



# Manyetik Rezonans Traktografinin Cerrahi Planlamadaki Önemi

## Magnetic Resonance Tractography in Preoperative Surgical Planning: Assessment of Its Impact

Macit TERZİ, İhsan DOĞAN

Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi, Nöroşirürji Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

**Yazışma adresi:** Macit TERZİ ✉ maciterzi@gmail.com

### ÖZ

Manyetik rezonans tensör traktografi beyaz cevher yollarının görüntülenmesini olanaklı hâle getiren yeni bir görüntüleme aracı olarak tanıtılmıştır. Cerrahi planlamanın doğru bir biçimde yapılması nöroanatomi bilgisinin radyolojik verilerle desteklenmesiyle mümkündür. Difüzyon tensör traktografi haritaları, beyin tümörünün kitle etkisine bağlı olarak beyaz cevher yollarında meydana gelen tahribatı anlamaya yardımcı olabilir. İntraoperatif nöronavigasyon sistemleriyle entegre şekilde kullanılan ve cerrahi sırasında rezeksiyon sınırlarının belirleyen yardımcı bir görüntüleme aracıdır. Difüzyon tensör traktografi beyaz cevher yollarını tanımlayarak güvenli rezeksiyon sınırlarının belirlenmesini sağlayan ve cerrahinin güvenliğini, etkinliğini artırmaya yardımcı olan etkin bir görüntüleme tekniğidir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Difüzyon tensör görüntüleme, İntraoperatif yardımcı teknikler, Manyetik rezonans görüntüleme, Traktografi

### ABSTRACT

Magnetic resonance tensor tractography has been introduced as an innovative imaging tool that makes it possible to visualize subcortical pathways. Accurate surgical planning is possible by supporting neuroanatomy knowledge with radiological data. Diffusion tensor tractography maps may help understand the pathologies of white matter pathways caused by the mass effect of a brain tumor. In addition, it is an auxiliary imaging tool used integrated with intraoperative neuronavigation systems and determines resection margins during surgery. Diffusion tensor tractography is an effective imaging technique that helps determine safe resection margins by identifying white matter pathways and helps increase the safety and effectiveness of surgery.

**KEYWORDS:** Diffusion tensor imaging, Intraoperative assistive techniques, Magnetic resonance imaging, Tractography

### ■ GİRİŞ

**M**ikrocerrahi tekniklerin başarılı bir şekilde uygulanması ve cerrahi planlamanın doğru bir şekilde yapılması beyin cerrahlarının nöroanatomi bilgilerini kullanarak radyolojik verileri değerlendirme yetkinliklerine bağlıdır. Dünyada ve ülkemizde teknolojik gelişmelerle beraber beyin cerrahisi alanında 1990 yılından itibaren kullanıma giren man-

yetik rezonans görüntüleme tekniği cerrahi tedavinin planlanmasında önemli yer tutmaktadır. Difüzyon tensör görüntüleme, fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme, difüzyon ağırlıklı görüntüleme gibi nöroradyoloji yöntemleri beynin nöronal ağlarının haritasının çıkarılmasında ve preoperatif süreçlerde planlamanın yapılmasında kullanılan yöntemler arasındadır.

Manyetik rezonans tensör traktografi beyin haritalama tekniklerini tamamlayan ve beyaz cevher yolaklarının görüntülenmesi olanaklı hâle getiren yeni bir görüntüleme aracı olarak tanıtılmıştır. Beyin tümörleri motor, görme ve lisan işlevleriyle ilişkili beyaz cevher yolaklarını etkileyebilen yer kaplayıcı lezyonlardır. Nörofonksiyonel dengenin korunması açısından ameliyat öncesi rezeksiyon sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Cerrahi tedavinin amacı postoperatif nörolojik defisitlerden kaçınmak için seçkin korteks alanlarını ve subkortikal beyaz cevher yolaklarını korurken rezeksiyonun kapsamını optimize hâle getirmektir.

