

STOKASTİK TALEPLİ VE ÇOK PERİYOTLU EVDE SAĞLIK HİZMETLERİNİN PLANLANMASI PROBLEMİ

Tuğba SARAÇ *^{ID}
İlknur TÜKENMEZ **^{ID}
Büşra TUTUMLU ***^{ID}

Alınma: 08.09.2023; düzeltme: 11.12.2023; kabul: 31.01.2024

Öz: Evde Sağlık Hizmetleri (ESH), yaşlanan nüfus ve kronik hastalıkların yükselmesiyle birlikte giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ancak, bu hizmetlerin etkin ve verimli bir şekilde planlanması ve yönetilmesi, stokastik hasta talepleri, değişken yol koşulları ve kaynakların kapasitesi gibi birçok kısıtla karşı karşıyadır. Özellikle, hasta taleplerinin stokastik doğası, planlamada önemli bir belirsizlik faktörü oluşturmakta ve planların çoğu zaman yeniden düzenlenmesini gerektirmektedir. Ayrıca, ESH'nin çok periyotlu bir yapısı vardır, yani her hasta için farklı zaman dilimlerinde farklı türden hizmetler gerekebilmektedir. Bu çalışmanın ana amacı, stokastik hasta talepleri ve çok periyotlu planlama ihtiyaçlarını dikkate alarak, ESH hizmetlerinin sunumunu daha etkin ve verimli bir şekilde yapabilecek bir matematiksel model önermektir. Önerilen model, kaynakların daha etkin bir şekilde ayrılmasına, servis kalitesinin artırılmasına ve acil durumlara daha etkin bir şekilde başa çıkılmasına da katkı sağlayacaktır. Bu, hem hastalara daha iyi hizmet sunumu hem de sağlık sistemi için daha düşük maliyetler anlamına gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Evde sağlık hizmetleri, Araç rotalama problemi, Stokastik talep, Stokastik programlama

The Multi-Period Home Health Care Planning Problem with Stochastic Demand

Abstract: Home Health Services (HHS) are gaining increasing importance with the aging population and the rise in chronic illnesses. However, the effective and efficient planning and management of these services face numerous constraints, such as stochastic patient demands, variable road conditions, and resource capacities. In particular, the stochastic nature of patient demands creates a significant uncertainty factor in planning, often requiring the reorganization of plans. Furthermore, HHS has a multi-periodic structure; that is, different types of services may be needed for each patient at different time slots. The main aim of this study is to propose a mathematical model that takes into account stochastic patient demands and multi-periodic planning needs to make the provision of HHS more effective and efficient. The proposed model will contribute to the more effective allocation of resources, the improvement of service quality, and better handling of emergency situations. This translates to both better service provision for patients and lower costs for the healthcare system.

Keywords: Home care services, Vehicle routing problem, Stochastic demand, Stochastic programming

* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

** Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Trabzon

*** Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kütahya

İletişim Yazarı: Tuğba SARAÇ (tsarac@ogu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Evde sağlık hizmetleri (ESH), yaşlılar, hastalar veya engelli bireylerin evlerinde ihtiyaç duydukları sağlık, bakım ve destek hizmetlerini içermektedir. Bu hizmetler, bu bireylerin yaşam kalitelerini artırmayı ve kendi evlerinde bağımsız bir şekilde yaşamalarını sağlamalarını amaçlamaktadır. Son dönemlerde ESH, sağlık hizmetlerinin sunumu açısından giderek daha önemli bir role sahip olmaktadır. Bunun nedeni, birçok kişinin hastane veya bakım evi ortamında değil, kendi evlerinde bakım hizmetleri almayı tercih etmesidir.

Evde verilen sağlık hizmetlerinden bazıları (insülin enjeksiyonu vb.) hizmetin zamanı konusunda hassasiyet gerektirir, bu tip hizmetlerde, herhangi bir gecikme hem hasta hem de bakım sağlayan kişiler için ciddi sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle bu hizmetler mutlaka belirli bir zaman aralığı içinde gerçekleştirilmelidir. Ayrıca bu hizmetlerin pek çoğu için periyodik tekrarlar da gereklidir. Bu nedenle problemi çok periyotlu olarak ele almak önemlidir.

Ele alınan problemin önemine paralel olarak, ESH'ye dair literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların birçoğu, problemi deterministik olarak ele almaktadır. Ancak, ESH'nin doğası gereği, hasta sağlık durumları, bakım ihtiyaçları, yaşam tarzları, bakım verenlerin planlama ve organizasyon becerileri, acil durumlar gibi birçok stokastik faktör bulunmaktadır. Bu nedenle, ESH'nin etkili ve verimli bir şekilde planlanması ve yönetilmesi için, bu stokastik faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle ESH'de birçok belirsizlikle karşılaşmaktadır. Örneğin, hastaların önceden talep ettikleri sağlık hizmetlerinin gün ve saatlerinde son anda değişiklik talep etmeleri mümkündür. Talepteki değişkenlik, ESH'lerini planlarken göz önünde bulundurulması gereken en önemli stokastik faktörlerden birisidir.

Stokastik faktörlerin öngörülmesi ve analizi, hizmetin etkin bir şekilde sağlanabilmesi için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, evde bakım hizmetleri sunan sağlık kuruluşlarının, stokastik faktörleri dikkate alarak planlama, yönetim ve hizmet sunumlarını optimize etmeleri, ESH'nin daha etkili ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine ve bakıma ihtiyaç duyan bireylerin yaşam kalitesinin artırılmasına katkıda bulunacaktır. Bu nedenle, ESH'ni planlarken hasta taleplerindeki değişkenliği dikkate almak önemlidir.

Bu çerçevede, bu çalışma, hizmetin bir zaman penceresi içinde gerçekleştirilmesi, stokastik taleplerin varlığı ve çok periyotlu planlama gibi unsurları içeren bir ESH planlama modeli önermektedir. Bu model, ESH'nin planlanması aşamasında problemin stokastik doğasına uyumlu bir şekilde hasta taleplerindeki belirsizliğin dikkate alınmasını mümkün kılmaktadır. Modelin uygulamaları ve sonuçları, evde sağlık hizmetlerinin sunulmasındaki etkinliği ve verimliliği artırma potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışma, literatürde bu konuda var olan boşluğu doldurmayı ve ESH'nin daha etkili ve verimli bir şekilde sunulabilmesi için yeni bir bakış açısı sunmayı hedeflemektedir. Stokastik talepli ve çok periyotlu evde sağlık hizmetlerinin planlanması, günümüzdeki sağlık hizmeti yönetimi için kritik bir zorunluluktur. Önerilen matematiksel model sayesinde, sağlık hizmeti sağlayıcılarına, politika yapıcılara ve karar alıcılara yol gösterecek pratik çözümler sunulması amaçlanmaktadır. Ayrıca bu çalışma, sağlık hizmetlerinin kalitesini, erişilebilirliğini ve etkinliğini artırarak toplum sağlığına büyük katkı sağlama potansiyeline de sahiptir.

Bu çalışmanın izleyen bölümünde yapılan literatür taraması, üçüncü bölümünde ele alınan problem ve geliştirilen matematiksel model, dördüncü bölümünde deneysel sonuçlar verilmiş, son bölümünde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Evde sağlık hizmetleri (ESH), yaşlı, hasta veya engelli bireylere evlerinde verilen sağlık, bakım ve destek hizmetlerini kapsamaktadır. Bu hizmetler, bakıma ihtiyaç duyan bireylerin yaşam kalitelerini artırmak ve kendi evlerinde bağımsız bir şekilde yaşamalarını sağlamak için tasarlanmıştır. Son yıllarda, ESH giderek daha popüler bir hale gelmiştir çünkü birçok kişi hastanede veya bakım evinde kalmak yerine ihtiyaç duydukları bakım hizmetlerini kendi

evlerinde almayı tercih etmektedir. Konunun önemi ile paralel bir şekilde literatürde ESH ile ilgili yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların önemli bir kısmında problem deterministik olarak ele alınmıştır. Ancak ESH, doğası gereği hastanın sağlık durumu, bakım ihtiyaçları, yaşam tarzı, bakım verenlerin planlama ve organizasyon becerileri, acil durumlar gibi birçok stokastik faktör içermektedir. Bu nedenle, ESH'nin planlanması ve yönetiminde, stokastik faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörlerin öngörülmesi ve analizi, evde bakım hizmetlerinin verimli ve etkili bir şekilde sunulabilmesine imkan sağlayacaktır. Ayrıca, evde bakım hizmetleri sunan sağlık kuruluşlarının, stokastik faktörleri dikkate alarak planlama, yönetim ve hizmet sunumlarını optimize etmeleri, ESH'nin daha etkili ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine ve bakıma ihtiyaç duyan bireylerin yaşam kalitesinin artırılmasına katkıda bulunacaktır. ESH alanındaki çalışmalarla ilgili daha ayrıntılı bilgilere Grieco ve diğ. (2021), Euchi ve diğ. (2022) ve Mascolo ve diğ. (2021) yakın tarihli yayın taramalarından erişilebilir.

