

Sol el baskın deneklerde serebral hemisferik asimetri: duyuşal-motor görev bağımlı bold yanıtının sinyal genlik analizi

Hakkı Muammer Karakaş, Bilge Çakır

AMAÇ

Solak deneklerde, sağ ve sol el duyuşal-motor görevleri sırasında ipsilateral ve kontralateral primer duyuşal-motor alanlarda oluşan etkinliklerin sinyal genlikleri, el ve hemisfer asimetrisi yönünden incelenmiştir. Bulgular, sağlak deneklere ait çalışmaların sonuçlarıyla, bu çalışmalarda öne sürülen kompleksite hipotezinin geçerliliği açısından karşılaştırılmıştır.

GEREÇ VE YÖNTEM

Yaşları 18 ile 26 arasında değişen 6 sağlıklı solak denek, 1.0 T (20 mT/m) tarayıcıda, fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme ile incelenmiştir. İncelemede eko-planar görüntüleme sekansı ve parmak dokundurma görevi kullanılmıştır. Sinyaller etkin alanlara eş boyutlu ilgi alanları yerleştirilerek ölçülmüştür. Sinyallerin denek içi ortalama genlikleri, genel lineer model kullanılarak, hemisfer ve el farklılıkları yönünden değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Hemisfer (sağ ya da sol) ve sinyal genliği arasında anlamlı ilişki bulunmamıştır. El (sağ ya da sol) ve sinyal genliği arasında zayıf fakat anlamlı bir ilişkinin varlığı saptanmıştır ($P < 0.07$). Genel ortalamalar dikkate alındığında, sağ el görevinin sinyal genliği sol el görevinin sinyal genliğinin ipsilateral hemisferde %138.8'i, kontralateral hemisferde ise %136.3'ü olarak bulunmuştur. En yüksek genlik sağ el görevi sırasında sol hemisferden elde edilmiştir. Sağ el görevleri sırasında oluşan ipsilateral etkinliğin genliği kontralateral etkinliğin genliğinin %82.2'sidir. Sol el görevlerinin yerine getirilmesinde bu oran %80.8'dir.

SONUÇ

Ipsilateral etkinliğin baskın olmayan el görevleri için daha belirgin olduğu hipotezi, literatürde sağlaklarla yapılmış çalışmaları tamamlayıcı şekilde, solaklar için doğrulanmıştır. Eş boyutlu ilgi alanlarının kullanılması ile literatürde etkin piksellerin sayılarının ölçümü ile elde olunan sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sağ el görevindeki sinyal genliklerinin her iki hemisferde sol el görevine göre daha yüksek olarak bulunmuş olması, sinyal genliği karşılaştırmalarının el baskınlığının saptanmasında kullanım alanı bulabileceğini düşündürmektedir.

Literatürde, el duyuşal-motor görevlerine bağlı kortikal etkinliklerin fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRG) ile araştırıldığı değişik çalışmalar bulunmaktadır (1-4). Söz edilen çalışmalarda, sağ el baskın deneklerin (sağlak) sol hemisferlerinde, ipsilateral el hareketleri sırasında kontralateral el hareketlerinde oluşana yakın büyüklükte etkinlik alanları saptanmaktadır (Resim 1A). Bununla birlikte sağlakların sağ hemisferlerinde ipsilateral etkinlik alanı izlenmemektedir (Resim 1B). Fonksiyonel görüntüleme ile ortaya konan bu asimetri, mevcut klinik ve anatomik çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde, sağlaklarda sol ipsilateral etkinliğe yol açan nedenin sol el hareketlerinin olası kompleksitesi olduğu şeklinde yorumlanmaktadır (3).

Bu çalışmada, sol el baskın (solak) deneklerde, sağ ve sol el motor görevleri sırasında ipsilateral ve kontralateral serebral hemisferlere ait primer duyuşal-motor alanlardan kortikal etkinlikler elde edilmiştir. Bu etkinlikler zamansal genlik değişimleri yönünden incelenmiş ve sağlak deneklere ait yayınlanmış çalışmaların sonuçlarıyla yukarıda sözedilen kompleksite hipotezinin geçerliliği açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada, farklı boyutlardaki ilgi alanlarının (ROI) kan oksijen seviyesi bağımlı (BOLD) sinyal genliği üzerine boyutlarından kaynaklanan etkileri ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle, tüm etkin alanın işaretlenmesi yerine, tüm deneklerde eş boyutlu tutulan ROI'ler kullanılmıştır (5).

