



YÜKSEK FREKANS VE DÜŞÜK MAGNİTÜDLÜ MEKANİK TİTREŞİM UYGULAMALARI
HIGH-FREQUENCY AND LOW-MAGNITUDE MECHANICAL VIBRATION STIMULI

Zeynep HACIOĞLU¹, Nisa Gül AMUK¹

¹Erciyes Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Ortodonti Anabilim Dalı, Kayseri

ÖZ

Mekanik titreşim uygulaması medikal alanda kullanılmasının yanı sıra diş hekimliği ve ortodonti pratiğinde de çeşitli şekillerde uygulama alanları kazanmaya başlamıştır. Titreşim uygulamasının diş hekimliği alanında araştırılmaya başlanmasıyla; ağrının azaltılması, kemik iyileşmesinin hızlandırılması, kemik rezorpsiyonunun azaltılması ve apozisyonunun artırılması, ortodontik diş hareketinin hızlandırılması, ortodontik olarak indüklenmiş kök rezorpsiyonunun önlenmesi gibi pek çok alanda klinik öncesi ve klinik çalışmalara konu olmuştur. Bu araştırmalar özet olarak, mekanik titreşim uygulamalarıyla tedavi sürecinin kısaltılabileceği, tedavi sürecinde meydana gelen yan etkilerin azaltılabileceği, hasta konforu ve kooperasyonun artırılarak tedavilerin başarısının artırılabilceği yönünde bulgular sunmaktadır. Bu derlemede, diş hekimliği ve ortodonti pratiğinde kullanılabilecek mekanik titreşim uygulamaları çeşitli yönleriyle ele alınmıştır.

ABSTRACT

Mechanical vibration has begun to acquire application fields in various ways in dentistry and orthodontic practice in addition to being used in the medical field. With the start of research into vibration application in the field of dentistry, it has been the research topic for preclinical and clinical studies in many areas such as relieving pain, accelerating bone healing, reducing bone resorption and increasing bone apposition, accelerating orthodontic tooth movement, reducing orthodontically induced root resorption. The findings from these studies indicate that with mechanical vibration applications the treatment process can be shortened, the side effects occurring during the treatment process can be reduced, and the success of the treatments can be increased by increasing patient comfort and cooperation. In this review, mechanical applications that can be used in dentistry and orthodontic practice are discussed in various aspects.

Anahtar kelimeler: Analjezi, diş hekimliği, ortodonti, osteogenez, titreşim.

Keywords: Analgesia, dentistry, orthodontics, osteogenesis, vibration.

GİRİŞ

Titreşim bir denge noktası etrafındaki mekanik salınım olarak tanımlanır (1) ve yoğunluğunu belirleyen üç temel biyomekanik özelliğe sahiptir: Frekans, bir saniyede tamamlanan döngü sayısını belirler ve Hertz (Hz) ile ölçülür. Genlik (amplitüd) terimi hareketin yüksekliğini belirler ve milimetre (mm) ile ölçülür. Titreşimin büyüklüğü (magnitüd) yer çekimi alanın etkisiyle oluşur gram (g) ile ifade edilir (2,3).

Titreşimlerin terapötik amaçla kullanılmasına ilişkin ilk bulgular eski Yunan ve Romalılar dönemine kadar uzanmaktadır. 16. yüzyılda Japonlar tarafından, romatizmal bozuklukları hafifletmek ve kemik kırıklarının tedavisi için, 18. yüzyılda sakat kişilerde sinir sistemleri üzerinde olumlu etkiler elde etmek ve kas spazmını tedavi etmek için uygulanmıştır. 19. yüzyılın başlarında mekanik cihazlar (modern cihazların öncüleri) tarafından insanlara uygulanan titreşimler, morbiditeyi azaltmak, kardiyovasküler sistemi desteklemek, sindirimi ve sinir hastalıklarını tedavi etmek amacıyla kullanılmıştır.

1960'larda ise günümüz cihazlarının doğrudan öncüsü olan ritmik nöromusküler stimülasyon cihazı tanıtılmış ve Dr. Biremann'ın 'Sikloid Titreşim Masajının Gövde Fleksiyonuna Etkisi' adlı makalesi yayımlanmıştır. 1970 yılında, Vladimir Nasarov, Biermann'ın fikrini geliştirerek sporcular için bir titreşim uygulama programı geliştirmiş ve sporcuların güç ve esnekliğinde bir iyileşme gözlemlemiştir. Kısa bir süre sonra, bu lokalize titreşim uygulaması Ruslar tarafından uzay programlarında görevli astronotların kemik ve kas kaybını önlemek için kullanılmaya başlanmış ve 1990'dan bu yana, Avrupa Uzay Ajansı ve NASA, uzayda astronotların kas gücü, kütle ve kemik yoğunluğunun korunabilmesi konusunda titreşim teknolojisini kullanmaktadır (4,5).