ESH sağlayıcıları, çeşitli belirsizliklerle başa çıkmak zorundadırlar. Örneğin, seyahat süreleri hava koşullarına, yoğun saatlere ve büyük şehirlerdeki koşullara bağlı olarak farklılık gösterebilir. Benzer şekilde, servis süreleri ve talepler de çeşitlilik arz edebilir. Bu nedenle, son yıllarda bu alanla ilgili stokastik çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. ESH problemini stokastik ele alan çalışmalardan erişilebilenler Tablo 1'de verilmiştir.

Bazirha ve diğ. (2023), ESH'nde rotalama ve çizelgeleme problemi için, hizmet senkronizasyonunun yanı sıra seyahat ve bakım süreleri açısından belirsizliklerin dikkate alındığı bir stokastik programlama modeli önermişlerdir. Amaç, seyahat maliyetini ve beklenen gecikme maliyetlerini en aza indirmektir. Gecikme maliyetleri, hizmet sağlayıcıların fazla çalışma süreleri için ödenen ücret olarak tanımlanabilir. Önerilen deterministik model, Cplex, genetik algoritma (GA) ve genel değişken komşu arama (GVNS) tabanlı algoritmalar ile çözülmüştür. Stokastik modelin çözümü için ise, melez bir GA önerilmiştir. Nikzad ve diğ. (2023), hizmet süresi, semptomlarına göre hasta sınıfları ve ziyaret sayısı belirsizliklerinin dikkate alındığı evde sağlık hizmeti problemini ele almıştır. İki aşamalı bir stokastik programlama modeli önermişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında personel sayısına karar verilirken ikinci aşamasında rotalar belirlenmektedir. Modeli daha verimli bir şekilde çözebilmek için iki aşamadan oluşan bir matsezişsel algoritma geliştirilmiştir. Tsang ve Shehadeh (2023), belirli bölgelerdeki bir dizi hasta arasındaki hareketliliği dikkate alan rotaya karar vermeyi ve her hastaya uygun randevu saati belirlemeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, her hastanın hizmet süresi ve hastalar arasındaki seyahat süreleri stokastik ele alınarak bekleme, rölanti, fazla mesai ve seyahat maliyetlerinin ağırlıklı toplamının enküçüklenmesini amaçlayan bir stokastik programlama modeli önerilmiştir. Du ve Zhang (2022) çalışmalarında, Çin'de evde sağlık hizmeti planlaması için yeni bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli sunmuşlardır. Önerilen modelde, stokastik hizmet süreleri ve farklı bölgeler arası koordinasyon dikkate alınmaktadır. Melez tavlama benzetimi algoritması ve Monte Carlo benzetimi kullanılarak, modelin uygulanabilirliği ve etkinliği doğrulanmıştır. Çalışma, bölge ötesi planlamanın kaynak kullanımını optimize ederek maliyetleri düşürebileceğini göstermektedir. Fu ve diğ. (2022) ESH çizelgeleme ve rotalama probleminde seyahat ve servis süresini stokastik olarak ele almışlardır. Hastaları ihtiyaç duydukları bakıma göre 5 gruba ayırmışlardır. Ayrıca sağlık personeli de tecrübesine göre gruplara ayrılmıştır ve servis süresi tecrübeye göre değişmektedir. Stokastik benzetim modelinde, atama kuralı ile melezlenen Genetik algoritma çözüm yöntemi olarak kullanılmıştır. GA, iki farklı atama kuralı ile melezlenerek kıyaslanmıştır. Benzetim kuralıyla melezlenen GA daha iyi sonuç vermiştir.

Tablo 1. ESH problemini stokastik ele alan çalışmalar

<i>alışma</i>	<i>P</i>	<i>Filo</i>	<i>SP</i>	<i>Amaç fonksiyonu</i>	<i>özüm yöntemi</i>
Bu alışma	çok	Heterojen	ZS	Hemşirelere ödenecek sabit ve süre bazlı ücretlerin toplamı	MM
Bazırha ve diğ. (2023)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Seyahat ve beklenen gecikme maliyetleri	SP, MGA
Nikzad ve diğ. (2023)	ok	Homojen	SS ve ZS	Hemşirelerin işe alma, beklenen ulaşım maliyetleri, hemşire sayısı ve bir hemşireye atanan maksimum hasta sayısı	MA
Tsang ve Shehadeh (2023)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Toplam ağırlıklı maliyet	DRE
Du ve Zhang (2022)	Tek		SS	İşe alım, seyahat, fazla mesai, hizmet, ziyaret edilmeyen hastalar için ceza ve hastaların zaman pencerelerini ihlal etme cezası maliyetleri	MTB
Fu ve diğ. (2022)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Beklenen servis ve seyahat süresi	MGA
Nikzad ve diğ. (2021)	ok	Homojen	Seyahat ve SS	Toplam seyahat maliyeti	MA
Zhan ve diğ. (2021)	Tek	Homojen	SS	Seyahat ve bekleme maliyeti	L-shaped
Carello ve Lanzarone (2021)	ok	Homojen	SS	Atama ve fazla mesai maliyeti	RE
Chen ve diğ. (2021)	Tek	Homojen	Seyahat süresi	Toplam maliyet ve ziyaret tatmini	HA
Liu ve diğ. (2019)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Planlanan zamanda hizmet alamama maliyeti	B&P, KYY
Shi ve diğ. (2019)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Toplam seyahat ve çalışan maliyeti	TB, TA, VNS, Benzetim
Shi ve diğ. (2018)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Seyahat ve geç hizmet maliyeti	MTB, MGA
Yang ve diğ. (2018)	Tek	Homojen	SS	Toplam bekleme süresi	şKP, KKA
Yuan ve diğ. (2018)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Seyahat ve ziyaret edilemeyen hasta maliyeti	
Shi ve diğ. (2017)	Tek	Homojen	Seyahat ve SS	Geç hizmet ve fazla çalışma maliyeti	SP, MGA
Chen ve diğ. (2017)	ok	Homojen	Seyahat ve SS	Toplam ödöl	LG
Yuan ve diğ. (2015)	Tek	Homojen	SS	Toplam ceza	
				Toplam seyahat, sabit, hizmet ve geç hizmet maliyeti	B&P
Cardoso ve diğ. (2015)	ok	Heterojen	ZS	Yatırım ve işletme maliyeti	TDP
Rodriguez ve diğ. (2015)	Tek	Heterojen	ZS	Hemşire sayısı	şKP

P: Periyot, SP: Stokastik Parametre, SS: Servis Süresi, ZS: Ziyaret Sayısı, MM: Matematiksel Model, MA: Matsezgisel Algoritma, SP: Stokastik Programlama, MGA: Melez Genetik Algoritma, DRE: Dağıtımlı Robust Eniyileme, B&P: Dal-Fiyat algoritması, MTB: Melez tavlama benzetimi, RE:Robust Eniyileme HA:Hibrit Algoritma, TB:Tavlama Benzetimi TA:Tabu Arama, DKA:Değişken Komşu Arama, şKP: şans kısıtlı programlama, KKA: Karınca kolonisi algoritması, KYY: Kesikli yaklaşım yöntemi LG:Lagrange Gevşetmesi