Gereç ve yöntem

Denekler

Bu çalışma yaşları 18 ile 26 arasında değişen (ortalama $22 \pm 3,1$) 5'i kadın ve 1'i erkek toplam 6 sağlıklı denek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde temel düzey + iki sikluslu parmak dokundurma görevi ve duyuşal-motor fMRG kullanılmıştır. Denekler Edinburg bataryasına göre sol el baskın olarak değerlendirilmiştir (6). Denekler çalışmanın amacı ve fMRG'nin olası biyolojik etkileri konusunda bilgilendirilmiş ve yazılı onayları alınmıştır.

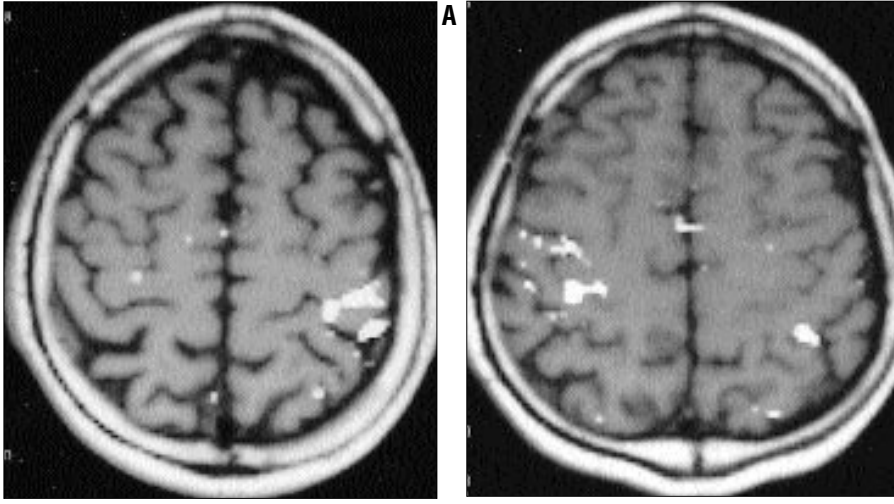
Etkinlik paradigması ve veri toplama

Kullanılan duyuşal-motor görev sol elin baş parmağının geri kalan sol el parmaklarının uçlarına 2,3,4,5;5,4,3,2 sırası ile ritmik olarak dokundurulmasından oluşan görev fazlarından ve parmakların hareket et-

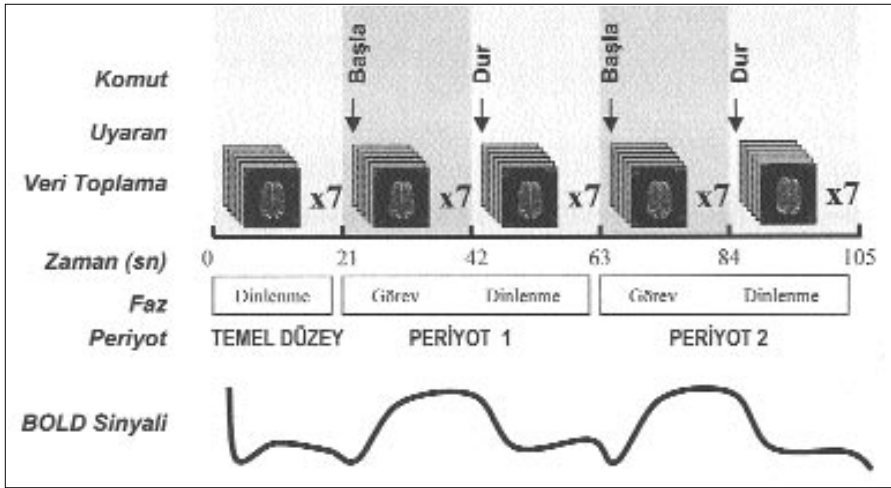
H. M. Karakaş (E), B. Çakır
Trakya Üniversitesi Tıp Fakültesi, Edirne

1. Ulusal Manyetik Rezonans Kongresi'nde (14 - 16 Aralık 2000, İzmir) poster bildirisi olarak sunulmuştur.

Gelişi: 20.12.2000 / Kabulü: 13.12.2001



Resim 1. Çalışma kapsamında olmayan iki sağlıklı denekte, sağ (A) ve sol el (B) görevleri sırasında kortikal etkinlikleri gösteren BOLD yanıtları. Baskın el görevinin sadece kontralateral etkinliğe (A), baskın olmayan el görevinin ise her iki hemisferde karşılaştırılabilir boyutta etkinliğe yol açtığı görülmektedir.



