

**İYYÜ MÜHENDİSLİK MİMARLIK  
FAKÜLTESİ DERGİSİ  
HAKEMLİ-AKADEMİK**

***(IYYU JOURNAL OF COLLEGE OF  
ENGINEERING AND ARCHITECTURE  
REFEREED-ACADEMIC)***

**CİLT (VOLUME) 1 SAYI (ISSUE) 1**

---

İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ  
HAKEMLİ-AKADEMİK DERGİSİ

Maltepe Mahallesi, Yılanlı Ayazma Caddesi, No: 26, P.K. 34010  
Cevizlibağ-Zeytinburnu, İstanbul, Türkiye

mmfd.yeniuyuzil.edu.tr

# MMFD-İYYÜ

ISSN: 3149-8442

İYYÜ MÜHENDİSLİK  
MİMARLIK FAKÜLTESİ  
DERGİSİ, HAKEMLİ-  
AKADEMİK

(IYYU JOURNAL OF COLLEGE  
OF ENGINEERING AND  
ARCHITECTURE, REFEREED-  
ACADEMIC)

CİLT (VOLUME) 1  
SAYI (ISSUE) 1

## KÜNYE

### İMTİYAZ SAHİBİ ve SORUMLU YAZI İŞLERİ MÜDÜRÜ:

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Mühendislik  
Mimarlık Fakültesi adına

Prof. Dr. Selahattin KÜÇÜK  
selahattin.kucuk@yeniuyuzuil.edu.tr

### DERGİ KOORDİNATÖRÜ ve MÜHENDİSLİK MAKALELERİ EDİTÖRÜ:

Dr. Öğr. Üyesi Ercüment ÖZER  
ercument.ozel@yeniuyuzuil.edu.tr

### MİMARLIK MAKALELERİ EDİTÖRÜ:

Dr. Öğr. Üyesi Safiye İrem DİZDAR

### YÖNETİM YERİ:

İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ,  
HAKEMLİ-AKADEMİK DERGİSİ

Maltepe Mahallesi, Yılanlı Ayazma Caddesi,  
No: 26, P.K. 34010, Cevizlibağ-Zeytinburnu,  
İstanbul, Türkiye

mmfd.yeniuyuzuil.edu.tr

## İÇİNDEKİLER

BELLEK VE MEKÂN İLİŞKİSİ BAĞLAMINDA BALAT	1
(Balat in the Context of Memory and Space Relation)	
Celal Kızıldeli	
MİMARLIK NEDİR?	11
(What Is Architecture?)	
Engin Akçin	
PARİS'İN KÖPRÜLERİ I	21
(Bridges of Paris I)	
İsmet Vildan Alptekin	
YENİ NESİL YAPAY BÖBREK TEKNOLOJİLERİ VE KLİNİK UYGULAMALARDAKİ GELECEĞİ	25
(New Generation Artificial Kidney Technologies and Their Future in Clinical Applications)	
Bahar Mammadlı, Sezen Canım Ateş	
VESTİBÜLER SİSTEM BOZUKLUKLARININ TSALLIS ENTROPİSİ TABANLI TANISINDA TEK AYAK BASINÇ VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNİN DOĞRULUK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	29
(The Effect of Evaluating Single Foot Pressure Data on Accuracy in the Diagnosis of Vestibular System Disorders Based on Tsallis Entropy)	
Serhat İkizoğlu, Harun Yaşar Köse	
DAHİLİ MODEL KONTROL TABANLI VE ORANSAL İNTEGRAL TÜREVSEL TABANLI DENETLEYİCİ TASARIMLARININ YAPAY PANKREAS KONTROLÜ İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI	33
(Comparison of Internal Model Control (IMC) Based and Proportional Integral Derivative (PID) Based Controller Designs for Artificial Pancreas Control)	
Ravan Şenen Al Ekhwan, Ercüment Özer	

# BELLEK VE MEKÂN İLİŞKİSİ BAĞLAMINDA BALAT

## (Balat in the Context of Memory and Space Relation)

Celal Kızıldeli

Dr. Öğr. Üy., Mimarlık Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. [celal.kizildeli@yeniyyuzyil.edu.tr](mailto:celal.kizildeli@yeniyyuzyil.edu.tr)  
(Asst. Prof. Dr., Department of Architecture, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yüzyil University, Istanbul, Turkey)

Alınma Tarihi: 03 Temmuz 2025 Kabul Tarihi: 11 Ağustos 2025 Yayın Tarihi: Şubat 2026  
(Received: 03 July 2025 Accepted: 11 August 2025 Published: February 2026)  
Dijital Nesne Tanımlayıcı (Digital Object Identifier): <https://doi.org/10.66125/0.2026.2>

Araştırma Makalesi  
(Research Paper)

### ÖZET

Toplumlar, geçmiş kültürleri temelinde birikimlerini artırarak gelişirler. Bu birikimler toplumun belleğini oluşturur ve gelecek kuşaklara aktarılmasıyla anlam kazanırlar. Günümüzde, toplumlar sahip oldukları kültürel mirasın yok olması ve bellek yitimi problemi ile karşı karşıya bulunmaktadır. Bu sorunun tanımlanması ve çözüm üretilmesi bir problematik olarak ortada durmaktadır. Konu çok boyutlu ve karmaşıktır; bu da araştırmayı önemli kılmaktadır. Bellek disiplinler arası içeriğe sahiptir ve bu kapsamda çeşitli bellek türlerinden bahsedilmektedir. Çalışmada, konuyla ilişkili olan bazı bellek çeşitleri anlatılmıştır: Bireysel bellek, toplumsal bellek; mekânsal bellek; mimari bellek ve kentsel bellek. Kavramsal çerçeveye bu kavramlar temelinde oluşturulmuştur. Mekân belleğin biçimlenmesinde bağlamı oluşturur; mekânı oluşturan bileşenlerin çeşitli özellikleri, birey tarafından duyumlar aracılığıyla kavranıp, çeşitli bilişsel süreçlere bağlı olarak algılanır. Bu algısal süreçte, fiziksel yapı yanında çeşitli sosyal, kültürel ve psikolojik etmenler etkili olur. Bu bağlamda, Balat Senti incelenmiştir. Balat'ın seçilmesinin nedeni, Haliç'in bir parçası olarak hem fiziksel hem de kültürel özelliklerle İstanbul'un geçmişine ilişkin birtakım değerleri günümüze kadar taşımış bir mekân olmasıdır. Bu semtin, anıtsal yapıları, sivil mimari örnekleri ve tarihsel geçmişi ile kendine özgü bir karakteri vardır ve Balat bütünüyle bir bellek mekânıdır. Bu araştırmada, bir sistematige bağlı olarak konunun teorik olarak açıklanması, belirli bir örneğe bağlı olarak irdelenmesi ve çözüm önerilerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için çalışmaya, öncelikle terminoloji ile başlanmış, mekân bellek ilişkisi çeşitli süreçlere bağlı olarak ortaya konmuş ve Balat, kent belleğinin mekânsal bileşenlerine bağlı olarak incelenmiş ve çeşitli öneriler ortaya konmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Bellek, Mekân, Bellek Mekânı, Mimari Bellek, Kentsel Bellek, Balat, Palimpsest

### ABSTRACT

Societies develop by increasing their accumulation based on their past cultures. These accumulations create the memory of society and gain meaning by transferring them to the future generation. Today, societies are faced with the loss of their cultural heritage and the problem of loss of memory (amnesia). Defining this problem and generating a solution stands out as a problem. The subject is multidimensional and complex; this makes the research important too. Memory has an interdisciplinary content and various types of memory are mentioned in this context. Memory has an interdisciplinary content and various types of memory are mentioned in this context. In this study, some type of memory related to the subject has been explained. These are individual memory, collective memory; spatial memory; architectural memory, and urban memory. The conceptual framework was created based on these concepts. Space creates the context in the formation of memory; various features of the components that make up the space are perceived by the individual through sensations and perceived depending on various cognitive processes. In this perceptual process, in addition to the physical structure, various social, cultural, and psychological factors are effective. Balat is a part of the Golden Horn and Balat with its physical and cultural features; is a place that has carried some values from Istanbul's past to the present day. This district has its unique character; with its monumental structures, examples of civil architecture, and historical past. It is all a memory space. This study, according to a systematic, it is aimed to explain the subject theoretically, examine it based on a specific example, and develop solutions proposals. For this, the study first started with terminology, the relationship between memory and space was revealed depending on various processes. Balat was examined depending on the spatial components of urban memory, and various suggestions were tried to be put forward.

**Keywords:** Memory, Place, Place of Memory, Urban Memory, Balat, Palimpsest

## 1. GİRİŞ

Toplumlar, kültür birikimlerine bağlı olarak oluşur ve bu birikimlerin artmasına koşut olarak gelişirler. Bu birikimler, aynı zamanda toplumların belleğini oluştururlar. Bu bağlamda geçmişle gelecek arasında bir köprü işlevi gören bellek, çok boyutlu bir içeriğe sahiptir ve çeşitli disiplinlerin ilgi alanındadır. Bu özelliğine bağlı olarak çeşitli bellek türlerinden bahsedilmektedir. Çalışmada, bellek konusu değişik boyutlarıyla ele alınmış ve kavramlar temelinde açıklanmıştır.

Geçmişten kalan birikimlerin en belirgin olanı yapılar ve mekânlardır; bunlar, belleğin oluşumunda bağlamı oluştururlar. Mekânlar, geçmişin somut izlerini taşırlar ve içerdiği imgeler üzerinden anımsanırlar. Mekânı oluşturan bileşenlerin çeşitli özellikleri duyumlar ile kavrandığında, birey bunları kendi zihinsel süreçleri içinde değerlendirerek birtakım yargılara

varır ve mekânı algılar. Bu algısal süreçte, fiziksel yapı yanında çeşitli sosyal, kültürel ve psikolojik etmenler etkili olur. Bu nedenle, çeşitli mekânlara ve kente ilişkin imgenin nasıl inşa edildiğini ve geri planını anlamak önemlidir.

Mimari ve kentsel boyuttaki mekânları etkili ve çekici kılan, insanları ya da toplumları etkileyebilecek bir yaşam öyküsüne sahip olmalarıdır. Bu bağlamda, kentsel ve mimari mekânlar, kültür birikimini yansıtmaları nedeniyle başta anı değeri olmak üzere tarihsel, belgesel ve estetik değer içerirler; taşıdıkları değerlere bağlı olarak korunduklarında varlıklarını sürdürebilirler. Bu nedenle, mimari yapılar ve oluşturdukları kentsel çevreler, aynı zamanda bir kentte geçmişle bağlantı kurmanın aracılarıdır ve kültürel miras olarak sonraki kuşaklara aktarırlar. Başka bir anlatımla, yapıların ve kentsel mekânların bellekteki izleri mimari ve kentsel belleği oluştururlar.

Bu çalışmada Balat semti özelinde bellek-mekân ilişkisi ortaya konmaya çalışılmıştır. Balat, hem fiziksel hem de taşıdığı kültürel özelliklerle İstanbul'un geçmişine ilişkin birtakım değerlerini günümüze kadar taşımış, kendine özgü karakteri olan tarihi bir mekândır. Bu karakter yüzyıllara bağlı olarak, çeşitli dönemlerde oluşmuştur. Tarihsel geçmişi, yerleşim dokusu, anıtsal yapıları ve sivil mimari örnekleri ile Balat, bir bellek mekânıdır. Gerek kent silüetine katkısı, gerekse tarihi yapısına bağlı değerler içermesi Balat'ın önemini ortaya koymaktadır. Kısacası Balat, fiziksel bir sürekliliğin yaşandığı, eski birikimler üzerine eklenerek gelişen ve katmanlardan oluşan bir yerleşimdir. Kentsel belleğin üreticisi olan bu durum palimpsest olarak nitelenmektedir. Bu kavram aynı zamanda tarihsel süreçte oluşan belleği de ifade etmektedir. Bu belleğin korunması, yaşatılması önemlidir. Bu amaçla, Balat'ın genel karakterini ve belleğini yansıtan her türlü değeri koruyacak, yani sosyo-kültürel, ekonomik ve fiziksel yıpranmayı durduracak ve çeşitli potansiyelleri değerlendirecek ve geliştirecek önlemler almak gerekir.

### Amaç

Bu çalışma ile mimari ve kentsel belleğin kültürel süreklilik bakımından önemini ortaya konması ve bir sistematik içerisinde çözüm önerileri geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla, kentsel alanın tarihsel süreçteki değişiminin izleri araştırılarak farklı katmanlara ilişkin saptamalarla mimari ve kentsel bellek ilişkisi irdelenmektedir. Bu bağlamda, bellek mekân ilişkisinin tarihsel süreçte, oluşumundan günümüze kadar yaşayan bir kent dokusu olan Balat semti üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Balat'ın fiziksel ve sosyal dokusunun kentsel ve toplumsal bellekteki yansımaları incelenmiş ve çalışmanın teorik kurgusu bu ilişki temelinde şekillendirilmiştir.

### Yöntem

Araştırma, mevcut kaynakların taranması ve yerinde yapılan tespitler üzerinden yürütülmüştür. Öncelikle konuyla ilgili literatür taraması yapılmış; psikoloji, sosyoloji ve mimarlık alanındaki çalışmalar incelenmiş ve daha önce yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Teorik araştırmalar, Balat'ta gözlem yoluyla yapılan incelemeler sonucu elde edilen verilerle ilişkilendirilmiştir. Bu bağlamda bu makale, literatür taraması ve araştırma-geliştirme türünden bir çalışmadır.

Çalışmaya öncelikle ilgili kavramların açıklanması ile başlanmış, mekân bellek ilişkisi ortaya konmuş ve Balat semti özelinde konu incelenmiştir. Balat çeşitli dönemleri yaşamış, birçok katmanı barındıran bir bellek mekânı olduğu için, kent belleğinin mekânsal bileşenleri olan "doğal çevre öğeleri", "yapılı çevre öğeleri" ve "toplumsal çevre öğeleri" alt başlıklarında analizleri yapılmış ve sonuçta ortaya çıkan bulgulara bağlı olarak Balat'a ilişkin çeşitli öneriler ortaya konmaya çalışılmıştır.

## 2. BELLEK VE BELLEK-MEKÂN İLİŞKİSİ

Toplumlar, kültürel birikimlere bağlı olarak oluşur ve gelişirler. Bu birikimler, aynı zamanda toplumların belleğini oluştururlar. Hançerlioğlu (2016) belleği geçmişin muhafaza etme ve tekrardan ortaya çıkarma yetisi olarak tanımlamıştır (Hançerlioğlu, 2016). Bellek, insanlar ve giderek toplumlar için en temel yaşamsal işlevlerden biridir ve zaman ve mekân bütünlüğüne bağlı olarak oluşur. Dış dünyayı anlamak, bilmek ve deneyimlemek için duyum ve algı gibi bilişsel süreçlere ihtiyaç duyulur. Bu süreç, dış dünyadan uyarıların duyu organları vasıtasıyla alınması, beyinde işlenmesi, yorumlanması ve karar verilmesi işlemlerinden oluşur.

Bellek pek çok etmenin etkisi altında olduğu için çok boyutludur ve çeşitli disiplinlerin ilgi alanındadır. Doğal olarak her disiplin konuya kendi perspektifinden yaklaşmış ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bilişsel psikolojide belleğin beyin fizyolojik yapısı ve insan psikolojisiyle ilişkili olduğu varsayılır ve tarihsel bağlam ve kültürle ilişkisi kurulmaz. Oysa belleğin işleyişinde dış koşullar, yani fiziksel bağlam ve kültürel koşullar da etkilidir. Başka bir anlatımla belleğin nörolojik boyutu önemlidir; bilgileri aktif bir şekilde yapılandırır, eklemeler ve çıkarmalar yapar; ancak bu yapılanmada kültürün etkinliği büyük ölçüde belirleyici olur. Bu nedenle bellek konusunu çok boyutlu yaklaşımla ele almak gerekir.

Bellek zamanın akışı içinde herhangi bir ana bağlı olarak oluşur ve süreç içerisinde çeşitli dönemlerdeki yaşanmışlıkların ara kesitinde ortaya çıkar. 'Bilinç demek, bellek demektir' diyen Bergson, sürekli anıların bir yumağa benzettığı yaşamda üst üste eklemelerle kişinin belleğinin oluştuğuna vurgu yapmaktadır (Bergson,1998;11). Mekân belleğin biçimlenmesinde

bağlamı oluşturur ve yer (locus) görevi görür. Anıların korunması, ortak düşüncenin oluşması ve temsili için uygun koşulları sağlayan mekân, somut olgular yanında soyut olguları da barındırır. Yani, somut etkinliklere ortam oluşturduğu kadar duyguları harekete geçirici etkiye de bulunabilirler. Başka bir anlatımla mekânlar, geçmişten kalan birikimlerin en belirgin olanıdır; geçmişin somut izlerini taşırlar ve içerdiği imgeler üzerinden anımsanırlar.

Bellek bireye bağlı olarak olduğu için bireysel bellek kavramından söz edilir. Bireysel bellek yaşamsal deneyimlerin kaydedilmesiyle oluşur ve biçimlenir. Bireyin yaşadıklarına bağlı olarak belleğine yerleşen anılar, bulunduğu toplum ve çevreyle yakından ilişkilidir. Çünkü, İnsan bireydir ancak üyesi olduğu toplumun ve çevrenin de bir parçasıdır. Assmann(2018) bireysel belleğin, bireyin toplumsal unsurlardan çıkardığı detaylarla oluştuğunu ve sosyalizasyon sürecine bağlı olarak geliştiğini ileri sürer:

Bellek, insanın sosyalizasyon sürecinde oluşur. Evet, bellek her zaman bireye aittir. Ama bellek toplumsal olarak belirlenir (...) Bellek canlıdır ve sürekli iletişim içinde varlığını sürdürür, bu alışveriş duraksarsa ve alışveriş içinde olunan gerçekliğin çerçevesi değişir ya da kaybolursa unutmaya başlar. İnsan sadece alışveriş içinde olduğu ve ortak belleğin çerçevesi içine yerleştirebildiği şeyleri hatırlar (Assmann, 2018).

**Toplumsal bellek** veya diğer adıyla **kollektif bellek** toplumların geçmişinden günümüze kadar olan süreçte üretilen belleği ve bilgi dağarcığını vurgulayan bir kavramdır. Diğer yandan, toplumsal bellek kavramı genel olarak kültür kavramını çağırıştır. Bu nedenle, toplumsal bellek, tarihsel süreçte oluşan kültürel birikimlerin (yazılı ve yazısız hukuk kuralları, yaşam biçimleri, yapı üretim biçimleri vb.) bir arşivi olarak düşünülebilir ve bu birikimlerin sonraki kuşaklara aktarılmasıyla anlam kazanır. Başka bir anlatımla, bu tarihsel süreçte yaşanan olaylar ve durumlar çeşitli biçimlerde toplumun hafızasında depolanır ve geçmişle günümüz arasında bir köprü işlevi görür. "Toplumsal bellek kavramı ilk kez 1925'te Maurice Halbwachs (1877-1945) tarafından kullanılmıştır. Halbwachs, belleğin bireysel niteliğine karşın, yer aldığı sosyal bağlamdaki ilişkilere bağlı olarak biçimlendiğini ve her toplumsal belleğin de bir mekânsal bağlamın içerisinde şekillendiğini ileri sürer. (Halbwachs, 1992).

İnsanlar yaşamlarını sürdürdüğü çevre ile devamlı olarak etkileşim halindedir ve bu etkileşim **bellek ve mekân ilişkisini** başlatır. Bellek ve mekânla ilgili birçok beyin mekanizması birbiriyle etkileşim halindedir ve bu mekanizmalar belleğin mekân algısına, mekân algısına ise hatırlamaya yardımcı olduğu iki yönlü bir yol oluşturur. Bu bağlamda mekân-birey ilişkisinde, geçmişte belleğe kaydedilen ve kalıcı bellekte yer edinen imgeler, bireysel özellikler yanında fiziksel ve sosyal çevreye ilişkin etmenlere bağlı olarak oluşur. Bu süreçte, farklı duyu sistemlerinin hiçbiri tek başına çalışmaz, çeşitli zaman aralıkları içinde birbiriyle etkileşime girer ve belleği de içeren bir sentez gerçekleşir. Bellek ve mekânsal yetenekler birbirini destekler. Bellek mekân algısının oluşturulma sürecinin ayrılmaz bir parçasıyken, mekân da anıların depolanıp erişildiği bir çeşit arşiv görevi görür. Beynin bellek-mekân bağlantısı ise paylaşımlı bir nöral altyapıya dayanır. Bellek sistemimize depolanmış bilginin büyük bir kısmı mekânsaldır. (Groh, 2017).

**Mekânsal algı**, bireyin bir yer ya da mekân içindeki deneyimlerine bağlı olarak ortaya çıkan bir bilişsel süreçtir; algılama ve hatırlama üzerine temellenir ve insan çevre ilişkisinin en önemli mekanizmasını oluşturur. Mekânın algılanması duyumsal ve zihinsel süreçlere bağlı olarak gerçekleşir. Mekânın algılanması sürecinde, bireyin yaşamı boyunca edindiği zihinsel ve deneysel edinimlere ilişkin bir çağrışım elde etmesine neden olan uyarılar mekânın bellekte bıraktığı izlere karşılık gelmektedir. Nesnelere ya da kavramlar arasında bağlam kurmaya yarayan tüm sosyal göstergeler, bellekte gerçekleştirilen 'geri çağırma'/ 'hatırlama' işlemlerini kolaylaştırılmaktadır. Dolayısıyla bellekte geri çağırımı sağlayan tüm izler, çevreden alınan duyumun, imgelemin ve bellekteki tüm birikimlerin sentezi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu süreçte, bireylerin kültürel yapısı, yaşam biçimi, kişisel özellikleri gibi çeşitli değişkenler etkili olur. Bu yüzden mekânı deneyimleyenlerin her birinin algılanması ve yargısı farklılık gösterebilir.