Nikzad ve diğ. (2021) çalışmalarında, evde sağlık hizmeti planlaması için iki aşamalı bir stokastik karma tam sayılı model önermişlerdir. Çalışmada, bölgeleme, personel boyutlandırma, kaynak ataması, zamanlama ve yönlendirme gibi kararlar bir araya getirilmektedir. Önerilen model, seyahat ve hizmet sürelerindeki belirsizlikleri dikkate almaktadır. Modelin çözümü için yeni bir matsezigisel algoritma geliştirilmiş ve bu algoritmanın etkinliği sayısal deneylerle gösterilmiştir. Zhan ve diğ. (2021) ESH'ni rotalama ve çizelgeleme probleminde servis zamanını stokastik olarak ele almışlardır. Problemin amaç fonksiyonu seyahat maliyeti ile servis elemanı ve hastaların bekleme zamanlarının enküçüklenmesidir. Hasta sayısının küçük boyutlu ele alındığı örneklerde 1000 senaryo üretilmiştir. Problem L-shaped yöntemi ile çözülmüştür. Çözüm kalitesini artırmak için geçerli eşitsizlikler algoritmaya eklenmiştir. Carello ve Lanzarone (2021) çalışmalarında servis zamanını belirsiz olarak ele almışlardır. Hastalar sürekli bakıma ihtiyaç duyan, kısmi sürekli bakıma ihtiyaç duyan ve sürekli bakıma ihtiyaç duymayan hastalar olarak 3 grupta ele alınmıştır. Robust eniyileme ve uygulayıcı düşman algoritması problemin çözümünde kullanılmıştır. Chen ve diğ. (2021) ESH'ni çizelgeleme probleminde seyahat süresini stokastik olarak ele almışlardır. İki aşamada çözülen modelin ilk aşamasında toplam operasyon maliyetinin enküçüklenmesi amacı altında atama kararı verilmiştir. İkinci aşamada ise sağlık personelinin hizmet vereceği hastaların çizelgelenmesi servis zamanı tatmininin enbüyüklenmesi amacı altında verilmiştir. Her hastanın servis zamanı için tercih ettiği bir zaman penceresi değeri yumuşak yamuk (soft trapezoid) olarak verilmiştir. Servis zamanının tatmini bu değere göre hesaplanmıştır. İteratif yerel arama, geniş komşu arama ve küme ayrıştırma algoritmaları melezlenerek problemin çözümünde kullanılmıştır. Liu ve diğ. (2019) çalışmalarında, hemşirelerin seyahat ve hizmet sürelerinin stokastik olduğu bir hemşire çizelgeleme ve rotalama probleminde çözüm yöntemleri sunmaktadır. Çalışmada, problemi daha karmaşık hale getiren olasılık kısıtları da tanımlanmıştır. Ele alınan problemin çözümü için dal-ve-fiyat (Branch-and-Price, B&P) algoritması ve kesikli yaklaşım yöntemi önerilmiştir. Sayısal deneyler, önerilen B&P algoritmasının etkinliğini ve seyahat ve hizmet sürelerinin stokastik doğasının dikkate alınmasının önemini doğrulamaktadır. Shi ve diğ. (2019) ESH probleminde seyahat zamanı ve servis süresini stokastik olarak ele almışlardır. Robust eniyileme modeli olarak modellenen problemin çözümünde tavlama benzetimi, yasaklı arama, değişken komşu arama algoritmaları ve benzetim modeli kullanılmıştır. Yasaklı arama algoritmasının daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Shi ve diğ. (2018), stokastik seyahat ve hizmet süreli ESH problemini ele almışlardır. Ele alınan problem için bir stokastik programlama modeli önerilmiş, çözümü için de tavlama benzetimi tabanlı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Yang ve diğ. (2018) çalışmalarında, stokastik ESH problemini ele almıştır. Çalışma, seyahat mesafesinin kısa ve bekleme maliyetinin yüksek olduğu durum için hemşirelerin hastalara nasıl etkin bir şekilde atanabileceğini incelemektedir. Çalışmada çoklu randevu, karma zaman penceresi ve yetenek-talep eşleşmesi gibi kısıtlar dikkate alınmıştır. Problemin şans kısıtlı programlama modeli oluşturulmuş ve karınca kolonisi temelli bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Yapılan deneyler, hemşirelerin sıralamasının çözüm üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve bekleme zamanı ile toplam iş yükü arasında bir denge sağlamak için bekleme sınırlamasının iyi ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Yuan ve diğ. (2018) seyahat ve servis zamanını stokastik olarak ele aldıkları çalışmalarını Dal-Fiyat algoritması ile çözmüşlerdir. Problemin amaç fonksiyonu seyahat maliyeti ve ziyaret edilemeyen hasta maliyetinin enküçüklenmesidir. Hasta ziyaret zamanlarının sıkı kısıt olarak ele alındığı modelde bir hastaya zaman penceresi dışında uğranırsa servis verilememektedir. Servis verilemeyen hastalar için ceza maliyeti amaç fonksiyonuna eklenmektedir. Dal fiyat algoritmasını hızlandırmak için bazı stratejiler uygulanmıştır ve 30, 40 ve 50 hasta içeren örnekler çözülmüştür. Shi ve diğ. (2017), seyahat ve hizmet sürelerinin stokastik olduğu ESH problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için bir stokastik programlama modeli ve melez genetik algoritma önermişlerdir. Chen ve diğ. (2017), stokastik hizmet ve seyahat sürelerini dikkate aldıkları çalışmalarında sağlık hizmetleri çizelgeleme problemini çok dönemli olarak ele almışlardır. Öncelikle deterministik problem için zaman penceresi, bakımın sürekliliği, iş yükü adaleti, ziyaretler arası zamansal

bağımlılıklar gibi gerçek dünya gereksinimlerini içeren bir tamsayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Daha sonra, şans kısıtları kullanılarak model, sürelerdeki belirsizlikle başa çıkacak şekilde düzenlenmiştir. Yuan ve diğ. (2015), çalışmalarında, stokastik hizmet süreleri ve beceri gereksinimlerinin dikkate alındığı ESH'nde çizelgeleme ve rotalama problemini ele almışlardır. Bakıma gereksinim duyan bireylerin evlerine geç varma maliyetinin dikkate alındığı problem için bir stokastik programlama modeli önerilmiştir. Problemi çözmek için, bir dal-fiyat algoritması geliştirilmiştir. Cardoso ve diğ. (2015), evde bakım hizmetlerini planlamak için stokastik bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Önerilen model, hizmetlerin ne zaman ve nerede ve hangi kapasiteyle gerçekteştirileceğini, kapasitenin hasta grupları arasında nasıl dağıtılacağı ve zaman içinde bakım hizmetinde hangi değişikliklerin gerekli olduğunu belirlemektedir. Rodriguez ve diğ. (2015), her bir faaliyet türü için talebin belirsiz olduğu tek bir dönemde gerekli bakıcı sayısını en aza indiren iki aşamalı bir karma tamsayılı programlama modeli önermiştir. Önerilen modeli çözmek için, her senaryoda farklı beceri türlerine sahip gerekli minimum bakıcı sayısının belirlendiği iki aşamalı bir algoritma geliştirilmiştir.

Tablo 1'deki stokastik ESH çalışmaları genel olarak değerlendirildiğinde, çalışmaların genellikle tek periyotlu, homojen filo olduğu ve stokastik parametre olarak servis sürelerinin dikkate alındığı görölmektedir. Çözüm yöntemi olarak ise genellikle sezgisel ya da metasezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmada ise literatürün genelinden farklı olarak, çok periyotlu ve heterojen filolu problem ele alınmıştır. Ziyaret sayısının stokastik olduğu durum incelenmiştir ve seçilen hemşirelere ödenecek sabit ve süre bazlı ücretlerin toplamının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Erişilebilen literatür dikkate alındığında, bu çalışma bütün bu özelliklerin bir arada ele alındığı ilk çalışmadır.

