

Hibrid Stabilizasyonun Avantaj ve Dezavantajları Nelerdir?

What are the Advantages and Disadvantages of Hybrid Stabilization?

Öz

Spinal stenoz, disk hernisi ve dejeneratif instabilite gibi semptomatik dejeneratif hastalıklara yönelik birçok cerrahi teknik geliştirilmiş olup bunların arasında dekompresyon ve füzyon cerrahisi en çok kullanılan tedavilerdendir. Füzyon cerrahisinin birçok faydasına rağmen, enstrümantasyon başarısızlığı, komşu segment dejenerasyonu (KSD) ve psödoartroz gibi teknikle ilişkili çeşitli komplikasyonları vardır. Bu sorunları çözmek ve geleneksel füzyonun olumsuz etkisini gidermek amacıyla füzyonsuz (dinamik stabilizasyon) kavramı tanıtılmıştır. Ancak çalışmaların birçoğunda dinamik stabilizasyon sisteminin %34'e varan revizyon cerrahisi oranları ve de hareketin ve komşu diskin korunmasında önemli bir avantajı olmayabileceğini gösteren sonuçlar bildirilmiştir. KSD'na ilişkin bu kanıtlara dayanarak, rijid fiksasyon (füzyon) ve dinamik stabilizasyondan oluşan hibrid stabilizasyon kavramı ortaya çıkmıştır. Füzyonun üstündeki veya altındaki seviyedeki stres konsantrasyonunu sınırlamak ve komşu segmentlerde hızlandırılmış dejenerasyonun gelişmesini önlemek için, dinamik (esnek ve füzyonsuz) ve statik (rijid ve füzyonlu) iki bileşenden oluşan hibrid bir cihaz olan Dynesys-Transition-Optima (DTO) (Zimmer Spine) geliştirilmiştir. Hibrid stabilizasyonda DTO gibi pedikül vida-rod bazlı hibrid stabilizasyon dışında interspinöz cihaz bazlı hibrid stabilizasyon da kullanılmaktadır. Klinik sonuçlar DTO' nun instabil lomber omurga hastalıklarının tedavisinde %60 ila %90 arasında değişen bir memnuniyet oranıyla güvenli ve etkili bir alternatif sağladığını gösterse de postoperatif dönemde komşu segment hastalıkları (KSH), vida gevşemesi ve vida kırılması gibi komplikasyonlar rapor edilmiştir. Uzun dönem takiplerde ise KSD veya KSH gelişiminin hibrid sistemle dinamik sisteme göre daha az gözlemlendiği bildirilmiştir. Ancak çalışmalar dinamik hibrid cihazların güvenliğini desteklememekte olup, implant sertliğini azaltmak, implant tasarımını optimize etmek, hasta güvenliğini artırmak amacıyla daha fazla biyomekanik çalışma ve klinik araştırmalara ihtiyaç vardır.

Anahtar Sözcükler: Avantajlar ve dezavantajlar, Cerrahi tedavi, Hibrid stabilizasyon, Omurganın semptomatik dejeneratif hastalıkları, Vertebra

ABSTRACT

Surgical interventions for degenerative spinal diseases include decompression and fusion surgery, widely utilized despite complications like instrumentation failure, adjacent segment degeneration (ASD), and pseudoarthrosis. The introduction of fusion-free (dynamic stabilization) aimed to address these issues, but studies suggest limited advantages, with revision surgery rates reaching 34%. Consequently, hybrid stabilization, combining rigid fusion and dynamic elements, emerged to mitigate stress concentration and prevent accelerated degeneration in adjacent segments. The Dynesys-Transition-Optima (DTO) hybrid device by Zimmer Spine, comprising dynamic (flexible without fusion) and static (rigid with fusion) components, was developed for this purpose. Additionally, interspinous device-based hybrid stabilization is employed. Clinical outcomes indicate DTO as a safe and effective alternative for unstable lumbar spine diseases (satisfaction rate: 60%-90%), yet postoperative complications, including adjacent segment diseases (ASDi), screw loosening, and breakage, have been reported. Long-term follow-ups reveal lower ASD rates with the hybrid system than with the dynamic system. However, safety concerns persist for dynamic hybrid devices, warranting further biomechanical studies and clinical research to enhance implant flexibility, optimize design, and ensure patient safety.

