



A research on fully automated parking systems and operational planning and control problems

Nurhan Dudaklı^{ID}, Adil Baykasoğlu*^{ID}

Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Tınaztepe Campus, 35397, Izmir, Turkey

Highlights:

- Examination of the parking space issue in cities
- Examination of Fully Automated Parking Systems (FAPSs) which provide an effective and environmentally friendly solution to the parking problem
- Classification of FAPSs' planning problems and analysis of operational planning & control problems

Keywords:

- Parking space issue in cities, fully automated parking systems (FAPSs)
- Efficiency of FAPSs
- Operational planning & control problems of FAPSs

Article Info:

Research Article
Received:27.02.2020
Accepted:03.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.695676

Acknowledgement:

This work was supported by Dokuz Eylül University Scientific Research Coordination Unit. Project Number: 2017.KB.FEN.027

Correspondence:

Author: Adil Baykasoğlu
e-mail:
adil.baykasoğlu@deu.edu.tr
phone: +90 232 301 7600

Graphical/Tabular Abstract

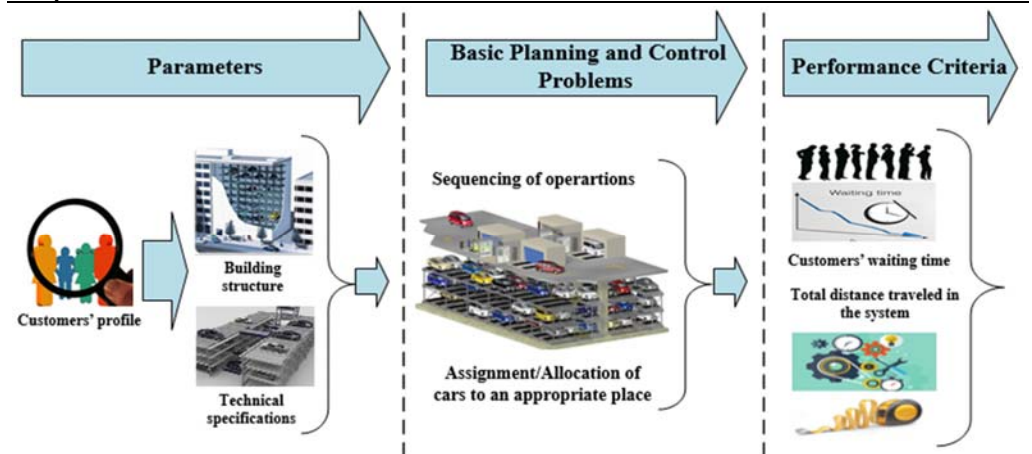


Figure A. The general structure of common operational planning and control problem in FAPSs

Purpose: The purpose of this study is to examine FAPSs in terms of technical and operational aspects and reveal the potential research areas that could increase the operational efficiency and effectiveness of FAPSs.

Theory and Methods:

As a matter of fact, there is a very limited number of studies dealing with operational planning and control problems of FAPSs in scientific literature. For this reason, the operational problems of FAPSs that have different designs are investigated initially, and then a general algorithm that controls operations in FAPSs is introduced. Different heuristics and dispatching rules that can be utilized for common planning problems in FAPSs are identified in the scope of this study. Additionally, the deterministic (structure and layout of the building, capacity, etc.) and stochastic parameters (number of customers, arrival/departure patten, etc.) of the system are examined in detail.

Results:

The findings show that the physical and technical features of the system shape the operations and operational problems. However, regardless of the design and system features, there are two main operational planning problems arising for all FAPSs, which are sequencing of operations and allocation of the cars. Considering the necessity of real-time control, it is quite difficult to solve these complicated problems optimally due to the dynamic and uncertain nature of the system. Hence, the software used for planning and executing operations in TOOS generally utilizes simple dispatching/heuristic rules. However, it should be emphasized that the performance of these rules and consequently the efficiency of the system is directly dependent on the system parameters. At this point, it is seen that customer behavior is a very important parameter that should be taken into account both in the design and operation phases.

Conclusion:

Considering the limited number of scientific studies on the subject, there is a need for studies addressing the operational planning and control problems in order to increase the efficiency and effectiveness of FAPSs. Aftermath, considering these problems as optimization problems and solving them with metaheuristic algorithms instead of using certain rules will provide significant improvements in system performance and service time especially. In addition, the new planning and control approaches should exploit real data in order to manage uncertainties.



Tam otomatik otopark sistemlerinde operasyonel planlama ve kontrol problemleri üzerine bir araştırma

Nurhan Dudaklı^{ID}, Adil Baykasoğlu*^{ID}

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, 35397, İzmir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Şehirlerdeki park yeri sorununun incelenmesi
- Park sorununa etkili ve çevre dostu bir çözüm sunan tam otomatik otopark sistemlerinin (TOOS) incelenmesi
- TOOS'lerin planlama problemlerinin sınıflandırılması ve operasyonel planlama ve kontrol problemlerinin incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 27.02.2020
Kabul: 03.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.695676

Anahtar Kelimeler:

Şehirlerdeki park yeri sorunu,
tam otomatik otopark sistemleri,
tam otomatik otopark sistemlerin etkinliği,
tam otomatik otopark sistemlerde operasyonel planlama ve kontrol problemleri

ÖZET

Dünya genelinde hızla artan nüfusa bağlı olarak, araç sayılarındaki artış özellikle kalabalık şehirlerde ciddi park yeri problemlerine neden olmaktadır. Söz konusu şehirlerdeki sınırlı boş alanlar da göz önüne alındığında, geniş alanlara ihtiyaç duyan geleneksel otoparkların (açık alan otoparkları, katlı otoparklar vb.) bu ihtiyacı karşılama konusunda çoğu zaman yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu sebeple, teknolojik gelişmelerin de yardımıyla hem yatay hem de dikey alanın daha etkin kullanılmasını sağlayan çeşitli otopark sistemleri geliştirilmiştir. Özellikle son yirmi yılda, sensör teknolojisinin kullanıldığı ve park işlemlerinin otomatik taşıyıcılarla (asansör, konveyör, robot vb.) gerçekleştirildiği Tam Otomatik Otopark Sistemleri (TOOS) yeni nesil otopark sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. TOOS'ler, tasarımları ve kullandıkları teknolojiler sayesinde park yeri sorununa etkili ve çevre dostu bir çözüm sunmaktadır. Bununla birlikte sistemin etkinliğini/verimliliğini operasyonel anlamda ele alan akademik çalışmalara hala ihtiyaç duyulmaktadır. Nitekim konuyla ilgili literatür incelendiğinde, TOOS'lerin tasarımı ve TOOS'lerde kullanılacak teknolojilerle ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen, TOOS'lerin operasyonel planlama ve kontrol problemlerini konu alan çalışmaların az sayıda olduğu görülmektedir. Mevcut araştırma kapsamında çeşitli TOOS'ler teknik ve operasyonel açıdan incelenmiş ve operasyonel etkinliği/verimliliği arttıracak potansiyel araştırma/çalışma alanları ortaya konulmuştur.

A research on fully automated parking systems and operational planning and control problems

H I G H L I G H T S

- Examination of the parking space issue in cities
- Examination of Fully Automated Parking Systems (FAPS) which provide an effective and environmentally friendly solution to the parking problem
- Classification of FAPSs' planning problems and analysis of operational planning & control problems

Article Info

Research Article
Received:27.02.2020
Accepted:03.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.695676

Keywords:

Parking space issue in cities,
fully automated parking systems,
efficiency of fully automated parking systems,
operational planning & control problems of fully automated parking systems

ABSTRACT

Due to the rapid increase in the population all over the world, the increase in the number of vehicles causes serious parking problems, especially in crowded cities. Considering the limited available spaces in highly populated cities, traditional parking systems (flat or multi-story) mostly unable to meet the demand due to the large space they need. Therefore, various parking systems that enable to use of both horizontal and vertical areas more effectively have been developed with the help of technological developments. Especially in the last two decades, Fully Automatic Parking Systems (FAPS) appear as the new generation parking systems where sensor technology is used and parking operations are carried out with the help of automatic carriers (lifts, conveyors, robots). FAPSs offer an effective and environmentally friendly solution to the parking space problem owing to the design and technologies they use. However, there is still a need for academic researches that address the operational efficiency /effectivity of the system. As a matter of fact, there are many studies in the scientific literature on the design of FAPSs and the technologies to be used in FAPSs while the number of studies dealing with operational planning and control problems of FAPSs is very limited. Based on these findings, different types of FAPSs are investigated in terms of technical and operational aspect and potential research areas that could increase the operational efficiency and effectivity are revealed in the scope of this research.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: nurhan.dudakli@deu.edu.tr, *adil.baykasoğlu@deu.edu.tr / Tel: +90 232 301 7600

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, özellikle büyük kentlerdeki araç sayısının ciddi bir trafik sorunlarına yol açtığı bilinmektedir. Bununla birlikte, gün içinde ortalama 1,5-2 saat trafikte olan ve zamanlarının %90'nını park halinde geçiren araçların nereye ve nasıl park edileceği şehir içi ulaşım ile ilgili diğer bir önemli sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Bu konuda yeterli ve doğru bir planlama yapılmadığında, erişim ve hareket işlevlerini yerine getirmesi gereken yollar park alanlarına dönüşmekte ve şehirlerdeki trafik sorunu daha da kötü bir hal almaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir ulaşım ve alan/arazi kullanımı neredeyse 40 yıldır şehirler ve yerel yönetimler için en önemli konuların başında gelmektedir [2]. Birçok OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development / Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü) ülkesi, şehirlerdeki kısıtlı alanları daha etkin kullanmak ve sürdürülebilir bir şehir içi ulaşım sağlamak için çeşitli politikalar geliştirmiştir. Özellikle gelişmiş OECD ülkeleri, bireysel motorlu araç sayısını azaltmak amacıyla yürüme, bisiklet, toplu taşıma vb. gibi sürdürülebilir ulaşım seçeneklerini teşvik etmektedir. Bu çabaların sonucunda OECD ülkelerinin ortalama yıllık *motorlu taşıt artış oranı* 1970'lerde %3,9 iken 2000'li yıllarda %0,9'a kadar gerilemiştir [3]. Buna rağmen araç sayısı her geçen yıl artmaya devam etmektedir. Türkiye ise gelişmekte olan bir ülke olarak daha yüksek artış oranlarına sahiptir. TÜİK verilerine göre Türkiye'de yıllık ortalama motorlu taşıt artış oranı 2002-2010 yılları arasında %4,7 iken 2011-2018 yılları arasında %3,7 olarak gerçekleşmiştir [4].

Söz konusu koşullar altında şehirlerdeki otopark ihtiyacı günden güne artarken mevcut boş alanlar ise giderek azalmaktadır. Özellikle şehir merkezlerinde erişilebilir gayrimenkul alanlar oldukça küçük ve çok pahalıdır. Küçük fakat oldukça değerli olan bu alanları daha faydalı kullanma zorunluluğu, park alanları ile ilgili çalışmalarını yerel yönetimler için oldukça önemli bir konu haline getirmiştir [5]. Bu bağlamda, şehirlerdeki park sorununu çözmek, en azından şehirleri bu konuda rahatlatmak amacıyla pek çok park alanı modeli [6] ve bunu destekleyen park ücreti politikaları [7] geliştirilmiştir. Bu çalışmalar sayesinde belirli ölçülerde iyileşmeler sağlansa da şehirlerin çoğunda park sorunu hala devam etmektedir. Bununla birlikte şehirlerde yaşayan vatandaşların park yeri bulmayla ilgili şikâyetleri giderek artmaktadır. Ayrıca park yeri ararken harcanan zaman da önemli bir şikâyet konusu olarak karşımıza çıkmaktadır [8]. Son zamanlarda park sorunlarıyla ilgili yapılan anketler, şikâyet oranının metropollerde %90'a ulaştığını göstermektedir [9].