Kemik, bulunduğu ortama cevap olarak kütlelerini, mimarisini ve mekanik özelliklerini uyarlayabilen, mekanik duyarlı bir dokudur. Düşük frekanslı dalgalar ve ultrason gibi küçük titreşimler mekanik stres oluşturarak kemik dokusunu uyarabilirler (6).

Yüksek frekans düşük magnitüdümlü titreşim ise döngüsel yüklemeye

Corresponding Author: Doç. Dr. Nisa Gül AMUK, ORCID: Erciyes Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Ortodonti Anabilim Dalı, Melikgazi/Kayseri. <https://orcid.org/0000-0002-3752-7100>, E-mail: nisagulamuk@gmail.com
Araş. Gör. Zeynep HACIOĞLU, zeynep.hacioglu@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2520-0247>.

sağlayan bir biyofiziksel müdahale şeklidir (7) ve kemik mineral yoğunluğu, kan dolaşımı, kas fonksiyonları ve denge kontrolü üzerine pozitif etkileri ile osteojenik potansiyele sahiptir (8-10). Bu uyarımların hücrel etkisi mekanizması ve moleküler yolları henüz tam olarak ortaya konulamamış olsa da; mekanik titreşim uygulamasının düşük seviyelerde dahi kemik dokusunun yüzeyinden derin bölgelerine iletilmesi yolu ile osteositler gibi kemik matrisine gömülü hücrelerde ilk cevabı oluşturduğu hipotezi üzerinde durulmaktadır (11). Titreşim uyarımının mekanik bir sinyalden biyolojik bir sinyale dönüştürülme şekli üzerine ise çeşitli teoriler öne sürülmüştür. Bunlardan ilki hücre zarı geçirgenliğinin ve ikincil haberci olan adenilat siklaz aktivitesinin etkilenecek iyon ve protein taşınmasında değişiklikler meydana gelmesi, ardından hücre içi sinyaller oluşması ve gen ekspresyonu uyarımının sağlanması şeklindedir (12). Diğer bir teori gerilime duyarlı katyon kanallarının geçirgenliğini etkilenmesi sonucu hücrenin elektriksiz yükünün değiştiği ve gen ekspresyonunu sağlayan hücre içi sinyallerin oluştuğu yönündedir (13). Diğer varsayımlar ise hücreye iletilen mekanik enerjinin, hücre iskeleti ve ekstraselüler matris arasında hücrel değişimleri aktive ettiği (14) ve kemik içerisinde elektrik akımının oluşmasını sağladığı şeklindedir (14).

Mekanik titreşim uygulamasının kemik dokusuna etkilerini anlayabilmek amacıyla osteoblastlar ve osteoklastların titreşime cevabını inceleyen çalışma sonuçlarına bakıldığında, titreşimle birlikte; osteojenik belirteçlerde ve osteoblast sayılarında artış; osteoklastik belirteçlerin miktarı ve osteoklastların sayılarında azalma olduğu görülmektedir (15,16). Bununla birlikte mekanik titreşim, sekonder kemik apozisyonunda artış ve kemik rezorpsiyonunda düşüş ile ilişkilendirilmiştir (17). Kulkarni ve ark. titreşimin hücrel etkinliği üzerine, osteoklast öncülü hücrelerdeki, dendritik hücreye spesifik transmembran protein (DC-STAMP) reseptörü ekspresyonunu azaltarak osteoklast oluşumunu azalttığı bulgusunu paylaşmışlardır (18). Diğer taraftan Wu ve ark. yüksek frekans düşük magnitudlü mekanik titreşimin osteoklastik etkinliği azaltıcı mekanizmasını, osteoklastların farklılaşmasını indükleyen nükleer faktör kapp-B ligandı (RANKL) reseptör aktivatörünü inhibe etmesi şeklinde açıklamışlardır (19). Hücrel etki mekanizmasından klinik öncesi hayvan deneylerine geçildiğinde, araştırmalar temelde trabeküler kemiğin mekanik kuvvetlere karşı adaptasyon göstereceğini belirten Wolff Kanunu'na paralel biçimde, ağırlık taşıma aktivitesi ve kemik mineral yoğunluğu arasındaki bağlantının incelenmesiyle başlamıştır. Rubin ve ark. uzun kemikler üzerinde yaptıkları çalışmada koyunların femurları üzerine 1 yıl boyunca haftada 5 gün, günde 20 dakika olmak üzere yüksek frekanslı (30 Hz) vertikal titreşim uygulamışlardır. Bu mekanik stimülasyon rejiminin sonunda, bilgisayarlı tomografi ile elde edilen görüntüler üzerinde yapılan ölçümler, proksimal femurdaki trabeküler kemiğin yoğunluğunun, kontrol grubundan % 34,2 daha fazla olduğunu ortaya koymuştur (20). Xie ve ark. tarafından fareler üzerinde yapılan benzer konulu bir diğer çalışmada, mekanik titreşimin büyüyen iskelet üzerindeki etkisini incelemek için hayvanlara 3 hafta boyunca günde 15 dakika 45 Hz frekansında tüm vücut titreşimi uygulanmış ve deney süresi sonunda titreşimin trabeküler kemik rezorpsiyonunu azalttığı görülmüştür (21).