3. ELE ALINAN PROBLEM VE ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODELLER

Ele alınan problemde farklı tipte hizmet gereksinimleri olan m hasta ve farklı uzmanlıklara sahip n hemşire vardır. Bir hasta ancak ihtiyaç duyduğu hizmet tipine uygun ya da daha fazla uzmanlığa sahip bir hemşire tarafından ziyaret edilebilir. Hemşirelerin uzmanlıkları üç tip olarak sınıflandırılmıştır. Birinci tip hemşireler, az deneyime sahiptir ve ancak bir tipinde hizmet gereksinimi olan hastalara hizmet verebilirler. Üçüncü tip hemşireler ise en yüksek uzmanlığa sahiptir ve tüm hastalara hizmet verebilirler. Hastaların üç gün içinde ziyaret edilmeleri gereken ziyaret sayıları farklıdır ve stokastiktir. i . hasta eğer g . günde ziyaret edilecekse, bakım hizmetine mutlaka $[a_{ig}, b_{ig}]$ zaman aralığında başlanmalıdır. Bir hasta bir gün içinde sadece bir kez ziyaret edilebilmektedir. Her hemşire turuna kendi ikamet adresinden başlamakta ve turunu yine aynı adreste sonlandırmaktadır. Düğüm kümesi $n+m$ düğümden oluşmaktadır. İlk n düğüm hemşirelere, m düğüm ise hastalara karşı gelmektedir. Her planlama döneminde tüm hemşirelerin görevlendirilmesi şart değildir. Dolayısıyla bir hemşire seçimi kararı söz konusudur. Her planlama dönemi başında ilgili planlama periyodunda hangi hemşirelerin seçileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu seçim oldukça kritiktir. Hastaların talepleri değişse bile, hemşirelerin tüm talepleri zamanında karşılayabilmesi gereklidir. Eğer bu aşamada yanlış karar verilirse olurlu bir planlama yapılabilmesi mümkün olmayabilir. Örneğin çok az sayıda hemşire seçilmişse hasta talepleri arttığında bu taleplerin zamanında karşılanabilmesi mümkün olmayabilir öte yandan çok fazla hemşire seçilmişse bu kez de kullanılmayacak işgücü için gereksiz yere fazla ücret ödenecektir. Bu nedenle seçilen hemşirelerin hangi senaryo gerçekteşirse gerçekteşsin etkin olabilmesi önemlidir. Önerilen matematiksel model ile hangi hemşirelerin seçileceği seçilen hemşirelerin hastaları hangi sıra ile ziyaret edeceği belirlenmektedir.

Önerilen stokastik model aşağıda verilmiştir.

İndisler:

i, j, h : düğüm indisi (ilk n düğüm hemşirelere ait düğümlerdir)

k, k' : hemşire indisi
 t : hemşire tipi indisi
 g : gün indisi
 r : senaryo indisi

Parametreler:

n : hemşire sayısı
 m : hasta sayısı
 θ : senaryo sayısı
 q_i : i . hastaya hizmet süresi
 μ_i : i . hastanın ihtiyaç duyduğu hemşire tipi
 L_{igr}^S : i . hasta g . günde r . senaryoda ziyaret talep ediyorsa 1, diğer durumda 0.
 d_{ij} : i . düğümden j . düğüme gitmek için gereken seyahat süresi
 a_{ig} : i . hastaya g . günde bakım hizmetine başlanabilecek en erken zaman
 b_{ig} : i . hastaya g . günde bakım hizmetine başlanabilecek en geç zaman
 φ_t : t . tip hemşireye seçilmesi durumunda ödenecek günlük sabit ücret (₺)
 β_t : t . tip hemşireye seçilmesi durumunda ödenecek süre bazlı ücret (dk/₺)
 α_k : k . hemşirenin tipi
 M : Yeterince büyük bir pozitif sayı

Karar Değişkenleri:

x_{ijgkr} : r . senaryoda g . günde k . hemşire i . düğümden j . düğüme gidiyorsa 1; diğer durumda 0
 y_k : k . hemşire seçildi ise 1; diğer durumda 0
 s_{igkr} : r . senaryoda g . günde k . hemşirenin i . hastaya hizmete başlama zamanı
 C_{gkr} : r . senaryoda g . günde k . hemşirenin turunu tamamlama zamanı

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{enk } f = \sum_t \varphi_t \sum_k \alpha_k = t y_k + \sum_t \beta_t \sum_g \sum_k \alpha_k = t C_{gkr} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_i \sum_j \sum_g x_{ijgkr} \leq M y_k \quad \forall k, r \quad (2)$$

$$x_{ijgk'r} \leq y_k \quad \forall i, j, g, k, k', r | i = k \text{ ya da } j = k \quad (3)$$

$$\mu_j \sum_i x_{ijgkr} \leq \alpha_k y_k \quad \forall i, j, g, r | j > n \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijgkr} = L_{jgr}^S \quad \forall j, r, g | j > n \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijgkr} \leq 1 \quad \forall j, g, r \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_k x_{ijgkr} \leq 1 \quad \forall i, g, r \quad (7)$$

$$\sum_{i \neq h} x_{ihgkr} - \sum_{j \neq h} x_{hjgkr} = 0 \quad \forall h, g, k, r | h > n \quad (8)$$

$$\sum_{j > n} x_{ijgkr} = y_k \quad \forall i, g, k, r | i = k \quad (9)$$

$$\sum_{i > n} x_{ijgkr} = y_k \quad \forall j, g, k, r | j = k \quad (10)$$

$$x_{ijgkr} = 0 \quad \forall i, j, g, k, r | i = j \quad (11)$$

$$s_{jgkr} \geq s_{igkr} + q_i + d_{ij} - M(1 - x_{ijgkr}) \quad \forall i, j, g, k, r | i \neq j, j > n \quad (12)$$

$$s_{igkr} \leq M \sum_j x_{ijgkr} \quad \forall i, g, k, r \quad (13)$$

$$s_{igkr} = 0 \quad \forall i, g, k, r | i \leq n \quad (14)$$

$$a_{ig} \leq s_{igkr} + M(1 - \sum_j x_{ijgkr}) \quad \forall i, g, k, r \quad (15)$$

$$s_{igkr} - M(1 - \sum_j x_{ijgkr}) \leq b_{ig} \quad \forall i, g, k, r \quad (16)$$

$$c_{gkr} \geq s_{igkr} + q_i + d_{ij} - M(1 - \sum_j x_{ijgkr}) \quad \forall i, g, k | j = k \quad (17)$$

$$x_{ijgkr} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, g, k, r \quad (18)$$

$$y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \quad (19)$$

$$s_{igkr} \geq 0 \quad \forall i, g, k, r \quad (20)$$

$$c_{gkr} \geq 0 \quad \forall g, k, r \quad (21)$$

Amaç (1) seçilen hemşirelere ödenecek sabit ve süre bazlı ücretlerin toplamını enküçükmektir. Kısıt (2), seçilmeyen hemşirelerin herhangi bir günde herhangi bir düğümü ziyaret etmelerini sağlar ve hastaların yeterli uzmanlığa sahip olmayan hemşireler tarafından ziyaret edilmelerini engeller. Kısıt (3), seçilmeyen hemşireye ait düğümüne uğranmasını engeller. Kısıt (4), bir hastaya hizmet edecek hemşirenin yeteneğinin hastanın ihtiyaç duyduğu yeteneğe eşit veya daha fazlasına sahip olmasını sağlar. Kısıt (5), her hastanın ihtiyaç sayısı kadar ziyaret edilmesini sağlar. Kısıt (6) ve (7), herhangi bir düğümün, herhangi bir günde en fazla 1 kez ziyaret edilmesine izin verir. Kısıt (8) bir hemşire bir hasta düğümüne uğradıysa o düğümünden ayrılmasını garanti eder. Kısıt (9) ve (10), seçilen hemşirelerin rotalarına kendi düğümlerinden başlamalarını ve rotalarını yine bu düğümde sonlandırmalarını sağlar. Kısıt (11), bir düğümünden kendisine atama yapılmasını engeller. Kısıt (12)-(14), her hastanın servisine başlama zamanlarının hesaplanması kısıtlarıdır. Kısıt (15) ve (16), zaman penceresi kısıtlarıdır. Kısıt (17), her seçilen hemşirenin turunu tamamlama zamanının hesaplanması içindir. Kısıt (18)-(21), karar değişkenlerinin tanım kümelerini göstermektedir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümün alt başlıklarında öncelikle ele alınan problemin ve önerilen matematiksel modelin daha iyi açıklanabilmesi için bir örnek problem verilmiştir. Daha sonra deneysel çalışmalarda kullanılan test problemlerinin özellikleri sunulmuştur. Son olarak test problemlerinin önerilen matematiksel model ile çözülmesi ile elde edilen sonuçlar tartışılmıştır ve çözüm performansını etkileyen problem özellikleri belirlenmiştir.

