemiğin temel yapısal bileşenini oluşturur. Bu kristaller X-ışınlarını absorbe ederek dokunun radyolojik olarak görünür hâle gelmesini sağlar.



Şekil 4. Günde 0,3 mm'lik distraksiyon ritminde intramembranöz ossifikasyon oluşumunu (b) gösteren fotomikrograf. Osteotominin proksimal ve distal uçlarında intramedüller kavite ve remodelasyon alanları izlenmektedir. Merkezde trabeküler yapılar longitudinal yönde uzanmış olup, bazı bölgelerde fibrokartilajinöz adacıklar mevcuttur. Siyah oklar ile gösterilen alanlarda mikrokırıklar dikkati çekmektedir. x6 büyütme.^[3]



Şekil 5. Günde 0,7 mm'lik distraksiyon ritminde, distraksiyon aralığında boşluklar ile birlikte fibröz doku (ft) izlenmektedir. Kemik ve fibröz doku arasındaki küçük kıkırdak adacıkları ok ile gösterilmiştir. İntramembranöz ossifikasyon alanı ise (b) ile belirtilmiştir. x6 büyütme.^[3]



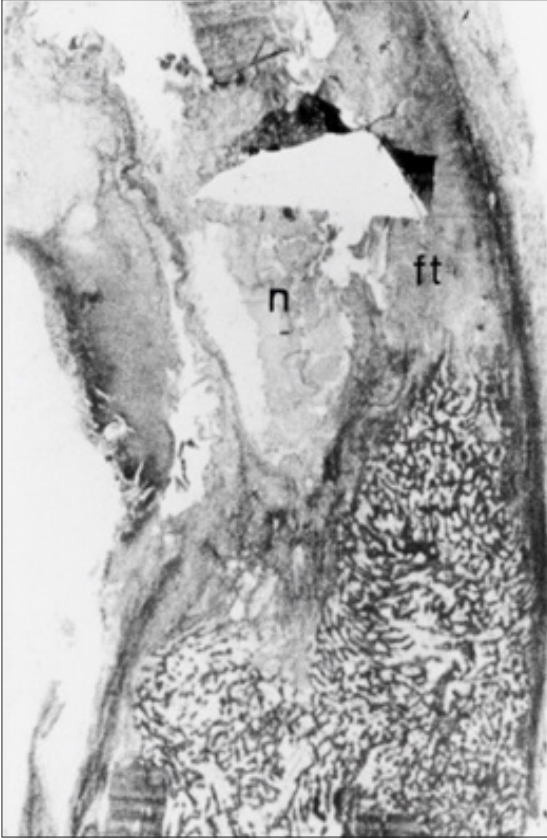
Şekil 6. Günde 1,3 mm'lik distraksiyon ritminde, distraksiyon aralığında büyük bir kistik alanı çevreleyen kemik doku görülmekte (b). Rejeneratın içindeki büyük kist formasyonu fibröz dokunun büyük bir kısmını oluşturuyor. Siyah oklarla gösterilen kıkırdak adalarına da dikkat ediniz. x6 büyütme.^[3]

Kemikleşme ilerledikçe, radyolojik olarak gözlemlenen olgunlaşma süreci de belirginleşir. İdeal koşullarda, radyolojik olgunlaşmanın longitudinal oryantasyonu direkt grafilere gözlenebilmekte; klinik uygulamalarda ise maturasyonun kalitesini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 8).

OSSİFİKASYON

İlizarov, distraksiyon osteogenezini ilk tanımladığında, bunun histoloji literatüründe bilinen intramembranöz veya endokondral ossifikasyondan farklı, üçüncü bir kemikleşme mekanizması olduğunu öne sürmüştü. Günümüzde ise distraksiyon aralığında gelişen anjiyogenez ve buna bağlı olarak pıhtılaşma odaklarının önce kıkırdaka, ardından da kemiğe olgunlaştığı bilinmektedir.