Bu klinik öncesi çalışmaların, mekanik titreşim uyarımlarında optimum frekans, magnitud ve uygulama süresinin belirlenmesi yönündeki bulgular, yüksek frekans ve düşük magnituddeki (30 Hz, 200 microstrain) mekanik uyarımların kortikal kemik hacminde artış meydana getirirken; düşük frekans ve yüksek magnituddeki (1 Hz, 3000 microstrain) mekanik uyarımların kemik üzerinde anabolik etkisinin olmadığını göstermektedir (22).

Mekanik titreşimin bir diğer terapötik etkisi ise analjezik etkinliğidir (23). Melzack ve Wall 1965 yılında kapı kontrol teorisini önerdiklerinde; ağrıyı ileten sinir liflerinin toksik olmayan uyarılar ile nosisep-

siyona kapatılması sayesinde ağrının azaltılabileceğini düşündürmüşlerdir (24). Fakat titreşimin ağrıyı azaltmadaki mekanizması konusunda literatürde bir fikir birliği yoktur. Genel kabul gören iki görüşten ilkinde göre, titreşimli analjezi öncelikle bir spinal süreci yansıtır; düşük eşikli mekanik alıcılardan gelen sinyaller, beyne ağrı hakkında bilgi gönderen birçok dorsal boynuz nöronlarının aktivitesini inhibe eder. Diğer görüş ise daha yüksek seviyede (örneğin kortikal) bulunan bir mekanizmanın titreşimli analjezide birincil rol oynadığıdır. Bu görüş de ağrı ve dokunmanın kodlanmasında rol oynayan iki kortikal alan arasındaki etkileşim teorisi ile savunulmaktadır (25). Bunlara ek olarak, çalışmalarda titreşimin bu etkiyi gerçekleştirmek için derideki Pacini cisimciğini, sinir liflerinin birincil uçlarını, Meissner cisimciğini, kemikteki reseptörler ve diğer dokulardaki mekanik alıcıları uyatarak deri, diş ve kas gibi dokularda ağrıyı azalttığı bildirilmiştir (23). Ne yazık ki, mekanik titreşim uygulamasının etkilerinin ve etki mekanizmasının yorumlanması her zaman kolay değildir. Bununla birlikte, Roy ve ark. kronik ağrısı (temporomandibular disfonksiyonlar) olan hastalarda, yüksek frekanslı uyarımların, Pacini cisimciklerinin neredeyse hiç olmadığı orofasiyal bölgede bile etkili olduğunu göstermiştir. Çalışmalarının sonucunda titreşimin ipsilateral ve kontralateral etkilerinin istatistiksel olarak eşdeğer olduğunu ve titreşimsel analjezinin en azından kısmen lokal mekanizmalar yerine merkezi sinir sistemi süreçlerine dayandığını savunmaktadırlar (26).

Medikal Alanda Mekanik Titreşim

Tıpta mekanik titreşimin temel kullanım amacı, kas-iskelet sisteminde herhangi bir nedenle atrofi meydana gelmiş bireylerde kemik ve kas gücünü teşvik etmektir. Ayrıca titreşimin kemik apozisyonuna yardımcı olması ve osteoklast oluşumunu azaltması sebebiyle tüm vücut titreşiminin kırık tedavisinde olduğu gibi osteoporoz tedavisinde de faydalı olabileceği belirtilmiştir (27).