## ■ MR TENSÖR TRAKTOGRAFI

Difüzyon tensör traktografi (DTG) protonların mikroskopik düzeyde yön bağımlı difüzyonunu ölçen ve beyaz cevher yolakları gibi anizotropiye duyarlılığı fazla olan yapıların 3 boyutlu değerlendirilmesini sağlayan görüntüleme tekniğidir (8). Difüzyon tensör görüntüleme, beyin parankiminin mikro yapısı hakkında bilgi edinmek için difüzyon anizotropisinden yararlanan yeni bir tekniktir. Anisotropi belli yönde kısıtlanan difüzyonun olduğu beyaz cevher yolaklarını gösterir. Suyun beyaz cevher içindeki anizotropik difüzyonu ilk olarak 1990 yılında Moseley ve arkadaşları tarafından, yalnızca iki farklı difüzyon yönünde veri elde eden bir MR tekniği kullanılarak gözlemlendi (6). Mevcut difüzyon teknikleri, 6 veya daha fazla doğrusal olmayan yöndeki difüzyon verilerini elde ederek matematiksel olarak tensor denilen geometrik yapıları tanımlamak için kullanılan sayısal sistem yardımıyla modellenir.

Bu teknik beyaz cevher yolaklarının geleneksel anatomik sekanslarla iyi tanımlanmadığı durumlarda ve patolojik yapısal lezyonlara (tümörler veya vasküler malformasyonlar gibi) göre konumunun belirlenmesinde yararlıdır. Merkezi sinir sistemi, kortikal fonksiyonel merkez bölgelerinden hem kısa hem de uzun beyaz cevher lifleri ile birbirine bağlanan entegre bir ağdır. İki motor korteks ayrı ayrı çalışmaz. Beyaz cevher lifleri komissüral, projeksiyon, asosiasyon lifleri olarak üç ana gruba ayrılır. Kommissüral lifler korpus kallozum, anterior komissür gibi her iki hemisferi birbirine bağlayan liflerdir. Projeksiyon lifleri korona radyata, kortikospinal traktus, forniks gibi birbirine uzak farklı yapıları birbirine bağlayan liflerdir. Asosiasyon lifleri U lifleri, uzun asosiasyon lifleri, arkuat fasikül, uncinat fasikül gibi aynı hemisferdeki önemli yapılar arasında bağlantı kuran liflerdir. Lif demetleri strialar, fasiküller ve yolaklar olarak adlandırılırken, geniş lif tabakaları lamina, kapsül ve radyasyo olarak adlandırılır. Bu isimler, lif demetlerinin büyüklüğünü ve şeklini tanımlamaktadır. Strialar uzunlamasına geçen ince lif demetleridir. Fasiküller mikroskobik olarak belirlenebilen lif gruplarıdır. Yolaklar, benzer bir işlevi yerine getiren akson gruplarıdır. Laminalar benzer yönde ilerleyen nispeten ince akson tabakalarıdır. Kapsüller, gri madde yapılarını kısmen kaplayan kavisli lif tabakalarıdır. Radyasyonlar, bir hedefe doğru veya hedeften uzaklaşan geniş lif tabakalarıdır. Deküstasyonlar orta hatta iki lif yolunun kesişmesi olarak tanımlanır.

Difüzyon tensör traktografi haritaları, beyin tümörünün kitle etkisine bağlı olarak liflerin yer değiştirmesi, infiltrasyonu ve tahribatını içeren beyaz cevher yolakları üzerindeki patolojik etkilerini anlamaya yardımcı olabilir. MR traktografi sağdan

sola seyreden lifleri kırmızı, önden arkaya lifleri yeşil, yukardan aşağıya yönelimi olan lifleri mavi olarak gösterir.

Beyaz cevher yolaklarının difüzyon tensör traktografi yardımıyla 3 boyutlu rekonstrüksiyonu ve motor korteksin uygun şekilde tanımlanmasını sağlayan fonksiyonel MR son yıllarda postoperatif morbiditenin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur (10).

Gelişen radyolojik görüntülemelerle beraber tanı daha kolay konulmakta ve ayrıntılı preoperatif görüntülemeleri yapılabildiği daha az oranda yanılma payıyla cerrahi planlama gerçekleştirilebilmektedir. Bu görüntüler ameliyat sırasında navigasyon sistemleri ile entegre edilerek hata payı daha da azaltılmaktadır. Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Beyin ve Sinir Cerrahisi Kliniğinde opere edilen olgu örnekleri üzerinden MR tensör traktografinin kullanım alanları gösterilmiştir.

## ■ OLGU ÖRNEKLERİ

### Olgu 1:

58 yaşında kadın hasta sol kol ve bacadaki güçsüzlük ve uyuşma şikayetiyle başvurdu. Fizik muayenesinde sol taraf 3/5 kas gücü saptanan hastanın görüntülemelerinde sağ talamus yerleşimli yüksek grade glial ile uyumlu kitlenin sağ kapsula internanın arka bacağında tahribata yol açtığı görülmesi üzerine beyaz cevher yolakları korunarak interhemisferik yaklaşımla biopsi alınma operasyonu planlandı (Şekil 1).

