



Yeni nesil programlanabilir manyetik uzayan çiviler

New generation programmable magnetic lengthening nails

Mehmet Cemalettin Aksoy¹, Sancar Bakırcıoğlu²

¹Hacettepe Üniversitesi Tıp Fakültesi, Ortopedi ve Travmatoloji Ana Bilim Dalı, Ankara

²Çermik Devlet Hastanesi, Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, Diyarbakır

Geleneksel eksternal fiksator, hibrit sistemler veya mekanik olarak uzatılan intramedüller çivilerin beraberinde getirdiği sorunlar göz önünde bulundurulduğunda pediatrik ve adolesan nüfus için dışarıdan kontrollü motorize uzatma çivileri günümüzde oldukça yaygın ve etkili bir yöntem haline gelmiştir. Manyetik çivilerde programlanabilen uzatma çivinin distraksiyonunun hassas olarak yapılabilmesine olanak sağlayan, girişimsel olmayan bir işlemdir. Günümüzde kullanımı mümkün olan, az sayıda programlanabilen manyetik motorize uzayan çivi mevcuttur. Yeni nesil programlanabilen uzatma çivileri; kapsamlı bir ameliyat öncesi planlama ve hazırlık, iyi bir deneyim ve cerrahi teknik ve aile eğitimi ile güvenle uygulanabilen ve sonuçları tatmin edici bir tedavi yöntemidir.

Anahtar sözcükler: ekstremite eşitsizliği; intramedüller çivi; kemik uzatma; manyetik

Considering the problems associated with traditional external fixators, hybrid systems or mechanically lengthening intramedullary nails, externally controlled motorized lengthening nails have become a very popular and effective method for the pediatric and adolescent population. Programmable lengthening of magnetic nails is a non-invasive procedure that allows precise distraction of the nail. There are few programmable motorized lengthening nails available in the market today. New generation programmable magnetic lengthening nails; it is a treatment method that can be safely applied with a comprehensive pre-operative planning and preparation, good experience and surgical technique and family training, with satisfactory results.

Key words: limb length discrepancy; intramedullary nail; bone lengthening; magnetic

Kısa olan kemiklerin uzatılmasına yönelik veriler 1900'lü yılların başına dayansa da^[1] ilk olarak 1970'li yıllardan itibaren yaptığı çalışmalarla eksternal fiksator yardımcı uzatmaya olanak sağlayan İizarov tekniği tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.^[2-4] Sirküler ve monolateral eksternal fiksatorün beraberinde getirdiği yumuşak doku problemleri, pin dibi enfeksiyonları, komşu eklem dislokasyonu, uzun süre fiksator taşımak ve fiksator çıkartıldığında yeniden kırık oluşması gibi problemler nedeniyle^[5-7] kemiği "içeriden uzatmak" fikri ortaya atılmıştır. İlk aşamalarda fiksator ve intramedüller çivi kombinasyonları denenmiştir. Çivi üzerinden uzatma tekniği (*Lengthening over nail*, LON) deformite ve uzatma cerrahisi için kullanılmaya başlanmıştır. Fiksatorün yardımıyla çivi üzerinden hem uzatma hem de kısaltma mümkün olmaktadır. Bu cerrahi tekniğin getirdiği zorluklar arasında ise artmış kan kaybı, yağ embolisi, implant ilişkili komplikasyonlar ve en önemlisi ise eksternal fiksatorle bağlı olarak gelişen pin dibi enfeksiyonun

ilerlemesi nedeniyle oluşan intramedüller enfeksiyon bulunmaktadır.^[8,9] Fakat geleneksel İizarov tekniğine kıyasla hem eksternal fiksator hem de refraktür oranları azalmıştır.^[10]

Bliskunov'un teleskopik çiviği ilk kez geliştirdiği 1983'ten bu yana, kemik uzatma anlayışımızda önemli ilerlemeler olmuştur. İlk etapta mekanik bir şekilde uzatılan intramedüller çivilerin neden olduğu kırık veya dizilim bozukluğu gibi olumsuzluklar^[11-13], teknolojik gelişmeler sayesinde dışarıdan elektrik akımı veya manyetik alan kurallarından faydalanılarak yeni nesil programlanabilen uzatma çivilerinin geliştirilmesine yol açmıştır.^[14] Geleneksel eksternal fiksator, hibrit sistemler (eksternal fiksator+intramedüller çivi) veya mekanik olarak uzatılan intramedüller çivilerin beraberinde getirdiği sorunlar göz önünde bulundurulduğunda pediatrik ve adolesan nüfus için dışarıdan kontrollü motorize uzatma çivileri günümüzde oldukça yaygındır ve etkili bir yöntem haline gelmiştir.^[15,16]

İletişim / Contact: Prof. Dr. Mehmet Cemalettin Aksoy • E-posta / E-mail: aksoyc@hotmail.com

ORCID iD: Mehmet Cemalettin Aksoy, 0000-0003-0295-7028 • Sancar Bakırcıoğlu, 0000-0001-5403-3324

