

Dikkatin Kontrolünde Maddeye Özgü Uyumluluk Oranı Etkilerinin Yarattığı Bilişsel Süreç Farklılığının fNIRS İle İncelenmesi

Item-Specific Proportion Congruency Uncovers Different Forms of Attentional Control: An event-related fNIRS Study

Sevgül TÜRKÖĞLÜ^{1,5}, Nart Bedin ATALAY², Merve KINIKLIOĞLU^{2,3}, Özge BOZKURT⁴, Burak ERDENİZ⁵
Murat Perit ÇAKIR⁶

¹Kıbrıs Aydın Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Psikoloji Bölümü, Girne, Kıbrıs

²TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen- Edebiyat Fakültesi, Psikoloji Bölümü, Ankara, Türkiye

³Bilkent Üniversitesi, İktisadi İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Psikoloji Bölümü, Ankara, Türkiye

⁴Anadolu Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Psikoloji Bölümü, Eskişehir, Türkiye

⁵İzmir Ekonomi Üniversitesi, Karmaşık Sistemler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Psikoloji Bölümü, İzmir, Türkiye

⁶Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, Bilişsel Bilimler Bölümü, Ankara, Türkiye

ÖZ

Giriş ve Amaç: Son dönemlerde yapılan çalışmalar dikkatin uyarıcı düzeyinde kontrol edilebildiğini göstermiştir. Bu çalışmalara göre deney kümesi içindeki her bir uyarıcı için, uyarıcının sunulma sıklığına göre farklı bir kontrol stratejisi kullanılabilmektedir. Ancak alternatif bir açıklamaya göre bu bulgular uyarıcı-tepki izlerlik öğrenmesi ile karıştırılmış olabilir. İzlerlik, belli bir çeldiricinin belli bir hedefle birlikte sunulma oranıdır; yüksek izlerlik, çağrışımsal öğrenme yoluyla daha hızlı tepki hazırlığını olanaklı kılarak uyarıcı düzeyi kontrolü taklit eden davranışsal etkiler üretir. Nörogörüntüleme çalışmaları ön singulat korteks (ACC) ve dorsolateral prefrontal korteks (DLPFC) aktivasyonuna dair kanıtlar sunmuş olsa da uyarıcı düzeyi kontrol ile izlerlik öğrenmesini nöral düzeyde birbirinden ayırmak hâlâ güçtür. Özellikle zamansal etkenlerin bu iki mekanizmanın prefrontal katılımını nasıl etkilediği henüz araştırılmamıştır.

Yöntem: Bu çalışmada flanker (yan uyarıcı/çeldirici) görevi aracılığıyla uyarıcı düzeyi uyumluluk oranı (UDUO) değişimlemesi kullanılmıştır. Tepki süresi ve hata oranına ek olarak fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi (fNIRS) ile prefrontal kortekste hemodinamik aktivite ölçülmüştür. İzlerlik öğrenmesinin rolü, uyarıcı

başlangıç asenkronisi (SOA) değişimlemesiyle incelenmiştir. 2 (uyumluluk) × 2 (uyumluluk oranı) × 3 (SOA: -250, 0, +250 ms) denek içi desen ve tekrarlı ölçümler varyans analizi kullanılmıştır.

Bulgular: Davranışsal verilerde UDUO etkisi (uyumluluk × uyumluluk oranı etkileşimi) anlamlı olup SOA tarafından düzenlenmiştir; -250 ve 0 ms koşullarında anlamlıyken +250 ms koşulunda anlamlı değildir. fNIRS verilerinde hiyerarşik FDR düzeltmesi sonrasında SOA temel etkisi sekiz kanalda (3,9–14,16), UDUO etkisi ise dört kanalda (1, 10, 11 ve 12) anlamlıdır. Üçlü etkileşim hiçbir kanalda anlamlı değildir. İzlerlik analizinde izlerlik temel etkisi (Uyumluluk Oranı × Uyumluluk etkileşiminin cebirsel eşdeğeri) yine 1., 10., 11. ve 12. kanallarda anlamlıdır.

Sonuç: Davranışsal veriler daha çok izlerlik öğrenmesini desteklerken fNIRS verileri, BA 46 duyarlılığına sahip kanal ile BA 10/BA 11 örtüşme bölgesindeki kanallarda UDUO ile ilişkili hemodinamik aktivasyon ortaya koymuştur; bu bulgu hem kontrol hem de öğrenme süreçlerinin olası katkısıyla tutarlıdır.

Anahtar Kelimeler: Dikkat, dorsolateral prefrontal korteks, hemodinamik, orbitofrontal korteks, öğrenme, spektroskopisi

ABSTRACT

Introduction: Recent research has shown that attentional control can be modulated at the item-specific level, meaning that different control strategies can be applied to individual stimuli based on their relative frequencies within a given set. However, an alternative account suggests these findings may be confounded by stimulus-response contingency learning. Contingency is the proportion of trials where a distractor appears with its corresponding target; higher contingency enables faster associative response preparation, producing behavioral effects that mimic item-specific control. While neuroimaging studies provide some evidence for anterior cingulate cortex (ACC) and dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) involvement during controlled processes, differentiating item-specific control from contingency learning at the neural level remains challenging. In particular, no prior study has examined how temporal factors influence prefrontal engagement during these two processes.

Methods: This study utilized item-specific proportion congruency (ISPC) manipulation via the flanker task. Hemodynamic activity in the prefrontal cortex was measured using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) alongside reaction time and error rates. The role of contingency learning was examined by manipulating stimulus onset asynchrony (SOA). A 2 (congruency) × 2 (proportion congruency) × 3 (SOA: -250, 0, +250 ms) within-subject design with repeated-measures ANOVA

was used. To control for multiple comparisons across the 16 channels and 7 ANOVA effects, a hierarchical false discovery rate (FDR) procedure was applied.

Results: The ISPC effect was significant and modulated by SOA, being significant at -250 and 0 ms but not at +250 ms. In fNIRS data, the SOA main effect was significant in eight channels (3,9–14,16), and the ISPC effect was significant in four channels (1, 10, 11, and 12), after hierarchical FDR correction. The three-way interaction was not significant in any channel. Contingency analysis revealed a main effect, with the largest contingency effect at -250 ms. The fNIRS contingency main effect was also significant in channels 1, 10, 11, and 12.

Conclusion: While behavioral results mostly support contingency learning, fNIRS data revealed ISPC-related activation in prefrontal channels with sensitivity to BA 46 (lateral, channel 1) and the BA 10/BA 11 overlap zone (medial, channels 10–12), with channel 11 emerging as a convergence point for both SOA and ISPC effects. This spatial dissociation is consistent with the possible involvement of both control and learning processes operating in parallel within distinct prefrontal subregions.

Keywords: Attention, dorsolateral prefrontal cortex, hemodynamics, learning, orbitofrontal cortex, spectroscopy

Cite this article as: Türköglü S, Atalay NB, Kınıkioğlu M, Bozkurt Ö, Erdeniz B, Çakır MP. Item-Specific Proportion Congruency Uncovers Different Forms of Attentional Control: An event-related fNIRS Study. Arch Neuropsychiatry 2026;63:606–615. doi: 10.29399/npa.29232

Öne Çıkan Noktalar

- Davranışsal veriler çoğunlukla izlerlik öğrenmesi mekanizmasını desteklemektedir.
- fNIRS verileri hem uyarıcı düzeyi kontrol hem de izlerlik öğrenmesini desteklemektedir.
- İzlerlik öğrenmesi ve kontrol mekanizmaları birlikte çalışabilmektedir.

GİRİŞ

Bilişsel kontrol, özellikle otomatik süreçlerin görev gereklilikleriyle çeliştiği durumlarda, bilgi işleme sürecini mevcut görevin amaçlarıyla uyumlu hale getirmek için esnek bir şekilde düzenleme yetisidir. Bu kavram, bilişsel işlemler esnasında gerçekleşen bilgiyi düzenleme ve görev doğrultusunda ayarlamalar yapabilme kapasitesini de kapsar. Söz konusu olgu, yaygın olarak flanker (yan uyarıcı/çeldirici) görevi aracılığıyla incelenmiştir (1). Bu görevde katılımcılardan, çeldirici işlevi gören harf dizileri içerisindeki merkezi hedef harfi tanımlamaları istenir. Çeldirici harflerin hedef harfle aynı olduğu durumlarda (uyumlu koşul; örn., FFF) yanıtlar daha hızlı ve doğrudur. Aynı olmadığı durumlarda ise (uyumsuz koşul; örn., DFD) daha yavaş ve hatalıdır. Uyumsuz ve uyumlu koşullar arasındaki fark uyumluluk (congruency) etkisi olarak adlandırılır ve kontrol düzeyinin bir göstergesi olarak kullanılır. Bu etki hedef uyaran ile çeldirici uyaranın yanıt seçimi üzerindeki göreceli etkisini göstermektedir.

Öncü bir çalışma, bilişsel kontrolün uyarıcı düzeyinde modüle edilebileceğini ortaya koymuştur (2). İlgili deneyde, uyarıcıların yarı çoğunlukla uyumlu ([ÇU], %75 uyumlu, %25 uyumsuz) koşulda sunulurken; diğer yarı çoğunlukla uyumsuz ([ÇUY], %75 uyumsuz, %25 uyumlu) koşulda sunulmuş ve tüm uyarıcılar seçkisiz bir sırada karıştırılmıştır. Bulgulara göre, uyumluluk etkisi çoğunlukla uyumlu uyarıcılarda daha büyük, çoğunlukla uyumsuz uyarıcılarda ise daha küçüktür. İki koşul arasındaki bu fark, uyarıcının kendisi tarafından tetiklenen uyarıcı düzeyinde bir kontrol biçimini yansıtan *uyarıcı düzeyi uyumluluk oranı* (UDUO; item-specific proportion congruency [ISPC]) etkisi olarak adlandırılmaktadır. Dikkatin kontrolü, çoğunlukla uyumlu ve çoğunlukla uyumsuz uyarıcılar için sırasıyla daha gevşek veya daha katı biçimde, aşağıdan yukarıya işleyen bir mekanizma aracılığıyla farklı şekillerde modüle edilebilmektedir. Önemli olarak, geleneksel deney listesinin tamamı boyunca dikkatin yukarıdan aşağıya stratejik biçimde yönlendirilmesine atfedilen liste düzeyi uyumluluk oranı (LDUO) etkisinin aksine (3), UDUO manipülasyonu aynı deney oturumu içerisinde genel liste düzeyi uyumluluk oranını sabit tutmaktadır (%50). Bu nedenle, uyumluluk etkisinde gözlemlenen herhangi bir değişim kapsamlı ve proaktif bir kontrole atfedilemez. Uyarıcı düzeyi uyumluluk oranı etkisi uyarıcılara özgü özelliklerle ilişkili olmalıdır. Bu yönüyle UDUO manipülasyonu mevcut kontrol açıklamalarını genişleterek uyarıcı düzeyi yeni bir kontrol biçimi ortaya koymaktadır.

