

Aralık Zamanlama: Kuramsal ve Deneysel Yaklaşımlar

Başak Akdoğan
Koç Üniversitesi

Fuat Balcı
Koç Üniversitesi

Özet

Aralık zamanlama yetimiz, saniye ve dakikaları içeren süreleri zamanlayabilmemizi sağlar. Zamanın doğal hayatın temel bir parçası olması sebebiyle, aralık zamanlama birçok bilişsel süreç ve günlük aktivitede önemli role sahiptir. Aralık zamanlama üzerine yapılan davranışsal çalışmalar, farklı canlı türlerindeki bireylerin zamansal bilgiyi etkin bir şekilde kullanabildiğini ortaya koymaktadır. İntitli olarak, insanlar ve diğer hayvanlarda zaman algısının ve zamanlama süreçlerinin temelinde ortak sinirsel mekanizmaların bulunduğu ve zamanlama davranışının farklı canlı türlerinde benzer istatistiksel özelliklerle gözlenebildiği önerilmektedir. Bu makalenin ilk bölümünde, aralık zamanlama işlevini açıklamak üzere geliştirilmiş, temelinde içsel saat mekanizmasını barındıran farklı kuramsal yaklaşımlar ele alınmaktadır. Aralık zamanlama modellerinin temel varsayımlarına yer verildikten sonra, insanlar ve diğer hayvanların süreleri zamanlayabilme yetilerini araştırmada kullanılan çeşitli psikofiziksel yöntemler tanıtılmaktadır. Son olarak, bu yöntemlerde gözlenen zamanlama performansının ortaya çıkmasında yer aldığı düşünülen karar süreçlerine yönelik analitik yaklaşımlar tartışılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Aralık zamanlama, bilişsel modelleme, karar verme, karşılaştırmalı psikoloji, psikofizik

Abstract

Interval timing ability enables us to keep track of intervals in the seconds-to-minutes range. Given that time is a fundamental dimension of natural life, it is not surprising that interval timing has a crucial role in numerous cognitive functions and everyday activities. Behavioral studies focusing on interval timing suggest that individuals of different species are able to use temporal information efficiently. It has been proposed that time perception and timing processes in humans and other animals have common neural mechanisms, and that timing behavior can be manifested with similar statistical properties across species. In the first part of this article, several theoretical approaches to interval timing that rely on an internal clock mechanism are discussed. After presenting the main assumptions of these models, various psychophysical procedures that are widely employed to investigate interval timing ability in humans and other animals are described. Finally, approaches to decision processes underlying timing performance observed in these procedures are discussed.

Key words: Cognitive modeling, comparative psychology, decision-making, interval timing, psychophysics

Yazışma Adresi: Doç. Dr. Fuat Balcı, İnsani Bilimler ve Edebiyat Fakültesi, Psikoloji Bölümü, Koç Üniversitesi, Rumelifeneri Yolu 34450 Sarıyer, İstanbul-Türkiye.

E-posta: fbalci@ku.edu.tr

Yazar Notu: (1) Makalemizin değerlendirme sürecinde yaptığı değerli yorumları ve geliştirici önerileri için Yalçın Akın Duyan'a teşekkür ederiz. (2) Yazım desteği, Fuat Balcı'ya verilen FP7 Marie Curie PIRG08-GA-2010-277015 ve TÜBİTAK 1001 (Proje No: 111K402) fon kaynakları ile sağlanmıştır.

Zaman kavramı, birçok filozof ve fizikçinin tarih boyunca ilgi odağı olmuş ve zamanın varlığı ve doğası önemli tarihsel tartışmalara konu olmuştur (Augustine, 2001; Einstein, 1905). Psikolojik zaman, kararlarımızın ve iletişimimizin kaçınılmaz bir parçası olmasına rağmen zamana ilişkin bir duyu sistemimizin bulunmaması bakımından özeldir. Bu durum zaman deneyiminin aslında beynimizin kendi ürünü olduğu sonucunu doğurmaktadır. Başka bir deyişle, zaman deneyimimiz sinir sistemimizin parçası olan bir içsel saat mekanizması sayesinde oluşmaktadır. Bu yaklaşıma göre, bir kum saati veya mekanik bir saat süreleri kendi dinamiklerine bağlı olarak nasıl ölçüyorsa, içsel saatin de zamanı kendi dinamiklerine dayanarak ölçtüğü öne sürülebilir.

Dolayısıyla, insanlar da dahil olmak üzere birçok hayvanın merkezi sinir sisteminde süreleri zamanlama mekanizmalarının bulunduğu ve bu sinirsel mekanizmaların farklı zaman aralıklarını ölçmek üzere özelleştirdiği düşünülmektedir. Zamanlama mekanizmalarını, 24 saatlik sürelerin zamanlanmasını ve saniye-dakikalar uzunluğundaki sürelerin zamanlanmasını sağlayan mekanizmalar olarak iki temel kategoride değerlendirmek mümkündür. 24 saatlik sürelerin zamanlaması temelde suprakiazmatik çekirdek aktivitesine (Rusak ve Zucker, 1979) ve bu çekirdekteki nöronların biyokimyasal özelliklerine dayanmaktadır (Golombek ve Rosenstein, 2010). Öyle ki, bu beyin bölgesinden alınan tekil nöronların biyokimyasal süreçleri laboratuvar ortamında bile 24 saate yakın bir periyodik aktivite sergiler (Welsh, Logothetis, Meister ve Reppert, 1995). Ancak bu hücre içi biyokimyasal mekanizmaların zaman sabitleri daha kısa sürelerin (örn., saniyeler, dakikalar) zamanlaması için yeterli hassasiyete sahip değildir. Ayrıca, tamamen döngüsel olan bu tür bir mekanizma daha kısa süreleri zamanlamak için gerekli olan esnekliğe de sahip değildir.

Sirkadyen ritmin temelindeki bu mekanizmanın, daha kısa süre aralıklarının zamanlanmasında önemli bir rol oynamadığı deneysel çalışmalar ile de gösterilmiştir. Örneğin, suprakiazmatik çekirdekteki lezyonlar sonucunda (Lewis, Miall, Daan ve Kacelnik, 2003) ve sirkadyen ritmin genetik yöntemler ile bozulduğu hayvan modellerinde (Cordes ve Gallistel, 2008) saniyeler ve dakikaların zamanlanmasının etkilenmediği gözlenmiştir (ancak dikkat ediniz: Agostino, do Nascimento, Bussi, Eguia ve Golombek, 2011; Bussi, Levin, Golombek ve Agostino, 2014). Bu durum, daha kısa sürelerin zamanlanmasının temelinde, içinde bilişsel kontrol mekanizmalarını da bulunduran daha geniş kapsamlı sinirsel devrelerin bulunduğunu düşündürmektedir (Buhusi ve Meck, 2005). Bu makalede aralık zamanlamanın bilişsel ve davranışsal modelleri ile birlikte bu işlevin altında yatan mekanizmalar ve aralık zamanlama işlevinin ölçümünde yaygın olarak kullanılan yöntemler tanıtılacaktır.

Aralık Zamanlama ve Öznel Zamanın Psikofiziği

Aralık zamanlama, saniyeler ve dakikaları kapsayan sürelerin “algılanması”, hatırlanması ve davranışa yansıtılmasını içeren bir yeti olarak tanımlanmaktadır (örn., Balcı, Meck, Moore ve Brunner, 2009b; Buhusi ve Meck, 2005). Aralık zamanlama işlevi günlük yaşamımızda önemli bir yere sahiptir. Örneğin, ısıttığımız yemeğin ocaktan ne zaman alınması gerektiğini, sarıya dönen trafik ışığında aracı durdurup durdurmayacağımızı, bir internet sitesinin açılıp açılmayacağını veya telefonda verdiğimiz bir yemek siparişinin unutulup unutulmadığını değerlendirebilmemiz, zaman aralıklarını takip edebildiğimize işaret etmektedir. Bu durumlara ek olarak zamanlayabilme yetimiz, çok kısa süre aralıklarını içeren ardışık işitsel olayların işlenmesini gerektiren müzik ve dil süreçlerini de kapsamaktadır (Cicchini, Arrighi, Cecchetti, Giusti ve Burr, 2012; Matell ve Meck, 2000; Schirmer, 2004).

Aralık zamanlama yetisinin yukarıda örneklendirdiğimiz ve zamansal bilginin kullanılmasını ve işlenmesini açıkça içeren durumlara ek olarak, biyolojik öneme sahip birçok bilişsel ve davranışsal işlevimiz için de önemli rol oynadığı tartışılmaktadır. Örneğin, bazı bağıntısal öğrenme modelleri zaman aralıklarının öğrenilen bağıntısal ilişkilerin bir parçası olduğunu önermektedir (Barnet, Cole ve Miller, 1997; Matzel, Held ve Miller, 1988; Miller ve Barnet, 1993). Zamanlama becerisi, bireylerin ödül oranlarını hesaplayabilmeleri ve maksimum ödül oranını elde etmelerini sağlayacak tepkileri verebilmeleri için de önemlidir. Burada, ödül oranının ödülleri arasındaki ortalama sürenin göz önünde bulundurularak (1/ödülleri arası ortalama süre) hesaplanabilmesi (örn., Gallistel ve ark., 2007), aralık zamanlama yetisinin gerekliliğini tekrar gözler önüne sermektedir. Bahsi geçen çalışmalar aralık zamanlamanın temel insan ve hayvan işlevlerinde sahip olduğu önemi vurgulamakla birlikte, bu araştırma alanının psikolojide yaygın bir etki kazanmasını da sağlamaktadır.

Aralık zamanlamanın bilişsel süreçlerdeki işlevi ve zamanın doğal hayatın kaçınılmaz bir parçası olması, insan ve hayvanlarda aralık zamanlamanın ortak sinirsel mekanizmalara dayanmasını olası kılmaktadır. İlişkili olarak aralık zamanlama, bilişsel ve davranışsal seviyede farklı canlı türlerinde benzer özelliklerle gözlenebilmektedir. Birçok çalışma insan ve hayvanların zamanlama davranışlarının gerçekten de benzer istatistiksel özelliklere sahip olduğunu ve bu özelliklere bağlı olarak kısıtlamalara tabi olduğunu ortaya koymaktadır (Malapani ve Fairhurst, 2002). İnsanlar da dahil birçok omurgalı hayvan türü çeşitli zaman aralıklarını ortalama da doğru bir şekilde fakat belirli bir değişkenlik miktarı ile zamanlamaktadır. Örneğin, bir bireyden sabit bir hedef süreyi (örn., 5 sn) birçok denemede tekrarlı olarak

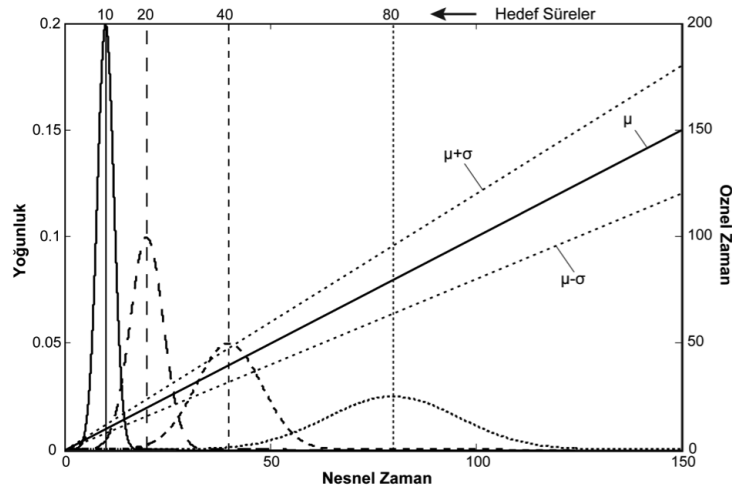
motor bir tepki ile (örn., bir klavye tuşunu basılı tutarak) üretmesi istenildiğinde, yapılan zamansal tahminlerin ortalaması hedef süreye denk gelecek şekilde, hedef süre etrafında anlamlı bir dağılım oluşturmaktadır.

Zamansal kontrol altındaki tepkilerin ortaya konulduğu süre dağılımları ve aynı süre aralıklarının ortalamaları arasında iyi tanımlanmış basit bir matematiksel ilişki vardır. Bir bireyin hedef süreye ait yaptığı zamansal tahminler bir değişken olarak ele alındığında, bu değişkenin varyansı ve ortalamasının karesi birbirine doğru orantılıdır. Dolayısıyla, zamansal tahminlerin standart sapmaları ve bu tahminlerin oluşturduğu süre dağılımının ortalaması da doğru orantılıdır. Böyle bir ilişkiye bağlı olarak, farklı hedef süreler için değişkenlik katsayısının (standart sapma/ortalama) her bir birey için sabit olduğu düşünülmektedir (Gibbon, 1977). Şekil 1, sayıl değişkenlik (scalar variability) olarak adlandırılan bu istatistiksel ilişkiyi farazi veriler üstünden göstermektedir. Değişkenlik katsayısının farklı hedef süreler için zamansal tahminler için sabit olması, tepkilerin ortaya

konulduğu süre dağılımlarının göreceli zaman boyutunda ifade edildiğinde (geçen zaman hedef süre ile orantılı olduğunda) birbiriyle örtüşmesini gerektirir (Buhusi ve ark., 2009).

Bu istatistiksel ilişkiye ek olarak, oranlara bağlı yapılan karşılaştırmalar aralık zamanlama bağlamında da geçerli olan Weber yasasını açıklamaktadır. Weber yasasına göre iki miktarın ayrıştırılabilirliği, iki miktar arasındaki farka değil iki miktarın birbirlerine oranına bağlıdır. Bu yasaya göre bir bireyin 10 ve 12 saniyeyi ayrıştırırken yaşadığı zorluk, aynı bireyin 40 ve 48 saniyeyi ayrıştırırken yaşadığı zorluğa denk olmalıdır. Sayıl değişkenliğinin Weber yasasını açıklamasının sebebi, değişkenlik katsayısı sabitken iki dağılım arasındaki örtüşmenin o dağılımların ortalamaları arasındaki oran eşit oldukça eşit kalmasıdır.

Weber yasasını açıklamanın bir başka yolu ise öznel zamanın nesnel zamanın logaritmik bir fonksiyonu olduğunu varsaymaktır. Logaritmik ölçekte miktarlar arasındaki farkı eşitleyecek olan da yine oranların eşit-



Şekil 1. Aralık Zamanlamanın Psikofiziksel Özelliklerine Bağlı Olarak, Dört Farklı Hedef Süreye Ait Zamansal Tahminlerin Oluşturduğu Farazi Süre Dağılımları

Not. Her bir dağılım için değişkenlik katsayısı sabit tutulmuştur. Dolayısıyla, hedef süreler daha büyük değerler aldığı anda elde edilen dağılımlar da o süreler ile doğru orantılı bir şekilde genişlemektedir. Sayıl değişkenlik olarak da adlandırılan bu özellik, bu grafikte farklı bir şekilde de ifade edilmiştir. Kalın çizgi değişen hedef süreler ile birebir ilişki içinde olan zamansal üretimlerin ortalamalarını göstermekte, noktalı çizgiler ise ilgili süreler için beklenen standart sapma değerlerini göstermektedir. Değişkenlik katsayısı sabit bir değer olarak kabul edilmiştir. Bu örnekte, takip eden her hedef süre bir önceki hedef süresinin iki katıdır. Süreler arası oran ve değişkenlik katsayısı sabit tutulduğunda, iki ardışık dağılım arasındaki örtüşme (dolayısıyla bu dağılımlara denk gelen nesnel sürelerin ayrıştırılabilirliği) aynı kalacaktır. Buna bağlı olarak, yukarıda birbirini takip eden her dağılım çiftinin ayrıştırılabilirliği sabittir.