Keywords: Advantages and disadvantages, Hybrid stabilization, Surgical treatment, Symptomatic degenerative diseases of the spine, Vertebra

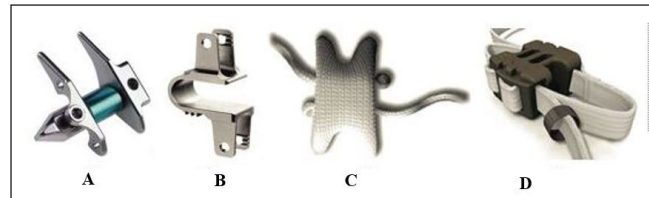
GİRİŞ

Spinal stenoz, disk hernisi ve dejeneratif instabilite gibi lomber dejeneratif hastalıklar bel ağrısının yaygın sebepleridir ve yaşam kalitesi üzerinde önemli etkileri vardır (13,38). Sempomatik dejeneratif hastalıklara yönelik birçok cerrahi teknik geliştirilmiş olup bunların arasında dekompresyon ve füzyon cerrahisi (posterior lomber interbody füzyon gibi) en çok kullanılan tedavi yöntemlerinden olup altın standart girişim olarak kabul edilirler (16,18). Füzyon cerrahisinin birçok faydası olmasına rağmen, enstrümantasyon başarısızlığı, komşu segment dejenerasyonu (KSD) ve psödoartroz gibi çeşitli komplikasyonları vardır (1,14,18,20,25,31). Spinal füzyon sonrasında, %36'ya varan revizyon oranları ve %30 kadar yüksek insidanslı komşu segment hastalığı (KSH) gelişimi bildirilmiştir (3,4,16,20,23,24,38). KSD gelişiminin aletli füzyona komşu segmentlerdeki adaptif hiper mobilite ile ilişkili olduğuna inanılmaktadır (24). Bu hiper mobilite veya instabilite genellikle kaynaşmış bir segmentin rostralinde gözlemlenir ve klinik gözlemler, füzyonun proksimalindeki seviyenin, distalindeki seviyeye göre dejeneratif değişikliklere uğrama olasılığının daha yüksek olduğunu göstermiştir (1,29). Biyomekanik çalışmalar ayrıca faset eklemlerinde segmental hareketin arttığını, disk içi basıncın (DİB), kayma yükünün ve komşu seviyelerdeki temas modellerinin değiştiğini de göstermiştir (15,16,18). Bu sorunları çözmek ve geleneksel füzyonun olumsuz etkisini gidermek amacıyla füzyonsuz (dinamik stabilizasyon) kavramı tanıtılmıştır (1,18). 1994 yılında pedikül sistemi kullanılarak rijid lomber füzyona alternatif olarak semi-rijid dinamik stabilizasyon sistemi ve dinamik nötralizasyon sistemi (Dynesys, Zimmer CH) geliştirilmiş ve mevcut en popüler sistemlerden biri haline gelmiştir (18,32).

Khoueir ve ark. üç tip posterior dinamik stabilizasyon sistemi tanımlamıştır: X-STOP, Wallis, DIAM ve Coflex gibi interspinöz proçes cihazları (Şekil 1); total faset değiştirme sistemi; Dynesys Transition Optima (DTO) gibi pedikül vidalı ve rod yapılı hibrid stabilizasyon cihazı (21,38). İlk lomber interspinöz proçes dekompresyon cihazı olan X-STOP, spinal stenozla bağlı nörojenik kladikasyon şikayeti olan hastaların tedavisinde, stenotik seviyedeki ekstansiyon hareketini sınırlamak için tasarlanmıştır. Coflex cihazı, ameliyatın klinik sonucunu iyileştirmek için faset eklemler yükünü hafifletmek, foraminal yüksekliği yeniden sağlamak ve stabilize sağlamak üzere tasarlanmıştır. DIAM implant sistemi ise silikon çekirdek ve polietilen kaplama ile tasarlanmıştır. İmplantı sabitlemek için üç adet ağ (mesh) kullanılır: bunlardan ikisi her bir spinöz proçesin etrafında, diğeri ise supraspinöz ligamanın etrafındadır (9,18). Boody ve ark. bel ağrısı ve alt lomber disk dejeneratif hastalığı olan olgularda DIAM omurga stabilizasyon sisteminin etkinliğini ameliyatsız tedaviyle karşılaştırmış ve DIAM cihazının iki yıllık takip süresinde, sırt ve bel ağrısında geleneksel ameliyatsız tedavi yöntemlerinden daha üstün performans gösterdiğini bildirmişlerdir (2). Pedikül vidası bazlı dinamik stabilizasyon sistemi ise, enstrümantasyonlu seviyelerde fizyolojik yük aktarımına olanak sağlamak için enstrümantasyonun sertliğini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için daha esnek, daha küçük çaplı metalik çubuklar, harekete izin veren menteşeli pedikül vida başları, longitudinal elemanlardaki sönümleyici bileşenler ve metalik olmayan biyomateryallerden yapılmış daha esnek rodlar gibi çeşitli tasarım konseptleri bildirilmiştir (18). Lomber hareket koruma cihazlarından olan Dynesys dinamik stabilizasyon