a. Örnek problem

3 hemşire ve 10 hastanın olduğu bir örnek problem oluşturulmuştur. İlk üç düğüm hemşirelere, sonraki on düğüm hastalara ait olmak üzere toplamda 13 düğüm vardır. Üç günlük bir planlama yapılacaktır ve üç tip hemşire vardır. Hemşire 1 ve 3 ikinci tip, hemşire 2 ise üçüncü tiptedir. Bir hemşirenin bir hastaya hizmet verebilmesi için hemşire tipinin hasta gereksinimine eşit ya da daha büyük olması gereklidir. t . tip hemşirenin seçilmesi durumunda ödenecek günlük sabit (φ_t) ücretler sırasıyla 1800, 2200 ve 2600'dür. Süre bazlı (β_t) ücretler ise sırasıyla 1, 2 ve 3'tür. i . hastaya hizmet süresi (q_i) ve i . hastanın ihtiyaç duyduğu hemşire tipi (μ_i) Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Örnek problem için q_i ve μ_i parametrelerinin değerleri

i	q_i	μ_i
4	54,0	2
5	65,5	1
6	33,5	1
7	94,0	1
8	65,0	1
9	108,5	3
10	35,5	1
11	71,0	1
12	31,5	2
13	81,0	1

i . hastanın g . günde r . senaryoda ziyaret talep edip etmediği (L_{igr}^S) Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Örnek problem için L_{igr}^S parametresinin değerleri

i/g	Senaryo 1 ($r=1$)			Senaryo 2 ($r=2$)			
	1	2	3	i/g	1	2	3
4	0	1	1	4	0	1	0
5	1	0	0	5	1	0	1
6	0	1	1	6	0	1	0
7	1	1	0	7	1	1	0
8	0	1	1	8	1	0	0
9	1	1	0	9	1	0	0
10	1	0	1	10	0	0	1
11	0	1	1	11	0	0	1
12	1	0	1	12	1	0	0
13	1	1	0	13	1	0	0

i . düğümünden j . düğüme gitmek için gereken seyahat süreleri (d_{ij}) Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Örnek problem için d_{ij} parametresinin değerleri

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,00	46,39	36,67	37,11	38,21	25,50	25,02	21,02	33,60	50,45	49,04	24,52	42,19
2	46,39	0,00	73,25	55,97	76,66	23,71	71,34	52,48	42,01	38,64	11,00	50,80	86,65
3	36,67	73,25	0,00	25,18	60,21	49,65	33,24	20,81	36,50	55,91	79,65	22,85	22,83
4	37,11	55,97	25,18	0,00	72,20	34,89	48,80	17,00	14,21	30,27	64,64	12,65	47,13
5	38,21	76,66	60,21	72,20	0,00	61,40	27,17	55,23	71,51	88,62	74,55	59,91	48,66
6	25,50	23,71	49,65	34,89	61,40	0,00	50,16	28,84	22,56	30,41	30,41	27,59	63,32
7	25,02	71,34	33,24	48,80	27,17	50,16	0,00	32,80	51,97	71,11	73,25	37,80	23,71
8	21,02	52,48	20,81	17,00	55,23	28,84	32,80	0,00	19,92	39,56	58,90	5,00	37,14
9	33,60	42,01	36,50	14,21	71,51	22,56	51,97	19,92	0,00	19,65	51,11	15,30	56,22
10	50,45	38,64	55,91	30,27	88,62	30,41	71,11	39,56	19,65	0,00	49,50	34,93	75,66
11	49,04	11,00	9,65	64,64	74,55	30,41	73,25	58,90	51,11	49,50	0,00	57,98	90,80
12	24,52	50,80	22,85	12,65	59,91	27,59	37,80	5,00	15,30	34,93	57,98	0,00	41,05
13	42,19	86,65	22,83	47,13	48,66	63,32	23,71	37,14	56,22	75,66	90,80	41,05	0,00

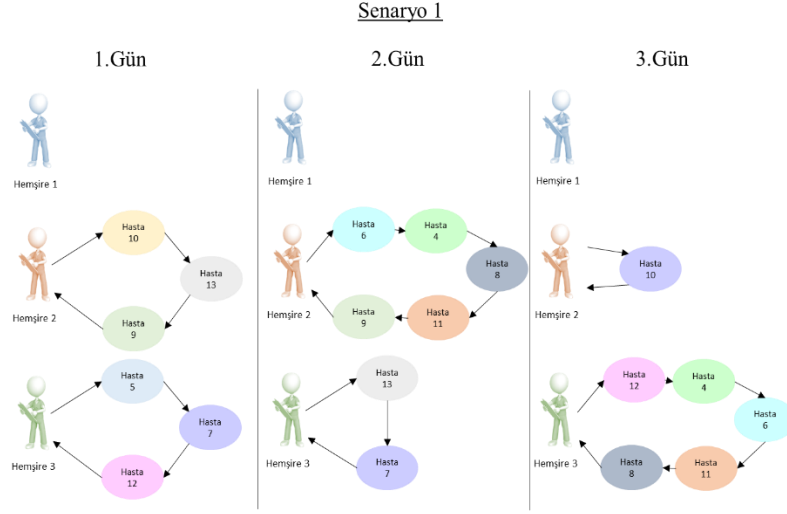
i . hastaya g . günde bakım hizmetine başlanabilecek en erken (a_{ig}) ve en geç (b_{ig}) zamanlar Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Örnek problem için a_{ig} ve b_{ig} parametresinin değerleri

i/g	a_{ig}			i/g	b_{ig}		
	1	2	3		1	2	3
4	114	20	79	4	257	144	142
5	85	119	57	5	164	248	141
6	169	17	149	6	278	118	283
7	97	120	183	7	247	171	327
8	211	104	254	8	318	182	389
9	268	290	255	9	376	421	323
10	28	94	7	10	139	243	155
11	260	170	219	11	373	288	302
12	290	22	1	12	424	172	134
13	84	12	161	13	234	124	298

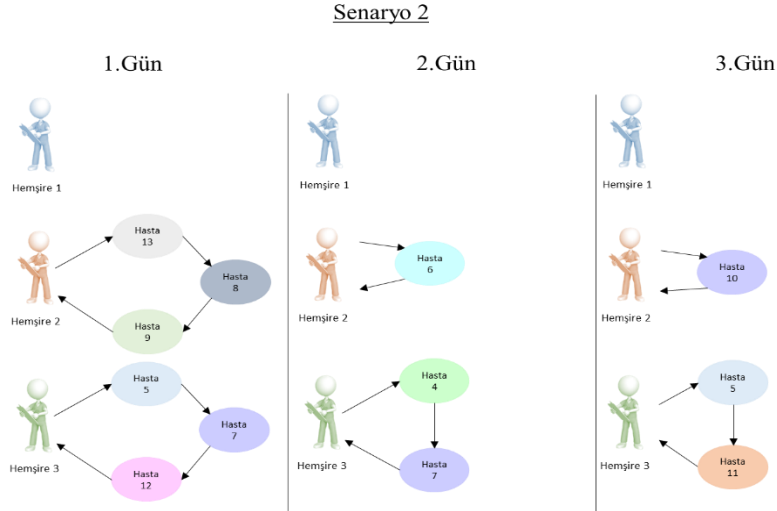
Örnek problem, önerilen matematiksel model ve GAMS Cplex çözücüsü ile 3,3 saniyede çözülmüş ve amaç fonksiyonunun değeri 14.019,72 olarak elde edilmiştir. Hizmet vermek üzere Hemşire 2 ve 3 seçilmiştir.