Mekânsal bellek, mekânla ilgili duyum - algılama - kodlama sürecinde oluşan öğrenme, deneyimleme ve anılara ilişkin süreçler yanında, mekânın bağlamı (ortam özellikleri) ve yaşantısının birlikte kaydedilmesine bağlı olarak oluşur. Başka bir anlatımla, bireyin mekânsal belleği, yaşanmışlık-

-lara ve anılara bağlı olarak oluşur ve bu süreçte mekana karşı aidiyet duygusu da gelişir. İzleyici tarafından algılanan mekan deneyimlenerek belleğe kodlanır. Kodlama işlemi kişinin duyum ve deneyimlerine göre kısa yahut uzun süreli bellek olarak göstergeler üzerinden mekânsal belleğe döndürülür. Belleğe kodlanan mekan, kullanıcı tarafından zihinde imgeye dönüştürülerek aidiyet kazanır(Çakır ve Gönül, 2015:89). Kişinin belleğinde yer eden mekânsal verilerin niteliğini fiziksel yapı yanında çeşitli sosyal, kültürel, psikolojik etmenler belirler. Özak ve Gökmen'e göre; mekânın ya da mekâna ilişkin bir verinin bellekte tutulması, kişilerin duysal ve algısal süreç boyunca mekâna kurulan ilişkinin boyutuna ve niteliğine göre değişkenlik gösterir. Mekânlar bireylere ne ölçüde bağlamsal veri içeren öğeler sunuyorsa o ölçüde kalıcı olurlar. Anılarla, deneyimlerle, algılarla, duyumlarla desteklenmiş bir mekân bellekte ilişkilendirilir, eşleştirilir, yönlendirilir, karşılaştırılır ve kodlanır (Özak ve Gökmen, 2009). Gerçekleşen bu süreç, uzun süreli belleğe geçiş süreci olarak adlandırılabilir. Uzun süreli belleğe kaydedilen öğeler, kişilerin hayatlarının sonraki dönemlerinde tekrar geri çağrılmak ve hatırlanmak üzere bellekteki varlıklarını sürdürürler.

Mekânsal bellek göstergelerine ilişkin değişkenleri Çakır ve Gönül(2015) şöyle sıralar:

- Tarihsel ve kültürel değer
- Özgünlük ve enderlik değeri
- Estetik ve sanatsal değer
- Anı değeri ve kullanım sürekliliği
- Teknik ve teknolojik değer (Çakır ve Gönül,2015).

Toplumların yarattıkları fiziksel çevreler, tarihin belirli dönemlerindeki kültür birikimlerine bağlı olarak oluşur ve bir miras olarak sonraki kuşaklara aktarılırlar. Tarihsel süreçte üretilen yapılar inşa edildikleri dönemin sosyal, kültürel, ekonomik ve teknolojik özelliklerine ilişkin pek çok veriyi barındırırlar. Bu nedenle, üretildiği kültüre ve yapıldığı döneme ışık tutan bir belge niteliğindedirler ve belleği oluştururlar. Bir yapı sahip olduğu özellikleriyle korunduğunda özgünlük ve enderlik niteliği ortaya çıkar. Üretildiği dönemin tasarım yaklaşımları ve sanatsal niteliklerini yansıtan tarihi yapılar sanatsal ve estetik değerler içerirler mekânsal belleği oluştururlar. Her birey ya da topluluğun geçmişte belirli yapılarla bütünleşen anıları vardır. Bunlar anı değeri oluştururlar. Yapıların kullanım sürekliliği bu mekânların korunmasını sağladığı gibi mekânsal belleğin de canlı ve dinamik tutulmasını sağlarlar. Tarihi yapılar, aynı zamanda üretildikleri dönemin üretim tekniği ve malzeme bilgisini de yansıtır ve belleğin göstergelerini de bu bilgiler oluşturur. Tarihi yapıların mekânsal bellek olarak değerlendirilmesinde mimari ve yapısal göstergelerden hareket edilmesi gerekir.

Bellek mekânları, belirli yerlerin, nesnelere ve olayların kişi ve gruplar için özel bir öneme sahip olduğunu vurgular. Bu mekânlar belleğin korunduğu ve aktarıldığı mekânlardır. Bellek mekânları kavramı Fransız tarihçi Pierre Nora tarafından ortaya atılmıştır. Pierre Nora bellek mekânını; insanların iradesiyle ya da zamanın işleyişiyle herhangi bir topluluğun ortak hafızasına ait simgesel öge haline getirdiği maddi ya da fikri düzendeki her anlamlı birim olarak açıklamıştır (Erkan,2024; 13). Bellek mekânlarının asıl varlık sebebi, zamanı durdurmak, unutmaya işini engellemek, nesnelere durumunu tespit etmek, ölümü ölümsüzleştirmek, somut olmayana somutlaştırmak ise bellek mekânları sürekli dönüşüme açık olarak yaşarlar. Mekânın fiziksel ve işlevsel nitelikleri, çeşitli etkinlikler ve etkileşim için zemin oluşturur. Bu mekânlar, insanlar için yarattıkları anlama bağlı olarak fiziksel ve sosyal anlamda devamlılığı sağlarlar. Başka bir anlatımla, bellek mekânları kavramı, genel anlamda her türlü etkinliğin bireysel ya da toplumsal olarak sürdürüldüğü mekânlarla ilgilidir; ancak dar anlamda, anma eylemlerinin gerçekleştirildiği mekânları ifade eder. Bellek mekânlarını, "insan topluluklarının resmi eylemlerde "grupun beraberlik duygusunun ve bireyselliğinin temelini oluşturan, geçmişe bağlı ortak bir bilgiyi anlatmasına aracılık eden yerler" olarak da tanımlanmaktadır (Assmann ve Czaplicka, J., 1995; Winter, 2015). Bu türden mekânlarla giden grup, olaya daha evvel yüklenmiş olan anlamları taşımakla kalmaz, yeni anlamlar da yükler. Pierre Nora, "bellek mekânları" terimini farklı metinlerde, efsanelerden hikâyelere ve kavramlara kadar genişletmiştir (Winter, 2015).

Bellek mekânları, çok farklı düzeylerdeki birikimler üzerinden işler ve toplumsal yaşamın pek çok kesimine dokunur. Bu mekânlar pitoresk ve estetik değerler yanında kültürel ve simgesel değerleri de içerirler. Bir mekânın tarihsel bakımdan önem kazanması, insanların belleğinde yer eden bir işaret noktası olma düzeyiyle ilişkilidir. Bellek mekânlarını etkili

ve çekici kılan, insanları ya da toplumları etkileyebilecek bir yaşam öyküsüne sahip olmalarıdır.

Bu mekânlarda gerçekleştirilen anma eylemi, geniş kitlelerin, hatırlanan olayın anlamlı olduğuna ve manevi bir mesaj içerdiğine ikna edilmesinden kaynaklanan bir eylemdir. Bellek mekânları iletilen mesajları somutlaştırır. Bellek mekânlarıyla alakalı belirleyici şey, bu mekânlar sadece travmatik bir durumla karşı karşıya kalanlarda değil, bu durumdan çok daha sonra gelen kuşaklar için de referans noktası meydana getirirler. Bellek mekânları insanların "tarihin bir anlam taşıdığına dair" inançlarını doğruladıkları yerlerdir (Winter, 2015).

Bu tür mekânlar eski çağlarda ve ortaçağda da yaygındır. Günümüzde kutsallık, müzeler ve sergiler gibi anma mekânlarında muhafaza edilir hale gelmiştir; ancak mekânları modernitenin kiliseleri ve katedralleridir artık; anma törenlerine yirminci yüzyılda güç veren ve zengin bir form çeşitliliği katan, işte bu kamusal ile özeline; "makro-tarihsel " ile "mikro-tarihselin" kesişimidir. Ancak bu süreçlerin karmaşık olması, bellek mekânlarının her zaman anma etkinliklerinin odak noktası olmadığı anlamına gelir (Winter, 2015).

Bellek Mekanları şöyle sıralanabilir:

- Dini Yapılar
- Eğitim Yapıları
- Kültür Yapıları
- Alışveriş Yapıları
- Kafe ve Restoranlar
- Konaklama Yapıları
- Ulaşım Yapıları
- Park ve Bahçeler
- Deniz Sahili
- Meydanlar vb.
- Belli bir dönemin tanığı olan her şey

Bu ve benzeri mekânlar, kent belleğinin canlı tutulmasını sağlarlar. İnsanlar bu mekânlar aracılığıyla kendi yaşam hikâyeleriyle bağlantı kurarlar.

Üretilmiş her yapı, üstlendiği işlevlere göre, farklı içeriğe sahip olur, biçimlenir ve değişik kimlikler alır. Bu kimlikler dinsel, anısal, kültürel vb. temelli işlevlere bağlı olarak oluşur. Bir meydan, bir sokak, eski ve özellikli bir ev, tarihi bir yapı; bir dağ, tepe; ulu bir çınar, belirli bir dönemin tanıklarındır; bireylerin, giderek toplumun belleğini oluştururlar. Bu bağlamda, kentsel ve mimari mekânlar, kültür birikimini yansıtmaları nedeniyle başta anı değeri olmak üzere tarihsel, belgesel ve estetik değer içerirler; taşıdıkları değerlere bağlı olarak korunduklarında varlıklarını sürdürülebilirler. Mimari yapılar ve oluşturdukları kentsel çevrelerin izleri mimari ve kentsel bellek'in de kaynağını oluştururlar. Bu varlıklar üretildiği dönemin toplumsal, ekonomik, kültürel, teknolojik yönlerinin yanı sıra sosyokültürel anlayışlarını, inançlarını ve beğenilerini de yansıtır. Diğer yandan, bu mekânların işlevsel yanları yanında simgesel yanları da vardır ve bunlar insanlar tarafından yüklenen anlam ve bağlılıklarla bağlı olarak fiziksel ve sosyal anlamda sürekliliği sağlarlar.

Kentsel bellek, bir kentin geçmişini, kültürel birikimini, mimarisini ifade eder ve toplumsal yaşamın izlerini barındırır ; bu birikimlere bağlı olarak da varlığını sürdürür. Bu nedenle, mimari yapılar ve oluşturdukları kentsel çevreler, aynı zamanda bir kentte geçmişle bağlantı kurmanın aracıdır ve kültürel miras olarak sonraki kuşaklara aktarılırlar. Kent mekânları, aynı zamanda, kent sakinlerinin yaşama yükledikleri anlama bağlı olarak oraları sahiplendikleri, mekânlar üzerinden kendilerine aidiyet ve prestij sağlama yönelik ontolojik dayanaklar buldukları yerlerdir.

Bu konuya ilişkin olarak Aldo Rossi "Şehrin Mimarisi" adlı çalışmasında kenti ortaya çıkaran mimariyi, "mekânlar üzerinden üretilen kent belleğinin bir dilimi" olarak açıklar (Rossi, 2006). Kente dair tüm imgeler, kentin kendisini ve belleğini içinde tutmasının yanı sıra toplum içindeki sosyal örüntüyü de mekânsal haliyle gözlemlenebilir hale getirir. Nitekim Rossi'nin belirttiği gibi işleyen bir köke sahiptir ve mekânlar yaratıldıktan sonra zamanla "genius logi" olarak ifade edilen mekâna has bir tinin varlığıyla bütünleşir. "Mekânın ruhu" olarak tanımlanan bu öz, Rossi'ye göre kenti yaşayan bir organizmaya dönüştürür. Mekân, kendi özünün içeren anlamını besler ve tinsel bir anlam edinir. Bu bağlamda Rossi'nin yorumuyla; dinamik bir yapı olarak kent ve mimari, belleğin öznesidir. Dolayısıyla kent ve mimarlık kavramlarıyla birlikte düşünülen kolektif belleğin yanı sıra kentin kendisinin de bir belleğe sahip olduğu düşüncesinden hareketle; kenti kendisine özgü olarak edindiği bu bellek "kentsel bellek" olarak ifade edilir (Tan Metreş, 2016).

Kentler, tarihsel süreçte fiziksel bir sürekliliğin yaşandığı, eski birikimler üzerine eklenerek gelişen ve katmanlardan oluşan yerleşmelerdir. Kentsel belleğin üreticisi olan bu durumu palimpsest olarak nitelenmek olasıdır. Meydan Larousse (1970)'da palimpsest kavramı, 'palimpsestus'tan hareketle, "üzerindeki ilk metin kazınarak, yerine yeni bir metin yazılmış parşömen el yazması" olarak tanımlanmıştır. Burada, eski yazı silinip yeni yazı yazılsa da eski yazının izleri kalmaktadır. Buradan hareketle katmanlardan oluşan ve dönüştürülen yerleşmeleri ve yapıları ifade etmek için de bu kavram kullanılmaktadır. Bu kavram aynı zamanda tarihsel süreçte oluşan belleği de ifade etmektedir. Tarihsel süreçte oluşan bu belleğin korunması ve yaşatılması önemlidir.

### 3. BALAT

#### 3.1. Balat'ın Tarihsel Süreçteki Gelişimi

Tarihi İstanbul'un fiziksel yapısını biçimlendiren en önemli öğelerinden biri olan Haliç'in alt bölgelerinden birini oluşturan ve güney kıyısında kurulan Balat, günümüzde Fatih İlçesi sınırları içinde yer almaktadır. Balat semti, oluşumundan günümüze dek çeşitli dönemlerdeki farklı değişkenlere ve koşullara bağlı olarak biçimlenmiş ve değişmiştir. Bu değişimi hem kentin demografik dokusunda, hem sosyo-ekonomik yapısında hem de yerleşme dokusu, sokak düzeni ve konut tipinde görmek olasıdır.

"Tarihi Yarımada'da Fener ile Ayvansaray arasında yer alan ve Haliç kıyısında sahil sınırlarının arkasından iç kısımlara doğru yükselen Balat Semti, yaklaşık olarak Esnaf Loncası caddesinden başlayıp, bir zamanlar Kantemir Sarayı'nın içinde yer aldığı bahçeye kadar uzanır (Özbilge, 2018)." (Resim 1).

Balat şehrinin ismi, muhtemelen "palation" (saray) sözcüğünün değişmiş halidir ve surlardaki Blakhernai Sarayı'na yakınlığı sebebiyle semt bu isimle tanınmıştır (Ortaylı,2007),(Türkün,2016).

Balat'ın yerleşime açılmasını ilk çağlara kadar götüren görüşler olsa da, ilk yerleşime ilişkin bilgi bulunmamaktadır. Roma İmparatorluğu döneminde Haliç boyunca surların dışında limanla ilişkili olarak dağınık yerleşmeler oluşmuştur... Balat semti de, Doğu Roma İmparatorluğunun surları genişletmesine kadar geçen süre içerisinde merkezin dışında kalan bir yerleşim yeri olmuştur. Doğu Roma İmparatorluğunun surları Blaherna'yı içine alacak kadar genişletmesiyle Balat çevresi yerleşim yeri içinde bulunmuştur (Yenen ve Yücutürk, 2004).

"İstanbul'un fethinden sonra gelen Türkler, Bizans'tan kalan Rumlar ve Musevilerle birlikte yaşamaya başladılar. Sonra bunlara Ermeniler ve ülkenin diğer cemaatleri de katılırlar (Özbilge, 2018)" Osmanlı kentinde, Müslüman ve gayrimüslim cemaatler, kendi mahallelerinde mescit, kilise veya sinagog etrafında yani dini mekanların etrafında yerleşmişlerdir. Bu bağlamda Balat semti de bir Yahudi Mahallesi olarak oluşmuş ve gelişmiştir.

Yahudilerin Balat bölgesinde yerleşimi Bizans İmparatorluğuna kadar dayanmaktadır. İstanbul fethedildikten sonra Fatih Sultan Mehmed'in yerleştirme politikasına bağlı olarak Makedonya'dan İstanbul'a gelen Yahudiler sırasıyla İspanya, Portekiz ve İtalyadan sürgün edilen Museviler Hasköy ve Balat'a yerleştirilmiştir. 15. Yüzyılın sonunda Yahudilerin semti haline gelmiş olan balatta çokça sinagog Yahudilerin geldikleri yerlerin adını taşımaktadır. 16.yy'da mahalle adları semt ismine dönüşerek Karabaş ve Molla Aşki mahallelerini de içine almıştır. 17. Yüzyıl itibarıyla çoğunlukla Bizans Yahudilerinin yaşadığı Balat'a diğer Yahudi gruplarının katılması ile beraber etkili bir cemaat oluşmuş ve zaman içinde cemaatler birbirine karışmıştır (Akın, 1994),(Akın, 2016). Sonraki yıllarda Müslümanlar da semte yerleşmeye başlamış ve camiler, mescitler ve tekkeler kurulmuştur karışmıştır.

Kuban (1996) şu bilgileri verir: Yahudiler, Bizans döneminden beri Sirkeci'de yaşıyorlardı. II. Mehmet'in vakfesinde, Sirkeci'den Balat'a kadar Haliç kıyılarında 13 Yahudi yerleşmesi bulunduğu yazılıdır. Yahudiler en yoğun olarak Bahçekapı'da (Cıfıt (Yahudi) Kapısı) oturuyordu. Yeni Cami'nin yapımı sırasında çoğunun dükkânı ve evi istimlak edilmişti. Yeni Cami inşaatı tamamlandıktan sonra Eminönü'nde oturan Yahudilerin hepsi başka Yahudi mahallelerine, özellikle de Balat ve Hasköy'e nakledilmişti (Kuban, 1996).



**Resim 1:** Balat Semti Dokusu ve Yerleşim Sınırları (Kaynak: İBB Arşivi, 2019)

Bu gelişmelere bağlı olarak Balat daha da gelişmiştir. Balat 17.yüzyılda en önemli ve parlak zamanını yaşamıştır. 18. Yüzyıla gelindiğinde ise Balat önemini günden güne kaybetmiştir. "Bu değişimin nedenleri arasında, bölgeyi etkileyen, Haliç Kıyılarındaki ticari canlılığın azalması, 1894 depremi; 18.ve 19.yüzyıllarda ardı ardına çıkan yangınlar; Hasköy, Ortaköy ve Kuzguncuk ve özellikle de Galata ve Pera'nın daha nitelikli yerleşme alanları olarak çekiciliği sayılabilir (Akın,2016)."

Balat'ın sahil şeritinde iskele etrafında şekillenen imalathaneler, depolar, kereste dükkanları, değirmen gibi yapılar; sur içinde hamam, cami, sinagog gibi anıtsal yapılarla birlikte dar sokaklarda konumlanan iki-üç katlı ahşap evlerden oluşan kent dokusu çıkan yangınlardan büyük düzeyde etkilenmiştir. "Birbirini kesen yapı adaları, birbirine paralel olarak uzanan sokaklar ve iskeleye doğru açılan kıyıya dik akslar bu alanın değişmez özelliğidir. Buna karşın üst kesimlere, örneğin Kasturya bölgesine doğru çıktığında, bu düzenin değiştiği ve burada geleneksel kent dokusuna uygun, az yoğun ve yeşili bol bir yerleşim bulunduğu gözlenmektedir (Akın,2016)."

19.yüzyılın ikinci yarısından itibaren Haliç kıyılarına önce devlet fabrikalarının, ardından da her tür atölye / imalathane ve mezbahanın gelmesi sahil kesiminin farklı bir karaktere bürünmesine neden olmuştur. Ayrıca Balat sahilinde kıyı çizgisinin değişimi de rol oynamaktadır. 1894 depreminden sonra yıkılan yapıların molozları sahilin doldurulmasında kullanılmıştır. 1936-1951 yılları arasında Henri Prost'a yaptırılan planda Haliç bir sanayi kenti olarak öngörülmüş ve sanayi atıkları nedeniyle de giderek önemli ölçüde kirlenmiştir. 1984-1986 yılları arasında Haliç'in temizlenmesi amacıyla başlatılan çalışmalar çerçevesinde, kıyıda oluşan geleneksel dokuyu ortadan kaldıran yıkımlar yapılmıştır. Eminönü'nde Yemiş İskelesi'nden itibaren tüm Haliç sahilini boyuncu sürdürülen bu faaliyetlerden Balat'ın kıyı kesimi de nasibini almış, değerleri gözletilmeksizin temizlenen sur dışındaki tarihi yapılar ve kentsel oluşum yerini tanımsız geniş park alanlarına bırakmıştır (Akın,2016).



**Resim 2: Balat Semt Silueti (Kaynak: İBB Arşivi, 2019)**

### 3.2. Balat'ta Kent Belleğinin Mekânsal Bileşenleri

Kentsel mekânın biçimlenmesine bağlı olarak ortaya çıkan yapı çevreleri, kentlinin yaşam pratikleriyle doğrudan ilişkilidir. Kentsel mekânın kimliği ya da karakteri de, bu süreçte, çeşitli yapısal ve soyut unsurlar tarafından belirlenmektedir. Başka bir anlatımla, kentsel bellek, kent mekânında zamana yayılı bir süreç içerisinde, kentsel mekânların çeşitli niteliklerine ve insan-mekân etkileşimine bağlı olarak oluşur. Bu bağlamda, kentsel belleği kentteki yaşam, sosyal ilişkiler ve kültür bağlamında düşünmek gerekir.

Kentsel çevreler, gerek bireysel, gerekse toplumsal belleğin üretilmesinde etkili olan ve kentsel bellek olarak da adlandırılan mekânsal belleğin oluşmasını sağlayan fiziki tabanı oluştururlar. Kentlilerin hem bireysel hem de toplumsal olarak bir değerler kümesiyle özdeşleştiği ve imgesel bir yarıya ulaştığı kentsel mekân öğelerini ortaya koymak önemlidir. Bir kent, kentsel mekânın niteliğine ve bu niteliklerin kentlinin belleğinde bıraktığı izlere bağlı olarak değerlendirilebilir. Bu mekânlar, kültürel ve sosyo-ekonomik durumlar ile tarihsel süreçte yaşananlara ilişkin hafızayı oluştururlar. Diğer yandan, bu mekânlar yerel kimliğin ve toplumsal özelliklerin bir yansımasıdır. Kentsel mekânların, kentin belleğini oluşturmanın yanı sıra eğitici bir işlevleri de vardır. Kısaca, kentsel mekânlar kendine özgü kültürel, sosyal, ekonomik ve tarihsel özellikleri ile bir bütünlük içerisinde kentlilerin belleğinde yer edinirler. Bu mekânlar, kent kimliği ve belleğini üreten öğeler olmanın yanında, kentsel bellekteki anlamlarının da anlaşılmasına yol açarlar. Kentsel belleği oluşturan öğeleri; doğal çevre öğeleri, yapı çevre öğeleri ve toplumsal çevre öğeleri olarak üç ana başlık altında incelemek olasıdır; Balat semtini de bu öğeler bağlamında incelemek gerekir.