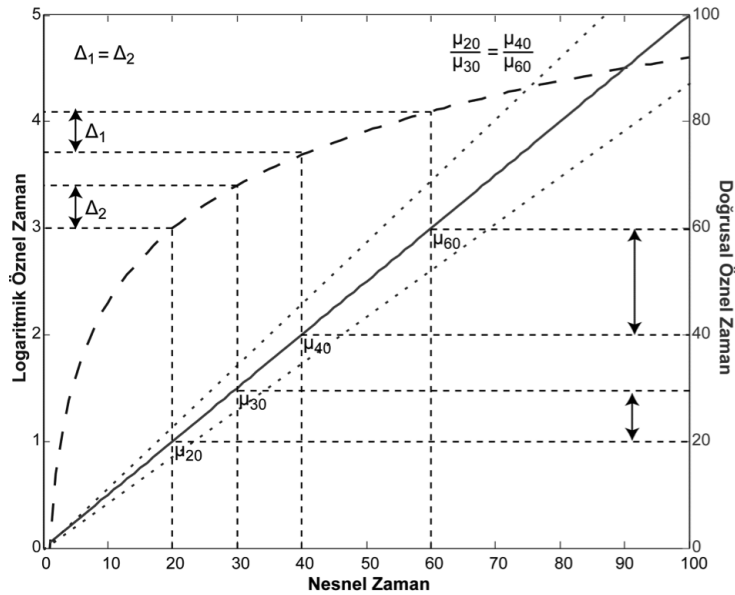
liğidir (Şekil 2). Fakat logaritmik zaman kavramı kavramsal çalışmalara tartışma konusu olmuştur. Örneğin, sıfırın logaritmasının tanımsız olması, bu ölçekte yapılabilecek işlemlerin çarpma ve bölme ile sınırlı olması ve üst-almadan (exponentiate) aritmetik ortalamaya ulaşamaması logaritmik zaman kavramı için problem oluşturmaktadır. Bu sebeple logaritmik ölçeğin bilişsel sisteme sağladığı avantajlar (örn., daha ekonomik bir kavramsallaştırma sistemi olması) ortadan kalkmaktadır (Balcı ve Gallistel, 2006; Montemayor ve Balcı, 2007).

Aralık Zamanlama Modelleri

Aralık zamanlama birçok modelleme çalışmasının konusu olmuştur ve bu işlevi psikofiziksel özellikleri ile birlikte açıklamaya yönelik modelleme çalışmaları gün geçtikçe artmaktadır (Church ve Broadbent, 1991; Grossberg ve Schmajuk, 1989; Karmarkar ve Buonomano, 2007; Matell ve Meck, 2000, 2004; Simen, Balcı, de-Souza, Cohen ve Holmes, 2011; Staddon ve Higa, 1999). Bu çalışmaların sayısındaki artış aralık zamanlamanın önemini anlaşılmaya paralellik göstermektedir. Makalenin bu bölümünde literatürde yaygın olarak kabul görmüş, özünde içsel “saat” temelli bazı aralık zamanlama modelleri tanıtılacaktır.

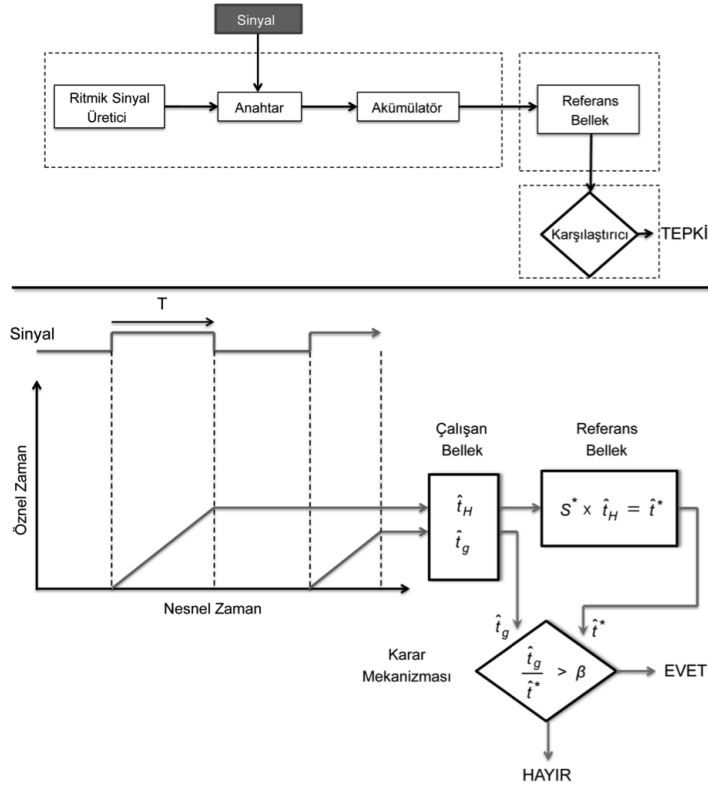
Sayı Zamanlama Modeli (Scalar Timing Model)

Sayı Zamanlama Modeli’ne (Scalar Timing Model, STM, Gibbon, Church ve Meck, 1984) göre, zamanlama yetimiz bilişsel psikoloji bileşenlerine dayanan bir saat mekanizması sayesinde mümkündür. Bu mekanizma, a) ritmik sinyal üretici (pacemaker), b) ritmik sinyal üreticiyi akümülatöre bağlayan bir anahtar, c) ritmik sinyal üreticinin anahtar aracılığıyla iletildiği çıktılarını bütünleştiren bir akümülatör, d) referans bellek ve e) karşılaştırıcıdan oluşur (Şekil 3). Bu modele göre ritmik sinyal üretici, öznel zamanın hammaddesi olarak nitelendirilebilecek saat sinyallerini deneyimlenen olaylardan neredeyse bağımsız bir şekilde, Poisson dağılımına göre durmaksızın üretmektedir. Poisson dağılımı bir olayın (zamanlama için bu olayların saat sinyali olduğu düşünülebilir) sabit bir süre içinde belirli sayılarda ortaya çıkma olasılığını tanımlar. Bu dağılıma göre söz konusu olayın ortalamada ortaya çıkma oranı bilinse de, her bir olay arasındaki sürenin diğer olaylar arasındaki sürelerden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Bu tür süreçlerde olaylar arasındaki süre, üstel bir dağılım (belleksiz olarak) ile tanımlanır. Başka bir deyişle üstel dağılım, sabit olan ortalama bir oran ile birbirinden bağımsız olarak meydana gelen olaylar arasındaki süreleri tanımlar.



Şekil 2. Logaritmik ve Doğrusal Öznel Zamanın Sürelerin Ayırıştırılabilirliği ile İlişkisi

Not. Logaritmik ölçekte birbirleri ile sabit oran ilişkisi içinde olan süre çiftlerini ayırıştırarak aralık metriği aynıdır. Düz çizgi doğrusal öznel zamanı, kesik çizgi ise logaritmik öznel zamanı temsil etmektedir.



Şekil 3. Sayıl Zamanlama Modeli

Not. t_H önceden zamanlanmış bir süreyi, t_g bir deneme gerçek zamanlı olarak değişen süre tahminini, t^* referans bellekten örneklenen süreyi, S^* sağlamalaştırma sürecindeki değişkenliği ve β karar eşliğini temsil etmektedir.

Poisson dağılımına göre oluşan olaylara örnek olarak gün içinde bir mağazaya uğrayan müşteri sayısı gösterilebilir. Bir mağazayı ortalamada Cumartesi günü daha fazla Çarşamba günü ise daha az müşterinin ziyaret ettiğini düşünelim. Bu durumda bu iki gün arasındaki Poisson parametresi farklılık gösterir (örn., Cumartesi için daha yüksek bir değer alır) fakat bir müşteri geldikten sonra bir sonraki müşterinin ne zaman geleceği tahmin edilemez (Sundarapandian, 2009). Poisson dağılımı özelliklerinin zamanlama süreçlerinin modellenmesinde kullanılması önemlidir çünkü aksiyon potansiyelleri arasındaki süreler de birçok modelleme çalışmasında üstel dağılıma yakınsak bir şekilde tanımlanmıştır (örn., Simen ve ark., 2011). Bu durum da en azından saat sinyalleri bakımından makul bir sinirsel temeli bulunan bir mekanizmayı olası kılmaktadır.

Fark edilen bir olayın başlangıcının deneyimlenmesi ile birlikte ritmik sinyal üreticisini akümülatöre bağ-

layan anahtar kapanır ve böylece ritmik sinyal üretici tarafından üretilen saat sinyalleri akümülatöre iletilir. Bu anahtarın işleyişi elektrik devrelerindeki anahtarların işleyiş prensiplerine benzer; anahtarın kapanması saat devresini tamamlar. Anahtar kapalı kaldığı sürece saat sinyalleri akümülatöre iletilir ve burada bir kayba uğramadan bütünlenir, yani akümülatör saat sinyallerini sayar. Deneyimlenen olayın sonlanması ile anahtar tekrar açılır ve akümülatörde bütünleştirilmiş olan sinyaller referans belleğe aktarılır. Bu aktarım işlemi sırasında, toplam sinyal değeri bir değişkenlik kaynağına tabi olduğu için bozulmaya uğrar. Bellek sağlamalaştırması (consolidation) ile ilişkilendirilen bu değişkenlik kaynağı ortalaması 1'e eşit olan normal bir dağılım olarak tanımlanmıştır. Böylece, aynı süreye sahip bir olayın tekrarlı olarak deneyimlenmesi durumunda uzun süreli bellekteki değerlerin ortalaması, ritmik sinyal üretici hızına bağlı olarak o süre içinde ortaya çıkması beklenen ortalama

saat sinyal sayısına eşit olur. Bu da süre tahmininin ortalamada doğru bir değer alması ile sonuçlanacaktır. Fakat sağlama parametresindeki dağılım, uzun süreli bellekteki değerlerin de bir dağılım oluşturmasına yol açar. Sonuç olarak, referans bellekte farklı hedef süre aralıklarına ait oluşturulan süre temsillerinin, normal dağılıma yakın bir özelliğe sahip olduğu varsayılır.

Aynı olay daha sonra tekrar deneyimlendiğinde referans bellekteki dağılımdan bir değer rasgele örneklenir ve bu değer karşılaştırıcı tarafından bir değişken olarak işleme alınır. İşlenen bu değer, olaya maruz kalındığı süre boyunca akümülatörde bütünleştirilen saat sinyal değeri ile oran hesabına göre gerçek zamanlı olarak karşılaştırılır. Akümülatördeki değer ile uzun süreli bellekten rasgele örneklenen değer arasındaki oran belirli bir karar eşiğini geçtiğinde zamana bağlı beklentinin ve ilgili davranışın ortaya çıktığı varsayılır. Örneğin, deneyimlenen olayın bir koşullu uyaran olduğunu ve bu uyarının sunumu sonunda bir ödül verildiğini düşünelim. Bu durumda, uyaran sunumu boyunca geçen süre ile referans bellekten örneklenen süre arasındaki oran ([Geçen Süre-Örneklenen Süre]/Örneklenen Süre) bir eşiği geçtiğinde birey ödül beklentisi ile ilişkili davranışsal tepkiyi ortaya koymaya başlar.

Bu noktada, diğer aralık zamanlama modellerine geçmeden önce Sayıl Zamanlama Modeli'nin birkaç varsayımına özellikle dikkat edilmesini vurgulamak önemli olacaktır. Sayıl Zamanlama Modeli saat hızının (Poisson parametresinin) sabit olduğunu varsayar. Bu varsayım dayanarak, değişik süreler çeşitli miktarlarda bütünleştirilen saat sinyalleri yoluyla zamanlanabilir. Başka bir deyişle, uzun süreler için kısa sürelere kıyasla daha fazla saat sinyali toplanır. Bu varsayım işlevsel açıdan değişik sürelerin zamanlanmasının değişken bir karar eşiğine dayandığı varsayımına denktir (örn., uzun süre için 100 adet saat sinyalinin toplanması gerekir iken, daha kısa bir süre için 50 adet saat sinyalinin toplanması gerekebilmektedir).

Davranışsal Zamanlama Kuramı (Behavioral Theory of Timing)

Sayı Zamanlama Modeli, bileşenleri ve işleyiş prensipleri nedeniyle tipik bir bilgi işleme modelidir. Bilgi işleme modellerinden çok davranış kuramlarını temel alan bir başka model ise, Davranışsal Zamanlama Kuramı'dır (Behavioral Theory of Timing, BeT, Killeen ve Fetterman, 1988). Bu modele göre hayvanların birbirini takip eden belirli davranış durumları (behavioral states) bulunur (örn., temizlenme davranışı) ve her bir davranış durumu bir sonraki davranış durumunu bir domino etkisine benzer şekilde etkinleştirir. Bu davranış durumları arasındaki geçiş zamanları üstel dağılımla uyumludur. Üstel dağılımın sabit ortalama bir oran ile birbirinden bağımsız olarak (Poisson dağılımına göre)

ortaya çıkan olaylar arasındaki süreleri tanımladığını hatırlayalım. Uyarın başlangıcından sabit bir süre geçtikten sonra biyolojik önemi olan bir olay ile karşılaşıldığını varsayalım. Bu durumda davranışsal durumlar arasındaki ortalama geçiş süresi ödül verildiğinde son davranış durumu etkinleşecek şekilde parametrize olur. Örneğin, kısa süreler için davranış durumları arasındaki ortalama geçiş süresi kısaldır, uzun süreler için ise bu süre uzar. Bu durum Poisson dağılımı parametresinin kısa süreler ile karşılaşıldığında artıp uzun süreler ile karşılaşıldığında azalması anlamına gelmektedir.

Bu modelde davranışsal durumlar arasındaki ortalama geçiş zamanı uyaran boyunca beklenen ödül oranına bağlıdır. Ödül oranı yükseldikçe durumlar arasındaki geçiş zamanı azalır. Ödül miktarı sabit tutulduğunda daha kısa uyaran süreleri ödül oranının artmasına, daha uzun uyaran süreleri ise ödül oranının düşmesine neden olur. Bu nedenle, yukarıda bahsettiğimiz Sayıl Zamanlama Modeli'ne göre değişik sürelere özel olarak yapıldığı varsayılan parametrisasyon, bu modelde ödül oranlarına bağlı olarak elde edilebilir.

Bu varsayımlar, aralık zamanlamanın işlevsel açıdan yine bir Poisson saat sinyaline bağlı olduğunu doğurmaktadır. Bu noktada, Sayıl Zamanlama Modeli ve Davranışsal Zamanlama Kuramı arasındaki temel fark ortaya çıkmaktadır. Sayıl Zamanlama Modeli değişik süreler için sabit bir Poisson saat hızı olduğunu ve bütünleştirilen farklı saat sinyal değerlerinin değişik sürelerle denk geldiğini varsayarken, Davranışsal Zamanlama Kuramı değişik süreleri zamanlamak üzere Poisson saat hızının değiştiğini ve bütünleştirilen saat sinyal miktarının her süre için aynı olduğunu ileri sürmektedir.