Düşük distraksiyon hızlarında intramembranöz ossifikasyon baskındır. İdeal hızlarda ise arada kıkırdak adacıkları bulunsun da intramembranöz ossifikasyon yeni kemik oluşumunun temel sürecini oluşturmaktadır. Endokondral ossifikasyonun baskın hâle gelmesi için aksiyel stabilitenin bozulması veya distraksiyon hızının aşırı artması gerekir; bu koşullar ise ideal kemik oluşum şartlarını karşılamamaktadır.^[1-3]



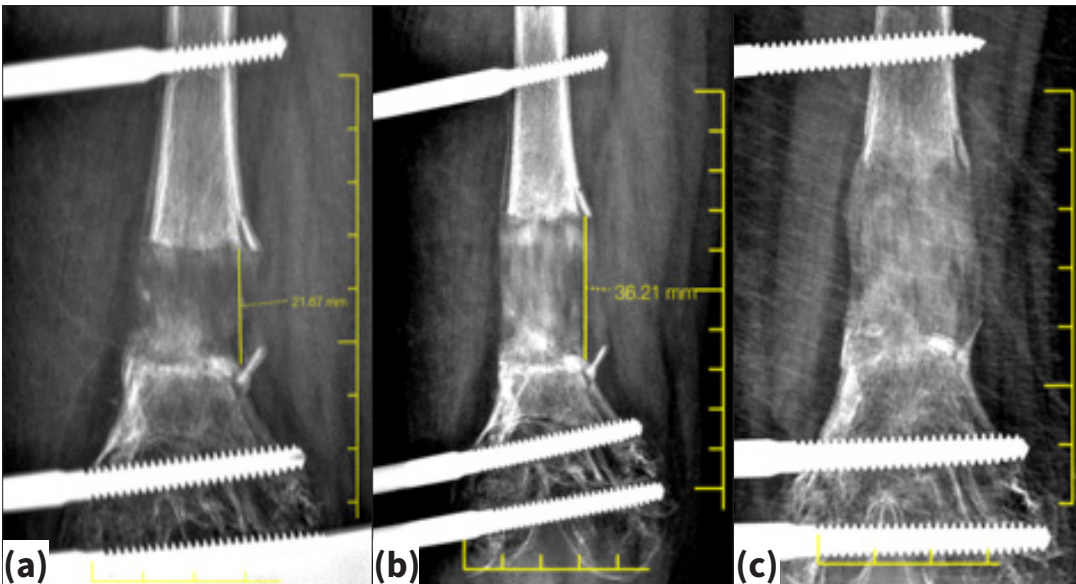
Şekil 7. Distraksiyon ritmi 2,7 mm/gün olarak uygulandığında kemik oluşumunda belirgin azalma ve inhibisyon izlenmektedir. Bu durumda rejenerat yalnızca proksimal uçta sınırlı kemik oluşumu göstermektedir. Merkezi alan ise düzensiz fibröz doku (ft) ve nekrotik odaklar (n) ile doludur. H&E boyası, x6 büyütme.^[3]

Ayrıca deneysel hayvan modellerinde, kullanılan fiksator tipine bağlı farklılıklar bildirilmiştir. Küçük hayvan modellerinde (örneğin; tavşan), genellikle monolateral fiksatorlerin kullanıldığı çalışmalarda endokondral ossifikasyon daha belirginken daha büyük hayvan modellerinde (örneğin; köpek, koyun) ve sirküler fiksatorlerle yapılan deneylerde intramembranöz ossifikasyonun baskın olduğu gösterilmiştir.^[4]

PERİOSTUN ROLÜ

Periost, kemik rejenerasyonunda en önemli biyolojik yapılardan biridir. İç yüzeyinde yer alan osteojenik tabaka sayesinde osteoblast ve progenitor hücreler açısından zengin bir kaynaktır. Histolojik çalışmalarda, osteotomi yapılmadan yalnızca periosteal distraksiyon uygulanan hayvan modellerinde dahi yeni kemik oluşumu ve mevcut kemik kütlelerinde artış raporlanmıştır.^[5] Bu bulgular, periostun distraksiyon osteogenezinde pasif bir örtü değil, aktif bir biyolojik katman olduğunu göstermektedir.

Periosteal distraksiyon, osteotomiye gerek kalmadan kemik yüzeyi boyunca yeni kemik formasyonunu uyarmaktadır. Mekanik gerilim altında periostun kaldırılması ve gerilmesi, burada bulunan osteoprogenitor hücrelerin proliferasyonunu tetikler ve sonuçta yeni kemik trabeküllerinin gelişimine yol açar. Ayrıca periostun zengin vaskülarizasyonu, hem osteojenik hücrelerin canlılığını hem de yeni oluşan dokunun beslenmesini destekler.