Geleneksel otoparkların yetersiz kaldığı günümüz koşullarında, yaşanan teknolojik gelişmelerin de yardımıyla kısıtlı alanların daha etkin kullanılabilmesini sağlayan yeni nesil otopark sistemleri (mekanik, yarı otomatik ve tam otomatik otoparklar vb.) geliştirilmiştir. Bunların içerisinde park yeri/alanı problemine en etkili çözümü, sensör teknolojisinin kullanıldığı, park işleminin otomatik

taşıyıcılarla (asansör, robot vs.) gerçekleştirildiği Tam Otomatik Otopark Sistemleri (TOOS) sunmaktadır. Fakat hem Türkiye'de hem de dünyada henüz gelişme aşamasında sayılabilecek bu sistemlerin performansını ve verimliliğini konu alan bilimsel çalışmaların sayısı oldukça azdır. Konuyla ilgili bilimsel yazın incelendiğinde, TOOS'lerin tasarımı ve TOOS'lerde kullanılacak teknolojiler ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, sistemin operasyon yönetimi ile ilgili araştırmaların sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, bu sistemlerin operasyonlarını planlayan ve kontrolünü sağlayan sistemlerin iyileştirilmesi veya geliştirilmesi ile ilgili çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu makalede, öncelikle TOOS'lerle ilgili yapılan bilimsel çalışmalar incelenmiş; yapılan araştırmanın kapsam ve yöntemi, elde edilen sonuçlarla birlikte Bölüm 2'de sunulmuştur. Bu doğrultuda makalenin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 3'te TOOS'lerin teknik ve operasyonel özellikleriyle ilgili daha detaylı bilgiler verilmiştir. Makalede ortaya konan çerçeveye bağlı olarak, Bölüm 4'te TOOS'lerin tasarım planlama konusuna değinilmiş; Bölüm 5'te ise TOOS'lerin operasyonel planlama ve kontrol problemleri daha kapsamlı bir şekilde ele alınıp incelenmiştir. Son olarak, Bölüm 6'da araştırmanın ana hatları ortaya konulmuş ve sonuçları tartışılmıştır.

2. ARAŞTIRMANIN KAPSAM VE YÖNTEMİ (SCOPE AND METHOD OF THE RESEARCH)

Bu makalenin amacı özellikle TOOS'lerin operasyon planlama ve kontrol konusu hakkında araştırmacılara detaylı bir inceleme sunmaktır. Bu bağlamda, (i) tam otomatik otopark türleri, mekanik ve teknik özellikleri hakkında detaylı bilgi vermek, (ii) TOOS'lerin tasarım ve operasyon planlama problemlerini tanımlamak, (iii) TOOS'lerin operasyon planlama ve kontrol problemlerinin genel yapısını ortaya koymak için bilimsel literatürden, bu sistemleri kuran firmaların web sayfalarından, konunun uzmanlarının görüşlerinden ve yazarların gözlemlerinden faydalanılmıştır. Öncelikle tam otomatik otoparklarla ilgili bilimsel literatürü tanımlamak ve sistematik olarak değerlendirmek için üç aşamalı bir inceleme yöntemi kullanılmıştır. İlk aşamada, yerel olan "TRDizin" [10] ve uluslararası olan "Scopus" [11], "Web of Science" [12] gibi geniş veri tabanlarında anahtar kelimeler kullanılarak sorgulamalar yapılmıştır. İkinci aşamada kapsamlı bir filtreleme işlemi yapıldıktan sonra üçüncü ve son aşamada, yapılan bilimsel çalışmalar sınıflandırılarak incelenmiştir.

Sorgulamalar "1970-2020" yılları arasında tüm alanları kapsayacak şekilde yapılmıştır. Bu koşullar altında TRDizin'in Fen Bilimleri veri tabanında yapılan sorgulamada "otopark" kelimesi kullanılmış ve 11 tanesi mühendislik, 6 tanesi temel bilimler, 3 tanesi tıp, 1 tanesi ziraat alanında olmak üzere toplam 20 çalışmaya ulaşılmıştır. Fakat maalesef bu çalışmaların hiç biri TOOS'leri konu almamıştır. Diğer taraftan, Scopus ve Web

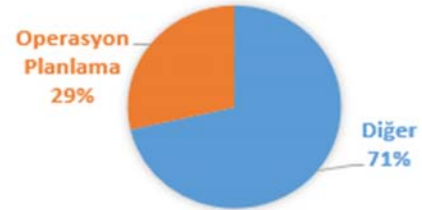
of Science veri tabanlarında İngilizce dilinde konuyla ilgili olabilecek farklı anahtar kelimelerle yapılan taramaların sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmalar içerisinde doğrudan “tam” otomatik otoparkları konu alan çalışmalar dikkate alındığında toplamda 28 yayına ulaşılmıştır. 2020* yılına ait veriler ise yılın ilk 5 ayını kapsamaktadır. Buna rağmen, Şekil 1’de görüldüğü üzere bu yayınların 11 tanesi (toplam yayınların %40’ı) son iki yıl içinde yapılmıştır. Yayınların türleriyle ilgili dağılım aynı şekil üzerinde görülebilmektedir.

Bu makalede detaylı olarak incelenecek olan operasyonel planlama ve kontrol konusuyula ilgili yapılan çalışmaların sayısı, 6 tanesi son iki yıl içinde olmak üzere, 8’dir. Geri kalan 20 çalışma tam otomatik otoparklarda kullanılan/kullanılabilecek mekanik ve elektronik donanımlar, yazılımlar ve bunların tasarımlarıyla ilgilidir (Şekil 2). Literatür araştırmasının sonuçları, son iki yılda yapılan yoğun çalışmalara rağmen hala operasyon planlama konusundaki bilimsel çalışmaların sayısının az olduğu göstermektedir.

3. TAM OTOMATİK OTO PARK SİSTEMLERİ VE TÜRLERİ (FULLY AUTOMATED PARKING SYSTEMS AND THEIR TYPES)

Son yıllarda, hem vatandaşlar hem de yöneticiler için şehir içi ulaşım ile ilgili en önemli sorunlardan biri haline gelen park sorununun geleneksel otopark sistemleriyle

çözümeyeceği anlaşılmıştır. Çok katlı otoparklar, şehir merkezlerindeki sınırlı alanların daha etkin kullanılmasını sağlayarak probleme belirli bir ölçüde çözüm getirmiş olsa da, bu tür sistemlerde hala mevcut alanın önemli bir kısmı erişim rampaları, merdivenler ve asansörler için ayrılmaktadır. Ayrıca tüm geleneksel sistemlerde olduğu gibi, bu tür sistemlerde park yeri arama ve park işlemleri (park etme ve park yerinden çıkma) zaman ve yakıt israfına neden olmakta; bu durum hem çevre hem de araçlar için çeşitli olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.



Şekil 2. Operasyon planlama ve kontrol konusunda yapılan çalışmaların oranı

(The proportion of researches about operation planning and control)

Günümüzde teknolojik gelişmelerin de yardımıyla, alanı daha etkin kullanan ve bu bahsedilen problemlerden kaçınmayı sağlayan çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Bunların içerisinde park yeri/alanı sorununa en etkili ve çevre dostu çözümü sunan Tam Otomatik Otopark Sistemleri (TOOS) yeni nesil otopark sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

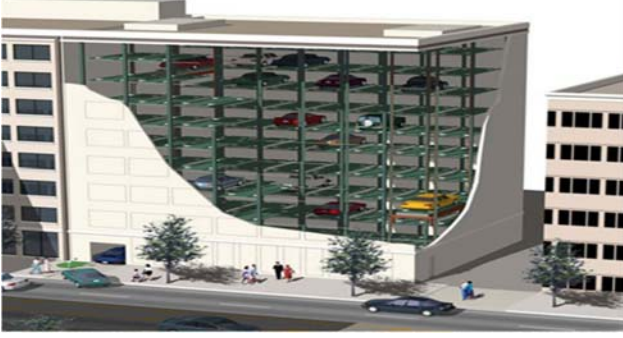
Tablo 1. Literatür taraması sonucu bulunan ve filtrelenen çalışma sayısı
(Number of studies found and filtered as a result of literature review)

Anahtar kelimeler	Sorgulama Sonucu		Filtrelenen (TOOS)	
	Scopus	WOS	Scopus	WOS
“Automate parking system*”	60	34	17	14
“Robotic parking*”	5	6	5	4
“Robotic Vallet*”	2	1	2	1
“Automated parking garage*”	6	3	3	3
“Automated parking structure*”	1	1	1	1
“Automated parking building*”	1	1	0	0
Birleşim	72	44	22	20
Scopus+WOS (filtrelenmiş)			28	



Şekil 1. Yıllara göre yayın sayısı ve yayın türü (The number of publications, and type of publications by years)

Sensor teknolojilerinden yararlanan bu sistemlerde, tüm park işlemleri (aracı döndürme, kaldırma, taşıma, yerleştirme vb.) otomatik taşıyıcılarla yani robotlarla gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle TOOS'ler, robotik otoparklar veya robotik vale sistemleri olarak da adlandırılabilir.



Şekil 3. Örnek bir TOOS yapısı [13]
(An example of FAPS structure [13])

TOOS'ler, çok katlı modüler garajlarda araçları depolamak ve geri almak için mekanik sistemleri (asansör, palet vb.) çeşitli yazılımlarla bütünleştiren akıllı sistemlerdir. Yapısal olarak depolara benzeyen bu sistemler park edilen araçların yerleştirildiği raf ve hücrelerden (yuvalardan) oluşmaktadır. Şekil 3'de görüldüğü üzere bu sistemlerde geniş park bölmelerine ve erişim rampalarına, merdivenlere ve yaya asansörlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca, geleneksel park sistemlerine kıyasla araçları birbirine daha yakın istiflemeye olanak sağlayan robotlar sayesinde dikey ve yatay alan daha verimli kullanılabilir. Böylece TOOS'lerde mevcut alanın çok büyük bir kısmı araçları park etmek için kullanılabilir. Örneğin geleneksel bir otopark sisteminde yatay (yüzey) alanın %41'i araçları park etmek için kullanılırken, bu oran bir TOOS ile %84'e kadar çıkarılabilir [11]. Bununla birlikte, park etme işleminin robotlar yardımıyla yapıyor oluşu zaman ve yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Öte yandan otoparklarda aydınlatma ve havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulmaması enerjiden de tasarruf edilmesini sağlamaktadır [8]. Böylece TOOS'ler park yeri sorununa çevreci bir çözüm sunarken, avantajlı maliyetlerle işletilebilir. Ayrıca, TOOS'ler, hem araçlar hem de sürücülerin karşılaşabileceği riskler açısından da (kaza, çalınma, doğal afetler vb.) önemli bir güvenlik üstünlüğü sunmaktadır. Sonuç olarak geleneksel otoparklarla karşılaştırıldığında, TOOS'lerin sağladığı yararlar şu şekilde özetlenebilir:

- Daha etkili/verimli alan kullanımı
- Zaman ve yakıt tasarrufu
- Enerji tasarrufu
- Daha düşük işletim maliyeti
- Daha güvenli yapılar

Bu bağlamda, park sistemlerinin geleceği olarak görülen TOOS'lere ilgi dünya genelinde artmaktadır [15]. Japonya ve Kore'nin yanı sıra, şehirlerindeki nüfus yoğunluğu nedeniyle Çin ve Hindistan gibi ülkelerde de bu sistemlerin sayısı her geçen gün artmaktadır. Avrupa ve Amerika

kıtasında ise, yapıların kendi otopark ihtiyacını karşılamak için kullanılan bu sistemlere olan ilgi 2000'li yılların başından itibaren artış göstermiş ve farklı bir boyut kazanmıştır. Örneğin, altı tanesi 2011 yılında olmak üzere, 2000-2012 yılları arasında Amerika'da kurulan ve ticari olarak hizmet veren TOOS'lerin sayısı on beş olmuştur [16]. Türkiye'de de aynı eğilimden söz etmek mümkündür. Türkiye'de 4 tanesi 2010-2016 yılları arasında kurulmuş olan ve ticari anlamda hizmet veren beş adet TOOS bulunmaktadır [17]. Fakat bu sayının giderek artacağı düşünülmektedir. Nitekim İzmir ve Trabzon şehirlerinde proje aşamasında olan iki TOOS yapısı/binası bulunmaktadır. Ayrıca, İstanbul'da yaşanan park sorununa çözümler arayan İSPARK (İstanbul Otopark İşletmeleri Tic. A.Ş.), kurduğu yarı otomatik otopark sistemlerinin yanı sıra ciddi yatırımlar yaparak tam otomatik otoparklar kurmayı planlamaktadır [18].