sisteminde lomber omurgadaki hareketi korumak amacıyla esnek polietilen tereftalat kordonlar ve polikarbonat üreten aralayıcılarla birbirine bağlanan pedikül vidaları kullanılır (20). Dinamik fiksatorler, omurganın fizyolojik hareketini koruyarak, artrodez sonrası komşu segmentlerde gözlenen hiper mobiliteyi ve yıkıcı biyomekanik kuvvetleri azaltır (19,20,39). Bu konuda yapılmış bazı kısa ve orta vadeli takip çalışmaları iyi sonuçlar gösterse de bir retrospektif kohort çalışmasında dejeneratif disk hastalığı olan hastalarda lomber omurganın dinamik ve rijid stabilizasyonları arasında anlamlı bir fark olmadığı bildirilmiştir (11,18). İki ayrı metaanalizde ise omurganın füzyonsuz stabilizasyonunun daha sonraki KSD'na karşı koruduğu öne sürülmüştür (34,41). Bu çalışmaların aksine St-Pierre ve ark. Dynesys stabilizasyonu sonrasında yeni başlayan klinik KSD'nun (%29), beş yıllık takipte artrodez sonrası gözlenen KSD'ndan (%5,2- 16,5) daha yüksek olduğunu bildirmiştir (37). Yine birçok çalışmada hibrid olmayan Dynesys dinamik stabilizasyon sisteminin %34'e varan revizyon cerrahisi oranları nedeni ile klinik bulgularda, hareketi korumada ve komşu disk korumasında önemli bir avantajla sahip olmayabileceği bildirilmiştir (11,16,18-20,28,36).

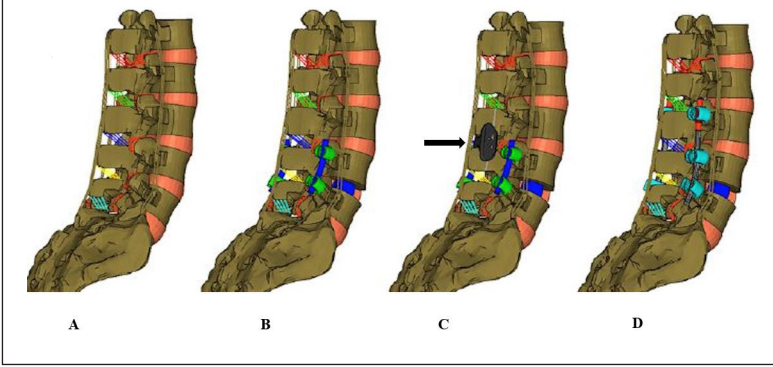
KSD'na ilişkin bu kanıtlara dayanarak, rijid fiksasyon (füzyon) ve dinamik stabilizasyondan oluşan hibrid stabilizasyon kavramı ortaya çıkmıştır (Şekil 2) (Şekil 3 C-D) (1,24,38). Füzyonun üstündeki veya altındaki seviyedeki stres konsantrasyonunu sınırlamak ve komşu segmentlerde hızlandırılmış dejenerasyonun gelişmesini önlemek için, dinamik (esnek ve füzyonsuz) ve statik (rijid ve füzyonlu) iki bileşenden oluşan hibrid bir cihaz olan Dynesys-Transition-Optima (DTO) (Zimmer Spine) geliştirilmiştir (Şekil 2) (1,7,10,18). Hibrid sistemler, ciddi instabiliteyi veya ileri dejenerasyonu bir veya daha fazla düzeyde tedavi etmek için füzyonun arzu edildiği has-



Şekil 1: İnter spinöz aralayıcı: A) X-STOP, B) Coflex, C) DIAM ve D) Wallis sistemi (Kaynak 9'dan).



Şekil 2: Dynesys-Transition-Optima (DTO) (Zimmer Spine) implantının fotoğrafı: Bir polyester ara parça (dış çap = 11,0 mm ve kalınlık = 2,0 mm) ve dinamik olarak stabilize edilmiş segmentteki kablo (dinamik bileşen), sert sabit segmentte (statik bileşen) bir titanyum rod (çap = 6 mm), ve statik ve dinamik bileşenleri bağlayan bir geçiş vidası. DTO ara parçasının ve statik bileşenlerin uzunluğu, pediküllerin doğal mesafesine göre belirlenir (Kaynak 18'den).