Şekil 8.a-c. Neonatal sepsis sonucu sağ femur distal büyüme plağında oluşan hasara bağlı gelişen kısalık, unilateral raylı eksternal fiksatorle tedavi edilmiştir. Günlük 1 mm uzatma ritmi uygulanmıştır. Uzatmanın üçüncü (a) ve beşinci haftalarında (b) çekilen direkt grafilerde yeni kemik oluşumu ve kemik yoğunluğunda artış gözlenmektedir. Matürasyon fazının ikinci haftasında çekilen grafide ise trabeküler kemik oluşumunun sıklaştığı ve olgunlaşmanın tüm distraksiyon aralığında devam ettiği izlenmektedir (c).

Bu nedenle, periost bütünlüğünün korunması distraksiyon osteogenezi için kritik önemdedir. İizarov ve takip eden araştırmacılar, distraksiyon sırasında periostun mümkün olduğunca korunmasının rejenerat kalitesini artırdığını ve konsolidasyon süresini kısalttığını vurgulamışlardır. Güncel deneysel ve klinik çalışmalar, periosteal distraksiyon yönteminin kemik defektlerinin tedavisinde ve kırık dokunun rejenerasyonunda potansiyel bir biyolojik strateji olabileceğini göstermektedir.

REJENERAT KALİTESİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Stabilite

İizarov, optimal rejenerat kalitesini etkileyen faktörleri belirlemek amacıyla köpekler üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. En iyi etkinin, rotasyonel ve eğilme kuvvetlerinin minimum düzeyde olduğu, aksiyel yüklenmeye bağlı trambolin etkisinin ise düşük ama varlığını koruduğu koşullarda elde edildiğini göstermiştir.^[1]

Osteotomi/Kortikotomi

İizarov ve ekibi, düşük enerjili ve atravmatik şekilde yapılan osteotomilerin kaynama üzerine olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuşlardır. En uygun yöntem olarak, korteksin kibarca kesilmesi, ardından intramedüller kanalın atlanarak işlemin tamamlanması ve son aşamada kemiğin manuel kırılmasının en iyi sonuçları verdiğini bildirmişlerdir. Bu şekilde yapılan osteotomilerin, distraksiyon boşluğunu daha homojen ve geniş bir rejenerasyon alanına dönüştürdüğü gözlemlenmiştir.^[1,2]

Distraksiyon ritmi

Kurgan'daki araştırmacılar, uzun kemiklerde ideal uzatma hızını 1 mm/gün olarak belirlemişlerdir. Bunun da günde 3-4 seansa bölünerek uygulanmasının en uygun yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, uzatma süresinin en az iki katı kadar bir sürede maturasyon gerektiğini tespit etmişlerdir. Çocuklarda bu süre minimum kabul edilirken, erişkinlerde distraksiyon süresinin üç ila dört katı uzunlukta bir maturasyon süresi gerektiği bildirilmiştir.^[1,2]

Çevre dokular

Distraksiyon alanındaki çevre yumuşak dokunun kalitesi, enfeksiyon varlığı ve bölgenin kanlanma düzeyi, yeni kemik oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Çevre dokularda hasar olduğunda maturasyon süreci belirgin şekilde uzamaktadır. Benzer şekilde, daha önce radyoterapi uygulanmış bölgelerde yapılan distraksiyon osteogenezinde de tıpkı enfeksiyon varlığında olduğu gibi kemikleşme süreci gecikmektedir.^[1,2]

TERMİNOLOJİ

Modern uzatma cerrahisindeki terminoloji, İizarov ile başlamış, daha sonra bu alana en çok katkı yapan otörlerden biri olan Paley tarafından genişletilmiştir. İizarov, uzatma bölgesini monolokal veya bilokal olarak sınıflandırmış; uzatma sekansını ise ardışık (*consecutive*) ya da eş zamanlı (*simultaneous*) şeklinde tanımlamıştır. Ayrıca aksiyel hareketleri manevra kavramıyla açıklamış ve bunları kompresyon, distraksiyon, kompresyon-distraksiyon ya da distraksiyon-kompresyon olarak ifade etmiştir.