#### 3.2.1. Doğal Çevre Öğeleri

Bir kentin belleğini oluşturan en önemli öğeler doğal ve kültürel çevre öğeleridir. Doğal çevre öğeleri, coğrafi konum, topoğrafik yapı, iklim, flora (bitki örtüsü)- fauna (hayvan türleri) ve su ögesidir. Balat, Haliç'in güney kıyısında konumlanmış olan ve günümüzde Fatih ilçesinin sınırları içinde kalan bir semttir. Yerleşmenin tarihsel süreç içinde oluşması ve biçimlenmesinde, su ve topoğrafik yapı temel belirleyici olmuştur. Balat'tan bahsedildiğinde, kentlilerin belleğinde, bir kıyı kentsel mekânı olması ve kıyıdan uzaklaştıkça artan bir eğimle kendini gösteren topoğrafik yapısı yer edinir. Bu durumu semtin silüetinde açıklıkla görmek mümkündür (Resim 2).

#### 3.2.2. Yapılı Çevre Öğeleri

Bir yerin karakterinin ve yapılaşmış çevre özelliklerinin oluşumunda temel belirleyici olan yerin sahip olduğu doğal yapıdır. Yerleşme bu doğal yapıya bağlı olarak oluşur ve biçimlenir. Bölgenin en çarpıcı özelliği, kıyı bağlantılı oluşu ve kıyıdan uzaklaştıkça eğimin arttığı bir özellik arz eden topoğrafyasıdır.

Surlar ile iç kesimin bağlantısı Balat kapısı tarafından sağlanmaktadır. Balat Kapısı'nın ardındaki bölge Balat'ın en mühim yerleşme alanıydı. Kapıdan girildiği zaman semtin ticari merkezine ulaşım sağlanabilmekteydi. Buradaki esnafın çoğunluğunu Yahudi esnaflar oluşturmaktaydı. Ayrıca diğer topluluklar da ticaret ve zanaat işleriyle uğraşmaktaydı (Akin, 2016)

Balat'ın yerleşme dokusunu, yapılaşmayı ve yol düzenini bu topoğrafik yapı ve su ögesi belirlemiştir. Balat bölgesi, topoğrafyanın özelliklerini taşısa da, 19. Yüzyılda çıkan yangınların ardından, ızgara sistemine bağlı yapılaşma düzenine geçilmiştir. Eğimin dik olduğu yerlerde sistemi bozmamak için yollar ya dik eğimlerle ya da merdivenlerle çözülmüştür. Bu özellikler Balat'ın kent kimliğinin oluşumunda da etkili olmuştur. Doğal yapıyla uyumlu olarak gelişen yapılaşma ve yapılaşmanın biçimlen-

dirdiği silüet, Balat'ı özgün kılan karakterinin oluşmasına yol açmıştır. Diğer yandan, doğal yapı, bölgedeki kentsel işlevlerin konumlanmalarında belirleyici olmuştur. Ticaret alanları kıyıya yakın ve ilişkili olarak konumlanırken eğimli alanlarda ise, konut ve diğer işlevsel alanlar yerleşmiştir. Sonuç olarak, bölgenin doğal özellikleri ve bu özelliklere bağlı işlevsel dağılım ve yapısal biçimlenme Balat'ın kentsel kimliğini oluşturmuş ve buna koşut olarak kentsel bellek ortaya çıkmıştır.

Çeşitli araştırmacıların tespitlerine göre: Balat'ın mimari karakterini belirleyen taş ve tuğladan oluşan kâgir yapılarıdır. Yangınlar sonucu yitirilen yapıların yerini betonarme yapılar almış ve çok az sayıda ahşap yapı, kötü ve vasat haliyle günümüze ulaşabilmiştir. Semtteki binalar genelde zemin+2 kattır; bu binalar arasında birinci katında ya da iki katında cumbalı olanlar ve son katı balkonlu olanlar çoğunluktadır. Bu yapılar 19.yüzyılın sonlarındaki özelliklerini taşımaktadır ve yarısına yakını 1930'dan önce inşa edilmiştir. Yeni yapılaşmadaki bazı özensizlikler bu dokuda yer yer bozulmalara yol açmıştır (Resim 3).



**Resim 3: Balat, eski ve yeni yapı düzeni (Yazarın Arşivi)**

Semtteki tek katlı yapılar, genellikle çevredeki ticari alanlarda, özellikle Balat çarşısının bulunduğu ticari aks üzerinde konumlanmıştır. Diğer kısımlarda ise tek katlı yapılar olarak anıtsal yapılar (cami, sinagog vb.) depolar ve atölyeler bulunmaktadır.

Balat semti, dar sokaklar ve bitişik nizam yapıların oluşturduğu homojen yapı sergiler (Resim 4). Bu yapılaşma düzeni, çevrelenme duygusunu yani mekân etkisini güçlendirici bir etkiye bulunur. Balat'ın içine girildiğinde, yollar boyunca benzer özellikte olan ve süreklilik arz eden bitişik düzende yapılar, bütünlük oluşturan bir birim olarak algılanır.

Bölgesel karakter oluşturan bu yapılar, Balat Evi olarak nitelenecek bulunduğu bölgeye kimlik veren bir özellik kazanır. Yerleşmeye kimlik kazandıran devamlılık ve uyumlu bütünlük, yer yer Fener Rum Erkek Lisesi ve Yavuz Sultan Selim Camii gibi bazı tarihi yapılarla kırlsa da, bu kırlma sürekliliği bozmaktan uzaktır. Aksine kentsel dokuda yarattığı farklılık, monotonluğu giderici bir etkiye bulunmaktadır. Sonuç olarak, Balat'ta mimari bakımdan yöreye kimlik kazandıracak düzeyde özellikli yapılar vardır ve bunlar konumlandıkları yol boyunca, tipolojik özelliklerinden dolayı bir süreklilik gösterirler ve bir bütün olarak algılanırlar. Aynı zamanda kendine özgü mimari karakterine bağlı olarak bir kimlik oluştururlar ve kentlinin belleğinde yer edinirler. Ne var ki bu yapıların yok oluşu bellek yitimine de yol açmaktadır (Resim 5 ) .



**Resim 4:** Balat, Sokak ve Yapı Düzeni (Yazarın Arşivi)

Bu durum, silüette de kendini göstermekte, hareketli ve canlı bir görünüm ortaya çıkmaktadır. Balat yerleşmesinin silüetini belirleyen ve vurgulayan, doğal ve mimari etmenlerdir. Yapı düzeninin belirlediği mimari doku, silüette de kendisini ortaya koymaktadır. Yol üzerindeki yapıların bitişik düzende yapılması cephelerde süreklilik yaratmakta ve cephelerdeki yapı detayları (çıkmalılar, cumbalar söveler, pencereler ve giriş kapıları vb.) mimarideki uyumu ve bütünlüğü vurgulamaktadır. Balat'ın kent bütününe silüetine baktığımızda doğal yapıyı ve yapı düzenine bağlı olarak oluşan kentsel dokuyu bir bütünlük içerisinde algılarız. Bu algı aynı zamanda kentsel belleğin de vurgulu bir yansımasıdır. Çünkü bu semt tarihsel süreçte oluşmuş mimari ve kentsel belleği barındırmaktadır.

### 3.2.3. Toplumsal Çevre Ögeleri

Balat, tarihsel süreçte bir Musevi semti olarak varlığını sürdürse de 19.yüzyılın ikinci yarısından itibaren, çeşitli etmenlere bağlı olarak demografik yapı değişmeye başlamış ve Cumhuriyet döneminde de hızlanarak devam etmiştir. Özellikle İsrail Devleti'nin kurulmasından sonra Balat nüfusunun yaklaşık dörtte biri Balat'tan ayrılmıştır (Siyahhan,2014),(Türkün,2016).

Varlık Vergisi de semtin Museviler tarafından terk edilmesinde çok önemli etken olmuştur. 1960'lı yıllardan sonra semtin Musevi sakinleri ekonomik durumlarının iyileşmesiyle birlikte çoğunlukla Şişli'ye taşınmıştır. İlerleyen süreçlerde Balat'taki Musevi cemaat, sayıca azalmış ve azınlık olmuştur. Karadeniz Bölgesi'nden

gelen göçler bölgenin demografik yapısını büyük oranda değişime uğratmıştır. Balat'ta 1950'li ve 1960'lı yıllarda özellikle Kastamonu'dan gelen nüfus ağırlıklıdır... Bugün Şişli, Nişantaşı gibi semtlerde oturup işlerini Balat'ta sürdüren az sayıda tüccar ve esnaf bulunmaktadır. Sonuç olarak, semtin nüfus yapısında önemli bir değişim meydana gelmiştir... (Siyahhan, 2014; Türkün,2016).

Bu gelişimde, ülkemizde 1950'lerden itibaren başlayan şehirleşme de etkili olmuş semt yeni katılanlarla değişime uğramıştır. Bununla birlikte Karadeniz Bölgesi'nden göç edenler, semtin sosyal dokusunu ve kültürel yapısında değişime yol açmıştır. Nitekim araştırmalar, Balat'ın günümüzdeki sosyal dokusunun 1960'larda oluşmaya başladığını göstermektedir. 1990'larda yaşanan göç dalgasından sonra Doğu ve Güneydoğu Anadolu'dan gelenlerle sosyal doku günümüzdeki halini almıştır. Başka bir anlatımla, çeşitli dönemlerde yaşanan göç hareketlerine bağlı olarak toplumsal yapı önemli ölçüde değişmiş ve günümüzdeki yapıya ulaşmıştır. Bu sürecin sonunda Musevilerin tamamen azınlığa düşmesiyle Balat bir Musevi semti olmaktan çıkmıştır.



**Resim 5:** Balat'ta atıl durumdaki bir yapının giderek yok oluşu (Yazarın Arşivi)

Akın, Balat'ın sosyal yapısına ilişkin şu bilgileri vermektedir: "...Sosyal anket sonuçları, kullanıcıların yüzde 50'sinin otuz-kırk yıldır burada yaşayan Karadenizliler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu grubu Marmara Bölgesi'nden gelenler izlemekte, yüzde 17'lik bir kesimin de 1990'ların başında Güneydoğu ve Doğu Anadolu'dan gelip buraya yerleştikleri görülmektedir. Sakinlerin yüzde 18'i İstanbul doğumludur. Anadolu'nun aynı yörelerinden gelenler, sıkı bir dayanışma ve birliktelik sergilemektedir. Alan sınırları içinde yoğun komşuluk ilişkileri gözlenmekte ve bu durum ankete verilen yanıtlarla da doğrulanmaktadır. Sokakta yaşama, Balat için önemli bir özellik olarak belirlemektedir. Kadınlar iklim elverdiği sürece hep kapı önünde oturmakta, çocuklar sokakta oynamaktadır..."(Akın,2018).

Balat'ın toplumsal yapısı ile ilgili yaşanan değişimi, Cihan Keyif'in Arkitera'da yayınlanan ve atadan Balat'lı olan Ersin Kalkan'la yaptığı röportajda anlatılanlardan görmek olasıdır. Kalkan röportajında Balat semtini "farklı yerlerden gelenlerle panayır yeri" olarak tanımlamıştır.



Tablo.1 Kùltür varlıkları tescil grubu tablosu (Kaynak. İBB Kùltürel Miras Koruma Müdürlüğü Arşivi,2025)

İŞLEV	TOPLAM ADET	TESCİL GRUBU					ANIT TÜRÜ/ÜST GRUP
		1. GRUP	2. GRUP	3. GRUP	4. GRUP	BELİRSİZ	
APARTMAN	13		7			6	Sivil mimari yapısı
APARTMAN, DÜKKAN/İŞYERİ	2		1			1	Sivil mimari yapısı
CAMİ	10	3				7	Dini yapı
CAMİ, KİLİSE	1	1					Dini yapı
CAMİ, KİLİSE, MÜZE	1	1					Karma yapı
CAMİ, KÜTÜPHANE	1	1					Karma yapı
ÇEŞME	12	4	4			4	Su yapısı
DEPO	1					1	Ticaret yapısı
DİĞER	3		1			2	Kentsel öge
DUVAR	10	5				5	Kentsel öge
DUVAR, KAPI	3	1	1			1	Kentsel öge
DÜKKAN/İŞYERİ	14		5			9	Ticaret yapısı
DÜKKAN/İŞYERİ, EV	61	1	41			19	Karma yapı
EV	781	3	385	2		391	Sivil mimari yapısı
FABRİKA	2	2					Endüstri yapısı
FIRIN	1		1				Ticaret yapısı
HAMAM	2	2					Su yapısı
HAVUZ, SARNIÇ	1	1					Su yapısı
HAZİRE	6	3				3	Dini alan
İMALATHANE	1					1	Endüstri yapısı
İSKELE	1		1				Ulaşım yapısı
KALINTI	8	2	2			4	Kentsel öge
KALINTI, SARNIÇ	1					1	Karma yapı
KAPI	5	4				4	Kentsel öge
KAPI/SUR	2					2	Karma yapı
KARAKOL	2	1				1	Yönetim yapısı
KİLİSE	5	1	1			3	Dini yapı
KONAK/KÖŞK	1		1				Sivil mimari yapısı
KUYU	6	3	2			1	Su yapısı
KÜTÜPHANE	1	1					Eğitim yapısı
MEDRESE	1					1	Eğitim yapısı
MEZAR	4	3				1	Dini alan
MEZARLIK	1					1	Dini alan
MÜŞTEMİLAT	11	3	6			2	Sivil mimari yapısı
MÜŞTEMİLAT, OKUL	1	1					Karma yapı
OKUL	7	1	3			3	Eğitim yapısı
SARNIÇ	9	6				3	Su yapısı
SÜBYAN MEKTEBİ	3	1				2	Eğitim yapısı
SIRA EV	8		2			6	Sivil mimari yapısı
SİNAGOG	1	1					Dini yapı
SU TERAZİSİ	1	1					Su yapısı
SUR	11	1				10	Savunma yapısı
ŞADIRVAN	2	1				1	Su yapısı
TEKKE	2		1			1	Dini yapı
TÜRBE	8	6				2	Dini yapı

yaklaşımdır (Baily, 1975; Aktaran: Ahunbay,2016 ). Bütünleşik koruma bir çevreyi pasif olarak korumayı değil, yaşam koşullarını ve çevreyi birlikte, tümel bir yaklaşımla ele alarak iyileştirmeyi hedeflemektedir (Ahunbay,2016). Ancak, tüm bunlar da sağlıklılaştırma ile olasıdır.

Bu konuda Avrupa Birliği Fener -Balat Projesi (1998) önemli bir örnektir. Balat ağırlıklı olan bu proje, 1996 yılında İstanbul'da yapılan Habitat II Konferansı'nın ardından 1998 yılında başlatılmıştır. UNESCO'nun desteği ve AB'nin mali yardımıyla gerçekleştirilmesi amaçlanan sosyal içerikli bu projenin önkoşulu, bölgenin altyapı ve donatı eksikliğinin giderilmesi ve "çöküntü alanı" olmaktan kurtarılarak bugünkü kullanıcılarıyla sıhhileştirilmesiydi. Projenin savunduğu temel ilkeler; semt sakinlerinin yaşam düzeyini yükseltmek ve mevcut yapıları konut stoku olarak sıhhileştirme çalışmaları süresince, altyapı düzenlemeleriyle ve eğitime yönelik yeni girişimlerle birlikte, bölgesel yenilemeleri, yapıların sağlamlaştırılmasını ve korunmaya değer yapıların restorasyonunu yöre insanlarıyla birlikte yürütmektir (Akın, 2015).

Benzer ve daha kapsamlı projelerle Balat'ın kentsel belleğini yaşatmak ve canlı tutmak gerekir. Kentsel ve kültürel belleğin yaşatılması ve canlı tutulması için semt sakinlerinin Balat'ı sahiplenmesi önemlidir. Bu olmadan fiziksel ve sosyal belleği yaşatmanın olanağı yoktur. Nitekim, tarihsel süreçte çeşitli nedenlerle Yahudiler ve diğer azınlıkların yüzyıllarca yaşadıkları bu semtten uzaklaşmasıyla bu süreçte sosyal doku değişmiş ve ciddi anlamda bellek yitimi yaşanmıştır. Balat'ın geleneksel fiziksel ve sosyal yapısıyla korumak için, bütüncül bir yaklaşımla konunun ele alınıp, mevcut dokuyu doğru ve rasyonel yöntemlerle koruyarak, bunu da günümüz ihtiyaçlarıyla uyumlu kılan katılımcı projeler geliştirilebilir ve geçmişten kalan miras gelecek kuşaklara aktararak bellek canlı tutulabilir. Diğer yandan, bu projenin Tarihi Yarımada ile entegre bir şekilde, sosyal yönü güçlü, ekonomik ve fiziksel iyileşmeyi sağlayan, tüm paydaşların çıkarlarının korunduğu bir içerikte olması gerekir.

#### 4. SONUÇ

Her toplum, kültürel belleğini oluşturan geçmiş birikimlerine bağlı olarak gelişir. Bellek, çeşitli disiplinlerce farklı ifade edilse de, genel olarak geçmişle ilgili bilgilerin akılda tutulmasını ifade eden bir yeti olarak tanımlanır ve gelecek kuşaklara aktarılmasıyla anlam kazanır. İnsanöğlü geçmiş birikimlerini saklamayı ve gerektiğinde onları yeniden üretip geliştirmeseydi ilerleyemzdi.

Bellek çok boyutludur ve pek çok etmenin etkisi altında oluşur. Bu nedenle çeşitli disiplinlerin kapsama alanındadır. Bilişsel psikolojide belleğin beynin fizyolojik yapısı ve insan psikolojisiyle ilişkili olduğu varsayılır ve tarihsel bağlamıyla ilişkisi kurulmaz. Oysa belleğin işleyişinde dış koşullar, yani toplumsal ve kültürel koşullar etkilidir. Başka bir anlatımla belleğin nörolojik boyutu önemlidir; bellek bilgileri aktif bir şekilde yapılandırır, eklemeler ve çıkarmalar yapar; ancak bu yapılanmada kültür büyük ölçüde etkili olur. Bu nedenle bellek konusuna çok boyutlu olarak bakmak ve incelemek gerekir.

Gündelik yaşam deneyimleri belirli bir zamanda ve mekânda gerçekleşir. Mekân belleğin biçimlenmesinde bağlamı oluşturur ve somut olgular yanında soyut olguları da barındırır. Mekânı oluşturan bileşenlerin çeşitli özellikleri duyumlar ile kavrandığında, birey bunları kendi zihinsel süreçleri içinde değerlendirerek birtakım yarıtlara varır ve mekânı algılar. Bu süreç, mekân ile ilgili duyum –algılama-kodlama-depolama-geri getirme süreçlerinden oluşur.

Çeşitli mekânlara ilişkin imgenin nasıl inşa edildiğini anlamak önemlidir. Algılanan her imge bellekte yer eder, anımsamayla zihnimizde belirir. Bellekte yer eden mekânsal verilerin niteliğini fiziksel yapı yanında çeşitli sosyal, kültürel ve psikolojik etmenler belirler. Bellek mekânları kavramı, genel anlamda her türlü etkinliğin bireysel ya da toplumsal olarak sürdürüldüğü mekânları ifade eder. En basitinden en karmaşık olana, çok farklı birikimler üzerinden işler ve yaşamın her alanında kendini gösterebilir. Bellek mekânlarını etkili ve çekici kılan, insanları ya da toplumlari etkileyebilecek bir yaşam öyküsüne sahip olmalarıdır.

Bellek mekânlarının mimari ve kentsel boyutu vardır. Yapıların ve kentlerin bellekteki izleri mimari ve kentsel belleği oluşturur. Mimari ve kentsel mekânlar geçmişin somut izlerini taşırlar ve içerdiği imgeler üzerinden anımsanırlar. Bu mekânlar, toplumsal yapıyı yansıtmaları nedeniyle başta anı değeri olmak üzere tarihsel, belgesel ve estetik değer içerirler; taşıdıkları değerlere bağlı olarak korunduklarında varlıklarını sürdürürler ve sonraki kuşaklara aktarırlar.

Balat semti, tarihsel süreçteki gelişimine bağlı olarak hem fiziksel hem de taşıdığı kültürel özelliklerle İstanbul'un geçmişine ilişkin birtakım değerlerini günümüze kadar taşımış bir tarihi mekândır. Anıtsal yapıları, sivil mimari örnekleri, kent silüetine katkısı ve turistik potansiyeli, bu semtin önemini ortaya koymaktadır. Bu nitelikler, yüzyıllara bağlı olarak oluşmuştur ve tarihsel belleği yansıtmaktadır. Başka bir anlatımla, Balat, fiziksel bir sürekliliğin yaşandığı, eski kalıntılar üzerine eklenerek gelişen ve katmanlardan oluşan bir yerleşmedir. Palimpsest olarak da nitelenen bu durum kentsel belleğin üreticisi durumundadır. Bu belleğin korunması, yaşatılması önemlidir. Bu amaçla, Balat'ın genel karakterini ve belleğini yansıtan her türlü değeri, yani sosyo-kültürel, ekonomik ve fiziksel yıpranmayı durduracak ve çeşitli potansiyelleri geliştirecek önlemler almak gerekir.

Bu amaçla şunlar önerilebilir.

- Tarihsel bağlamı nedeniyle, Balat Semti çok boyutlu bir fiziksel ve toplumsal yapıya sahiptir. Semte ilişkin sorunların çözümü için çok boyutlu ve bütüncül (holistik) bir yaklaşım gerekir.
- Kent bütünüyle ilişkileri bağlamında, Balat'ın belleğini oluşturan tarihsel değerlerini korumak, canlandırmak ve geliştirmek üzere çözümler üretmek gerekir.
- Bir kıyı yerleşmesi olan Balat'ın kıyı bandı ile ilişkisini geliştirmek ve Haliç sistemi ile bütünleşmesini sağlamak; bu bağlamda içerdiği çeşitli potansiyelleri değerlendirerek sahili sosyal ve kültürel alanlar olarak geliştirmek gerekir.
- Kentsel dokunun, sosyal dokunun ve kentsel kimliğin bir bütün olarak ele alınıp hem tarihi değerleri korumak hem de kültürel belleği yaşatmak ve geliştirmek için çözümler üretmek gerekir.
- Yörenin potansiyellerini bilimsel araştırmalara bağlı olarak ortaya koymak ve bu potansiyellerden maksimum toplumsal ve ekonomik yarar sağlamak üzere projeler geliştirmek gerekir.