İlk senaryonun gerçekleşmesi durumu için; 1. gün hemşire 2 sırasıyla hasta 10, 13 ve 9’u ziyaret etmiştir. Hemşire 3 ise sırasıyla hasta 5, 7 ve 12’ye hizmet vermiştir. 2. gün hemşire 2 sırasıyla hasta 6, 4, 8, 11 ve 9’u ziyaret etmiştir. Hemşire 3 ise sırasıyla hasta 13 ve 7’ye hizmet vermiştir. Son gün ise hemşire 2 sadece hasta 10’u ziyaret etmiştir. Hemşire 3 ise sırasıyla hasta 12, 4, 6, 11 ve 8’e hizmet vermiştir. Şekil 1’de senaryo 1 için elde edilen hemşire rotaları gösterilmiştir.



Şekil 1:
Senaryo 1 için hemşirelerin rotaları

İkinci senaryonun gerçekleşmesi durumu için ise; 1. gün hemşire 2 sırasıyla hasta 13, 8 ve 9'u ziyaret etmiştir. Hemşire 3 ise sırasıyla hasta 5, 7 ve 12'ye hizmet vermiştir. 2. gün hemşire 2 sadece hasta 6'yı ziyaret etmiştir. Hemşire 3 ise sırasıyla hasta 4 ve 7'ye hizmet vermiştir. Son gün ise hemşire 2 sadece hasta 10'u ziyaret etmiştir. Hemşire 3 ise sırasıyla hasta 5 ve 11'e hizmet vermiştir. Şekil 2'de senaryo 1 için elde edilen hemşire rotaları gösterilmiştir.



Şekil 2:
Senaryo 2 için hemşirelerin rotaları

Şekil 1 ve 2'den de görülebileceği gibi seçilen hemşirelerle hangi senaryo gerçekleşirse gerçekleşsin tüm hasta talepleri karşılanabilmiştir.

Örnek problem için elde edilen çözümde r . senaryoda g . günde k . hemşirenin turunu tamamlama zamanları (C_{gkr}^S) ve r . senaryoda g . günde k . hemşirenin i . hastaya hizmete başlama zamanları (s_{igkr}^S) sırasıyla Tablo 6 ve 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Elde edilen C_{gkr}^S karar değişkeninin değerleri

g/k	<i>Senaryo 1</i>		<i>Senaryo 2</i>	
	2	3	2	3
1	437,54	363,82	446,44	363,82
2	559,61	254,77	80,91	255,22
3	112,78	447,51	112,78	299,65

Tablo 7. Elde edilen s_{igkr}^S karar değişkeninin değerleri

i/k	<i>1.gün</i>			
	<i>Senaryo 1</i>		<i>Senaryo 2</i>	
	2	3	2	3
5	-	85,00	-	85,00
7	-	177,67	-	177,67
8	-	-	211,00	-
9	287,03	-	295,90	-
10	38,64	-	-	309,47
12	-	309,47	-	-
13	149,80	-	86,65	-
i/k	<i>2.gün</i>			
	<i>Senaryo 1</i>		<i>Senaryo 2</i>	
	2	3	2	3
4	92,09	-	-	25,18
6	23,71	-	23,71	-
7	-	127,50	-	127,97
8	163,09	-	-	-
9	409,10	-	-	-
11	286,99	-	-	-
13	-	22,83	-	-
i/k	<i>3.gün</i>			
	<i>Senaryo 1</i>		<i>Senaryo 2</i>	
	2	3	2	3
4	-	79,00	-	-
5	-	0	-	60,21
6	-	167,89	-	-
8	-	361,70	-	-
10	38,64	-	38,64	1
11	-	231,80	-	219,00
12	-	22,85	-	0

Tablo 6 ve 7'den de görülebileceği gibi tüm ziyaretler, tüm senaryolarda izin verilen zaman penceresi içinde gerçekteşmiştir.

4.2. Test Problemleri

Modeli test etmek için Nikzad ve diğ. (2023) ve Nikzad ve diğ. (2021) çalışmalarında kullanılan test problemleri uyarlanmıştır. Türetilen problemlerinin özellikleri Tablo 8'de verilmiştir. Tablonun ilk sütununda *Tip* ile problemin tipi, *m* ile hasta sayısı, *n* ile hemşire sayısı, *g* ile gün (periyot) sayısı, *s* ile de kullanılan senaryo sayısı verilmiştir. Test problemlerinde düğüm sayısı 13, 15, 18, 20, 25, 27, 35, 40 ve 45 olarak, hastalara hizmet verebilecek en fazla hemşire

sayısı ise 3, 5, 7 ya da 10 olarak alınmıştır. Periyot, küçük problemlerde 3 gün büyük problemlerde ise 5 gün olarak belirlenmiştir. Senaryo sayısı ise 2 ya da 3 olarak alınmıştır. Hastaların her senaryodaki ihtiyaç duydukları ziyaret sayıları, en erken ve en geç ziyaret saatleri, ihtiyaç duyulan hizmet seviyesi ve hemşirelerin verebilecekleri hizmet seviyeleri ise her problem tipi için rassal türetilmiştir. Her problem tipi için 5 farklı problem türetilmiştir.

Tablo 8. Test problemlerinin boyutları

<i>Tip</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>g</i>	<i>s</i>
<i>Tip-1</i>	10	3	3	2
<i>Tip-2</i>	10	5	3	2
<i>Tip-3</i>	15	3	3	2
<i>Tip-4</i>	15	5	3	2
<i>Tip-5</i>	20	5	5	3
<i>Tip-6</i>	20	7	5	3
<i>Tip-7</i>	25	10	5	2
<i>Tip-8</i>	30	10	5	2
<i>Tip-9</i>	35	10	5	2

4.3. Test Problemleri

Test problemleri, önerilen matematiksel model ve GAMS Cplex çözücüsü ile 10800 saniye süre limiti içinde çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 9’da verilmiştir. Tablonun ilk sütununda problem tipi (*Tip*), izleyen sütunlarda ise sırasıyla problem numarası (*Problem No*), elde edilen amaç fonksiyonu değeri (*f*), saniye cinsinden çözüm süresi (*t*), seçilen hemşire sayısı (*n**), Cplex çözücüsü ile elde edilen alt sınır değeri (AS_{Cplex}) ve elde edilen amaç fonksiyonu değerinin alt sınır değerine yüzde uzaklığı ($\%Gap$) verilmiştir. $\%Gap$ değerleri denklem (21)’de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%Gap = \frac{100(f - AS_{Cplex})}{f} \quad (21)$$

Tablo 9’dan da görülebileceği gibi Tip-1, Tip-2, Tip-3 ve Tip-4 problemlerinin tamamının süre limiti içinde eniyi çözümlerine erişilmiştir. Müşteri sayısının arttığı Tip-5, Tip-6, Tip-7, Tip-8 ve Tip-9 problemlerinin tamamı için süre sonuna kadar kullanılmış olmasına rağmen eniyi çözümlerin bulunması mümkün olmamıştır. Cplex tarafından hesaplanan alt sınır değerlerine $\%7,3$ ile $\%89,8$ arasında yaklaşabilen uygun çözümler elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar problem tipi bazında incelenecek olursa, Tip-1 problemlerinin çözüm süreleri 0,13 ve 1,20 saniye arasında değişmiştir. Bir örnekte 3 hemşire seçilirken diğer örneklerde 2 hemşire seçilmiştir ve amaç fonksiyonunun aldığı değerler birbirine yakındır. Tip-2 için bir örnekte 1, bir örnekte 2, 3 örnekte 3 hemşire seçilmiştir. Tip-1 ile kıyaslandığında hemşire sayısının artmasının bir etkisi olmamıştır. Çözüm süreleri genellikle 2 saniye olurken bir örnekte yaklaşık 8 saniye, bir örnekte ise 0,38 saniye sürmüştür. Tip-3 için beklendiği gibi önceki örneklere göre amaç fonksiyonunun değeri artmıştır. Bazı örneklerde kısa çözüm sürelerine ihtiyaç duyulurken bir örnek için 15 saniye gerekmiştir. 3 örnek için 3 hemşire, 2 örnek için ise 2 hemşire seçilmiştir. Tip-4 için elde edilen sonuçlara bakıldığında çözüm sürelerinin Tip-3’e kıyasla çok arttığı görülmüştür. Fakat hemşire sayısının artması seçilen hemşire sayısını artırmamıştır. Tip-5, Tip-6, Tip-7, Tip-8 ve Tip-9 için verilen süre sınırı içerisinde problemlerin eniyi çözümleri elde edilememiştir. Bu problemlerde en fazla 5 hemşire seçilmiştir. Önceki

örneklerle kıyaslandığında amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin de arttığı görülmüştür. Gün sayısının artması problemi daha karmaşık hale getirmiştir.