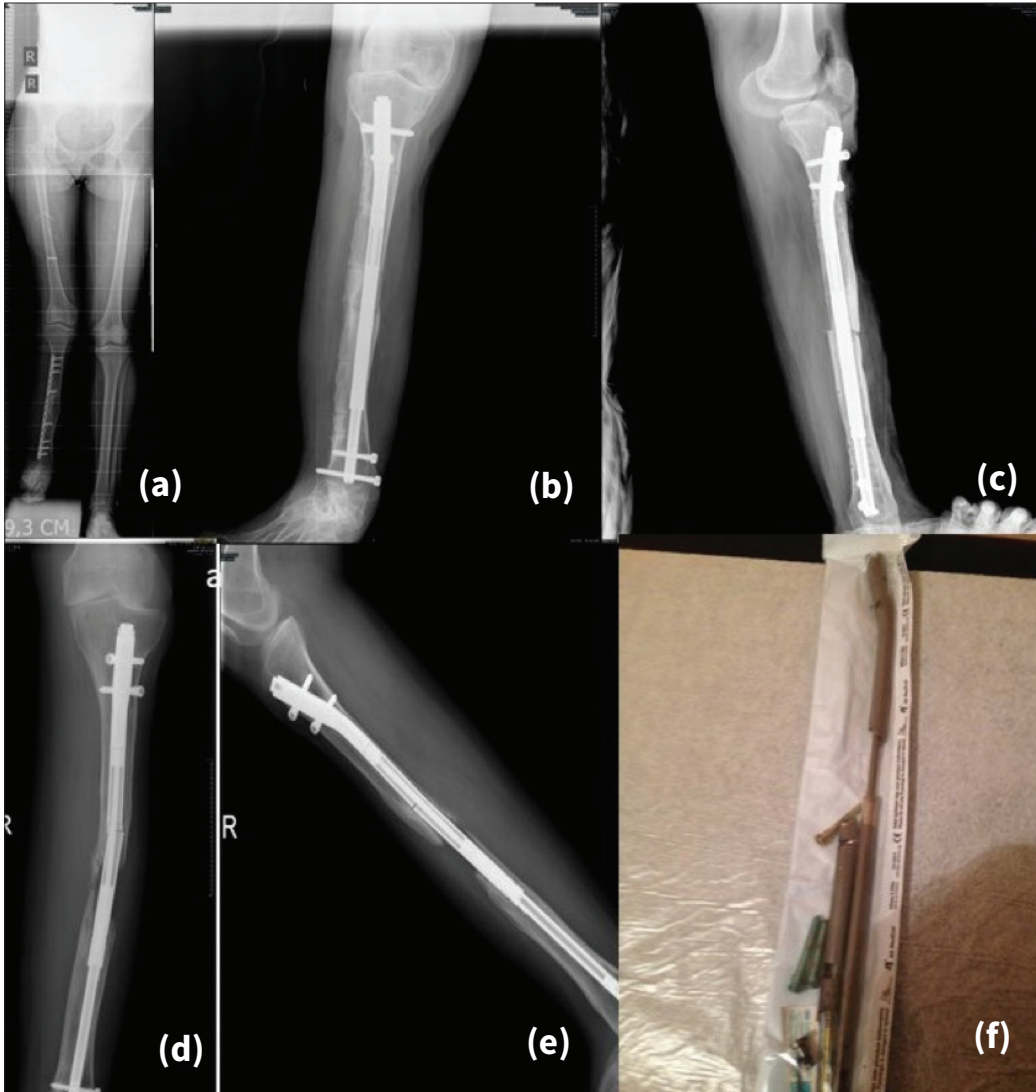
Geliş / Received: 6 Aralık 2021 • **Kabul / Accepted:** 22 Aralık 2021

UZAYAN İNTRAMEDÜLLER ÇİVİLER VE ÖZELLİKLERİ

Uzayan intramedüller çiviler, mekanik ve uzaktan (kumanda ile) uzatılabilen motorlu çiviler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İlk adımı atan Bliskunov'un mekanik teleskopik çivisinden sonra Albizzia ve Guichet mekanik çivileri geliştirmiştir^[17] fakat mekanik uzayan çiviler arasında en yaygın olarak kullanılanı ISKD (*Intramedullary skeletal kinetic distractor*) çivisidir.^[18] 2000'li yılların başından itibaren kullanılan ISKD çivisi iç içe geçen iki teleskopik çivinin 3-9°'lik küçük rotasyonel hareketler sayesinde uzaması üzerine kurulu bir prensip ile çalışır. Hastanın günlük ayak rotasyon hareketleri ile ve eksternal fiksatörlerin yardımı olmadan uzunu manuel olarak sallaması ile kademeli olarak uzatma sağlamaktadır. Hastalar, cildin

üzerinden bir monitör vasıtası ile uzatma miktarını takip edebilseler de hem maliyet oranının yüksek olması hem de uzatma oranını kontrol etmede güçlük çekilmesi,^[19,20] çivinin kırılması (Şekil 1)^[21], kaynama gecikmesi,^[22,23] ve ameliyat sonrası özellikle ilk iki hafta oluşan ağrı^[24] gibi bazı komplikasyonlar, olumsuz yanları arasında sayılmaktadır.