Çizim 1. Çalışmada kullanılan duyuşsal-motor etkinlik görevini gösteren blok şema (BOLD: Kan oksijen seviyesi bağımlı).

mediği dinlenme fazlarından oluşmaktadır. Parmakların birbirine değdirilme hızı denekler tarafından denetlenmektedir. Denekler incelemeden önce görevi 2 Hz sıklığında gerçekleştirmeleri için eğitilmiştir. Görüntüleme öncesinde görev başarımı yönünden gözlem altında alıştırma yapılmıştır. Fonksiyonel görüntüleme için kullanılan etkinlik protokolü, 21 saniye süren temel düzey devresi ile her biri 21'er saniye süren parmak dokundurma ve dinlenme fazlarından oluşan, toplam 42 saniye süreli iki devreden oluşmaktadır (Çizim 1). Görevin başlangıç ve bitişi magnet odasındaki hoparlörden verilen 1'er saniye süreli kısa bir sinyal ile belirtilmektedir. Sinyalin duyulabilirliği ana-

lize dahil edilmeyen bir deneme çekimi sırasında denetlenmiştir. Denekler tüm inceleme süresince gözlerini kapalı tutmaları yolunda uyarılmıştır. Görevin yerine getirilmesi magnet tünelinin yanında bekleyen bir radyolog tarafından denetlenmiştir.

Çalışma 20 mT/m maksimum gradyent kuvvetine sahip 1.0 T süperiletken tarayıcıda (Magnetom Impact Expert, Siemens, Erlangen, Almanya) standart kafa sargısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yerleşim için elde edilmiş üç düzlemlü görüntüleri takiben, sagittal ve koronal görüntüler kullanılarak, aksiyel plandaki anatomik görüntüler için iki planlı yerleştirme yapılmıştır. Anatomik görüntüler birincil kortikal el alanını korpus kallo-

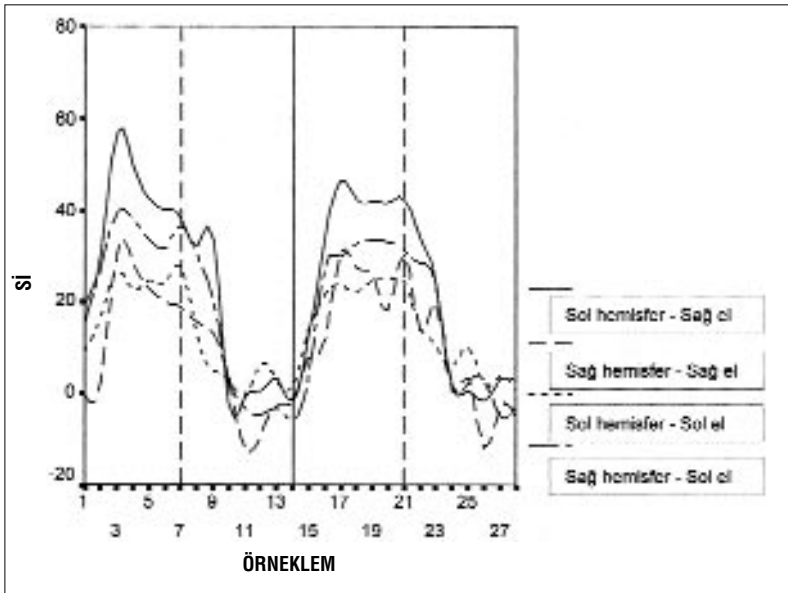
zumdan vertekse kadar kapsayan, bi-komissural düzleme paralel spin eko T1-ağırlıklı (TR/TE/NEX = 350/15/2) 10 paraksiyel kesitten oluşmaktadır. Belirtilen sekansla toplam 1 dakikada 33 saniyede FOV 210x210; matris 128x128; kesit kalınlığı 4 mm; ve kesit arası mesafesi 1 mm olacak şekilde görüntüler alınmıştır.

Fonksiyonel görüntüleme serbest induksiyon kayboluşu T2* "single-shot" gradyent eko-eko-planar görüntüleme (EPI) sekansı kullanılarak (TR/TE/NEX=1.8/66/1) anatomik T1-ağırlıklı görüntüleme eş kesitlerde gerçekleştirilmiştir. Belirtilen sekansla her üç saniyede bir, FOV 210x210; matris 64x64; kesit kalınlığı 4 mm; ve kesit arası mesafesi 1 mm olacak şekilde görüntüler alınmıştır. Toplam 105 sn süren veri toplama işlemi, 21 sn süreli üç dinlenme devresinden ve bu devrelerle dönüşümlü olarak uygulanan 21 sn süreli iki duyuşsal-motor devreden oluşmaktadır. Deney süresince her biri on kesit içeren toplam 35 seri (350 görüntü) elde olunmuştur. Tüm seriler hareket artefaktları yönünden sinematik yöntemle kontrol edilmiştir.