Tarihsel süreçte, çeşitli koşullara bağlı olarak biçimlenen kentsel mekânlar kentsel belleği oluştururlar ve kentsel kimliğin biçimlenmesinde en önemli rolü oynarlar. Geçmişle gelecek arasında sağlıklı ilişkiler kültürel belleğin korunmasıyla kurulabilir. Kentsel belleği oluşturan mekânların sürekliliği, hem bu mekânların kentlilerce sahiplenebilmesi hem de kültürel belleğin yaşatılması için önemlidir. Bu nedenle, bellek mekânlarının korunup yaşatılması ile hem kültürel süreklilik sağlanacak hem de mekânsal bellek devamlı canlı kalacaktır.

Bellek mekânlarının yalnızca fiziksel yapısıyla korunması değil, çağdaş yaşamla bütünleştirilmesi ve etkinliklerle canlı tutulması gerekir. Bu da kapsamlı bir planlama yaklaşımını gerektirir. Bütünleşik yaklaşımla koruma bir mekânı pasif olarak korumayı değil, yaşam koşullarını ve çevreyi birlikte tümel olarak ele alıp iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, Balat'ın kendi sakinlerini hedefleyen kapsamlı bir sağlıklılaştırma programına bağlı olarak geliştirilmesi ve kentsel belleğin canlı tutulması gerekir.

#### KAYNAKÇA

- Akın, N. (2016). Haliç'te Bir Rehabilitasyon Alanı: Balat. Z. Ahunbay, İ. Dinçer ve Ç. Şahin (Ed.), Neoliberal Kent Politikaları ve Fener-Balat-Ayvansaray Örnekleri: Bir Koruma Mücadelesinin Öyküsü (17-42) içinde. Türkiye İş Bankası Yayınları.
- Ahunbay,Z. (2016) Kentsel Korumada Temel İlkeler ve Fener-Balat. Z. Ahunbay, İ. Dinçer ve Ç. Şahin (Ed.), Neoliberal Kent Politikaları ve Fener-Balat-Ayvansaray Örnekleri: Bir Koruma Mücadelesinin Öyküsü (17-42) içinde. Türkiye İş Bankası Yayınları.
- Assmann, J. (2018). Kültürel Bellek: Eski Yüksek Kültürlerde Yazı, Hatırlama ve Politik Kimlik. (3. Baskı). Ayrıntı Yayınları.
- Arcan, E. F. ve Evci, F. (1992). Mimari Tasarıma Yaklaşım. (2.Basım). 2K Yayınları.
- Boyer, P ve Werst, J. (2015). Zihinde ve Kültürde Bellek (1.Baskı). (Çev. Y.A. Dalar,). Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.
- Çalak, İ. E. (2016). Kentsel ve Kolektif Belleğin Sürekliliği Bağlamında Kamusal Mekanlar: ULAP Platz Örneği, Almanya . Tasarım + Kuram , 8 (13) , 34-47 . DOI: 10.23835/tasarimkuram.240895

Groh, J.M. (2017). Mekan Yaratmak: Beyin Neyin Nerede Olduğunu Nasıl Biliyor (2.Baskı). (G.Koca, Çev). Metis Yayınları.

Hançerlioğlu, O. (2016). Felsefe Sözlüğü (23.Baskı). Remzi Kitabevi

Arkitera. (2015). Balat'tan Gidenler Yerine Sessizlik Geldi.  
<https://www.arkitera.com/soylesi/balattangidenlerin-yerine-sessizlik-geldi/>

Wikipedia. (2022,Ağustos). Toplumsal Hafıza.  
[https://tr.wikipedia.org/wiki/Toplumsal\\_hafiza](https://tr.wikipedia.org/wiki/Toplumsal_hafiza)

Kuban, D. (1996). İstanbul Bir Kent Tarihi. (1.Baskı). (Z. Rona, Çev.). Türkiye Ekonomik ve Toplumsal Tarih Vakfı.

Meydan Larousse (1970), Bütük Lügat ve Ansiklopedi (9.Cilt),Meydan Yayınevi

Tan Metreş, E. H. (2016). Kentsel Bellek Bağlamında Yu. V. Trifonov'un Öykülerinde "Moskova". [Yayımlanmamış doktora tezi]. İstanbul Üniversitesi.

Özbilge, A.F. (2018). Fener-Balat-Ayvansaray. (1.Baskı). E Yayınları.

Özdeş, G. (yılı bilinmiyor). Şehirsel Tasarım. Yayımlanmamış Ders Notu, Mimarlık Bölümü. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Ünlü, T.S. (2017). Kent Kimliğinin Oluşumunda Kentsel Bellek ve Kentsel Mekan İlişkisi: Mersin Örneği. Planlama. 2017;27(1) 75-93.

[https://jag.journalagent.com/planlama/pdfs/PLAN-06078-RESEARCH\\_ARTICLE-SELVI\\_UNLU.pdf](https://jag.journalagent.com/planlama/pdfs/PLAN-06078-RESEARCH_ARTICLE-SELVI_UNLU.pdf)

Winter,J. (2015). Tarihçiler ve Bellek Mekanları. P. Boyer ve J. Werst (Ed.), Zihinde ve Kültürde Bellek. (s. 321-343) içinde. Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.

Özak Öymen, N. ve Gökmen Pulat, G. (2009). Bellek ve Mekan İlişkisi Üzerine Bir Model Önerisi. İTÜ Dergisi. Sayı:8,Cilt:2 145-155.  
[https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/119482/mod\\_resource/content/0/bellek%20ve%20mimari.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/119482/mod_resource/content/0/bellek%20ve%20mimari.pdf)

Plotnik, R. (2009). Psikolojiye Giriş. (1.Baskı). Kaknüs Yayınları.

Rossi, A. (2006). Şehrin Mimarisi. (1.Baskı). (Çev.N. Gürbilek). Kanat Kitap Yayın.

Türkün, A. (2018). İstanbul'un Tarihi Konut Bölgelerinde Kentsel Dönüşüm :Tarlabaşı ve Fener- Balat- Ayvansaray Örnekleri. Z. Ahunbay, İ. Dinçer ve Ç. Şahin (Ed.), Neoliberal Kent Politikaları ve Fener-Balat- Ayvansaray Örnekleri: Bir Koruma Mücadelesinin Öyküsü (s. 131-181) içinde. Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.

**Bu makaleye atıfta bulunmak için:**

Kızıldeli, C. (2026). "Bellek ve Mekan İlişkisi Bağlamında Balat", *İYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemli-Akademik*, 1(1):1-10.  
<https://doi.org/10.66125/0.2026.2>

# MİMARLIK NEDİR?

## (What Is Architecture?)

Engin Akçin

Yük. Mimar - Öğr. Gör., Mimarlık Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,  
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. [engin.akcin@yeniuyuzuil.edu.tr](mailto:engin.akcin@yeniuyuzuil.edu.tr)  
(M.Arch. - Lecturer, Department of Architecture, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yüzyıl University, Istanbul, Turkey)

Alınma Tarihi: 07 Temmuz 2025 Kabul Tarihi: 29 Ağustos 2025 Yayın Tarihi: Şubat 2026  
(Received: 07 July 2025 Accepted: 29 August 2025 Published: February 2026)  
Dijital Nesne Tanımlayıcı (Digital Object Identifier): <https://doi.org/10.66125/0.2026.3>

Derleme Makalesi  
(Review Paper)

### ÖZET

Bu makale, mimarlığı işlevsel, duygusal ve ideolojik gereksinimlere yanıt olarak fiziksel çevrenin dönüştürülmesini içeren çok katmanlı bir uğraş olarak kavramsallaştırmaktadır. Mimarlığı bir enformasyon işleme sistemi olarak çerçeveleyen çalışma, yapıların ve mekânların yalnızca tasarım ürünleri değil, aynı zamanda insan algısını, deneyimini ve anlam inşasını şekillendiren etkin öğeler olduğunu ileri sürmektedir. Araştırma, mimarlığın tarihsel evrimini pre-endüstriyel toplumlarda kolektif bir zanaat olarak doğuşundan, Rönesans ve Sanayi Devrimi ile birlikte profesyonel bir disipline dönüşümüne kadar izlemekte; bu bağlamda bireysel ve yaratıcı bir özne olarak "mimar" kimliğinin ortaya çıkışına odaklanmaktadır. Mimari tasarımın bilişsel ve toplumsal boyutlarını irdeleyen çalışma, ampirik, analitik, sanatsal ve ideolojik bilgi türlerinin bütünlüklü biçimde tasarım sürecine dahil oluşunu vurgular. Ayrıca, mimari biçimlenmeleri yönlendiren tekrar eden bilişsel örüntüler olarak "mimari mem" kavramını ortaya koymakta ve bu yapısı kalıpların dijital bilgi teknolojileriyle birlikte daha hızlı ve yaygın şekilde dolaşıma girdiğini savunmaktadır. Mimarlığı dinamik bir problem çözme ve enformasyon iletimi sistemi olarak ele alan bu yaklaşım, mimarlığın hem fiziksel hem de sosyo-kültürel çevreyi biçimlendirme rolünü öne çıkarır. Sinirbilim, felsefe ve kültürel kuramdan beslenen bu disiplinlerarası çözümleme, çağdaş toplumda mimarlığın anlam ve işlevine dair derinlikli bir anlayış geliştirmeyi amaçlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Mimarlık, Enformasyon, Paradigma, Sorunsal, Mem

### ABSTRACT

This article conceptualizes architecture as a multifaceted endeavor that transforms the physical environment to address functional, emotional, and ideological imperatives. Framing architecture as an information-processing system, it posits that buildings and spaces are not only products of design but also active agents in shaping human perception, experience, and meaning. The study traces the historical evolution of architecture from a collective craft in pre-industrial societies to a professional discipline during the Renaissance and Industrial Revolution, spotlighting the emergence of the architect as an individual creative force. It explores the cognitive and social dimensions of architectural design, emphasizing the integration of empirical, analytical, artistic, and ideological knowledge. The concept of architectural "memes" is introduced as recurring cognitive patterns that drive stylistic evolution, amplified by contemporary digital information technologies. By presenting architecture as a dynamic system of problem-solving and information transmission, the article highlights its role in shaping both physical and socio-cultural landscapes. Drawing on neuroscience, philosophy, and cultural theory, this interdisciplinary analysis offers a nuanced understanding of architecture's significance in contemporary society.

**Keywords:** Architecture, Information, Paradigm, Problematics, Meme

## 1. GİRİŞ

"Siz Mimarlık'la ilgilenmiyor olabilirsiniz ama Mimarlık sizinle ilgilenmektedir."\*

(\* Troçki'ye atfedilen "Siz savaşla ilgilenmiyor olabilirsiniz ama savaş sizinle ilgilenmektedir" sözünden türetilmiştir.)

"Mimarlık" üzerine herhangi bir fikir üretmeden önce "Mimarlık" ile kast edilenin ne olduğunu netleştirmek gerekir, çünkü "Mimarlık" kavramı aslında birbiri ile ilişkili birden çok anlam ifade ediyor. Bu makale, mimarlığı bir bilgi işleme sistemi olarak çerçevelemek amacıyla, sinirbilim, felsefe, kültür kuramı ve mimarlık tarihi gibi farklı disiplinlerden edinilen perspektifleri birleştiren disiplinlerarası bir metodoloji benimsemektedir (Cross 2011; Mallgrave, 2010; Oxman, 2006).

Bu metinde sıkça kullanılan "Sorunsal" ("Problematik")<sup>1</sup> terimi, düşüncüyü şekillendiren soru ve varsayımlar bütünü anlamına gelir ve kökleri özellikle Kant ve Althusser gibi filozofların geleneklerinde yer alır; bu düşünürler, sorunsal bir düşünce sisteminde neyin düşünülebilir olduğunu tanımlayan örtük bir yapı olarak tanımlarlar (Althusser, 1970; Kant, 1781/1998). Benzer şekilde, burada kullanılan anlamıyla "paradigma"<sup>2</sup> terimi de bilgi üretimini yönlendiren zihinsel çerçeveleri ifade eder ve Kuhn'un (1962) bilimsel pratikteki paradigma değişimleri kavramına dayanmaktadır. Bu çerçevede paradigmanın, yalnızca bilginin içeriğini değil, bilgi üretiminin yöntem ve araçlarını da yapılandırdığı kabul edilir (Lakatos, 1978).

En geniş ve genel anlamıyla "Mimarlık" insanların fiziki çevreyi dönüştürme, kendilerine uydurma işinde 'bina' üretimi uğraşını ifade eder (Norberg-Schulz, 1980; Rapoport, 1982).

Örneğin “Ortaçağ Mimarlığı” dediğimizde Ortaçağ olarak tanımlanan tarihsel dönem boyunca dünya üzerinde binaların ve onların oluşturduğu fiziki çevrenin bütünsel olarak üretiliş şeklini kast edebiliriz. Bu anlamda mimarlık, hem teknik hem de kültürel bir bilgi pratiği olarak, çevrenin işlevsel, sembolik ve estetik dönüşümünü içerir.

Mimarlık kavramı aynı zamanda bir toplumda bu uğraş ile üretilmiş binalardan ve onların bir araya gelişinden oluşan dönüştürülmüş fiziki çevreyi anlatmak için de kullanılır. Örneğin, “Roma Mimarisi” dediğimizde Roma şehrini biçimlendiren fiziki çevreyi veya Roma Uygarlığının mimari tarzını kast edebiliriz (Kostof, 1995). Bu kullanım, mimarlığı yalnızca bir faaliyet veya meslek olarak değil, aynı zamanda tarihsel ve kültürel bir miras olarak da tanımlar. Kent dokusu, yapım teknikleri, mekân organizasyonu ve sembolik biçimler üzerinden bir toplumun düşünsel yapısını ve yaşam tarzını okumaya olanak tanır (Rykwert, 1981). Böylece mimarlık, hem üretim süreci hem de bu üretimin zamansal birikimi olan yapılaşmış çevre olarak çift yönlü bir anlam kazanır (Frampton, 2007).

Ama Mimarlık kavramını aynı zamanda bu uğraşın, yani fiziki çevreyi dönüştürmenin ve bina üretiminin tasarım sürecini ve uğraş alanı genelde fiziki çevrenin, özelde binaların tasarımı olan bir mesleği anlatmak için de kullanıyoruz.

Fiziki çevreyi dönüştürmekten ve “bina” üretmekten söz edince bu kavramları da tanımlamak gerekiyor.

“Fiziki çevre” ile insanların içinde var olduğu dünya gezegeni üzerindeki doğal fiziki ortamı kast ediyoruz.

“Dönüştürmek” ile bu doğal ortamın insan eliyle, kendine uygun hale getirmek üzere, değiştirilmesini kast ediyoruz.

“Bina” ile mekan oluşturmak için üretilen yapıları kast ediyoruz (Lefebvre 1991).

“Mekan” sınırlanmış, tanımlanmış uzay parçası demek (Tuan, 1977).

“Yapı”, en genel anlamıyla, parçaların sistematik bir araya gelişine oluşan bütün anlamına geliyor (Alexander, 1964).

“İnsan” (“Homo Sapiens”) memeli hayvanların Primatlar grubunun, bundan yaklaşık 300 bin yıl önce doğal evrim süreci sonucunda ortaya çıkmış olan, bir alt türü (Harari, 2011). Bir çok başka hayvan türü de doğayı kendine uygun hale getirmek üzere dönüştürüyor, karınca yuvalarından kuş yuvalarına bunun pek çok örneği var. Ancak insan türü bunu diğer hayvan türlerinde olmayan boyutlarda geliştirmiş. Bunun nedenini insan türünün doğal üstünlüğünden çok, doğal zayıflığında aramak doğru olur (Harari, 2011). İnsan türü doğaya uyum sağlamak ve hayatta kalmakta pek çok alanda diğer hayvan türlerine göre zayıf.

“İnsan”, tüysüz bedeni doğa şartlarına açık, narin derisi kolayca yırtılıp zedelenebilen, soğuğa karşı da güneş ışınlarına karşı da son derece dayanıksız, çabucak hastalanan, çabuk yorulan, zayıf kemik yapısı çok çabuk kırılabilen, ince güçsüz bacakları üzerinde zor ayakta durabilen, gözleri görme konusunda çok yetersiz, burnu iyi koku alamayan, kulakları işitmede zayıf, yavaş, savunmasız, beceriksiz bir canlı türü (Eberhard, 2009; Harari, 2011). Pek çok diğer tür gibi hızlı koşmıyor, yeteri kadar beceriyle ağaçlara tırmanıp dengeli bir şekilde dalların üzerinde durmuyor, sıçrama, yüzme gibi eylemlerde beceriksiz. Güçlü pençe ve tırnakları, güçlü çene yapısı ve dişleri yok. En fazla yılda bir kere, o da sadece bir tek yavru üretebiliyor, bu yavruları da kendi başına hayatta kalma konusunda son derece yetersiz, hassas, narin, çok yavaş gelişen canlılar oluyor. Bu nitelikleri ile “İnsan” doğada hayatta kalıp devam etmesi zor bir canlı türü olarak görünüyor.

Bu zayıf haliyle insan türünün hayatta kalmasını sağlayan birbirine bağlı iki özelliği oldu:

- 1- Çevresini zayıf yanlarını tamamlamak üzere araç olarak kullanmak ve kendine uyacak şekilde dönüştürmek. Bütün canlı türleri doğaya uyum sağlayarak hayatta kalırken, İnsan türü doğayı kendine uydurarak varolabildi (Tuan, 1977).
- 2- Gruplar halinde bir arada davranmak. Pek çok hayvan türü sürüler ve gruplar halinde davranarak varolma stratejisi geliştirmiştir, ama İnsan

türü bunu “toplum” dediğimiz çok daha karmaşık ve örgütlü biçimler niteliğine getirerek varolabilmiştir (Dunbar, 1998; Harari, 2011).

Bu ikisi de beynini yoğun şekilde kullanmasını gerektiriyordu, diğer fiziksel zaafına karşın, diğer türlere göre biraz daha karmaşık ve büyük beyin yapısı ve başka açılardan zaaf gibi görünen bazı fiziki özellikler, mesela, iki ayağı üzerinde dikine durmak dolayısıyla ellerin başka işler için serbest kalması ve ellerinin daha zayıf, ama hassas ve karmaşık hareket imkanı sağlayan yapısı, farklı sesler çıkarmaya uygun ağız ve gırtlak yapıları da bu konularda bir avantaj sağlıyordu (Harari 2011).

Çevresindekileri avantajına kullanabilmesi (alet kullanmak) veya kendine uydurmak üzere dönüştürülmesi (üretim) için onu iyi anlaması, yani zihninde doğruya yakın ve oldukça detaylı bir modelini oluşturması gerekiyordu. Bunu gözlem, zihninde kurgulama ve çok sayıda deneme-yanılma yoluyla, yani hayal etme ve deneyimleme ile sağlıyordu. Ama her bireyin tekil deneyimleri ile çok fazla ilerlemek mümkün değildi. Deneyimlerin biriktirilebilmesi, bireyden bireye aktarılabilmesi gerekiyordu (Tomasello, 1999).

Grup halinde bir arada yaşamak ve davranmak da sadece sayısal bir kalabalık oluşturarak değil organize ve koordineli şekilde bir arada davranarak bir avantaj sağlayabiliyordu. Bunun için de diğer bireyleri tanımak, anlamak, birlikte davranış şekilleri (sosyal ilişkiler, organizasyon ve koordinasyon) oluşturmak, yani birey olarak kendisinin, diğer bireylerin ve topluluğun ve tüm bunların farklı ilişki ve davranış şekillerinin bir zihinsel modelini oluşturmak gibi yoğun zihinsel çabaya gerektiriyordu (Dunbar, 1998). Bu zihinsel modellerin de grup içinde büyük ölçüde ortaklaşa olması gerekiyordu, bunun için bireylerin bir birini anlaması, yani iletişim kurması gerekiyordu (Boyd & Richerson, 1985; Tomasello, 1999).

“Bilişsel Devrim” (“Cognitive Revolution”) olarak anılan insanların karmaşık bir dil geliştirmesi ve o dil ile düşünmeye başlaması bundan yaklaşık 70.000 yıl önce gerçekleşti ve İnsan türünün beyninin işleyiş şeklini, dolayısı ile de fiziki yapısını değiştirerek, bu yolla diğer hayvanlardan radikal şekilde farklılaşarak uygarlıklar kurup dünyaya hakim olmasını sağlayan sıçramaya yol açtı (Harari, 2011). Bu devrim, insanın soyut kavramlar geliştirebilmesini, karmaşık sosyal ilişkiler ve işbirlikleri kurabilmesini mümkün kıldı (Tomasello, 1999). Dilin gelişimi aynı zamanda kolektif hayal gücü ve kültürel bilgilerin nesilden nesile aktarılması sürecini hızlandırarak, insan topluluklarının karmaşık organizasyonlar ve büyük ölçekli toplumlar haline gelmesine zemin hazırladı (Boyd & Richerson, 1985).

## 2- BİLGİ NEDİR?

İçinde var olduğumuz gerçekliği anlamak için zihnimizde modeller oluşturuyoruz ve bu modellere en genel anlamı ile “bilgi” diyoruz (Gregory, 1980; Johnson-Laird, 1983). Zihnimiz, kendisi ve içinde bir parçası olarak yer aldığı bedeni de dahil olmak üzere, içinde var olduğu gerçekliği bu oluşturduğu zihinsel model yoluyla kavıyor (Clark, 1997; Varela, Thompson & Rosch, 1991). Zihnimiz bu modeli bedeninin sahip olduğu algılayıcılar (sensorler) vasıtasıyla, yani beş duyu diye tanımladığımız görme (ışık algılama), işitme (ses algılama), koku, tad alma ve dokunma duyarlarıyla yoluyla dışardan aldığı uyarıları ve bedeninin sinir sistemi vasıtasıyla içerden gönderdiği uyarıları yorumlayarak yaratıyor (Eberhard, 2009).

Gözümüz bütün ışık dalga boyları içinde küçük bir dilimi, kulağımız bütün ses frekansları içinde sınırlı bir dilimi algılıyor, koku ve tat alma duyumuz da farklı molekülleri algılamakta son derece sınırlı yeteneğe sahip, maddenin ısı, doku, sertlik gibi çeşitli özelliklerini algılayan dokunma duyumuz da son derece sınırlı. Bu sınırlamalar sadece dalga boyu, frekans gibi niteliklerle değil, uyarının yoğunluğu ve algının hassasiyeti ile de ilgili, mesela belli ebattan daha küçük veya uzak nesnelere ve belli volümden düşük sesleri de algılayamıyoruz (Eberhard, 2009).