Günümüzde kullanımı mümkün olan az sayıda programlanabilen motorize uzayan çivi mevcuttur. Bunlardan ilki olan ve 1997 yılında tanıtılan FITBONE® (Wittenstein, Igergheim, Almanya), motorize intramedüller uzatma çivileri kavramını ortaya çıkarmıştır.^[25] Çıkarılan ilk öncü modelin çapı 13 mm olup proksimal kısmında 10 mm çapında bir motoru mevcuttur. Çivinin proksimali ve distali kilitli vidalarla sabitlenir ve en fazla 8 cm'ye kadar

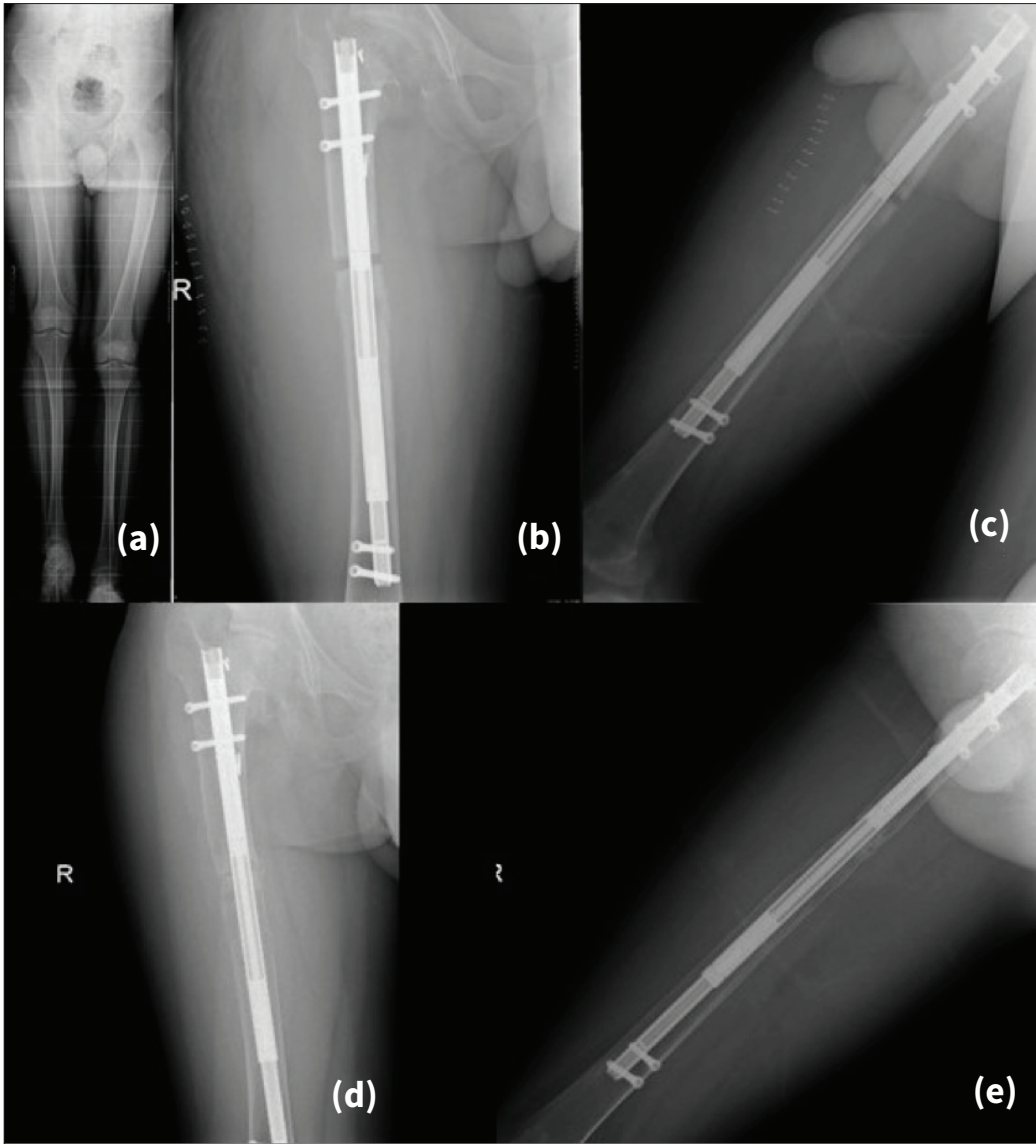


Şekil 1.a-f. Fibular Hemimeli tanılı hastaya daha önce multiple operasyonlar uygulanmış olup sağ alt ekstremitesindeki kısalığı için (a) ISKD çivisi ile uzatma planlandı (b,c). Uzatma tamamlanmadan çivide meydana gelen kırık nedeniyle (d,e,f) uzatmaya son verilerek plak ile fiksasyon uygulandı.

uzamaya olanak verir. Çivinin sahip olduğu motor, deri altındaki bir implantın enerji aktarımı yapan sistemi sayesinde üretilen bir elektrik akımı ile çalışmaktadır. Yüksek frekanslı elektrik enerjisi ile cilt üzerinden çivinin motoruna enerji aktararak uzatma uygulanabilmektedir.