Alternatif bir bakış açısı olarak Schmidt ve Besner (2008), UDUO etkisinin uyarıcı düzeyi kontrol süreçlerinden ziyade uyarıcı-tepki izlerlik öğrenmesi

mekanizmasıyla açıklanabileceğini öne sürmüştür (4). Her bir çeldirici boyut için izlerlik, ilgili çeldiricinin karşılık geldiği hedef boyut ile birlikte sunulduğu denemelerin oranı olarak hesaplanmaktadır. Uyarıcı düzeyi uyumluluk oranı deneylerinde çoğunlukla uyumlu kümedeki uyumlu uyarıcılarda ve çoğunlukla uyumsuz kümedeki uyumsuz uyarıcılarda yüksek düzeyde izlerlik bulunmaktadır (örn., $16/(16+4)=0,80$; bkz. Tablo 1). Diğer yandan, çoğunlukla uyumlu kümedeki uyumsuz uyarıcılar ile çoğunlukla uyumsuz kümedeki uyumlu uyarıcılar düşük izlerlik değerine sahiptir (örn., $4/(16+4)=0,20$). İzlerlik yüksek olduğunda katılımcılar, bilişsel kontrol süreçlerini kullanmaksızın, çeldirici boyut ile tepki arasındaki izlerlik ilişkisine dayanarak doğru tepkiyi tahmin edebilmektedir. Bu durum ilişkisel bir öğrenme oluşturarak tepki hazırlığını kolaylaştırmakta ve yüksek izlerlik içeren uyarıcılarda daha hızlı tepkilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu hızlı tepkiler, uyarıcı düzeyi kontrol süreçleri devreye girmeksizin öğrenme temelli bir UDUO etkisi üretebilmektedir. Jacoby ve ark.'nın (2003, 2) verilerini yeniden analiz eden Schmidt ve Besner (2008), yüksek izlerlik içeren uyarıcılara verilen tepkilerin düşük izlerlik içeren uyarıcılara kıyasla daha hızlı olduğunu göstermiştir (4). Bununla birlikte, izlerlik ve uyumluluk arasında herhangi bir etkileşim gözlemlenmemiş; uyumluluk etkisinin yüksek ve düşük izlerlik koşullarında aynı olduğu ortaya konmuştur. Oysa uyarıcı düzeyi kontrol açıklaması, bu iki değişken arasında bir etkileşim öngörmektedir. Çoğunlukla uyumsuz kümedeki uyumsuz uyarıcılar için artan kontrol durumlarının, yüksek izlerlik içeren uyumsuz uyarıcılardaki uyumluluk etkisini azaltması ve bunun sonucunda bir etkileşim etkisi oluşturması beklenmektedir. Ancak yeniden analiz sonuçlarında bu tür bir etkileşim gözlemlenmemiştir. Bu nedenle Schmidt ve Besner (2008, 4), UDUO etkisinin dikkatin uyarıcı düzeyi kontrolün bir göstergesi olmaktan ziyade, uyumluluk etkisi ile izlerlik öğrenmesinin birleşiminden oluşan iki ayrı sürecin ürünü olduğunu ileri sürmüştür. Bununla birlikte, davranışsal çalışmalar kapsamında UDUO etkisinin altında yatan mekanizmalar hâlâ tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Özellikle uyarıcı düzeyi kontrol süreçleri ile izlerlik öğrenmesinin göreceli katkıları konusunda alanyazınında farklı görüşler bulunmaktadır. Araştırmaların bir kısmı izlerlik öğrenmesinin baskın rolünü desteklerken, diğer bir kısmı kullanılan görevin özelliklerine bağlı olarak her iki mekanizmanın da katkı sunabileceğini ortaya koymaktadır (5–12).

Nörogörüntüleme çalışmaları da izlerlik öğrenmesi ile uyarıcı düzeyi kontrol süreçlerinin UDUO etkisine yaptığı göreceli katkıları ayırtırmaya yardımcı olabilir. Blais ve Bunge (2010), fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRG) yöntemi kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, anterior singulat korteks (ACC) ve dorsolateral prefrontal korteks (dLPFC) aktivasyonlarının her bir uyarıcının kendi uyumluluk oranına göre şekillendiğini göstererek uyarıcı düzeyi kontrolü desteklemiştir (13). İkinci bir fMRG çalışmasında Grandjean ve ark. (2013), Jacoby ve ark. (2003,2) aynı desene sahip bir UDUO deneyi yapmıştır (14). Bulgulara göre, çoğunlukla uyumlu kümede gözlemlenen uyumluluk etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır ve bu durum ACC ile dLPFC bölgelerinde uyumlu ve uyumsuz uyarıcılar arasında aktivasyon farklılıkları bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, çoğunlukla uyumsuz kümede ne ACC ne de dLPFC bölgelerinde anlamlı bir aktivasyon farklılığı gözlemlenmiştir. Grandjean ve ark. (2013,14), Schmidt ve Besner'in (2008, 4) yaklaşımına benzer biçimde kendi verileri üzerinde bir izlerlik analizi de gerçekleştirmiştir. Bulgular, ACC ve dLPFC aktivitesinin uyumluluk ile izlerlik arasındaki etkileşimi yansıtmadığını ortaya koymuştur. Bir başka deyişle, ACC-dLPFC ağı içerisinde uyumlu ve uyumsuz uyarıcılar arasında gözlemlenen aktivasyon farkı, yüksek ve düşük izlerlik koşullarında benzer düzeydedir. Bu bulgu, izlerlik öğrenmesi açıklamasını desteklemektedir. Birlikte değerlendirildiğinde, bu nörogörüntüleme bulguları ACC-dLPFC ağının uyarıcı düzeyi kontrol süreçlerindeki rolüne ilişkin karmaşık ve birbirleriyle tam olarak örtüşmeyen kanıtlar sunmaktadır.

Hem davranışsal hem de nöral düzeyde gerçekleştirilen araştırmalara rağmen, UDUO etkisinin nöral düzeyde esas olarak uyarıcı düzeyi

Tablo 1. Bir bloktaki uyaran dağılımı

Hedef çeldirici	D	F	J	K
D	16	4		
F	4	16		
J			4	16
K			16	4

Uyaran düzeni, üç SOA bloğunun tamamında aynıdır. Her katılımcı için harfler çoğunlukla uyumlu (ÇU) ve çoğunlukla uyumsuz (ÇUY) koşullara seçkisiz olarak atanmıştır.

kontrol süreçlerini mi yoksa izlerlik öğrenmesini mi yansıttığı halen netlik kazanmamıştır. Önemli olarak, önceki nörogörüntüleme çalışmaları ağırlıklı olarak klasik görevlere odaklanmış ve zamansal faktörlerin, izlerlik öğrenmesi ile uyarıcı düzeyi kontrol süreçlerinin farklı biçimlerde devreye girdiği durumlarda, prefrontal etkinliği nasıl etkileyebileceğini incelememiştir. Bu sınırlılığı gidermek amacıyla mevcut çalışmada, dikkat dağıtıcı uyarıcı ile hedef uyarıcının başlangıcı arasındaki zamansal aralığı ifade eden Uyarıcı Başlangıç Asenkronisi (Stimulus Onset Asynchrony [SOA]) manipülasyonu kullanılmış ve prefrontal aktivite fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi (functional near-infrared spectroscopy [fNIRS]) yöntemiyle ölçülmüştür. Uyarıcı başlangıç asenkronisi manipülasyonu kuramsal açıdan önemlidir; çünkü çeldirici boyut ve hedef boyut arasındaki zamansal ayırımı, izlerlik öğrenmesi ile uyarıcı düzeyi kontrol mekanizmalarının kullanımını farklı biçimlerde etkileyebilir. Özellikle çeldirici boyut hedef boyutun ardından +200 ms gecikmeyle sunulduğunda UDUO etkisinin ortadan kalktığını gösteren davranışsal bulgular göz önünde bulundurulduğunda (11), SOA manipülasyonu UDUO etkisinin nöral düzeydeki zamansal dinamiklerinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu örüntü, çeldirici boyutun, ya izlerlik öğrenmesine yol açan bir ipucu işlevi görebildiği ya da tepki başlatılmadan önce uyarıcı düzeyi reaktif kontrol süreçlerini tetikleyebildiği sınırlı bir zaman aralığı bulunduğunu göstermektedir.

Bu doğrultuda mevcut çalışmada, UDUO etkisinde prefrontal korteksin rolü, invaziv olmayan optik bir nörogörüntüleme yöntemi olan fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi (functional near-infrared spectroscopy [fNIRS]) kullanılarak incelenmiştir. fNIRS, kafa derisi üzerine yerleştirilen ışık yayıcıları ve algılayıcılar aracılığıyla kortekste hemodinamik yanıtı ölçen bir yöntemdir (15-17). Bu yöntem, yakın kızılötesi spektrumundaki emilim değişimlerine dayanarak oksijenlenmiş hemoglobin (oxy-Hb) ve oksijensiz hemoglobin (deoxy-Hb) yoğunluklarının göreceli düzeylerini hesaplamaya olanak sağlamaktadır (18-20). Her ne kadar fNIRS derin beyin dokularının gözlemlenmesi açısından uygun bir yöntem olmasa da (21,22), prefrontal korteks gibi kafa derisine yakın kortikal bölgelerdeki hemodinamik yanıtların ölçülmesinde güvenilir bir teknik olarak kabul edilmektedir (23). Ayrıca yöntemin maliyet açısından avantajlı olması, daha büyük örneklem gruplarıyla çalışmasına olanak sağlayarak istatistiksel gücün artırılmasına katkı sunmaktadır.

Önemli olarak, önceki hiçbir nörogörüntüleme çalışması, UDUO etkisinin kontrol temelli ve öğrenme temelli açıklamalarını ayırtmak amacıyla SOA manipülasyonunu prefrontal aktivitenin doğrudan ölçümüyle birleştirmemiştir. Çeldirici ile hedef boyut başlangıcı arasındaki zamansal asenkroninin (SOA) manipüle edilmesi kuramsal açıdan bilgilendiricidir; çünkü bu manipülasyon, izlerlik öğrenmesi ve uyarıcı düzeyi kontrolün katkılarını farklı şekillerde etkileyebilir (11). Bu doğrultuda, mevcut çalışmada prefrontal kortekste hemodinamik aktivitenin, UDUO etkisinin altında yatan mekanizmaları ve bu mekanizmaların SOA tarafından nasıl modüle edildiği incelenmiştir. Bu doğrultuda, iki temel öngörü oluşturulmuştur. İlk olarak, eğer UDUO etkisini yönlendiren mekanizma uyarıcı düzeyi kontrol ise, BA 46 duyarlılığına sahip kanallardaki aktivitenin (önceki fMRI literatüründe dIPFC ile ilişkilendirilen bölgeler; bkz. 13, ayrıca bkz. 24) UDUO etkisini göstermesi ve bu etkinin davranışsal verilerle paralel bir biçimde SOA tarafından modüle edilmesi beklenmektedir. İkinci olarak, eğer izlerlik öğrenmesi UDUO etkisine katkıda bulunuyorsa, öğrenmeyle ilişkili bölgelere (örneğin BA 11) duyarlılık gösteren ön prefrontal kanallardaki aktivasyonun da, fNIRS'in erişebildiği ölçüde, UDUO etkisini göstermesi beklenmektedir. Ayrıca bu etkinin, ilişkisel öğrenme için gerekli zamansal aralığı yansıtan SOA'ya bağlı bir modülasyon sergilemesi olasıdır. Her iki mekanizmanın da katkıda bulunması durumunda ise, hem BA 46'ya hem de BA 11'e duyarlı kanallarda UDUO ile ilişkili aktivasyon gözlenmesi beklenmektedir; ancak SOA modülasyonunun örüntüsü, bu mekanizmaların göreceli katkılarını açıklığa kavuşturmaya yardımcı olabilir.

YÖNTEM

Bu deneyin davranışsal replikasyonu ek materyallerde raporlanmıştır. Dilbilgisi hatalarını düzeltmek ve akademik yazım stilini geliştirmek amacıyla Gemini 3 Flash ve Grammarly Desktop programları kullanılmıştır.

Katılımcılar

Deneye İzmir Ekonomi Üniversitesi'nden 61 lisans öğrencisi katılmıştır. Tüm katılımcılar, normal veya düzeltilmiş-normal görme yetisine sahip olduklarını, herhangi bir psikoaktif ilaç kullanmadıklarını, okuma problemi ya da dikkat eksikliği bozukluğu bulunmadığını ve ana dillerinin Türkçe olduğunu bildirmiştir. Deney öncesinde tüm katılımcılar çalışmanın kısa bir açıklamasını okumuş ve çevrim içi bilgilendirilmiş onam formunu onaylamıştır. Analiz sırasında, fNIRS sinyali değerlerindeki fizyolojik ve/veya fizyolojik olmayan gürültü kaynakları nedeniyle 17 katılımcı analizden çıkarılmıştır. Ayrıca, bir katılımcının hata oranının ortalama hata yüzdesinden üç standart sapma daha yüksek olması, görevin yanlış anlaşılması olabileceğine ya da göreve yeterli katılım gösterilmediğine işaret ettiğinden, bu katılımcının verileri de analizden çıkarılmıştır. Tüm analizler, geriye kalan 40 katılımcının (30 kadın, 10 erkek; yaş ortalaması=21,28) verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Etik

Çalışma, Helsinki Bildirgesi'ne uygun olarak yürütülmüştür ve çalışma prosedürü İzmir Ekonomi Üniversitesi Etik Kurulu tarafından onaylanmıştır (B. 30,2. İEÜ. 0,05,05-020-052; Tarih: 07.04.2017). Tüm katılımcılar, deneyin başlangıcında katılım için yazılı onam vermiştir.