İnsan vücudunda yaşlanmaya bağlı görülen, hareket kabiliyeti ve kas fonksiyonlarında azalma etkilerinin önüne geçilmesi için ideal terapötik yaklaşım, bireyin yaptığı egzersiz miktarını artırarak kemiklerin yüklenmesini uyarmak etmek şeklinde olmalıdır. Fakat egzersiz ve diğer fiziksel aktivitelerin belirlendiği sıklıkta ve ağırlıkta yapılması bu bireylerin, eşlik eden muhtemel sistemik rahatsızlıkları göz önünde bulundurulduğunda her zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle titreşim uygulamaları, kas-iskelet sistemi üzerinde pozitif etki sağlayacak olan fiziksel aktivitenin yerine geçecek optimal bir seçenek olarak görülmektedir. Bautmans ve ark.'nın huzurevinde yaşayan ve hareket kısıtlılığı olan 24 hasta üzerinde yaptıkları randomize kontrollü bir çalışmada, hastalara altı hafta boyunca 30-50 Hz, 2-5 mm amplitüdüdeki titreşim platformu üzerinde egzersiz yaptırılmış ve kontrol grubuna kıyasla bu hastaların egzersiz sırasındaki fonksiyonel ve kas performansında daha fazla artış elde edilmiştir (28). Postmenopozal kemik kaybını azaltmak üzerine 70 kadın hastada yapılan bir yıllık prospektif bir araştırmada, hastalara yüksek frekans ve düşük magnitudde (30 Hz ve 0.2 g) günde 20 dakika olmak üzere tüm vücut titreşimi uygulanmış ve titreşim uygulanan hastalarda femur ve omurga kemiklerinde kemik kaybının azaldığı görülmüştür (29). Kemik mineral yoğunluğu düşük olan 48 genç kadın hastada yapılan bir diğer çalışmada ise tüm vücut titreşiminin kemik ve kas dokusu üzerine etkisi incelenmiştir. Deney grubundaki hastalara 12 ay süresince tüm vücut, günlük 10 dakika, 30 Hz'lik titreşim uygulanmış ve titreşim uygulanan gruptaki hastaların kortikal ve spongyöz kemik miktarında ve kas kütlesinde artış elde edilmiştir (8). Bu biyofiziksel uyarım şeklinin, kas-iskelet sistemi üzerinde girişimsel olmaksızın yarattığı osteojenik etki ve herhangi bir farmakolojik ajan kullanımı içermediğinden medikasyona bağlı oluşabilecek yan etkilerin ve ilaç etkileşimlerinin görülmemesi bu uygulamanın avantajları arasındadır (30,31).

Öte yandan mekanik titreşimin analjezik etkisi göz önünde bulundurulduğunda (23,24), egzersiz alanında ağrının azaltılması için de

titreşim uygulamasının optimal koşulları araştırılmaktadır. Yoğun egzersizden sonra kas ağrısı; sertlik, hareket oranının ve kas gücünün azalması semptomları ile ortaya çıkar (32). Bu konuda yapılan çalışmaların, egzersiz sonrası uygulanan düşük şiddetteki titreşimin ağrıyı azalttığı, cilt altındaki kan akışını artırdığı ve hastanın hareket aralığını artırdığı yönündeki bulgular, titreşimin egzersiz sonrasında derlenme ve ağrının azaltılması için kullanılabilmesi görüşünü desteklemektedir (32,33). Ancak hangi tip hastaların, mekanik titreşimin hangi formundan, ne ölçüde faydalanacağını belirlemek için titreşimin mekano-transdüksiyon yolları hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır (31).

Diş Hekimliğinde Mekanik Titreşim

Orofasiyal bölgede titreşim uygulamasının girişimsel olmayan doğası ve kolay uygulanışı, araştırmacıları bu uyarıların çeşitli diş hekimliği uygulamalarındaki etkilerini araştırmaya yönlendirmiştir (34). Diş hekimliğinde de pulpal, periodontal veya cerrahi sonrası diş kaynaklı ağrıyı hafifletmek; lokal anestezi uygulaması sırasındaki ağrıyı azaltmak, kronik ağrıların yönetilmesi için titreşim uygulamaları araştırılmakta ve kullanılmaktadır (24,34,35).

Ayrıca, yapılan çalışmalarda titreşim uygulamasının kemirgenlerin tibial metafizine yerleştirilen implantın çevresindeki kemik iyileşmesini artırdığı yönünde bulgular elde edilmiştir (36). Titreşim uyarılarının sıçanlarda kesici dişin çekim soketindeki kemik iyileşmesine etkisini araştıran bir çalışmada ise kemik iyileşmesinin erken safhasında, özellikle trabeküller kalınlıkta pozitif bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur (37).