Tablo 9. Test problemlerinin sonuçları

<i>Tip</i>	<i>Problem No</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>n</i> *	<i>AS_{Cplex}</i>	<i>%Gap</i>
<i>Tip-1</i>	P-1	16488,0	0,13	3	16488,0	0,0
	P-2	16792,0	0,19	2	16792,0	0,0
	P-3	17152,0	0,28	2	17152,0	0,0
	P-4	17101,0	0,94	2	17101,0	0,0
	P-5	17575,0	1,20	2	17575,0	0,0
<i>Tip-2</i>	P-1	17003,0	7,92	3	17003,0	0,0
	P-2	20919,0	0,38	3	20919,0	0,0
	P-3	17101,0	2,88	2	17101,0	0,0
	P-4	17248,0	1,42	1	17248,0	0,0
	P-5	17032,0	1,73	3	17032,0	0,0
<i>Tip-3</i>	P-1	18354,0	0,30	3	18354,0	0,0
	P-2	18019,0	0,97	3	18019,0	0,0
	P-3	18367,0	2,92	2	18367,0	0,0
	P-4	16262,5	15,02	2	16262,5	0,0
	P-5	15307,0	0,77	3	15307,0	0,0
<i>Tip-4</i>	P-1	16120,0	261,92	3	16120,0	0,0
	P-2	17615,0	6,78	3	17615,0	0,0
	P-3	14901,0	194,91	2	14901,0	0,0
	P-4	16027,0	100,06	3	16027,0	0,0
	P-5	11499,5	560,23	2	11499,5	0,0
<i>Tip-5</i>	P-1	42151,0	10800,00	4	27398,2	35,0
	P-2	36856,0	10800,00	3	34165,5	7,3
	P-3	36249,0	10800,00	4	29832,9	17,7
	P-4	41349,0	10800,00	4	28778,9	30,4
	P-5	40621,0	10800,00	4	27622,3	32,0
<i>Tip-6</i>	P-1	29084,0	10800,00	3	16432,5	43,5
	P-2	41812,0	10800,00	4	17728,3	57,6
	P-3	35971,0	10800,00	3	17661,8	50,9
	P-4	37028,0	10800,00	4	17810,5	51,9
	P-5	30304,0	10800,00	3	14576,2	51,9
<i>Tip-7</i>	P-1	38073,0	10800,00	5	13211,3	65,3
	P-2	40254,0	10800,00	4	4105,9	89,8
	P-3	35270,0	10800,00	5	6560,2	81,4
	P-4	38938,0	10800,00	5	8644,2	77,8
	P-5	34744,0	10800,00	5	6879,3	80,2
<i>Tip-8</i>	P-1	41435,0	10800,00	5	28975,5	43,8
	P-2	35330,0	10800,00	4	30651,3	13,2
	P-3	40433,0	10800,00	3	30631,1	32,0
	P-4	32268,0	10800,00	3	27817,3	16,4
	P-5	35091,0	10800,00	4	28299,2	24,1
<i>Tip-9</i>	P-1	37642,0	10800,00	4	6926,1	81,6
	P-2	28665,0	10800,00	4	4959,1	82,7
	P-3	30639,0	10800,00	5	6924,4	77,4
	P-4	34410,0	10800,00	3	6365,9	81,5
	P-5	33370,0	10800,00	5	7875,3	76,4

4.4. Problem Özelliklerinin Problemin Çözüm Performansına Etkisi

Problemin çözüm performansının hasta sayısı (m), hemşire sayısı (n), periyod sayısı (g) ve senaryo sayısı (s) özelliklerinden hangisinden daha fazla etkilediğini belirlemek üzere varyans analizi yapılmıştır. Test problemlerinin çözümü için sınırsız süre vermek mümkün olmadığından problemler 10800 saniye süre limiti ile çözülmüştür. Bu durumda eğer varyans analizinde bağımlı değişken çözüm süresi olarak alınırsa, süre limiti ile duran tüm testlerin çözüm performansının aynı olarak değerlendirilmesine yol açacaktır. Bu dezavantajı ortadan kaldırabilmek amacıyla, varyans analizinde bağımlı değişkenin değeri olarak hem çözüm süresini hem de eğer eniyi çözüme ulaşamadıysa Cplex çözücüsü ile elde edilen alt sınır değerine ne kadar uzak olduğu bilgileri birleştirilerek bir performans değeri (PD) oluşturulmuştur. Bu değer, çözüm süresinin kullanım yüzdesi ile alt sınıra uzaklık yüzdesi toplanarak elde edilmiştir. Her iki değer de yüzde cinsinden ifade edildiği için problemlerin çözüm performansının karşılaştırılmasında kullanılması mümkün olabilmektedir. Denklem (22)'de verilen formül ile hesaplanan PD değerleri Tablo 10'da verilmiştir.

$$PD = \%Gap + \frac{100t}{10800} \quad (22)$$

Tablo 10. Test problemlerinin PD değerleri

<i>Tip</i>	<i>Problem No</i>	<i>PD</i>	<i>Tip</i>	<i>Problem No</i>	<i>PD</i>	<i>Tip</i>	<i>Problem No</i>	<i>PD</i>
<i>Tip-1</i>	P-1	0,001	<i>Tip-4</i>	P-1	2,425	<i>Tip-7</i>	P-1	165,300
	P-2	0,002		P-2	0,063		P-2	189,800
	P-3	0,003		P-3	1,805		P-3	181,400
	P-4	0,009		P-4	0,926		P-4	177,800
	P-5	0,011		P-5	5,187		P-5	180,200
<i>Tip-2</i>	P-1	0,073	<i>Tip-5</i>	P-1	135,000	<i>Tip-8</i>	P-1	143,800
	P-2	0,004		P-2	107,300		P-2	113,200
	P-3	0,027		P-3	117,700		P-3	132,000
	P-4	0,013		P-4	130,400		P-4	116,400
	P-5	0,016		P-5	132,000		P-5	124,100
<i>Tip-3</i>	P-1	0,003	<i>Tip-6</i>	P-1	143,500	<i>Tip-9</i>	P-1	181,600
	P-2	0,009		P-2	157,600		P-2	182,700
	P-3	0,027		P-3	150,900		P-3	177,400
	P-4	0,139		P-4	151,900		P-4	181,500
	P-5	0,007		P-5	151,900		P-5	176,400

Tablo 10'dan da görülebileceği gibi, Tip-5 ve daha büyük boyutlu problemlerinin çözüm performansı küçük boyutlu problemlere kıyasla oldukça ciddi bir şekilde kötüleşmiştir. Hangi faktörlerin çözüm performansına daha fazla etkisinin olduğunu incelemek amacıyla Python programlama dili kullanılarak varyans analizi yapılmıştır. Elde edilen varyans analizi tablosu Tablo 11'de verilmiştir. Varyans analizinden de görülebileceği gibi çözüm performansı üzerinde en etkili faktör m (hasta sayısı)'dir. Bu faktörü sırasıyla g (periyot sayısı), $n:m$ ikili etkileşimi ve n (hemşire sayısı) faktörleri izlemektedir. Dolayısıyla çözüm performansı en düşük problemler başta hasta sayısı olmak üzere periyot sayısı ve hemşire sayısının fazla olduğu problemlerdir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, stokastik hasta talepleri ve çok periyotlu hizmet ihtiyacı dikkate alınarak evde sağlık hizmetleri için bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen model, hizmet kalitesinin ve

hizmet sağlayıcılarının verimliliğinin iyileştirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle, stokastik talepleri hesaba katmak, taleplerin zamanında ve etkin bir şekilde karşılanmasını sağlamakta; kaynak kullanımını optimize ederek gereksiz maliyetleri düşürmektedir. Bu çerçevede, önerilen model, ESH'nin planlanması ve yönetimi konusunda literatüre önemli bir katkıda bulunmaktadır.