Uygulanan cerrahiye de amaca göre sınıflandırmıştır: Eğer işlem psödoartroz tedavisinde uygulanıyorsa osteosentez, uzatma amacıyla yapılıyorsa uzatma, epifiz üzerinden yapılıyorsa traksiyon epifizyolizis veya kompresyon epifizyolizis olarak adlandırmıştır. Örneğin, deforme düzeltilmesi içermeyen ve yalnızca kırık hattında kompresyon uygulaması ile tedavi edilen bir kaynama olgusu monolokal kompresyon osteogenezi şeklinde tanımlanmaktadır.^[6-9]

PALEY'İN KATKILARI VE İNDEKSLER

Paley ise daha çok uzatma hızı ve şeklini ifade eden bir terminoloji kullanarak, literatürdeki standardizasyon sorunlarının çözümüne büyük katkı sağlamıştır. Ancak bu yaklaşıma dair ilk ifadeler Aldegheri ve De Bastiani çalışmalarında görülmektedir. Bu araştırmacılar, kemik oluşum oranlarını karşılaştırmak için distraksiyon + konsolidasyon süresini (toplam tedavi süresi, gün) toplam uzatma miktarına santimetre (cm) oranlamış ve bu parametreye iyileşme indeksi (*healing index*, HI) adını vermiştir.^[8,10]

Paley ise bu oranı cm başına ay cinsinden tanımlayarak uzatma indeksi (*lengthening index*, LI) kavramını geliştirmiştir.^[10] Bu indeks aynı zamanda distraksiyon-konsolidasyon indeksi (DCI) olarak da adlandırılmaktadır. Hastanın eksternal fiksatörle geçireceği süre, planlanan uzatma miktarının DCI ile çarpılmasıyla hesaplanır. Örneğin, indeks 1 ay/cm ise; 3 cm uzatma için üç ay, 6 cm uzatma için altı ay eksternal fiksatör süresi öngörülür.^[11,12]

Farklı İndeksler ve Kullanımları

- *Bone Healing Index* (BHI): En yaygın kullanılan tanımdır. Fiksatör içerisinde geçirilen toplam süre (gün), elde edilen toplam uzatma miktarına (cm) bölünerek hesaplanır. Her santimetre için fiksatörle geçirilen süreyi (gün/cm) ifade eder.^[12]
- HI: BHI ile eş anlamlıdır.
- *External Fixation Index*: BHI ile aynı oranı ifade eder.
- DCI: Distraksiyon ve konsolidasyonun birlikte değerlendirilmesinde kullanılır.

Bu terimler, yeni kemik oluşumunun güvenilir ve geçerli kantitatif göstergeleri olarak literatürde kabul görmüştür.

Distraksiyon ve Konsolidasyon İndeksleri

Daha nadir kullanılan iki parametre ise distraksiyon indeksi (*distraction index*) ve konsolidasyon indeksi (*consolidation index*)'dir.

- Distraksiyon İndeksi: Distraksiyon süresi (gün)/toplam uzatma miktarı (cm).
- Konsolidasyon İndeksi: Konsolidasyon süresi (gün)/toplam uzatma miktarı (cm).

Bu parametreler özellikle çivi üzerinden yapılan uzatma olgularında, distraksiyon ve konsolidasyon evrelerini ayrı ayrı temsil etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Distraksiyon oranı (*distraction rate*)

Son olarak, günlük distraksiyon miktarı distraksiyon oranı (*distraction rate*) olarak tanımlanır.

- Örn: $4 \times 0,25 \text{ mm/gün} = 1 \text{ mm/gün}$.

UZATMA CERRAHİSİNDE KULLANILAN İMPLANTLAR

Halkasal Fiksatorler

Halkasal fiksatorler, yüksek stabilite ve modülerlik avantajı sağlayan eksternal fiksasyon sistemleridir. Transfiksasyon yöntemiyle kemiğe tutunarak, çok düzensizli düzeltmelerin yapılmasına olanak tanır. Özellikle tibia uzatmaları, kompleks deformitelerin düzeltilmesi, konjenital kısıllıkların tedavisi ve büyüme plağının korunmasının gerekli olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Bununla birlikte, halkasal fiksatorlerin uygulanması ve yönetimi teknik açıdan zorluklar içerir ve yüksek bir öğrenme eğrisi gerektirir. Ayrıca uzun kullanım süreleri hasta konforunu olumsuz etkileyebilmektedir.