### Olgu 2:

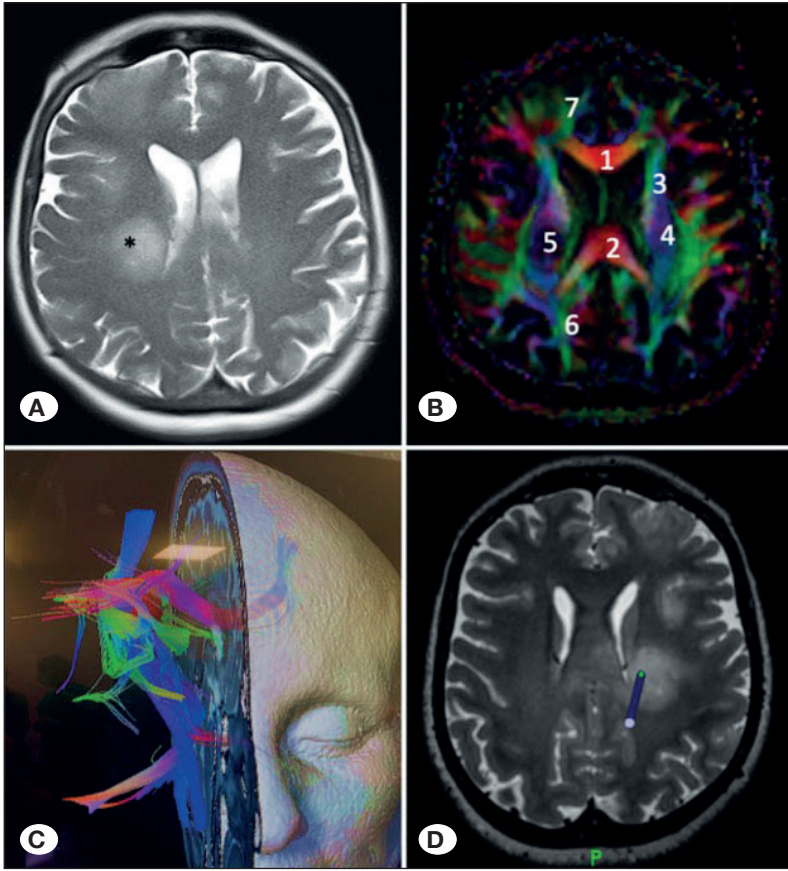
Kliniğimize baş ağrısı, bulantı, kusma şikayetiyle başvuran 26 yaşında kadın hastanın görüntülemelerinde sol lateral ventrikül komşuluğunda parasagittal yerleşimli sol anterior koroidal arterden beslenen, internal serebral vene drene olan arteriovenöz malformasyonla uyumlu lezyon saptanmıştır. MR tensör traktografi ile beraber ameliyat öncesi yapılan değerlendirme neticesinde posterior interhemisferik yaklaşımla cerrahi eksizyon planlanmıştır (Şekil 2).

### Olgu 3:

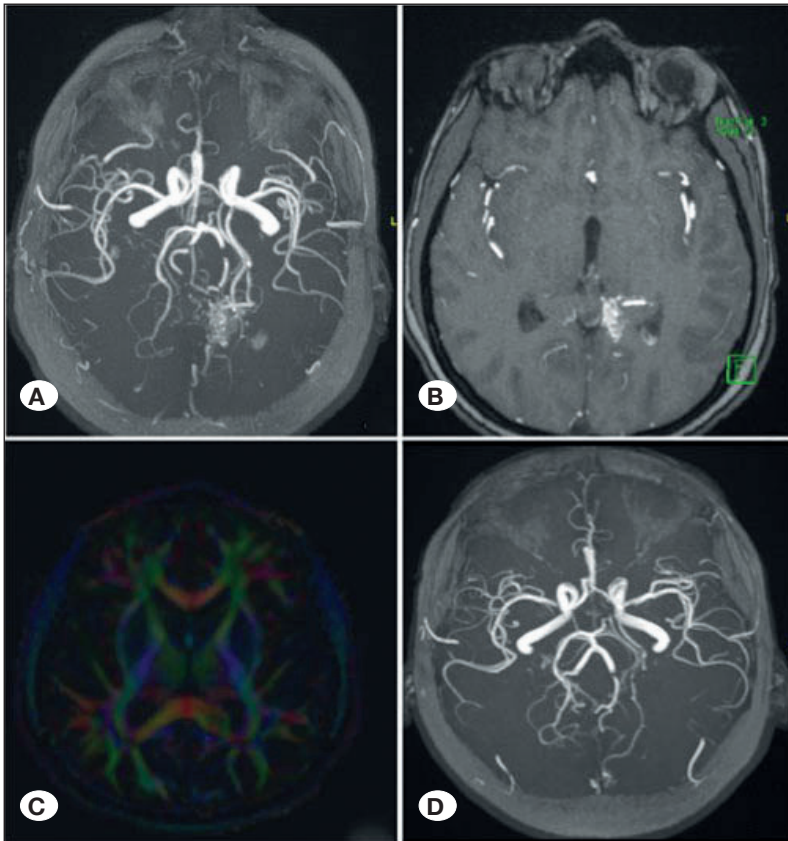
4 yaşında erkek çocuk kliniğimize sağ yüz yarımında güçsüzlük, sağ gözde kayma şikayetiyle başvurmuştur. Fizik muayenede sağ gözde dışa bakış kısıtlılığı ve facial paralizi saptanıyor. Hastanın görüntülemesinde ponsta posterior egzofitik uzanım gösteren, 4. ventriküle uzanan beyin sapı gliomunu taklit eden pons apsesi saptanıyor. MR tensör traktografinin intraoperatif BT navigasyon sistemiyle entegre edilerek telovelar yaklaşımla beyin sapı gliomunu taklit eden pons apsесinin drene edilmesi operasyonu gerçekleştiriliyor (Şekil 3).