Yani zihnimiz gerçeklik hakkında oldukça sınırlı veriyi işleyerek oldukça kaba taslak bir model, gerçeğe ait bir varsayım, bir hayal oluşturuyor (Johnson-Laird, 1983). Zihnimiz bir veri işleme sistemi, algıladığı sinyalleri yorumluyor, ona göre davranıyor, test ediyor, sonuçlarına göre öğreniyor, gerektiğinde modeli revize ediyor (Clark, 1997; Friston, 2010). Bunu yaparken önceki deneyimlerinin birikimlerini kullanıyor, dolayısıyla bu deneyimlere bağlı olarak önyargılar, kabuller, varsayımlar oluşturuyor ve duyarlar yoluyla gelen verileri bunlarla yorumlayarak yeniden modelliyor (Gigerenzer, 2007; Kahneman, 2011). Sonuçta bu modeli

“gerçeklik” olarak kabul ediyor, onun içinde varoluyor, yaşıyoruz. Elbette bu model varolan gerçeği olduğu gibi yansıtmıyor ama insanın onun içinde varolmasına yetecek kadar bir bilgi veriyor, dolayısıyla varoluşsal olarak işe yarıyor (Eberhard, 2009; Merleau-Ponty, 1945/2012).

Sonuç olarak “Beyin” bir enformasyon işleme aracıdır. Beynin işleyerek bir model yaratmak üzere kullandığı verilere, ham bilgilere, yani girdiye “enformasyon”, işlem sonucunda oluşturulan modele “bilgi” diyoruz (Floridi, 2010; Shannon & Weaver, 1949). Ama işlenmiş bilgi de tekrar zihnin işlemesine tabi olacak girdi, yani “enformasyon” olabiliyor. Bu anlamda zihinsel algı veya model, işlem sürecinin girdi tarafında yer alıyorsa “enformasyon” (data, veri), çıktı tarafında yer alıyorsa “bilgi” diyoruz (Eberhard, 2009; Floridi, 2010)

### 3- BİLME BİÇİMLERİ

İnsan zihninin ürettiği “bilgi”nin çeşitli biçimleri var.

En temel ve basit bilgi biçimi “ampirik” yani deneysel ve gözlemsel bilgi. İnsan beyninin temel basit modelleme yolu ile deneyimlediklerinden oluşturduğu bilgi biçimine “ampirik” (deneysel) bilgi diyoruz (Dewey, 1938; Polanyi, 1966). Gözlem ve deneyimlerini genelleyerek, bunlarda örüntüler (patemler) ve benzeşmeler (anolojiler) bularak modeller, kalıplar oluşturma ve bu şekilde hafızasında tutma işi (Lakoff & Johnson, 1999). İnsanların çevreyi, doğayı kullanma biçimlerini geliştirmelerine, alet yapmalarına, üretim teknikleri geliştirmelerine elveren bilgi biçimi de bu “ampirik” bilgidir (Ingold, 2000; Geertz, 1973). Gökyüzünü, yıldızları, güneşi, ayı gözlersiniz, bunların hareketlerinin belli bir düzeni olduğunu farkedersiniz. Mevsimlerin dönüşümünü ve tekrarını deneyimleyerek modelleyebilirsiniz. Taşı nasıl kullanacağımızı, sopalar ve taşlarla neler yapabileceğimizi, toplayacağınız bitkileri ve avları ne zaman nerede bulabileceğimizi de bu yolla, gözleyerek ve deneyerek öğrenebilirsiniz. Bunların neden böyle olduğunu bilmeniz gerekmez, böyle olduğunu deneyimlenizle bilirsiniz ve bu bilgi onları kullanmak, tehditlerden korunmak, faydalardan yararlanmak gibi hayatta kalmakla ilgili konularda yeterlidir (Ingold, 2000). İnsanların ürettiği basit teknolojiler, üretim biçimleri ve aletler büyük ölçüde bu tür bilgiye dayalıdır (Polanyi, 1966).

İkinci temel bilgi biçimi “ideolojik” bilgi, ki bu din ve diğer inanç sistemleri, ahlak, etik, kültür gibi “değerler” içeren ve sosyal normlar oluşturan bilme biçimlerinin tümünü içerir (Althusser, 1971; Williams, 1985). İnsan beyninin işleyişi sadece dış çevreden gelen enformasyonun işlenmesine dayanmıyor, deneyimlemek dediğimiz şey sadece basit deneme değil, yaşanan karşısında hissedilenlerden de, yani duygulardan da oluşuyor (Damasio, 1994; Frijda, 1986). Özellikle insanların bir birleri ile ilişkileri, dolayısıyla da topluluğun ilişki biçimleri ve bunun zihinde modellenmesi büyük ölçüde bu duygusal deneyimlere dayanıyor (Fiske, 1991; Tomasello, 2014). Bunlardan “iyi”, “kötü”, “güzel”, “çirkin”, “doğru”, “yanlış”, “dost”, “düşman” gibi “değer” içeren kalıplar, kavramlar çıkıyor (Geertz, 1973; Taylor, 1985). İnsan zihninde dış gerçekliği –ve kendini- modellerken duygusal basit gözlem ve deneyleri ile duygusal deneyimleri birlikte çalışıyor ve pratik, basit “ampirik” bilgi ile onun üzerine yüklenen duygusal kavram ve değerler birbirine karışıyor (Damasio, 1994; Lakoff & Johnson, 1999). Yani, insan beyni oluşturduğu “bilgi” üzerine zihninde ürettiği anlamlar ve değerler yüklüyor ve hikayeler yazıyor; bu anlamlar, değerler ve hikayelerden oluşan kalıplar yaratıyor ve bilgi işleme işini bu kalıplarla sürdürmeye başlıyor (Althusser, 1971; Ricoeur, 1984).

Doğrudan gözlem ve deneyden çıkmayan, sübjektif (öznel) ve intersübjektif (özeler arası) deneyimlere, zihnin ürettiği anlam, değer ve hikayelere dayanan bu bilgi biçimine en genel olarak “ideoloji” diyoruz (Eagleton, 1991). Burada “ideoloji” kavramını en genel ve en geniş anlamında kullandık. Yaygın olarak “ideoloji” siyasi-kültürel-ahlaki-inançsal belirli doktrinleri tanımlamak için kullanılır (Eagleton, 1991). Kuşkusuz bu doktrinler ve inanç sistemleri olarak dinler ideoloji kavramının kapsamı içinde kalır, ama daha genel anlamında ideoloji bir toplumda insanların zihinsel dünyasının içinde olduğu ve var olduğu bütün düşünsel kabullerin, normları, kalıpları, değerlerin oluşturduğu bütündür (Althusser, 1971). Belli bir toplumun ve belli bir dönemin düşünsel ortamını (medyum), oluşturur (Williams, 1985). Kuşkusuz “ampirik” bilgi ve “ideolojik” bilgi insanların zihninde net biçimde ayrılmış değil; iki tür düşünme biçimi, iç içe birlikte yürüyor ve gerçeklik hakkında üretilen model ikisinin birlikte karşılıklı etkileşimle çalışması sonucu ortaya çıkıyor. (Kahneman, 2011; Lakoff & Johnson, 1999)

Üçüncü bilgi biçimi analitik, rasyonel, mantıksal bilgi, ki bu felsefe, matematik, geometri ve nihayetinde bilim olarak tanımladığımız bilgi alanlarını oluşturuyor (Russell, 1912). Bu bilgi türü rasyonel düşünme yoluyla nedensellik bağları kurarak “ampirik” ve “ideolojik” bilginin şüpheli ve eleştirel sorgulanmasını ve doğruya yakın ve iç tutarlılığı olan bir teorik çerçeve ile açıklanma çabasını anlatır (Quine, 1969; Popper, 1959).

En saf ve tipik rasyonel düşünce en soyut düzeyde matematik ve geometride gözlenebilir. Varoluşu oluşturan enformasyon bütününe altında yatan en temel prensiplerin en soyut düzeyde tanımı olan bu alanlar rasyonel düşünmenin temelini oluşturur, sadece zihinsel süreçlerle kesin, hesap edilebilir, kanıtlanabilir ve çürütülebilir modeller oluşturur ve gerçekte varolan doğruya yakın modellenmesi, yani anlaşılması için temel bir düşünsel yapı sağlar (Lakatos, 1976, Tegmark 2014).

Felsefe “ideolojik” bilgi ile iç içedir ama onu eleştirel ve şüpheli bir bakışla sorgulayarak iç tutarlılığı olan mantıklı sonuçlara varmayı hedefler (Grayling, 2019; Hegel, 1807/1977; Kant, 1781/1998). Bilimsel bilgi ise “ampirik”, yani gözlemsel ve deneysel bilginin analitik sorgulanması yoluyla, doğrudan varolan gerçeğin nesnel, ideolojiden arınmış, olduğu gibi kavranması çabasını anlatır (Kuhn, 1962; Popper, 1959).

Dördüncüsü ise “sanatsal” veya “yaratıcı” bilgi olarak tanımlanabilir ve “duygusal-duygusal deneyimler yaratmak” amaçlı bilgi üretimini anlatır (Dewey, 1934). Doğrudan dış gerçekliği anlamak ve açıklamak için oluşturulan bir zihinsel model olarak değil ama çeşitli deneyimleri yaşatmak, fikirleri, hisleri anlatmak, biçimlendirmek ve aktarmak üzere oluşturulan zihinsel modeller olarak bilgi (Merleau-Ponty, 1962). Sanatsal bilgi ideolojik bilgi ile iç içedir, ideolojik bilginin üretilmesi ve yayılması için kullanıldığı gibi onun oluşturduğu çerçeve, ortam içinde bizzat onun tarafından belirlenerek üretilir (Eagleton, 1991; Williams, 1985). Doğrudan ideolojik kavramlar olan iyi, kötü, güzel, çirkin, doğru, yanlış gibi değerlere ilişkindir ve büyük ölçüde bu değerleri biçimlendirmek, oluşturmak, tanımlamak veya onlara ulaşmak için üretilir (Adorno, 1970; Eldridge, 2003; Gracyk, 2011). Bu anlamda sanatsal bilgi hem ideolojik bilginin taşıyıcısı, yayıcısı hem de üreticisidir. Ama aynı zamanda da onun için bir parçası ve onun ürünü, sonucudur (Bachelard 1994; Benjamin, 2008).

### 4- TASARIM NEDİR?

İnsanlar zayıf yanlarını telafi etmek üzere çevrelerini dönüştürme (alet yapma, kullanma ve üretim) işinin bir parçası olarak en temel ihtiyaçlarından biri olan barınmak, dış doğa şartlarından korunmak için de çevrelerini dönüştürdüler (Childe, 1950; Rapoport, 1982; Rasmussen, 1962). Bu amaçla belirli parçaları belirli şekillerde bir araya getirerek fiziki yapılar inşa ettiler ve bu yapıların (binaların) sınırlayıcı tanımladığı mekanlarda çeşitli bireysel ve toplumsal ihtiyaçlarını karşıladılar (Alexander, 1979; Lynch, 1960). Bu faaliyet yukarıda sözünü ettiğimiz “mimarlık” kavramının en genel tanımını oluşturuyor (Frampton, 2007).

İnsanların bu dönüştürme işini yapabilmeleri için “bilgi” üretmeleri, yani çevrelerinden gelen enformasyonu işleyerek onun hakkında zihinsel modeller oluşturmaları gerekiyordu (Cross, 2006; Lawson, 2006). Bu nitelikte, doğayı değiştirmek üzere bilgi üretmeye “Tasarım” diyoruz (Simon, 1969).

Tasarım en genel anlamıyla zihnin gerçekte varolmayan ama olması istenen bir şeyi kurgulaması, modellemesi, hayal etmesi işi (Dorst, 2011). İnsanlar ilk aletleri yapmaya ve kullanmaya başladıklarından beri, bunu farklı nesnelere nasıl ve ne şekilde kullanılabileceğini, bunları daha kullanışlı kılmak için nasıl müdahale edip değiştirebileceklerini, nasıl biçim verebileceklerini zihinlerinde modelleyerek bunu başardılar (Cross, 2006). Çevrelerini kendilerine uydurmaları, dönüştürmeleri de bu zihinsel süreçlerle, kurgulayarak, modelleyerek, hayal ederek mümkün oldu. Bu şekilde düşünmeye ve bilgi üretmeye tasarım diyoruz (Simon, 1969).

Görüleceği üzere tasarım da esas olarak bir enformasyon işleme ve bilgi üretme süreci (Cross, 2006; Dorst, 2011). Gerçekte varolan değil ama gerçekte var olması mümkün olanı zihinde modellemek (Simon, 1969). En genel anlamında tasarım kavramı, bu gün anladığımız anlamda, üretim sürecinden bağımsız ve ondan öne gelen bir zihni uzmanlık uğraşı olarak “tasarım” ile sınırlı olmaksızın, herhangi bir şey üretmek için gerekli olan, onu önceden zihinde kurgulama sürecini anlatır (Lawson, 2006). Dolayısıyla Mimarlık ve Tasarım gibi profesyonel meslekler ortaya çıkmadan çok

önceden, insanlar çevrelerini dönüştürmeye başladıklarından beri, insan beyninin enformasyon işleme biçimlerinden birini oluşturur (Cross, 2006; Simon, 1969).

İnsanlar doğayı dönüştürmeye başladıklarından beri bunu sadece basit fiziki ihtiyaçları karşılamak için yapmadılar, bu eylemin ve sonuç ürünün yarattığı hisler, deneyimler için de yaptılar (Damasio, 1994; Pallasmaa, 2005). İnsan beyninin enformasyon işleme sistemi duygularla yürür. Duygular esas olarak doğal evrim sonucu gelişmiş “hayatta kal ve çoğal” ana hedefine yönelik ödül ve ceza mekanizmaları iken, bilişsel devrim ile, yani dilin ve dil ile düşünmenin geliştirilmesi ile, bu ana işlevlerinin ötesine geçtiler (Tomasello, 1999). İnsanlar çevrelerini dönüştürerek kullanım nesnelere üretirken, bu dönüştürme eyleminden ve sonucundan duygusal deneyimler yaşadılar ve bu eylemleri bu deneyimleri yaşamak amacıyla da yapmaya başladılar (Csikszentmihalyi, 1990;). Bu deneyimlere ve sonuçta çıkan ürüne ve biçimlere anlamlar yüklemeye, onları sembolleştirmeye başladılar (Geertz, 1973). Örneğin ellerinde taşıdıkları ve işlerine yarayan sopalara sihirli değnekler olarak hayal ettiler, güç sembolü asalar olarak anlamlandırdılar. Dış şartlardan korunmak ve bedenlerini örtmek için ürettikleri kıyafetlere de anlamlar yüklediler, toplumsal ilişki içinde pozisyonlarını, güçlerini, prestijlerini tanımlayan ifadeler olarak gördüler (Barthes, 1983; Latour, 2005).

Giyisiler insanlar için en baştan beri dış şartlardan korunmanın ve mahremiyet amaçlı örtünmenin ötesinde anlamlar taşıdı, bireyin kendine ilişkin dışarı karşı verdiği mesajlar, ifadeler niteliğini aldı ve tarım toplumları ile beraber giysi kodları, normları haline alarak doğrudan bireyin toplum içindeki yerini ve işlevini (sosyal sınıfını, mesleğini, inancını, etnisitesini vb.) tanımlayan ifadelere dönüştü. Taç, asa, yüzük, mühür gibi aksesuar, takı ve objeler hem dinsel hem yönetsel ororitinin, iktidarın sembolleri haline geldiler (Geertz, 1973).

Örneğin, parlak ve renkli taşlar, şekilli deniz kabukları, pırlıtlı metallere, bunların veya başka maddelerin insan eliyle işlenmiş halleri insanlar tarafından fetişleştirildi, arzu nesnelere haline geldi, değer yüklenildi ve böylece kıymetlendiler (Appadurai, 1986; Mauss, 1925/1990). Bu durum ortaklaşa paylaşıldıkça, “değer”in taşıyıcısı nesnelere dönüştüler, mal ve hizmet değiş tokuşu için ve servet biriktirmek için araç haline geldiler (Graeber, 2011). O kadar ki, daha sonra sadece bunları temsil eden basılı yazılı kağıtlar, ardından da sadece değeri temsil eden kağıtlar, ardından sadece dijital enformasyon aynı işi görür hale geldi (Dodd, 2014; Harari, 2011).

Görülebileceği üzere bir enformasyon işleme biçimi olarak tasarım, yukarıda anlatılan ampirik, analitik, ideolojik ve sanatsal bilgi üretme, yani enformasyon işleme türlerinin karmaşık bir bütünü halinde yürür. Tasarım sadece fiziki bir ihtiyacın karşılanması değil yukarıda söz edilen duygusal etkilerin yaratılması, tasarlanan şey anlam içeriklerinin yüklenmesi işini de içerir (Lawson, 2006; Pallasmaa, 2005).

İnsanların birey olarak ve birlikte toplum olarak içinde yaşayacağı, hayatın sahnesini oluşturan fiziki çevreyi, mekanları, binaları biçimlendiren, en genel anlamında “mimarlık” uğraşı da bu nitelikte bir toplumsal enformasyon işleme biçimidir; sadece fiziki ihtiyaçları karşılamak amaçlı değil, aynı zamanda duygusal ve duygusal deneyimler yaratmak ve anlamlar ifade etmek amaçlıdır (Pallasmaa, 2005; Rapoport, 1982; Till, 2009).

## 5- BİREYSEL TASARIMCI OLARAK MİMAR'IN ORTAYA ÇIKIŞI:

Meslek olarak, bildiğimiz anlamda Mimarlık ve binaları inşa sürecinden bağımsız olarak, önceden tasarlayan uzman olarak “Mimar”, aslında Sanayi Toplumu’nu hazırlayan tarihsel sürecin bir parçası olarak, 14-17. Yüzyıl’larda Rönesans ile ortaya çıkmıştır (Frampton, 2007; Kostof, 1995). Türkiye’de kullandığımız “Mimar” kelimesi kökenli olup “imar eden” anlamına gelir ve köken olarak inşaat işi ustası, ustabaşı anlamındadır (İnceoğlu, 2011). İngilizce’deki “Architect” kelimesi de, benzer şekilde Yunanca “arkhitekton” kökünden gelir ve “şef inşaatçı” anlamındadır (Saint, 2007).

Rönesans’tan önce, insanların bundan yaklaşık 10.000 yıl kadar önce Tarım Toplamlarına geçişinden beri (Toffler; 1980), bu günkü anlamda bağımsız bir meslek olarak Mimarlık ve Mimarlar yoktu; binaları inşa eden, marangoz, demirci, duvar ustası, taş ustası gibi ustalar vardı. Bunlardan biri, çoğunlukla taş veya yığma duvar ustalarından biri, baş usta olarak işin tamamını kontrol ediyordu. Bu niteliğiyle bu pozisyon bu günkü usta başı,

mimar, mühendis ve yüklenici pozisyonlarının bir birleşimi gibiydi. Aslında tasarım işi bizzat inşa sürecinin bir parçasıydı, her usta, usta başının çizdiği genel çerçeve içinde kendi işinin hem tasarımını hem uygulamasını yapıyordu. Binalar, özellikle küçük ölçekli sivil mimarlıkta, zaten toplumsal olarak ortaklaşa geliştirilmiş belli teknik, biçim ve usulların tekrarı şeklinde uygulanıyordu (Ching, 2014; Kostof, 1995; Lefèvre, 2017).

Büyük ölçekli kamusal yapılarda tasarım bir miktar devreye giriyordu ama onlar da özgün, bireysel bir tasarım değil, yine ortaklaşa oluşturulmuş belirli tekniklerin ve biçimlerin tekrarı şeklinde oluyordu ve genel tasarım kararları, çoğunlukla baş usta tarafından alınıyordu. Özellikle tapınak gibi büyük dini binaların ana tasarımı bazen bizzat inşaat işinden anlayan, yapımı yöneten din adamları tarafından ustabaşı ile koordineli olarak yapılıyordu. Saray gibi büyük resmi binalar, kale gibi askeri binalar pek çok durumda sivil veya askeri yüksek bürokratlarca (komutanlar vb.), hatta bazen bizzat imparator, kral gibi iktidar sahiplerince, yine ustalar ve baş usta ile birlikte tasarlanıyordu (Kostof, 1995; Roth, 1992).

Bu sürecin yöneticisi ve organizatörü olan baş ustalar, nadiren de olsa, bazen sivrilip tarihe kaydedilecek isim de yapabiliyorlardı ama bu genelde istisnai bir durum oluşturuyordu; mimarlık bireysel olmaktan çok kolektif bir çabanın ürünüydü. Yani, sonuç olarak, örneğin Mimar Sinan dediğimizde, günümüzdeki mimarlık gibi, binanın bütünü inşaından önce tasarlayan bağımsız bir tasarımcı kimliği düşünmek yanlış bir algıdır. Mimar Sinan, Osmanlı İmparatorluğu’nda bir dönem sarayın “Baş Mimarı” (yani Baş Usta) pozisyonunda görevli bir “Ustabaşı” idi. (Bozdoğan, 2001; Kuban, 2011; Kuran, 1987; Necipoğlu, 2005)

Rönesans öncesinde, Mimarlığın kolektif ve iç içe bir üretim ve tasarım olarak yürüdüğü Tarım Toplamların’da mimarlık belirli teknik, biçim ve kalıpların tekrarı şeklinde sürdürülüyordu. Bu aslında tüm sanat dalları için geçerliydi, sanat ile zanaat arasında bir ayrım yoktu, sanatçı belli bir alanda ustalaşmış zanaatçıydı. Sanatçıdan beklenen yaratıcılık ve özgünlük değil, ustalıklı (Gombrich, 1995; Kuban, 1995; Rykwert, 1981; Shiner, 2001; Toffler, 1980).

Örneğin, sanatsal ve mimari biçimlerde belirgin bir değişim olmadan antik Mısır medeniyeti yaklaşık 3000 yıl, antik Yunan medeniyeti yaklaşık 1400 yıl, antik Roma medeniyeti yaklaşık 1150 yıl sürdü. Benzer biçimde örneğin antik Mezopotamya medeniyetleri (Sümer, Akad, Babil, Asur), antik Çin medeniyeti, antik Japon medeniyeti, antik Hint-Güney Asya medeniyetleri, antik Mezoamerikan (Olmek, Maya, Aztek) medeniyetleri, antik Andean-Inca medeniyetleri yaklaşık 1000-3000 yıl sanatsal ve mimari formlarda kayda değer değişim yaşamadan sürmüştür (Kostof, 1995; Kuban, 1995).