İlginç olan şudur ki, Poisson süreci parametresi değişik süreler için uyarlandığında ve eşik sabit tutulduğunda ortaya çıkan tepki dağılımları yine sabit değişkenlik oranı göstererek, aralık zamanlamanın temel psikofiziksel özelliklerini açıklayabilmektedir. Fakat Sayıl Zamanlama Modeli'nden farklı olarak bu durumda ortaya çıkan dağılımlar normal dağılım değil, Gamma dağılımdır. Gamma dağılımı Poisson sürecine bağlı olarak n'inci olayın meydana gelmesine kadar geçen sürelerin (birbirinden bağımsız üstel değişkenlerin toplamının) yoğunluğunu tanımlar. Bu dağılımın ölçek (θ) ve şekil (k) parametrelerinden oluşan iki parametresi bulunmaktadır. Gamma dağılımının k parametresi yüksek değerler aldıkça, bu dağılım Gauss dağılımına yakınsak bir hal alır (ortalama = $k\theta$, standart sapma = $k\theta^2$, değişkenlik katsayısı = $1/\sqrt{k}$). Dolayısıyla, ortaya çıkan dağılımlardaki çarpıklığın (skewness = $2/\sqrt{k}$) değişkenlik katsayısına oranı ikidir ve bu özellik model karşılaştırmaları için önemli bir görgül istatistiksel özellik olarak ortaya çıkmaktadır (Jørgensen, 1997). Örneğin, elde edilen tepki zamanlarının çarpıklığının değişkenlik katsayısına oranı ikiye yakın ise bu durum Gamma dağılımının bu

veriyi daha iyi açıkladığı anlamına gelebilir. Bu değer sıfırda öne çıkan dağılım Gauss dağılımı olacaktır. Fakat zamanlama alanında Gamma dağılımının Gauss dağılımına göre kavramsal/analitik avantajı negatif değerlere izin vermemesidir.

Davranışsal Zamanlama Kuramı'nın mimarisini temel alan bir başka model olan Zamanlamayı Öğrenme Modeli'dir (Learning to Time, Machado, 1997). Bu model BeT'te varsayılan durumları bir tepki katmanına bağlar ve bu katmanlar arasında bağımsız öğrenmeye bağlı olarak değişik bağlantı ağırlıkları tanımlar.

Aralık Zamanlamanın Sürüklenme-Yayımlı (Drift-Diffusion) Modeli

Sürüklenme-yayımlı modelleri iki seçenekli karar verme deneylerinde elde edilen doğruluk ve tepki zamanlarını açıklayan rasgele yürüyüş (random walk) modelleri bütünü olarak tanımlanır. Bu tür iki seçenekli karar verme görevlerinde katılımcılara kendilerine sunulan bir uyarının iki hipotezden hangisini doğruladığı sorulmaktadır. Bu tip iki seçenekli kararları barındıran deneylere, katılımcılara sağa veya sola küme halinde hareket eden noktalar gösterildiği durumlar örnek gösterilebilir. Bu noktaların bir bölümü rasgele yönlerde hareket ederken, diğer bölümü tutarlı bir şekilde sağa ya da sola hareket etmektedir ve katılımcılardan noktaların hangi yöne tutarlı olarak hareket ettiğini belirtmeleri istenmektedir. Birçok modelleme çalışması, bu tür senaryolarda alınan kararların altında gürültülü kanıt bütünleştirme (noisy evidence accumulation) süreçlerinin yattığını öne sürmüştür. Başka bir deyişle, ortalamada iki hipotezden birini doğrulayacak yönde toplanan kanıtların bir değişiklik kaynağına maruz kaldığı ve bu nedenle zaman içinde seyrettikleri rotada rasgelelik sergiledikleri varsayılmıştır. Karar bütünleştirme sürecinin değişkenlik içermesi, aynı uyarın ile karşılaşıldığı durumlarda dahi, bireylerin kararlarının doğruluğunun ve bu kararların verilmesine kadar geçen süre aralıklarının denemeler arası farklılık göstermesine neden olur.

Bu tür iki seçenekli kararların temelindeki optimal istatistiksel işlem, aşamalı olasılık oranı testidir (Sequential Probability Ratio Test; Barnard, 1946; Wald, 1947). Bu işlem sabit bir doğruluk oranı için bütünleştirilmesi gerekli olan kanıt miktarını en aza indirirken, sabit bir miktardaki kanıt için doğruluk oranını en yükseğe çıkartacaktır (Wald ve Wolfowitz, 1948). Bu istatistiksel işlem Stone (1960) tarafından iki seçenekli zorunlu kararların aldıkları süreyi modellemek üzere kullanılmıştır. Bu modele göre her kanıt örneklenirken, iki karara ait hipotezlerin olasılık oranlarının hesaplandığı ve örneklenen toplam kanıt sayısının karar süresine denk geldiği varsayılmıştır. Kanıtlar bu modelde ayrı bir şekilde örneklenir iken, sürüklenme-yayımlı modelinde (Ratcliff, 1978) bu süreç daha sürekli bir haldedir. Başka bir de-

yişle sürüklenme-yayımlı modeli aşamalı olasılık oranı testinin aralıksız halidir. Bu model, doğru ve hatalı kararların aldığı ortalama süreler arasındaki farkı açıklamak üzere bazı parametrelerinin denemeler arasında değişkenlik göstermesine izin verecek şekilde genişletilmiştir (Ratcliff ve Rouder, 1998). Sürüklenme-yayımlı modeline göre hakkında karar verilen duysal bilgiler değişkenlik içerir. İki hipotezi destekleyen kanıtlar arasındaki fark karar değişkeni olarak kullanılır ve bu değişken zamana bağlı olarak bütünleştirilir. Bir denemede karar değişkeninin ilk önce hangi eşliğe ulaştığı verilen kararı belirlerken, bu eşliğe ulaşma süresi karar süresini belirler.

Sürüklenme-yayımlı modeli en basit halinde matematiksel olarak stokastik diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır.

$$dx = A \cdot dt + c \cdot dW, x(0) = 0 \quad (1)$$

Bu denklemde, dt zaman aralığını gösterirken, dW her adımda eklenen Gauss beyaz gürültü (white noise) olarak düşünülebilir. Burada zamanla güncellenen değer, karar değişkeni olan x 'in karar eşikleri tarafından sınırlandırılan karar alanındaki dikey düzlemdeki yerleşimidir. A , x 'in bir karar eşğine (z) veya diğer karar eşğine ($-z$) ortalamada ne kadar hızda ilerlediğini gösterir. Kanıt bütünleştirme sürecinin değişken olması sonucunda, x 'in zamanla birlikte ilerleyişinde bir derece rasgelelik de sergilenir. İlintili olarak, c parametresi karar değişkeni x 'in sadece gürültüye bağlı olarak kat edeceği bu mesafeyi tanımlar (Ratcliff ve McKoon, 2008). Bu tür bir süreç karar verme senaryolarında değerlendirildiğinde, uyarının fark edilmesi ve verilen kararla ilişkilendirilen davranışın ortaya çıkmasında belirli gecikmelerin meydana gelmesini beklemek doğaldır. Bu tür gecikmeler T_0 parametresi tarafından temsil edilmektedir. Eğer iki hipotezin doğruluk olasılığı eşit ise, kanıt bütünleştirme süreci herhangi bir karar eşğine yönelik tercih barındırmadan $x(0)$ olarak tanımlanan, iki eşğin orta noktasından başlayacaktır. Bu tür modeller, sözcükler hakkında alınan kararlardan (Ratcliff, Gomez ve McKoon, 2004), görsel kararlara (Balcı ve ark., 2011b) ve hatırlama süreçlerine (McKoon ve Ratcliff, 2012; Ratcliff, 1978) kadar birçok bilişsel ve algısal alandaki kararları ve bu kararlara ait tepki sürelerini başarıyla açıklamaktadır.

Yakın zamanda Sürüklenme-Yayımlı Modeli aralık zamanlama davranışını açıklamak üzere uyarlanmıştır (Zamana göre adaptif, karşıt Poisson Sürüklenme-Yayımlı Modeli – Time-adaptive, opponent Poisson Drift-Diffusion Model, TOP-DDM, Simen ve ark., 2011; Simen, Rivest, Ludvig, Balcı ve Killeen, 2013). Bu modelin (ve nöral uygulamasının) temel varsayımları, a) sinir hücresi aksiyon potansiyellerinin Poisson dağılıma göre ortaya çıktığı, b) bu aksiyon potansiyellerinin bütünleştirilebildiği ve c) uyarıcı (excitatory) girdilerdeki artış ile baskılayıcı (inhibitory) aksiyon potansiyellerinin de orantılı olarak arttığıdır. Bu iki Poisson sürecin çık-

tları toplandığında (uyarıcı sinyallerin toplamı-orantılı baskılayıcı sinyallerin toplamı) ve bu kümülatif değer yüksek ve sabit bir değerdeki eşişe ulaştığında zamana bağlı karar verilir.

İki bağımsız Poisson değişkeni arasındaki farkın varyansı, bu iki Poisson sürecin varyansının toplamına, bu varyans da Poisson dağılımına göre bu süreçlerin sinyal oluşturma oranına eşittir (Poisson dağılımın ortalaması aynı dağılımın varyansına eşittir). Eğer baskılayıcı sinyaller uyarıcı sinyallerin sabit bir oranı ise $(1-\gamma)I$ ortaya çıkan varyans net sürüklenme ile orantılı olur. Bu da, sürüklenme-yayımlı sürecinin yayılım standart sapmasının sürüklenmenin kareköküne orantılı olduğu anlamına gelir. Bu durum yukarıda tanıtılmış olan karar verme modellerinde kullanılan ve bütünleştirilen sinyalden bağımsız olan sabit yayılım standart sapmasından farklıdır. Yukarıda sözel olarak anlatılan zamanlama sürecini tanımlayan denklem aşağıdaki gibidir.

$$dx = (1-\gamma) \cdot I \cdot dt + \sqrt{(1+\gamma)} \cdot I \cdot dW \quad (2)$$

Yukarıda tanımlanan baskılayıcı sinyallerin uyarıcı sinyallere oranı burada γ ile gösterilmiştir. Denklem 2 ve Denklem 1 karşılaştırıldığında aşağıdaki eşitlikleri tanımlayabiliriz.

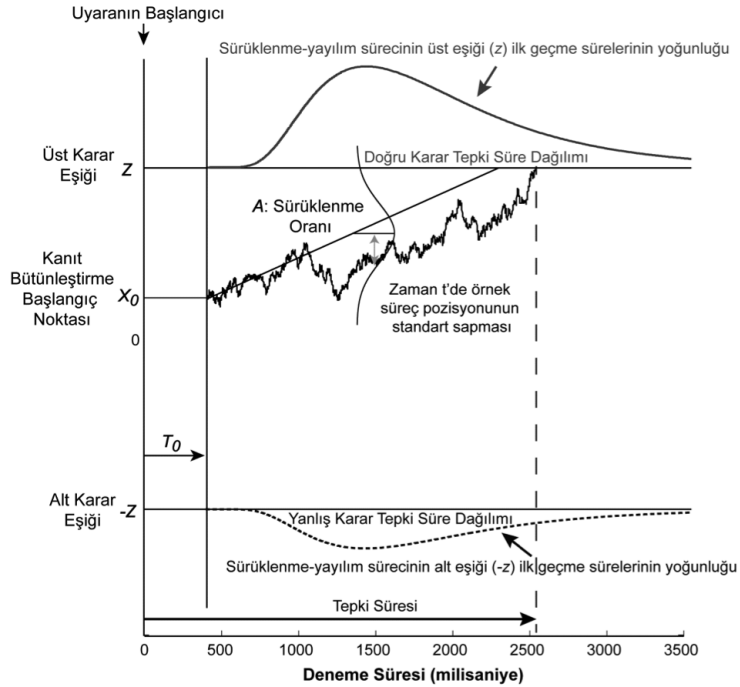
$$\begin{aligned} A &= \frac{(1-\gamma) \cdot I}{\sqrt{(1+\gamma)} \cdot I} \\ c &= \sqrt{(1+\gamma)} \cdot I \\ c &= \sqrt{(1+\gamma)} / (1-\gamma)A \end{aligned}$$

$m \equiv \sqrt{(1+\gamma)} / (1-\gamma)$ (m sabit bir oran olduğunda), $c = m\sqrt{A}$ olarak tanımlanabilir.

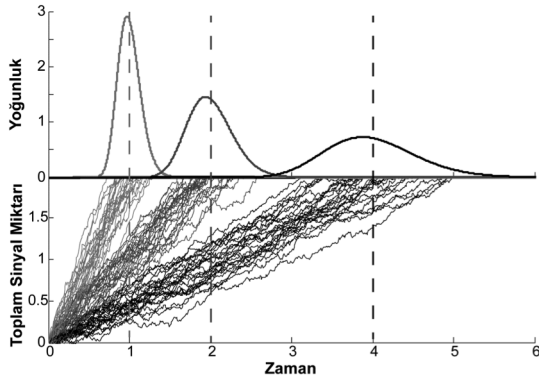
$$dx = A \cdot dt + m\sqrt{A} \cdot dW \quad (3)$$

Bu özel sürüklenme-yayımlı ilişkisi varsayılarak farklı süreler için benzetim yapıldığında ortaya çıkan rasgele yürüyüş örnekleri ve sabit eşişe ilk geçme zamanlarının dağılımı Şekil 5'te gösterilmektedir.

Bu süreç çok kere tekrarlandığında ilk eşik geçme süreleri ters normal (inverse-Gaussian) bir dağılım gösterir ve bu dağılımların sabit bir değişkenlik katsayısı vardır. Dikkatinizi çekmek istediğimiz bir nokta, γ 0 olduğunda (yani baskılayıcı sinyal etkisi yokken) bu modelin BeT modeline denk geldiğidir. Ancak ters normal dağılımın çarpıklığının değişkenlik katsayısına oranı 3'tür ve elde edilen veriler bu parametrelerin oranlarının 3'e daha yakın olduğunu göstererek, TOP-DDM modelini (BeT ve STM modellerine kıyasla) desteklemektedir.



Şekil 4. Sürüklenme-Yayımlı Modelinin İki Alternatifi Zorunlu Seçim Kararlarına Uyarlanmış Hali



Şekil 5. Parametreleri 1, 2 ve 4 Zaman Ünitesi için Belirlenmiş Zamana Göre Adaptif, Karşıt Poisson Sürüklenme-Yayılm Modeli'nin Tahmin Ettiği Sürüklenme-Yayılm Süreçleri ve Bu Süreçlerin Ortaya Çıkardığı İlk Eşik Geçme Süresi Dağılımları

Farklı Aralık Zamanlama Yöntemleri

Makalenin bir önceki bölümünde aralık zamanlama işlevini açıklamak üzere geliştirilmiş farklı kuramsal yaklaşımlar tanıtıldı. Bu bölümde ise aralık zamanlama performansının incelenmesi için geliştirilen çeşitli davranışsal yöntemler ele alınacaktır. Yararlanılan psikofiziksel paradigmalardan insanların ve hayvanların zamanlama davranışları hakkında çok büyük derecede benzerlik ortaya koyduğu için, aralık zamanlama kolaylıkla farklı uyaran tipleri ile ve değişik zamansal bağlamlarda türler arası test edilebilmektedir. Bu özelliklerle ilintili olarak, makalenin bu kısmında yöntem açıklamalarının yanı sıra bu yöntemlerden elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılan analitik ölçümler ve sonuçların nasıl yorumlanabileceği anlatılacaktır.