Ortodontide Mekanik Titreşim

Ortodonti alanında yüksek frekans ve düşük magnitudü mekanik titreşim uygulamasıyla ilgili araştırmaların ana odak noktası başlangıçta ortodontik diş hareketi hızını arttırmak olmuştur. Yapılan çalışmalarda mekanik titreşim uygulamasının kemik yapım-yıkım sürecini anabolik yönde etkilediği, yani trabekül sayısı ve genişliğinde artışla birlikte süngerimsi kemiğin sertliği ve dayanıklılığını artırdığı bulunmuştur (29,30). Ortodontik diş hareketi sırasında gerçekleşen kemiğin yeniden şekillenme mekanizması da benzer olduğundan mekanik titreşim uygulamasının diş hareketini hızlandırmak için kullanılabilmesi fikri ortaya çıkmıştır (38). Nitelikim, titreşimin diş hareketi üzerine etkilerini incelemek için yapılan çalışmalarda da kemik yapım sürecini hızlandırdığı, kemik yoğunluğunu artırdığı, diş hareketiyle oluşan katabolik olayların etkilerini azalttığı, periodontal dokunun yapım sürecini hızlandırdığı ve kan desteği sağlayarak periodontal ligamentin basınç tarafında oluşan iskemik cevabı önlediği bildirilmiştir (20,21,39). Piezoelektrik teoriye göre, diş hareketi sırasında uygulanan kuvvet, alveoler kemikte elektriksel değişiklikler meydana getirir ve apozisyon-rezorpsiyon olaylarını başlatır. Ortodontik diş hareketi sırasında devamlı bir kuvvet uygulanırsa basınçla ilişkili sinyaller baskın olarak oluşmaz, bu nedenle basıncın dokulara aralıklı olarak iletildiği titreşim uygulaması ile kemikteki elektriksel değişikliklerin sürekliliğini sağlayarak diş hareketinin hızlandırılmasında kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır (40). Ancak tüm bu pozitif bulgu ve varsayımların yanı sıra, titreşim uygulamasının diş hareket hızını etkilemediği hatta azalttığı belirtilen çalışmalar da mevcuttur (41,42).

Marie ve ark. ortodontik tedavi ile eş zamanlı uygulanan titreşimin kan desteği sağlayarak iskemik cevabı önlemesi ve diş hareketini hızlandırmasının yanı sıra ortodontik tedaviyle oluşabilecek ağrının azaltılmasında da etkili olabileceği savunmuşlardır (39). Otsson ve ark. dental ağrısı bulunan 33 hastada yaptıkları çalışmalarında, hastaların kafatası ve yüz bölgesinde belirli alanlara 100 Hz frekansında titreşimin uygulanması ile hastaların ağrısının azaldığını, titreşimin bu etkiyi ağrı yolunu ve ağrı taşıyan fibriller arasındaki iletişimi engelleyerek sağladığını belirtmişlerdir (35). Ortodontik tedavi sırasında titreşim uygulaması ile daha az ağrı oluştuğunu belirten Marie ve ark.ın çalışmasında, ağrı oluştuktan sonra titreşimi tolere

edemeyen hastaların çoğunlukta olması sebebiyle, uygulamanın ağrı başlamadan önce yapılması önerilmiştir (39). Diğer taraftan Miles ve ark. nın yaptığı randomize kontrollü bir çalışmada ise hastalarda titreşim cihazı (Tooth Masseur) kullanılarak günde 20 dakika, 111 Hz frekansında ve 0.06 N büyüklüğünde uygulanan titreşimin, 10 haftalık süre sonunda ağrı seviyelerinde kontrol grubu ile karşılaştırıldığında anlamlı bir farklılık yaratmadığı bildirilmiştir (43).

Titreşim uygulamasının bir diğer araştırma alanı ise kök rezorpsiyonu üzerine olan muhtemel etkisidir. Mao ve ark. nın titreşimin kök rezorpsiyonu üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında maksiller birinci premolarların 4 haftalık bukkal tipping hareketi boyunca günde 10 dakika, 113 Hz frekansında titreşim uygulaması sonrasında çekilen dişler mikro-bilgisayarlı tomografi ile incelenmiş ve titreşim uygulanan grupta kök rezorpsiyonun %33 daha az olduğu bulunmuştur (44). Tan ve ark.'nın AceleDent cihazı kullanarak 30 Hz frekansında 20 g büyüklüğündeki titreşimin kök rezorpsiyonu üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında ise, kök rezorpsiyonu miktarında kontrol grubuyla karşılaştırıldığında anlamlı bir fark bulunamamıştır (45).

Titreşimin araştırılan bir diğer etkisi de sabit ortodontik tedavi mekanikleri açısından önemli bir biyomekanik faktör olan braket ve ark teli arasındaki kayma-yuvarlanma sürtünmesi (Stick-slip friction) üzerinedir. Ancak ilgili araştırma bulgularına bakıldığında titreşimin sürtünme kuvvetini azaltıcı etkisi üzerine bir görüş birliği bulunmamaktadır (46).