### Olgu 4:

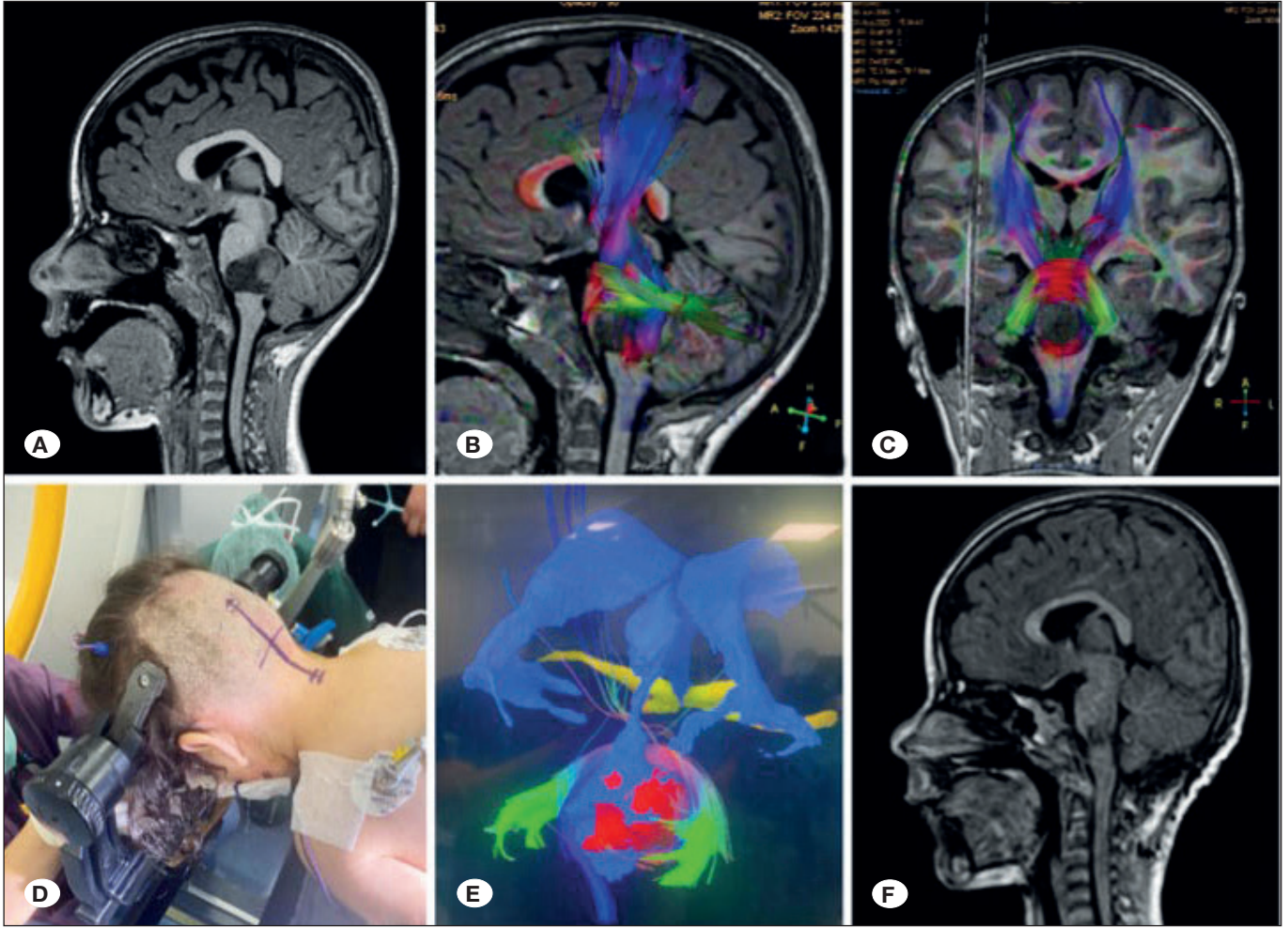
55 yaşında kadın hasta sol kolda uyuşma ve nöbet şikayetiyle kliniğimize başvurdu. Hastada nörolojik muayenesinde sol taraf 4/5 olarak değerlendirildi. Yapılan tetkiklerde sağ lateral ventrikül oksipital horn komşuluğunda santral kistik-nekrotik vasıflı periferi kontrastlanan yüksek grade glial ile uyumlu kitlenin sağ kapsula internanın arka bacağı ve splenium üzerinde tahribata yol açtığı görülmüştür. Hastanın beyaz cevher yolakları korunarak rezeksiyon sınırları optimize edilmeye çalışılmıştır (Şekil 4).