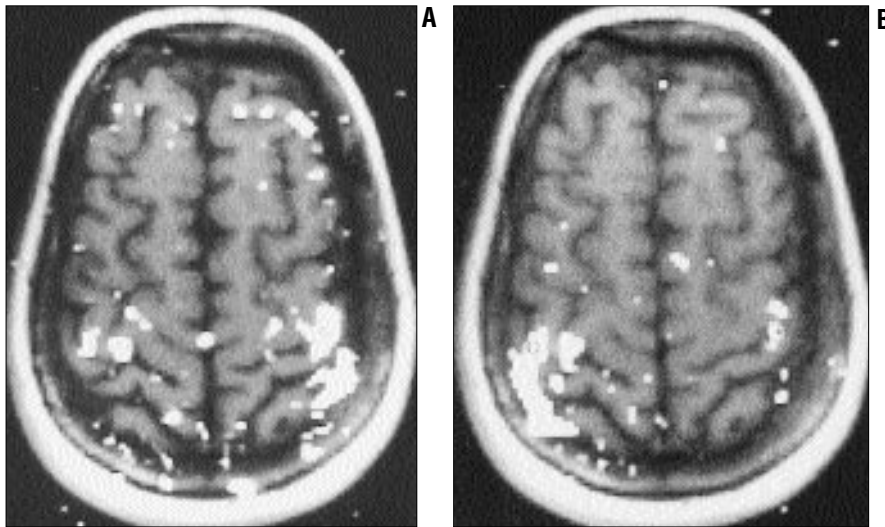
Veri analizi

Beyin bölgelerinin işlevsel uyumluluğu görev bağımlı etkinliğin korelasyonel analizi ile belirlenmiştir. Analizde, 21 sn'lik devrelerin ilk 6'şar sn'si (ilk iki örnekleme), olay-bağımlı etkinliğin latansı ve yükselme süresi nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır (4). Korelasyon eşik değeri (z skoru) tüm deneklerde 0.8 olarak seçilmiştir.

Sinyal şiddetinde etkinlikle uyumlu anlamlı değişimler renk kodlu etkin pikseller olarak gösterilmiş ve elde edildikleri fonksiyonel kesitlere karşılık gelen anatomik MRG kesitleri üzerine örtüştürülmüştür. Peri-Rolandik bölge, anatomik kriterlere ve komissura anterior-komissura posterior referans sistemine göre belirlenmiş bulunan santral sulkusa komşu giruslar olarak kabul edilmiştir (7,8). İpsilateral ve kontralateral presantral bölgelerde görev-bağımlı anlamlı sinyal değişimi gösteren alanlar, 0.1 cm²'lik eş



Grafik 1. Sağ ve sol el görevleri sırasındaki ipsilateral ve kontralateral kortikal etkinliklerin görev fazları ile ilişkisini gösteren, denek ortalamalarına ait temel düzey düzeltilmiş örneklem-şiddet grafiği (Örneklem: x 3 sn; SI: sinyal şiddeti).



Resim 2. Solak bir denekte, sağ (A) ve sol el (B) görevleri sırasında her iki hemisferde anlamlı kortikal etkinlikleri ve eş boyutlu işaretlemeleri gösteren fonksiyonel görüntüler. Her iki elin bihemisferik etkinliğe yol açması, bu denek için niceliksel değerlendirme yapmadan baskınlığın saptanmasını güçleştirmektedir.

boyutlu ROI'ler kullanılarak işaretlenmiştir.

Erken dönemdeki sinyal düşüşünü kontrol etmek için ilk dinlenme fazındaki ilk iki görüntüden elde edilen veriler analiz dışı bırakılmıştır. İlk dinlenme fazına ait geri kalan beş sinyal şiddetinin ortalaması alınmıştır. Bu ortalama, sinyal şiddetinin zamansal akışı sırasındaki temel düzey dalgalanmalarını dengelemek için kullanılmıştır. Düzeltilmiş veriler kullanılarak denek içi ortalamalar ve denekler arası genel ortalamalar elde edilmiştir. Her ortalama devrenin gecikme süresi

olarak kabul edilen ilk iki değeri değerlendirme dışı bırakıldıktan sonra, geri kalan denek içi ortalama verilerin, maksimagörev-minimakontrol olarak hesap edilen sinyal genlikleri hemisfer ve el farklılıkları yönünden incelenmiştir. Belirtilen incelemede genel lineer model-genel faktöryel analiz (GLM-GF) kullanılmıştır (9).