Süre Ayrıştırması (Temporal Bisection)

Psikofiziksel yöntemlerden biri olan süre ayrıştırması, insanlarda ve diğer hayvanlarda zamanlama performansının ve süre temelli kararların incelenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde görsel veya işitsel bir uyaran, bir kısa bir de uzun olmak üzere iki referans süre (örn., 2 ve 8 sn.) boyunca farklı denemelerde rasgele bir sırayla sunulmaktadır. Deneme sonunda katılımcılardan bir tuş kullanılarak sunulan sürenin 'kısa' veya 'uzun' olarak ayrıştırılması beklenmektedir ve yapılan sınıflandırmaların doğruluğuna bağlı olarak geribildirim verilmektedir. Bu iki süreye ait zamansal ayrıştırma performansı belirli bir doğruluk seviyesine (örn., %80) ulaştıktan sonra katılımcılara referans sü-

relerin arasında bulunan farklı uzunluktaki süreler de sunulmaktadır. Referans sürelerin sunumunun bitiminde olduğu gibi ara sürelerde de deneme sonunda geriye dönük 'kısa' ve 'uzun' sınıflandırması yapılması beklenmektedir. Ancak, referans sürelerin ayrıştırılma sürecinden farklı olarak ara sürelerin sınıflandırılması sonucunda geribildirim verilmez. Böylece, bu sürelerdeki davranışsal performansın değerlendirilmesi ile zamansal bilgi işleminin bir parçası olan algısal süreçler daha iyi karakterize edilir (Raslear, 1985).

Süre ayrıştırması yönteminde, referans ve ara sürelerin 'kısa' ve 'uzun' olarak sınıflandırılması sonucu, her uyaran süresi için yapılan 'uzun' seçiminin (ilgili süre için yapılan toplam seçim sayısına) oranı ile genellikle sigmoid şekle sahip olan psikometrik fonksiyon oluşturulur. Elde edilen bu psikometrik fonksiyonların farklı yöntemler ile analiz edilmesi sonucu süre ayrıştırması yönteminde verilen zamansal kararların doğası hakkında bilgi elde edilir. Davranışsal performansın değerlendirilmesinde kullanılan ölçümlerden biri 'öznel eşitlik noktası' (point of subjective equality) veya 'ayrıştırma noktası'dır (bisection point). Bireysel psikometrik fonksiyonların şekline en çok uyandıran regresyon eğrisi ile modellenmesi sonucu öznel eşitlik noktası olarak adlandırılan, katılımcıların eşit olasılık ile 'kısa' veya 'uzun' olarak ayrıştırdıkları süre belirlenir. Başka bir deyişle, bu nokta %50 olasılıkla 'uzun' yanıtının verildiği süre olarak da düşünülebilir. Süre ayrıştırması yönteminde test süreleri ile ilgili yapılan 'kısa' ve 'uzun' ayrıştırmalarının zamansal hassasiyeti ile ilgili çıkarımlar ise oluşturulan psikometrik fonksiyon eğrilerinin eğimiyle yapılabilmektedir (Meck, 1983). Eğitim metriği üzerinden hesaplanan ayırım eşiği (difference limen) ve Weber oranı (Weber ratio) zamansal hassasiyet göstergeleri olarak kullanılmaktadır. Denemelerin %75'inde 'uzun' olarak ayrıştırılan süre ile denemelerin %25'inde 'uzun' olarak sınıflandırılan süre arasındaki farkın yarısı ayırım eşiği (AE) olarak adlandırılır ve yüksek bir AE değeri düşük zamansal hassasiyete işaret etmektedir. Ayırım eşiğinin öznel ayrıştırma noktası ile oranlanması sonucunda Weber oranı (WO) elde edilir. Sayıl Zamanlama Modeli'nin özelliklerine göre, aynı orana sahip farklı süre aralıklarının kullanımı sonucunda WO değerinin sabit kalması öngörülür iken, artan süre aralıkları ile AE'nin de artış göstermesi beklenir (Droit-Volet ve Wearden, 2002).

Süre ayrıştırma yönteminde elde edilen verinin analizinde kullanılan bu farklı yöntemlerden en önemlisi belki de öznel eşitlik noktasının yatay düzlemde konumlanma şeklidir. Bu ölçüme dayalı bulgular çeşitli deneysel manipülasyonlar nedeniyle farklılık göstermektedir. Genelde bu nokta, hayvanlarda yaklaşık olarak iki referans sürenin geometrik ortalamasının bulunduğu süreye denk gelmekte iken (örn., Church ve Deluty, 1977), insanlarda iki referans sürenin aritmetik ortalamasının bu-

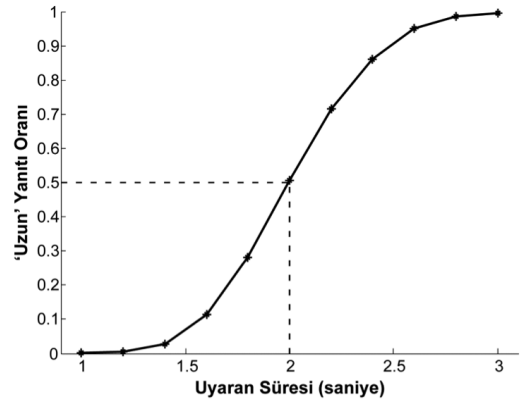
lunduğu noktaya daha yakındır (Balcı ve Gallistel, 2006; Wearden, 1991). Fakat uyarın özelliklerindeki değişime bağlı olarak öznel eşitlik noktasının yatay düzlemde sağa veya sola kayması da mümkündür. Örneğin, Wearden ve Ferrara (1995), insanlarla yaptıkları bir çalışmada uyarın sürelerinin diziliminin logaritmik veya doğrusal aralıklar ile elde edilmesinin öznel eşitlik noktası üzerinde farklı etkiler yarattığını bulmuştur. Test sürelerinin logaritmik düzlemde eşit aralıklarla mesafelendirilmesi öznel eşitlik noktasının sola kayması ile sonuçlanmış iken, uyarınların doğrusal düzlemde eşit aralıklarla belirlenmesi öznel eşitlik noktasının sağa kaymasına sebep olmuştur. Benzer şekilde, uzun (*U*) ve kısa (*K*) referans sürelerinin birbirine oranında azalma, öznel eşitlik noktasının solda olmasına ve geometrik ortalamaya daha yakın olmasına neden olurken (Allan ve Gibbon, 1991), *U/K* oranının daha yüksek olduğu durumda ayırıştırma noktası aritmetik ortalamaya daha yakındır (Wearden ve Ferrara, 1996).

Öznel eşitlik noktasının bu tür yöntemsel farklılıklara hassas olması, süre ayırıştırma performansı ile ilgili olan karar süreçlerinin karmaşıklığı hakkında bize fikir vermektedir. Karar mekanizmalarının modellenmesine yönelik ilk çalışmalardan biri Wearden (1991) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu modelin temelinde, her denemede iki referans süre için birer bellek temsili alınması (kısa süre için *k**, uzun süre için *u**) ve ilgili denemede sunulan süre (*t*) ile karşılaştırılarak aradaki zamansal farkın hesaplanması yatmaktadır. *k** ile *t* arasındaki fark *t* ile *u** arasındaki farktan düşük ise ‘kısa’ yanıt verilir iken tam tersi durum sonucunda ‘uzun’ yanıt verilir. Geçen sürenin doğrusal bir şekilde biriktiği varsayılırsa, bu karar kuralına göre, öznel eşitlik noktasının iki referans süreye de eşit uzaklıkta olduğu, yani *k* - t* ile *t - u**’nin birbirine eşit olduğu duruma denk geldiği düşünülebilir. Bu tip bir varsayım sonucunda da ayırıştırma noktası referans sürelerin aritmetik ortalamalarının bulunduğu noktada bulunacaktır (Wearden, 2004).

Fakat yukarıda bahsi geçen bulguların çeşitliliği, süre ayırıştırma yöntemindeki davranışsal süreçlerin bu tip basit bir karar kuralına bağlı olarak ortaya çıktığını ileri sürmenin yeterli olmayacağı izlenimini vermektedir. Bu nedenle, Wearden ve Ferrara (1995), uyarınların logaritmik veya doğrusal düzleme göre mesafelendirilmesi sonucu öznel eşitlik noktasında meydana gelen değişikliklerin ortaya çıkmasında görev alan zamanlama ve karar süreçlerine farklı bir bakış açısı getirmiştir. Geliştirilen bu karar kuralına göre, *t*’nin ‘kısa’ ve ‘uzun’ olan sınıflandırılmasında yalnızca referans süreleri değil deney oturumu boyunca sunulan bütün uyarın sürelerini içeren bir karar mekanizması kullanılmaktadır. Sunulan tüm sürelerin aritmetik ortalaması *M* değişkeni olarak adlandırılmıştır ve bu değişken, ortalaması *M* olan ve belirli bir değişkenlik katsayısı (*c*) ile tanımlanan normal

dağılım ile temsil edilmektedir. *M* değişkeninin uyarın sürelerinin aralarındaki zamansal farklarda meydana gelen değişikliklerden etkilenmesi sonucunda da ayırıştırma noktasının konumunun değişeceği düşünülmektedir.

Wearden ve Ferrara’ya (1995) göre, *t* ve *M* arasındaki farkın *t* ile oranlanması, $(t - M)/t$, sonucu elde edilen değerin sabit olduğu varsayılan *b* eşliğinden yüksek olması ‘uzun’ yanıtın verilmesi ile sonuçlanır iken negatif *b* eşliğinden düşük olması *t*’nin ‘kısa’ olarak sınıflandırılmasına yol açar. Bu değerin *-b* ve *b* arasında kaldığı durumda ise *t* ve *M* hakkında belirsizlik yaşanması sonucu ‘kısa’ ve ‘uzun’ yanıtlarından biri rasgele verilir. Hatırlatmak gerekir ki zamanlama mekanizmamızdaki değişkenlik nedeniyle sabit bir süre bazen ‘uzun’ bazen de ‘kısa’ olarak sınıflandırılabilir. Şekil 6, Wearden ve Ferrara (1995) çalışmasında geliştirilen karar kuralının kullanımı ile oluşturulan farazi bir psikometrik fonksiyon göstermektedir. Bu örnekte uyarınların arasındaki zamansal mesafe doğrusal düzleme göre belirlenmiştir ve buna bağlı olarak, öznel eşitlik noktasının iki referans sürenin aritmetik ortalaması ile eş değerde olması ön görülmektedir. Wearden ve Ferrara’nın (1995), uyarın dizisinde yapılan değişimlerin ayırıştırma performansını farklı yönlerde etkilediği bulgusu sonucunda öne sürdükleri karar kuralı ile oluşturulan bu tahminlerin görümler ile büyük ölçüde örtüşmesi, süre ayırıştırma yöntemindeki zamansal kararların referans süreler aynı kaldığında dahi farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Farklı Uyarın Süreleri için Verilen ‘Uzun’ Yanıtı Oranındaki Değişimi Gösteren Farazi Psikometrik Fonksiyon

Not. Kesik çizgiler, ‘uzun’ yanıt oranının 0.5’e denk geldiği uyarın süresine işaret etmektedir. Psikometrik fonksiyonu oluşturan veriler her süre için 10000 kere tekrarlanan simülasyonlardan elde edilmiştir.

Öznel eşitlik noktasının konumlanmasında görülen farklılıklar Balcı ve arkadaşları (2011a) tarafından ise ilintili manipülasyonların ödülü maksimize eden karar stratejileri üstündeki etkileri ile açıklanmıştır. Zamanlama süreçlerinin varyasyona tabi olması nedeniyle birçok zamansal kararın içsel zamansal belirsizlik altında alınmasına bağlı olarak hedef sürelerle ilişkin alınan kararların zamansal risk değerlendirmesini de içerdiği öne sürülmüştür (Balcı, Freestone ve Gallistel, 2009a). İlgili olarak, farklı canlı türlerine ait bireylerin zamanlama davranışlarını, maruz kaldıkları zamansal bağlamın yanı sıra içsel zamansal belirsizlik seviyelerini dikkate alarak adapte ettikleri ve böylece ödülleri maksimize eden kararlar aldıkları düşünülmektedir. Bu bakış açısı doğrultusunda, öznel eşitlik noktasının konumlanmasında gözlemlenen farklılıkların içsel zamansal belirsizlik seviyeleri tarafından modüle edildiği öne sürülmektedir. Buna bağlı olarak, içsel zamansal belirsizliğin düşük olduğu yani zamanlama süreçlerinin yüksek derecede kesinlik içerdiği durumlarda öznel eşitlik noktasının aritmetik ortalamaya daha yakın olacağı hesaplanmış, yüksek içsel zamansal belirsizliğin ise öznel eşitlik noktasını sola kaydıracağı gösterilmiştir.

Süre ayrıştırması yöntemini kullanan çalışmalar ve elde edilen davranışsal performansın altında yatan karar mekanizmalarını araştıran modelleme çalışmaları genellikle 'kısa' ve 'uzun' yanıtlarının verilme oranları üzerinde yoğunlaşmış ve tepki sürelerini göz ardı etmiştir. Dolayısıyla, bu zamansal kararların oluşum sürecine ait açıklamalar yetersiz kalmıştır. Bu amaçla Balcı ve Simen (2014), hesaplamalı bir yaklaşım ile süre ayrıştırması yönteminde alınan iki seçeneğe kararlar ve bu kararların oluşum süreci hakkında iki aşamalı sürüklenme-yayımlı süreci tanımlamışlardır. Önerilen ardışık yayılım modelinin ilk aşaması uyarın süresinin zamanlanmasını içerir (Simen ve ark., 2011). Belirli bir değişkenliğe tabi olan bu dinamik zamanlama süreci ile uyarın sunumu sonlanmadan test süresine ait bir tahmin oluşturulur. Uyarın sunumu bittikten sonra karar sürecinin ikinci aşaması devreye girer. İkinci aşamadaki karşılaştırma sürecinin başlangıç noktası ve sürüklenme parametreleri, birinci aşamada zamanlayıcının nerede sonlandığına bağlıdır. Bu aşamada, kısa ve uzun süreleri birbirinden ayırdığı öne sürülen tahmini ayrıştırma noktası ile test süresine ait oluşturulan tahmin arasındaki fark alınır. Bu farka bağlı olarak kanıtın hangi eşığe daha önce sürükleneceği belirlenir. Geçen süreye ait oluşturulan tahmin ile tahmini ayrıştırma noktası arasındaki farkın pozitif bir değere sahip olması daha çok 'uzun' yanıtı ile sonuçlanır iken, negatif bir değer daha çok 'kısa' yanıtına yol açar.