**Şekil 1:** **A)** Aksial T2 MR : Sağ talamus yerleşimli yüksek grade glial ile uyumlu kitle \* ile gösterilmiştir. **B)** MR tensör traktografi: Sağ kapsula internanın arka bacağına tahribata yol açan sağ talamus yerleşimli yüksek grade glial kitle (1-korpus kallosum rostrum, 2-korpus kallosum splenium, 3-İnternal kapsül ön bacağı, 4-İnternal kapsül arka bacağı, 5-Sağ talamus yerleşimli yüksek grade glial kitle, 6-forceps majör, 7-forceps minör) **C)** 3-boyutlu MR Traktografi **D)** İnterhemisferik yaklaşımla intraoperatif navigasyon sistemi eşliğinde tümörden biopsi alınması.



**Şekil 2:** **A)** MR anjiyografi, **B)** Aksial T1 kontrast: Solda korpus kallosum spleniumu, oksipital forseps düzeyinde sol anterior koroidal arterden beslenen, internal serebral vene drene olan arteriovenöz malformasyonla uyumlu lezyon izlenmektedir. **C)** MR traktografi: solda lateral ventrikülün sentral parçasının posteriorunda cingulumda arteriovenöz malformasyonla uyumlu vasküler lezyonun splenium ve capsula internanın arka bacağıyla olan komşulukları görülmektedir. **D)** MR anjiyografi: Posterior interhemisferik yaklaşımla AVM cerrahisi yapılan hastanın postoperatif görüntülemesi.



**Şekil 3:** A) Sagittal T1: Ponsta posterior egzofitik uzanım gösteren, 4. ventriküle uzanan beyin sapı gliomunu taklit eden pons apsesi B, C) MR traktografi: Motor korteksten çıkan kortikospinal lifler, korona radiatada bir araya gelirler ve kapsüla internanın arka bacağından geçerler. Traktus pons'a girdiğinde pontocerebellar fibriller tarafından demetlere ayrılır. Pontomedüller bileşkekte liflerin çoğu dekusasyon piramidum'da orta hattı çaprazlar D) Hasta concord pozisyonunda intraoperatif BT ile uyumlu başlığa alınarak televoletonsiller yaklaşımla beyin sapı gliomunu taklit eden pons apsесinin drene edilmesi E) Üç boyutlu MR traktografi görüntüleri F) Sagittal T1: Post-op görüntüleme.