PRECICE® (Ellipse Technologies, Inc., Irvine, Kaliforniya, ABD) manyetik uzatma çivisinin ilk jenerasyonu (P1) ise^[26] 2012 yılında geliştirilmiş olup ideal hastada en fazla 6,5 cm uzatma kapasitesine sahiptir ve iki parçadan oluşmaktadır. P1 ve bundan sonra geliştirilecek manyetik çivilerin en büyük avantajı uzatmanın yanı sıra cihazın terse çalıştırılarak kısaltma veya kompresyon

yapmasına, hatta uzatmaya ara verme gibi olanaklara imkân tanımalarıdır. Manyetik alan kumandasının yedi dakika süre ile çalıştırılması sonucu 1 mm uzamaya olanak sağlanabilmektedir. Çivinin mekanik özellikleri nedeniyle ameliyat sonrası uzatma döneminde hastalar yük vermeden mobilize olabilmektedir. Manyetik alan kumandası ile çivi arasında 5 cm mesafe olması gerektiğinden obez adölesanlarda uzatma, problem yaratabilmektedir. Bu sorunun önüne uyluğun distal kısmı daha zayıf olduğundan çivinin retrograd kullanımı ile geçilmeye çalışılmıştır. Takiben geliştirilen PRECICE® 2 (P2) ise tek parçadan oluşup 8 cm'ye kadar uzatmaya olanak tanımaktadır (Şekil 2). Daha dayanıklı biyomekanik



Şekil 2.a-e. Üç yaşında geçirdiği araç dışı trafik kazası sonucu femur boyun kırığı nedeniyle avasküler nekroz ve trokanterik aşırı büyümesi olan hastada gelişen sağ alt ekstremitedeki kısalık nedeniyle (a), PRECICE femur çivisi ile uzatma uygulandı (b,c). Hastanın 1,5 yıl sonraki kontrol osteotomi hattında sorunsuz bir kaynama mevcuttu (d,e).

temellere sahip olan çivi, hastaların uzatma esnasında yük vermesine izin vermektedir. PRECICE modelleri iyi bir kemik iyileşmesi, yüksek doğruluk, hassasiyet ve görece düşük komplikasyon oranı ile ekstremite uzatma ameliyatlarında bir devrim yaratmıştır.^[27-29] Bununla birlikte, daha fazla ağırlık taşımaya izin verecek ve implantın kendisinin sebep olduğu komplikasyonları azaltacak bir implanta halen ihtiyaç duyulmaktadır.^[30]

Intramedüller manyetik çivilerin en yeni ve üçüncü jenerasyonu olarak PRECICE STRYDE® (NuVasive Specialized Orthopedics, San Diego, Kaliforniya) çivisi geliştirilmiştir.^[31] Önceki titanyum modellerden temel farkı, sertleştirilmiş paslanmaz çelikten yapılmış olmasıdır. PRECICE çivisi sadece 22-34 kg kadar yük vermeye olanak tanıırken PRECICE STRYDE yaklaşık %400 daha fazla (68-113 kg) yük vermeye olanak tanımaktadır. Bu sayede uzatma ve konsolidasyon evrelerinde hastaların yük vermelerine ve günlük yaşam aktivitelerinden geri kalmamalarına olanak tanımaktadır.^[14,16]

MANYETİK ÇİVİLERDE PROGRAMLANABİLEN UZATMA

Manyetik çivilerde programlanabilen uzatma, çivinin distraksiyonunun hassas olarak yapılabilmesine olanak sağlayan, girişimsel olmayan bir işlemdir. Programlanabilen uzatma, elektronik olarak çalıştırılan bir motor ve motor tarafından döndürülen iki kalıcı nadir toprak mıknatısı (*rare-earth magnet*) içerir. Bu mıknatıslar alışılagelmiş mıknatıslardan farklıdır. Nadir toprak mıknatısları, nadir toprak elementlerinin alaşımlarından yapılmış güçlü kalıcı mıknatıslardır. 1970'lerde ve 1980'lerde geliştirilen nadir toprak mıknatısları, yapılan en güçlü kalıcı mıknatıs türüdür ve ferrit veya alnico (alüminyum-nikel-kobalt) mıknatıslar gibi klasik mıknatıslardan önemli ölçüde daha güçlü manyetik alanlar üretir. Tipik olarak nadir toprak mıknatısları tarafından üretilen manyetik alan 1,4 Tesla'yı aşabilirken, ferrit veya alnico mıknatıslar ise 0,5-1 Tesla'lık manyetik alanlar oluşturabilir. Uzaktan kontrol edilebilen bu mıknatıslar PRECICE çivisine 5,5 cm'den az bir alana uygulandığında manyetik alan sayesinde çivi içerisindeki nadir toprak mıknatısı döner ve distraksiyon çubuğu, mıknatıslarının dönüş yönüne bağlı olarak intramedüller çiviye uzatır veya kısaltır. Uzaktan kontrol edilebilen çivi uygulandıktan sonra ilk kez ameliyat odasında kontrol edilir. 1 mm'lik test distraksiyonu uygulanır ve radyografik olarak kontrol edilir. Ameliyatı takiben 0-7 günlük bekleme süresinden sonra günlük uzatma programı cerrah tarafından hazırlanır ve çivi, hasta veya bakım vereni tarafından günlük olarak uzatılır. Hastanın kontrollerinde, eğer gerekiyorsa, cihaz terse çalıştırılarak kısaltma veya kompresyon yapmaya, hatta uzatmaya ara vermeye olanak tanıyabilir.^[14]