14-17. yy’larda Rönesans ile bu değişmeye başladı, çoğunlukla da inşaat işinden gelen baş ustaların yerine, resim ve heykel sanatlarından gelen usta sanatçılar “binaların tasarımcısı” mimar olarak sivrildiler, isim yaptılar. Mimar (Architect) terimi bir meslek olarak “Baş usta”dan ayrı olarak bunlar için kullanılır oldu, böylece de Mimar-Mühendis ayrımının ilk filizlenişi ortaya çıktı (Ackerman, 1961; Kostof, 2000; Roth, 1992).

Ama tam anlamıyla özel eğitilmiş profesyonel bir meslek olarak Mimarlık, Sanayi Toplumu’na geçişle birlikte (Toffler; 1980), 18.-19.yy’larda mimarlık kullanımının ve mesleki örgütlenmelerin ortaya çıkmasıyla başlamıştır (Abbott, 1988; Collins, 1998; Cuff,1991; Kostof, 2000).

Şimdi, en genel anlamında Mimarlığı bir enformasyon işleme biçimi olarak ele alan bu genel teorik çerçeve içinde, Mühendislik ile Mimarlığın ayrışmasını da anlayabiliriz. “Tasarım” sürecinin ağırlıklı ampirik ve analitik, yani “teknik” enformasyon işleme alanında uzmanlaşan enformasyon işleme sistemi (Mühendislik) ile ağırlıklı “ideolojik” ve “sanatsal” enformasyon işleme alanlarında uzmanlaşan enformasyon işleme sistemi (Mimarlık) Rönesans’tan başlayarak giderek ayrıştı, ve iki ayrı meslek alanı olarak biçimlendi. (Not: Rönesans ile birlikte bağımsız sanatçı-tasarımcı olarak ortaya çıkan “Mimar” kimliğinin ağırlıklı “yapı ustaları” arasından değil “görsel sanat ustaları” arasından çıkmış olma sebebi büyük ölçüde bu ayrımdan kaynaklanır.) (Collins, 1998; Cuff, 1991; Kuban, 1995; Roth, 1992; Saint, 2007)

Sanayi Toplumu yapısının oluşmasıyla birlikte 18. ve 19. Yüzyıl’lardan başlayarak, bu alanla doğrudan ilişkili Mühendislik disiplinleri de daha sonra kendi içinde, İnşaat, Mekanik, Elektrik mühendislikleri gibi alt uzmanlık alanlarına ayrıldılar. Aynı süreçte Mimarlık da kendi içinde

Mimarlık, Kentsel Tasarım, Peyzaj Tasarımı, İç Tasarım gibi alt uzmanlıklara ayrıldı (Abbott, 1988; Cuff, 1991; Kuban, 1995).

Sonuç olarak; Mimarlık fiziki çevreyi dönüştürerek biçimlendirmek üzere tasarlamak anlamında bir enformasyon işleme biçimidir ve İç Tasarım, Kentsel Tasarım, Peyzaj Tasarımı gibi disiplinler daha genel Mimarlık uğraşının sonradan uzmanlaşma ile ayrılmış alt disiplinleridir. Dolayısı ile burada Mimarlık kavramını bunların tümünü içerecek şekilde kullanıldı. Fiziki çevreyi dönüştürme uğraşının tasarım ayağı da sadece Mimarlık'tan oluşmuyor, bu için teknik kısmı farklı uzmanlık alanlarına ayrılmış Bilimsel ve Ampirik teknik bilgiye dayalı Mühendislik disiplinleri tarafından paylaşılıyor (Alexander, 1964; Alexander, Ishikawa, & Silverstein, 1977; Lawson, 2006).

## 6- ENFORMASYON İŞLEME SİSTEMİ OLARAK MİMARLIK:

Her mimari tasarım özünde bir problem çözümdür. Ana problem genellikle belli bir yerde, belli bir ihtiyacı karşılayan binanın veya binalar grubunun ve/veya fiziki çevrenin tasarımıdır. (Simon, 1969) Yani mimari tasarım probleminin genelde "arsa-çevre-bağlam", "konu-ihtiyaç-talep" ve "teknoloji-malzeme-kaynak" olmak üzere üç ana ayağı vardır ve büyük ölçüde bu üçünün nasıl bir araya getirilip bağdaştırılacağı ile ilgilidir (Cross, 2011; Lawson, 2006).

Mimar öncelikle problemi anlamak için bu üç başlık altındaki konuları araştırmak, bilgi toplamak ve bunları değerlendiren, analiz etmek durumundadır. Bu kendi başına yoğun bir enformasyon işleme eylemidir (Darke, 1979; Dorst, 2011; Eastman, 1970; Schön, 1983).

"Arsa-çevre-bağlam" ayağında araştırma, bölgenin, çevrenin ve arazinin coğrafi, topografik, iklimsel, ekolojik fiziki verileri, çevrenin altyapı, ulaşım, trafik vb. donanım verileri, çevrenin bitki örtüsü, çevre binalar, kenstsel doku, morfoloji, manzara vb. görsel verileri (Rapoport, 1982), çevrenin, tarihi, kültürü, sosyal yapısı gibi sosyo-kültürel verileri, (Norberg-Schulz, 1980) bölgeye ve arsaya ait imar mevzuatı, sınırlamalar, normlar, çevrenin sorunları, fırsatları, avantajları, dezavantajları konularında çeşitli kaynak ve dökümanlardan araştırma ile ve bizzat çevrede bulunup, gözleyerek, algılayarak, hissederek yapılır (Pallasmaa, 2005).

"Konu-ihtiyaç-talep" ayağında araştırma, bilgi toplama mevcut benzer mekanları bizzat gözlemleyerek ve inceleyerek (Lawson, 2006), aynı veya benzer konuda uygulanmış veya projelendirilmiş örnekleri inceleyerek, konunun uzmanlarına ve/veya deneyimli kullanıcılara danışarak ve çok sayıda döküman ve kaynaktan yararlanarak yapılır (Schön, 1983). Bu araştırma sadece "işlev"i içermez, aynı zamanda "biçim"i de kapsar (Rapoport, 1982; Unwin, 2009).

"Teknoloji, malzeme, kaynak" ayağında konuya, bölgeye, yere uygun inşaat teknoloji ve malzemeleri araştırılır. Kaynak yatırımının ayrılabileceği bütçeyi, çevredeki tedarik, nakliye, işçilik vb. imkanlarını içerir (Edwards, 2005). Göz önüne alınacak maliyet analizi inşa sürecinin ve sonuç ürünün sadece parasal değil, efor, zahmet, kaynak tüketimi ve çevreye etki olarak nelere malolacağını içerir.

Bu bölüm enformasyon işlemenin sistematik, rasyonel, objektif bir formu olarak görünmekle birlikte (Cross, 2011; Simon, 1969), bu aşamada dahi hangi verilerin toplanacağı, hangi kaynaklara başvurulacağı, toplanan enformasyon içinde hangilerinin önemseneyeceği, dikkate alınacağı, verilerin hangi kriterlerle değerlendirileceği, nasıl analiz edileceği, yani enformasyonun nasıl toplandığından ne şekilde işleneceğine kadar tamamı, büyük ölçüde subjektif, inter-subjektif, ideolojik ve sezgisel bir süreçtir (Heylighen, 2000; Lawson, 2006; Schön, 1983).

Subjektif; çünkü birey olarak mimarın kendi zihninin süreçleri ile ürettiği tercihler, yaklaşım, bakış tarafından belirlenir (Cross, 2011; Lawson, 2006).

İnter-subjektif; çünkü büyük ölçüde öznel arası, toplumsal ortak kabul, varsayım ve değerlere, sorunsal<sup>1</sup> ve paradigmalara<sup>2</sup> dayanır (Heylighen, 2000; Kuhn, 1970).

İdeolojik; çünkü birey olarak mimar'ın zihninin içinde varolduğu ve çalıştığı, zamana ve topluma ait genel ideolojik çerçeve, ortam, medyum içinde oluşur, onun kavram ve değerleri tarafından biçimlendirilir (Dovey, 1999; Jencks, 2000; Lefebvre, 1991).

Sezgisel; çünkü tüm bu kararlar doğrudan zihnin rasyonel bilinçli düşünme mekanizmasından çıkmaz, büyük ölçüde farkında olmadığımız, bilinç altında yürüten enformasyon işleme sistemlerinin sonucu olarak ortaya çıkar (Gigerenzer, 2007; Pallasmaa, 2009; Schön, 1983).

Toplanan veriler ham, birim enformasyonlar olmaktan çok, önceden başkalarının işlenmiş, 'bilgi' haline getirilmiş enformasyondur. Yani belirli toplumsal enformasyon işleme süreçlerinin sonuçlarıdır (Berger & Luckmann, 1966). Bu nedenle verilerin kendisi de toplumsal inter-subjektif, ideolojik değerler, kalıplar, sorunsallar<sup>1</sup> ve paradigmalara<sup>2</sup> tarafından belirlenmiştir (Foucault, 1972).

Mimar, bu araştırma ve analizlerin sonucunda çözümü gereken problemi etraflıca tanımlamış olur (Lawson, 2006). Bu yolla eldeki enformasyonu işleyecek olan beynine bunu nasıl işlemesi gerektiğine dair bir çerçeve sağlar, çözümü gereken problemleri tanımlar, amaç, hedef ve görevler belirler (Cross, 2011; Simon, 1969).

Bundan sonra probleme öneceği çözümü biçimlendirmek üzere bazı tercihler yapması, ana kararlar alması gerekir. Bu kararları oluşturmak üzere bir dizi soru biçimlendirip bunlara cevaplar araması gerekir (Dorst, 2011; Schön, 1983). Hangi soruları sorarak başladığınız ne cevaplara varacağınızı belirler, yani sorulan sorular düşüncenin içinde biçimleneceği bir sorunsal<sup>1</sup> yaratır (Althusser, 1970; Foucault, 1972). Bu sorunsal ve baştan yapılan bazı ön kabuller ve varsayımlar bir bütün olarak bir paradigma<sup>2</sup> oluşturur (Kuhn, 1970). Zihinsel sürecin içinde şekillendiği paradigma varılacak sonucu belirler (Heylighen, 2000; Schön, 1983).

Mimarın zihni önceden biçimlenmiş bir paradigma içerir, bu aslında tasarım boyunca işlenecek enformasyonu işleme biçimini belirleyen bir işletim programı, bir algoritma gibi çalışır (Cross, 2011; Kuhn, 1970). Paradigma büyük ölçüde ideolojik bilgi tarafından biçimlendirilmiştir (Lefebvre, 1991; Jencks, 2000). Bu paradigma mimarın birey olarak kişisel karakter özellikleri, eğilimleri, hayat boyu deneyimleri, içinde yaşadığı toplum ve çevrenin ideolojisi, aldığı eğitim, daha önceki mesleki pratikleri gibi pek çok faktör tarafından biçimlendirilmiştir (Lawson, 2006; Schön, 1983).

Paradigmanın oluşumu aslında sadece mimarın hayatı boyunca süren bir enformasyon işleme faaliyetinin sonucu değil aynı zamanda içinde yaşadığı çevrenin, toplumun hatta daha genelde insanlığın tarih boyunca süregelen bir kolektif enformasyon işleme eyleminin de sonucudur (Berger & Luckmann, 1966; Foucault, 1972).

Dolayısıyla, daha araştırma ve analiz aşamasında dahi etkin olan öznel, öznel-arası, ideolojik ve sezgisel faktörler ve enformasyon işleme biçimleri tasarımın kararlar ve çözümler üretme aşamasında daha da belirleyicidir (Cross, 2011; Schön, 1983). Bu noktada belirlenen sorulara verilen cevaplar, alınan ana kararlar ve kabuller çerçevesinde mimarın tasarım için bir hedef ve amaç belirlemesi gerekir (Lawson, 2006). Bu, sonuçta ortaya çıkması amaçlanan binanın ana hatlarıyla nasıl birşey olacağına dair kabaca bütünsel bir fikir oluşturmak anlamına gelir. Buna günümüzde mimarlıkta genellikle "konsept" diyoruz (Heylighen & Martin, 2004).

Ortaya çıkan konsept zihnin yoğun ve karmaşık bir enformasyon işleme eyleminin sonucudur. Bu enformasyon işleme sadece "sistem -2" olarak tanımlanan bilinçli, mantıklı, rasyonel işlem mekanizmaları ile değil, bununla birlikte aynı zamanda ve daha çok, beynin çalışmasının %95'ini oluşturan, bilinç dışındaki "sistem-1" olarak tanımlanan enformasyon işleme sistemi ile gerçekleşir (Kahneman, 2011). Bu farkında olunmayan enformasyon işleme sisteminin bilince çıkan sonuçlarına, "sezgi" veya "ilham" diyoruz (Gigerenzer, 2007; Pallasmaa, 2009). Tasarımın araştırma ve analizden sonraki, bir tasarım fikri ortaya çıkana kadar olan bu zihinsel işlem dönemi, genellikle "kuluçka" dönemi olarak tanımlanıyor (Cross, 2011; Lawson, 2006). Bu işlemin sonucu, genelde "evreka" anı olarak tanımlanan noktada, ortaya çıkan tasarım ana fikri, ya da "konsept", görüleceği üzere bilinçli, rasyonel düşünme süreçlerinden çok tasarımcı birey olarak mimarın zihninin, içinde yer aldığı, orada var olduğu ve oradan beslendiği toplumsal ideolojik zihinsel ortam ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan ve ağırlıkla bilinç altında yürüten enformasyon işleme süreçlerinin bir sonucudur (Berger & Luckmann, 1966; Schön, 1983).

Kuşkusuz, tasarımın hedef ve amacı tek başına mimar tarafından belirlenemez. Mimari tasarım, bireysel yaratıcı sanatların aksine yaratıcısının ürününü kendi başına, kendi içinden geldiği gibi

gerçekleştirip sunabileceği bir alan değildir (Cuff, 1991). Mimarın ürünleri yüksek maliyetlidir ve bir ihtiyaca veya talebe cevap vermek için üretilirler, büyütürler, kalıcıdır ve çevreyi ve çok sayıda insanın hayatını doğrudan etkilerler (Till, 2009;). Dolayısıyla mimarın ürünü talep eden ve maliyetini karşılayacak olan bir müşterisi veya işvereni vardır, ürünün potansiyel kullanıcıları vardır, yapıyı inşa edecek yüklenici vardır, bu süreç içinde farklı konularda yer alan çok sayıda mühendis, uzman, danışman vardır, üründen ve onun çevresine olan etkisinden etkileyecek bir toplum, kamu oyu vardır, denetleyecek ve onaylayacak kamusal otorite vardır. Başta işveren yatırımcı olmak üzere, bütün bu pozisyonlarda yer alan çok sayıda aktörün, çoğu zaman birPPbiri ile çelişen istekleri, eğilimleri, talepleri vardır.

Ana hedef ve amaçların belirlenmesi, kendi başına bir tasarım problemi olmanın ötesinde, sosyal, ekonomik, kültürel, felsefi, hatta ideolojik, politik bir konudur ve müşteri, yatırımcı, kullanıcı, izleyici, kamu oyu (toplum), kamusal otorite ve tasarımcı gibi çeşitli aktörlerin (çoğu zaman birbiri ile çelişen) yaklaşım ve çıkarları yönünde etki ve tepkileri ile belirlenir (Cuff, 1991; Dovey, 1999; Till, 2009). Mimar başta ana hedef ve amaçları ve konsepti oluştururken, etkili aktörlerin eğilim ve taleplerini dikkate almak ve sonuçta da onları ikna etmek durumundadır (Latour, 2005). Bu aktörlerin talepleri, etki ve tepkileri, müdahaleleri tasarım süreci, hatta inşaa süreci boyunca devam eder (Lawson, 2006).

Mimarlık toplumsal bir üretim ve bilgi üretimi (enformasyon işleme) süreci (Berger & Luckmann, 1966; Dovey, 1999). Mimar burada tasarımın, yani bilgi üretim sürecinin lideri, şefi olarak görevlendirilmiş uzman olarak yer alıyor (Cuff, 1991; Schön, 1983). Toplum birbiri ile çelişen çıkar, eğilim ve yaklaşımları olan çok sayıda birey, grup, organizasyon ve kurumsal yapının çatışma, rekabet, müzakere, anlaşma, ittifak, iş birliği gibi çeşitlenen ilişkilerinden oluşuyor. Bu ilişkiler toplumsal bir kendiliğinden enformasyon işleme sistemi oluşturur (Heylighen, 2009; Simon, 1969). Bu anlamda toplumu oluşturan üretim aktivitelerinden biri olarak mimarlık da bu karmaşık toplumsal ilişki biçimlerinin, yani kendiliğinden toplumsal enformasyon işleme sisteminin temel bir parçasını oluşturur (Till, 2009).

Sürecin lideri, şefi pozisyonundaki mimar tasarım ve inşa süreci boyunca, bu ilişkileri koordine etmek, yönetmek, hatta manipüle etmek, müzakereleri yürütmek, uzlaşmaları sağlamak, paydaşları yönlendirmek, eğitmek, kendi zihninde biçimlendirdiği ana amaç, hedef ve konsept doğrultusunda sürekli ikna etmek durumundadır (Cuff, 1991; Till, 2009). Bu süreçte mimar, yalnızca fiziksel bir çevre tasarlamakla kalmaz; aynı zamanda sosyal ilişkileri yeniden düzenler, bilgi üretir ve çeşitli aktörler arasında fikirlerin dolaşımını sağlar (Dovey, 1999). Dolayısıyla mimarlık, yalnızca estetik ya da teknik değil, aynı zamanda müzakere ve temsil süreçlerini de içeren bir bilgi pratiği haline gelir (Schön, 1983).

Bu süreç içinde mimar için bu dışardan müdahaleler ile tasarımın kontrolünü kaybetmek riski vardır (Cuff, 1991). Pek çok durumda sonuç ürün ilk hedeflenen ve amaçlanandan çok farklı bir yere varabilir, iç tutarlılığı ve bütünlüğü bozulabilir (Lawson, 2006; Till, 2009). Bu tür evrime süreçleri, bazen işveren talepleri, teknik kısıtlamalar, yasal düzenlemeler ya da müteahhit uygulamaları nedeniyle oluşur; bazen de çok aktörlü tasarım ortamının doğal bir sonucu olarak ortaya çıkar (Dovey, 1999). Mimarlık pratiğinde bu türden yön kayıpları, tasarımın sadece tekil bir ajanın (radenin) bağımsız ve bireysel yaratıcı zihinsel eylemi değil, aynı zamanda bir süreç ve ilişkiler ağı olduğuna işaret eder (Schön, 1983).

Hedef, amaç ve konsept belirlendikten sonra; bu amaç ve hedefe varmak, belirlenen konsepti gerçekleştirmek üzere bütünden detaya doğru, aşama aşama tasarım kararları alınır ve tasarım olgunlaştırılır, biçimlendirilir ve netleştirilir (Cross, 2011; Lawson, 2006). Yukarıda anlatıldığı gibi, bu aşamada da mimar dışardan etki ve müdahalelere açık durumdadır (Cuff, 1991). Tüm bu süreç yoğun ve detaylı bir enformasyon işleme eylemidir ve her aşamasında birey olarak mimarın zihninin bilinçli ve rasyonel (Sistem 2) ve bilinç altı ve sezgisel, güdüsel, duygusal (Sistem 1) düşünme, yani enformasyon işleme sistemlerinin, zihninde varolan paradigmalara ve ideolojik yapıların oluşturduğu çerçeve içinde ve konuya dahil olan diğer aktörlerin ve genel olarak toplumun etkileri altında çalışmasının bir sonucudur (Berger & Luckmann, 1966; Gigerenzer, 2007; Kahneman, 2011; Pallasmaa, 2009; Schön, 1983).

Paradigma kavramı, tasarım anlamında enformasyon işleme biçiminin araçlarını, tekniklerini ve dilini de içerir (Cross, 2011; Kvan, 2001). Tasarım süreci, bu araç ve tekniklerin bulunduğu imkanlar ve kısıtlamalardan doğrudan etkilenir, dahası mimarın zihinsel yapısını bu araçlar ve dil

belirler, biçimlendirir (Clark, 1997; Oxman, 2006; Schön, 1983). Tarım toplumlarında olduğu gibi, sahada uygulama sırasında yerinde inşaat araç gereçleri ile tasarım yapıyorsanız farklı, ortogonal teknik çizim yöntemleri ile kağıt üzerinde T cetveli, gönye, pergel gibi araç gereçle tasarlıyorsanız farklı, CAD, BIM veya 3D yazılımları yoluyla bilgisayarda tasarım yapıyorsanız farklı sonuçlara varırsınız (Lawson, 2006). Her bir araç ve ortam, mimarın mekânı kavrayış ve ifade ediş biçimini, dolayısıyla tasarımı doğrudan etkileyen bir düşünsel altyapı ve görsel dil sunar (Goldschmidt & Porter, 2004; Hemmerling & Cocchiarella, 2017).

Mimarın beyni tasarım süresince elindeki enformasyonu işleyerek sonuçlara varır. Bu enformasyon beyinde hafızada depolanmış bilgi ve araştırma sürecinde girdi olarak eklenen bilgilerden oluşur. Beynin işlem yapacağı veri tabanı ne kadar zengin ise çıkarabileceği tasarım sonuçları o kadar daha çeşitli, zengin ve yetkin olur (Cross, 2011; Lawson, 2006).

Beyin bu işlemleri sadece bilinçli, rasyonel düşünme süreçleri (Sistem-2) ile yapmaz, daha çok bilinç altındaki sezgisel (Sistem-1) süreçlerle yürütür (Gigerenzer, 2007; Kahneman, 2011). Bilinçli düşünme sistemi, bilinç altına verileri, sorunları ve kısmen işlemi yürüteceği kriterleri verir, problemi tanımlar ve bilinç altının yaptığı işlemler sonucu ortaya çıkan sonuçlara rasyonel hikayeler üretir (Pallasmaa, 2009; Schön, 1983). Böylece, tasarımda ortaya çıkan "yaratıcı sezgi"nin büyük bir kısmı, adım adım mantıksal çıkarımdan ziyade derin, sezgisel işlemlerden kaynaklanır.