Ortodontik klinik uygulama ve araştırmalara henüz geçilememiş, hala klinik öncesi araştırmaları devam edilmekte olan titreşim konulu araştırma alanları ise ortodontik tedavi sonrasında nüksüz azaltmak, kraniofasiyal bölgedeki sütür gelişiminin uyarılması, mandibular büyümenin ve kondil kırıkdağındaki endokondral kemikleşmenin uyarılmasıdır. Titreşim uygulamasının tavşanların kraniofasiyal sütür gelişimine etkisini incelemek için yapılan bir çalışmada, tavşanlara 12 gün boyunca, günde 10 dakika süre ile 0.2 Hz frekansında, 2 Newton büyüklüğünde titreşim uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda kontrol grubuna göre kraniofasiyal uzunlukta daha fazla artış elde edilmiş, premaksillo-maksiller sütürde belirgin sütural ayrılma ve yeni oluşan kemik adalarının indüklediği bulunmuştur (47).

Yadav ve ark. nın ortodontik pekiştirme ve nüks üzerine titreşim uygulamasının etkisini incelemek amacıyla fareler üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel bir çalışmada, nüks modeli oluşturularak farelere 30 Hz frekansında titreşim uygulanmıştır. Deney sonucunda istatistiksel olarak anlamlı bulunmasa da titreşim uygulanan grupta daha az nüks görüldüğü, bunun yanı sıra titreşim grubunda kemik hacminde ve periodontal dokuda kollajen fibrillerinin kalınlığında daha fazla artış bulunduğu bildirilmiştir (48).

Sriram ve ark. nın titreşimin kondiler kırıkdağı etkisini incelemek için fareler üzerinde yaptıkları çalışmada ise, deney grubuna 28 gün boyunca, haftada 5 gün, günde 20 dakika, 30 Hz titreşim uygulanmıştır. Deney sonucunda kondiler kırıkdağı hacminde azalma ve kemik histomorfometrik parametrelerinde artış gözlenmiş; kırıkdağı yerini endokondral kemiğin aldığı ve titreşimin kondiler kırıkdağı adaptif yeniden şekillenmesini artırdığı rapor edilmiştir (49). Titreşimin mandibular büyüme etkisini incelemek için sıçanlar üzerinde yapılan bir diğer araştırmada, sıçanların mandibulasi fonksiyonel tedaviyi taklit edecek şekilde önde konumlandırılmış ve sıçanlara 30 günlük deney süresince, 30 Hz, 0.3 g tüm vücut titreşimi günde 20 dakika, haftada 5 gün uygulanmıştır. Mandibuların önde konumlandırıldığı ve titreşim uygulanan grupta kondiler kırıkdağı bütünlüğünde kayıp ve kondilin ön bölgesinde rezorpsiyon belirtileri gözlemlenmiştir. Bununla birlikte titreşim olmadan, yalnız fonksiyonel aparey uygulanan grupta trabeküller kemik kalitesinde bozulma görülmesine karşın titreşim varlığında, kemik kalitesinde bozulma olmadan uygulanan yüke trabeküller adaptasyon sağlandığı

gözlemlenmiştir (50).

SONUÇ

Mekanik titreşim uygulamalarının terapötik etkileri, hareket kısıtlılığı olan ve/veya sistemik nedenlerle kemik yoğunluğunun azalmış olduğu hastalarda kemik yıkımını önlemek, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının cerrahi tedavisi sonrası iyileşmeyi hızlandırmak, kas spazmını tedavi etmek ve kas performansını arttırmak gibi birçok medikal alanda sıklıkla araştırılmakta ve uygulanmaktadır. Öte yandan mekanik titreşimin ortodontik kullanımı üzerine çalışmalar sıklıkla diş hareketi hızlandırma konusunda yoğunlaşmış olup, mevcut potansiyel faydaları hakkında çok az şey bilinmektedir. Bu biyofiziksel müdahale şeklinin, hücrel mekanizması ve moleküler yolları tam olarak ortaya konulamamasına ve hala araştırılıyor olmasına rağmen, kas-iskelet sistemi üzerindeki girişimsel olmaksızın sağladığı anabolik ve osteojenik etkinliği, farmakolojik ajanlar kullanılmadan sistemik etkiler sağlaması ve analjezik etkileri ümit vericidir. Mekanik titreşim uygulamasının, kemik dokusuna olan etkisi hem hayvan deneylerinde hem de klinik birçok çalışmada incelenmiş olmasına rağmen elde edilen veriler, titreşimin uygulanma amacına göre optimum protokolünü açıklamada yetersiz kalmıştır. Titreşimli uyaranların biyofiziksel, hücrel ve moleküler etki mekanizmalarının aydınlatılması, osteojenik ve analjezik etkileri dışındaki potansiyel terapötik etkilerinin aydınlatılması ve uygulanma amacına göre frekans, genlik, süre ve uzamsal boyutunun tanımlanacağı protokollerin belirlenmesi için daha çok deneysel ve klinik araştırma ihtiyacı vardır.