Balcı ve Simen'in (2014) süre ayrıştırması yönteminde gözlemlenen performansa yönelik öne sürdüğü ardışık yayılım modelinin ana parametrelerine dair yapılan tahminlere bakıldığında, üst eşiğin 'uzun', alt eşiğin ise

'kısa' yanıtına denk geldiği varsayımı sebebiyle uyarın süresinde görülen artış ile sürüklenme oranında da (A) doğrusal bir yükselme beklenmektedir. Başlangıç noktasının da (X_0) uyarın sunumu başlangıcında 'kısa' karar eşığına yakın başlaması ön görülür iken, geçen süre ile 'uzun' karar eşığına yaklaşması beklenir. Ayrıca, karar verme süreçlerinde meydana gelen çeşitli gecikmeleri temsil eden karar dışı süre (T_0) parametresinin de 'uzun' sınıflandırmaları için daha düşük bir değer alacağı varsayılmaktadır. Uyarın sunumu başında 'kısa' sınıflandırmasına bağlılık, sinyal sürenin devamı durumunda hatalı yanıtı yol açacaktır ancak uyarın sonlanmadan 'uzun' yanıtına ait bağlılık tepki hazırlığına yardımcı olacağı için deneme sonunda yapılan sınıflandırmalara ait tepki süresinde azalma sağlayacaktır. Kısacası, zamanlanan uyarın hakkında bireylerin 'uzun' kararına bağlılık göstermeleri sonucunda, T_0 uzun test süreleri için daha düşük değere sahip olacaktır.

Karar oranlarının ve tepki sürelerinin önerilen iki aşamalı ardışık yayılım süreci ile modellenmesinden elde edilen sonuçlar ön görülen parametre tahminlerinin görgül verileri çok büyük ölçüde açıkladığını göstermektedir. Davranışsal performans bakıldığında da elde edilen psikometrik fonksiyonun model üzerinden yapılan tahminler ile örtüştüğü gözlenmiştir. Tepki sürelerinde ise, 'kısa' sınıflandırmalarının yapıldığı deneimelerde uyarın süresi arttıkça tepki sürelerinde de artış gözlenir iken 'uzun' sınıflandırılmalarının yapıldığı durumlarda uyarın süresi arttıkça tepki sürelerinde azalma gözlenmiştir. Uyarın sürelerinin 'kısa' ve 'uzun' olarak sınıflandırılmasına ait tepki hızında görülen bu bulgular model üzerinden yapılan tahminlerle de desteklenmiştir. Ayrıca, ortalama tepki hızının farklı uyarın sürelerinde değişimi incelendiğinde, öznel eşitlik noktası yakınında tepki süresinde artış olduğu, yani karar alımının yavaşladığı, uzun referans süreye yakın zaman aralıkları için ise daha hızlı yanıtlar verildiği bulunmuştur. 'Kısa' ve 'uzun' sınıflandırmalarına ait tepki sürelerinin değerlendirilmesi sonucu elde ettikleri bu bulgular ile Balcı ve Simen (2014), süre ayrıştırması yönteminin tamamıyla geriye dönük kararları içermediğini, ileriye dönük bileşenlerinin de olduğu varsayımını güçlendirmişlerdir. Ayrıca, makalenin ilk bölümünde de belirtildiği üzere, ardışık yayılım model parametre tahminlerinin aralık zamanlama yöntemi için de doğrulanmış olması hem zamansal olan hem de zaman ile ilişkilendirilmeyen diğer yöntemlerde verilen kararların ortak mekanizmaları paylaştığını ileri sürmektedir.

Zamansal Genelleştirme (Temporal Generalization)

Bu yöntemde, katılımcılara ilk önce belirli bir standart süre, sonrasında da standart süre ile karşılaştırılacakları farklı süreler sunulmaktadır. Standart süreye olan benzerlikleri kıyaslanacak olan diğer zaman ara-

lıkları hedef süreye eşit olabilmekle beraber, daha kısa veya daha uzun da olabilmektedir. Katılımcının görevi, her denemede deneyimledikleri sürenin standart süreye eşit olup olmadığını belirlemektir. Katılımcıların verdiği 'aynı' yanıtlarının denemeler arası ortalaması alınır ve farklı test süreleri için gösterdiği değişiklik zamansal genelleştirme eğrisi (temporal generalization gradient) oluşturulur.

Bu yöntemde elde edilen tipik bulgulardan biri, 'aynı' yanıt oranının istikrarlı bir şekilde standart süreye en yüksek değerini almasıdır. Fakat denekler standart süreye denk gelmeyen diğer süreler için de bazen 'aynı' yanıtını verebilmektedirler. Başka bir deyişle, katılımcılar bazen standart süreden daha kısa veya uzun olan süreleri de standart sürenin aynı olarak yorumlayabilirler. Bu zamansal genelleme eğilimi standart süre ile karşılaştırılan süre ile hedef süre arasındaki fark azaldıkça artmaktadır. Zamansal genelleştirme eğrilerinin dikliği de farklı sürelerin standart süreden ne derece hassasiyet ile ayrıştırılabildiğini göstermektedir. Eğrilerin dik olması yüksek hassasiyete işaret ederken, daha yassı biçimde olan zamansal genelleştirme eğrileri katılımcıların standart süreyi diğer sürelerden daha düşük bir duyarlılık ile ayrıştırdığını ortaya koyar. Zamansal genelleştirme eğrilerine ait bir diğer tipik bulgu ise asimmetrik bir özelliğe sahip olmalarıdır. Diğer bir deyişle, katılımcılar standart süreden daha uzun olan süreleri kısa olan sürelerle göre daha yüksek bir sıklıkla standart süreyle aynı olarak değerlendirmektedirler.

Church ve Gibbon'ın (1982) sıçanlarla yaptıkları çalışmalarla bu zamanlama yönteminde kullanıldığı düşünülen zamansal karar verme mekanizmalarının altında yatan süreçlere nicel bir açıklama getirilmiş; Wearden (1992) ise, bu kuramsal yaklaşımı farklı görgül bulgular doğrultusunda geliştirmiştir. Church ve Gibbon'a (1982) göre zamansal genelleştirme yönteminde karşılaştırılan sürenin (t) standart süre (s) olarak belirtilmesi, başka bir deyişle, 'aynı' yanıtının üretilmesi aşağıdaki hesaplamaya göre gerçekleşir:

$$|(s^* - t)/s^*| < b^* \quad (4)$$

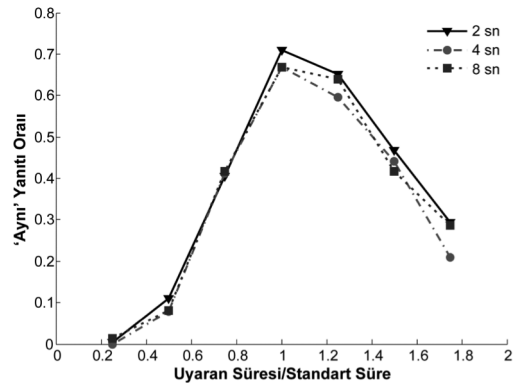
Bu karar kuralına göre, her denemede, t 'nin s 'ye olan benzerliğini belirlemek için ilk önce t ile standart süreye ait olan bellek temsilinin (s^*) mutlak farkı alınır. Denekler sonrasında, bu farkı s^* 'yle oranlayarak deneyimledikleri sürenin standart süreye ait bellek temsiline ne derece benzerlik gösterdiğini hesaplarlar. Elde edilen bu ayrıştırma oranı, denemeler arası değişkenlik gösteren ve ortalama değeri b^* 'ye eşit olan eşik değışkeninden her denemede alınan b^* örneği ile karşılaştırılır. b^* 'den düşük bir değer elde edilmesi, standart sürenin bellek temsilinden alınan örneğe göre gösterdiği farklılığın yeterince az olmasına ve bunun sonucunda t 'nin standart olarak tanımlanmasıyla sonuçlanır.

Church ve Gibbon'ın (1982) orijinal modeli, sı-

çanlarla yaptıkları çalışmalardan elde edilen zamansal genelleştirme eğrilerini tahmin edebilse de Wearden'ın (1992) insanlarla yaptığı çalışmalar istikrarlı bir biçimde daha asimmetrik bir eğilime sahip olan zamansal genelleştirme eğrilerini ortaya koymaktadır. İnsan verilerindeki bu asimetriyi daha doğru bir şekilde tanımlayabilmek amacıyla Wearden (1992), yukarıda belirtilen hesaplamadaki s^* ve t arasındaki mutlak farkı s^* yerine t ile normalize etmiştir.

$$|(s^* - t)/t| < b^* \quad (5)$$

Bu yeni metrik yakından incelendiğinde, zamansal genelleştirme eğrilerinde gözlemlenen asimetrinin bu modelde daha belirgin olduğu görülebilir. Örneğin, s 'nin 10 saniyeye eşit olduğu ve t_1 'in 7.5 sn t_2 'nin ise 12.5 sn olduğu düşünülüğünde, ilk durum için $|(10 - 7.5)/7.5 = 0.33$ iken diğer durumda $|(10 - 12.5)/12.5 = 0.2$ olacaktır. İki karşılaştırmadan elde edilen sonuçlardan hangisi daha küçük bir değere sahip ise, yani burada t_2 'nin olduğu durum, o daha yüksek bir olasılıkla eşik değışkeni b^* 'den daha düşük olacaktır ve dolayısıyla standart süreyle 'aynı' olarak değerlendirilecektir. Kısacası, karar kuralında yapılan bu değışim t_1 ve t_2 'nin standart süreye olan uzaklığının mutlak farkının aynı olduğu durumda dahi standart süreden daha uzun olan karşılaştırma süresinin 'aynı' olarak değerlendirilmesini daha olası kılmaktadır. Bahsi geçen bu asimetri, Şekil 7'de üç farklı standart süre için söz konusu karar hesabına bağlı olarak



Şekil 7. Modifiye Edilmiş Church ve Gibbon Modeli (Wearden, 1992) ile Oluşturulan, Üç Farklı Standart Süreye ait Normalize Edilmiş Farazi Zamansal Genelleştirme Eğrileri

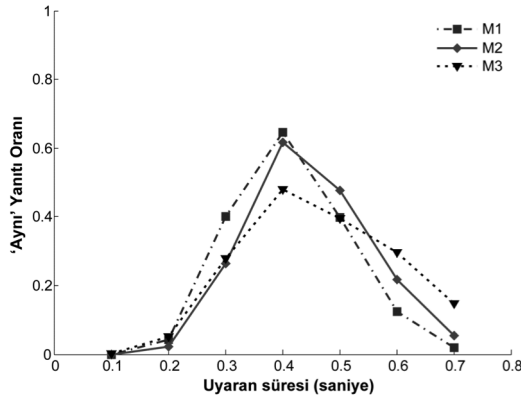
Not. Verilerin simülasyonu sırasında Wearden (1992) çalışmasındaki 3. deneyde elde edilen parametre tahminleri kullanılmış ve her süre için gözlemlenen veriler 1000 kere simüle edilerek elde edilmiştir.

oluşturulan farazi zamansal genelleştirme eğrilerinde net bir şekilde gözlemlenmektedir.

Şekil 7’de de görüldüğü üzere, Wearden (1992) çalışmasında s^* ve t arasındaki mutlak farkın t ile normalize edilmesi ile orijinal Church ve Gibbon’ın (1982) modelinde yapılan bu değişiklik, insanlardan elde edilen verilerde gözlemlenen asimetriyi rahatlıkla ortaya koymaktadır. Fakat karar kuralında yine Wearden (1992) tarafından öne sürülen bir başka değişiklik de t parametresinin de denemeler arası değişkenlik göstermesine izin verilmesidir.

$$|(s^* - t^*)/t^*| < b^* \quad (6)$$

Daha fazla rasgelelik içeren bu hesaplamadaki değişiklik ile zamansal değişkenlik modeli (timing variability model, Wearden, 1992) olarak adlandırılan bu uyarlamada, katılımcıların deneyimledikleri sürenin bellek temsilinde de (t^*) değişkenlik olduğu varsayılmaktadır. Karşılaştırılan sürenin bellek temsilindeki bu varyasyon, standart sürenin bellek temsilinde görüldüğü gibi aynı değişkenlik katsayısına sahiptir. Bu uyarlamada, zamansal genelleştirme yöntemindeki zamansal kararların standart süreye ait bellek temsilinde ve eşik parametresinde görülen varyasyona ek olarak ilgili denemede sunulan karşılaştırma süresine ait varyasyonu da içeren üç farklı değişkenlik kaynağına tabi olduğu öne sürülmektedir.



Şekil 8. Üç Farklı Karar Modeli ile Oluşturulan Farazi Zamansal Genelleştirme Eğrileri

Not. Verilerin simülasyonu sırasında değişkenlik katsayısı ve eşik değişkeninin ortalama değeri 0.2'ye eşitlenmiştir. M1: Orijinal Church ve Gibbon modeli (Church ve Gibbon, 1982), M2: Modifiye edilmiş Church ve Gibbon modeli (Wearden, 1992), M3: Zamansal değişkenlik modeli (Wearden, 1992). Her model için oluşturulan veriler, her süre için 1000 kere simüle edilerek elde edilmiştir.

Zamansal genelleştirme yöntemindeki karar mekanizmalarını açıklamayı ve parametrize etmeyi amaçlayan bu üç farklı model, temelinde zamanlama literatüründe önemli bir yere sahip olan sayıl özelliğe dair varsayımlar üzerine kurulmuştur ve insanlardan ve diğer hayvanlardan elde edilen verilerde gözlemlenmesi olası farklılıkları varyasyon kaynaklarında değişiklikler yaparak açıklamaktadır. Şekil 8, bahsi geçen modellerin kullanılması ile oluşturulan farazi zamansal genelleştirme eğrilerini göstermektedir. Üç farklı modelde öne sürülen parametre değişimleri, aynı uyarıcı süreleri için verilen 'aynı' yanıt oranlarının değişkenlik göstermesini ön görmeye birlikte, oluşturulan farazi zamansal genelleştirme eğrilerinin büyük ölçüde benzerlik göstereceğini de önermektedir.