Bulgular

İnceleme kapsamındaki tüm deneklerde, santral sulkus çevresinde anlamlı BOLD yanıtını gösteren fMRG

görüntüleri elde edilmiştir. Tanımlanan etkin alanlardaki zamansal sinyal değişimleri uygulanan görev protokolü ile olay-bağımlı birliktelik göstermiştir (Grafik 1).

Uygulanan duysal-motor görev, tüm deneklerde her iki el için ipsilateral ve kontralateral etkinliğe yol açmıştır (Resim 2). İpsilateral ya da kontralateral etkinliklerin varlığı ve kullanılan el (sağ ya da sol) arasında denek sıklığı yönünden anlamlı fark bulunmamıştır.

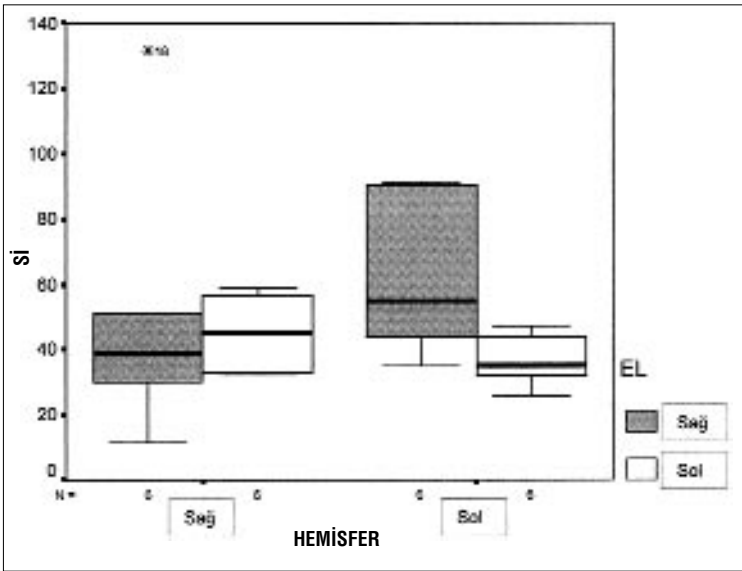
Denek içi ortalama verilerin sinyal genlikleri, GLM-GF analizi ile hemisfer ve el farklılıkları yönünden incelendiğinde hemisfer (sağ ya da sol) ve BOLD sinyal genliği arasında anlamlı ilişki bulunmamıştır. Buna karşın el (sağ ya da sol) ve BOLD sinyal genliği arasında istatistiksel olarak zayıf da olsa anlamlı bir ilişki saptanmıştır (ünivariat varyans analizi $P < 0.07$).

Grafik 2, değişik hemisfer ve el kombinasyonları için sinyal genlik ortalamalarının dağılımını göstermektedir. Deneklerin tümüne ait genel ortalamalar dikkate alındığında, sağ el görevinin BOLD sinyal genliği sol el görevinin sinyal genliğinin ipsilateral hemisferde %138.8'i, kontralateral hemisferde ise %136.3'ü olarak bulunmuştur. İncelenen dört farklı el-hemisfer kombinasyonundaki en yüksek genlik sağ el görevi sırasında sol hemisferden elde edilmiştir (Grafik 3).