## ■ TARTIŞMA

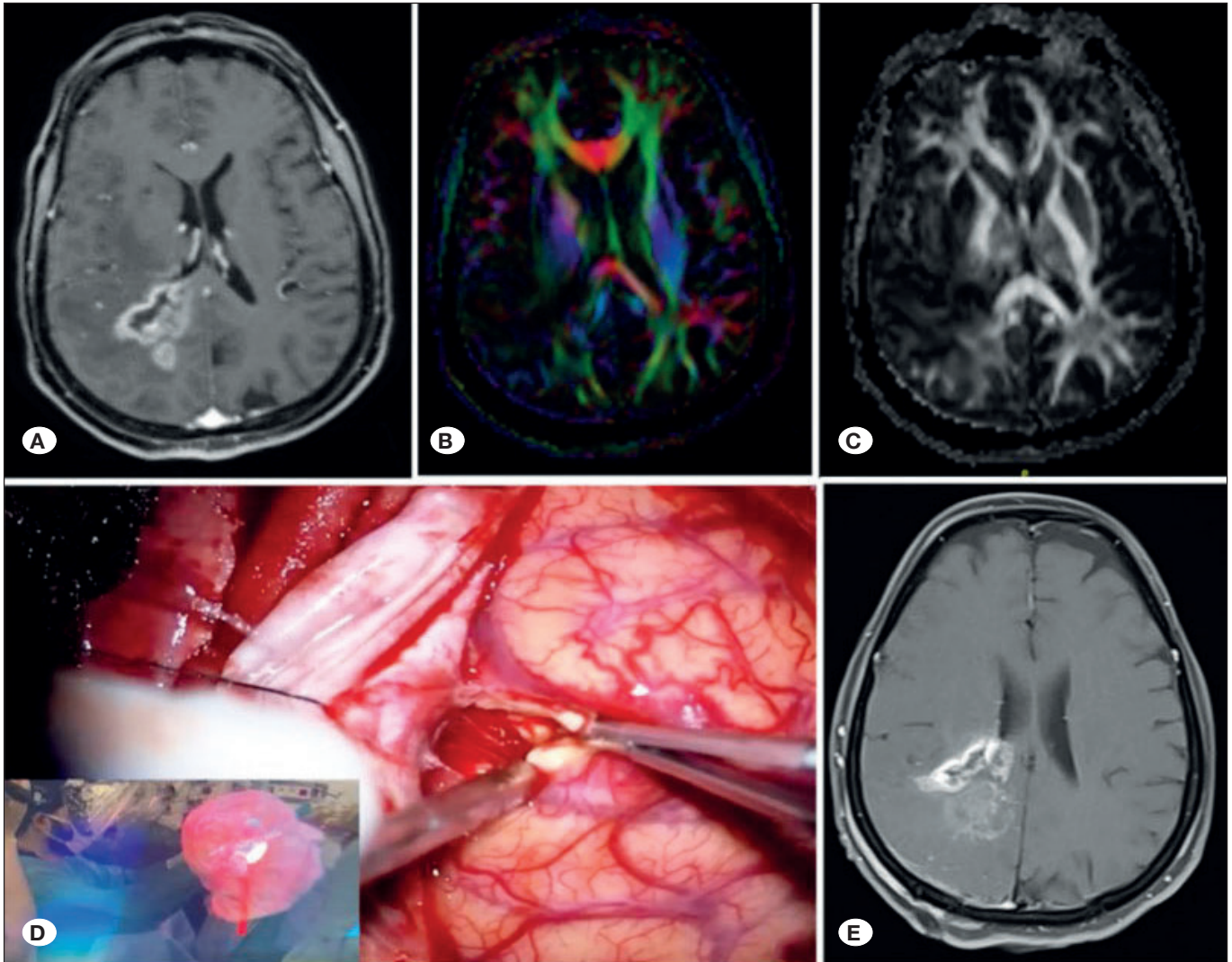
Klinik uygulamalar sırasında traktografi mikrocerrahi rezeksiyon için faydalı bir yardımcı olsa da çeşitli durumlardaki aksamlara (%18,2) ve başarısızlıklara (%6) ek olarak artefaktlar ve teknik eksiklikler (örn. Hematom) nedeniyle bazı sınırlamaları vardır (9). Kitle, hematom nedeniyle beyinde oluşan orta hat shiftine bağlı olarak intraoperatif beyaz cevher yollarının yer değiştirmesi cerrah açısından dikkat edilmesi gereken bir husustur. İntraoperatif direkt kortikal elektrik stimülasyonu mikrocerrahi sırasında 'altın standart' olarak kalsa da, traktografi ameliyat öncesi yapılabilen fonksiyonel beyin haritalamasına yönelik noninvaziv ve daha az karmaşık bir alternatiftir (1).

Difüzyon tensör traktografi görüntüleri, tümör dokuları ve ödemin neden olduğu bozulan anatomi nedeniyle kafa karıştırıcı olabilir. Peritümöral ödemin varlığı ve doğası tümör tiplerine göre farklılık gösterdiği için beyaz cevher yollarının yapısını

heterojen şekilde değişikliğe uğratmakta ve daha karmaşık duruma getirmektedir. Peritümöral alanlarda beyaz cevher yollarının hatalı ve tutarsız olabileceği göz önünde tutulmalıdır (5).