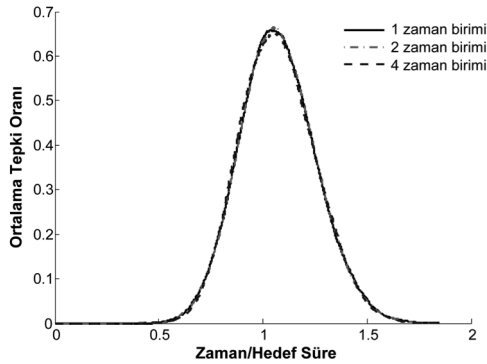
Zamansal bilgi işlemenin ne tip aşamalara tabi olduğunu Sayıl Zamanlama Modeli'ne bağlı olarak açıklamayı amaçlayan bu modeller, zamansal kararların doğası hakkında önemli varsayımlarda bulunsalar da bu kararların işleme dinamikleri hakkında yeterli bilgi vermemektedir. Bu nedenle Klapproth ve Müller (2008), katılımcıları zamansal genelleştirme yönteminde iki tip deneme çeşidi ile test etmişlerdir. Bir gruptan ("doğruluk grubu") standart süre ile karşılaştırılacak olan süreler için verecekleri 'aynı' ve 'farklı' yanıtlarını herhangi bir süre kısıtlaması olmadan vermeleri istenmiş iken, diğer gruptan ("hız grubu") kararların olabildiğince hızlı verilmesi istenmiş ve yanıtların uyarıcı sonlanmadan verilmesi mümkün kılınmıştır. Tahmin edilebileceği üzere, doğruluk grubuna kıyasla, hız grubundan elde edilen ortalama tepki süresinin daha kısa olduğu bulunmuştur. Ayrıca, doğruluk grubunda test süresi arttıkça tepki süresi de artmıştır. Hız grubunda ise, benzer bir örüntü ile 'aynı' yanıtlarının verildiği denemelerde uyarıcı süresindeki artış ile tepki süreleri de artmıştır. Ancak, 'farklı' yanıtlarından elde edilen tepki süresinin uyarıcı süresinin doğrusal bir fonksiyonu olarak standart süreye kadar artış gösterdiği bulunmuştur. Buna karşın, standart süreden daha uzun olan karşılaştırma sürelerinin 'farklı' olarak ayrıştırılmasına ait tepki hızının, uyarıcı süresindeki değişimden bağımsız olduğu ve sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Klapproth ve Wearden (2011), 'hız' grubunda 'farklı' yanıtlarına ait tepki hızının sahip olduğu bu örüntünün, karşılaştırma sürelerinin aralarındaki zamansal mesafe değiştiğinde veya bütün karşılaştırma sürelerinin standart süreden daha uzun olduğu durumlarda dahi aynı kaldığını bulmuştur. Ayrıca, standart sürenin her deneme başında sunulması sebebiyle referans belleğe bağımlılığın azaltıldığı durumlarda da tepki sürelerine dair benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Bu bulgular, zamansal kararların uyarıcı sunumu sonunda geriye dönük verilmediğini, zamanlanan uyarıcıya maruz kaldığı süre boyunca karar sürecinin gerçek zamanlı olarak oluşum içinde olduğunu göstermektedir (Klapproth, 2008). Bu yaklaşım Balci ve

Simen'in (2014) süre ayırıştırması yöntemi için geliştirdiği model ile de uyumluluk göstermektedir.

Doruk-Aralık Yöntemi (Peak-Interval Procedure)

Zamanlama literatüründe özellikle hayvanlarda sıklıkla kullanılan bir diğer davranışsal paradigma ise doruk-aralık yöntemidir (Bitterman, 1964; Catania, 1970; Roberts, 1981). Doruk-aralık yönteminde hayvanlar aynı türden görsel veya işitsel uyarı işaret (cue) olarak kullanan iki farklı deneme türüne maruz kalmaktadırlar. Öğrenme aşamasında yapılan denemelerde, katılımcılara deneme başında işaret uyarı (örn., ses) sunulur ve sonrasında sabit-aralık (fixed-interval) yönteminde yapıldığı gibi, belirli bir süre geçtikten sonra deneğin verdiği ilk yanıtın ödüllendirilmesi ile deneme sonlandırılır. Sabit süre geçmeden verilen yanıtlar ise ödüllendirilmez. "Doruk" denemelerinde ise deneme işaret uyarı ile başlatılır fakat deneğin yanıtları ödül ile sonlandırılmaz ve uyarı sabit sürenin yaklaşık üç katı uzunluğunda sunulur. Bu deneysel manipülasyon sonucu, geçen süre ile katılımcıların tepki sıklıklarında ne şekilde bir değişiklik gerçekleştiği ve geribildirim yokluğunda (örn., ödül verilmemesi) hedef sürenin nasıl zamanlandığı hakkında bilgi sahibi olunur.

Ödüllendirilmeyen denemelerde beklenen ortalama davranış örüntüsü, tepki oranının sabit sürenin sonlanmasına yakın artış göstermesi, yaklaşık olarak hedef süre anında doruğa ulaşması ve sonrası azalan bir eğilim ile tamamen sonlanmasıdır. Sıklıkla gözlemlenen bu davranış örüntüsü, hafif asimetriye sahip olan normal dağılım eğrisi benzeri bir eğilime sahiptir (Şekil 9, Bal-



Şekil 9. Üç Ayrı Hedef Süre için Normalleştirilmiş Ortalama Tepki Eğrileri

Not. Gözlenen veriler, her süre için 5000 kere simüle edilerek elde edilmiştir.

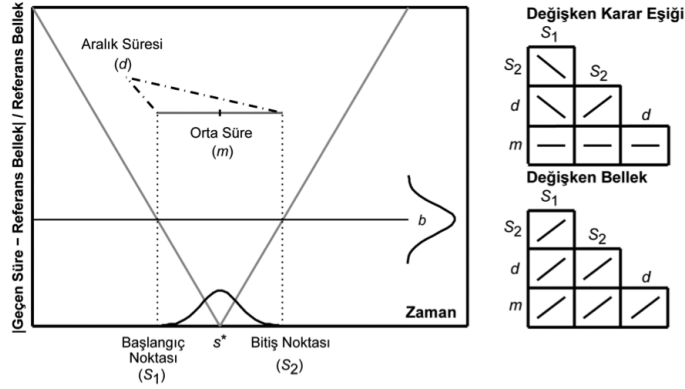
cı ve ark., 2009b). Şekil 9'da da görüldüğü üzere, ortalama tepki oranının geçen süreyle ilişkisi daha düzgün bir eğri ile tanımlansa da her deneme için tekli analiz yapıldığında (single-trial analysis) davranış örüntüsünün iki farklı evreden oluştuğu ve tepkilerin bir evreden diğerine ani bir geçiş yaptığı gözlemlenmiştir (Cheng ve Westwood, 1993; Church, Meck ve Gibbon, 1994; Gibbon ve Church, 1990). Ödülün sunulmadığı, doruk denemelerindeki davranış örgüsüne tekli bakıldığında, deneme başında gözlemlenen düşük tepki oranı sonrasında ölçüt süreye ulaşmadan ani bir şekilde yüksek tepki oranına geçiş yapıldığı (başlangıç noktası, S_1) ve ölçüt sürenin geçmesi sonrasında ödül beklentisindeki azalma sebebiyle tekrar düşük tepki oranına geçildiği (bitiş noktası, S_2) görülmektedir. Bireysel doruk denemelerinde gözlemlenen 'düşük-yüksek-düşük' tepki örüntüsünün analizi için sık kullanılan algoritmalarından biri Church ve arkadaşları (1994) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$A = t_1(r - r_1) + t_2(r_2 - r) + t_3(r - r_3) \quad (7)$$

Bu denklemde t_1 , t_2 ve t_3 sırasıyla deneme başından S_1 'e kadar geçen süre, S_1 ve S_2 arasındaki aralık ve son olarak S_2 'den deneme sonuna kadar geçen süreyi işaret ederken, r_1 , r_2 ve r_3 ise bu zamansal aralıklarda gözlemlenen ortalama tepki oranları olarak tanımlanmaktadır. Bir diğer değişken olan r ise ilgili denemenin bütününde üretilen ortalama tepki oranına denk gelmektedir. Bu değişkenler kullanılarak Denklem 7'de sunulan fonksiyonu (A) maksimize eden t_1 , t_2 ve t_3 değerleri bulunur ve böylece her deneme için S_1 ve S_2 belirlenir.

Doruk denemelerinde görülen tepki örüntüsünün iki farklı davranışsal durumdaki oluşup oluşmadığını değerlendirmek için, belirlenen başlangıç ve bitiş noktalarının sırasıyla öncesi ve sonrasına göre denemeler sıralandırılır ve bu geçiş noktalarına göre tepki oranları hesaplanır. Bu analiz ile S_1 öncesi tepkilerin oldukça seyrek olması, S_1 sonrası ise yüksek bir tepki oranı beklenir. S_2 öncesinde ise S_1 sonrasında görüldüğü gibi bir örüntü beklenir iken, S_2 sonrasında tepkilerde yine azalma beklenir. Bu farklı davranışsal fazlarda elde edilen tepki eğrilerinin, ortalama tepki eğrilerinde görülen önce yükselen, sonra azalan örüntüye kıyasla daha keskin iniş-çıkışlara sahip olması beklenir.

Tepki oranlarında deneme bazında görülen 'düşük-yüksek-düşük' davranış örgüsünün karakterize edilmesine bağlı olarak başlangıç ve bitiş noktaları dışında yüksek tepki oranının görüldüğü zaman aralığının orta noktası, $m = (S_2 - S_1)/2$, ve bu aralığın genişliği, $d = S_2 - S_1$, hesaplanır. Bu değişkenlerin aralarındaki ilişkiye bakarak zamansal tahminlerde görülen varyasyonun olası kaynakları hakkında yorum yapmak mümkündür (Gibbon ve Church, 1990). Örneğin, karar eşliğinde görülen varyasyon (Şekil 10'daki düz yatay çizginin farklı denemelerde değişik değerlere sahip olması), başlangıç



Şekil 10. Doruk-Aralık Yönteminde Bir Denemede Sayıl Zamanlama Modeli'ne Bağlı Olarak Gözlenmesi Beklenen Dinamikler

Not. Normal dağılıma sahip olan referans bellek temsili (s^*) ile akümülatördeki değer arasındaki fark geçen zaman ile azalacak ve buna bağlı olarak öznel çelişki de azalma görülecektir. Farkın yine normal dağılımdan gelen karar eşiği değişkeninden (b) küçük olması durumunda denekler yüksek oranda yanıt vermeye başlayacaklardır (Gibbon ve Church'ten (1990) uyarlanmıştır).

ve bitiş noktalarında ters yönde değişime yol açacaktır. b 'nin daha düşük bir değere sahip olması, başlangıç noktasını daha erkene alacak iken bitiş noktasının daha geç sonlanmasına sebep olacaktır. Buna bağlı olarak, d parametresinde de (Şekil 10) bir artış beklenir. Eşik değişkeninin daha yüksek bir değer alması ise deneklerin yüksek frekansla tepki vermeye başlamalarını geciktirmesine rağmen, tepki sonlanması daha erken olacaktır. Zamansal olarak daha kısa sürecek olan bu yanıt örüntüsü de genişlik parametresinde bir azalmayla sonuçlanacaktır. Fakat tahmin edileceği üzere, sadece karar eşiği değişkeninde meydana gelen değişiklikler, başlangıç ve bitiş noktaları üzerindeki etkisi eşit olduğu için m değişkeninde (Şekil 10) bir farklılığa yol açmayacaktır.

Bir diğer varyasyon kaynağı olan bellek mekanizmasında eşik değişkeni sabit tutulduğunda gözlemlenen değişiklikler (Şekil 10'da s^* 'nin zaman ekseninde sağa veya sola kayarak farklı değerlere sahip olması) ile davranış parametreleri arasındaki korelasyon örüntüleri değişmektedir. Hedef süreye ait bellek tahminindeki artış, tepki başlangıcında ve bitişinde gecikmeye sebep olur. Bu pozitif korelasyona bağlı olarak, genişlik ve orta nokta parametrelerinde de artış gözlemlenir. Hedef süreye ilişkin bellek temsilindeki azalma ise tam zıttı örüntüye sahip olarak, ilgili bütün değişkenlerin daha düşük değerler alması ile sonuçlanacaktır.

Bellek ve karar mekanizmalarından kaynaklanan varyasyonun zamanlama davranışını farklı derecelerde etkilemesi, bireysel denemelerde hangi mekanizmanın

daha baskın olduğu sorusunu akla getiriyor (Gibbon ve Church, 1990). İlk bakışta, her davranış parametresinde değişime yol açacak olması nedeniyle bellek süreçlerinin davranış üzerindeki kontrolünün daha fazla olacağı tahmin edilebilir. Fakat, doruk-aralık yöntemi de dahil olmak üzere birçok aralık zamanlama paradigmasında değişen deneysel gereksinimlere ve farklı varyasyon kaynaklarına bağlı olarak zamansal kararların değişik derecelerde etkileneceğini göz önünde bulundurmak gerekir.

Sürenin Yeniden Üretimi (Temporal Reproduction)

Sürenin yeniden üretimi yönteminde katılımcılara ilk önce, hedeflenen belirli zaman aralıkları görsel veya işitsel uyarılar aracılığıyla her deneme ya da her deneysel blok başında sunulur. Sonrasında aynı uyarı tekrar sunulur ve katılımcılardan hedef sürenin geçtiğini düşündüklerinde belirli bir motor tepki vermeleri (örn., bir tuşa basma) beklenir. Hedef süreye ait yapılan tahmin böylece, uyarı başlangıcı ve tuşa basılma anı arasında geçen zamandır.

Bu yöntemde de elde edilen veriler de, zamansal tahminlerin doğruluk ve kesinlik boyutlarının incelenmesinde kullanılmaktadır. Doğruluk endeksi olarak katılımcıların denemeler arası ortalamada üretim süresinin hedef süreye olan oranı kullanılır. Bu hesaplama sonucu elde edilen değer 1'in üzerinde ise bireylerin standart süreyi olduğundan daha uzunmuş gibi algılaması sonucu yapılan üretimlerin ortalamada hedef süreden daha yüksek bir değere sahip olduğuna işaret eder. Buna karşın,

1'in altındaki değerler ise hedef sürenin daha kısa algılandığına ve yapılan tahminlerin ortalamada standart süreden daha kısa olduğunu gösterir (Baudouin, Vanneste, Pouthas ve Isingrini, 2006). Tahmin edilebileceği üzere, ortalama üretim süresinin hedef süreye olan oranı 1'e ne kadar yakın ise zamansal tahminlerin o kadar doğru olduğunu düşünülebilir. Bu noktada, zamansal tahminlerin hedef süreden sapmasının altında yatan olası mekanizmaların tanımlanması önem taşımaktadır. Makalenin ilk kısmında bahsedilen saat sisteminin hedef sürenin öğrenimi ve üretilmesi aşamalarında devrede olduğu bilinmektedir. İlgili olarak, saat hızının sabit olması sebebiyle iki aşama üzerindeki olası etkileri birbirini sıfırlayacaktır ve zamansal tahminler ortalamada hedef süreye denk gelecektir. Benzer şekilde, zamansal bilginin işlenmesi ve test aşamasında geri getirilmesi sırasında saat mekanizmasının dikkat ve bellek ile ilintili diğer bileşenlerinin işleyişinde değişiklik olmayacağı için zamanlama yetisinde bir farklılık beklenmeyecektir. Buna karşın, uyaran özelliğinde değişimler, farmakolojik müdahaleler veya bilişsel yükün artırılması sebebiyle öğrenme ve üretim aşamalarının farklı biçimlerde etkilenmesi, zamansal tahminlerin doğruluk boyutunda değişimlere yol açacaktır.

Bireylerin zamansal hassasiyetlerinin değerlendirilmesi için ise zamansal tahminlerin değişkenlik katsayısı hesaplanır. Üretimlerin standart sapmasının ortalama üretim süresine oranı, hedef süreye yönelik yapılan tekrarlı zamansal tahminlerin denemeler arası ne derece farklılık gösterdiğini ortaya koyar. Yüksek bir değişkenlik katsayısı değeri verilerde daha fazla varyasyona yani düşük zamansal hassasiyete işaret ederken, düşük bir değişkenlik katsayısı değeri katılımcıların süre tahminlerinde istikrarlı olduklarını gösterir (Gibbon, Malapani, Dale ve Gallistel, 1997).