3.1. Tam Otomatik Otopark Sistem Türleri (Types of Fully Automated Parking Systems)

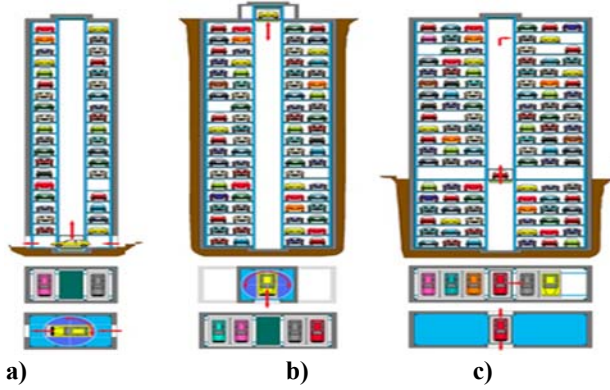
TOOS'lerin ilk kurulum maliyeti geleneksel otoparklara göre daha yüksek olsa da, önceki bölümde bahsedildiği üzere, alandan sağlanan tasarruf ve işletim maliyetleri göz önüne alındığında TOOS'ler daha avantajlı bir seçenek haline gelmektedir [1, 19]. İhtiyaçlar ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda, sektördeki üreticiler tarafından farklı yapısal ve fonksiyonel tasarımlara sahip birçok TOOS projesi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Araç depolama şekilleri ve kullandıkları taşıma sistemleri farklılık gösteren bu yapıların, ilk kurulum maliyetleri, kapasite ve operasyonel hızları da doğal olarak farklılık göstermektedir. TOOS'ler taşıdıkları farklı özelliklerine göre sınıflandırılabilir olsa da genellikle kullandıkları taşıma sistemlerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu bağlamda, en yaygın TOOS tipleri aşağıda listelenip kısaca açıklanmıştır [20].

3.1.1. Kule/Lift tipi sistemler (Tower/Lift parking systems)

Kule/Lift tipi sistemler genellikle sağ ve sol tarafında park hücreleri bulunan bir araç asansöründen oluşmaktadır. Bu sistemlerde araçlar sürücüler tarafından transfer kabini içindeki asansörün üzerine bırakılmaktadır. Araçlar, park işlemi için uygun şekilde döndürüldükten sonra asansörle ilgili kata çıkarılıp/indirildikten sonra, asansörün sağ ya da sol tarafında bulunan boş bir hücreye yerleştirilmektedir. Geri alma işlemi de bunun tersi şeklinde gerçekleşmekte: araç hücresinden alınıp, transfer kabini asansörle getirildikten sonra, çıkış yapabilecek pozisyonda sürücüye teslim edilmektedir.

Şekil 4'te farklı tasarımlara sahip kule tipi tam otomatik otopark yapıları görülmektedir. Tek bir koridor ve asansörden oluşan bu sistemler tamamen yer üstünde (Şekil 4a), tamamen yer altında (Şekil 4b), veya yapının bir kısmı yer altında (Şekil 4c) olacak şekilde inşa edilebilir [22]. Ayrıca, asansörle ulaşılan her kattaki hücre sayısı da ihtiyaca göre değişkenlik gösterebilmektedir. Kapasiteyi arttırmak amacıyla asansörün sağ ve sol tarafına birden fazla araç park

edilebilecek şekilde derinlikli raf sistemleri (Şekil 4b, Şekil 4c) tasarlanabilir. Kule tipi sistemlerin kurulum maliyeti diğer sistemlere göre nispeten daha düşüktür. Alanı oldukça etkin kullanılabilen bu sistemlerde tek asansör bulunduğu için sistemin işlem/operasyon kapasitesi düşüktür. Bu nedenle, operasyonel anlamda kapasiteyi arttırmak için yan yana birden fazla kule inşa edilebilmektedir [23].



Şekil 4. Farklı tasarımlara sahip kule tipi TOOS'ler [21]
(Tower type FAPS with different designs [21])

3.1.2. Silo tipi sistemler (Silo parking systems)

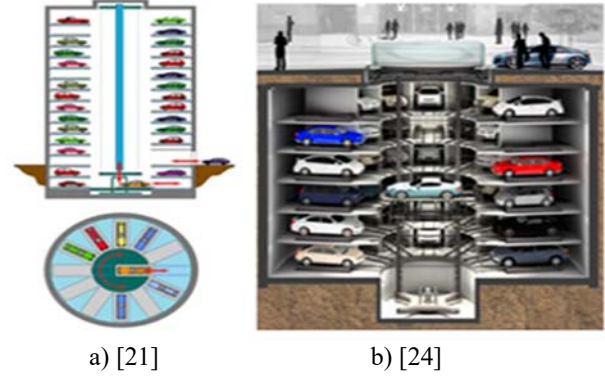
Silo tipi sistemler, araçları park etmek ve almak için merkezde konumlandırılmış tek bir mekanizmaya sahip silindirik sistemlerdir. Bu sistemler, ana hatlarıyla kule tipi sistemlere benzeseler de yapının şekli ve kullanılan taşıma sistemi açısından farklılık göstermektedir. Araçlar silindir şeklindeki yapının dış yüzeyine park edilirken, yapının merkezinde araçların aşağı/yukarı ve dairesel hareketlerini eş zamanlı gerçekleştirebilen bir mekanizma bulunmaktadır (Şekil 5). Böylece bir park hücresinden diğerine geçiş oldukça hızlı gerçekleşebilmektedir [20].

Merkezi taşıma sistemine birden fazla platform eklenebilmesine rağmen, genellikle silo tipi sistemlerde tek seferde yalnızca bir araç park edilebilmekte veya geri alınabilmektedir. Kule tipi sistemlerde olduğu gibi işlem kapasitesini arttırmak için yan yana birden fazla sistem kurulabilmektedir.

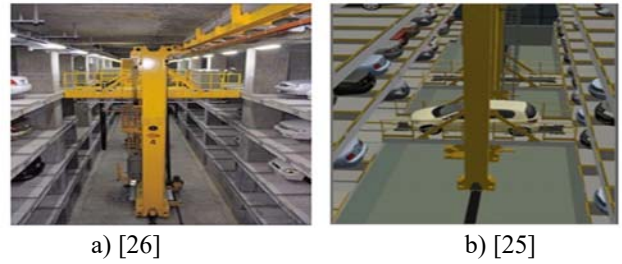
3.1.3. Vinç'li sistemler (Crane parking systems)

Bu tür sistemlerde park işlemleri, yapının merkezinde bulunan, hem dikey hem de yatay hareket edebilen vinçler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, vinç mekanizması zemin ve tavanda bulunan raylar

üzerinde yatay hareket ederken aynı zamanda üzerinde bulunduğu asansör/platform da dikey olarak hareket etmektedir. Bu sayede araçlar belirlenen park yerine (hücresine) oldukça hızlı bir şekilde ulaştırılmaktadır [25].



Şekil 5. Farklı tasarımlara sahip silo tipi TOOS'ler
(Silo Type FAPS with different designs)

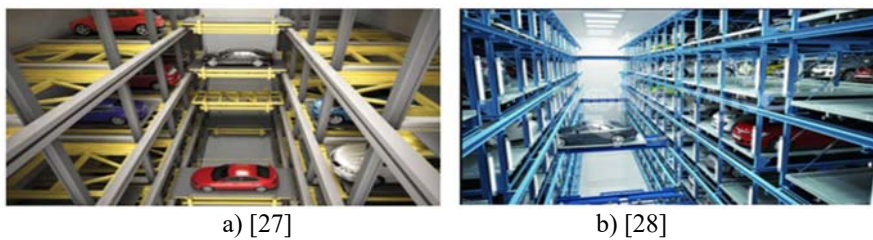


Şekil 6. Farklı tasarımlara sahip vinç tipi TOOS'ler (Crane type FAPS with different designs)

3.1.4. Mekik tipi sistemler (Shuttle parking systems)

Mekik tipi sistemlerde katlar arası taşıma için yine asansörler kullanılmaktadır. İlgili katta araçları asansörden alıp uygun bir yere yerleştirmek için ise yatay şeritler üzerinde hareket eden mekikler kullanılmaktadır. Mekikler, katlarda belirlenen hücrelere ulaşmak ve aracı bırakmak için yatay hareket etmektedir. Araçları mekiğe yerleştirmek, taşımak ve park yerine bırakmak için robotlar, paletler, taşıma kayışları vb. gibi farklı ekipmanlar bu sistemlerde kullanılabilmektedir [20].

Yapının büyüklüğüne bağlı olarak genellikle belirli sayıda asansörle birlikte, her katta bir mekik bulunmaktadır. Bu nedenle bu sistemlerin işlem kapasitesinin diğer sistemlerle göre daha yüksek olduğu söylenebilir. Genellikle mekik



Şekil 7. Farklı tasarımlara sahip mekik tipi TOOS'ler (Shuttle type FAPS with different designs)

şeridinin iki yanında birer araçlık park yeri bulunmasına rağmen (Şekil 7a) daha fazla park alanı sağlamak amacıyla şeridin yanlarına ikinci hatta üçüncü bir sıra eklenebilmektedir (Şekil 7b). Hem işlem kapasitesi hem de alanı verimli kullanması açısından oldukça etkili olan bu sistemlerin kuruluş maliyeti diğer sistemlere göre biraz daha yüksek olabilmektedir [23].