Desen ve İstatistiksel Analiz

Çalışmada, tepki süreleri (RT) ve hata yüzdesi (PE) için 2 (uyumluluk: uyumlu, uyumsuz) × 2 (Uyumluluk Oranı [UO]: Çoğunlukla Uyumlu[ÇU], Çoğunlukla Uyumsuz[ÇUY]) × 3 (SOA: -250 ms, 0 ms, +250 ms) tekrarlı ölçümler varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Davranışsal veriler R (R Core Team, Viyana, Avusturya), fNIRS verileri ise fNIRSOFT-PRO (BIOPAC, Kaliforniya, ABD) kullanılarak işlenmiştir (25). Hem davranışsal hem de fNIRS verileri JASP (JASP Team, Amsterdam, Hollanda) ile analiz edilmiştir. Tüm ANOVA analizleri yalnızca denek içi faktörlerden oluşmuş, denekler arası faktörler ya da kovaryatlar kullanılmamıştır.

Verilerin, birbiriyle rekabet eden iki kuramsal yaklaşımın öngörülerini doğrultusunda değerlendirilebilmesi amacıyla, 2 × 2'lik (Uyumluluk Oranı × Uyumluluk) alt desen üzerinden iki farklı kuramsal parametreleştirme çerçevesinde yorumlanmıştır. Uyarıcı düzeyi kontrol yaklaşımıyla (2,7) tutarlı olan *uyumluluk oranı çerçevesinde* (proportion congruency [PC]), temel test Uyumluluk Oranı (UO) × Uyumluluk etkileşimidir; yani UDUO etkisinin kendisidir. Buna karşılık, izlerlik öğrenmesi yaklaşımıyla uyumlu olan *izlerlik çerçevesinde* (4), ana test izlerlik temel etkisidir: yüksek izlerlikli uyarıcılara düşük izlerlikli uyarıcılara kıyasla daha hızlı tepki verilmesi beklenmektedir. Bu çerçevede yüksek izlerlikli kümeler {ÇU-uyumlu, ÇUY-uyumsuz-uyumsuz} koşullarına, düşük izlerlikli kümeler ise {ÇU-uyumsuz, ÇUY-uyumlu} koşullarına karşılık gelmektedir. Bu iki parametreleştirme, aynı modelin ortogonal dönüşümleridir ve aynı veri üzerinde özdeş test istatistikleri üretmektedir. Dolayısıyla bunlar bağımsız analizler değildir, bunun yerine kuramların temel karşıtlığını, üst düzey bir etkileşim olarak değil, temel etki olarak görünür kılan alternatif kodlamalardır. Özellikle, izlerlik temel etkisi matematiksel olarak Uyumluluk Oranı × Uyumluluk etkileşimine eşdeğerdir. İzlerlik × Uyumluluk etkileşimi ise Uyumluluk Oranı temel etkisine eşdeğerdir. Uyumluluk temel etkisi ise her iki çerçevede de değişmeden kalmaktadır. Bu doğrultuda, istatistiksel düzeltme amacıyla tüm etkiler Uyumluluk Oranı çerçevesi altında raporlanmıştır. İzlerlik çerçevesi ise kritik ayırt edici test olan: İzlerlik × Uyumluluk etkileşimini vurgulamak için kullanılmıştır. Bu etkileşim, alternatif çerçevede uyumluluk oranı temel etkisine eşdeğerdir. Anlamlı bir İzlerlik × Uyumluluk etkileşimi kontrol açıklamasını destekleyecek; bu etkileşimin gözlemlenmemesi ise izlerlik öğrenmesi açıklamasını destekleyecektir (4).

Uyarıcılar (ve işlem)

Uyaranlar, yan yana sunulan üç harften oluşmuştur; hedef harf merkezde, birbirinin aynı olan iki çeldirici harf ise hedefin solunda ve sağında yer almıştır. Uyumlu denemelerde hedef ve çeldirici harfler aynıdır (örn., DDD). Uyumsuz denemelerde ise hedef ve çeldirici harfler birbirinden farklıdır (örn., FDF). Tüm uyaranlar ekranın merkezinde, beyaz arka plan üzerinde 30 punto siyah Courier New yazı tipiyle sunulmuştur. Dört harf (D, F, J ve K) iki kümeye ayrılmış; bu kümelerden biri çoğunlukla uyumlu (ÇU) küme, diğeri ise çoğunlukla uyumsuz (ÇUY) küme olarak kullanılmıştır (Tablo 1). Önceki çalışmalarda olduğu gibi (2), bu kümeler seçkisiz biçimde birbirine karıştırılarak sunulmuş ve böylece liste düzeyi etkilerden ziyade uyarıcı düzeyi etkilerin gözlemlenmesi sağlanmıştır. Harflerin çoğunlukla uyumsuz ve uyumsuz kümelerine atanması da her katılımcı için seçkisiz olarak gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, hedef ve çeldirici harfler arasındaki SOA manipule edilmiştir.

Çeldirici-önce koşulunda (SOA=-250 ms), çeldirici harfler hedef harf aralarına yerleştirilmeden önce 250 ms süreyle sunulmuştur. Eşzamanlı sunum koşulunda (SOA=0 ms), çeldirici ve hedef harfler aynı anda sunulmuştur. Buna karşılık, hedef-önce koşulunda (SOA=+250 ms), çeldirici harfler sunulmadan önce hedef harf 250 ms süreyle gösterilmiştir (bkz. Şekil 1). Uyaranlar, bir tepki kaydedilene ya da 1500 milisaniyelik süre sınırına ulaşılan kadar ekranda görünür kalmıştır. Bu süreyi aşan denemeler “teпки yok” olarak kodlanmıştır. Uyaran başlangıç asenkronisi, 80 denemeden oluşan her blok içinde sabit tutulmuştur. Uyaran başlangıç asenkronisinin denemeden denemeye seçkisiz biçimde değişmesi zamansal belirsizlik yaratabileceğinden, özellikle bloklu SOA prosedürü tercih edilmiştir. Bu tür bir zamansal belirsizlik, katılımcıları daha temkinli “bekle ve gör” stratejileri kullanmaya teşvik edebilir ve bu durum incelenen mekanizmaların belirginliğini azaltabilir. Buna karşılık, SOA’nın bloklar hâlinde sunulması, katılımcıların her blok içinde istikrarlı zamansal beklentiler geliştirmesine ve böylece SOA etkisine ilişkin daha net bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlamaktadır. Farklı SOA blokları farklı bilişsel setler oluşturabilecek olsa da bu durum, deney deseninin kuramsal olarak gerekçelendirilmiş bir yönüdür. Özellikle bu çalışmada, farklı zamansal dinamiklerin UDUO etkisini ve bu etkinin altında yatan mekanizmaları sistematik olarak modüle edip etmediğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Her bir SOA koşulu 80 deneme içermektedir (toplam 240 deneme) ve bu sayı hem kontrol ayarlamalarının hem de izlerlik öğrenmesi süreçlerinin ortaya çıkması için yeterli maruziyet sağlamaktadır. Önceki bulgular, UDUO etkisinin ilk 16 deneme içinde dahi güvenilir biçimde ortaya çıkabildiğini göstermektedir (2). Bu durum, mevcut deney deseninin her blok içinde etkinin ortaya çıkması için yeterli koşulları sağladığını düşündürmektedir. Ayrıca önceki araştırmalar, bloklu SOA

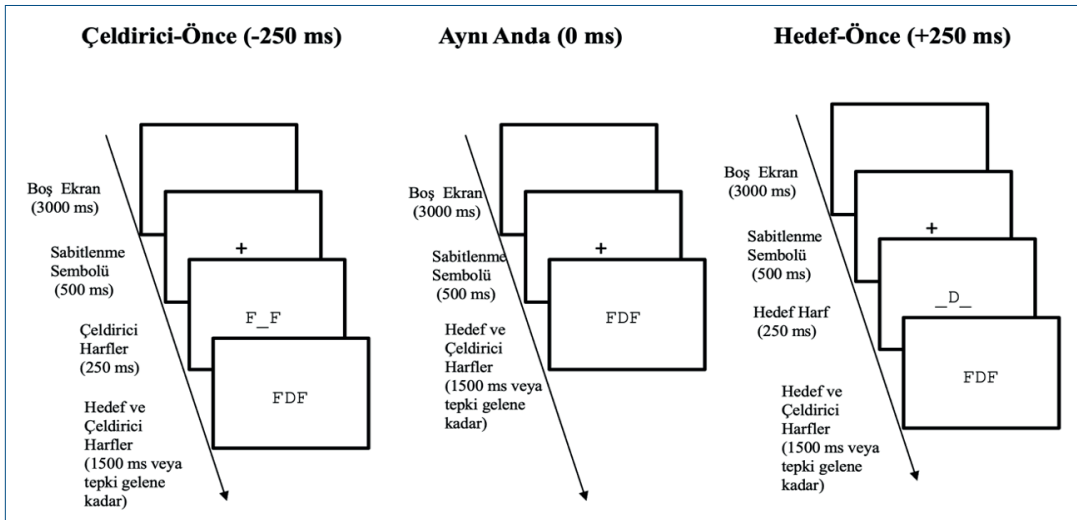
prosedürlerinin güvenilir UDUO etkileri üretebildiğini göstermiştir (11). Uyaran sunumu ve veri toplama, Serial Response Box® (Psychology Software Tools, Pittsburgh, ABD) ile birlikte E-Prime® yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Katılımcılara, çeldirici harfleri göz ardı ederek hedef harfe karşılık gelen tuşa olabildiğince hızlı ve doğru biçimde basmaları gerektiği sözlü ve yazılı olarak bildirilmiştir. Her deneme, 3000 ms süren boş bir ekranla başlamış; bunu 500 ms boyunca sunulan bir sabitleme sembolü izlemiş ve ardından SOA koşuluna bağlı olarak hedef ve/veya çeldirici harfler ekranda sunulmuştur. Deney oturumu toplam 240 denemeden oluşmuştur; her SOA koşulu için 80 denemelik bir blok uygulanmıştır. Uyaran başlangıç asenkronisi bloklarının sırası her katılımcı için seçkisiz olarak belirlenmiştir.

fNIRS işlemi

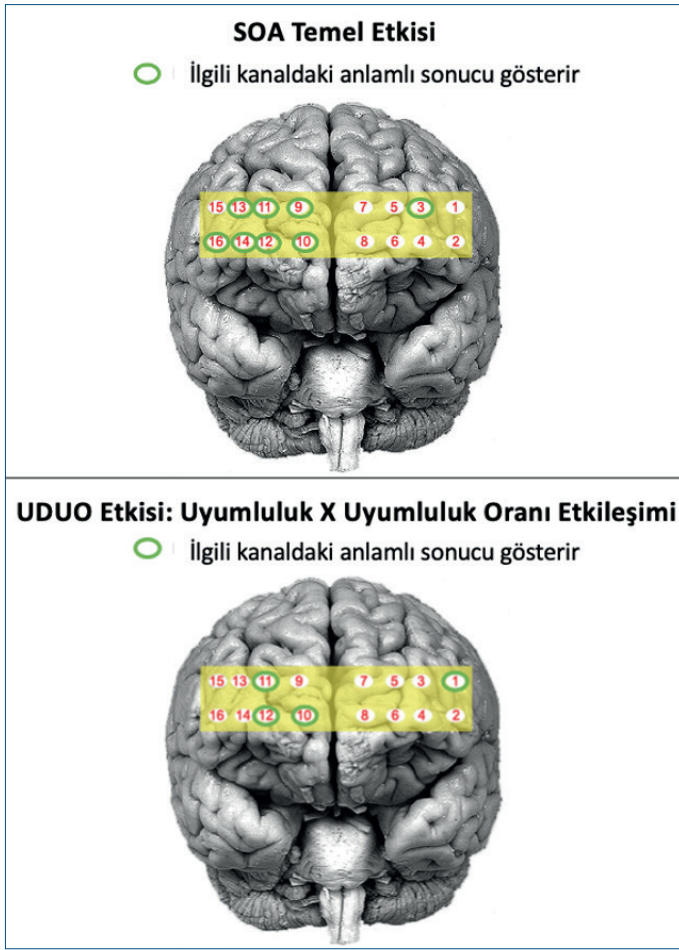
Prefrontal kortekste hemodinamik aktivite, fNIR 200A 16 kanallı fonksiyonel (stand-alone) beyin görüntüleme sistemi (fNIR Devices, LLC [Potomac, MD, ABD]) kullanılarak gözlemlenmiş; fNIR Imager’den veri toplamak için COBI Studio (BIOPAC, Kaliforniya, ABD) kullanılmıştır. Deney başlamadan önce, katılımcının alnı kir, ter ve kozmetik materyallerden arındırılmak amacıyla temizlenmiştir. Ardından katılımcıların alnına fNIR sensör pedi yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 2). Son olarak, kayıt öncesinde her katılımcı için sinyal değerleri kontrol edilmiştir. Sinyal değerleri 400 mV ile 4000 mV arasında değilse cihaz durdurulmuş; uygun sinyal değerleri gözlemlenene kadar ışık şiddeti ve dedektör kazanç değerleri ayarlanmıştır. Cihaz ayarları düzenlendikten sonra hemodinamik aktivite kaydedilmiştir. Uyaran sunumu E-Prime 2.0 ile programlanmıştır.