Difüzyon tensör traktografi donanımına, yazılıma ve operatöre bağlı olan karmaşık bir görüntü edinme tekniğidir. Traktografi rekonstrüksiyonlarının doğruluğunu etkileyen faktörler arasında MR tarayıcısının özellikleri, yazılım parametreleri ve verilerinin kalitesi yer alır. Artefaktların azaltılmasını sağlayan yardımcı algoritmalar geliştirilmiştir (2). Bu süreçler difüzyon tensör traktografi tekniğinin sınırlarını belirleyen etkenlerdir.

Kraniyotomi ve duranın açılmasından sonra yerçekimine ve hastanın pozisyonuna bağlı olarak beyinde meydana gelen yer değiştirme ameliyat öncesi görüntülenen beyaz cevher yollarının ameliyat sırasında beyinin güncel konumuyla örtüşmeyerek yanlış yorumlamaya neden olabilir. Beyin cerrahları



**Şekil 4:** **A)** Kontrastlı Aksial T1 MR : Sağ lateral ventrikül oksipital horn komşuluğunda santral kistik-nekrotik vasıflı periferi kontrastlanan kitle **B)** MR traktografi: Sağ capsula internanın arka bacağı ve splenium üzerindeki tahribat görülmektedir. **C)** Fraksiyonel anizotropik MR **D)** İntraoperatif nöronavigasyon sistemleriyle entegre karma gerçeklik teknolojisi kullanılarak yapılan cerrahi **E)** Kontrastlı Aksial T1 MR: Sağ capsula internanın arka bacağı korunarak nörolojik defisit gelişmesi engellenmiş ve rezeksiyon alanı optimize edilmiştir.

ameliyat sırasında anatomi bilgilerini kullanarak değişiklikleri takip eder ve görüntülemenin sınırlamalarına bağlı olumsuz sonuçları telafi etmeye çalışır. Ameliyat öncesi ve intraoperatif fraksiyonel anizotropi haritaları oluşturularak ameliyat sırasında cerrahi stratejinin yeniden uyarlanabileceği ve beyaz cevher yolaklarının gerçek konumunun saptanabileceği yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Beyin tümörü rezeksiyonu yapılan 27 hastada yapılan bir çalışma beyaz cevher yolaklarının kayması içe doğru 8 mm'lik kaymadan dışa doğru 15 mm'ye kadar değişiyordu (ortalama dışa doğru kayma 2,5 mm – 5,8). 27 hastanın %59'unda dışa kayma, %30'unda içe doğru kayma tespit edildi.

Temporal lob rezeksiyonu yapılan lezyonsuz epilepsi hastalarında ventriküler sistem açıldığı için beyin omurilik sıvısının kaybı beyin içe doğru kaymasına neden olur. İlaça dirençli

epilepsi nedeniyle temporal lob rezeksiyonu yapılan sekiz hastada optik radyasyonun 2 ila 14 mm içe doğru kaydığı tespit edildi. Burrhole işlemi uygulanan üç hastanın ikisinde dışa doğru kayma meydana geldi (7). Bu çalışmada gösterildiği gibi beyaz cevher yolaklarında belirgin saptanan ve öngörülemez kaymaların navigasyon sisteminin intraoperatif güncellenmesi ile optimize edilebileceği öngörülmektedir.

Beyin cerrahlarının derin yerleşimli tümörlerin çıkarılması esnasında neden olduğu deformasyonun neticesinde piramidal yol gibi önemli beyaz cevher yolaklarının gerçek pozisyonuna ilişkin güncel bilginin ameliyat sonrası nörolojik defisit gelişme riskini azaltacağı düşünülmektedir (7). Bununla birlikte çivili başlıkların oluşturduğu artefakt, operasyon lojundaki hava değerleri, maliyeti ve zaman kısıtlaması intraoperatif traktografi kullanımını kısıtlayan etkenlerdir.