Monolateral Fiksatorler

Monolateral fiksatorler, halkasal fiksatorlere kıyasla daha az invaziv olup hasta uyumunun daha yüksek olduğu implantlardır. Özellikle akondroplazi hastalarında humerus uzatmalarında, pediatrik dönemin erken evrelerinde femur ve tibia uzatma cerrahisinde, ayrıca hibrit tekniklerde internal tespitin distraksiyon gücü olarak kullanılabilir. Monolateral fiksatorlerin intramedüller çivi ile kombine edilmesi hibrit bir yaklaşım sunar. Bu yöntem sayesinde, uzatma sonrasında eksternal fiksator daha erken çıkarılabilir, kallus olgunlaşması desteklenebilir ve rehabilitasyon süreci hızlandırılabilir.

Uzaysal Fiksatorler

Uzaysal fiksatorler, altı kollu (*hexapod*) sistemleri sayesinde deformitelerin çok eksenli düzeltilmesini mümkün kılan gelişmiş eksternal fiksasyon cihazlarıdır. Özellikle oblik plan deformiteleri, kompleks konjenital deformitelerin aşamalı düzeltilmesi ve multiapikal deformitelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemlerin doğru şekilde reçetelenmemesi veya reçetenin hatalı uygulanması durumunda fragman kontrolü kaybedilebilir ve düzeltilmesi güç komplikasyonlar ortaya çıkabilir.

Kendiliğinden Uzayan İntramedüller Cihazlar

Günümüzde uzatma cerrahisinde kullanılan en modern implantlardan biri, motorize ve kendiliğinden uzayan intramedüller çivilerdir. Bu implantlar, daha estetik bir görünüm ve konforlu bir tedavi süreci sundukları için hasta memnuniyeti yüksektir. Transfiksasyon ihtiyacını ortadan kaldırmaları, enfeksiyon oranlarının düşmesini sağlamaktadır. Ayrıca distraksiyon sürecinin daha kontrollü yönetilmesine olanak tanıyarak hem hekim hem de hasta açısından daha güvenli bir uygulama imkânı sunar. Bununla birlikte, bu cihazların yüksek maliyetleri nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde kullanımları sınırlıdır. Ayrıca bazı sistemlerde uzama mekanizmasına bağlı teknik problemler ortaya çıkabilmektedir.

Sonuç olarak, uzatma cerrahisinde implant seçimi yalnızca cerrahi tekniğe değil, aynı zamanda hastanın ihtiyaçlarına ve planlanan uzatmanın hedeflerine göre şekillendirilmelidir. Teknolojik gelişmeler implant çeşitliliğini artırır da temel biyomekanik prensipler değişmeden kalmaktadır. Günümüzde uygulanan her yeni teknik, geçmişte tanımlanan prensipler üzerine inşa edilmiştir. Bu nedenle cerrahi planlama yapılırken biyomekanik ilkeler her zaman ön planda tutulmalıdır.

SONUÇ: BİLİM, TEKNOLOJİ VE PRENSİPLERİN BÜTÜNLÜĞÜ

Bilim tarih boyunca gözlemlerle başlamış, teknolojiyle gelişmiş ve prensipler aracılığıyla kalıcılığını korumuştur. Uzatma cerrahisi de bu evrimsel sürecin bir parçası olarak yıllar içinde büyük değişimler geçirmiştir. Kullanılan implantlar teknolojik yeniliklerle çeşitlenmiş, cerrahi teknikler daha rafine hale gelmiş ve hasta konforu belirgin şekilde artmıştır. Ancak bütün bu ilerlemelere rağmen, temel biyomekanik ve histolojik prensipler değişmeden varlığını sürdürmüştür.

Yaklaşık yarım yüzyıl önce stres-gerim etkisinin yeni kemik oluşumunu ve anjiyogenezi stimüle ettiği keşfedildiğinde, uzatma cerrahisinin klinik uygulamalarında

yeni bir dönem başlamıştır. Distraksiyon osteogenezi prensipleri, başta Gavril A. İlizarov olmak üzere pek çok araştırmacının katkılarıyla modern uzatma cerrahisinin temel taşlarını oluşturmuştur. Bugün bu prensipler yalnızca ekstremité uzatma işlemlerinde değil; psödoartroz, büyük kemik kayıpları, konjenital kısalıklar ve kronik enfeksiyonların tedavisinde de başarıyla uygulanmaktadır.