fNIRS Veri Ön İşleme

Veriler, fNIRSOFT-PRO analiz yazılımı (BIOPAC, Kaliforniya, ABD) kullanılarak analize hazırlanmıştır (25). Her katılımcının ham verisi, sinyal değerlerinin kalitesi açısından değerlendirilmiştir. Sensörün altında saç bulunması nedeniyle sinyal yoğunluğu kabul edilebilir aralığın (400–4000 mV) dışında kalan ya da aşırı terlemeye bağlı olarak kararsız optik bağlantı gösteren katılımcılar, fizyolojik olmayan gürültü kaynakları olarak tanımlanmıştır. Buna ek olarak, deney sırasında baş hareketlerinden kaynaklanan aykırı değerleri ve ani artışları düzenlemek amacıyla SMAR (sliding windows motion artifact rejection) algoritması uygulanmıştır (29). Analiz dışı bırakılan katılımcı sayısı Katılımcılar bölümünde raporlanmıştır. Çalışmadaki analiz dışı bırakılan katılımcı oranı görece yüksektir; bu durum muhtemelen katı kalite ölçütlerinden, katılımcıların saç özelliklerinden (yoğun ve koyu renk saç) ve deneyin görece uzun sürmesi sonucu hareket artefaktlarının ortaya çıkmasından kaynaklı olabilir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilmiş optotlara sahip daha yeni fNIRS sistemlerinin kullanılması ve daha sık aralar verilmesi önerilmektedir.



Şekil 1. Örnek uyaran sunumu.



Şekil 2. Lateral kanallar (sol 1, 2; sağ 15, 16; BA 46/10), medial kanallar (sol 5, 6; sağ 11, 12; BA 10/11) ve frontopolar kanallar (sol 7, 8; sağ 9, 10; BA 10) olarak tanımlanmıştır. Kanal 3 ve 4 (sol) ile Kanal 13 ve 14 (sağ) birden fazla alanı kapsamaktadır (BA 10, 11, 46, 47). Kanal-Brodman alanı eşleşmeleri, standart montaj (26,27) ve üretici firmanın haritalamasına (BIOPAC; bkz. 28) dayanmaktadır ve yaklaşık olarak değerlendirilmelidir.

Solunum hızı, kalp atımındaki değişimler ve kan basıncı da (Mayer döngüleri) kan dolaşımını etkilemektedir (30); bu durum ham fNIRS sinyallerinde yüksek frekanslı gürültüye yol açmaktadır. Verilerdeki bu yerel değişimleri gidermek amacıyla, SMAR uygulamasından sonra 20. dereceden ve 0,1 Hz kesim frekansına sahip bir filtre (finite impulse response [FIR]) uygulanmıştır (29,31). Son olarak, fNIRS belirteçleri değiştirilmiş (modified) Beer-Lambert Yasası kullanılarak hemodinamik yanıtlara dönüştürülmüştür. Her bir uyumluluk bloğu sırasında kandaki oksijen düzeyi ve kan hacmi miktarlarındaki değişim hesaplanmış; ardından veriler analiz edilmeye ve topografik olarak görselleştirilmeye hazır hâle getirilmiştir.

Hemodinamik tepkiler deneme düzeyinde hesaplanmış ve her koşul ile her katılımcı için ortalama hemodinamik aktivite hesaplanmıştır. Bu veriler temel alınarak kanal bazlı istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Daha açık bir ifadeyle, davranışsal veriler için kullanılan $2 \times 2 \times 3$ faktöriyel desene sahip tekrarlı ölçümler varyans analizi (ANOVA), 16 kanalın her biri için ayrı ayrı uygulanmıştır. Küresellik (sphericity) varsayımının ihlal edildiği durumlarda Greenhouse-Geisser düzeltmesi uygulanmıştır. Hem 16 kanal hem de yedi ANOVA etkisi genelinde çoklu karşılaştırmaları kontrol etmek amacıyla FDR (false discovery rate) prosedürü uygulanmıştır (32,33). İlk aşamada, yedi etkinin her biri için 16 kanal düzeyindeki p değeri Simes birleşik testi kullanılarak tek bir etki düzeyi p değerinde birleştirilmiştir (34). Ardından elde edilen yedi birleşik p değeri, korteks genelinde sıfırdan farklı herhangi bir kanal etkisine ilişkin kanıt gösteren etkileri belirlemek amacıyla $q=0,05$ düzeyinde Benjamini-Hochberg FDR

düzeltilmesine tabi tutulmuştur. İkinci aşamada, ilk aşamayı geçen etkilerin her biri içinde 16 kanal genelinde kanal düzeyi Benjamini-Hochberg FDR düzeltmesi ($q=0,05$) uygulanmıştır. İlk aşamayı geçemeyen etkiler ise kanal düzeyinde test edilmemiştir. Bu iki aşamalı prosedür, kanal-etki matrisinin tamamı genelinde FDR'yi biçimsel olarak kontrol ederken, uzamsal olarak tutarlı sinyale sahip etkiler için istatistiksel gücün korunmasına olanak sağlamaktadır (33). Bonferroni düzeltmesi yerine FDR düzeltmesi tercih edilmiştir, çünkü Bonferroni düzeltmesi testlerin birbirinden bağımsız olduğunu varsayarken komşu fNIRS kanalları prefrontal hemodinamik yanıtın uzamsal yayılımı ve ortak fizyolojik gürültü kaynakları nedeniyle hemodinamik sinyali paylaşmaktadır. Bu koşullar altında Bonferroni düzeltmesi aşırı katı hâle gelmekte ve istatistiksel gücü azaltmaktadır (35). Önemli olarak, genel doğrusal model (general linear model [GLM]) yaklaşımı ya da ilgi bölgesi (region-of-interest [ROI]) ortalaması kullanılmamıştır. Bunun yerine, her kanal ayrı bir bağımlı değişken olarak ele alınmış; buna karşın FDR düzeltmesiyle katı bir anlamlılık ölçütü korunmuştur. Bu kanal bazlı yaklaşım, fNIRS montajının uzamsal özgüllüğünü korumak ve önceden tanımlanmış kortikal bölgeler içinde işlevsel homojenlik varsayımından kaçınmak amacıyla tercih edilmiştir.

BULGULAR

Davranışsal Bulgular

Tepki süresi (RT) analizinden; tepki verilmeyen denemeler, hatalı tepki verilen denemeler, tepki verilmeyen ya da hatalı tepki verilen denemeleri takip eden denemeler ve tepki süresi 150 ms'den küçük olan denemeler çıkarılmıştır. Erken tepki verme davranışını yansıtmaması nedeniyle 150 ms eşiği bilişsel kontrol alanyazınında standart olarak kullanılmaktadır, bu eşik algılama ve tepki hazırlığı için gereken minimum süreyi temsil etmektedir. Tekrarlı olmayan uç değer değer eleme işlemlerinin örneklem büyüklüğüne ve popülasyonun çarpıklık düzeyine duyarlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, daha dinamik ve geçerli bir yaklaşım olan tekrarlı uç değer değer eleme (recursive outlier elimination) işlemi benimsenmiştir (36). Bu prosedürde, her katılımcı ve her koşul için ortalama ve standart sapma ayrı ayrı hesaplanmış, uç değerler örneklem büyüklüğüne dinamik olarak bağlı ölçütlere göre çıkarılmıştır. Bu işlem, geriye uç değer kalmayana kadar tekrarlanmıştır (benzer bir uygulamaya için ayrıca bkz. kaynak 5). Bu eleme işleminden sonra tepki süresi analizi, denemelerin kalan %96'sı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hata yüzdesi (PE) analizi için ise yalnızca tepki verilmeyen denemeler analizden çıkarılmıştır. Küresellik varsayımının ihlal edildiği durumlarda Greenhouse-Geisser düzeltmesi uygulanmıştır.

Uyumluluk Oranı (UO) Analizi

Koşullara ilişkin ortalama tepki süresi (RT) ve hata yüzdesi (PE) değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Tepki süresi verileri için uyumluluk temel etkisi anlamlıdır, $F(1,39)=56,21$, $MSE=2626,32$, $p<0,001$, $\eta^2_p=0,59$. Tepkiler uyumlu denemelerde ($M=662$), uyumsuz denemelere ($M=697$) kıyasla daha hızlı verilmiştir. Uyarın başlangıç asenkronisinin temel etkisi anlamlıdır, $F(1,77,69,18)=34,56$, $MSE=7652,86$, $p<0,001$, $\eta^2_p=0,47$. Tepkiler en hızlı çeldirici-önce denemelerinde ($M=639$) verilmiş; bunu hedef-önce denemeleri ($M=683$) ve eşzamanlı sunum denemeleri ($M=716$) izlemiştir. Uyumluluk oranı temel etkisi ise anlamlı değildir, $F(1,39)=0,95$, $MSE=22,579,89$, $p=0,34$, $\eta^2_p=0,02$. Uyumluluk ve SOA arasındaki iki yönlü etkileşim anlamlıdır, $F(1,88,73,45)=6,70$, $MSE=4375,15$, $p=0,003$, $\eta^2_p=0,15$. En büyük uyumluluk etkisi çeldirici-önce koşulunda ($M=59$) gözlemlenmiş; bunu eşzamanlı sunum koşulu ($M=40$) ve hedef-önce koşulu ($M=7$) izlemiştir. Uyumluluk ve UO arasındaki iki yönlü etkileşim, yani UDUO etkisi anlamlıdır, $F(1,39)=12,59$, $MSE=2916,75$, $p=0,001$, $\eta^2_p=0,24$. Bu bulgu, uyumluluk etkisinin ÇUY kümede ($M=18$), ÇU kümeye ($M=53$) kıyasla daha küçük olduğunu göstermektedir. Uyarın başlangıç asenkronisi ve UO arasındaki iki yönlü etkileşim de anlamlıdır, $F(1,96,76,62)=3,22$, $MSE=3191,08$, $p=0,046$, $\eta^2_p=0,08$. Uyumluluk, SOA

Tablo 2. Her koşul için ortalama tepki süreleri (RT) ve hata yüzdeleri (PE)

Uyumluluk oranı	Uyumluluk	SOA					
		Çeldirici-önce		Eşzamanlı		Hedef-önce	
		RT	PE	RT	PE	RT	PE
Çoğunlukla uyumlu	Uyumlu	577 (17)	3,6 (0,9)	687 (16)	4,0 (0,6)	674 (13)	4,8 (0,9)
	Uyumsuz	670 (15)	3,5 (0,9)	744 (19)	7,5 (1,5)	683 (18)	4,4 (1,1)
Çoğunlukla uyumsuz	Uyumlu	642 (22)	3,1 (1,1)	704 (21)	3,1 (1,1)	685 (18)	5 (1,2)
	Uyumsuz	667 (14)	4,3 (0,7)	727 (17)	4,3 (0,7)	690 (18)	4,9 (0,8)
UDUO etkisi		68	-1,3	33	2,3	4	-0,3

SOA: uyarın başlangıç asenkronisi; standart hatalar parantez içinde verilmiştir; tepki süreleri milisaniye cinsinden raporlanmıştır.

ve UO arasındaki üç yönlü etkileşim anlamlıdır, $F(1,90,74,07)=3,73$, $MSE=2923,71$, $p=0,03$, $\eta^2_p=0,09$.