Şekil 3: Geliştirilen modelleri gösteren görseller: Bir yetişkin için sağlam lumbosakral omurga modeli (A), sert füzyon modeli (B), hibrit stabilizasyon DIAM kullanan model (Siyah ok) (C) ve NFlex kullanan hibrit stabilizasyon modeli (D). Füzyon modeli için, L4-5 segmentine geleneksel bir sert titanyum alaşımlı rod ve kafes yerleştirildi. Hibrit stabilizasyon modeli için, sert füzyon modelinin L3-4 segmentine ek olarak bir interspinöz cihaz (İH sistem) (DIAM) veya PH sistemi (pedikül vida-rod bazlı hibrit stabilizasyon) (NFlex) yerleştirildi. Aletli modellerde, kafes modelinin net görülebilmesi için anulusun bir kısmı çıkartıldı (Kaynak 24'den).

talarda ve bir veya daha fazla komşu segmentin dejeneratif değişiklikler gösterdiği durumlarda (hastanın semptomlarına katkıda bulunduğu düşünülen ancak artrodezi gerektirecek kadar şiddetli olmayan) kullanılmak üzere tasarlanmıştır (1,20). Böylece stabil olmayan dejeneratif segmentler statik fiksator ile düzenlenirken komşu segmentler dinamik fiksatorler tarafından korunur (1,35). Biyomekanik açıdan bakıldığında geçiş diskinin hareketliliği bir dereceye kadar korunabilir ve böylece mekanik yük dinamik fiksator tarafından kısmen paylaşılabilir (1,18). İdeal hibrit stabilizasyon, normal eklem hareket açıklığı (ROM) mümkün olduğu kadar korumalı ve hem geçiş hem de komşu bölümleri korumak için geçiş bölümü çok sert veya hareketli olmamalıdır (5,24). Interbody füzyona komşu segmentlerde ROM'da önemli bir artış gözlemlenebileceğinden hibrit stabilizasyon sisteminin dinamik bileşeni komşu seviyeyi aşırı hareketten korur (18). Klinik ve biyomekanik çalışmalar, füzyon cerrahisinin proksimal ve distal komşu segmentlerdeki biyomekanik stresi artırdığını ve proksimal komşu segmentin, distal komşu segmente göre daha hassas olduğunu göstermiştir (18). Hibrit cerrahi sonrasında KSD görülme sıklığının %10,91, KSH'nın ise %18,18 olduğu, standart lomber füzyon prosedürüyle karşılaştırıldığında KSD'nin dört, KSH'ise üç kat daha düşük olduğu bildirilmiştir (16). Formica ve ark. hibrit stabilizasyonla tedavi edilen 41 hastanın iki yıllık takiplerinde komşu segmentlerde anlamlı dejeneratif değişiklikler bulmadıklarını bildirmişlerdir (12). Maserati ve ark. ise DTO implante edilen ve 8 ay takip ettikleri 24 hastadan üçünün (%12,0) dinamik olarak stabilize edilen seviyelerde veya üzerinde semptomatik dejeneratif değişiklikler geliştirdiğini bildirmişlerdir (30). Baioni ve ark. da çalışmalarını DTO uygulanmış olgularla sınırlandırarak 30 hastanın 3'ünde (%10,0) radyografik KSD kanıtı kayıt ettiklerini bildirmişlerdir. Bu oran Maserati ve ark.'nın çalışmasında bildirdiklerine benzer olsa da Baioni ve ark. olgularını 5 yılı aşkın sürede takip etmişlerdir (1). Baioni ve ark.'nın bildirdikleri %10 radyografik KSD insidansı, Cheh ve ark. tarafından füzyon cerrahisinden sonraki ilk 5 yıl içinde bildirilen radyografik KSD insidansından dört kat daha düşük olup, hibrit fiksasyonun lomber füzyonun üzerindeki KSD gelişimini geciktirebileceğini düşündürmüştür (1,3). Bu sonuç yaş ile ilgili olup, 50 yaşın üzerindeki hastaların KSD geliştirme riski, 50 yaş ve altındaki kişilere göre daha yüksek olabilir (1). Lee ve ark. rijid fiksasyon ve hibrit füzyon arasındaki KSD gelişimini iki yıllık takipteki dinamik stabilizasyonla karşılaştırarak hibrit sistemlerin KSD'nu geciktirdiğini ancak önlemediğini bildirmişlerdir (20,26). Yine, Mageswaran ve ark. nın füzyon ve hibrit yapıları karşılaştıran biyomekanik çalışmasının sonuçları hibrit stabilizasyon sisteminin komşu segmentlerdeki fazla stres nedeniyle füzyon yapısıyla benzer