3.1.5. Bulmaca tipi sistemler (Puzzle parking systems)

Tüm otopark sistemleri içerisinde en yüksek yoğunluklu araç park etme becerisine sahip olan sistemler yatay olan bulmaca (horizontal puzzle) tipi sistemlerdir [20]. Yüzey alanının yaklaşık %95'ini etkin bir şekilde park için kullanabilen bu tam otomatik sistemler, mekanik veya yarı otomatik olan dikey (vertical puzzle) sistemlerle karıştırılmamalıdır. Çok küçük alanlara bile kurulabilen bu sistemler, temel olarak yüzey üzerinde hareket eden paletlerden ve bu paletlerin yerleştiği hücrelerden oluşmaktadır (Şekil 8). Paletler 4 yönde manevra kabiliyetine sahiptir. Paletler buldukları hücreden bir diğerine kayarak hareket eder ve nihai varış noktasına (asansör, belirlenen park yeri, giriş-çıkış odası vb.) ulaşmaktadır. Bu hareketlerin mümkün olabilmesi için sistemde en az bir boş hücrenin bulunması ve paletlerin istenilen noktaya ulaşabilmesini sağlayacak yolun/rotanın oluşturulması gerekmektedir. Sisteme de adını veren, çözülmesi gereken bu bulmaca problemidir [14].

Hareketli paletlerden oluşan sistemin en önemli avantajlarından biri de yapıya şekilsel esneklik sağlamasıdır. Paletler herhangi bir yönde manevra yapabildiği sürece yapının/binanın kare veya dikdörtgen olmasına gerek yoktur. Bununla birlikte bulmaca tipi sistem işlem kapasitesi en yüksek olan sistemlerden biridir. Sistemdeki boş hücre sayısı, asansör ve giriş/çıkış nokta sayısı işlem kapasitesinin ayarlanması için kullanılan parametrelerdir. Bu avantajlarının yanında, kurulum ve işletim maliyetinin diğer sistemlere göre daha yüksek olması ve park etme/geri alma işlemlerinin daha karmaşık olması bu sistemin dezavantajları arasında sayılabilir.



Şekil 8. Bulmaca tipi TOOS [20] (Puzzle type FAPS [20])



Şekil 9. AGV'li TOOS [29] (AGV parking system [29])

3.1.6. AGV'li sistemler (AGV parking systems)

AGV (Automated Guided Vehicle) teknolojisi uzun yıllardır depolarda kullanılmasına rağmen araçları park etmek için kullanılmaya başlandı. Araçları taşıyan paletleri hareket ettirmek için kullanılan AGV'ler, diğer sistemlerdeki taşıyıcıların aksine belirli bir yön veya şeritle kısıtlanmazlar [20]. Bu sistemlerde araçlar, buldukları yerden park edilmek ya da teslim edilmek üzere herhangi bir AGV ile alınabilmekte, herhangi bir rotayla varış noktasına ulaştırılabilmektedir (Şekil 9).

Araçların herhangi bir AGV ile taşınması, AGV'lerin aynı anda aynı yolu kullanabiliyor olması ve tek bir rotayla sınırlandırılmaması sisteme oldukça büyük bir esneklik sağlamaktadır. Bu nedenle sistemin işlem kapasitesi AGV sayısına bağlı olarak oldukça yüksek olabilmektedir.

4. TAM OTOMATİK OTO PARK SİSTEMLERİNİN TASARIM ÖZELLİKLERİ (THE DESIGN FEATURES OF FULLY AUTOMATED PARKING SYSTEMS)

Tam otomatik otoparklar, sınırlı alanlara ve hacimlere çok sayıda araç park edilmesini sağlayarak şehirlerdeki park yeri sorununa etkili bir çözüm sunmaktadır. Buna rağmen, TOOS'lerde tasarım ve/veya işletme (operasyon) aşamasındaki kötü *planlamadan* kaynaklanan sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle bilimsel yazında tasarım [30-32] ve donanım konularına odaklanan pek çok çalışma bulunmaktadır [33, 34]. TOOS'lerin tasarım kararları optimum kapasite, kullanım yoğunluğu, sistem performansı gibi birçok konu/kriter göz önünden bulundurulmaktadır [35-37]. Sözü edilen tasarım hedeflerinin dışında, maliyet, proje alanının yapısal koşulları, otoparkın trafik akışıyla ilişkisi, kullanılacak kaynaklar, çevresel ve yasal düzenlemeler yine tasarım aşamasında dikkate alınması gereken hususlardır [17]. İhtiyaçlar, bütçe, fiziksel ve teknik kısıtlar dikkate alınarak, en ideal tasarım için Tablo 2'de listelenen sistem özellikleri ile ilgili kararlar verilmektedir [31, 33, 35, 36, 38].



Tablo 2. TOOS'lerin temel tasarım özellikleri
(The basic design features of FAPSs)

Tasarım Kararı	Olası seçenekler
Yapının Şekli	Dikdörtgen, Dairesel, L veya U şeklinde
Raf Sistemi	Tek derinlikli veya çok derinlikli
Taşıma Sistemi	Silo, kule, mekik, vinç, bulmaca, AGV
Taşıyıcı/Robot/Asansör Sayısı	Bir veya birden fazla
Giriş-Çıkış Noktası Sayısı	Bir veya birden fazla

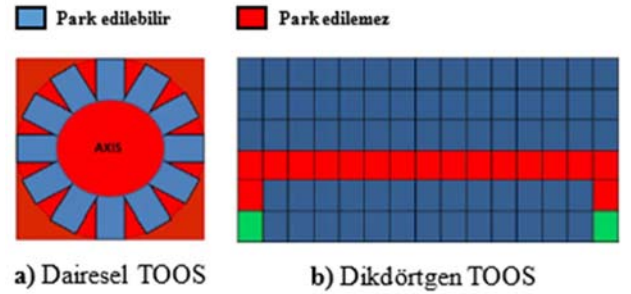
* Kararlar arasında belirli bir hiyerarşi yoktur, her biri diğerine belirli bir ölçüde bağlıdır.

Yapının şekli, düzeni (layout) ve kullanılacak taşıma sistemi gibi konular TOOS'lerin ana tasarım kararlarını oluşturmaktadır [31, 33, 35]. Ayrıca sistemde kullanılacak taşıyıcı (asansör, robot vs.) sayısı, koridor sayısı, yapının giriş/çıkış nokta sayısı vb. diğer önemli tasarım kararları arasında yer almaktadır [30, 36]. Kararlar arasında belirli hiyerarşi olmamasına rağmen, tasarım kararları birbirine belirli bir ölçüde bağlıdır. Örneğin silo tipi taşıma sistemi kullanılacaksa, dairesel bir yapı inşa edilmektedir. Tasarım özellikleri ile ilgili diğer seçenekler (taşıyıcı sayısı, giriş-çıkış noktası sayısı vb.) ise performans ve maliyet gözetilerek değerlendirilmektedir [38]. Öte yandan dikdörtgen şeklinde bir yapı inşa edilecekse, çok farklı taşıma sistemleri çok farklı raf konfigürasyonlarıyla kurulabilmektedir [33]. İhtiyaçlar (kapasite, kullanım yoğunluğu vb.) ve çeşitli kısıtlar (fiziksel ve teknik kısıtlar, bütçe vb.) dikkate alınarak belirlenen tasarım özellikleri, aynı zamanda sistemde gerçekleştirilecek operasyonel faaliyetleri ve sistemin performansını etkileyen en önemli parametrelerdir [36, 39]. TOOS'lerin tasarım konusu, operasyonel etkinlik ile verimli alan kullanımı arasındaki ters orantıdan dolayı zorlu bir problem haline gelmektedir. Kapasite, performans ve maliyet dikkate alınarak en ideal tasarım planı, tasarım seçeneklerinin sağladığı avantaj ve dezavantajlar dikkate alınarak oluşturulmalıdır. TOOS'lerin tasarım özellikleri, alanı verimli kullanma ve operasyonel kolaylıklar/zorluklar çerçevesinde ilerleyen alt başlıklarda incelenmiştir.

4.1. Yapının şekli (Shape of the structure)

Alanı daha etkin kullanmak ve işlem süresini kısaltmak için farklı şekillerde otopark binaları tasarlanmıştır/tasarlanmaktadır. Ancak yukarıda da değinildiği gibi alanı verimli kullanmak ile operasyonel kolaylık/hız arasında bir ters orantı söz konusudur. Örneğin, dairesel tasarıma sahip sistemlerde operasyonel işlemler daha kolay ve hızlı gerçekleştirilmesine rağmen, bu sistemlerin alanı faydalı kullanım oranı dikdörtgen yapılara göre oldukça düşüktür (Şekil 10). Bu nedenle operasyonel zorluklarına rağmen dikdörtgen yapıdaki TOOS'ler, sınırlı park alanlarını daha verimli kullandıkları için pratikte daha çok tercih edilmektedir. Şekil 10a'da silo tipi dairesel bir TOOS'den kesit ve Şekil 10b'de derinlikli raf sistemine

sahip dikdörtgen yapıdaki bir TOOS'den kesit görülmektedir. Bahsedilen iki temel tasarımın, alan kullanımını konusundaki etkinliğini karşılaştıran çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Nayak vd. [31] yaptıkları çalışmada, dairesel bir TOOS'un kat alanının yalnızca %34'ü faydalı kullandığını, dikdörtgen bir TOOS'nin ise %78'ini kullandığını göstermişlerdir. Başka bir araştırma ise [14] dikdörtgen yapıdaki bir TOOS'nin yüzey alanını %84'e kadar faydalı kullanabildiğini ortaya koymaktadır. Şekilsel olarak daha esnek yapılar kurulmasına imkân sağlayan bulmaca tipi sistemler de genellikle dikdörtgen bir yapıdadır ve yüzey alanının %95'ini etkin bir şekilde kullanabilmektedir [20]. Bununla birlikte, alanı bu kadar etkin kullanabilen bu tip sistemlerde park etme ve geri alma işlemleri, her bir araca direkt ve hızlı erişim sağlayan dairesel sistemlere göre çok daha karmaşık ve yavaş olmaktadır [40].



Şekil 10. Farklı tasarımlara sahip TOOS'lerin yatay alanı kullanım oranı [31]
(Horizontal area utilization rate of different FAPS designs [31])

4.2. Raf düzeni (Shelves layout)

Yapıların şekilsel özelliğinin yanı sıra, TOOS'lerin raf sistemleri ve araç park etme düzenleri de alanın faydalı kullanımına etki eden önemli parametrelerdir. TOOS'lerin çoğunda depo sistemlerinde olduğu gibi raflar ve her bir aracın park edildiği hücreler/yuvalar (slot) bulunmaktadır. Aynı şekilde depolarda olduğu gibi bu raf sistemleri tek derinlikli (Şekil 4a, Şekil 5a, Şekil 6a, Şekil 7a) veya çok derinlikli olabilmektedir (Şekil 4b, Şekil 4c, Şekil 6b, Şekil 7b). Tek derinlikli raf sistemine sahip yapılarda alan kullanım oranı %67 iken, çok derinlikli raflarla bu oran %84'e kadar çıkarılabilmektedir [14]. Tek derinlikli raflara sahip sistemlerde, koridorda hareket eden taşıyıcıların her bir araca direkt erişimi mümkün olmaktadır. Aynı zamanda bu tür sistemlerde park halindeki araçlar, park süresince aynı noktada kalacağı için statik bir depolamadan söz edilebilir. Fakat çok derinlikli raflara sahip sistemlerde yeni bir park işlemi, yuvalarda bulunan araçların kaydırılmasını, yerinin değiştirilmesini gerektiren dinamik bir depolama sürecine sahiptir [21]. Ayrıca bu tip sistemlerde geri alma işlemi sırasında iç yuvalarda bulunan araçlara erişmek daha zor olmaktadır. Özellikle çıkacak aracın önünde araç varsa, öncelikle bu aracın yerinin değiştirilmesi gerekeceğinden işlem süresi oldukça uzayacaktır. Böyle bir durumda, bu karmaşık operasyonların/işlemlerin planlanması ve kontrol edilmesi TOOS'lerin performansını açısından daha da önemli bir konu haline gelmektedir.