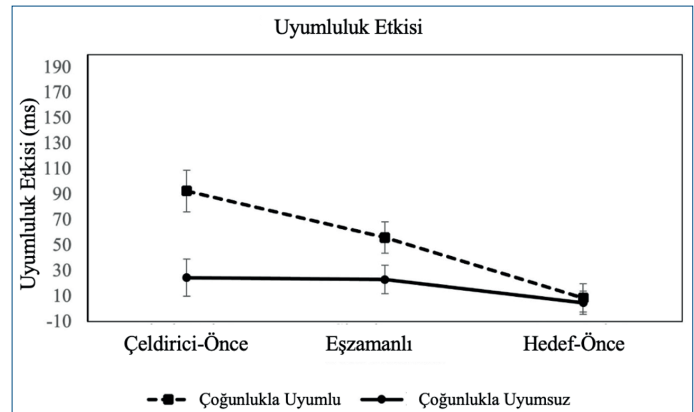
Her bir SOA koşulu için ayrı ayrı 2 (uyumluluk: uyumlu, uyumsuz) $\times$ 2 (UO: ÇU, ÇUY) tekrarlı ölçümler varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Uyumluluk ve UO arasındaki iki yönlü etkileşim, yani UDUO etkisi, çeldirici-önce koşulunda (68 ms) anlamlıdır, $F(1,39)=12,47$, $MSE=3715,39$, $p=0,001$, $\eta^2_p=0,24$. Benzer şekilde, eşzamanlı sunum koşulunda da UDUO etkisi (33 ms) anlamlıdır, $F(1,39)=5,02$, $MSE=2177,83$, $p=0,03$, $\eta^2_p=0,11$. Buna karşılık, hedef-önce koşulunda UDUO etkisi (4 ms) anlamlı değildir, $F(1,39)=0,06$, $MSE=2576,04$, $p=0,81$, $\eta^2_p=0,001$ (bkz. Şekil 2). Hata yüzdeleri (PE) için temel etkilerin ya da etkileşimlerin hiçbirisi anlamlı değildir ($p > 0,05$).

İzlerlik Analizi

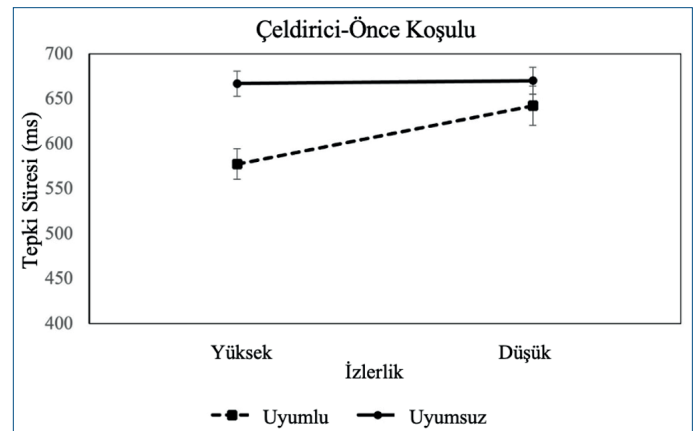
Yöntem bölümünde açıklandığı üzere, izlerlik çerçevesi 2 $\times$ 2'lik (UO $\times$ Uyumluluk) alt desenin matematiksel olarak eşdeğer bir yeniden parametreleştirmesidir: İzlerlik temelektisi UO $\times$ Uyumluluk etkileşimine, İzlerlik $\times$ Uyumluluk etkileşimi ise UO temel etkisine karşılık gelmektedir. Bu nedenle aşağıda raporlanan istatistikler, yukarıda UO analizinde raporlanan istatistiklerle özdeştir, ancak öğrenme açıklaması (4) kapsamında yorumlamayı kolaylaştırmak amacıyla izlerlik çerçevesi altında sunulmuştur.

Tepki süresi verileri için izlerlik temel etkisi anlamlıdır, $F(1,39)=12,59$, $MSE=2916,75$, $p=0,001$, $\eta^2_p=0,24$. Bu etki, yukarıda raporlanan UO $\times$ Uyumluluk etkileşimine eşdeğerdir. Tepkiler yüksek izlerlikli denemelerde ($M=671$), düşük izlerlikli denemelere ($M=688$) kıyasla daha hızlı verilmiştir. İzlerlik ve SOA arasındaki iki yönlü etkileşim anlamlıdır, $F(1,90,74,07)=3,73$, $MSE=2923,71$, $p=0,03$, $\eta^2_p=0,09$. Bu etki, SOA $\times$ UO $\times$ Uyumluluk üç yönlü etkileşimine eşdeğerdir. En büyük izlerlik etkisi, düşük izlerlik koşullarından yüksek izlerlik koşullarının çıkarılmasıyla hesaplanmış ve çeldirici-önce koşulunda gözlemlenmiştir (yüksek ve düşük izlerlik koşulları arasındaki ortalama fark=34 ms). Bunu eşzamanlı sunum koşulu ($M=17$) ve hedef-önce koşulu ($M=2$) izlemiştir. Kritik olarak, uyumluluk ve izlerlik arasındaki iki yönlü etkileşim anlamlı değildir, $F(1,39)=0,95$, $MSE=22,579,89$, $p=0,34$, $\eta^2_p=0,02$. Bu etki, UO temel etkisine eşdeğerdir. Söz konusu etkileşim, iki kuramsal açıklamayı birbirinden ayıran temel testtir: uyarıcı düzeyi kontrol açıklaması bu etkileşimin varlığını öngörürken, izlerlik öğrenmesi açıklaması bu etkileşimin yokluğunu öngörmektedir (4). Uyumluluk, SOA ve izlerlik arasındaki üç yönlü etkileşim anlamlıdır, $F(1,96,76,62)=3,22$, $MSE=3191,08$, $p=0,046$, $\eta^2_p=0,08$. Bu etki, SOA $\times$ UO etkileşimine eşdeğerdir.

Her bir SOA koşulu için ayrı ayrı 2 (uyumluluk: uyumlu, uyumsuz) $\times$ 2 (izlerlik: yüksek, düşük) tekrarlı ölçümler varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. İzlerlik temel etkisi çeldirici-önce koşulunda anlamlıdır, $F(1,39)=12,47$, $MSE=3715,39$, $p=0,001$, $\eta^2_p=0,24$. Benzer şekilde, eşzamanlı sunum koşulunda da izlerlik temel etkisi anlamlıdır, $F(1,39)=5,02$, $MSE=2177,83$, $p=0,03$, $\eta^2_p=0,11$. Buna karşılık, hedef-önce koşulunda izlerlik temel etkisi anlamlı değildir, $F(1,39)=0,06$, $MSE=2576,04$, $p=0,81$, $\eta^2_p=0,001$. Uyumluluk ve izlerlik arasındaki iki yönlü etkileşim, çeldirici-



Şekil 3. Uyumluluk oranı (UO) ve uyarın başlangıç asenkronisine (SOA) bağlı ortalama uyumluluk etkileri (hata çubukları: standart hatalar; ms: milisaniye).



Şekil 4. Çeldirici-önce koşulunda, izlerliğe bağlı ortalama uyumluluk etkileri (hata çubukları: standart hatalar; ms: milisaniye).

önce koşulunda anlamlıdır; ancak bu etkileşim beklenen yönün tersindedir (bkz. 7; ayrıca bkz. Şekil 3,4), $F(1,39)=4,46$, $MSE=8551,43$, $p=0,04$, $\eta^2_p=0,10$. Buna karşılık, eşzamanlı sunum ve hedef-önce koşullarında bu etkileşim anlamlı değildir ($p > 0,05$). Hata yüzdeleri (PE) için temel etkilerin ya da etkileşimlerin hiçbirisi anlamlı değildir ($p > 0,05$).

fNIRS Bulguları

Uyumluluk Oranı (UO) Analizi

On altı kanaldan elde edilen oxy-Hb ölçümleri, ayrı ayrı 2 (uyumluluk: uyumlu, uyumsuz) $\times$ 2 (UO: ÇU, ÇUY) $\times$ 3 (SOA: -250 ms, 0 ms, +250 ms) tekrarlı ölçümler varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir (Not: Bazı katılımcılar için belirli kanallardan elde edilen veriler gürültü nedeniyle kullanılamadı ve analizler bu kanallar hariç tutularak yapıldı. Bu nedenle, fNIRS sonuçlarında df değerleri farklılık gösterebilir). Küresellik varsayımının ihlal edildiği durumlarda Greenhouse-Geisser düzeltmesi uygulanmıştır.

On altı kanal ve 7 ANOVA etkisi genelindeki çoklu karşılaştırmalar, Yöntem bölümünde açıklanan hiyerarşik FDR işlemi kullanılarak kontrol edilmiştir.

Aşama 1: Etki düzeyi tarama. On altı kanal genelinde Simes testi ile birleştirilen p değerleri, $q=0,05$ düzeyinde Benjamini-Hochberg FDR düzeltmesine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, korteks genelinde sıfırdan farklı herhangi bir kanal etkisine ilişkin kanıt içeren yalnızca iki etki olduğunu göstermiştir: SOA temel etkisi ($p_{\text{Simes}}=0,008$, $p_{\text{FDR}}=0,028$) ve UO $\times$ Uyumluluk etkileşimi ($p_{\text{Simes}}=0,005$, $p_{\text{FDR}}=0,028$). Geriye kalan etkiler, UO temel etkisi dâhil olmak üzere (izlerlik çerçevesi altında izlerlik $\times$ Uyumluluk etkileşimi; $p_{\text{Simes}}=0,120$, $p_{\text{FDR}}=0,280$), Uyumluluk temel etkisi ($p_{\text{FDR}}=0,912$) ve diğer tüm iki yönlü ve üç yönlü etkileşimler (tüm $p_{\text{FDR}} \geq 0,912$), Aşama 1'i geçmemiştir. Bu nedenle söz konusu etkiler kanal düzeyinde test edilmemiştir.

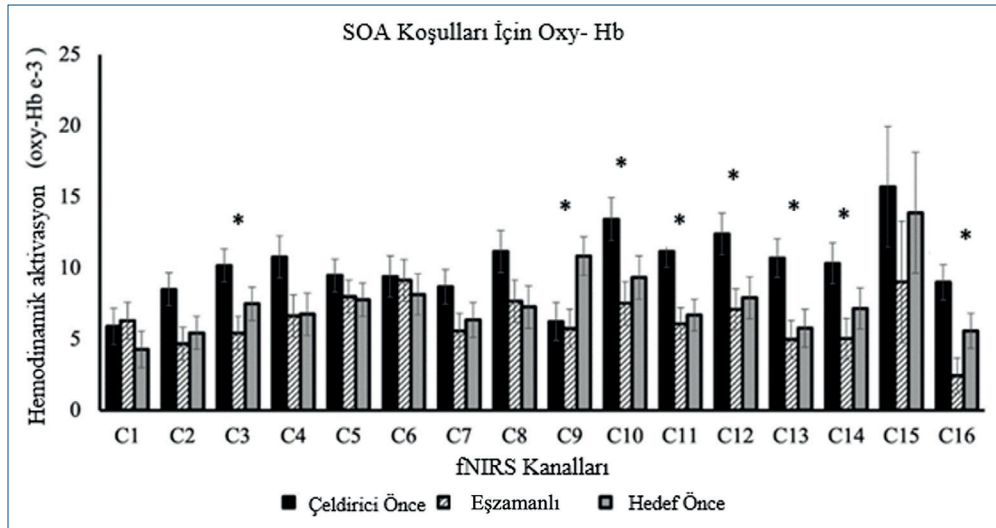
Aşama 2: Kalan etkiler için kanal düzeyinde testler. SOA temel etkisi sekiz kanalda anlamlıdır: Kanal 3, ($F(2,78)=4,59$, $p_{\text{FDR}}=0,037$, $\eta^2_p=0,105$), Kanal 9 ($F(1,97,76,71)=4,16$, $p_{\text{FDR}}=0,040$, $\eta^2_p=0,106$), Kanal 10 ($F(1,85,71,96)=4,51$, $p_{\text{FDR}}=0,037$, $\eta^2_p=0,104$), Kanal 11 ($F(1,78,69,49)=8,40$, $p_{\text{FDR}}=0,008$, $\eta^2_p=0,177$), Kanal 12 ($F(1,92,74,83)=4,51$, $p_{\text{FDR}}=0,037$, $\eta^2_p=0,104$), Kanal 13 ($F(1,94,75,55)=5,65$, $p_{\text{FDR}}=0,027$, $\eta^2_p=0,126$), Kanal 14 ($F(1,98,77,13)=4,33$, $p_{\text{FDR}}=0,039$, $\eta^2_p=0,100$), ve Kanal 16 ($F(1,97,73,03)=8,14$, $p_{\text{FDR}}=0,008$, $\eta^2_p=0,180$). Uyarın başlangıç asenkronisinin temel etkisi geriye kalan kanallarda anlamlı değildir (bkz. Şekil 5).