özelliklere sahip olduğunu göstermiştir (28). Ancak Durrani ve ark. tersine sonuç bildirmiş, çalışmaları dinamik stabilizasyon sisteminin genişletilmiş artrodezin neden olduğu hiper mobilitiyi azaltabileceğini göstermiştir. Ayrıca yazarlar, füzyon sonrası segmentin üzerine dinamik stabilizasyon sistemi eklendiğinde füzyona komşu segmentteki DİB'in azaldığını, böylece hibrit cerrahinin komşu segmentteki dejeneratif disk değişiklikleri üzerinde önleyici etkiye sahip olabileceğini bildirmişlerdir (8). Klinik sonuçlar DTO'nun instabil lomber omurga hastalıklarının tedavisinde %60 ila %90 arasında değişen bir memnuniyet oranıyla güvenli ve etkili bir alternatif sağladığını gösterse de postoperatif dönemde KSH'ları, vida gevşemesi ve vida kırılması gibi komplikasyonlar da rapor edilmiştir (11,18,21,28). Hsiao ve ark. nın araştırmasında, örneklerin kemik mineral yoğunluğu değerlerinin osteoporoz içermemesi nedeniyle hiçbir örnekte vida gevşemesi veya vida kırılmasına rastlanılmadığı bildirilmiştir (18). Baioni ve ark. da 30 hastadan oluşan kohortlarında, 5 yıllık takip sonunda ortalama Oswestry Engellilik İndeksi'nin (ODİ) 67.6'dan 27.7'ye düştüğünü göstermişlerdir. Aynı ekip olgularının klinik sonuçlarının iyi olması, herhangi bir implant kırılması veya vida gevşemesi olgusuna rastlanmaması nedeniyle serilerinin hibrit posterior fiksasyon sisteminin etkinliğini, güvenliğini ve güvenilirliğini desteklediğini bildirmişlerdir (1). Yine, Schwarzenbach ve ark. 31 hastadan oluşan bir popülasyonlarında, Dynesys ile enstrümantasyon sonrasında postoperatif ODİ ve görsel analog skalada (VAS) anlamlı bir iyileşme olduğunu bildirmişlerdir (35). Herren ve ark. da DTO hibrit enstrümantasyonla tedavi edilen ve ortalama 31 aylık takip ettikleri 55 hastanın tamamının zaman içinde ODİ'nde düzelme olduğunu, özellikle daha önce füzyon işlemi uygulanmış ve sonrasında üst komşu segmentte semptomatik dejenerasyon başlayan hastaların hibrit dinamik enstrümantasyondan yararlandıklarını bildirmişlerdir (16). Ancak Putzier ve ark. maksimum 76,4 aylık takip sonrasında, füzyon ve hibrit dinamik enstrümantasyon arasında ODİ ve VAS sonuçları açısından anlamlı bir fark olmadığını bildirmişlerdir (33).

Hibrit stabilizasyonda DTO gibi pedikül vida-rod bazlı hibrit stabilizasyon (PH) dışında interspinöz cihaz bazlı hibrit stabilizasyon (İH; geleneksel füzyonlu interspinöz proçes stabilizatörü) da kullanılmaktadır (Şekil 3C) (25). Geleneksel füzyon cerrahisine göre, İH ve PH modelinin KSD' nu önlemedeki etkinliği çeşitli klinik çalışmalarda gösterilmiştir (22,24,27). Hibrit yükleme koşulu altındaki lomber stabilizasyonun geçiş segmentinde füzyonun neden olduğu aşırı hareketi azalttığı ancak PH modelinin geçiş seviyesine komşu segmentte İH modeline göre daha yüksek strese neden olduğu, bu far-