GÜNCEL LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ VE KOMPLİKASYONLAR

Son yıllarda yeni nesil programlanabilen uzatma çivilerinin kullanımı oldukça yaygın hale gelmiştir. Fakat bu konu halen araştırılmaya açık olup giderek artan oranda çalışmalar yapılmaktadır. FITBONE® çivisine ait ilk sonuçlar Avrupa ve Avustralya'dan bildirilmiştir; genellikle küçük vaka serileri üzerine yapılan sonuçlar tatmin edicidir. Singh ve ark., 2001-2004 yılları arasında 13 ve 11 mm tibia çivisi ile uzatma uygulamışlardır. Ortalama 4 cm uzatma sağlamışlar ve hastalar yük vermeye ortalama sekiz ay sonra başlamışlardır. Bir hastada angüler deformasyon, bir hastada geç kaynama, iki hastada uzatma gerçekleştirilememesi nedeniyle daha geniş çaplı çivi ile değişimini komplikasyon olarak vurgulamışlardır. Fakat hiçbir hastada sistemin elektrik aksamında (subkutan anten ve motora bağlanan kablo) bir sorun olmadığını belirtmişlerdir.^[32] Kreig ve ark., sekiz adölesanda FITBONE uzatma çivisi uyguladıkları çalışmada ortalama 3,8 cm'lik uzatma sağlamışlar ve eksternal fiksatlara göre daha kısa hastanede kalma süresi ve daha az komplikasyon oranı bildirmişlerdir.^[33] Black ve ark. ise eksternal fiksator ile FITBONE uzatma çivisini kıyaslamışlardır. Çivi uygulanan grupta komplikasyon sayısında azalma olduğunu belirtmişler ve yine çivi uygulanan hastaların ameliyat sonrası ilk dönemden sonra önemli ölçüde daha az ağrı yaşadıkları, daha az yoğunlukta fizik tedavi gerektirdiklerini ve günlük aktivitelerde daha az kesinti yaşadıklarını raporlamışlardır.^[34]

FITBONE çivisinden daha sonra ortaya çıkan ilk nesil PRECICE çivisine (P1) dair yapılan çalışmalarda Kirane ve ark., proksimal femoral osteotomi yapılan hastalarda varus-prokurvatum açılmasına, proksimal tibial osteotomi yapılan hastalarda ise valgus-prokurvatum açılmasına eğilim olduğunu gözlemlediler. Bu açısal değişikliklerin tibial çivilerde daha sık olduğunu ve *Poller* vidaları ile önüne geçtiklerini belirtmişlerdir.^[26] Ön çalışmalarda bildirilen açılma problemini özellikle vurgulayan çalışmalar neticesinde ikinci nesil PRECICE çivisi (P2) geliştirilmiştir. Monoblok halinde olan implant eğilme kuvvetlerine karşı yorulma mukavemetinde en az iki kat daha güçlüydü ve dişliler ile kılavuz vida arasında üç kat daha güçlü bağlantıya sahipti. İkinci nesil PRECICE çivisi ve takibinde ortaya çıkan paslanmaz çelikten yapılan PRECICE STRYDE çivisine yönelik çalışmalar ise tatmin ediciydi. İliadis ve ark.'nın kurguladığı çalışmada pediatrik ve adölesan çalışma grubunda uyguladıkları toplamda 50 PRECICE ve PRECICE STRYDE çivilerinin sonuçlarını bildirmişlerdir. Yirmi sekiz antegrad femoral, 13 retrograd femoral ve beş tibial PRECICE çivisi ile iki tibial ve iki femoral PRECICE STRYDE çivisi uygulamışlardır. Ortalama yaşları 15 (dağı-