Uyumluluk ve UO arasındaki iki yönlü etkileşim, yani UDUO etkisi, Kanal 1 ($F(1,35)=10,98$, $p_{\text{FDR}}=0,024$, $\eta^2_p=0,239$), Kanal 10 ($F(1,39)=12,96$, $p_{\text{FDR}}=0,005$, $\eta^2_p=0,249$), Kanal 11 ($F(1,39)=13,63$, $p_{\text{FDR}}=0,005$, $\eta^2_p=0,259$), ve Kanal 12'de anlamlıdır ($F(1,39)=19,02$, $p_{\text{FDR}}=0,005$, $\eta^2_p=0,328$). Bu etki geriye kalan kanallarda anlamlı değildir (bkz. Şekil 6). Kanalların hiçbirinde uyumluluk temel etkisi ya da UO temel etkisi anlamlı değildir. Uyumluluk ve SOA arasındaki iki yönlü etkileşim, UO ve SOA arasındaki iki yönlü etkileşim ve uyumluluk, PC ve SOA arasındaki üç yönlü etkileşim de hiçbir kanalda anlamlı değildir.

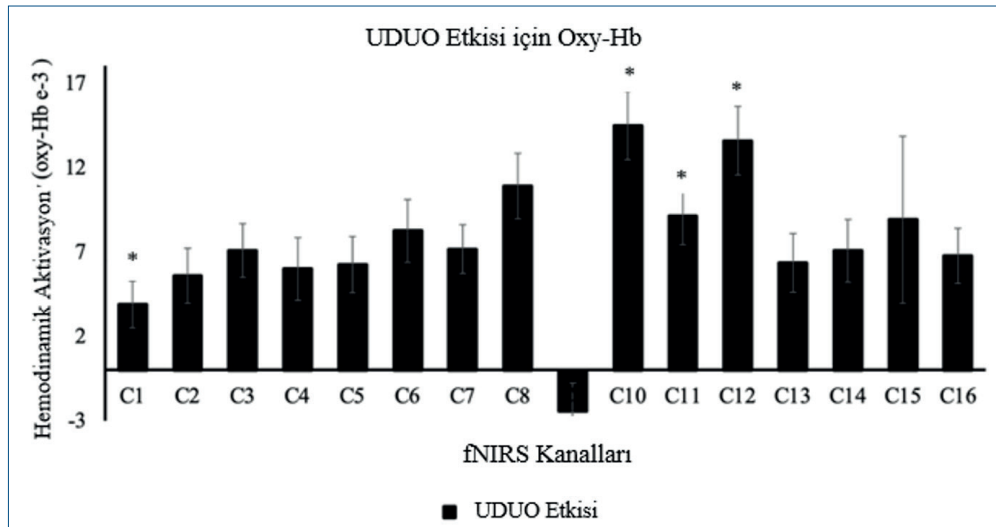
Sağlamlık kontrolü olarak, analiz ayrıca 112 testin tümüne (16 kanal $\times$ 7 etki) ortak olarak uygulanan daha katı birleştirilmiş BH-FDR prosedürü kapsamında da gerçekleştirilmiştir. Bu daha katı ölçüt altında, SOA temel etkisi Kanal 11 ve 16'da anlamlılığını korumuş; UO $\times$ Uyumluluk etkileşimi ise Kanal 10, 11 ve 12'de anlamlı kalmıştır (tüm $p_{\text{FDR-pooled}}=0,022$). Bu bulgular, temel sonuçların kullanılan düzeltme stratejisine bağlı olmadığını göstermektedir. Önemli olarak Kanal 11, hem SOA temel etkisi hem de UO $\times$ Uyumluluk etkileşimi için en katı düzeltmeden sağ çıkan tek kanal olmuştur. Bu durum, Kanal 11'i mevcut deney deseninde zamansal etkiler ile uyarıcı düzeyi etkiler arasında bir yakınsama noktası olarak tanımlamaktadır.

İzlerlik Analizi

Yöntem bölümünde açıklandığı üzere, izlerlik çerçevesi aynı 2×2 'lik (UO $\times$ Uyumluluk) alt desenin matematiksel olarak eşdeğer bir yeniden



Şekil 5. Uyarın başlangıç asenkronisine (SOA) bağlı olarak ortalama Oxy-Hb (e-3) değerleri (C1, C2, ..., sırasıyla Kanal 1, Kanal 2 ve devamındaki kanallar; *: hiyerarşik FDR düzeltmesi sonrasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlılık; hata çubukları: standart hatalar).



Şekil 6. Uyarıcı düzeyi uyumluluk oranı (UDUO) etkisi için ortalama Oxy-Hb (e-3) değerleri (C1, C2, ..., sırasıyla Kanal 1, Kanal 2 ve devamındaki kanallar. Uyarıcı düzeyi uyumluluk oranı etkisi: uyumluluk ve uyumluluk oranı etkileşimi; *: hiyerarşik FDR düzeltmesi sonrasında $p < 0,05$ düzeyinde anlamlılık; hata çubukları: standart hatalar).

parametreleştirmesidir. İzlerlik temel etkisi yukarıda raporlanan $UO \times$ Uyumluluk etkileşimine, İzlerlik $\times$ Uyumluluk etkileşimi ise UO temel etkisine karşılık gelmektedir. Bu doğrultuda, aynı istatistikler her iki çerçeve için de geçerlidir ve ek bir test yapılmamıştır.

Bu yeniden parametreleştirme altında, Kanal 1, 10, 11 ve 12'de gözlemlenen anlamlı $UO \times$ Uyumluluk etkileşimi, eşdeğer biçimde anlamlı bir İzlerlik temel etkisi olarak yorumlanmaktadır. Bu dört prefrontal kanalda hemodinamik yanıtlar, yüksek izlerlikli uyarıcılar (ÇU-uyumlu ve ÇUY-uyumsuz) için düşük izlerlikli uyarıcılara (ÇU-uyumsuz ve ÇUY-uyumlu) kıyasla daha yüksektir. Bu örüntü, davranışsal düzeyde gözlemlenen İzlerlik temel etkisiyle tutarlıdır ve UDUO görevi sırasında prefrontal kortekste ilişkisel öğrenme süreçlerinin devreye girdiğini desteklemektedir.

Kritik olarak, UO temel etkisi, izlerlik çerçevesi altında İzlerlik $\times$ Uyumluluk etkileşimine karşılık gelen etki, hiçbir kanalda anlamlı değildir. Bu etki, hiyerarşik FDR prosedürünün 1. aşamasını geçmemiştir (Simes-birleşik $p=0,120$, $pFDR=0,280$). Bu bulgu, korteks genelinde bu karşıtlığa ilişkin bir kanıt bulunmadığını göstermektedir. İzlerlik $\times$ Uyumluluk etkileşimi, birbiriyle rekabet eden iki kuramsal açıklamayı ayırt eden temel testtir: uyarıcı düzeyi kontrol açıklaması bu etkileşimin varlığını öngörmektedir; çünkü uyumsuz uyarıcılarda artan kontrolün, yüksek ve düşük izlerlikli uyarıcılarda uyumluluk etkisini farklı biçimlerde etkilemesi beklenir. Buna karşılık, izlerlik öğrenmesi açıklaması bu etkileşimin yokluğunu öngörmektedir; çünkü izlerlik yalnızca tepki hızı üzerinde bir temel etki üretir ve uyumluluk etkisini değişimlemez. Bu etkileşimin nöral düzeyde gözlemlenmemesi, yukarıda raporlanan davranışsal yokluk bulgusuyla paralellik göstermekte ve Schmidt ve Besner'in (2008,4) yeniden analizini prefrontal hemodinamik yanıtlara genişletmektedir. Kanal 1, 10, 11 ve 12'de gözlemlenen anlamlı İzlerlik temel etkisiyle birlikte değerlendirildiğinde, bu örüntü UDUO etkisine ilişkin izlerlik öğrenmesi açıklamasıyla tutarlı nöral kanıtlar sunmaktadır.

TARTIŞMA

Mevcut deneyde elde edilen davranışsal veriler, UDUO etkisinin temel mekanizmasının izlerlik öğrenmesi olduğunu düşündürmektedir. Bunu düşündüren ilk kanıt, izlerliğin bir temel etki göstermesidir; yüksek izlerlikli uyarıcılara, düşük izlerlikli uyarıcılara kıyasla tüm SOA koşulları genelinde daha hızlı tepki verilmiştir. Bu bulgu, izlerlik öğrenmesi mekanizmasının performansı genel olarak etkilediğini göstermektedir. İkinci kanıt, uyumluluk ve izlerlik etkileşiminin yalnızca çeldirici-önce koşulunda (-250 ms) ortaya çıkması; ancak bu etkinin kontrol açıklamasının öngördüğü yönün tersinde olmasıdır (7). Çeldirici-önce koşulunda uyumluluk etkisi, düşük izlerlikli uyarıcılara kıyasla yüksek izlerlikli uyarıcılarda daha büyüktür (bkz. Şekil 4). Eğer uyumluluk etkisindeki değişim uyarıcı düzeyi kontrolle ilişkili olsaydı (7), uyumsuz uyarıcılarda tam ters yönde bir örüntü ortaya çıkmalıydı. Ancak böyle bir sonuç gözlemlenmemiştir. Üçüncü kanıt, SOA manipülasyonuna bağlı olarak UDUO etkisinde ortaya çıkan değişimin temel olarak çoğunlukla uyumlu uyarıcılara verilen tepkiler tarafından yönlendirilmesidir (Şekil 3). Uyarıcı düzeyi uyumluluk oranı etkisinin SOA'ya bağlı değişimi uyarıcı düzeyi dikkat kontrolü ilişkili olsaydı, uyarıcı düzeyi kontrol bu uyarıcılara bağlı olduğundan, onların da etkilenmesi beklenirdi. Dördüncü kanıt ise SOA ve izlerlik arasındaki iki yönlü etkileşimdir. Özellikle izlerlik etkisi, eşzamanlı sunum koşuluna kıyasla çeldirici-önce koşulunda daha belirgindir; ancak bu etki hedef-önce koşulunda, UDUO etkisiyle tamamen aynı SOA-bağlı örüntüyü göstererek ortadan kalkmıştır. Katılımcılar, doğru tepkiyi öngörebildikleri için yüksek izlerlikli uyarıcılara daha hızlı tepki vermiştir. Bu dört bulgu birlikte değerlendirildiğinde, SOA manipülasyonunun UDUO etkisinin izlerlik öğrenmesi bileşenini etkilediğini göstermektedir. Bu bağlamda SOA, öğrenme ve kontrol mekanizmalarının göreceli katkılarını modüle eden bir unsur gibi görünmektedir. Çeldirici-önce koşulunda, çeldiriciye erken

erişim izlerlik öğrenmesinin çaba gerektiren kontrol süreçlerini devre dışı bırakmasına olanak sağlamaktadır. Nitekim etkinin uyumlu uyarıcılara verilen tepkiler tarafından yönlendirilmesi de bunu desteklemektedir (Şekil 4). Eşzamanlı sunum koşulunda (0 ms) her iki mekanizma da katkı sunabilir, ancak çeldirici boyutun işlenmesi için mevcut zaman aralığı daha sınırlıdır. Bu durum muhtemelen çeldirici-önce koşuluna kıyasla daha küçük bir UDUO etkisinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Hedef-önce koşulunda (+250 ms) ise çeldirici, yararlı bir izlerlik ipucu işlevi görmek ya da uyarıcı düzeyi kontrolü tetiklemek için çok geç sunulmaktadır; dolayısıyla UDUO etkisi anlamlı değildir. Özetle SOA, performansın izlerlik öğrenmesiyle mi yoksa daha yavaş ve kaynak gerektiren kontrol süreçleriyle mi ilgili olduğunu belirliyor gibi görünmektedir.