Önerilen matematiksel modelin sağlık hizmetlerinde kaynak optimizasyonu ve acil durum yönetimi alanlarında da uygulanması mümkündür. Gelecekte model, hasta talepleri dışında, hemşirelerin seyahat süreleri gibi başka stokastik parametreleri de dahil ederek geliştirilebilir. Daha büyük boyuttaki problemler için genetik algoritma, yasaklı arama gibi metasezgisel algoritmalar geliştirilebilir. Önerilen matematiksel modele gerçek zamanlı veri toplama ve analizi entegre edilerek modelin dinamik olarak güncellenmesine ve daha doğru tahminler yapılmasına olanak sağlanabilir.

Tablo 11. Varyans analizi

	<i>df</i>	<i>sum_sq</i>	<i>mean_sq</i>	<i>F</i>	<i>PR(>F)</i>
m	1,0	195325,670354	195325,670354	647,499534	4,826878e-25
n	1,0	10402,430680	10402,430680	34,483788	9,350566e-07
n:m	1,0	21693,293269	21693,293269	71,912705	3,351654e-10
g	1,0	31898,168441	31898,168441	105,741602	2,131997e-12
m:g	1,0	511,412200	511,412200	1,695318	2,009492e-01
n:g	1,0	60,720423	60,720423	0,201287	6,563009e-01
n:m:g	1,0	1,231154	1,231154	0,004081	9,494060e-01
s	1,0	431,688635	431,688635	1,431037	2,392051e-01
m:s	1,0	5,420305	5,420305	0,017968	8,940932e-01
n:s	1,0	15,035942	15,035942	0,049844	8,245634e-01
n:m:s	1,0	57,260173	57,260173	0,189816	6,656011e-01
g:s	1,0	772,106244	772,106244	2,559512	1,181378e-01
m:g:s	1,0	5421,007681	5421,007681	17,970500	1,433620e-04
n:g:s	1,0	3203,253821	3203,253821	10,618703	2,403362e-03
n:m:g:s	1,0	1,496676	1,496676	0,004961	9,442248e-01
Residual	37,0	11161,474910	301,661484	NaN	NaN

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Tuğba SARAÇ, literatür taraması, matematiksel modelin geliştirilmesi, geliştirilen modelin uygulanması ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; İlknur TÜKENMEZ, literatür taraması, matematiksel modelin geliştirilmesi, geliştirilen modelin uygulanması ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; Büşra TUTUMLU, literatür taraması, matematiksel modelin geliştirilmesi, geliştirilen modelin uygulanması ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

KAYNAKLAR

1. Bazirha, M., Kadrani, A. ve Benmansour, R. (2023) Stochastic home health care routing and scheduling problem with multiple synchronized services, *Annals of Operations Research*, 320(2), 573-601. doi:10.1007/s10479-021-04222-w

2. Cardoso, T., Oliveira, MD., Barbosa-Povoa, A. ve Nickel, S. (2015) An integrated approach for planning a long-term care network with uncertainty, strategic policy and equity considerations, *European Journal of Operational Research*, 247(1), 321-334. doi:10.1016/j.ejor.2015.05.074
3. Carello, G. ve Lanzarone, E. (2021) An implementor-adversary approach for uncertain and time-correlated service times in the nurse-to-patient assignment problem, *Computers&Operations Research*. doi:10.1016/j.cor.2021.105378
4. Chen, C., Rubinstein, ZB., Smith, SF. ve Lau, HC. (2017) Tackling large-scale home health care delivery problem with uncertainty, *Twenty-Seventh International Conference on Automated Planning and Scheduling*, Pittsburgh, 358-366. <https://www.ri.cmu.edu/publications/tackling-large-scale-home-health-care-delivery-problem-with-uncertainty/>
5. Chen, H., Luo, X., Zhang, Z. ve Zhou, O. (2021) Stochastic bi-level programming model for home healthcare scheduling problems considering the degree of satisfaction, *Journal Of Systems Science And Systems Engineering*, 30(5), 572–599. doi:10.1007/s11518-021-5507-3
6. Du, G. ve Zhang, J. (2022) Cross-regional manpower scheduling and routing problem with stochastic service times in home health care, *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108668. doi:10.1016/j.cie.2022.108668
7. Euch, J., Masmoudi, M. ve Siarry, P. (2022) Home health care routing and scheduling problems: a literature review, *4or-A Quarterly Journal Of Operations Research*, 20, 351–389. doi:10.1007/s10288-022-00516-2
8. Fu, Y., Ding, F., Mu, Z., Sun, C. ve Gao, K. (2022) Integrating scheduling and routing decisions into home health care operation with skill requirements and uncertainties, *Journal of Simulation*. doi:10.1080/17477778.2022.2108735
9. Grieco, L., Utley, M. ve Crowe, S. (2021) Operational research applied to decisions in home health care: A systematic literature review, *Journal of the Operational Research Society*, 72(9), 1960-1991. doi:10.1080/01605682.2020.1750311
10. Liu, R., Yuan, B. ve Jiang, Z. (2019) A branch-and-price algorithm for the home-caregiver scheduling and routing problem with stochastic travel and service times, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31, 989-1011. doi:10.1007/s10696-018-9328-8
11. Mascolo, D., Martinez, M.,C. ve Espinouse, M.,L. (2021) Routing and scheduling in Home Health Care: A literature survey and bibliometric analysis, *Computers& Industrial Engineering*, 158, 107255. doi:10.1016/j.cie.2021.107255
12. Nikzad, E., Bashiri, M. ve Abbasi, B. (2021) A matheuristic algorithm for stochastic home health care planning, *European Journal of Operational Research*, 288(3), 753-774. doi:10.1016/j.ejor.2020.06.040
13. Nikzad, E., Bashiri, M. ve Abbasi, B. (2023) Home healthcare staff dimensioning problem for temporary caregivers: A matheuristic solution approach, *Computers & Operations Research*, 152. doi:10.1016/j.cor.2022.106126
14. Rodriguez, C., Garaix, T., Xie, X. ve Augusto, V. (2015) Staff dimensioning in homecare services with uncertain demands, *International Journal of Production Research*, 53(24), 7396-7410. doi:10.1080/00207543.2015.1081427
15. Shi, Y., Boudouh, T. ve Grunder, O. (2017) A home health care routing problem with stochastic travel and service time, *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13987-13992. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.2419

16. Shi, Y., Boudouh, T., Grunder, O. ve Wang, D. (2018) Modeling and solving simultaneous delivery and pick-up problem with stochastic travel and service times in home health care, *Expert systems with applications*, 102, 218-233. doi:10.1016/j.eswa.2018.02.025
17. Shi, Y., Boudouh, T. Ve Grunder, O., (2019) A robust optimization for a home health care routing and scheduling with consideration of uncertain travel and service times, *Transportation Research Part E*, 128, 52-95. doi:10.1016/j.tre.2019.05.015
18. Tsang, MY. ve Shehadeh, KS. (2023) Stochastic optimization models for a home service routing and appointment scheduling problem with random travel and service times, *European Journal Of Operational Research*, 307(1), 48-63. doi:10.1016/j.ejor.2022.09.020
19. Yang, X., Zhang, T., Mao, N., Chen, Q., Bai, L. ve Chen, W. (2018) The stochastic home health care routing problem in dense communities with multi-appointment, *In 2018 15th International Conference on Service Systems and Service Management*, IEE, Hangzhou-China, 1-6.
<https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&number=8464971>
20. Yuan, B., Liu, R. ve Jiang, Z. (2015) A branch-and-price algorithm for the home health care scheduling and routing problem with stochastic service times and skill requirements, *International Journal of Production Research*, 53(24), 7450-7464. doi:10.1080/00207543.2015.1082041
21. Yuan, B., Liu, R. ve Jiang, Z. (2018) Daily scheduling of caregivers with stochastic times, *International Journal of Production Research*, 56(9), 3245-3261. doi:10.1080/00207543.2018.1445879
22. Zhan, Y., Wang, Z. ve Wan, G. (2021) Home service routing and appointment scheduling with stochastic service times, *European Journal of Operational Research*, 288, 98-110. doi:10.1016/j.ejor.2020.05.037