Beyin tümörü olan hastalarda nöronavigasyon ve subkortikal beyaz cevher elektriksel stimölasyonu birleştiren bir çalışmada, görüntölleme tetkiklerinin lif demetlerinin gerçek boyutunu saptamakta başarısız olduğu görüldü. Primer motor korteksi ve piramidal sistemi içeren lezyonlar nedeniyle ameliyat edilen iki hastada MR traktografi, nöronavigasyon ve subkortikal beyaz cevher elektriksel stimölasyonu bir arada kullanıldı. Ameliyat öncesi MR traktografi görüntüleri ve ameliyat sırasındaki elektriksel beyaz cevher stimölasyonunun sonuçları, ameliyat sonrası MR görüntüleri ve cerrahi sonuçlarla karşılaştırıldığında MR tensör traktografi tekniğinin klinik etkinliğinin doğrulanmadığı gösterilmiştir (3). Ameliyat öncesi subkortikal elektriksel stimölasyon haritalaması ile MR tensör traktografi görüntölmesi karşılaştırıldığında vakaların yalnızca %82'sinde her iki teknik arasında iyi bir uyum bulunmuştur (4).

## ■ SONUÇ

Difüzyon tensör traktografi beyaz cevher yollarını tanımlayarak güvenli rezeksiyon sınırlarının belirlenmesini sağlayan ve cerrahinin güvenliğini, etkinliğini artırmaya yardımcı olan görüntölleme tekniğidir. Beyaz cevher yollarının doğru bir şekilde tanımlanmasıyla nöral bağlantı ağlarının anlaşılması kolaylaşacaktır. Cerrahi tedavinin planlanmasında kullanılması gereken ve cerrahin farkındalığını artıran değerli bir görüntölleme aracıdır. Ameliyat öncesi planlama sürecinde MR tensör traktografinin dahil edilmesi gerektiği vurgulanmakla beraber nöroanatomi bilgisi, elektrofizyolojik çalışmalar, fonksiyonel görüntölleme yöntemlerinin kullanımı ile optimize edilmesi gereklidir.

## ■ KAYNAKLAR

1. Bagadia A, Purandare H, Misra BK, Gupta S: Application of magnetic resonance tractography in the perioperative planning of patients with eloquent region intra-axial brain lesions. *J Clin Neurosci* 18(5):633-639, 2011
2. İrfanoğlu MO, Walker L, Sarlls J, Marenco S, Pierpaoli C: Effects of image distortions originating from susceptibility variations and concomitant fields on diffusion MRI tractography results. *Neuroimage* 61(1):275-288, 2012
3. Kinoshita M, Yamada K, Hashimoto N, Kato A, Izumoto S, Baba T, Maruno M, Nishimura T, Yoshimine T: Fiber-tracking does not accurately estimate size of fiber bundle in pathological condition: Initial neurosurgical experience using neuronavigation and subcortical white matter stimulation. *Neuroimage* 25(2):424-429, 2005
4. Leclercq D, Duffau H, Delmaire C, Capelle L, Gatignol P, Ducros M, Chiras J, Lehericy S: Comparison of diffusion tensor imaging tractography of language tracts and intraoperative subcortical stimulations. *J Neurosurg* 112(3):503-511, 2010
5. Min ZG, Niu C, Rana N, Ji HM, Zhang M: Differentiation of pure vasogenic edema and tumor-infiltrated edema in patients with peritumoral edema by analyzing the relationship of axial and radial diffusivities on 3.0T MRI. *Clin Neurol Neurosurg* 115(8):1366-1370, 2013
6. Moseley ME, Cohen Y, Kucharczyk J, Mintorovitch J, Asgari HS, Wendland MF, Tsuruda J, Norman D: Diffusion-weighted MR imaging of anisotropic water diffusion in cat central nervous system. *Radiology* 176:439-445, 1990
7. Nimsky C, Ganslandt O, Hastreiter P, Wang R, Benner T, Sorensen AG, Fahlbusch R: Intraoperative diffusion-tensor MR imaging: Shifting of white matter tracts during neurosurgical procedures-initial experience. *Radiology* 234(1):218-225, 2005
8. Pajevic S, Pierpaoli C: Color schemes to represent the orientation of anisotropic tissues from diffusion tensor data: Application to white matter fiber tract mapping in the human brain. *Magn Reson Med* 42(3):526-540, 1999
9. Shahbandi A, Sattari SA, Haghshomar M, Shab-Bidar S, Lawton MT: Application of diffusion tensor-based tractography in treatment of brain arteriovenous malformations: A systematic review. *Neurosurg Rev* 46(1):115, 2023
10. Wang L, Lin F, Wu J, Jiao Y, Cao Y, Zhao Y, Wang S: Plasticity of motor function and surgical outcomes in patients with cerebral arteriovenous malformation involving primary motor area: Insight from fMRI and DTI. *Chin Neurosurg J* 2:12, 2016