SOA, UDUO etkisinin altında yatan mekanizmayı belirleyen tek faktör değildir. Önceki çalışmalarda tartışıldığı üzere (3,8), kümelerde bulunan tekil uyarıcı sayısı da kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle kümelerdeki tekil uyarıcı sayısı az olduğunda, izlerlik öğrenmesi mekanizması daha belirgin hâle gelmektedir. Mevcut çalışmada iki uyarıcılı bir küme deseni kullanılmıştır; bu durum, özellikle uygun SOA koşullarıyla birleştiğinde, katılımcıların izlerlik öğrenmesine dayanma eğilimini artırmış olabilir. Ayrıca, metodolojik bir derlemede (37), izlerlik öğrenmesi ve diğer mekanizmaların etkisini ortadan kaldırmak amacıyla bilişsel kontrolün, uyumluluk oranını ortaya çıkaran bağlam uyarıcılarından bağımsız olarak değerlendirilmesi gerektiği öne sürülmüştür. Bunu gerçekleştirmek için araştırmacılara, UDUO etkisinde kontrolü incelerken izlerlik ve uyumluluk oranı bakımından yanlılık içermeyen bağımsız uyarıcı kümeleri (%50 uyumlu) eklemeleri önerilmektedir. Bu yaklaşım sesli tepki verilen (vocal) görevlerde uygulanabilir ancak mevcut deneyde manuel (tuşlu) tepki gerektiren bir flanker görevi kullanılmıştır. Bağımsız bir uyarıcı kümesinin eklenmesi tepki kümesini de genişletecek ve dörtten fazla tepki gerektirecektir. Böyle bir durumda katılımcıların dörtten fazla parmak kullanması gerekecektir ancak bu uygulama açısından pratik olmayabilir ve bilişsel yükü önemli ölçüde artırabilir. Bu nedenle, mevcut deneyde yanlılık içermeyen bir uyarıcı kümesinin kullanılması uygulanabilir görünmemektedir. Görevle ilişkili faktörlerin yanı sıra, depresyon ve kaygı gibi bireysel farklılıklar da uyarıcı düzeyi kontrolü etkileyebilir. Mevcut çalışmada bu bozukluklar taranmamış olsa da denek içi desende, her katılımcının her koşulda test edilmesi bu tür karıştırıcı değişkenlerin etkisini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu yaklaşım alanyazındaki çoğu UDUO deneyiyle de tutarlıdır. Bununla birlikte, gelecekteki çalışmalarda bu tür durumların taranması, UDUO etkisinin altında yatan mekanizmalar açısından daha kesin veriler sağlayacaktır.

Uyarıcı tanısalılığının (diagnosticity) UDUO etkisini ortaya çıkarmadaki rolü de dikkate alınmalıdır (6,8). Mevcut flanker görevinde hem hedef hem de çeldirici boyutlar, uyumluluk oranı durumunu tanılayıcı nitelikte olsa da yalnızca hedef boyutu doğru tepkiyi tam olarak işaret etmektedir. Bu asimetri, UDUO etkisinin hedef-önce koşulunda neden ortadan kalktığını kısmen açıklayabilir: Tepkiyi tanılayıcı hedef bir kez belirlendiğinde, tepki açısından daha az tanılayıcı olan çeldirici, izlerlik özelliklerinden bağımsız olarak tepki hazırlığı üzerinde sınırlı bir etki göstermektedir. Gelecek araştırmalarda, uyarıcı tanılayıcılığının SOA ile birlikte sistematik olarak manipüle edilmesi, bu faktörlerin uyarıcıya özgü kontrol ve izlerlik öğrenmesini değişimlemedeki etkileşimini daha açık biçimde ortaya koyabilir. Davranışsal veriler, SOA'nın izlerlik temelli UDUO etkisini nasıl değişimlemediğine ilişkin tutarlı bir açıklama sunsa da fNIRS verileri daha nüanslı bir tablo ortaya koymaktadır.

Davranışsal sonuçlar SOA'nın UDUO etkisini modüle ettiğini göstermiş olsa da bu örüntü fNIRS ile ölçülen hemodinamik yanıtlarda tam olarak tekrarlanmamıştır. Daha açık bir ifadeyle, hiyerarşik FDR düzeltmesi altında sekiz kanalda (3,9–14,16) anlamlı SOA temel etkisi gözlemlenmiştir. Bu bulgu, zamansal ipucu dinamiklerine yönelik prefrontal duyarlılığın yaygın bir dağılım gösterdiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, kritik üç yönlü

etkileşim ($SOA \times$ uyumluluk $\times$ UO) hiçbir kanalda istatistiksel olarak anlamlı değildi ve hiyerarşik FDR prosedürünün 1. aşamasını geçmemiştir. Bu uyumsuzluğu birkaç faktör açıklayabilir. İlk olarak, fNIRS'in sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio [SNR]) fMRG'ye kıyasla daha düşüktür ve yüksek düzeyli üç yönlü etkileşimlerin saptanması muhtemelen daha büyük bir örneklem büyüklüğü gerektirmektedir. İkinci olarak, SOA etkileri milisaniye düzeyinde geçici nöral dinamikler ortaya çıkarabilir; ancak hemodinamik yanıtın doğası gereği yavaş olması bu etkilerin saptanmasını güçleştirir. Üçüncü olarak, davranışsal UDUO etkisi muhtemelen anterior singulat korteks (ACC), parietal bölgeler, duyuşal korteksler ve motor hazırlık ağırları dâhil olmak üzere birçok nöral ağın ortak ürünü olarak ortaya çıkmaktadır ve bu ağların tümü SOA'ya duyarlı olabilir. fNIRS kapsama alanımız prefrontal korteks (PFC) ile sınırlı olduğundan, bu bölgelerin katkısı saptanamamış olabilir. Dördüncü olarak, çeldiricinin zamanlamasından bağımsız olarak, çeldirici mevcut olduğunda PFC katılımının tavan etkisine ulaşması da mümkündür. Bu durumda davranışsal farklılıklar PFC katılımındaki değişimlerden ziyade daha sonraki tepki hazırlığı süreçlerini yansıtır olabilir. SOA'ya bağlı olarak farklı davranışsal süreçler baskın hâle gelebilse de izlerlik öğrenmesi ve bilişsel kontrol PFC içinde örtüşen nöral alt yapıya sahip olabilir. Bu örtüşme, fNIRS'in mevcut uzamsal çözünürlüğüyle ayrıştırılamayan benzer ve ayırt edilemez hemodinamik örüntüler üretebilir. Bu sınırlılıklar, davranışsal verilerin mekanizmalardaki modülasyonu açık biçimde gösterdiğini, ancak bu mekanizmaların nöral karşılıklarının tam olarak ayrıştırılabilmesi için daha duyarlı ölçümlere ihtiyaç duyulduğunu düşündürmektedir. Gelecek çalışmalarda, daha büyük örneklem, olay-ilişkili desenler ve eşzamanlı fNIRS-EEG ya da yüksek yoğunluklu fNIRS ve fMRG gibi çok yöntemli yaklaşımlar kullanılmalıdır. Bu tür yaklaşımlar, birden fazla beyin bölgesinin eşzamanlı olarak incelenmesine ve UDUO etkisinin hızlı nöral dinamiklerinin daha iyi yakalanmasına olanak sağlayacaktır.

Kritik olarak, davranışsal sonuçlar izlerlik öğrenmesini desteklerken, fNIRS verileri belirli prefrontal kanallarda UDUO ile ilişkili hemodinamik modülasyon olduğunu göstermektedir. UO analizi, hiyerarşik FDR düzeltmesi sonrasında Kanal 1, 10, 11 ve 12'de anlamlı bir UDUO etkisi olduğunu ortaya koymuştur. İzlerlik çerçevesi altında ise aynı kanallar eşdeğer biçimde anlamlı bir İzlerlik temel etkisi göstermektedir. Üretici firmanın Brodmann alanı haritalamasına göre (26-28,38), Kanal 1 BA 46 ve BA 10'a karşılık gelirken, Kanal 10, 11 ve 12 BA 10/BA 11 örtüşme bölgesine karşılık gelmektedir. Bu uzamsal ayrışma dikkat çekicidir: UDUO etkisi BA 46 duyarlılığı olan lateral BA ve BA 11 duyarlılığı olan medial kanallarda ortaya çıkmış, ancak geriye kalan kanallarda gözlemlenmemiştir. Kanal 1'in BA 46 ile ilişkili olması, dorsolateral prefrontal bölgelerin uyumluluk oranı etkilerindeki rolüne işaret eden önceki fMRG çalışmalarıyla genel olarak tutarlıdır (13,14). Diğer yandan, Kanal 10-12'nin BA 11 duyarlılığı, uyarıcı-pekiştirme ilişkisel öğrenmesi ve uyarıların yordayıcı değerinin değerlendirilmesi süreçlerinde rol oynadığı öne sürülen anterior prefrontal bölgelerin katılımıyla tutarlıdır (39-41). Bu süreçler, UDUO etkisi için önerilen izlerlik öğrenmesi mekanizmasıyla yakından ilişkilidir. Önemli olarak, UO temel etkisi, izlerlik çerçevesi altında kuramsal açıdan kritik İzlerlik $\times$ Uyumluluk etkileşimine karşılık gelen etki, hiçbir kanalda anlamlı değildir ve hiyerarşik FDR prosedürünün etki düzeyi tarama aşamasını geçmemiştir. Bu bulgu, davranışsal bulguyla paralellik göstermekte olup izlerlik öğrenmesi açıklamasıyla tutarlıdır (4). Ayrıca Kanal 11, en katı düzeltme altında (112 testin tamamı genelinde birleştirilmiş FDR) hem SOA hem de UDUO etkisi için anlamlı etki gösteren tek kanal olmuştur. Bu durum, Kanal 11'i anterior medial prefrontal kortekste zamansal ve uyarıcı düzeyi işlemenin olası bir yakınsama noktası olarak öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte, BA 10'un tüm anlamlı kanallar için ortak olduğu ve sensörün neredeyse tamamına yayıldığı dikkate alınmalıdır. Bu durum yorumun özgüllüğünü sınırlamaktadır. Ayrıca BA 11, gözlerin arkasına doğru kıvrılan ve yüzeye yerleştirilen fNIRS optotlarıyla büyük ölçüde erişilemeyen ventral orbital yüzeye uzandığından, mevcut veriler aktivasyonun orbitofrontal

korteksin kendisini mi yoksa komşu rostral prefrontal korteksi mi yansıttığını doğrulayamamaktadır. Kesin kortikal konumların, birey düzeyinde anatomik eşleştirme, optot dijitalleştirme ya da daha yüksek yoğunluklu fNIRS dizileri kullanılarak gelecek çalışmalarla doğrulanması gerekmektedir. Birlikte değerlendirildiğinde, bu sonuçlar BA 46 ve BA 11'e duyarlı prefrontal bölgelerin UDUO ile ilişkili hemodinamik modülasyon gösterdiğini düşündürmektedir. Bu bulgu, hem kontrol hem de öğrenme süreçlerinin olası katılımıyla tutarlıdır; ancak mevcut montajın uzamsal çözünürlüğü kesin bir işlevsel-anatomik atıf yapılmasına olanak vermemektedir.