## 7- MİMARİ "MEM"LER

Bilinçaltı enformasyon işleme süreçleri patern algılama, benzerlikler yakalama (analoji) ve çağrışımlarla çalışır. Bu süreçte tekrar eden deneyimler kalıplar, kısa yollar, şartlanmalar oluşturur. Bu kendiliğinden tekrar ederek kendini yeniden üreten düşünce ve algı kalıplarına mem (meme) diyoruz.

"Mem" kelimesinin etimolojik kökeni, "taklit edilen" veya "taklit edilen bir şey" anlamına gelen Yunanca mimema (μίμημα) kelimesinden gelir. Richard Dawkins, 1976 tarihli kitabı The Selfish Gene'de bu Yunanca kökten uyarlayarak terimi tanıttı. "Gen"e (gene) benzer bir ses çıkarması için kasıtlı olarak "mem" (meme) olarak kısalttı ve memlerin biyolojik evrimdeki genlere benzer kültürel çoğalma birimleri olduğu fikrini vurguladı. Dawkins, terimin kültürel fikirlerin, uygulamaların veya yeniliklerin taklit yoluyla nasıl iletildiğinin ve evrimleştiğinin özünü yakalamasını amaçladı. Taklit ile dilsel bağlantı, mem aktarımının temel mekanizmasını vurgular: insan davranışı yoluyla çoğalma ve çeşitlilik (Dawkins, 1976).

Memler zihnin bilinçaltı enformasyon işleme sürecinin kendiliğinden bir sonucudur, bilgisayar programlarında kendiliğinden oluşan "bug"lar gibi. Kültürlerin, ideolojilerin, tarzların, trendlerin oluşmasında temel mekanizma olarak çalışırlar (Blackmore, 1999; Dennett, 1995).

Mimari akım ve tarzlar da büyük ölçüde biçimsel ve yapısal mem'ler yoluyla oluşur (Salingeros, 2013). Mimar'ın zihni genelde hayatı, özelden eğitim süreci ve meslek hayatı boyunca karşılaştığı çevreler, binalar, mekanlar, görseller ve çizimler yoluyla, sürekli duysal ve algısal enformasyona maruz kalır. Beyin biz farkında olmasak da görüş alanına giren her şeyi kaydeder ve işler. Bunlar beynin daha sonra yapacağı enformasyon işleme işinde veri tabanını oluşturur. Bu tekrar eden işlemler zihinde mem'ler yaratır. Mimarın sürekli, bol ve çeşitli mimari görsele maruz kalması zihninin işleme kapasitesini, tasarım becerisini zenginleştirir, yükseltir. Özellikle çeşitlilik ve farklılık belirli sınırlı mem'lere, kalıplara, şartlanmalara saplanmasına engel olur (Cross, 2011; Salingeros, 2013).

Bilgi Toplumu teknolojileri, bilgisayarlar, internet, akıllı cep telefonları ve sosyal medya küresel iletişimde yepyeni bir sıçrama yarattı. Basılı yayın, radyo, televizyon ve sinema yoluyla büyük ölçüde tek taraflı yayılan enformasyon, dolayısı ile her alandaki mem'ler bu yeni iletişim teknolojileri ile küresel ölçekte ve her kullanıcının bireysel katkısıyla çok taraflı ve katlanarak yayılan bir enformasyon akışına dönüşmüştür (Castells, 2001).

Bu nedenle her türlü mem günümüzde çok daha hızlı oluşmakta ve yayılmakta, o kadar ki mem kavramı özel olarak bu internette kendiliğinden yayılan içerikler için yaygın olarak kullanılmakta (Dawkins, 1976; Shifman, 2013).

Bu gün artık mimarın zihni google ve benzeri arama motorları, facebook, pinterest, instagram, youtube gibi platformlar ve çok sayıda dijital mimari, tasarım ve sanat içerikli yayın kanalları ile muazzam büyüklükte bir küresel enformasyon akışına maruzdur. Günümüz mimarlığının çok sesli, çok renkli, büyük ölçüde kaotik çeşitliliği, küresel bir toplumsal formasyon değişimi, belirsiz ve kararsız bir geçişi süreci içinde olmamızın yanında, bu durumdan kaynaklanıyor.

Mimari tasarım, yukarıda özetlenen karmaşık süreçler ile, mimarın zihninin, güncel ve tarihsel toplumsal enformasyon işleme süreçleriyle etkileşim içinde yürüyen enformasyon işleme eyleminin sonucudur (Cross, 2006; Lawson, 2006).

## 8- ENFORMASYON İLETİM VE İŞLEME ARACI OLARAK MEKAN, BİNA VE ÇEVRE

*"Biz binalarımızı şekillendiririz; daha sonra onlar bizi şekillendirir." Sir Winston Churchill - (28 Ekim 1943'te Lordlar Kamarası'ndaki toplantıda yaptığı konuşmadan.)*

Yapılar çevrelerindeki diğer yapıları ve yaşantıyı da etkiler ve onlardan etkilenir. Bir yapı varlığıyla dünya yüzeyinde ve uzayda kapladığı yerde başka oluşumlara engel olur. Sadece orada bulunmasıyla görünümü, algıyı değiştirir, mesela bir manzaraya engel olur veya yeni bir ilgi, ilgi noktası oluşturur. Binalar çevrelerindeki sosyal yaşantıda çekim veya itim alanları oluştururlar, varlıkları ve formlarıyla çevrenin ilerdeki gelişimini yönlendirirler, alana daha çok insan gelmesine veya tersine uzaklaşmasına sebep olabilirler, bu şekilde kentsel yoğunluğu, nüfusun niteliğini ve niceliğini ve yaya ve araç trafik akışını değiştirirler (Hillier & Hanson, 1984; Lynch, 1960).

Bir yapının tasarımı, sadece kendine ait estetik ve işlevsel değerlerle değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal bağlamla da yakından ilişkilidir. Bu bağlamda, mimari form ve kentsel ortam arasında sürekli karşılıklı etkileşim söz konusudur (Alexander, 1979; Gehl, 2011). Yapılar, çevredeki diğer fiziksel ve sosyal sistemlerle bir arada var olan karmaşık bir ağın parçalarıdır ve bu ağ içinde hareket eden insanların deneyimlerini, davranışlarını ve ilişkilerini şekillendirir (Hillier & Hanson, 1984).

Binalar duvar, döşeme, kapı, pencere gibi yapısal elemanları ile mekanları yaratır ve biçimlendirirler. Bu yolla bir mekanlar örüntüsü yaratırlar. Bu elemanların ve onların tanımladığı mekanların dizilişi algoritma niteliğinde bir enformasyon dizisidir. Bu enformasyon dizisi, kullanıcıların bina içinde neler yapabileceklerini, mekanları ne şekilde kullanacaklarını, nasıl davranacaklarını hatta nasıl hissedeceklerini belirler (Pallasmaa, 1996).

Mekânın organizasyonu, kullanıcının hareketlerini ve deneyimlerini yönlendiren bir yapısal şema işlevi görür. Mekanlar arası bağlantılar, görsel ve fiziksel erişilebilirlik, açıklık ve mahremiyet gibi özellikler, mekansal davranışları şekillendirir (Hillier & Hanson, 1984). Bu nedenle mimari tasarım, yalnızca estetik veya teknik tercihlerden ibaret olmayıp, aynı zamanda sosyal ve psikolojik etkileşimleri yönlendiren bir enformasyon işleme sürecidir (Alexander, 1979).

Mekansal düzenlemelerle belirlenen bu algoritmik yapı, hem fonksiyonel hem de duygusal ihtiyaçları karşılayarak kullanıcıların bina ile kurduğu deneyimi biçimlendirir. Bu süreçte mimar, kullanıcı deneyimini en üst düzeye çıkarmak üzere mekan organizasyonunu, dolaşım kalıplarını, ışıklandırma ve akustik gibi duyuşal unsurları da hesaba katmak durumundadır. (Lynch, 1960; Pallasmaa, 2012).

Binalar ve yapılar bir araya gelerek birbirleri ile ilişki kurarlar, sokak, bulvar, meydan, avlu gibi dış mekanlar yaratırlar, bir arada bir doku oluşturarak dönüştürülmüş çevreleri, kentsel morfolojiyi yaratırlar (Conzen, 1960). Bu şekilde daha büyük bir anlatının kurucusu olurlar.

Kentsel morfoloji, yapılar arası ilişkilerin ve mekan organizasyonlarının toplamı olarak, toplumsal yaşantının fiziksel ve işlevsel çerçevesini oluşturur (Whitehand, 2001). Sokak ve meydanlar, sadece dolaşım yolları değil, aynı zamanda kamusal etkileşim ve toplumsal ilişkilerin sahneleri olarak işlev görür (Gehl, 2010).

Bu şekilde, tekil yapıların oluşturduğu parçalar, birlikte daha büyük bir hikayenin, yani kentsel yaşamın ve kültürün bileşenleri haline gelirler. Kentin fiziksel formu, içinde yaşayan toplumun tarihini, değerlerini, ilişkilerini ve kolektif belleğini yansıtır (Lynch, 1960).

Görülebileceği üzere, yapılar, binalar, mekanlar ve dönüştürülmüş fiziki çevre sadece statik işlenmiş enformasyon birimleri değil, aynı zamanda sürekli bir enformasyon işleme ve iletişim sürecinin aktif parçalarıdır (Hillier & Hanson, 1984). Mekan ve yapı, kullanıcıların algı, davranış ve etkileşimlerini şekillendiren dinamik enformasyon akışının hem kaynağı hem de taşıyıcısıdır.

Bu bağlamda, mekân sadece fiziksel bir yer değil, toplumsal ilişkilerin, kültürel anlamların ve bireysel deneyimlerin kodlandığı ve yeniden üretildiği bir iletişim ortamıdır. Yapılar ve çevreler, kullanıcılara hem fiziksel hem de sembolik mesajlar ileterek sosyal davranışları yönlendirir ve bu süreç devamlılık arz eder (Lefebvre, 1991).

Bu teorik çerçeveden yola çıkarak şu sonuca varabiliriz: Mekan, bina ve çevre, yalnızca işlenmiş enformasyonun depolandığı nesnelere değil, aynı zamanda sürekli olarak enformasyon işleyen, dönüştüren ve ileten iletişim araçlarıdır (Pallasmaa, 2005).

Binalarda biçimin de bir işlevi vardır ve bu çok önemli ve belirleyici bir işlevdir. Mekanlar, binalar, yapılar ve çevre oluşturdukları biçimlerle de enformasyon içerirler ve iletirler (Jencks, 2000). Mimari tasarım süreci, bir enformasyon işleme eylemi olarak, işlenmiş enformasyon olan sonuç ürününün, yani binaların, mekanların, yapıların ve onların bir araya gelişleriyle oluşan çevrenin biçimlerini de oluşturur ve bu biçimler kendi başına enformasyon taşıyıcılarıdır (Mitchell, 1990).

Bu biçimler, kullanıcıların algılarını, deneyimlerini ve davranışlarını yönlendiren sembolik ve işlevsel anlamlar taşıyıcıdır (Eco, 1997). Örneğin, bir bina cephesinin simetrik veya asimetric olması, kullanılan malzeme, renk ve dokular, hem fiziksel ortamın kalitesini belirler hem de ona dair mesajlar verir (Alexander, 1979). Biçim, mimari dilin temel ögesi olarak, hem estetik hem de işlevsel düzeyde bir iletişim aracıdır.

Sonuç olarak, biçim, sadece estetik bir tercih değil, aynı zamanda çevreyle, kullanıcıyla ve toplumla iletişim kuran bir enformasyon taşıyıcısıdır. Mimari biçimlerin tasarım sürecindeki belirleyici rolü, mimarlık disiplini içindeki enformasyon işleme kavramının somutlaşmış hali olarak görülebilir.

Mekanların ve binaların biçimleri, tasarımcı öyle istemiş olsa da olmasa da, en ufak detayından bütününe, kullanıcı ve izleyiciye mesajlar verir ve duygusal-duygusal deneyimler yaratır (Pallasmaa, 2005). Dolayısıyla, tasarımcı olarak mimarın işi büyük ölçüde bu mesajların ve deneyimlerin başta belirlenen hedef ve amaçlara uygun olarak kurgulanmasını kapsar (Alexander, 1979). Özünde, binanın anlatacağı hikayeyi mimar yazar (Norberg-Schulz, 1980).

Bu hikaye, mimari formun taşıdığı sembolik ve işlevsel anlamların bileşimidir ve mekânların kullanıcı ile kurduğu ilişkiyi belirler (Lynch, 1960). Biçim sadece yapının dış görünüşü değil, aynı zamanda onun içerdığı anlamlar, kullanıcıya sunduğu deneyimler ve içinde yaşanacak hayatın temsili olarak okunabilir. Mimari, böylece hem fiziksel hem de kültürel bir dil olarak işlev görür.

Mimarın, biçimler aracılığıyla mekânları ve binaları anlamlandırması, insan deneyimini şekillendirmesi ve bu deneyimlerin sosyal, kültürel ve psikolojik boyutlarını hesaba katarak tasarımını gerçekleştirmesi gerekir. Bu açıdan, mimarlık hem bir enformasyon işleme hem de bir anlatı yaratma sürecidir (Bachelard, 1994; Clark, 1997; Pallasmaa, 1996; Psarra, 2009).

Mimarlık'ta gerçek anlamda "konsept" sonradan tasarım üzerine yazılan bir hikaye değil de, tasarımın başta belirlenen amacının ve buna yönelik hedeflerinin bütünlüklü bir tasavvuru olarak anlaşıldığında, tasarım süreci boyunca alınan kararları yönlendiren bir kılavuz oluşturur. Bu bağlamda, "mimarlık nasıl görüldüğü ile ilgili değil nasıl çalıştığı ile ilgilidir" sözü, modernist paradigmanın salt mekanik işlevsellik ifade eden kavrayışının ötesinde, bina ve mekanların "biçiminin işlevini" de içerecek şekilde genişletilebilir (Holl, Pallasmaa, and Pérez-Gómez, 1994; Venturi, Scott Brown & Izenour, 1977).

Binanın nasıl çalıştığı, insanları nasıl etkilediğini, nasıl hissettirdiğini, ne deneyimler yaşattığını ve onlara ne anlattığını da kapsar (Pallasmaa, 2005). Böylece, mimarlık yalnızca fiziksel ihtiyaçları karşılayan yapılar yaratmakla kalmaz, aynı zamanda duyuşal, psikolojik ve sosyal boyutlarıyla kullanıcıların deneyim dünyasını şekillendirir.

Konsept, mimarın zihninde tasarımın amacına yönelik olarak oluşturulan bir bilgi ve anlam ağıdır; kararların tutarlılığını sağlar ve tasarımın bütünselliğini korur. Tasarım sürecinde alınan her karar, bu kavramsal çerçevede değerlendirilir ve böylece proje, hem işlevsellik hem de anlam açısından tutarlı hale gelir (Kolarevic, 2003).

## 9- SONUÇ

Bir mimari tasarımın iyi veya kötü, doğru veya yanlış olduğuna nasıl karar verebiliriz? Bunun öznel yolu bizim kendi zihnimizdeki paradigmlar, ideolojik kalıplar ve değerlerle bakarak, yani kendi zihnimizin enformasyon işleme sistemleri ile değerlendirerek, beğenip beğenmemiz olabilir. Ancak daha genel ve nesnel bir bakış açısıyla bakarsak, "başlangıçta belirlenen amaç, hedef ve konseptte, içsel tutarlılığı olan bütünsel bir sonuç olarak ulaşan bir tasarım iyi bir tasarımdır" diyebiliriz.

Başlangıçta belirlenen amaç, hedef ve konsepti benimsemeyebiliriz, yanlış bulabiliriz, sonuçta ortaya çıkan ürünü beğenmeyebiliriz ama bu tasarımın kendisinin zayıf, yanlış veya kötü olduğu anlamına gelmez. Başta belirlenen amaç ve hedef, doğrudan tasarımla ilgili olmayan, ideolojik, politik bir tartışma konusudur. Bunlar sonucu belirlenen konsept'in bu hedef ve amaçlara uygunluğu bir tasarım kararıdır ve kuşkusuz tasarım üzerine bir tartışma konusu ve bir değerlendirme kriteri oluşturur. Sonuçta ortaya çıkan ürünün başta belirlenen hedef ve amaçlara ve bunlardan yola çıkarak varılan konseptte uygunluğu, iç tutarlılığı ve bütünlüklülüğü tasarımın başarısını ve kalitesini belirleyen ana konulardır. Bu kriterlerden bağımsız olarak, sonuç ürünü beğenip beğenmememiz ise bizim sübjektif yargımızı ifade eder.

Bundan, başta belirlenen niyet, hedef ve amacın eleştirilemeyeceği, bunlara karşı çıkılmayacağı sonucu çıkmaz; sadece bunların mimari tasarımla doğrudan ilgili olmayan, daha genel ideolojik ve politik bir tartışma konusu oluşturduğu sonucu çıkar. Başka bir deyişle, tasarımın amacını ve hedefini sorgulamak, o tasarımın kendisinden ayrı, daha geniş toplumsal ve düşünsel bağlamlarda yer alan bir eleştiridir.

Ancak, görüleceği üzere, tasarım süreci gibi, onun sonucu üzerine tartışma ve değerlendirme işinin kendisi de bir enformasyon işleme sürecidir ve her enformasyon işleme sistemi gibi, değerlendirmeyi yapanın zihnindeki ideoloji, sorunsal, paradigma ve beynin şartlanması ve yanılı kalıpları ("bias") ile biçimlenir.

Bu bağlamda, mimari değerlendirmeler çoğunlukla çeşitli sosyo-kültürel, psikolojik ve bilişsel etkenlerle şekillenir ve dolayısıyla farklı bireyler, gruplar veya toplumlar aynı tasarımı farklı biçimlerde algılayabilir ve yorumlayabilirler. Değerlendirme süreci, tekil bir "doğru"ya ulaşmaktan çok, çoklu perspektiflerin tartışmasını ve karşılıklı etkileşimini içerir .

Bundan; elimizde her hangi bir fikri, yaklaşımı veya yargıyı ölçecek hiçbir genel geçer kriter olmadığı, her yargının göreceli ve sübjektif olduğu, dolayısı ile tartışılmayacağı, "post-truth" ("hakikat-ötesi") bir sonuç çıkarmamak gerekir. Kastedilen mimarlık ve onun ürünleri üzerine fikir üretir, yargılarda bulunur ve tartışırken, daha genel bağlamı içinde değerlendirmek, ideolojik pozisyonlara ve sübjektif yargılara ilişkin tartışma konuları ile tasarıma ilişkin nesnel kriterleri ayırmak ve zihnin ideolojik şartlanmaları, yanılı kalıpları, sorunsal ve paradigma yapılarının farkında olmak gerekliliğidir.

Bu metin boyunca anlatılmak istendiği üzere, mimarlığı hem tasarım süreci, hem de bu sürecin amaçladığı ürün, "dönüştürülmüş fiziki çevre" anlamında, toplumsal bir "enformasyon işleme" sistemi ve ağı olarak gördüğümüzde ve bu gün anladığımız anlamda "Mimarlık" ve bağımsız bireysel tasarımcı olarak "Mimar"ın bu insani uğraşın yapısal ve içkin bir karakteri olmayıp "tarihsel" olduğunu, belli bir toplum yapısına ait bir biçim olduğunu kabul ettiğimizde, günümüzün yeni ve farklı bir toplum yapısına doğru hızlı değişim süreci içinde, toplumsal enformasyon işleme araç ve sistemlerinin hızla dönüştüğü ve insan yapısı ama insan-olmayan ajanların da dahil olduğu dijital ağlar dünyasında, bağımsız, bireysel tasarımcı olarak "mimar"ın yerini ve rolünü yeniden sorgulamamız gerekiyor. Bu yaklaşım cevaplanması gereken temel ve hayati sorulara yol açıyor: Mimarlık "İnsan" beyninin bir enformasyon işleme işiyse, bunu başka bir enformasyon işleme aracı da yerine getirebilir mi? Gelecekte, yeni oluşmakta olan toplum yapısı içinde bildiğimiz anlamda bağımsız tasarımcı olarak "Mimar"a hala gerek olacak mı?

Sonuç olarak, bu metin, kendisi de mimarlığı "anlamak" üzere bir zihinsel modelleme çabasıdır. "Anlamak" bir olguyu veya kavramı, gerçeklik hakkındaki genel zihinsel modelimiz içine, uygun, yani çelişki ve tutarsızlık yaratmayacak bir şekilde, eklemek (belirli bir hareket kabiliyeti, "esneklik" ifade etmek için "eklemek" değil "eklemek") veya gerekiyorsa zihinsel modelimizi bu yeni enformasyona göre revize etmek anlamına geliyor.

Dolayısıyla, bu çalışma da bir "enformasyon işleme" eyleminin ürünüdür. Her ne kadar, bilimsel, nesnel düşünme sisteminin şüpheciliğini, eşleştirileliğini, ve "ideoloji"den arınma, dolayısıyla "değer" ifade eden yaklaşımlardan kaçınma prensibini benimse de, her enformasyon işleme süreci gibi zihinsel kalıplarla biçimlenmiştir ve ideolojiden ve yanılı kalıplarından tümüyle muaf değildir.

## 10- DİPNOTLAR

1- Sorunsal (Problematik): "Düşünce sürecinde sorulan sorular dizisi" anlamına gelen "sorunsal" kavramının kökleri felsefede, özellikle Immanuel Kant'ın eserlerinde ve daha sonra kıta felsefesinin gelişiminde, özellikle Gaston Bachelard, Henri Bergson, Martin Heidegger ve Louis Althusser'in eserlerinde bulunur. Louis Althusser tarafından Gaston Bachelard'ın kavramsallaştırmasına dayanarak, yapısalcı düşüncenin temel bir kavramı olarak yukarıdaki anlamında, düşünce sisteminin temel alt yapısı olarak kullanmıştır. Althusser, her ideolojinin veya felsefi sistemin, insanların dünyayı nasıl düşündüğünü ve anladığını şekillendiren temel bir düşünce yapısına sahip olduğunu savundu. Bu yapı "sorunsal"dır. Sorunsal, o sistem içinde neyin düşünülebilir olduğunu tanımlayan bir dizi varsayım, kavram ve sorudan oluşur. Düşüncenin sınırlarını belirler ve neyin "doğru" veya "geçerli" olarak kabul edilebileceğini belirler. Sorunsal genellikle bilinçsiz veya örtüktür. İnsanlar genellikle düşüncelerini yöneten temel varsayımların farkında değildir. Althusser, sorunsalın birleşik veya tutarlı bir bütün olmadığını vurguladı. Çelişkiler ve tutarsızlıklar içerebilir. Sorunsal sabit veya evrensel değildir. Tarihsel ve toplumsal koşullar tarafından şekillendirilir. Farklı toplumların ve tarihsel dönemlerin farklı sorunsalları vardır.