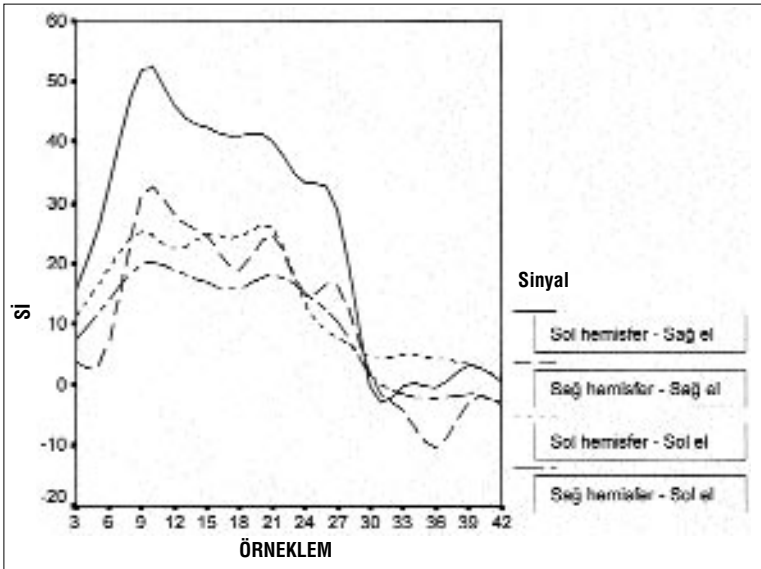
Sağ el görevlerinin yerine getirilmesi sırasında oluşan ipsilateral hemisferik etkinliğin genliği kontralateral hemisferik etkinliğin genliğinin %82.2'si olarak bulunmuştur. Sol el görevlerinin yerine getirilmesinde bu oran %80.8 düzeyinde gerçekleşmiştir.

Tartışma

Hemisferik baskınlık ve el baskınlığı insan serebral işlevlerin iki temel yönünü oluşturmaktadır (10). Motor işlevler açısından bakıldığında, sol hemisferik lezyonlardan kaynaklanan nörolojik kayıplar sağ hemisferik lezyonlardan kaynaklanan kayıplara göre daha belirgin olmaktadır (11-13). Bunun nedeni santral sulkus çevresinde-



Grafik 2. Sağ ve sol el görevleri sırasında ipsilateral ve kontralateral kortikal etkinliklere ait temel düzey düzeltmeli sinyal genlik ortalamaları ve standart sapmalarını gösteren kutu grafiği (SI: sinyal şiddeti).



Grafik 3. Değişik hemisfer ve el kombinasyonları için ölçülen temel düzey düzeltmeli sinyallerin genel ortalamalarının zamansal değişimi (SI: sinyal şiddeti).

ki kortikal hasarların, kontralateral elde paraliye ya da pareziye neden olmasıdır. İpsilateral elin işlevleri ise sağ ya da sol hemisfer lezyonlarınca farklı oranlarda etkilenmektedir. Sol hemisferik lezyonlar sol elin işlevsel bozukluğuna yol açmakta, buna karşın sağ hemisferik lezyonlarda sağ elin işlevleri göreceli olarak daha az etkilenmektedir (11-13). Kortikal hasarlar sonrası motor işlevlerin araştırıldığı bu çalışmaların önemli bir eksikliği, çalışmalara dahil edilen hastaların el baskınlıklarına dikkat edilmemiş olmasıdır.

Duyusal-motor işlevlerin gerçekleş-

tirilmesinde ipsilateral ve kontralateral hemisferlerin oynadığı roller duyu-sal-motor görevlerin kullanıldığı ve el baskınlığının kontrol edildiği fonksiyonel görüntüleme çalışmaları ile de araştırılmıştır. Bu çalışmalarda, sağ el baskın deneklerde, klinik çalışmalarla uyumlu şekilde, sol el hareketlerine bağlı ipsilateral etkinlik alanının sağ el hareketlerine bağlı ipsilateral etkinlik alanına göre daha geniş olduğu bulunmuştur (1-3).

Söz edilen bulguların sol el baskın deneklerdeki geçerliliğinin araştırıldığı bu çalışma, atıfta bulunan çalışmalara göre önemli bir farklılık içer-

mektedir. Çalışmada etkinlik farklılıklarının değerlendirilmesinde etkin alanların ölçümü değil, en geniş etkinlik alanı içine yerleştirilmiş eş boyutlu ROI'lerden elde edilen sinyal değerleri kullanılmıştır. BOLD sinyal genliği, altta yatan fizyolojik olaylar ve görüntüleme fiziği nedeniyle nöronal etkinliğin gerçek nicel ölçütünü oluşturmasa da, etkinlik ile görece lineer bir değişim göstermektedir (14,15). Sinyal genliği, ilgi alanlarının eş boyutlu yerleştirilmesi halinde, farklı hemisferlerden yapılan karşılaştırmalı ölçümler için nesnel bir kriter oluşturmaktadır (5). Sinyallerin ilgi alanları yolu ile incelenmesinin temel üstünlüğü, olay-bağımlı yanıtın zamansal bileşenlerinin de analiz edilebilmesi ve latans/genlik gözlemlerinin yapılabilmesidir. Çalışma kapsamındaki solaklarda, belirtilen yöntemle, ipsilateral hemisferler için sağ el görevinin sinyal genliğinin sol el görevinin sinyal genliğinin ortalama %138.8'i olduğunun bulunması, atıfta bulunan bulguların sol el baskın denekler içinde, bu sefer sağ elde olmak üzere varlığını göstermektedir.