4.3. Taşıma sistemi (Transport system)

Alan kullanımı kadar önemli bir diğer tasarım konusu, yapıda kullanılacak taşıma sisteminin belirlenmesidir. Daha önce de bahsedildiği gibi TOOS'ler, park ile ilgili tüm taşıma, yerleştirme ve geri alma işlemlerinin otomatik taşıyıcılarla gerçekleştirildiği yeni nesil araç depolama sistemleridir. Araştırmacılar ve sektördeki üreticiler tarafından otopark içerisinde gerçekleşen operasyonları otomatik olarak gerçekleştiren pek çok farklı teknoloji ve sistem önerilmiş ve uygulanmıştır. Bu bağlamda farklı tasarım ve teknolojilere sahip TOOS'lerin etkinliğini araştıran bilimsel çalışmalar mevcuttur [8, 31, 32, 41]. Yapıda kullanılacak taşıma sistemine karar verilirken büyük ölçüde proje alanına, bina yapısına, kapasite ihtiyacına, kullanım yoğunluğuna ve bütçeye dikkat edilmektedir. Yapının şekli, raf/park yeri düzeni ve kullanılacak ekipmanlar kullanılan taşıma sistemine bağlı olmakla birlikte, bunun tersi durum da geçerlidir. Kullanılan ekipmanlara göre farklı sınıflandırmalar yapılabilmesine rağmen (paletli, kartlı vb.) temel olarak taşıma sistemleri, araçları taşıyıp yerleştiren sistemlere (lift/kule, shuttle/mekik, crane/vinç, AGV vs.) göre sınıflandırılmaktadır [20, 21, 23]

4.4. Diğer tasarım parametreleri (giriş-çıkış kabini, asansör, taşıyıcı ve boş hücre sayısı)

(Other design parameters (number of entrance-exit bay, lifts/elevators, transporters, empty slots))

Sistemin işlem kapasitesini belirleyen giriş-çıkış kabin sayısı, asansör/koridor/taşıyıcı sayısı ve boş hücre sayısı parametreler ana tasarım kararlarıyla birlikte değerlendirilmesi gereken önemli konular arasında yer almaktadır. Bu noktada, sistemin kullanım yoğunluğu yani müşteri yoğunluğu bu kararlar alınırken dikkat edilmesi gereken en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır [30, 35, 36]. Sözü edilen tasarım elemanlarının sayısının artırılması, sistemin işlem kapasitesi dolayısıyla hızını arttıracaktır fakat aynı zamanda araç park etmek için ayrılan alanların bir kısmının bu yapılara tahsis edilmesi gerektirecektir. Alanın verimli kullanımı ile sistemin işlem kapasitesi arasındaki bu denge gözetilerek uygun kararlar alınmaya çalışılmaktadır [36]. Ayrıca tasarım elemanlarının her biri ek maliyet oluşturacağı için bütçe kısıtı da göz önünde bulundurulmalıdır [17].

5. OPERASYONEL PLANLAMA VE KONTROL PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI (OPERATIONAL PLANNING AND CONTROL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACHES)

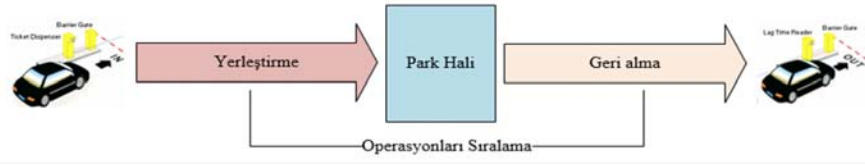
Araçları park yerine (hücresine) getirip götürme yöntemi, kullanılan taşıma sistemine göre farklılık gösterse de park etme işlemi kullanılan teknolojiden bağımsız olarak tüm TOOS'lerde aynı şekilde gerçekleşmektedir. Bu sistemlerde sürücüler araçlarını park odasında bırakırlar. Bu noktadan sonra müşterilerin işlemin bitmesini beklemelerine gerek yoktur; zira araçlar sürücüsüz olarak, taşıyıcılar yardımıyla, rastgele ya da önceden belirlenmiş bazı kurallara göre boş

hücelere yerleştirilmektedir. Daha sonra müşteriler tekrar gelip araçlarını almak istediklerinde, araçlar yine taşıyıcılar yardımıyla buldukları hücrelerden alınıp park odasında müşteriye teslim edilmektedir. Fakat geri alma işlemi sırasında, müşteriler aracı almak istedikleri andan itibaren, araç kendilerine teslim edilene kadar geçen süre boyunca beklemek zorunda kalmaktadırlar. Sistemin operasyonel etkinliği ve verimliliği ile doğrudan ilişkili olan bu bekleme süresi, müşteri memnuniyeti açısından oldukça önemlidir. Doğru bir operasyonel planlama ile bu bekleme süreleri önemli ölçüde azaltılarak müşteri memnuniyeti artırılabilir [36, 42, 35, 37]

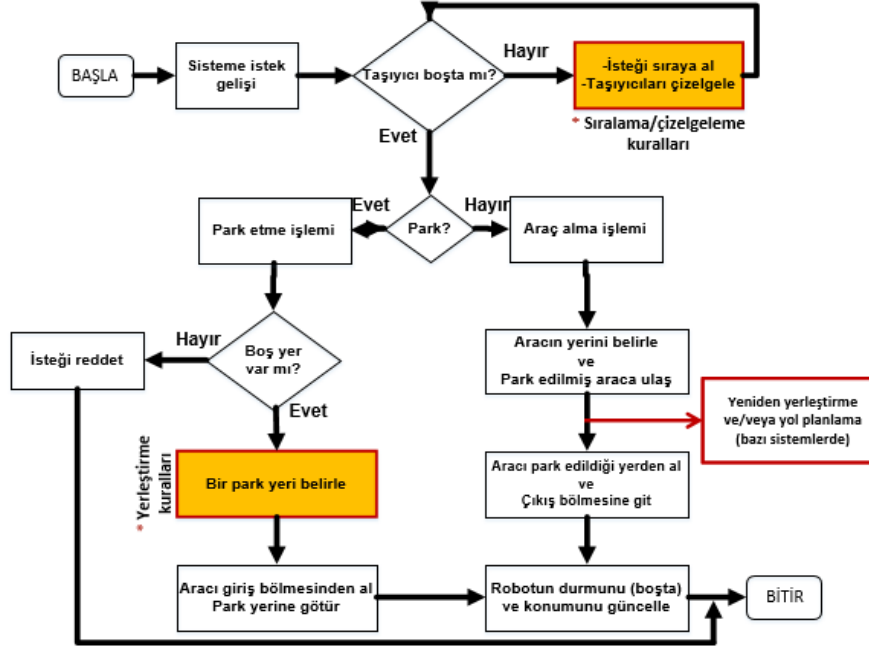
Şekil 11'de gösterildiği gibi tasarımdan ve taşıma sisteminden bağımsız olarak, TOOS'lerde gerçekleştirilen iki temel operasyon vardır: (i) araçları yerleştirme ve (ii) araçları geri alma. Bu süreçte operasyonlar yürütülürken, sistemde işlemlerin hangi sırada yapılacağı (sequencing) ve park edilen aracın nereye yerleştirileceği (allocation) gibi iki temel karar problemiyle karşılaşmaktadır. Araç yerleştirme ve geri alma işlemleri sistem tarafından eş zamanlı olarak ve genellikle ilk gelen ilk hizmet görür politikasına göre gerçekleştirilmektedir. Yerleştirme işlemi sırasında ise araçlar genellikle en yakın boş yere yerleştirilmektedir. Sistemde birden fazla giriş/çıkış noktası ve birden fazla taşıyıcı olması durumunda, robotların hareketlerinin belirlenmesi ve çizelgelenmesi de gerekmektedir [14, 35]. Söz konusu operasyonlar iyi yönetilemediği takdirde, bu durum düşük operasyonel etkinliğe, uzun hizmet sürelerine, verimsiz enerji kullanımına ve dolaylı yüksek maliyetlere yol açabilmektedir.

5.1. TOOS'lerde Operasyonel Problemlerin Genel Yapısı (General Structure of Operational Problems in FAPSs)

TOOS'lerde araç yerleştirme ve geri alma işlemleri sensör, asansör, palet gibi pek çok mekanik ve elektronik donanımı, kontrol ve koordine eden sistemler ile gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlere ait genel bir işlem ve akış diyagramı Şekil 12'de verilmiştir. Tasarım ve sistem özelliklerinden bağımsız olarak TOOS'lerde işlemler gerçekleştirilirken (i) işlemlerin hangi sırada yapılacağı (sequencing) ve (ii) park edilen aracın nereye yerleştirileceği (allocation) gibi iki temel karar problemiyle karşılaşmaktadır. Bununla birlikte, ele alınan TOOS'nin tasarımına bağlı olarak operasyonel işlemlerin ve kararın sayısı artabilmektedir. Bahsedilen temel karar/planlama problemlerine ek olarak, birden fazla taşıyıcının olduğu TOOS'lerde (iii) taşıyıcıları çizelgeleme (scheduling); derinlikli raf sistemine sahip TOOS'lerde (iv) yeniden yerleştirme (realllocation); ve bazı özel taşıma sistemlerine sahip TOOS'lerde (örn. Puzzle tipi TOOS) (v) yörünge (path) planlama problemleriyle de karşılaşabilmektedir [30, 43]. Bu makale kapsamında, özellikle TOOS'lerde karşılaşılan ilk iki planlama problemi üzerinde durulmuştur. Mevcut sistemlerde bu problemleri çözmek için kullanılan/kullanılabilecek çözüm yöntemleri araştırılmıştır. Söz konusu operasyonlar ve bunlarla ilgili kararlar iyi yönetilemediği takdirde, sistemin performansı ve maliyetleri ile ilgili önemli sorunlar ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 11. TOOS'lerde temel operasyonel işlemler (The fundamental operational processes in FAPSs)



Şekil 12. TOOS'lerin genel işlem akış diyagramı (The general process flow diagram of FAPSs)

Benzer problemler uzun yıllardır farklı sistemlerde çalışılmasına rağmen tam otomatik otoparklarda operasyon planlama konusu oldukça yeni sayılmaktadır. Ayrıca mevcut çalışmaların çoğu, yerleştirme ve geri alma işlemlerinin yalnızca biriyle ilgilenebilir. Otoparklarda eş zamanlı gerçekleşen talepleri ve işlemleri operasyonel planlama ve kontrol kapsamında birlikte ele alan çalışmaların sayısı sınırlıdır [14, 36, 37, 44].

TOOS'lerde operasyonel planlama ve kontrol problemleri, sistemin oldukça dinamik ve belirsiz yapısı (müşterilerin giriş-çıkışları, park süreleri vs.) nedeniyle tanımlanması ve çözülmesi zor problemlerdir. Bu nedenle pratikte operasyonları planlamak ve yürütmek için kullanılan sistemlerde sıkça sezgisel (heuristics) yöntemlerden ve dağıtım kurallarından (dispatching rules) yararlanılmaktadır [14, 44, 37, 42].