lim: 12-17) olan hasta grubunda tedavi sonucu 46,5 mm uzatma sağlamışlardır. Yedi hastada eklem sertliği ve iki hastada prominent vidanın konsolidasyonu takiben çıkartılmak zorunda kalması dışında ciddi bir komplikasyon görmediklerini belirtmişlerdir.^[35] Galal ve ark. ise 2021 yılında 36 adet PRECICE ve 30 adet PRECICE STRYDE çivisinin etkinliklerini kıyaslayan bir çalışma yayınlamışlardır. Tek merkezden düzenlenen bu çalışmada gruplar arasında diz ve kalça eklem hareket açıklıkları açısından bir fark yoktu. Fakat kemik iyileşme endeksi ve distraksiyon hızı açısından anlamlı bir fark bulunuyordu (STRYDE grubunda daha yavaş). STRYDE grubunda hiçbir hastada çivi ile ilişkili mekanik bir komplikasyon yokken, eski model PRECICE grubunda üç hastada çiviye bağlı mekanik komplikasyon gelişmiştir. Sonuç olarak, daha düşük kemik iyileşme endeksi ve distraksiyon hızına rağmen STRYDE çivisinin mekanik komplikasyon açısından daha avantajlı olduğunu vurgulamışlardır.^[36]

Eksternal fiksator sistemleri ile yeni nesil programlanabilen uzatma çivilerini karşılaştıran az sayıda çalışma mevcuttur. Laubscher ve ark., kurguladıkları çalışmada 20 olguda PRECICE çivisi ve 13 hastada ise monolateral *Limb reconstruction system* (LRS) sistemi ile uzatma uygulamıştır.^[37] Kemik iyileşme endeksi PRECICE grubu için 31,3 gün/cm (0,93 mm/gün) iken LRS grubu için ise 47,1 gün/cm (0,83 mm/gün) olduğunu belirtmişlerdir. Bu erken iyileşmenin PRECICE grubunda çok daha erken tam yük vermeye olanak sağladığını vurgulamışlardır. LRS grubunda pin yeri enfeksiyonu, tekrarlayan deformite gibi komplikasyonlar görüldüğünü ve hastaların implant toleransı ve kozmetik memnuniyet açısından PRECICE grubunda daha memnun olduklarını raporlamışlardır. Horn ve ark.'nın yaptıkları çalışmada ise 15 hastada FITBONE motorize intramedüller çivi 15 hastada ise sirküler eksternal fiksator (*Taylor Spatial Frame*) ile uzatma uygulamışlardır.^[38] İki grup; yaş, cinsiyet, etiyoloji ve uzatma miktarı bakımından (ortalama 35 mm) eşit gruplardır. Radyografik kemik iyileşme endeksini anlamlı olarak çivi grubunda daha iyi bulmuşlardır (1,5 ay/cm'e karşı 1,9 ay/cm). Diz eklemi hareket açıklığının hem uzatma tamamlandığında hem de uzatmadan altı ay sonra, yine çivi grubunda anlamlı olarak daha iyi olduğunu vurgulamışlardır ve fiksator grubunda daha çok komplikasyon gördüklerini belirtmişlerdir. Richardson ve ark. ise fiksatorler yardımcı çivi üzerinden uzatma ile manyetik çivileri kıyaslayan bir çalışma kurgulamışlardır.^[39] On dokuz LON ve 39 manyetik çivi uygulamasını dâhil ettikleri çalışmada manyetik çivi grubunun LON grubuna göre hasta başına daha az cerrahi geçirdiğini (2,1'e karşı 3,1) ve daha az kaynama süresine sahip olduğunu (100 güne karşı 136 gün) belirtmişlerdir. Manyetik çivinin implant maliyeti fazla olsa da geçirilen cerrahi sayısının daha düşük olması nedeniyle

toplam maliyet açısından iki grup arasında anlamlı bir fark olmadığını (50.255\$'a karşı 44.449\$) vurgulamışlardır. Teleskopik çivilerde revizyon oranları literatürde oldukça değişken olup, boy uzatma veya konjenital hastalıklarda %0-30 civarında değişkenlik gösterirken^[14,40] osteogenezis imperfekta gibi hastalıklarda ise %50'ye varan revizyon oranları bildirilmiştir.^[41]

Travma için yaygın olarak kullanılan diğer intramedüller çivilerin aksine birçok cerrah, işlem tamamlandıktan sonra teleskopik çivilerin rutin olarak çıkarılmasını önermektedir. Çivinin kırılması, implant ilişkili enfeksiyonlar gibi nedenlerin yanı sıra implantın çıkartılmak istenmesinin başlıca nedenlerinden biri, manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ile varsayılan uyumsuzluktur. Kullanım talimatları, PRECICE manyetik çivilerin MRG ortamında güvenli olmadığını belirtmektedir.^[14] Teorik kaygılar arasında implant migrasyonu (yer değiştirmesi), implant ısınması ve uzatma mekanizmasının istem dışı uzaması yer almaktadır. Fakat son dönemde yapay kemik (*saw-bone*), kemik içine yerleştirilen manyetik çiviler üzerinde yapılan çalışmalar manyetik çivinin 1,5 ve 3,0 Tesla'lık MRG ortamlarında bu implanta etki eden ısıtma, uzama ve yer değiştirme kuvvetlerinde değişiklik yapmadığını ve bu hastalarda MRG'nin güvenli olacağını savunmaktadır.^[42] Bu güncel çalışmalar çivinin çıkarılması gerektiği kanısını son dönemde değiştirmeye başlamıştır.