El hareketleri sırasında ipsilateral etkinliklerin oluşması, insan lateral kortikospinal yollarının %10-15'inin çaprazlaşma yapmadığını kanıtlayan anatomik çalışmalar nedeniyle beklenen bir bulgudur (16). Literatürde, ipsilateral hemisferde anlamlı değişikliğin gösterilmediği çalışmalar bulunmakla birlikte (17), mevcut çalışma fMRG'nin kullanıldığı diğer birçok çalışma gibi ipsilateral etkinliğin varlığını doğrulamaktadır. Ayrıca etkinlik alanı büyüklüğü ne olursa olsun, ipsilateral sinyal genliğinin kontralateral sinyal genliğine göre sağ ve sol el için ortalama %81 düzeyinde gerçekleşmesi, ipsilateral hemisferin el hareketlerindeki önemli rolüne işaret etmektedir. Bu çıkarım maymunlarda yapılan deneysel çalışmalara ait çıkarımlarla da desteklenmektedir (18).

Sağ el baskın deneklerde yapılan çalışmalarda, ipsilateral etkinliğin sol el için daha belirgin olması, bu elin hareketlerinin sağlaklar için daha kompleks olduğu ve ipsilateral motor

korteksin bu hareketlerin kontrolünde olasılıkla daha fazla yer aldığı hipotezi ile açıklanmaktadır (3). Nitekim sol hemisferlerinde lezyon bulunan sağ-laklarda kontralateral kompleks motor kayıplara ek olarak ipsilateral kayıplar da izlenmektedir (19,20). Hemisferik etkinlik farklılıklarının görev zorluğuna bağlı olduğu hipotezinin doğru olması durumunda, bu hipotezin solaklarda sağ hemisfer-sağ el ikilisi için geçerli olması gerekmektedir. Mevcut çalışmada sağ el görevinin sol el görevine göre ipsilateral hemisferde daha yüksek bir genlik artışı yaratması solaklar için belirtilen hipotezi doğrulamaktadır.

Dikkate değer bir diğer konu, sağ el görevlerinin her iki hemisferde de sol el görevlerine göre daha yüksek etkinlik genliğine yol açmış olmasıdır. Deneklerin sol el baskınlığına işaret edebilecek olan bu sonuçlar, sağ elini kullanan deneklerde de aynı bulguların elde edilmesi durumunda, el baskınlığının Edinburg bataryası veya diğer yöntemler ile saptanmasına alternatif oluşturabilir.

Sonuç olarak, ipsilateral etkinliğin baskın olmayan elin hareketleri sırasında daha belirgin olduğu hipotezi,

literatürde sağlaklarla yapılan çalışmaları tamamlayıcı bir şekilde doğrulanmıştır. Eş boyutlu ilgi alanlarının kullanılması ile literatürde etkin alanların ölçümü ile elde olunan sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ek

olarak, sağ el görevlerinin her iki hemisferde de sol el görevlerine göre daha yüksek etkinliğe yol açmış olması, fMRG sinyal genliği karşılaştırmalarının el baskınlığının saptanmasında kullanılabileceğini düşündürmektedir.

CEREBRAL HEMISPHERIC ASYMMETRY IN LEFT-HANDED SUBJECTS: SIGNAL AMPLITUDE ANALYSIS OF SENSORY-MOTOR TASK RELATED BOLD RESPONSE

PURPOSE: Signal amplitudes of ipsilateral and contralateral primary sensory-motor activations during left and right hand sensory-motor tasks were analyzed for hemisphere and hand asymmetry in left-handers. Results were compared to those reported for right-handers, regarding the validity of the complexity hypothesis.

MATERIALS AND METHODS: Six healthy left-handed subjects, aged between 18 and 26 years were investigated in a 1.0 T (20 mT/m) scanner. Echo-planar imaging and finger tapping task were used in the experiments. In-subject average amplitudes of the signals, obtained by using equal-sized regions of interest, were analyzed with a general linear model for hemisphere and hand asymmetry.