kin da KSD olasılığını etkileyebileceği bildirilmiştir (Şekil 3) (24). Geçiş segmentinde de İH modelinin PH modeline göre bazı avantajları olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, İH modelinin kurulumu genellikle 30 dakikadan az sürmekte olup arka elemanlar daha az dissekte edilmekte, PH modeli ise daha uzun insizyon ve paraspinal kas disseksiyonu gerektirmektedir. Yine, PH modeli uygulanması sırasında geçiş segmentine pedikül vidalarının takılması nedeniyle faset eklem hasarı da oluşabilmektedir. Bu nedenle de PH modeli uygulanan hastalarda sıklıkla istenmeyen füzyon veya implant başarısızlığı meydana gelebilmektedir (5,6,22-24,33,36). Herren ve ark., hibrid dinamik enstrümantasyonun başlangıcında oluşan olumlu etkinin 60 aya kadar olan takip sırasında azaldığını, bunun nedeninin ise özellikle vida gevşemesi sorunu olabileceğini bildirdiler (16). Wu ve ark. dinamik stabilizasyonda vida gevşemesinin nadir olmadığını (hastaların %19,8'inde vidaların %4,7'si), yaşlı hastalarda veya diyabetli hastalarda vida gevşeme oranlarının daha yüksek olduğunu bildirdiler (40). Hoff ve ark. da benzer şekilde CD Horizon Agile Spinal System tamamlama cihazının kullanımıyla yüksek oranda (%30) implant kırılması (rod ve vidalar) bulduklarını bildirmişlerdir (17). Putzier ve ark. DTO cihazının prototipi olarak tanımlanan Allospine Dynesys Geçiş Sisteminin prospektif bir klinik çalışmasını sunarak 6 yıllık takip sırasında vida (%9,09) ve rod kırılması (%4,55) bildirdiler (33). Kashkoush ve ark. ise çalışmalarında, takip görüntüleme sırasında yalnızca tek vida kırılması olgusu bulunduğunu ancak üç kişide kafes migrasyonu gözlemlediklerini bildirdiler (20). Herren ve ark. dinamik enstrümantasyonlu vertebranın bitişiğinde veya içinde literatürde bildirilmeyen yüksek oranda (%10,91) kırık gözlemlediklerini, bu sorun nedeniyle biyomekanik açıdan hibrid cihazların komşu segment üzerindeki kuvveti ne kadar azalttığının açık olmadığını bildirdiler (16). Aynı ekip enstrümantasyonun farklı seviyelerinde %52,73 ile yüksek oranda vida gevşemesi tespit ettiklerini ve bu yüksek oranın, grubun yaşının yüksek olmasından kaynaklanabileceğini (ortalama yaş 69) ancak vida gevşemesi olguları da dahil olmak üzere genel olarak implantla ilişkili komplikasyon oranının %67, 27'ye kadar çıktığını bildirdiler. Yine aynı ekip olgularının uzun dönem takiplerinde, hibrid sistemle KSD veya KSH gelişimini dinamik sisteme göre daha az gözlemleseler de çalışmalarının dinamik hibrid cihazların güvenliğini desteklemediğini bildirdiler (16).

Sonuç olarak, hibrid dinamik stabilizasyonun orta veya uzun vadeli etkilerinin ve komşu segment üzerindeki etkisinin tam olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, komplikasyonları azaltmak ve hasta güvenliğini artırmak amacıyla implant tasarımını optimize edecek daha fazla biyomekanik çalışmalar ve klinik araştırmalar yapılmalıdır (16,18).