İzlerlik öğrenmesi ve uyarıcı düzeyi kontrol dışındaki mekanizmalar da UDUO etkisine katkıda bulunabilir. Bu mekanizmalardan biri tepki hazırlama/tekrarlama etkisidir. Bu mekanizmaya göre, aynı tepkiyi paylaşan ya da ardışık denemeler arasında uyarıcı özelliklerini tekrarlayan uyarıcılar (örn., 'F' harfinin hem n denemesinde hem de $n+1$ denemesinde yer alması) tepki hızına katkı sağlayabilir (42). Dolayısıyla UDUO deneylerinde, yüksek izlerlikli uyarıcıların bu tür tekrarlayıcı örüntülerden yararlanma olasılığı daha yüksek olabilir ve bu durum UDUO etkisine katkı sağlayabilir. Her ne kadar denemelerin seçkisiz sunulması bu mekanizmanın katkısını azaltmış olsa da tamamen ortadan kaldırmamış olabilir. Bir diğer olası katkı sağlayıcı mekanizma ise Sıralı Uyumluluk Etkisi'dir (Congruency Sequence Effect [CSE]). Bu etki, uyumsuz bir denemeden sonra gözlemlenen uyumluluk etkisinin, uyumlu bir denemeden sonra gözlemlenene kıyasla azalmasını ifade etmektedir. Görevin doğası gereği, bu mekanizma UDUO etkisini dolaylı olarak etkileyebilir (43,44). Bulgularımız izlerlikle ilişkili süreçlerin güçlü biçimde devreye girdiğini desteklese de diğer mekanizmaların etkisini tamamen dışlamak mümkün değildir.

Genel olarak bu çalışma, UDUO etkisinin altında yatan mekanizmaları incelemek amacıyla davranışsal yöntemleri fNIRS görüntüleme ile birleştirerek alanyazına katkı sunmaktadır. Zamansal değişimlemenin (SOA) prefrontal hemodinamik ölçümle birlikte kullanılması, mevcut bulguların izlerlik öğrenmesi ve uyarıcı düzeyi kontrolün birbirine rakip süreçler olmaktan ziyade tamamlayıcı süreçler olarak işleyebileceğini düşündüren ilk nörogörüntüleme kanıtları sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, davranışsal ve fNIRS verileri birlikte değerlendirildiğinde, izlerlik öğrenmesi ve bilişsel kontrolün zorunlu olarak birbirine karşıt süreçler olmadığı; aksine, göreceli katkıları SOA gibi zamansal parametreler tarafından modüle edilen tamamlayıcı mekanizmalar olarak işleyebileceği görüşü desteklenmektedir. Mevcut bulgular alternatif açıklamaları kesin olarak dışlayamasa da UDUO etkisine ilişkin çok faktörlü bir açıklamayı destekleyen, birbiriyle örtüşen davranışsal ve nörogörüntüleme kanıtları sunmaktadır.

Etik Komite Onayı: Çalışma İzmir Ekonomi Üniversitesi Etik Kurulu tarafından onaylanmıştır (B.30.2.İEU.0.05.05-020-052, Tarih: 07.04.2017).

Bilgilendirilmiş Onam: Tüm katılımcılar yazılı bilgilendirilmiş onam vermiştir.

Hakem Değerlendirmesi: Dış Bağımsız.

Yazar Katkıları: Fikir- NBA, BE; Tasarım- NBA, BE; Denetleme- NBA, BE; Kaynak- NBA, BE; Malzemeler- ST, MK; Veri Toplama ve/veya İşleme- ST, MK; Analiz ve/veya Yorum- NBA, BE, MPÇ, ST, ÖB; Literatür Taraması- ST, ÖB; Yazıyı Yazan- ST, ÖB; Eleştirel İnceleme- NBA, BE.

Çıkar Çatışması: Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Finansal Destek: Finansal destek bulunmamaktadır.

Yapay Zekâ Kullanımı: Yazarlar, dilbilgisi hatalarını düzeltmek ve akademik yazım stilini geliştirmek amacıyla Gemini 3 Flash ve Grammarly Desktop kullanmıştır. Nihai metin yazarlar tarafından gözden geçirilmiş ve doğrulanmıştır; yazarlar içeriğin tamamından ve bütünlüğünden tam sorumluluk almaktadır.

KAYNAKLAR

- Eriksen BA, Eriksen CW. Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Percept Psychophys*. 1974;16:143–149. [\[Crossref\]](#)
- Jacoby LL, Lindsay DS, Hessels S. Item-specific control of automatic processes: Stroop process dissociations. *Psychon Bull Rev*. 2003;10:638–644. [\[Crossref\]](#)
- Bugg JM, Crump MJ. In support of a distinction between voluntary and stimulus-driven control: a review of the literature on proportion congruent effects. *Front Psychol*. 2012;3:367. [\[Crossref\]](#)
- Schmidt JR, Besner D. The Stroop effect: why proportion congruent has nothing to do with congruency and everything to do with contingency. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*. 2008;34:514–523. [\[Crossref\]](#)
- Bozkurt O, Misirlisoy M, Atalay NB. Simultaneous engagement of top-down and bottom-up control in the Stroop task: exploring the effect of contingency learning. *Exp Psychol*. 2023;70:294–306. [\[Crossref\]](#)
- Bugg JM. The relative attractiveness of distractors and targets affects the coming and going of item-specific control: evidence from flanker tasks. *Atten Percept Psychophys*. 2015;77:373–389. [\[Crossref\]](#)
- Bugg JM, Jacoby LL, Chanani S. Why it is too early to lose control in accounts of item-specific proportion congruency effects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2011;37:844–859. [\[Crossref\]](#)
- Bugg JM, Hutchison KA. Converging evidence for control of color-word Stroop interference at the item level. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2013;39:433–449. [\[Crossref\]](#)
- Spinelli G, Lupker SJ. Item-specific control of attention in the Stroop task: contingency learning is not the whole story in the item-specific proportion-congruent effect. *Mem Cognit*. 2020;48:426–435. [\[Crossref\]](#)
- Spinelli G, Krishna K, Perry JR, Lupker SJ. Working memory load dissociates contingency learning and item-specific proportion-congruent effects. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*. 2020;46:2007–2033. [\[Crossref\]](#)
- Atalay NB, Misirlisoy M. ISPC effect is not observed when the word comes too late: a time course analysis. *Front Psychol*. 2014;5:117. [\[Crossref\]](#)
- Atalay NB, Misirlisoy M. Can contingency learning alone account for item-specific control? Evidence from within- and between-language ISPC effects. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*. 2012;38:1578–1590. [\[Crossref\]](#)
- Blais C, Bunge S. Behavioral and neural evidence for item-specific performance monitoring. *J Cogn Neurosci*. 2010;22:2758–2767. [\[Crossref\]](#)
- Grandjean J, d'Ostilio K, Fias W, Phillips C, Balteau E, Degueldre C, et al. Exploration of the mechanisms underlying the ISPC effect: Evidence from behavioral and neuroimaging data. *Neuropsychologia*. 2013;51:1040–1049. [\[Crossref\]](#)
- Hoshi Y. Functional near-infrared optical imaging: utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*. 2003;40:511–520. [\[Crossref\]](#)
- Strangman G, Culver JP, Thompson JH, Boas DA. A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *Neuroimage*. 2002;17:719–731. [\[Crossref\]](#)
- Villringer A, Planck J, Hock C, Schleinkofer L, Dirnagl U. Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults. *Neurosci Lett*. 1993;154:101–114. [\[Crossref\]](#)
- Boas DA, Franceschini MA, Dunn AK, Strangman G. Noninvasive imaging of cerebral activation with diffuse optical tomography. In: Frostig RD, editor. *In Vivo Optical Imaging of Brain Function*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2002. p. 193–221. [\[Crossref\]](#)
- Irani F, Platek SM, Bunce S, Ruocco AC, Chute D. Functional near infrared spectroscopy (fNIRS): an emerging neuroimaging technology with important applications for the study of brain disorders. *Clin Neuropsychol*. 2007;21:9–37. [\[Crossref\]](#)
- Scholkmann F, Kleiser S, Metz AJ, Zimmermann R, Mata Pavia J, Wolf U, et al. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *Neuroimage*. 2014;1:6–27. [\[Crossref\]](#)
- Carrion JL, Dominguez UL. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS): principles and neuroscientific applications. In: Bright P, editor. *Neuroimaging-Methods*. InTech; 2012. p. 953–978.
- Canning C, Scheutz M. Functional near-infrared spectroscopy in human-robot interaction. *J Hum Robot Interact*. 2013;2:62–84. [\[Crossref\]](#)
- Kolb B. *Whishaw IQ. Fundamentals of Human Neuropsychology*, 6th ed. New York: Worth; 2009.
- Petrides M. Lateral prefrontal cortex: architectonic and functional organization. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2005;360:781–795. [\[Crossref\]](#)
- Ayaz H. *Functional Near Infrared Spectroscopy based Brain Computer Interface* (Doctoral Thesis). Drexel University; 2010.
- Ayaz H, Izzetoglu M, Platek SM, Bunce S, Izzetoglu K, Pourrezaei K, et al. Registering fNIR data to brain surface image using MRI templates. In: 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society; 2006 Aug 30 - Sept 3. New York, NY, USA: IEEE; 2006. p. 2671–2674. [\[Crossref\]](#)
- Ayaz H, Onaral B, Izzetoglu K, Shewokis PA, McKendrick R, Parasuraman R. Continuous monitoring of brain dynamics with functional near infrared spectroscopy as a tool for neuroergonomic research: empirical examples and a technological development. *Front Hum Neurosci*. 2013;7:871. [\[Crossref\]](#)
- Liu Y, Piazza EA, Simony E, Shewokis PA, Onaral B, Hasson U, et al. Measuring speaker-listener neural coupling with functional near infrared spectroscopy. *Sci Rep*. 2017;7:43293. [\[Crossref\]](#)
- Ayaz H, Izzetoglu M, Shewokis PA, Onaral B. Sliding-window motion artifact rejection for functional near-infrared spectroscopy. In: 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology; 2010 Aug 31 - Sept 4. Buenos Aires, Argentina: IEEE; 2010. p. 6567–6570. [\[Crossref\]](#)
- Elghozi JL, Laude D, Girard A. Effects of respiration on blood pressure and heart rate variability in humans. *Clin Exp Pharmacol Physiol*. 1991;18:735–742. [\[Crossref\]](#)
- Izzetoglu M, Izzetoglu K, Bunce S, Ayaz H. Functional near-infrared neuroimaging. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2005;13:153–159. [\[Crossref\]](#)
- Benjamini Y, Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *J R Stat Soc Series B Methodol*. 1995;57:289–300. [\[Crossref\]](#)
- Benjamini Y, Bogomolov M. Selective inference on multiple families of hypotheses. *J R Stat Soc Series B Stat Methodol*. 2014;76:297–318. [\[Crossref\]](#)
- Simes RJ. An improved Bonferroni procedure for multiple tests of significance. *Biometrika*. 1986;73:751–754. [\[Crossref\]](#)
- Singh AK, Dan I. Exploring the false discovery rate in multichannel NIRS. *Neuroimage*. 2006;33:542–549. [\[Crossref\]](#)
- Van Selst M, Jolicoeur P. A solution to the effect of sample size on outlier elimination. *Q J Exp Psychol Sec A*. 1994;47:631–650. [\[Crossref\]](#)
- Braem S, Bugg JM, Schmidt JR, Crump MJ, Weissman DH, Notebaert W, et al. Measuring adaptive control in conflict tasks. *Trends Cogn Sci*. 2019;23:769–783. [\[Crossref\]](#)
- BIOPAC Systems Inc. fNIR FAQ [Internet]. Available from: <https://www.biopac.com/knowledge-base/fnir-faq/>
- Rolls ET. The functions of the orbitofrontal cortex. *Brain Cogn*. 2004;55:11–29. [\[Crossref\]](#)
- Wallis JD. Orbitofrontal cortex and its contribution to decision-making. *Annu Rev Neurosci*. 2007;30:31–56. [\[Crossref\]](#)
- Riceberg JS, Shapiro ML. Orbitofrontal cortex signals expected outcomes with predictive codes when stable contingencies promote the integration of reward history. *J Neurosci*. 2017;37:2010–2021. [\[Crossref\]](#)
- Cochrane BA, Pratt J. The item-specific proportion congruency effect can be contaminated by short-term repetition priming. *Atten Percept Psychophys*. 2022;84:1–9. [\[Crossref\]](#)
- Aschenbrenner AJ, Balota DA. Additive effects of item-specific and congruency sequence effects in the vocal Stroop task. *Front Psychol*. 2019;10:860. [\[Crossref\]](#)
- Hutchison KA. The interactive effects of listwide control, item-based control, and working memory capacity on Stroop performance. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*. 2011;37:851–860. [\[Crossref\]](#)