RESULTS: No significant relation was found between hemisphere and signal amplitude, whereas a slight but significant relation existed between the latter parameter and hand ($P<0.07$). Regarding between-subjects averages, signal amplitude of the right hand task was found to be 138.8% of the left hand task in ipsilateral and 136.3% in contralateral hemispheres. The highest amplitude was obtained from the left hemisphere during the right hand task. Ipsilateral hemispheric activation during the right hand task was 82.2% of the contralateral hemispheric activation, whereas it was 80.8% for the left hand task.

CONCLUSION: The hypothesis of prominence of ipsilateral activation for non-dominant hand tasks were validated in left-handers. By using equal-sized regions of interest, similar results to ones that rely on measurement of activated pixels were found. As signal amplitudes during the right hand task were found to be higher than the ones during the left hand task, it was also assumed that amplitude comparisons might be used in the assessment of handedness.

TURK J DIAGN INTERVENT RADIOL 2002; 8:187-191

Kaynaklar

1. Li A, Yetkin FZ, Cox R, Haughton VM. Ipsilateral hemisphere activation during motor and sensory tasks. AJNR Am J Neuroradiol 1996; 17:651-655.
2. Kim SG, Ashe J, Hendrick K, Ellerman JM, Merkle H. Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. Science 1993; 261:615-617.
3. Singh LN, Higano S, Takahashi S, et al. Functional MR imaging of cortical activation of the cerebral hemispheres during motor tasks. AJNR Am J Neuroradiol 1998; 19:275-280.
4. Boecker H, Kleinschmidt A, Requardt M, Hancic W, Merboldt KD, Frahm J. Functional cooperativity of human cortical motor areas during self-paced simple finger movements: a high-resolution MRI study. Brain 1994; 117:1231-1239.
5. Karakaş HM, Tasalı N, Tunçbilek N, Ünlü E, Çakır B. İlgi alanı (ROI) boyutunun duyuşal-motor uyarılma paradigmasında BOLD sinyal intensitesi üzerine etkisi. Tanısal ve Girişimsel Radyoloji 2001; 7:16-21.
6. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. Neuropsychologia 1971; 9:97-113.
7. Sobel DF, Gallen CC, Schwartz BJ, et al.

- Locating the central sulcus: comparison of MR anatomic and magnetoencephalographic functional methods. AJNR 1993; 14:915-925.
8. Talairach J, Tournoux P. Referentially oriented cerebral MRI anatomy. Stuttgart: George Thieme Verlag, 1993.
 9. Karakaş HM. Kognitif nöroradyolojik yöntem ve yaklaşımlar In: Karakaş S, Aydın H, Erdemir C, Özemesi Ç, eds. Multidisipliner yaklaşımla beyin ve kognisyon. Ankara: Çizgi Tıp Yayınevi, 2000; 22-36.
 10. Myers DG. Psychology. 4th ed. New York: Worth Publishers, 1995; 60-68.
 11. Haaland YK, Harrington DL, Yeo R. The effects of task complexity on motor performance in left and right CVA patients. Neuropsychologia 1987; 25:783-94.
 12. Kimura D. Acquisition of a motor skill after left-hemisphere damage. Brain 1977; 100:527-542.
 13. Wyke M. The effects of brain lesions on the performance of bilateral arm movements. Neuropsychologia 1971; 9:33-42.
 14. Howseman AM, Bowtell RW. Functional magnetic resonance imaging: imaging techniques and contrast mechanisms. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 1999; 1387:1179-94.
 15. Karakas HM. Information processing in the human brain: simple and complex

- event-related functional magnetic resonance imaging approach. In: Onaral B, Stefanopoulos Y, eds. Workshop on biomedical information engineering proceedings. İstanbul: Boğaziçi University Printhouse, 2000; 141-144.
16. Nyberg HR, Rinvik E. Some comments of the pyramidal tract with special reference to its individual variations. Acta Neurol Scand 1963; 39:445-449.
 17. Roland PE, Meyer E, Shibasaki T, Yamamoto YL, Thompson CJ. Regional cerebral blood flow changes in cortex and basal ganglia during voluntary movements in normal human volunteers. J Neurophysiol 1982; 48:467-480.
 18. Tanji J, Okano K, Sato CK. Neuronal activity in cortical motor areas related to ipsilateral, contralateral, and bilateral digit movements of the monkey. J Neurophysiol 1988; 60:325-343.
 19. Jones DR, Donaldson MI, Parkin JP. Impairment and recovery of ipsilateral sensory-motor function following unilateral cerebral infarction. Brain 1989; 112:113-132.
 20. Haaland YK, Cleeland SC, Carr D. Motor performance after unilateral hemisphere damage in patients with tumor. Arch Neurol 1977; 34:556-559.