5.2. TOOS'lerde Operasyonel Problemlerin Genel Yapısı (General Structure of Operational Problems in FAPSs)

Otoparklarla ilgili güncel çalışmalar, TOOS'lerin, park alanlarını geleneksel otoparklara kıyasla çok daha verimli kullandığını vurgulamaktadır [15, 45, 46]. Sağladıkları tüm avantajlara rağmen TOOS'lerin kullanıcılar tarafından tercih edilirliliğini azaltan bazı hususlar bulunmaktadır. Örneğin

TOOS'lerin park ücretlerinin geleneksel otoparklara kıyasla biraz daha yüksek olması bunlardan biridir. Ancak, TOOS'lerle ilgili kullanıcılar açısından en çok memnuniyetsizlik yaratan durum, sistemin hizmet süresidir; başka bir deyişle müşterilerin bekleme süresidir. Müşteriler günün belirli saatlerinde, özellikle iş giriş-çıkış saatleri gibi yoğun saatlerde, arabalarını park edebilmek veya geri alabilmek için uzun süre beklemek zorunda kalabilmektedirler [44, 35, 47].

Teknolojik gelişmeler (sensör, wireless, RFID vb.) [48-50]., teknik anlamda iyi çalışan ve çok kısa süreler içerisinde (70 - 200 saniye) park işlemlerini gerçekleştirebilen sistemler kurma imkânı sağlamıştır [51]. Sonuç olarak, müşterilerin uzun bekleme sürelerinin nedeni, sistemin operasyon (işlem) hızından ziyade, tasarım aşamasında belirlenen işlem kapasitesi olduğu anlaşılmaktadır. Genellikle TOOS'lerin alan kullanımı ile operasyonel kapasitesi ve yönetim kolaylığı arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Bu nedenle tasarım aşamasında teknik ve fiziksel kısıtlara ek olarak, yüksek bir alan kullanım oranı hedeflendiğinde işlem kapasitesi en yüksek düzeyde belirlenemeyebilir. Buna rağmen doğru bir operasyonel planlama ile belirlenen/mevcut işlem kapasitesi en etkin şekilde kullanılarak hizmet süreleri planlanan düzeyde tutulabilir. Bu bağlamda, operasyonel planlama ve kontrol probleminin

parametreleri, temel karar değişkenleri, performans ölçütleri ve aralarındaki hiyerarşik ilişki Şekil 13'de gösterilmiştir. Bulgular, sistemin fiziksel ve teknik özelliklerinin operasyonları ve operasyonel problemleri şekillendirdiğini göstermektedir. Sistemin tasarım (fiziksel ve teknik) özellikleri ise ilk aşamada müşteri profiline göre belirlenmektedir/belirlenmelidir. Sistemin genel performansını ise müşteri profili ile tasarım özelliklerinin uyumu ve ortaya çıkan operasyonel problemlerin ne kadar etkili çözüldüğü ile ilgilidir. Bu durumda müşteri davranışlarının doğrudan ve dolaylı olarak operasyonel kararlar ve sistem performansı üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. TOOS'lerin operasyonel performansını arttırmak ise, müşteri memnuniyetini arttıracak ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltacaktır. Müşteri memnuniyeti açısından, müşterilerin sistemde bekleme süreleri önemli bir performans ölçüsüdür. Bekleme süresi ise sistemin operasyonel etkinliği ve verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Müşterilerin bekleme süresi sistemde kat edilen toplam mesafe veya ortalama işlem süresi ile ölçülmektedir [37, 44, 42]. Bu nedenle operasyonel planlama ve kontrol sorunlarını ele alan yöntemler ve algoritmalar geliştirmek sistemin tasarım aşaması kadar önemli bir süreç haline gelmektedir.

5.3. Temel Planlama ve Kontrol Problemleri (Fundamental Planning and Control Problems)

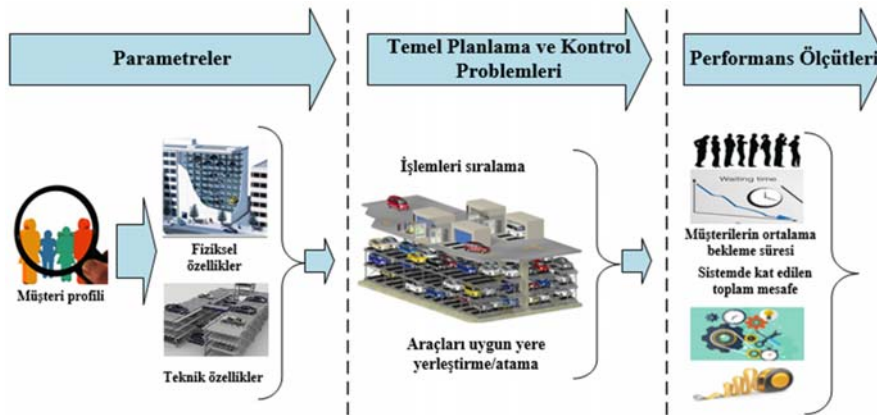
İşlemlerin Sıralanması (Sequencing): TOOS'lerde çok sayıda park etme ve geri alma isteği eş zamanlı olarak gelebilmektedir. Sistemde tek bir taşıyıcı varsa bu işlemlerin sıralanması, birden fazla taşıyıcı varsa da çizelgeleme gerekmektedir. Hem sıralama hem de çizelgeleme problemlerini çözmek için TOOS'lerde genellikle "ilk gelen ilk hizmet görür" (first come first served - FCFS) kuralına göre işlem yapılmaktadır. Ancak, farklı sıralama (dağıtım) kuralları müşteri profiline ve sistem tasarımına bağlı olarak daha iyi performans gösterebilmektedir. Sıralama problemi göz önüne alındığında, ilk önce gelen ilk önce işlem görür anlayışı, bireysel bekleme süreleri açısından iyi sonuçlar sağlayabilir. Fakat müşterilerin toplam/ortalama bekleme süresi, sistem performansı ve genel memnuniyet açısından

daha iyi bir göstergedir. Öte yandan, sistemdeki toplam/ortalama bekleme süresi verimlilikle doğrudan ilişkilidir. Örneğin taşıyıcının kat ettiği toplam mesafeyi azaltacak bir sıralama, toplam bekleme süresini dolayısıyla ortalama müşteri bekleme süresini azaltacaktır [42, 44].

Araçların Yerleştirilmesi (Allocation): Mevcut sistemlerin çoğunda araçların nereye yerleştirileceğine karar verilirken, basit bir sezgisel yöntem olan "en yakın boş yere (hücreye) yerleştir" (nearest neighbor method – NNM) kuralı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım söz konusu operasyon sırasında taşıyıcının kat ettiği mesafeyi azaltmayı sağlamaktadır. Ancak, ilk aşamada yapılan atama (araçların yerleştirilmesi), taşıyıcıların daha sonra gerçekleştirmesi gereken hareket sayısını, toplamda kat edeceği mesafeyi ve süreyi önemli ölçüde belirlemektedir [52]. Örneğin, kısa süreli park işlemleri için çıkış noktasına yakın, uzun süreli park işlemleri için çıkış noktasına uzak yerleştirilen araçlar taşıyıcının kat edeceği toplam mesafeyi ve müşterilerin bekleme süresini önemli ölçüde azaltacaktır. Öte yandan derinlikli rafların kullanıldığı sistemlerde geri alınacak araca ulaşmak için rafların ön sıralarında yer alan araçların yerlerinin değiştirilmesi gerekebilmektedir [34]. Özetle, sistemde araçların nereye yerleştirildiği takip eden operasyonları ve kararları da doğrudan etkilemektedir. Yapılan araştırma ve çalışmalar, operasyonel anlamda TOOS'lerin performansının sıralama kararından ziyade araç yerleştirme kararından etkilendiğini göstermektedir [52-54]. Alanı daha verimli kullanmak için tasarlanmış, daha karmaşık operasyonlara sahip sistemlerde araçların nereye yerleştirildiği çok daha önemli bir konu haline gelmektedir. Bu nedenle, müşteri davranışları dikkate alınarak farklı yerleştirme kurallarının farklı tasarımlar için performansı incelenmeli ve uygun yerleştirme kararı/kararları sisteme uygulanmalıdır [43, 52].

5.4. Operasyonel Planlama ve Kontrol Problemlerinde Kullanılabilecek Yaklaşımlar (Approaches to Operational Planning & Control Problems)

Park etme işleminin doğası ve şehir içindeki yoğunluk dikkate alındığında, TOOS'lerin çok kısa sürede çok fazla müşteriye hizmet vermesi gerekebilmektedir. Müşterilerin



Şekil 13. TOOS'lerdeki operasyonel planlama ve kontrol problemlerinin genel yapısı
(The general structure of operational planning and control problem in FAPSS)

bu anlık taleplerine doğru ve hızlı bir şekilde cevap verebilmek ancak operasyonların iyi yönetilmesi ile mümkün olabilir. Ortaya çıkan bu operasyonel problemleri çözmek için belirli kurallar kullanmak yerine, söz konusu problemleri bir optimizasyon problemi olarak ele alıp çözmek, sistemin performansında ve özellikle hizmet sürelerinde ciddi iyileşmeler sağlayacaktır. Bu bağlamda operasyonel planlama ve kontrol problemlerinin bütünleşik ve eş zamanlı olarak çözülmesi gerekmektedir. Fakat sistem içinde kat edilen toplam mesafeyi/transfer süresini minimize etmek amacıyla çözülecek yerleştirme (allocation) ve sıralama (sequencing) problemleri zor hesaplamalı problemlerdir. Ayrıca otopark sistemlerinde, ne kadar aracın sisteme ne zaman gireceği, sistemde ne kadar kalıp ayrılacağı konusunda bir kesinlik söz konusu değildir. Oldukça dinamik ve belirsiz olan bu süreçte operasyonların en ideal şekilde planlanıp gerçekleştirilmesinin oldukça zor olduğu anlaşılmaktadır. TOOS'lerin operasyonel planlama ve kontrol problemleri ele alınırken, gerçek zamanlı, hızlı ve uygulanabilir çözümlere ihtiyaç duyulması nedeniyle çeşitli sezgisel yöntemler ve kurallar tercih edilmektedir [37, 44]. Kullanılan yöntemlerle en ideal çözümler elde edilemiyor olmasına rağmen doğru bir sıralama ve yerleştirme stratejisi ile işlem mesafelerini ve sürelerini kısaltmak mümkündür. Böylece sistemin bakım-onarım ve işletme maliyetleri azalırken [35-37]. aynı zamanda müşterilere daha hızlı hizmet verilmiş olur [42, 44].

Şekil 11'de verilen akış diyagramına göre kuyrukta bekleyen park etme ve/veya geri alma işlemleri varsa, sistemin öncelikle hangi işlemi gerçekleştirileceğine karar vermesi gerekmektedir. Tablo 3'de görüldüğü üzere işlemleri sıralamak için dört farklı kural uygulanabilir. Sistem tarafından işlem türüne bağlı olmayan (FCFS ve NRF) bir

sıralama yapılabileceği gibi, işlem türlerine öncelikler verilerek (PRF ve RRF) bir sıralama yapılabilir. Müşteri memnuniyeti açısından, farklı durum ve koşullarda sistemde park etme işlemlerine veya geri alma işlemlerine genel bir öncelik verilebilir. Daha sonra aynı türdeki işlemlerin kendi içindeki sıralaması için de farklı öncelikler belirlenebilir. TOOS'lerde müşteriler park işlemi için fiziksel bir sırada/kuyrukta olurlar. Fakat geri alma işlemi sırasında genellikle böyle bir kuyruk söz konusu değildir. Bu nedenle park işlemleri doğal olarak kendi içinde "önce gelen önce işlem görür" kuralına göre sıralanırken, geri alma işlemlerinin kendi içindeki sıralaması farklı kurallarına göre yapılabilmektedir. Gerçekleştirilecek sıradaki işlem belirlendikten sonra işlem bir park işlemi ise aracın nereye yerleştirileceğine karar verilmesi gerekir. Araçlar otoparkta, (i) rastgele boş bir hücreye, (ii) en yakın veya (iii) en uzak boş hücreye yerleştirilebilir.