Bu bilimsel temel, zaman içinde yalnızca bir biyolojik süreç olmaktan çıkmış; gelişen teknolojilerle birlikte bir cerrahi felsefe ve hatta sanata dönüşmüştür. Günümüzde kullanılan motorize, kendiliğinden uzayan intramedüller çiviler, bilgisayar destekli eksternal fiksator sistemleri ve robotik cerrahi yaklaşımları, geçmişte ortaya konan prensipler üzerine inşa edilmiştir. Gelecekte implant tasarımları ve cerrahi yöntemler değişmeye devam edecek olsa da, uzatma cerrahisinin temel biyomekanik ilkeleri her zaman korunacaktır.

Son olarak, bu sürecin yalnızca cerrahlar veya araştırmacılar için değil, aynı zamanda hastalar için de bir yolculuk olduğu unutulmamalıdır. Uzatma cerrahisi geçiren her hasta, bu bilimsel ve teknolojik evrimin aktif bir parçasıdır. Onların sabrı, uyumu ve özverisi olmadan bu alandaki ilerlemeler mümkün olmazdı. Tıpkı bilim insanlarının keşif yolculuklarında olduğu gibi, uzatma cerrahisinde de en önemli unsur, hastanın bireysel yolculuğuna duyulan saygıdır.

KAYNAKLAR

1. İlizarov GA. The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues. In: İlizarov GA, editor. Transosseous osteosynthesis: Theoretical and clinical aspects of the regeneration and growth of tissue. Berlin (Germany): Springer-Verlag; 1992. p. 137-255. [Crossref](#)
2. Green SA, Dahl MT. The regenerate bone. In: Green SA, Dahl MT, editors. Intramedullary limb lengthening: Principles and practice. Cham (Switzerland): Springer International Publishing; 2018. p. 17-25. [Crossref](#)
3. Li G, Viridi AS, Ashhurst DE, Simpson AH, Triffitt JT. Tissues formed during distraction osteogenesis in the rabbit are determined by the distraction rate: Localization of the cells that express the mRNAs and the distribution of types I and II collagens. *Cell Biol Int* 2000;24(1):25-33. [Crossref](#)
4. López-Pliego EM, Giráldez-Sánchez M, Mora-Macias J, Reina-Romo E, Domínguez J. Histological evolution of the regenerate during bone transport: An experimental study in sheep. *Injury* 2016;47 Suppl 3:S7-s14. [Crossref](#)
5. Schmidt BL, Kung L, Jones C, Casap N. Induced osteogenesis by periosteal distraction. *J Oral Maxillofac Surg* 2002;60(10):1170-5. [Crossref](#)
6. Nogueira MP, Paley D, Bhavé A, Herbert A, Nocente C, Herzenberg JE. Nerve lesions associated with limb-lengthening. *J Bone Joint Surg Am* 2003;85(8):1502-10. [Crossref](#)
7. Aldegheri R, Trivella G, Lavini F. Epiphyseal distraction. Chondrodiastasis. *Clin Orthop Relat Res* 1989(241):117-27. [Crossref](#)
8. Aldegheri R, De Bastiani G, Renzi Brivio L. Diaphyseal lengthening of the lower limb (study of 78 cases). *Chir Organi Mov* 1985;70(2):111-9.
9. Saleh M, Donnan L. The technique of callotasis and its application to monofocal limb lengthening. In: De Bastiani G, Apley AG, Goldberg A, editors. *Orthofix external fixation in trauma and orthopaedics*. London (UK): Springer London; 2000. p. 458-66. [Crossref](#)
10. Paley D. Current techniques of limb lengthening. *J Pediatr Orthop* 1988;8(1):73-92. [Crossref](#)
11. Paley D, Herzenberg JE, Paremain G, Bhavé A. Femoral lengthening over an intramedullary nail. A matched-case comparison with İlizarov femoral lengthening. *J Bone Joint Surg Am* 1997;79(10):1464-80. [Crossref](#)
12. Putti V. The operative lengthening of the femur. 1921. *Clin Orthop Relat Res* 1990(250):4-7. [Crossref](#)