SONUÇ

Yeni nesil programlanabilen uzatma çivileri; kapsamlı bir ameliyat öncesi planlama ve hazırlık, iyi bir deneyim ve cerrahi teknik ve aile eğitimi ile güvenle uygulanabilen ve sonuçları tatmin edici bir tedavi yöntemidir. Diğer yandan ise yük vermeye olanak sağlayan bu motorlu çivilerin maliyet oranının yüksek olması ve kolay erişilememesi ise olumsuz yanları arasında sayılabilir.

KAYNAKLAR

1. Codivilla A. The classic: on the means of lengthening, in the lower limbs, the muscles and tissues which are shortened through deformity. *Clin Orthop Relat Res* 2008;466(12):2903-9. **Crossref**
2. Ilizarov G, Deviatov A. Surgical lengthening of the shin with simultaneous correction of deformities. *Ortop Travmatol Protez* 1969;30(3):32-7.
3. Ilizarov G, Deviatov A. Surgical elongation of the leg. *Ortop Travmatol Protez* 1971;32(8):20-5.
4. Ilizarov GA. The principles of the Ilizarov method. *Bull Hosp Jt Dis Orthop Inst* 1988;48(1):1-11.
5. Paley D. Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique. *Clin Orthop Relat Res* 1990;250:81-104. **Crossref**

6. Eldridge JC, Bell DF. Problems with substantial limb lengthening. *Orthop Clin North Am* 1991;22(4):625-31. [Crossref](#)
7. Tjernström B, Olerud S, Rehnberg L. Limb lengthening by callus distraction: complications in 53 cases operated 1980-1991. *Acta Orthop Scand* 1994;65(4):447-55. [Crossref](#)
8. Riemer BL, Butterfield SL. Comparison of reamed and nonreamed solid core nailing of the tibial diaphysis after external fixation: a preliminary report. *J Orthop Trauma* 1993;7(3):279-85. [Crossref](#)
9. Wheelwright E, Court-Brown C. Primary external fixation and secondary intramedullary nailing in the treatment of tibial fractures. *Injury* 1992;23(6):373-6. [Crossref](#)
10. Paley D, Herzenberg JE, Paremian G, Bhavre A. Femoral lengthening over an intramedullary nail. A matched-case comparison with Ilizarov femoral lengthening. *J BJS* 1997;79(10):1464-80. [Crossref](#)
11. Bliskunov A. Intramedullary distraction of the femur (preliminary report). *Ortop Travmatol Protez* 1983(10):59-62.
12. Calder PR, Laubscher M, Goodier WD. The role of the intramedullary implant in limb lengthening. *Injury* 2017;48:S52-S58. [Crossref](#)
13. Witt A, Jäger M. Results of animal experiments with an implantable femur distractor for operative leg lengthening (author's transl). *Arch Orthop Unfallchir* 1977;88(3):273-9.
14. Paley D. PRECICE intramedullary limb lengthening system. *Expert Rev Med Devices* 2015;12(3):231-49. [Crossref](#)
15. Richard HM, Nguyen DC, Birch JG, Roland SD, Samchukov MK, Cherkashin AM. Clinical implications of psychosocial factors on pediatric external fixation treatment and recommendations. *Clin Orthop Relat Res* 2015;473(10):3154-62. [Crossref](#)
16. Fragomen AT, Wellman D, Rozbruch SR. The PRECICE magnetic IM compression nail for long bone nonunions: a preliminary report. *Arch Orthop Trauma Surg* 2019;139(11):1551-60. [Crossref](#)
17. Guichet J. Leg lengthening and correction of deformity using the femoral Albizzia nail. *Der Orthopade* 1999;28(12):1066-77. [Crossref](#)
18. Cole JD, Justin D, Kasparis T, DeVlugt D, Knobloch C. The intramedullary skeletal kinetic distractor (ISKD): first clinical results of a new intramedullary nail for lengthening of the femur and tibia. *Injury* 2001;32:129-39. [Crossref](#)
19. Kenaway M, Krettek C, Liodakis E, Meller R, Hankemeier S. Insufficient bone regenerate after intramedullary femoral lengthening: risk factors and classification system. *Clin Orthop Relat Res* 2011;469(1):264-73. [Crossref](#)
20. Mahboubian S, Seah M, Fragomen AT, Rozbruch SR. Femoral lengthening with lengthening over a nail has fewer complications than intramedullary skeletal kinetic distraction. *Clin Orthop Relat Res* 2012;470(4):1221-31. [Crossref](#)
21. Burghardt R, Herzenberg J, Specht S, Paley D. Mechanical failure of the Intramedullary Skeletal Kinetic Distractor in limb lengthening. *J Bone Joint Surg Br* 2011;93(5):639-43. [Crossref](#)
22. Wang K, Edwards E. Intramedullary skeletal kinetic distractor in the treatment of leg length discrepancy—a review of 16 cases and analysis of complications. *J Orthop Trauma* 2012;26(9):e138-e44. [Crossref](#)
23. Simpson A, Shalaby H, Keenan G. Femoral lengthening with the intramedullary skeletal kinetic distractor. *J Bone Joint Surg Br* 2009;91(7):955-61. [Crossref](#)
24. Lee DH, Ryu KJ, Song HR, Han S-H. Complications of the Intramedullary Skeletal Kinetic Distractor (ISKD) in distraction osteogenesis. *Clin Orthop Relat Res* 2014;472(12):3852-9. [Crossref](#)
25. Baumgart R, Betz A, Schweiberer L. A fully implantable motorized intramedullary nail for limb lengthening and bone transport. *Clin Orthop Relat Res* 1997(343):135-43. [Crossref](#)
26. Kirane YM, Fragomen AT, Rozbruch SR. Precision of the PRECICE® internal bone lengthening nail. *Clin Orthop Relat Res* 2014;472(12):3869-78. [Crossref](#)
27. Calder PR, McKay JE, Timms AJ, Roskrow T, Fugazzotto S, Edel P, et al. Femoral lengthening using the Precice intramedullary limb-lengthening system: outcome comparison following antegrade and retrograde nails. *Bone Joint J* 2019;101(9):1168-76. [Crossref](#)
28. Fragomen AT, Rozbruch SR. Retrograde magnetic internal lengthening nail for acute femoral deformity correction and limb lengthening. *Expert Rev Med Devices* 2017;14(10):811-20. [Crossref](#)
29. Fragomen AT, Kurtz AM, Barclay JR, Nguyen J, Rozbruch SR. A comparison of femoral lengthening methods favors the magnetic internal lengthening nail when compared with lengthening over a nail. *HSS Journal* 2018;14(2):166-76. [Crossref](#)
30. Lee DH, Kim S, Lee JW, Park H, Kim TY, Kim HW. A comparison of the device-related complications of intramedullary lengthening nails using a new classification system. *Biomed Res Int* 2017;2017:8032510. [Crossref](#)
31. Schiedel F. Extracorporeal noninvasive acute retraction of STRYDE® for continued lengthening in cases with limited nail stroke: a technical less invasive solution to reload the STRYDE®. *Arch Orthop Trauma Surg* 2021;141:899-905. [Crossref](#)
32. Singh S, Lahiri A, Iqbal M. The results of limb lengthening by callus distraction using an extending intramedullary nail (Fitbone) in non-traumatic disorders. *J Bone Joint Surg Br* 2006;88(7):938-42. [Crossref](#)
33. Krieg AH, Speth BM, Foster BK. Leg lengthening with a motorized nail in adolescents. *Clin Orthop Relat Res* 2008;466(1):189-97. [Crossref](#)
34. Black SR, Kwon MS, Cherkashin AM, Samchukov ML, Birch JG, Jo C-H. Lengthening in congenital femoral deficiency: a comparison of circular external fixation and a motorized intramedullary nail. *J Bone Joint Surg Am* 2015;97(17):1432. [Crossref](#)
35. Iliadis AD, Palloni V, Wright J, Goodier D, Calder P. Pediatric lower limb lengthening using the PRECICE nail: our experience with 50 cases. *J Pediatr Orthop* 2021;41(1):e44-e49. [Crossref](#)

