

Özet

Üstbiliş, bireyin kendi bilişsel süreçlerini izleme ve değerlendirme kapasitesi olarak geniş bir öz-izleme yetileri yelpazesini kapsamaktadır. Zamansal hata izleme (TEM), bu yetilerden biri olarak, bireylerin dışsal geri bildirim olmaksızın kendi ürettikleri zaman aralıklarının doğruluğunu değerlendirdiği üstbilişsel bir süreç olarak tanımlanır. TEM, üstbilişin incelenebilir bir örneği olarak, öz-izlemenin hesaplamalı ve sinirsel altyapısına doğrudan bir pencere sunmaktadır. Motor eylem zamanlaması, TEM'i araştırmak için işlevsel bir deneysel çerçeve sağlar: üretilen zaman aralığı ile hedef arasındaki sapma, içsel olarak erişilebilir bir hata sinyali oluşturur ve bu sayede dışsal geri bildirim olmaksızın üstbilişsel değerlendirmeyi mümkün kılar. Bu tez, türler arası davranışsal paradigmaları, motor talep manipülasyonlarını ve transformer tabanlı EEG mimarisiyle gerçekleştirilen tek deneme düzeyinde sinirsel çözümlemeleri bütünleştirerek TEM'in çok düzeyli bir incelemesini sunmaktadır.

İlk araştırma sorusu, TEM'in türler arasında korunmuş bir kapasite olup olmadığı ve bu kapasitenin paylaşılan mı yoksa farklı stratejilerle mi desteklendiği idi. Sıçanlar ve insanlar, hizalanmış deneme yapıları, ödül ve görev kuralları ile eşleştirilmiş koşullar altında test edildi; her iki tür de üretilen zaman aralıkları ile hedef arasındaki sapmaya göre doğru ödül seçeneğini belirlemek zorundaydı. Sonuçlar, her iki türün de deneme bazında güvenilir hata izleme sergilediğini göstererek TEM'in paylaşılan bir bilişsel kapasite olduğunu ortaya koydu. Ancak bu izleme sürecini destekleyen bilgi türü türler arasında farklılık gösterdi: sıçanlar ağırlıklı olarak mevcut denemedeki kanıtlara dayalıyken, insanlar birikmiş deneme geçmişi ve öğrenilmiş ödül kurallarından daha fazla yararlandı. Kritik olarak, görev kurallarının türler arasında eşitlendiği durumlarda TEM performansındaki farklar azaldı; bu da TEM'in temel zamanlama yetisindeki farklılıklardan ziyade strateji seçimine ve kural kullanımına bağlı olarak şekillendiğini göstermektedir.

TEM'in türler arasında korunmuş olması, insanlarda motor eylem zamanlamasına ilişkin üstbilişsel yargıların hangi bilgiye dayandığı sorusunu gündeme getirdi. Bu bağlamda iki rakip hipotez formüle edildi. Merkezi Saat Hipotezi'ne göre, saat sinyalinin varyasyonu arttıkça TEM'in kesinliği azalır; çünkü ek motor varyansı içsel zamansal temsillerin okunmasını bozar. Buna karşılık Motor Hipotezi, motor değişkenliğin amaçlanan ve

gerçekleştirilen eylemler arasında bir referans noktası sağlayarak TEM'in kesinliğini artırdığını öne sürer. Hipotezleri ayırt etmek için motor sinyal varyansı, düğmeye basma ve joystick hareketi koşulları karşılaştırılarak deneysel olarak manipüle edildi. Bulgular, artan motor talebin motor zamanlama doğruluğunu etkilemeden üstbilişsel kesinliği seçici olarak bozduğunu gösterdi; bu durum, Merkezi Saat Hipotezi'ni destekleyerek katılımcıların değerlendirmelerini motor çıktı sinyalleri yerine içsel zamansal temsillere dayandırdığını ortaya koymaktadır.

TEM'in içsel zamanlama temsillerine dayandığını bilmek, üstbilişsel değerlendirmenin yalnızca motor zamanlama sinyallerine mi dayandığını yoksa nöronal olarak ayrı bir sürece mi sahip olduğunu tek başına açıklamamaktadır. Üçüncü çalışma, bu soruyu doğrudan ele alarak hem motor eylem zamanlamasında hem de TEM karar aşamalarında teta (θ ; 3–7 Hz), alfa (α ; 8–12 Hz) ve beta (β ; 13–30 Hz) bantlarındaki dinamikleri, PCA ile optimize edilmiş tek deneme EEG verilerini Vision Transformer algoritması ile analiz etti. Motor zamanlama doğruluğu herhangi bir tek frekans bandından çözümlenebilirken, üstbilişsel çıkarım, nesnel zamanlama performansı ile öznel hata değerlendirmesi arasındaki uyum, süregelen motor zamanlama sırasında üç bandın ortak katkısını gerektirdi; hiçbir tek bant tek başına yeterli olmadı. Dahası, motor zamanlama süresince sinirsel aktiviteleriyle üstbilişsel çıkarımları daha başarılı bir şekilde çözümlenen bireyler, deneyde daha yüksek TEM karar kesinliği sergiledi. Bu bulgular, üstbilişsel değerlendirmenin motor zamanlama sinyallerinin doğrudan okunmasına değil, üst düzey çok bantlı entegrasyon tarafından desteklendiğine ve nöronal açıdan ayrı bir süreç olarak işlendiğine işaret etmektedir.

Üç çalışma genelinde, içsel zamanlama temsillerinin TEM'in temel substratını oluşturduğu ve görev ile bağlamsal faktörler tarafından şekillendirildiği gösterilmiştir. Artan motor talepler altında TEM kesinliğinin seçici olarak bozulması ve motor zamanlama ile üstbilişsel çıkarım arasındaki frekans temelli ayrışma, TEM'in zamanlama performansından bağımsız, üst düzey sinirsel mekanizmalar aracılığıyla işlendiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: üstbiliş, zamansal hata izleme (TEM), motor eylem zamanlaması, zaman aralığı üretimi, EEG kod çözme, transformer mimarisi.