TOOS'lerin sistem özellikleri ve park süreci dikkate alındığında, iki temel problem olan sıralama ve yerleştirme kararları için Tablo 3'de özetlenen dağıtım kuralları kullanılabilir. Bu kurallar tek giriş-çıkış noktası olan, tek koridorlu, tek derinlikli, tek taşıyıcı sistemlerde operasyonları hızlı bir şekilde planlamak ve yürütmek için faydalı olacaktır. Ancak farklı sistemler veya sistem özellikleri (birden fazla giriş çıkış noktası ve taşıyıcı, derinlikli raflar) söz konusu olduğunda ayrıca taşıyıcıların ve kapıların çizelgelenmesi, araçların yeniden yerleştirilmesi gibi konular için ek kurallara/yöntemlere ihtiyaç duyulacaktır. Böyle bir durumda, tüm operasyonel kararlar için oluşturulacak kural setinden, sistem için en ideal kural kombinasyonu belirlenmelidir. TOOS gibi karmaşık ve dinamik sistemlerin performansını değerlendirmek için en uygun yöntemlerden biri benzetim modellemesi olacaktır

Tablo 3. TOOS'lerin operasyonel planlama ve kontrolünde kullanılan/kullanılabilecek kurallar
(Rules that can be used in operational planning and control of FAPSs)

	Dağıtım kuralı/sezgisel yöntem	Açıklama
İşlemlerin Sıralama Kuralları	Önce gelen önce işlem görür First Come First Served (FCFS)	İşlemin ne olduğu önemli değil, her zaman önce gelen önce işlem görür
	Park işlemlerine öncelik ver Parking Requests First (PRF)	Sırada bekleyen işlemler arasında her zaman park etme/yerleştirme işlemine öncelik verilir
	Geri alma işlemlerine öncelik ver Retrieval Requests First (RRF)	Sırada bekleyen işlemler arasında her zaman geri alma işlemine öncelik verilir
	En yakın işleme öncelik ver Nearest Request First (NRF)	İşlemin türü veya geliş zamanı önemli değil, her zaman taşıyıcıya/robota en yakın işleme öncelik verilir
*Geri Alma Kuralları	Önce gelen önce işlem görür First Come First Served (FCFS)	Geri alma işlemleri kendi içinde önce gelen önce işlem görür kuralına göre sıralanır
	Önce en yakın olan Nearest One First (NOF)	Geri alma işlemleri kendi içinde en yakın olan önce işlem görür kuralına göre sıralanır
	Önce en uzak olan Farthest One First (FOF)	Geri alma işlemleri kendi içinde en uzak olan önce işlem görür kuralına göre sıralanır
Yerleştirme Kuralları	Rastgele boş bir hücreye yerleştir Random Available Slot (RAS)	Park edilen araba, rastgele boş bir hücreye yerleştirilir
	En yakın boş hücreye yerleştir Nearest Available Slot (NAS)	Park edilen araba, en yakın boş yere yerleştirilir
	En uzak boş hücreye yerleştir Farthest Available Slot (FAS)	Park edilen araba, en uzak boş hücreye yerleştirilir

*Park etme işlemlerini genellikle kendi içinde sıralamaya gerek yoktur, fakat geri alma işlemleri için farklı sıralama kuralları kullanılabilir.

[55, 56]. TOOS'leri konu alan bilimsel çalışmaların neredeyse tamamı sistemin benzetim modelleri üzerinden gerçekleştirilmiştir [14, 36, 37, 44].

5.5. Sistemin Parametre ve Kısıtları (Parameters and Constraints of the System)

TOOS'lerin performansının operasyonel kararlardan oldukça etkilendiği önceki bölümlerde vurgulanmıştı. Özellikle farklı performans göstergeleri söz konusu olduğunda, bahsedilen strateji ve kuralların veya kural kombinasyonlarının herhangi birinin kesin üstünlüğünden söz etmek mümkün olmamaktadır [14, 37, 42]. Strateji ve kuralların etkinliği büyük ölçüde, sistemin tasarım özelliklerine (binanın yapısı ve düzeni), kullanılan taşıma sistemine ve müşteri davranış özelliklerine (giriş-çıkış saatleri, yoğunluğu vb.) bağlıdır. TOOS'lerin operasyonlarını yürütülürken kullanılacak kural setine, bahsedilen sistem parametreleri dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda karar verilmez. Bu amaçla yapılacak benzetim çalışmasının parametreleri; kesin (deterministic) ve kesin olmayan yani olasılıksal (stochastic) parametreler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Birinci parametre grubu için ilgili değerler (çoğunlukla) kesindir ve parametrelerle ilgili verileri toplamak nispeten kolaydır. Bununla birlikte, ikinci parametre grubu rasgelelik içerir ve bu parametrelerle ilgili verilerin derlemesi nispeten zordur. Ayrıca toplanan ham veriler doğrudan kullanım için uygun değildir. Sisteme uygun girdiler üretmek için ön işlemlere ve ek analizlere ihtiyaç duyulur [36, 42, 44, 53, 54].

(i) *Kesin olan Sistem Parametreleri:* Sistemin fiziksel ve teknik özellikleri, yukarıda belirtilen ilk grup parametrelere örnektir. Yapının ve park yuvalarının büyüklüğü ve düzeni, giriş-çıkış noktası ve taşıyıcı sayısı, taşıyıcıların ve diğer mekanik ekipmanların hızı, sistemin kapasitesi (yuva sayısı), doğru şekilde tanımlanması gereken parametrelerdir. Bu tür parametreler tasarım ve kurulum aşamasında müşteri profiline uygun olarak belirlenir ve sabit/kesin (deterministik) değerleri vardır.

(ii) *Kesin olmayan Sistem Parametreleri:* Sistemin belirsiz ve dinamik yapısının asıl kaynağı olan tam olarak bilinmeyen müşteri davranışları bu parametre grubunu oluşturmaktadır. Doğru bir müşteri/kullanıcı analizi, verimli bir tasarım ve işletim sistemi için olmazsa olmazdır. Müşteri sayısı ve yoğunluğu, müşterilerin sisteme giriş-çıkış düzenleri, park süreleri vb. müşteri davranış özellikleri hem sistemin tasarım aşamasında hem de operasyonların planlama ve kontrol aşamasında dikkate alınması gereken oldukça önemli sistem parametreleridir. TOOS'lerin özellikle operasyonlarını en ideal şekilde yönetmek için otopark müşterilerinin davranışlarına ilişkin aşağıdaki verilerinin analiz edilip istatistiksel olarak anlamlı hale getirilmesi gerekmektedir.

- Müşteri yoğunluğu
- Müşterilerin geliş ve gidiş düzenleri ve
- Araçlarını ne kadar süre park ettikleri

Dağıtım kurallarının etkinliği çok büyük ölçüde müşterilerin davranış özelliklerine bağlıdır. Ancak bu müşteri davranışları ile ilgili bahsedilen tüm parametrelerin kesin bir değeri yoktur ve belirli zaman aralıklarında tahmini değerler almaktadır. Örneğin, insanların işe gidip geldikleri yoğun saatlerde, park etme ve geri alma talebi oldukça yüksek olurken, diğer saatler nispeten daha dengelidir. Ancak parametre değerleri ile ilgili kesin bir şey söylemek yine de mümkün değildir. Benzer şekilde, park süreleri günden güne, müşteriden müşteriye değişir ve genellikle öngörülebilirliği düşüktür.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Günümüzde şehirlerde gittikçe artan park alanı/yeri ihtiyacı, sürdürülebilir şehir içi ulaşım bağlamında yerel yöneticilerin ilgilenmek zorunda kaldıkları en önemli problemlerden biri haline gelmiştir. Vatandaşlar için de oldukça eziyet veren bir süreç haline gelen park sorununun, geleneksel otopark sistemleriyle çözülmesinin oldukça zor olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle şehir merkezlerindeki kısıtlı alanları etkin ve çevreci bir şekilde kullanma ihtiyacı, TOOS'lerin yeni nesil otopark sistemleri olarak günlük hayatımızda yer almasını sağlamıştır. TOOS'lerde işlemlerin insansız olarak, tamamen otomatik taşıyıcılarla gerçekleştiriliyor olması araçların birbirine daha yakın istiflenmesine imkân sağlarken, aynı zamanda geleneksel sistemlerde bulunması gereken rampa, asansör, havalandırma ve aydınlatma sistemleri ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bu sayede TOOS'ler eldeki sınırlı alanı çok daha verimli bir şekilde kullanmakta ve çevresel diğer sorunların (zaman, yakıt israfı vb.) önüne geçmektedir.

Tüm bu kazanımların bir sonucu olarak TOOS'ler park sistemlerinin geleceği olarak görülmektedir. Ancak, TOOS'lerin, olası uzun hizmet sürelerine, verimsiz enerji tüketimine ve dolaylı olarak yüksek maliyetlere yol açan çeşitli sorunları vardır. Gelişme aşamasında olan bu sistemlerin şehirlerde hedeflenen etkileri yaratabilmesi için öncelikle bu sorunlarının çözülmesi gerekmektedir. Yapılan incelemelerin sonucunda TOOS'lerde karşılaşılan sorunların büyük bir kısmının TOOS'lerin tasarım ve/veya işletme (operasyon) aşamasındaki kötü planlamadan kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bilimsel yazında TOOS'lerin tasarımı ve TOOS'lerde kullanılacak teknolojik ekipmanlarla ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu noktada, tasarım ve donanımla ilgili sorunlarının pek çoğuna çözüm üretilen TOOS'lerin, operasyonel verimliliği ve hizmet süreleri daha önemli konular haline gelmeye başlamıştır.