36. Galal S, Shin J, Principe P, Khabyeh-Hasbani N, Mehta R, Hamilton A, et al. STRYDE versus PRECICE magnetic internal lengthening nail for femur lengthening. Arch Orthop Trauma Surg 2021;1-7. [Crossref](#)
37. Laubscher M, Mitchell C, Timms A, Goodier D, Calder P. Outcomes following femoral lengthening: an initial comparison of the Precice intramedullary lengthening nail and the LRS external fixator monorail system. Bone Joint J 2016;98(10):1382-8. [Crossref](#)
38. Horn J, Grimsrud Ø, Dagsgard AH, Huhnstock S, Steen H. Femoral lengthening with a motorized intramedullary nail: a matched-pair comparison with external ring fixator lengthening in 30 cases. Acta Orthopaedica 2015;86(2):248-56. [Crossref](#)
39. Richardson SS, Schairer WW, Fragomen AT, Rozbruch SR. Cost comparison of femoral distraction osteogenesis with external lengthening over a nail versus internal magnetic lengthening nail. JAAOS 2019;27(9):e430-e6. [Crossref](#)
40. Haider T, Wozasek G. Repeated intramedullary stabilization following failed telescopic nail lengthening—an appropriate treatment strategy. Injury 2019;50(11):2060-4. [Crossref](#)
41. Wirth T. The orthopaedic management of long bone deformities in genetically and acquired generalized bone weakening conditions. J Child Orthop 2019;13(1):12-21. [Crossref](#)
42. Gomez C, Nelson S, Speirs J, Barnes S. Magnetic intramedullary lengthening nails and MRI compatibility. J Pediatr Orthop 2018;38(10):e584-e7. [Crossref](#)