KAYNAKLAR

- Rao SS. Mechanical Vibrations (5th ed). Prentice Hall, New Jersey, 2011; pp13-6.
- Cardinale M, Wakeling J. Whole body vibration exercise: are vibrations good for you? British Journal of Sports Medicine 2005; 39(9):585-589.
- Rauch F. Vibration therapy. Developmental Medicine & Child Neurology 2009; 51:166-816.
- Bagheri J. Application of whole-body vibration: Technical and clinical studies in healthy persons and people with a neurological disorder: Erasmus MC: University Medical Center Rotterdam; 2013.
- Kaeding TS. The historical evolution of the therapeutic application of whole body vibrations: any lessons to be learned? Austin Sports Med 2016; 1(1):1003.
- Fredericks DC, Nepola JV, Baker JT, Abbott J, Simon B. Effects of pulsed electromagnetic fields on bone healing in a rabbit tibial osteotomy model. J Orthop Trauma 2000; 14(2):93-100.
- Leung KS, Shi HF, Cheung WH, et al. Low-magnitude high-frequency vibration accelerates callus formation, mineralization, and fracture healing in rats. J Orthop Res 2009; 27(4):458-465.
- Gilsanz V, Wren TA, Sanchez M, et al. C. Low-level, high-frequency mechanical signals enhance musculoskeletal development of young women with low BMD. J Bone Miner Res 2006; 21(9):1464-1474.
- Stewart JM, Karman C, Montgomery LD, McLeod KJ. Plantar vibration improves leg fluid flow in perimenopausal women. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 2005; 288(3):R623-629.
- Cheung WH, Mok HW, Qin L, et al. High-frequency whole-body vibration improves balancing ability in elderly women. Arch Phys Med Rehabil 2007; 88(7):852-857.
- Graber LW, Vanarsdall RL, Vig KW, Huang GJ. Orthodontics-E-Book: current principles and techniques: Elsevier Health Sciences 2016.
- Mortimer AJ, Dyson M. The effect of therapeutic ultrasound on calcium uptake in fibroblasts. Ultrasound Med Biol 1988; 14(6):499-506.
- Sachs F. Mechanical transduction by membrane ion channels: a mini review. Mol Cell Biochem 1991; 104(1-2):57-60.
- Wang N, Butler JP, Ingber DE. Mechanotransduction across the cell surface and through the cytoskeleton. Science 1993; 260(5111):1124-1127.
- Li JK, Chang WH, Lin JC, et al. Cytokine release from osteoblasts in response to ultrasound stimulation. Biomaterials 2003; 24(13):2379-2385.
- Sun JS, Hong RC, Chang WH, et al. In vitro effects of low-intensity ultrasound stimulation on the bone cells. J Biomed Mater Res 2001; 57(3):449-456.
- Judex S, Lei X, Han D, Rubin C. Low-magnitude mechanical signals that stimulate bone formation in the ovariectomized rat are dependent on the applied frequency but not on the strain magnitude. J Biomech 2007; 40(6):1333-1339.
- Kulkarni RN, Voglewede PA, Liu D. Mechanical vibration inhibits osteoclast formation by reducing DC-STAMP receptor expression in osteoclast precursor cells. Bone 2013; 57(2):493-498.
- Wu SH, Zhong ZM, Chen JT. Low-magnitude high-frequency vibration inhibits RANKL-induced osteoclast differentiation of RAW264.7 cells. Int J Med Sci 2012; 9(9):801-807.
- Rubin C, Turner AS, Bain S, Mallinckrodt C, McLeod K. Anabolism. Low mechanical signals strengthen long bones. Nature 2001; 412(6847):603-604.
- Xie L, Jacobson JM, Choi ES, et al. Low-level mechanical vibrations can influence bone resorption and bone formation in the growing skeleton. Bone 2006; 39(5):1059-1066.
- Rubin CT, Bain SD, McLeod KJ. Suppression of the osteogenic response in the aging skeleton. Calcif Tissue Int 1992; 50(4):306-313.
- Chesky KS, Michel DE. The Music Vibration Table (MVT™): Developing a technology and conceptual model for pain relief. Music Therapy Perspectives 1991; 9(1):32-38.
- Melzack R, Wall PD. Pain mechanisms: a new theory. Science 1965; 150(3699):971-979.
- Hollins M, McDermott K, Harper D. How does vibration reduce pain? Perception 2014; 43(1):70-84.
- Roy EA, Hollins M, Maixner W. Reduction of TMD pain by high-frequency vibration: a spatial and temporal analysis. Pain 2003; 101(3):267-274.
- Thompson WR, Yen SS, Rubin J. Vibration therapy: clinical applications in bone. Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes 2014; 21(6):447-453.
- Bautmans I, Van Hees E, Lemper JC, Mets T. The feasibility of Whole Body Vibration in institutionalised elderly persons and its influence on muscle performance, balance and mobility: a randomised controlled trial. BMC Geriatr 2005; 5:17.