KAYNAKLAR

- Baioni A, Di Silvestre M, Greggi T, Vommaro F, Lolli F, Scarale A: Does hybrid fixation prevent junctional disease after posterior fusion for degenerative lumbar disorders? A minimum 5-year follow-up study. *Eur Spine J* 24 Suppl 7:855-864, 2015
- Boody BS, Smucker JD, Sasso W, Miller JW, Snowden R, Sasso RC: Evaluation of DIAM™ Spinal Stabilization System for lower lumbar disc degenerative disease: A randomized, prospective, single-site study. *J Orthop* 21:171-177, 2020
- Cheh G, Bridwell KH, Lenke LG, Buchowski JM, Daubs MD, Kim Y, Baldus C: Adjacent segment disease following lumbar/thoracolumbar fusion with pedicle screw instrumentation: A minimum 5-year follow-up. *Spine (Phila Pa 1976)* 32:2253-2257, 2007
- Chen XL, Guan L, Liu YZ, Yang JC, Wang WL, Hai Y: Interspinous dynamic stabilization adjacent to fusion versus double-segment fusion for treatment of lumbar degenerative disease with a minimum follow-up of three years. *Int Orthop* 40:1275-1283, 2016
- Chien CY, Kuo YJ, Lin SC, Chuang WH, Luh YP: Kinematic and mechanical comparisons of lumbar hybrid fixation using Dynesys and Cosmic systems. *Spine (Phila Pa 1976)* 39:E878-884, 2014
- Chuang WH, Lin SC, Chen SH, Wang CW, Tsai WC, Chen YJ, Hwang JR: Biomechanical effects of disc degeneration and hybrid fixation on the transition and adjacent lumbar segments: Trade-off between junctional problem, motion preservation, and load protection. *Spine (Phila Pa 1976)* 37(24):E1488-1497, 2012
- Dubois G: Dynamic stabilization with the Dynesys® system and the dynamic transition option DTO™ implant: philosophy — concept — surgical technique. *Interact Surg* 3:239-244, 2008
- Durrani A, Jain V, Desai R, Bucklen B, Ingalhalikar A, Muzumdar A, Moldavsky M, Khalil S: Could junctional problems at the end of a long construct be addressed by providing a graduated reduction in stiffness? A biomechanical investigation. *Spine (Phila Pa 1976)* 37:E16-22, 2012
- Erbulut DU, Zafarparandeh I, Ozer AF, Goel VK: Biomechanics of posterior dynamic stabilization systems. *Adv Orthop* 2013:451956, 2013
- Fay LY, Chang CC, Chang HK, Tu TH, Tsai TY, Wu CL, Huang WC, Wu JC, Cheng H: A hybrid dynamic stabilization and fusion system in multilevel lumbar spondylosis. *Neurospine* 15:231-241, 2018
- Fay LY, Wu JC, Tsai TY, Wu CL, Huang WC, Cheng H: Dynamic stabilization for degenerative spondylolisthesis: Evaluation of radiographic and clinical outcomes. *Clin Neurol Neurosurg* 115:535-541, 2013
- Formica M, Cavagnaro L, Basso M, Zanirato A, Felli L, Formica C: Is it possible to preserve lumbar lordosis after hybrid stabilization? Preliminary results of a novel rigid-dynamic stabilization system in degenerative lumbar pathologies. *Eur Spine J* 24 Suppl 7:849-854, 2015
- Gao T, Lai Q, Zhou S, Liu X, Liu Y, Zhan P, Yu X, Xiao J, Dai M, Zhang B: Correlation between facet tropism and lumbar degenerative disease: A retrospective analysis. *BMC Musculoskelet Disord* 18:483, 2017
- Ghasemi AA: Adjacent segment degeneration after posterior lumbar fusion: An analysis of possible risk factors. *Clin Neurol Neurosurg* 143:15-18, 2016
- Ha KY, Seo JY, Kwon SE, Son IN, Kim KW, Kim YH: Posterior dynamic stabilization in the treatment of degenerative lumbar stenosis: Validity of its rationale. *J Neurosurg Spine* 18:24-31, 2013
- Herren C, Sobottke R, Pishnamaz M, Scheyerer MJ, Bredow J, Westermann L, Berger EM, Oikonomidis S, Eysel P, Siewe J: The use of the DTO™ hybrid dynamic device: A clinical outcome- and radiological-based prospective clinical trial. *BMC Musculoskelet Disord* 19:199, 2018