TOOS'lerin operasyonel planlama ve kontrol problemleri, araçların uygun bir yere yerleştirilmesi, park edilmiş araçların uygun bir kombinasyonda geri alınması, tüm operasyonların ve robot hareketlerinin sıralanmasını kapsamaktadır. Sözü edilen problemlerin etkili bir şekilde çözülmesi sistemin verimliliği ve performansı üzerinde, özellikle müşteri memnuniyeti açısından, önemli iyileşmeler sağlayacaktır. Ancak park etme işleminin doğası, sistem kısıtları, problemlerin dinamik ve belirsiz yapısı problemlerin en ideal (optimal) şekilde çözülmesini oldukça

zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, pratikte TOOS'lerde operasyonları planlamak ve yürütmek için kullanılan yazılımlarda sezgisel yöntemlerden ve/veya kurallardan yararlanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında TOOS'lerin operasyonel planlama ve kontrolünü sağlayabilecek genel bir işlem akış diyagramı ortaya konulmuştur. Tüm TOOS'lerin ortak operasyonel problemleri olan araç yerleştirme ve sıralama kararları için kullanılan/kullanılabilecek çeşitli yaklaşımlar tartışılmıştır. Ancak operasyonları yürütürken kullanılan kuralların etkinliğinin dolayısıyla sistemin performansının, sistem parametrelerine doğrudan bağlı olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda operasyonel planlama ve kontrol problemlerinin yapısal (parametreleri, kısıtları, karar değişkenleri vb.), özellikleri ve birbirleriyle ilişkisi tartışılmıştır. Konu ile ilgili gelecek çalışmalarda, sistemlerin operasyonel kontrolü için basit sezgisel kurallar kullanmak yerine, en ideal /ideale en yakın çözümleri hızlı bir şekilde elde etmeye yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Bu alanda çok ciddi bir araştırma eksikliği bulunmaktadır. Sistemden kaynaklı belirsizlikleri iyi yönetebilmek için eldeki bilgi ve verileri kullanabilecek akıllı sistemler geliştirilmelidir. TOOS'de operasyonların gerçek zamanlı kontrolü için hızlı çözüm üretme gerekliliği göz önüne alındığında, çoğu kombinasyonel ve dinamik yapıdaki problemlerin bütünlük ve eş zamanlı çözümü için yapay zeka kaynaklı algoritmaların kullanımının ön plana çıkacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2017.KB.FEN.027

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yardım, M. S. ve Ağrikli, M., Otomatik Otoparklar ve Türkiye'deki Otopark Probleminin Çözümü İçin Uygulama Potansiyeli, 6. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul-Turkey, 363-371, 23-25 Mayıs 2005
2. Buehler, R., & Pucher, J., Sustainable transport in Freiburg: lessons from Germany's environmental capital. *International Journal of Sustainable Transportation*, 5 (1), 43-70, 2011.
3. Buehler, R., Pucher, J., Gerike, R., & Götschi, T., Reducing car dependence in the heart of Europe: lessons from Germany, Austria, and Switzerland. *Transport Reviews*, 37 (1), 4-28, 2017.
4. TUİK, Yıllara göre motorlu kara taşıt sayısı, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=30630>, Yayın tarihi: Ocak, 2019, Erişim tarihi: Kasım 11, 2019.
5. Ibeas, Á., Cordera, R., dell'Olio, L., & Moura, J. L., Modelling demand in restricted parking zones. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45 (6), 485-498, 2011.
6. Ahamed, S. T., & Jovanov, A., Possible Solutions of Car Parking Problem of Retail Business in Gothenburg City Center ,Master Degree Project 2009, 42, 2009.
7. Marsden, G., The evidence base for parking policies-a review. *Transport policy*, 13 (6), 447-457.
8. Jog, Y., Sajeev, A., Vidwans, S., & Mallick, C., Understanding smart and automated parking technology. *Int. J. u-e-Serv. Sci. Technol*, 8, 251-262, 2015.
9. Downtown Parking Survey. <http://www.bainbridgewa.gov/DocumentCenter/View/9154/Parking-Survey-101017?bidId=>. Ekim 10, 2017. Erişim tarihi: Ağustos 27, 2018.
10. TRDizin,, <https://trdizin.gov.tr>
11. Scopus, <https://www.scopus.com>
12. Web of Science, <https://apps.webofknowledge.com>
13. Terra nova ventures, Robotic parking systems. http://www.terranoventures.com/RoboticParking_Green.aspx. 2019. Erişim tarihi: Ağustos 13, 2019.
14. Serpen, G., & Dou, C. (2015). Automated robotic parking systems: real-time, concurrent and multi-robot path planning in dynamic environments. *Applied Intelligence*, 42 (2), 231-251.
15. Rosenblum, J., Hudson, A. W., & Ben-Joseph, E., Parking futures: An international review of trends and speculation. *Land Use Policy*, 91, 104054. 2020.
16. Fata Automation. History of Automated Parking Systems. <http://automatedparking.com/history/>. 2012. Erişim tarihi: Şubat 20, 2018.
17. Can, M., & Ilıcalı, M., Türkiye'de ileri otopark sistemleri İzmir Alsancak otopark uygulama örneği ve öneriler sunulması, İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 2 (1), 23-35, 2019.
18. İSPARK. İSPARK'ta araçları robotlar park edecek. <http://ispark.istanbul/isparkta-aracлари-robotlar-park-edecek/>. 2014. Erişim tarihi: Eylül 14, 2018.
19. UCLA, Anderson School of Management, http://www.anderson.ucla.edu/Documents/areas/ctr/ziman/UCLA_Parking_Dilemma_Symposium_Don_Monahan.pptx, 2012, Erişim tarihi: Mayıs 19, 2020.
20. Fata Automation. Types of Automated Parking Systems. <http://automatedparking.com/system-types>. 2012. Erişim tarihi: Eylül 20, 2018.
21. GİVT. Parking Systems, <https://www.gıvt.de/index.php/en/mechan-automat-parksysteme-all-en>. 2018. Erişim tarihi: Eylül 14, 2018.
22. Roadtraffic, Munich Automated Underground Parking System, <https://www.roadtraffic-technology.com/projects/munich-automated-underground-parking/>. Erişim Tarihi: Mayıs 18, 2020.
23. Automated Robotic Parking. Parking Equipment Types. <http://www.automatedroboticparking.com/parking-equipment-types/>. 2018, Eylül 14, 2018.
24. AIM. Silo Systems. <http://www.aimagv.com/aps-silo.html>. 2015. Erişim tarihi: Ağustos 20, 2019.
25. Pari Car Parking. Types of Systems. http://paricarparking.com/types_of_systems/stacker_system.php Son erişim tarihi: Eylül 27 2019.
26. Auto Evolution. Eco Garage Automatic Parking for Chicago. <https://www.autoevolution.com/news/ecogarage-automatic-parking-for-chicago-29186.html>. 2011. Erişim tarihi: Eylül 27, 2019.

27. Karin Tetlow. Robots Update the Parking Garage, Continuing Education Center. https://continuingeducation.bnppmedia.com/article_print.php?C=942&L=316 . Ekim, 2012. Erişim tarihi: Eylül 27, 2019.
28. Solucoes Industriais. Otomatik Park Yeri. https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instalacoes_e_equipamento_industrial/almitec/produtos/seguranca-e-protecao/estacionamento-automatizado. 2018. Erişim tarihi: Eylül 27, 2019.
29. Mhedemag. AGV. <https://www.youtube.com/watch?v=MKu2yEM6Pas&list=PLtS8QR-oHXGwavN2hV0LHE-kPLMtDafl&index=37&t=0s>. 2016. Erişim Tarihi: Eylül 27, 2019.
30. Debnath, J. K., & Serpen, G., Real-Time Optimal Scheduling of a Group of Elevators in a Multi-Story Robotic Fully-Automated Parking Structure. *Procedia Computer Science*, 61, 507-514, 2015.
31. Nayak, A. K., Akash, H. C., & Prakash, G., Robotic Valet Parking System. In *India Educators' Conference (TIEEC)*, 2013 Texas Instruments, 311-315, IEEE. 2013.
32. Eswaran, P., Manikandan, A.V.M., & Godha, S., Prototype of an underground multi-storied automated car parking system. In *Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN)*, 2013 International Conference on, 674-677, IEEE, Mayıs, 2013.
33. Hrabovský, L., Mlčák, T., & Kotajný, G., Forces Generated in the Parking Brake of the Pallet Locking System. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 13 (4). 2019.
34. Hrabovský, L., & Dluhoš, D., Calibration of transducers and of a coil compression spring constant on the testing equipment simulating the process of a pallet positioning in a rack cell. *Open Engineering*, 9 (1), 631-640. 2019.
35. Wu, G., Xu, X., De Koster, R., & Zou, B., Optimal design and planning for compact automated parking systems. *European Journal of Operational Research*, 273 (3), 948-967. 2019.
36. Serpen, G., & Debnath, J., Design and performance evaluation of a parking management system for automated, multi-story and robotic parking structure. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2019.
37. Wu, G., Zou, B., & Xu, X., Shuttle-based operating policies for multiple-lift compact automated parking systems based on queuing networks. *Cluster Computing*, 22 (3), 6449-6460. 2019.
38. Benardos, A., Souladaki, M., & Tampakopoulou, L., Underground parking facilities in Athens: Technical requirements and feasibility analysis of two proposed schemes. In *proceedings of 12th International Conference of the Associated Research Centers for Urban Underground Space*, 2009.
39. Mathijssen, A., & Pretorius, A. J., Verified design of an automated parking garage. In *International Workshop on Parallel and Distributed Methods in Verification*, 165-180, Springer, Berlin, Heidelberg. August, 2006.
40. Serpen, G., & Dou, C., Automated robotic parking systems: real-time, concurrent and multi-robot path planning in dynamic environments. *Applied Intelligence*, 42 (2), 231-251, 2015
41. Pypno, C., Multi-storey automated over ground garage for cars-solution of parking problems in big urban areas. *Transport Problems*, 3, 59-63, 2008.
42. Wu, G., Xu, X., & Lu, X., Considering the influence of queue length on performance improvement for a new compact robotic automated parking system. *International Journal of Information Management*, 50, 487-497. 2020.
43. Mirzaei, M., De Koster, R. B., & Zaerpour, N., Modelling load retrievals in puzzle-based storage systems. *International Journal of Production Research*, 1-13, 2017.
44. Chen, Q., Wang, Z., Gong, Y., De Koster, R. B., & Chen, W., Performance evaluation of compact automated parking systems with mobile application and customer service priority. *International Journal of Production Research*, 1-34. 2020.
45. González-González, E., Nogués, S., & Stead, D., Parking futures: Preparing European cities for the advent of automated vehicles. *Land Use Policy*, 91, 104010. 2020.
46. Shoeibi, N., & Shoeibi, N., Future of Smart Parking: Automated Valet Parking Using Deep Q-Learning. In *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence*, 177-182, Springer, Cham. June, 2019.
47. Mahmood, M. A., & Hajjaj, S. S. H., Design and Implementation of a Rotary Parking System for a Truly Smart City in line with Smart Cities Technologies and Trends. In *2018 8th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, 49-52, IEEE. November, 2018.
48. Kanmaz M., Aydın M.A., Comparison of dv-hop based indoor positioning methods in wireless sensor networks and new approach with k-means ++ clustering method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 975-986, 2019.
49. Özgönül M.C., Seçmen M., Size-reduced printed log-periodic dipole antenna for wireless communication applications, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1631-1646, 2020.
50. Aydın H., Görmüş S., Ulutaş G., Security for the internet of things: a survey of existing mechanisms, protocols and open research issues, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1247-1272, 2018.
51. Parkolay, Parkolay projeler, <https://www.otomatik.com.tr/TR/48-Projeler/?FILTER=541-0-0-0-0>. Erişim Tarihi: Ekim 3, 2019.
52. Zou, M., Wang, Q., & Liu, S. A., Optimization of Parking Space Allocation for Automated Parking System of Paternoster Type by Genetic Algorithm. In

- 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) 3834-3838), IEEE, June, 2019.
- 53.** Baykasoğlu A, Dudaklı N, Özsoydan FB., A GRASP based algorithm to reduce service time in Fully Automated Parking System, International Workshop on Mathematical Methods, Ankara-Turkey, 64, 27-29 April 2017.
- 54.** Baykasoğlu A, Dudaklı N, Özsoydan FB., Evaluation of Different Dispatching Rule-Based Algorithms in Fully Automated Parking Systems, 9th International Conference on Computer Technologies and Development, Istanbul-Turkey, 23-24, 24-26 March 2018.
- 55.** Chung, C. A. (Ed.), Simulation modeling handbook: a practical approach. CRC Press., 2003.
- 56.** Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P., A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. Applied Energy, 113, 1043-1058, 2014.