29. Rubin C, Recker R, Cullen D, et al. Prevention of postmenopausal bone loss by a low-magnitude, high-frequency mechanical stimuli: A clinical trial assessing compliance, efficacy, and safety. *J Bone Miner Res* 2004; 19(3):343-351.
30. Rubin C, Judex S, Qin YX. Low-level mechanical signals and their potential as a non-pharmacological intervention for osteoporosis. *Age Ageing* 2006; 35 Suppl 2:ii32-ii36.
31. Gauthier BJ. The Effects of Mechanical Vibration on Human Chondrocytes In Vitro. PhD Thesis, Marquette University, Wisconsin 2016.
32. Veqar Z, Imtiaz S. Vibration therapy in management of delayed onset muscle soreness (DOMS). *J Clin Diagn Res* 2014; 8(6):Le01-4.
33. Wheeler AA, Jacobson BH. Effect of whole-body vibration on delayed onset muscular soreness, flexibility, and power. *J Strength Cond Res* 2013; 27(9):2527-2532.
34. Nanitsos E, Vartuli R, Forte A, Dennison PJ, Peck CC. The effect of vibration on pain during local anaesthesia injections. *Aust Dent J* 2009; 54(2):94-100.
35. Ottoson D, Ekblom A, Hansson P. Vibratory stimulation for the relief of pain of dental origin. *Pain* 1981; 10(1):37-45.
36. Ogawa T, Possemiers T, Zhang X, et al. Influence of whole-body vibration time on peri-implant bone healing: a histomorphometrical animal study. *J Clin Periodontol* 2011; 38(2):180-185.
37. Kono T, Ayukawa Y, Moriyama Y, et al. The effect of low-magnitude, high-frequency vibration stimuli on the bone healing of rat incisor extraction socket. *J Biomech Eng* 2012; 134(9):091001.
38. Nishimura M, Chiba M, Ohashi T, et al. Periodontal tissue activation by vibration: intermittent stimulation by resonance vibration accelerates experimental tooth movement in rats. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 133(4):572-583.
39. Marie SS, Powers M, Sheridan JJ. Vibratory stimulation as a method of reducing pain after orthodontic appliance adjustment. *J Clin Orthod* 2003; 37(4):205-8; quiz 3-4.
40. Proffit WR, Fields Jr HW, Sarver DM. *Contemporary Orthodontics*, 5e: Elsevier India 2012.
41. Yadav S, Dobie T, Assefnia A, et al. Effect of low-frequency mechanical vibration on orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2015; 148(3):440-449.
42. Kalajzic Z, Peluso EB, Utreja A, et al. Effect of cyclical forces on the periodontal ligament and alveolar bone remodeling during orthodontic tooth movement. *Angle Orthod* 2014; 84(2):297-303.
43. Miles P, Smith H, Weyant R, Rinchuse DJ. The effects of a vibrational appliance on tooth movement and patient discomfort: a prospective randomised clinical trial. *Aust Orthod J* 2012; 28(2):213-218.
44. Grove J. The Effect Of Mechanical Vibration (113 Hz Applied to Maxillary First Premolars) On Root Resorption Associated With Orthodontic Force: A Micro-CT Study 2011.
45. Tan D. The Effect of Mechanical Mibration (Accelerated 30Hz) Applied to the Hemimaxilla on Root Resorption and Tooth Movement After Application of Orthodontic Force. A micro CT Study 2011.
46. Seo YJ, Lim BS, Park YG, et al. Effect of self-ligating bracket type and vibration on frictional force and stick-slip phenomenon in diverse tooth displacement conditions: an in vitro mechanical analysis. *Eur J Orthod* 2015; 37(5):474-480.
47. Mao JJ, Wang X, Mooney MP, Kopher RA, Nudera JA. Strain induced osteogenesis of the craniofacial suture upon controlled delivery of low-frequency cyclic forces. *Front Biosci* 2003; 8:10-17.
48. Yadav S, Assefnia A, Gupta H, et al. The effect of low-frequency mechanical vibration on retention in an orthodontic relapse model. *Eur J Orthod* 2016; 38(1):44-50.
49. Sriram D, Jones A, Alatli-Burt I, Darendeliler MA. Effects of mechanical stimuli on adaptive remodeling of condylar cartilage. *J Dent Res* 2009; 88(5):466-470.
50. Rogers O. The Effect of High-Frequency, Low Magnitude Mechanical Stimuli on The Rat Condyle During Mandibular Protrusion. A micro-CT Study. PhD Thesis, Sydney University, Sydney 2010; pp 132-138.