17. Hoff E, Strube P, Rohlmann A, Gross C, Putzier M: Which radiographic parameters are linked to failure of a dynamic spinal implant? *Clin Orthop Relat Res* 470:1834-1846, 2012
18. Hsiao CK, Tsai YJ, Yen CY, Li YC, Hsiao HY, Tu YK: Biomechanical effect of hybrid dynamic stabilization implant on the segmental motion and intradiscal pressure in human lumbar spine. *Bioengineering (Basel)* 10:31, 2022
19. Jahng TA, Kim YE, Moon KY: Comparison of the biomechanical effect of pedicle-based dynamic stabilization: A study using finite element analysis. *Spine J* 13:85-94, 2013
20. Kashkoush A, Agarwal N, Paschel E, Goldschmidt E, Gerszten PC: Evaluation of a hybrid dynamic stabilization and fusion system in the lumbar spine: A 10 year experience. *Cureus* 8:e637, 2016
21. Khoeir P, Kim KA, Wang MY: Classification of posterior dynamic stabilization devices. *Neurosurg Focus* 22:E3, 2007
22. Lee CH, Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, Yoon SH, Kim HJ: The efficacy of lumbar hybrid stabilization using the DIAM to delay adjacent segment degeneration: An intervention comparison study with a minimum 2-year follow-up. *Neurosurgery* 73(2 Suppl Operative):ons224-31; discussion ons231-2, 2013
23. Lee CH, Jahng TA, Hyun SJ, Kim CH, Park SB, Kim KJ, Chung CK, Kim HJ, Lee SE: Dynamic stabilization using the Dynesys system versus posterior lumbar interbody fusion for the treatment of degenerative lumbar spinal disease: A clinical and radiological outcomes-based meta-analysis. *Neurosurg Focus* 40:E7, 2016
24. Lee CH, Kim YE, Lee HJ, Kim DG, Kim CH: Biomechanical effects of hybrid stabilization on the risk of proximal adjacent-segment degeneration following lumbar spinal fusion using an interspinous device or a pedicle screw-based dynamic fixator. *J Neurosurg Spine* 27:643-649, 2017
25. Lee CK, Langrana NA: Lumbosacral spinal fusion. A biomechanical study. *Spine (Phila Pa 1976)* 9:574-81, 1984
26. Lee SE, Jahng TA, Kim HJ: Hybrid surgery combined with dynamic stabilization system and fusion for the multilevel degenerative disease of the lumbosacral spine. *Int J Spine Surg* 9:45, 2015
27. Lu K, Liliang PC, Wang HK, Liang CL, Chen JS, Chen TB, Wang KW, Chen HJ: Reduction in adjacent-segment degeneration after multilevel posterior lumbar interbody fusion with proximal DIAM implantation. *J Neurosurg Spine* 23:190-196, 2015
28. Mageswaran P, Tschy F, Colbrunn RW, Bonner TF, McLain RF: Hybrid dynamic stabilization: A biomechanical assessment of adjacent and supraadjacent levels of the lumbar spine. *J Neurosurg Spine* 17:232-242, 2012
29. Malakoutian M, Volkheimer D, Street J, Dvorak MF, Wilke HJ, Oxland TR: Do in vivo kinematic studies provide insight into adjacent segment degeneration? A qualitative systematic literature review. *Eur Spine J* 24:1865-1881, 2015
30. Maserati MB, Tormenti MJ, Panczykowski DM, Bonfield CM, Gerszten PC: The use of a hybrid dynamic stabilization and fusion system in the lumbar spine: Preliminary experience. *Neurosurg Focus* 28:E2, 2010
31. Morishita Y, Ohta H, Naito M, Matsumoto Y, Huang G, Tatsumi M, Takemitsu Y, Kida H: Kinematic evaluation of the adjacent segments after lumbar instrumented surgery: A comparison between rigid fusion and dynamic non-fusion stabilization. *Eur Spine J* 20:1480-1485, 2011
32. Prud'homme M, Barrios C, Rouch P, Charles YP, Steib JP, Skalli W: Clinical outcomes and complications after pedicle-anchored dynamic or hybrid lumbar spine stabilization: A systematic literature review. *J Spinal Disord Tech* 28:E439-448, 2015
33. Putzier M, Hoff E, Tohtz S, Gross C, Perka C, Strube P: Dynamic stabilization adjacent to single-level fusion: Part II. No clinical benefit for asymptomatic, initially degenerated adjacent segments after 6 years follow-up. *Eur Spine J* 19:2181-2189, 2010
34. Ren C, Song Y, Liu L, Xue Y: Adjacent segment degeneration and disease after lumbar fusion compared with motion-preserving procedures: A meta-analysis. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 24 Suppl 1:S245-253, 2014
35. Schwarzenbach O, Rohrbach N, Berlemann U: Segment-by-segment stabilization for degenerative disc disease: A hybrid technique. *Eur Spine J* 19:1010-1020, 2010
36. Sengupta DK, Herkowitz HN: Pedicle screw-based posterior dynamic stabilization: Literature review. *Adv Orthop* 2012:424268, 2012
37. St-Pierre GH, Jack A, Siddiqui MM, Henderson RL, Nataraj A: Nonfusion does not prevent adjacent segment disease: Dynesys long-term outcomes with minimum five-year follow-up. *Spine (Phila Pa 1976)* 41:265-273, 2016
38. Sun X, Chen Z, Sun S, Wang W, Zhang T, Kong C, Lu S: Dynamic stabilization adjacent to fusion versus posterior lumbar interbody fusion for the treatment of lumbar degenerative disease: A meta-analysis. *Biomed Res Int* 2020:9309134, 2020
39. Wang Q, Liu J, Shi Y, Chen Y, Yu H, Ma J, Ren W, Yang H, Wang H, Xiang L: Short-term effects of a dynamic neutralization system (Dynesys) for multi-segmental lumbar disc herniation. *Eur Spine J* 25:1409-1416, 2016
40. Wu JC, Huang WC, Tsai HW, Ko CC, Wu CL, Tu TH, Cheng H: Pedicle screw loosening in dynamic stabilization: Incidence, risk, and outcome in 126 patients. *Neurosurg Focus* 31:E9, 2011
41. Zhou ZJ, Xia P, Zhao X, Fang XQ, Zhao FD, Fan SW: Can posterior dynamic stabilization reduce the risk of adjacent segment deterioration? *Turk Neurosurg* 23:579-589, 2013