Hedef sürenin öğrenimi ve üretimi aşamalarında motor tepki kullanımının gerekli kılınması, nesnel zamanın algılanmasını ve tepki zamanlarını etkileyebilmektedir. Örneğin, hedef sürenin deneme başında otomatik olarak sunulduğu ya da bireylerin verdikleri motor tepki sonucunda başladığı durumlarda zamansal tahminlerin farklılık gösterdiği, ikinci durumda üretimlerin hedef süreye oranla daha kısa yapıldığı gözlemlenmiştir (Humphreys ve Buehner, 2010). Benzer şekilde, yapılan üretimin motor tepkiye bağlı olduğu durumlarda katılımcıların doğru tahminlerde bulunabilmelerinin bu motor tepkiye ait süreyi de zamansal kararlarına entegre etmelerini içereceği öne sürülmüştür (Droit-Volet, 2010). Motor yanıtın zamansal tahminleri etkilediği varsayımı sebebiyle, elde edilen tepki zamanlarının motor tepkinin hazırlanması ve başlatılmasına ait süreyi de içerdiğini göz önünde bulundurmak gerekir. Buna bağlı olarak, zamansal kararların nicel özelliklerini araştıran modeller motor tepkinin oluşturacağı gecikmeleri ve algısal

bilginin motor süreçlerle entegrasyonunu da dikkate almaktadır (Shi, Ganzenmüller ve Müller, 2013; Wearden, 2003).

Sürenin yeniden üretiminde ve diğer birçok aralık zamanlama yönteminde, zamana ait oluşturulan öznel temsillerde farklılığa sebep olan bir diğer etken de katılımcılara yaptıkları zamansal tahminler hakkında geribildirim verilmesidir. Geribildirim kullanımının performansı her zaman daha iyi bir düzeye taşıdığı anlamına gelmese de (örn., Rakitin ve ark., 1998), genel kanı zamansal ilişkilerin öğrenim hızında artışa ve performansın maksimize edilmesine katkıda bulunacağı yönündedir (Acerbi, Wolpert ve Vijayakumar, 2012). Benzer şekilde, performansa yönelik yapılan bilgilendirmenin içeriğindeki farklılıklar da katılımcıların diğer denemelerdeki zamansal tahminlerini şekillendirmelerine sebep olabilir. Örneğin, bireylere her deneme sonunda verilen geribildirim performansı doğru bir şekilde yansıttığında, tahminlerin hedef süreye yaklaştığı ancak geribildirim yanlış olduğu durumda, yani yapılan üretimin özellikle daha kısa veya uzun yapıldığı bildirildiğinde, bireylerin sırasıyla daha uzun ve kısa tahminlerde buldukları gözlemlenmiştir (Ryan ve Robey, 2002). Bütün bu bulgular, zamanlama mekanizmasının birçok algısal, bilişsel ve motor süreçle yüksek derecede etkileşim içinde olduğunu vurgulamakta ve geçen zamana ait bilgi işlem süreçlerini açıklamak amaçlı yapılan modelleme çalışmalarının gerektirdiği karmaşıklığı tekrardan ortaya koymaktadır.

Süre Üretimi (Temporal Production)

Bahsi geçen aralık zamanlama yöntemlerinden farklı olarak süre üretimi paradigması (örn., Wearden ve McShane, 1988), katılımcıların dil fonksiyonlarını kullanmasını gerektirmektedir ve bu nedenle sadece insanlarla kullanılabilir. Bu yöntem, sürenin yeniden üretilmesi yöntemiyle çok büyük derecede benzerlik göstermektedir fakat hedef süre aralığı görsel veya işitsel bir uyaran aracılığıyla sunulmadan, sözlü yönergeler aracılığıyla belirtilir. Bireylerin üretim işlemini başlatmak için klavye tuşuna basmaları ve hedeflenen sürenin geçtiğini düşündüklerinde ikinci kez basarak üretimi sonlandırmaları gerekmektedir. Bu yöntemde, üretilmesi istenen süre bir uyaran aracılığıyla sunulmadığı için, tahminler bireylerin geçen fiziksel süreyi kodlama biçimlerine göre değil araştırmacı tarafından belirlenen sözlü kategoriler ile tanımlanan zaman aralıklarına bağlı olarak yapılmaktadır (Balci ve ark., 2009b). Burada önemli olan nokta, bu zamansal birimlerin (milisaniye veya saniye) öznel zamanlama davranışı ile nasıl bir etkileşim içinde olduğu ve aktarım sürecinin ne şekilde gerçekleştiğidir (Wearden, 2003). Yeniden süre üretimi yönteminde olduğu gibi, bu aralık zamanlama yönteminde de, süre üretimlerinin ortalamasının hedeflenen süre

aralığı ile ilişkisine bakarak zamanlama performansını doğruluk yönünden incelemek ve tahminlerin denemeler arası değişimini hesaplayarak ise zamansal kesinlik boyutunu değerlendirmek mümkündür.

Süre Tahmini (Time Estimation)

Dil fonksiyonu gerektirdiği için sadece insanlar ile kullanılabilen bir başka aralık zamanlama yöntemi ise süre tahminidir. Bu yöntem deneysel süreç gereği süre üretimi yönteminin tam tersi olup katılımcılara çeşitli süre aralıkları belirli bir uyarın aracılığıyla sunulur ve sonrasında bireylerden uyarının süresine ait sözlü tahminlerde bulunması istenir. Geçen fiziksel sürenin sözel olarak nicelenmesi sonucunda kısa sürelerle ait (örn., milisaniye) yapılan tahminlerin fazla varyasyon göstermediği ve genellikle tam ve buçuklu sayılar dışında başka değerlerin kullanılmadığı gözlemlenmiştir (Wearden, 2003). Bu yüzden, süre tahmini ve sürenin üretimi yöntemlerinin zamana bağlı gerçekleşen davranışsal süreçler ile sözel temsillerin birbirine dönüşümünü gerektirmesi verilerde açıklanamayan değişkenlerin etki etmesine sebep olabilir (Buhusi ve Meck, 2005). Örneğin, farklı bireyler geçen süreye ait aynı içsel temsili oluştursalar bile sözel tahminlerinde farklılıklar olabilir ve buna bağlı olarak yapılan tahminlerin ortalamada aldığı değerlerde ve denemeler arası performansta farklılıklar gözlemlenebilir (Wearden, 2004). Bu yüzden davranışsal performansın yorumlanması sırasında öznel zamanın sözel yanıtlara ne şekilde aktarıldığının göz önünde bulundurulması gerekir.

Sonuç

Zamansal bilgi işlem ve çevrenin zamansal kısıtlamalarını dikkate almak bilişsel ve davranışsal süreçlerimiz için hayati öneme sahiptir. Bu yazıda da sunduğumuz üzere, aralık zamanlama yetisini ele alan birçok bilişsel ve sinirsel model, etkin zamanlama davranışının barındırdığı karar süreçleri hakkında bizlere bilgi vermektedir. Ancak, içsel saat temelli bu kuramsal yaklaşımlara ait varsayımlar farklı psikofiziksel yöntemler ile çeşitli zamansal bağlamlarda değerlendirilebilse de, zamansal biliş sistemimizin altında yatan sinirsel mekanizmalar halen kesin bir şekilde tanımlanamamıştır. Bu nedenle, aralık zamanlamanın çeşitli nörolojik ve psikiyatrik bozukluklarda ve yaşlılık sürecinde görülen bilişsel yıkımla ilişkilendirilerek araştırılması, aralık zamanlamanın altında yatan nörobiyolojik mekanizmaların daha iyi tanımlanmasına olanak sağlayacaktır. Böyle bir yaklaşım, sinirsel hastalıkların etiyolojisinin ve seyrinin değerlendirilebilmesi ve risk gruplarının erken evrelerde tespit edilebilmesini de sağlayacağı için aralık zamanlamanın sinirsel temelini daha detaylı araştırılması ayrıca önem kazanmaktadır. Zamanlama yetisinin insanlar ve

hayvanlarda benzer psikofiziksel özelliklere sahip olması sayesinde bu temel işlev, bilişsel bozulmanın gözlemlendiği sinirsel hastalıklara sahip hayvan modellerinde rahatlıkla incelenebilmesinin yanı sıra insanlarda uygulanması mümkün olmayan yöntemsel yaklaşımlarla da araştırılabilmektedir.

Kaynaklar

- Acerbi, L., Wolpert, D. ve Vijayakumar, S. (2012). Internal representations of temporal statistics and feedback calibrate motor-sensory interval timing. *PLoS Computational Biology*, 8(11), e1002771.
- Agostino, P. V., do Nascimento, M., Bussi, I. L., Eguía, M. C. ve Golombek, D. A. (2011). Circadian modulation of interval timing in mice. *Brain Research*, 1370, 154-163.
- Allan, L. ve Gibbon, J. (1991). Human bisection at the geometric mean. *Learning and Motivation*, 22(1-2), 39-58.
- Augustine, S. (2001). *Confessions of St. Augustine*. (R. Wagner, Çev.). New York: Signet Classics.
- Balcı, F., Freestone, D. ve Gallistel, C. (2009a). Risk assessment in man and mouse. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(7), 2459-2463.
- Balcı, F., Freestone, D., Simen, P., deSouza, L., Cohen, J. D. ve Holmes, P. (2011a). Optimal temporal risk assessment. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 1-15.
- Balcı, F. ve Gallistel, C. (2006). Cross-domain transfer of quantitative discriminations: Is it all a matter of proportion? *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(4), 636-642.
- Balcı, F., Meck, W. H., Moore, H. ve Brunner, D. (2009b). Timing deficits in aging and neuropathology. J. L. Bizon ve A. G. Woods, (Ed.), *Animal models of human cognitive aging* içinde (161-201). Totowa, NJ: Humana Press.
- Balcı, F. ve Simen, P. (2014). Decision processes in temporal discrimination. *Acta Psychologica*, 149, 157-168.
- Balcı, F., Simen P., Niyogi, R., Saxe, A., Hughes, J., Holmes, P. ve Cohen, J. D. (2011b). Acquisition of decision making criteria: Reward rate ultimately beats accuracy. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(2), 640-657.
- Barnard, G. A. (1946). Sequential tests in industrial statistics. *Journal of the Royal Statistical Society Supplement*, 8, 1-21.
- Barnet, R. C., Cole, R. P. ve Miller, R. R. (1997). Temporal integration in second-order conditioning and sensory preconditioning. *Animal Learning & Behavior*, 25, 221-233.
- Baudouin, A., Vanneste, S., Pouthas, V. ve Isingrini, M. (2006). Age-related changes in duration reproduction: Involvement of working memory processes. *Brain and Cognition*, 62(1), 17-23.
- Bitterman, M. (1964). Classical conditioning in the goldfish as a function of the CS-UCS interval. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 58(3), 359-366.
- Buhusi, C. V., Aziz, D., Winslow, D., Carter, R. E., Swearingen, J. E. ve Buhusi, M. C. (2009). Interval timing accuracy and scalar timing in C57BL/6 mice. *Behavioral Neuroscience*, 123(5), 1102
- Buhusi, C. V. ve Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(10), 755-765.
- Bussi, I. L., Levín, G., Golombek, D. A. ve Agostino, P. V. (2014). Involvement of dopamine signaling in the circadian modulation of interval timing. *European Journal of Neuroscience*, 40(1), 2299-2310.

- Catania, A. C. (1970). Reinforcement schedules and psychophysical judgments: A study of some temporal properties of behavior. W. N. Schoenfeld, (Ed.), *The theory of reinforcement schedules* içinde (1-42). New York, NY: Appleton-Century-Crofts.
- Cheng, K. ve Westwood, R. (1993). Analysis of single trials in pigeons' timing performance. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 19(1), 56-67.
- Church, R. ve Broadbent, H. A. (1991). A connectionist model of timing. M. I. Commons, S. Grossberg ve J. E. R. Staddon, (Ed.), *Neural network models of conditioning and action* içinde (255-240). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Church, R. ve Deluty, M. (1977). Bisection of temporal intervals. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 3(3), 216-228.
- Church, R. ve Gibbon, J. (1982). Temporal generalization. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 8(2), 165-186.
- Church, R., Meck, W. H. ve Gibbon, J. (1994). Application of scalar timing theory to individual trials. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 20(2), 135-155.
- Cicchini, G., Arrighi, R., Cecchetti, L., Giusti, M. ve Burr, D. (2012). Optimal encoding of interval timing in expert percussionists. *Journal of Neuroscience*, 32(3), 1056-1060.
- Cordes, S. ve Gallistel, C. (2008). Intact interval timing in circadian CLOCK mutants. *Brain Research*, 1227, 120-127.
- Droit-Volet, S. (2010). Stop using time reproduction tasks in a comparative perspective without further analyses of the role of the motor response: The example of children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(1), 130-148.
- Droit-Volet, S. ve Wearden, J. (2002). Speeding up an internal clock in children? Effects of visual flicker on subjective duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section B*, 55(3), 193-211.
- Einstein, A. (1905). *On the electrodynamics of moving bodies*. G. B. Jeffrey ve W. Perrett, (Çev.). London: Methuen. (1923).
- Gallistel, C. R., King, A. P., Gottlieb, D., Balci, F., Papachristos, E. B., Szalecki, M. ve Carbone, K. S. (2007). Is matching innate? *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 87(2), 161-199.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84(3), 279-325.
- Gibbon, J. ve Church, R. (1990). Representation of time. *Cognition*, 37(1-2), 23-54.
- Gibbon, J., Church, R. M. ve Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. J. Gibbon ve L. Allan, (Ed.), *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423: *Timing and time perception* içinde (52-77). New York: New York Academy of Sciences.
- Gibbon, J., Malapani, C., Dale, C. L. ve Gallistel, C. R. (1997). Toward a neurobiology of temporal cognition: Advances and challenges. *Current Opinion in Neurobiology*, 7(2), 170-184.
- Golombek, D. ve Rosenstein, R. (2010). Physiology of circadian entrainment. *Physiological Reviews*, 90(3), 1063-1102.
- Grossberg, S. ve Schmajuk, N. (1989). Neural dynamics of adaptive timing and temporal discrimination during associative learning. *Neural Networks*, 2(2), 79-102.
- Humphreys, G. ve Buehner, M. (2010). Temporal binding of action and effect in interval reproduction. *Experimental Brain Research*, 203(2), 465-470.
- Jørgensen, B. (1997). *The theory of dispersion models*. London: Chapman & Hall.
- Karmarkar, U. ve Buonomano, D. (2007). Timing in the absence of clocks: Encoding time in neural network states. *Neuron*, 53(3), 427-438.
- Killeen, P. ve Fetterman, J. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological Review*, 95(2), 274-295.
- Klapproth, F. (2008). Time and decision making in humans. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 8(4), 509-524.
- Klapproth, F. ve Müller, M. (2008). Temporal generalization under time pressure in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(4), 588-600.
- Klapproth, F. ve Wearden, J. H. (2011). Why do temporal generalization gradients change when people make decisions as quickly as possible? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(8), 1646-1664.
- Lewis, P., Miall, R., Daan, S. ve Kacelnik, A. (2003). Interval timing in mice does not rely upon the circadian pacemaker. *Neuroscience Letters*, 348(3), 131-134.
- Machado, A. (1997). Learning the temporal dynamics of behavior. *Psychological Review*, 104(2), 241-265.
- Malapani, C. ve Fairhurst, S. (2002). Scalar timing in animals and humans. *Learning and Motivation*, 33, 156-176.
- Matell, M. ve Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *Bioessays*, 22(1), 94-103.
- Matell, M. ve Meck, W. H. (2004). Cortico-striatal circuits and interval timing: Coincidence detection of oscillatory processes. *Cognitive Brain Research*, 21(2), 139-170.
- Matzel, L. D., Held, F. P. ve Miller, R. R. (1988). Information and the expression of simultaneous and backward associations: Implications for contiguity theory. *Learning & Motivation*, 18, 319-342.
- McKoon, G. ve Ratcliff, R. (2012). Aging and IQ effects on associative recognition and priming in item recognition. *Journal of Memory and Language*, 66(3), 416-437.
- Meck, W. H. (1983). Selective adjustment of the speed of internal clock and memory processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9(2), 171-201.
- Miller, R. R. ve Barnet, R. B. (1993). The role of time in elementary associations. *Current Directions in Psychological Science*, 2, 106-111.
- Montemayor, C. ve Balci, F. (2007). Compositionality in language and arithmetic. *Journal of Theoretical and Philosophical Psychology*, 27(1), 53-72.
- Rakitin, B., Gibbon, J., Penney, T. B., Malapani, C., Hinton, S. ve Meck, W. H. (1998). Scalar expectancy theory and peak-interval timing in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 24(1), 15-33.
- Raslear, T. (1985). Perceptual bias and response bias in temporal bisection. *Perception & Psychophysics*, 38(3), 261-268.
- Ratcliff, R. (1978). A theory of memory retrieval. *Psychological Review*, 85(2), 59-108.
- Ratcliff, R., Gomez, P. ve McKoon, G. (2004). A diffusion model account of the lexical decision task. *Psychological Review*, 111(1), 159-182.
- Ratcliff, R. ve McKoon, G. (2008). The diffusion decision model: Theory and data for two-choice decision tasks. *Neural Computation*, 20, 873-922.
- Ratcliff, R. ve Rouder, J. (1998). Modeling response times for two-choice decisions. *Psychological Science*, 9, 347-356.
- Roberts, S. (1981). Isolation of an internal clock. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*,

- 7(3), 242-268.
- Rusak, B. ve Zucker, I. (1979). Neural regulation of circadian rhythms. *Physiological Reviews*, 59(3), 449-526.
- Ryan, L. ve Robey, T. (2002). Learning and performance effects of accurate and erroneous knowledge of results on time perception. *Acta Psychologica*, 111(1), 83-100.
- Schirmer, A. (2004). Timing speech: A review of lesion and neuroimaging findings. *Cognitive Brain Research*, 21(2), 269-287.
- Shi, Z., Ganzenmüller, S. ve Müller, H. (2013). Reducing bias in auditory duration reproduction by integrating the reproduced signal. *PLoS ONE*, 8(4), e62065.
- Simen, P., Balci, F., deSouza, L., Cohen, J. D. ve Holmes, P. (2011). A model of interval timing by neural integration. *Journal of Neuroscience*, 31(25), 9238-9253.
- Simen, P., Rivest, F., Ludvig, E.A., Balci, F. ve Killeen, P. (2013). Timescale invariance in the pacemaker-accumulator family of timing models. *Timing & Time Perception*, 30, 159-188.
- Staddon, J. ve Higa, J. (1999). Time and memory: towards a pacemaker-free theory of interval timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71(2), 215-251.
- Stone, M. (1960). Models for choice-reaction time. *Psychometrika*, 25, 251-260.
- Sundarapandian, V. (2009). *Probability, statistics and queuing theory*. New Delhi: PHI Learning.
- Wald, A. (1947). *Sequential analysis*. New York: Wiley.
- Wald, A. ve Wolfowitz, J. (1948). Optimum character of the sequential probability ratio test. *The Annals of Mathematical Statistics*, 19(3), 326-339.
- Wearden, J. H. (1991). Do humans possess an internal clock with scalar timing properties? *Learning and Motivation*, 22(1-2), 59-83.
- Wearden, J. H. (1992). Temporal generalization in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 18(2), 134-144.
- Wearden, J. H. (2003). Applying the scalar timing model to human time psychology: Progress and challenges. H. Helfrich, (Ed.), *Time and mind II: Information-processing perspectives* içinde (21-39). Göttingen: Hogrefe & Huber.
- Wearden, J. H. (2004). Decision processes in models of timing. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 303-317.
- Wearden, J. H. ve Ferrara, A. (1995). Stimulus spacing effects in temporal bisection by humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48B, 289-310.
- Wearden, J. H. ve Ferrara, A. (1996). Stimulus range effects in temporal bisection by humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49B, 24-44.
- Wearden, J. H. ve McShane, B. (1988). Interval production as an analogue of the peak procedure: Evidence for similarity of human and animal timing processes. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 40B, 363-375.
- Welsh, D., Logothetis, D., Meister, M. ve Reppert, S. (1995). Individual neurons dissociated from rat suprachiasmatic nucleus express independently phased circadian firing rhythms. *Neuron*, 14(4), 697-706.

Summary

Interval Timing: Theoretical and Experimental Approaches

Başak Akdoğan
Koç University

Fuat Balcı
Koç University

Interval timing is defined as the ability to perceive and remember time intervals in the seconds-to-minutes range and it involves the integration of temporal information into behavior (e.g., Balcı, Meck, Moore, & Brunner, 2009b; Buhusi & Meck, 2005). This function forms an indispensable component of natural life and is fundamental to various cognitive and behavioral processes that are of vital biological significance. These ubiquitous characteristics of interval timing are coupled with similar psychophysical properties across species (Malapani & Fairhurst, 2002). That is, many vertebrates including humans, can time different durations with high levels of accuracy but with limited precision. For instance, when an individual is instructed to reproduce a fixed target duration repeatedly, temporal judgments will form a distribution centered around the criterion duration and the mean reproduction will be very close to the target duration. Moreover, the mean and the standard deviation of this, roughly Gaussian, distribution will be proportional to the target duration within an individual, which results in the coefficient of variation (CV) to stay constant across different intervals (Gibbon, 1977). This constant ratio leads to the superimposition of response functions when plotted on a relative time scale, referred to as time-scale invariance (Buhusi et al., 2009).

Theories of Interval Timing

Scalar Timing Model

One prominent model of interval timing that has steered much of the discussion on the psychophysics of timing is the Scalar Timing Model (STM; Gibbon, Church, & Meck, 1984). This theoretical approach assumes that interval timing function relies on an internal clock mechanism that consists of a pacemaker, a switch, an accumulator, reference memory, and a comparator. The pacemaker generates pulses according to a Poisson process, and upon stimulus presentation the switch closes which leads to the transmission of these pulses to

the accumulator until stimulus offset. At the end of the trial, the number of pulses integrated in the accumulator is transferred to the reference memory. During this transfer, the accumulated signals or clock readings are multiplied by a Gaussian distributed memory random variable (with mean 1), thus leading to scalar variability in the memory representations of the target duration. When the duration is experienced on latter trials, the current value in the accumulator is continuously compared to a randomly sampled memory representation until this difference reaches a threshold, which in turn produces overt behavior.

Behavioral Theory of Timing

An alternative theory to STM is the Behavioral Theory of Timing (BeT; Killeen & Fetterman, 1988), which assumes different successive behavioral states of animals. This model further assumes exponentially distributed transition times between these behavioral states, which in effect constitutes a Poisson pacemaker. The transition times are assumed to be inversely proportional (thus the pacemaker rate proportional) to the reinforcement rate. When the Poisson process parameter is adapted for different time intervals and the decision threshold is kept constant, the threshold crossing times again exhibit scale invariance. However, different from the STM, the timed responses will form a Gamma distribution instead of a Gaussian distribution.

Drift-Diffusion Model of Interval Timing

Diffusion models are essentially random walk models that have been applied to explain choices and associated reaction times obtained in two-choice decision-making in the context of multiple domains (Balcı et al., 2011b; McKoon & Ratcliff, 2012; Ratcliff, 1978; Ratcliff, Gomez, & McKoon, 2004). In the drift-diffusion model (DDM), the difference between evidence supporting two hypotheses is noisily (due to noise embedded in sensory evidence) integrated over time until

it crosses one of the two decision thresholds. Upon a threshold crossing, the corresponding decision is made, and the threshold crossing time determines the decision time.

Recently, the DDM has been adapted to explain interval timing behavior (Time-adaptive, opponent Poisson Drift-Diffusion Model; Simen et al., 2011; Simen, Rivest, Ludvig, Balci, & Killeen, 2013). This model accommodates various key properties of timed behavior by providing a neurally plausible basis for interval timing. It shows that the diffusion process originating from the integration of excitatory and proportional inhibitory Poisson inputs leads to timescale invariance. In this model, different criterion durations can be timed by the modulation of the drift rate to reach at a fixed threshold at the target time interval. It is further argued that the resultant response time functions would follow an inverse Gaussian distribution.

Interval Timing Protocols

Temporal Bisection

In this procedure, participants are trained to differentially respond to a short (e.g., 2 s) or a long (e.g., 8 s) reference duration. When the discrimination accuracy for each of these referents reaches a predetermined level (e.g., 80%), participants are tested also with intermediate durations. Their task is to categorize all stimulus durations as short or long based on their subjective similarity to previously learned reference durations. In order to capture the perceptual aspects of temporal processing, only the correct categorizations of the reference durations are reinforced.

Temporal bisection performance can be evaluated by forming the psychophysical function which illustrates the proportion of *long* responses as a function of stimulus durations. The analysis of the psychophysical curve yields various measures to make inferences about key elements of temporal judgments. For instance, the stimulus duration that is classified as long in 50% of trials indexes the point of subjective equality (PSE), whereas the slope of the psychophysical function reflects temporal sensitivity.

Previous work suggests that the PSE is sensitive to a number of experimental manipulations including stimulus spacing (Wearden & Ferrara, 1995) and the ratio between short and long reference durations (Allan & Gibbon, 1991; Wearden & Ferrara, 1996). It has been also found to differ in studies conducted with different species (Balci & Gallistel, 2006; Church & Deluty 1977; Wearden, 1991). Therefore, the conceptualization of decision processes in the temporal bisection task requires the consideration of such methodological factors. Furthermore, the analysis of response times associated with

short and *long* choices is also of high importance as it enables researchers to elucidate the latent processing dynamics that underlay the temporal bisection performance (e.g., Balci & Simen, 2014).

Temporal Generalization Task

In temporal generalization, participants are initially presented with a standard duration, and then are asked to compare different stimulus durations with this criterion duration. The stimulus durations can be equal to, shorter or longer than the standard. After the presentation of a stimulus duration, participants make *same* or *different* judgments. The proportion of *same* responses is plotted as a function of stimulus durations to obtain temporal generalization gradients. Typically, these gradients peak at the standard duration and show a slight rightward asymmetry (e.g., Wearden, 1992).

Decision rules underlying *same* or *different* choices have been argued to rely on the discrepancy between the timed stimulus and memory representation of the standard duration, normalized by either the memory representation in animals (Church & Gibbon, 1982) or the experienced duration in humans (Wearden, 1992). Although these attempts to formalize the decision processes can account for the variation observed in temporal judgments of different species and are consistent with scalar timing, they do not examine the time course of temporal judgments. Thus, recent work also incorporates the response times associated with sameness judgments to better characterize the decision rules that participants employ in this typical time discrimination task (Klapproth, 2008; Klapproth & Müller, 2008; Klapproth & Wearden, 2011).

Peak-Interval Procedure

In the peak-interval procedure, subjects are initially exposed to fixed-interval (FI) trials in which the first response after a fixed duration has elapsed since the presentation of a cue stimulus is reinforced. When the temporal criterion is established with FI trials, subjects are tested in the probe (peak) trials. In a typical “peak” trial, the cue stimulus is turned on, but responses do not produce any reinforcement and the trial lasts longer than the reinforced trials (e.g., 3 times FI). The resultant response distributions when averaged across many probe trials are well-represented by a Gaussian distribution function but with a slight rightward skew. On the other hand, individual trials are better characterized by a break-run-break response pattern in which animals start responding with a low rate and then abruptly switch to a phase of high rates of responding and later return to a low rate of responding (Cheng & Westwood, 1993; Church, Meck, & Gibbon, 1984; Gibbon & Church, 1990). The analysis of single trial responding enables researchers to obtain

four important statistics about the break-run-break pattern: start time of the high state (S_1), stop time of the high state (S_2), the spread ($S_2 - S_1$), and the middle point ($(S_2 - S_1) / 2$). The correlational analysis of these parameters provides information about the contribution of different sources (i.e., memory and threshold variance) to the variability in the timed responses.

Other Interval Timing Tasks

Other commonly used psychophysical tasks include: a) *temporal reproduction*, where participants are first presented with a standard duration in the form of an auditory tone or visual stimulus, and then prompted to reproduce the duration as accurately as possible via a motor response (e.g., keypress), b) *temporal production*, where the target duration is specified in temporal units by the experimenter and participants are asked to produce that interval by a specific response, and c) *time estimation*, in which participants' task is to verbally estimate the length of a target duration that was either demarcated by two auditory tones or presented via a visual stimulus (e.g., square).

As in other interval timing paradigms, the data obtained from these tasks can be evaluated with respect to the accuracy and precision of temporal judgments. The ratio between mean temporal estimates and target duration can provide an accuracy index. The closer the obtained values are to 1, the more accurate are the temporal judgments (Baudouin, Vanneste, Pouthas, & Isingrini, 2006). For the assessment of temporal sensitivity, coefficient of variation (CV) can be calculated by taking the ratio between the standard deviation and mean of time estimations. Lower CVs indicate more precise estimates, whereas higher CV values mark more variability in repeated temporal judgments (Gibbon, Malapani, Dale, & Gallistel, 1997).

It is important to interpret these measures with

caution as both the formation of temporal representations and timing performance can differ both within and across tasks due to a number of factors that include the involvement of linguistic processes (Buhusi & Meck, 2005; Wearden, 2003, 2004), execution of a motor response (Droit-Volet, 2010; Shi, Ganzenmüller, & Müller, 2013; Wearden, 2003), or the presentation of performance feedback (Acerbi, Wolpert, & Vijayakumar, 2012; Ryan & Robey, 2002). Therefore, it is essential to acknowledge the close interaction between timing performance and various cognitive, perceptual, and motor factors while assessing interval timing ability and designing experimental protocols.

Conclusion

Temporal information processing and the assessment of temporal contingencies in the environment are crucial for our cognitive and behavioral functions. Most cognitive and neural models investigating interval timing ability provide information about the decision processes that comprise intact timing behavior. However, even though these clock-based approaches can be evaluated with the use of different psychophysical procedures in various temporal contexts, neural mechanisms underlying temporal cognition still are not well-defined. Therefore, the investigation of interval timing in relation to cognitive decline observed in various neurological and psychiatric disorders and aging would further our understanding of the underlying neurobiological mechanisms. Since this approach would also enable the evaluation of neural dysfunction as well as the early determination of risk groups, further investigation of the neural underpinnings of interval timing gains more significance. Finally, as timing ability is exhibited with similar psychophysical characteristics across humans and animals, this fundamental function also has high translational value.