2- Paradigma: "Paradigmlar" düşünce ve bilgi üretim süreçlerini belirleyen entelektüel yapısal çerçeveleri oluşturur. "Paradigma" teriminin bilimde en etkili kullanımı Thomas S. Kuhn'un çığır açan kitabı *Bilimsel Devrimlerin Yapısı*'nda (1962) yer alır. Kuhn, bir topluluk içindeki bilimsel uygulamayı tanımlayan teoriler, yöntemler ve standartlar çerçevesi olarak "paradigma" kavramını ortaya attı. Bilimin, anomaliler veya yeni keşifler nedeniyle mevcut bir çerçevenin yenisiyle değiştirildiği bir dizi "paradigma kayması" yoluyla ilerlediğini savundu. Newton mekaniğinden Einstein'ın görelilik teorisine geçiş, fizikte bir paradigma kaymasıydı. Ancak "paradigma" kavramı Kuhn'un kendisinin de "Terim kendi hayatını yaşamaya başladı, bazen de benim amaçladığım şekillerde" diyerek ifade ettiği gibi bilimsel düşünce üretim pratiklerinden öte genel olarak insan düşüncesinin işleyişine ilişkin daha geniş bir kavram olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu geniş anlamında "Paradigma" "sorunsal" da içerir. Paradigmlar, bilimsel ve felsefi gelenekler içinde açık zihinsel çerçeveleri oluştururken, sorunsal, paradigmların oluşumunu ve evrimini şekillendiren daha derin, çoğunlukla bilinçdışı yapıyı temsil eder. Bu yazı kapsamında "sorunsal" ve "paradigma" insan zihninin enformasyon işleme biçimine ilişkin kavramlar olarak insan düşüncesini şekillendiren yapıları tanımlamak için kullanılmıştır. Paradigmlar açık entelektüel çerçeveleri tanımlarken, sorunsallar hem bireysel bilişi hem de kolektif bilgi üretimini etkileyen temel kavramsal koşulları temsil eder.

## 11- KAYNAKÇA

- Abbott, A. (1988). *The system of professions: An essay on the division of expert labor*. University of Chicago Press.  
<https://doi.org/10.7208/chicago/9780226189666.001.0001>
- Ackerman, J. S. (1961). *The architecture of Michelangelo*. University of Chicago Press.
- Adorno, T. W. (1970). *Aesthetic theory* (G. Adorno & R. Hullot-Kentor, Trans.). Routledge.
- Alexander, C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Harvard University Press.
- Alexander, C. (1979). *The timeless way of building*. Oxford University Press.
- Althusser, L. (1970). *For Marx*. Verso.
- Althusser, L. (1971). *Ideology and ideological state apparatuses*. In *Lenin and philosophy and other essays* (pp. 127–186). Monthly Review Press.
- Appadurai, A. (1986). *Introduction: Commodities and the politics of value*. In A. Appadurai (Ed.), *The social life of things: Commodities in cultural perspective* (pp. 3–63). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511819582.003>
- Bachelard, G. (1994). *The poetics of space*. Beacon Press.  
<https://doi.org/10.1215/10757163-1-1-29>

- Berger, P. L., & Luckmann, T. (1966). *The social construction of reality: A treatise in the sociology of knowledge*. Anchor Books.
- Blackmore, S. (1999). *The meme machine*. Oxford University Press.
- Boghossian, P. (2006). *Fear of knowledge: Against relativism and constructivism*. Oxford University Press.  
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199287185.001.0001>
- Boyd, R., & Richerson, P. J. (1985). *Culture and the evolutionary process*. University of Chicago Press.
- Castells, M. (2001). *The rise of the network society*. Wiley.  
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199255771.003.0011>
- Childe, V. G. (1950). The urban revolution. *The Town Planning Review*, 21(1), 3–17.  
<https://doi.org/10.3828/tpv.21.1.k853061614q42qh>
- Ching, F. D. K. (2014). *Architecture: Form, space, and order* (4th ed.). Wiley.
- Clark, A. (1997). *Being there: Putting brain, body, and world together again*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/1552.001.0001>
- Conzen, M. R. G. (1960). *Alnwick, Northumberland: A study in town-plan analysis*. Institute of British Geographers. <https://doi.org/10.2307/621094>
- Cross, N. (2011). *Design thinking: Understanding how designers think and work*. Berg Publishers. <https://doi.org/10.5040/9781474293884>
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The psychology of optimal experience*. Harper & Row.
- Cuff, D. (1991). *Architecture: The story of practice*. MIT Press.
- Damasio, A. (1994). *Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain*. Putnam.
- Darke, J. (1979). The primary generator and the design process. *Design Studies*, 1(1), 36–44. [https://doi.org/10.1016/0142-694X\(79\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0142-694X(79)90027-9)
- Dawkins, R. (1976). *The selfish gene*. Oxford University Press.
- Dewey, J. (1934). *Art as experience*. Minton, Balch & Company.
- Dewey, J. (1938). *Logic: The theory of inquiry*. Holt, Rinehart and Winston.
- Dodd, N. (2014). *The social life of money*. Princeton University Press.  
<https://doi.org/10.1515/9781400852048>
- Dorst, K. (2011). The core of “design thinking” and its application. *Design Studies*, 32(6), 521–532. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.07.006>
- Dunbar, R. I. M. (1998). The social brain hypothesis. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 6(5), 178–190. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6505\(1998\)6:5<178::AIDEVAN5>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6505(1998)6:5<178::AIDEVAN5>3.0.CO;2-8)
- Lefebvre, H. (1991). *The production of space* (D. Nicholson-Smith, Trans.). Blackwell.
- Eagleton, T. (1991). *Ideology: An introduction*. Verso.
- Eberhard, J. P. (2009). *Brain landscape: The coexistence of neuroscience and architecture*. Oxford University Press.  
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195331721.001.0001>
- Eco, U. (1997). *Function and sign: The semiotics of architecture*. In N. Leach (Ed.), *Rethinking architecture: A reader in cultural theory* (pp. 158–186). Routledge.
- Edwards, B. (2005). *Rough guide to sustainability: A design primer*. RIBA Publishing.
- Eldridge, R. (2003). *An introduction to the philosophy of art*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164740>
- Floridi, L. (2010). *Information: A very short introduction*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/actrade/9780199551378.001.0001>
- Flyvbjerg, B. (2001). *Making social science matter: Why social inquiry fails and how it can succeed again*. Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511810503>
- Frampton, K. (2007). *Modern architecture: a critical history*. 4th ed. Thames & Hudson.
- Foucault, M. (1972). *The archaeology of knowledge* (A. M. Sheridan Smith, Trans.). Pantheon.
- Frijda, N. H. (1986). *The emotions*. Cambridge University Press.
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127–138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- Geertz, C. (1973). *The interpretation of cultures*. Basic Books. Gehl, J. (2010). *Cities for people*. Island Press.
- Gehl, J. (2011). *Life between buildings: Using public space*. Island Press.
- Gigerenzer, G. (2007). *Gut feelings: The intelligence of the unconscious*. Viking.
- Goldschmidt, G., & Porter, W. (Eds.). (2004). *Design representation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b97667>
- Gombrich, E. H. (1995). *Story of art*. Phaidon
- Gracyk, T. (2011). *The philosophy of art: An introduction*. Polity Press.  
<https://doi.org/10.1093/obo/9780199757824-0061>
- Grayling, A. C. (2019). *The history of philosophy*. Viking.
- Gregory, R. L. (1980). Perceptions as hypotheses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 290 (1038), 181–197. <https://doi.org/10.1098/rstb.1980.0090>
- Habermas, J. (1984). *The theory of communicative action: Vol. I. Reason and the rationalization of society*. Beacon Press.
- Harari, Y. N. (2011). *Sapiens: A brief history of humankind*. Harvill Secker.
- Hegel, G. W. F. (1977). *Phenomenology of spirit* (A. V. Miller, Trans.). Oxford University Press. (Original work published 1807).
- Hemmerling, M., & Cocchiarella, L. (Eds.). (2017). *Informed architecture: Computational strategies in architectural design*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53135-9>
- Heylighen, A. (2000). In case of architectural design: Criticism as a learning strategy. *Design Studies*, 21(1), 39–58.
- Heylighen, A., & Martin, W. M. (2004). That elusive concept of “concept” in architecture: A first snapshot of concepts during design. In K. Van Laere (Ed.), *Bridging the gap: New perspectives on design cognition* (pp. 55–66). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2393-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2393-4_4)
- Heylighen, F. (2009). Complexity and self-organization. In M. J. Bates & M. N. Maack (Eds.), *Encyclopedia of library and information sciences* (pp. 1215–1224). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1081/E-ELIS3-120043869>
- Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The social logic of space*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511597237>
- Holl, S., Pallasmaa, J., & Pérez-Gómez, A. (1994). *Questions of perception: Phenomenology of architecture*. William Stout Publishers.
- Ingold, T. (2000). *The perception of the environment: Essays on livelihood, dwelling and skill*. Routledge.
- Jencks, C. (2000). *The new paradigm in architecture*. Yale University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Harvard University Press.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Farrar, Straus and Giroux.
- Kant, I. (1998). *Critique of pure reason* (P. Guyer & A. W. Wood, Trans.). Cambridge University Press. (Original work published 1781). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804649>
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Spon Press. <https://doi.org/10.4324/9780203634561>
- Kostof, S. (1995). *A history of architecture: Settings and rituals*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195083781.001.0001>
- Kostof, S. (2000). *The architect: Chapters in the history of the profession*. University of California Press.
- Kuban, D. (1995). *Mimarlık kavramları*. YEM Yayın.
- Kuban, D. (2011). *Sinan'ın sanatı ve Selimiye*. Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press.
- Kuhn, T. S. (1970). *The structure of scientific revolutions* (2nd ed.). University of Chicago Press.
- Kuran, A. (1987). *Sinan: The grand old master of Ottoman architecture*. ADA Press.
- Kvan, T. (2001). The pedagogy of virtual design studios. *Automation in Construction*, 10(3), 345–353. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00051-0)
- Lakatos, I. (1976). *Proofs and refutations: The logic of mathematical discovery*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171472>
- Lakatos, I. (1978). The methodology of scientific research programmes (J. Worrall & G. Currie, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511621123>
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1999). *Philosophy in the flesh: The embodied mind and its challenge to Western thought*. Basic Books.
- Latour, B. (2005). *Reassembling the social: An introduction to actor-network theory*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199256044.001.0001>
- Lawson, B. (2006). *How designers think: The design process demystified* (4th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780800454979>
- Lefebvre, W. (2017). *Architectural knowledge*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45671-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45671-3_9)
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*. MIT Press.
- Mallgrave, H. F. (2010). *The architect's brain: Neuroscience, creativity, and architecture*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444317275>
- Mallgrave, H. F. (2013). *Architecture and embodiment: The implications of the new sciences and humanities for design*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203071144>
- Mauss, M. (1990). *The gift: Forms and functions of exchange in archaic societies* (I. Cunnison, Trans.). W.W. Norton. (Original work published 1925).
- McIntyre, L. (2018). *Post-truth*. MIT Press.
- Merleau-Ponty, M. (2012). *Phenomenology of perception* (D. A. Landes, Trans.). Routledge. (Original work published 1945). <https://doi.org/10.4324/9780203720714>
- Mitchell, W. J. (1990). *The logic of architecture: Design, computation, and cognition*. MIT Press.
- Necipoglu, G. (2005). *The age of Sinan: Architectural culture in the Ottoman Empire*. Reaktion Books. <https://doi.org/10.3202/caa.reviews.2006.129>
- Norberg-Schulz, C. (1980). *Genius loci: Towards a phenomenology of architecture*. Rizzoli.
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- Pallasmaa, J. (2005). *The eyes of the skin: Architecture and the senses*. Wiley.
- Pallasmaa, J. (2009). *The thinking hand: Existential and embodied wisdom in architecture*. Wiley.
- Pallasmaa, J. (2012). *The embodied image: Imagination and imagery in architecture*. Wiley.
- Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension*. University of Chicago Press.
- Popper, K. (1959). *The logic of scientific discovery*. Routledge.
- Psarra, S. (2009). *Architecture and narrative: The formation of space and cultural meaning*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203639672>
- Quine, W. V. (1969). *Ontological relativity and other essays*. Columbia University Press. <https://doi.org/10.7312/quin92204>
- Rapoport, A. (1982). *The meaning of the built environment: A nonverbal communication approach*. Sage.
- Rasmussen, S. E. (1962). *Experiencing architecture*. MIT Press.
- Roth, L. M. (1991). *Understanding architecture: Its elements, history, and meaning*. Avalon Publishing.
- Russell, B. (1912). *The problems of philosophy*. Oxford University Press.
- Rykwert, J. (1981b). *On Adam's house in paradise: The idea of the primitive hut in architectural history*. MIT Press.
- Saint, A. (2007). *Architect and engineer: A study in sibling rivalry*. Yale University Press.

- Salingaros, N. A. (2013). *Unified architectural theory: Form, language, complexity*. Sustasis Press.
- Schön, D. A. (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. Basic Books.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press.
- Shifman, L. (2013). *Memes in digital culture*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9429.001.0001>
- Shiner, L. (2001). *The invention of art: A cultural history*. University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226753416.001.0001>
- Simon, H. A. (1969). *The sciences of the artificial*. MIT Press.
- Taylor, C. (1985). *Philosophy and the human sciences: Philosophical papers, volume 2*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139173490>
- Tegmark, M. (2014). *Our mathematical universe*. Penguin.
- Till, J. (2009). *Architecture depends*. MIT Press.
- Toffler, A. (1980). *The third wave*. Morrow.
- Tomasello, M. (1999). *The cultural origins of human cognition*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/9780674044371>
- Tuan, Y.-F. (1977). *Space and place: The perspective of experience*. University of Minnesota Press.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124–1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- Unwin, S. (2009). *Analysing architecture* (3rd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203880906>
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/6730.001.0001>
- Venturi, R., Scott Brown, D., & Izenour, S. (1977). *Learning from Las Vegas*. MIT Press.
- Williams, R. (1985). *Keywords: A vocabulary of culture and society* (Rev. ed.). Oxford University Press.
- Whitehand, J. W. R. (2001). British urban morphology: The Conzenian tradition. *Urban Morphology*, 5(2), 103–109. <https://doi.org/10.51347/jum.v5i2.3896>

**Bu makaleye atıfta bulunmak için:**

Akçin, E. (2026). "Mimarlık Nedir", *İYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemi-Akademik*, 1(1):11-20. <https://doi.org/10.66125/0.2026.3>

# PARİS'İN KÖPRÜLERİ 1

## (Bridges of Paris 1)

İsmet Vildan Alptekin \*

Prof. Dr., İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

\* ismet.alptekin@yeniyyuzuil.edu.tr

(Prof. Dr., Department of Interior Design and Landscape Architecture, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yuzuil University, Istanbul, Turkey)

Alınma Tarihi: 16 Temmuz 2025 Kabul Tarihi: 29 Ağustos 2025 Yayın Tarihi: Şubat 2026  
(Received: 16 July 2025 Accepted: 29 August 2025 Published: February 2026)  
Dijital Nesne Tanımlayıcı (Digital Object Identifier): <https://doi.org/10.66125/0.2026.1>

Derleme Makalesi  
(Review Paper)

### ÖZET

Paris kenti tarihsel dokuları korunmuş en önemli dünya kentlerinden biridir. Bu özelliğinin yanı sıra Paris, önemli kültür ve sanat merkezi olma özelliğini de taşır. Kent L'île de la Cité adasında kurulmuş ve dairesel olarak tarihi bir büyüme göstermiştir. Paris, içinden kıvrılarak geçen Seine nehri ile özdeşleşmiştir. Kentin Seine nehrinin güneyine bakan bölümüne sol kıyı, kuzeyine bakan bölümüne sağ kıyı denir. Nehir ekolojik ve estetik doğal değerlerinin dışında aynı zamanda bir nehir ulaşım yoludur. Kentin sağ ve sol yakalarını birbirine bağlayan, periferi sınırları içinde, otuz sekiz köprü bulunmaktadır. Büyük bir çoğunluğu teknik ve sanatsal olarak özel bir yapıya sahiptir. Kentle bütünleşmiş köprülerin her birinin ilgi çekici ayrı bir tarihi vardır. Paris kentine genel bir bakış atıldığında akla; köprüler, barok yapılar, Mansart çatuları ve Seine nehri gelir. Hemen her köprü buna benzer büyük ya da küçük meydanlara bağlanır. Yani kentin tarihi dokusu bakımından önemli bir yere sahiptirler. Köprülerin işte bu işlevleri açısından yapılan araştırmalar yetersizdir. Bu yüzden köprülerin diğer özelliklerinin yanı sıra kent dokusundaki etkileri ve fiziki uyumları yönünden analizlerine önem verilmiştir. Periferide yer alan her bir köprü kent dokusundaki rolleri açısından detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bu yüzden her köprü için özel bir dispozisyon oluşturulmuştur. Bu dispozisyonlar tüm köprüleri içeren bir dispozisyona bağlanarak, kentin tüm köprülerini içeren kent dokusunun genel yapısından bir sonuç varılmıştır. Bu çalışma ileride bir kitaba dönüştürülecektir. Ekte sunduğumuz makale, iki örnekle çalışmanın amacını ifade etmektedir. Aynı zamanda çalışma, bir dünya kenti olan Paris'in kent dokusu açısından gösterdiği farkındalığın yanı sıra, turizm potansiyelinin de göstergesi olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** tarihi doku, köprüler, kent morfolojisi, Seine Nehri, turizm potansiyeli

### ABSTRACT

Paris is one of the most important cities in the world in terms of preserving its historical fabric. In addition to this feature, Paris is also an important center of culture and art. The city was founded on the Île de la Cité and has grown historically in a circular pattern. Paris is synonymous with the Seine River, which winds through it. The part of the city facing the south bank of the Seine is called the left bank, and the part facing the north bank is called the right bank. In addition to its ecological and aesthetic natural values, the river is also a waterway for transportation. There are thirty-eight bridges connecting the right and left banks of the city within the city limits. The majority of them have a unique technical and artistic structure. Each of the bridges integrated into the city has its own interesting history. When you think of Paris, bridges, baroque buildings, Mansart roofs, and the Seine River come to mind. Almost every bridge connects to large or small squares similar to this one. In other words, they occupy an important place in terms of the city's historical fabric. Research on the functions of bridges has been insufficient. Therefore, in addition to their other characteristics, their effects on the city fabric and their physical compatibility have been analyzed. Each bridge located on the periphery has been examined in detail in terms of its role in the city's fabric. For this reason, a special disposition has been created for each bridge. These dispositions are linked to a disposition that includes all bridges, leading to a conclusion about the general structure of the city's fabric, which includes all bridges. This study will be turned into a book in the future. The article we present in the appendix illustrates the purpose of the study with two examples. Additionally, the study will serve as an indicator of Paris's awareness of its urban fabric as a global city, as well as its tourism potential.

**Keywords:** historical texture, bridges, urban morphology, Seine River, tourism potential

## 1. GİRİŞ

Paris, Avrupa'nın ve dünyanın en öneml kentlerinden biri olma özelliğine sahip bir dünya kentidir. Tarihinin çok eskilere dayanması, dünyanın en önemli turizm ve sanat merkezlerinden biri olması nedeni ile Paris yeryüzünde en iyi bilinen kentlerin başında yer alır. Kent aynı zamanda tarihi dokusunu çok büyük bir oranda koruyan ve korumaya özen gösteren dünya örneklerinden biridir. Paris her yıl yaklaşık 40 milyon turiste ev sahipliği yapar. Bu özelliği ile de ilk sırada yer alır. Kent merkezi 2,5 milyon olmak üzere, banliyöleri ile birlikte kentin nüfusu 12 milyondur. Turizm mevsiminde nüfusu 50 milyona yaklaşmaktadır. Dünyanın 24. büyük kenti ve Avrupa'nın en kalabalık yerleşimidir. Paris'in en önemli

özelliklerinden biri de büyük bir nehir kenti olmasıdır. Tarihi MÖ 4000 yılına kadar uzanan kent başlangıçta, Seine nehri içinde yer alan L'île de la Cité adasında kurulmuştur. Daha sonraki süreçte dairesel bir biçimde gelişen ve çapı yaklaşık 15 km olan kenti, Seine nehri kıvrımlı bir şekilde ikiye böler. Bu yüzden Seine nehri Paris ile özdeşleşmiştir. Seine nehri kente kazandırdığı ekolojik, rekreasyonel özellikleri ile birlikte büyük bir nehir taşımacılığına da olanak sağlar. Seine nehri tarafından ikiye bölünen Paris'i, kendine has tarihi geçişleri ve özellikleri olan köprüler birbirine bağlar.

Köprüler meydanları ve aksları birbirlerine bağlayarak kent ulaşımının temel bağlantılarını oluşturur. Bu önemli fonksiyonlarının yanı sıra, her bir köprü belli tarihinin yanı sıra ayrı bir stile ve estetik bir yapıya sahiptir. Birçoğu heykel, rölyef ve sanatsal değere sahip aydınlatma elemanı ile donatılmıştır. Bazıları da felsefi özellikler kazanmıştır. Genel olarak Seine nehri üzerinden yüzlerce köprü bulunmaktadır. Burada sadece periferi içerisinde yer alan 38 köprü ele alınmıştır. Bu köprüler Paris'in tarihi ve kentsel gelişimine paralel olarak inşa edilmiş olup, her birinin ayrı ayrı tarihsel bir oluşum süreci bulunmaktadır.

Paris'in köprüleri kentsel bağlantı fonksiyonlarının yanı sıra kent kimliğinin, kent estetiğinin oluşumunda büyük rol oynamaktadır. Paris'in köprüleri hakkında, bugüne kadar onlarca kitap çıktı, hikayeler yazıldı. Ancak hiçbirinde köprülerin kent silüeti, kentsel peyzaj, kent kimliği ve sitüasyon konularında bir bütün halindeki analizleri yapılmamıştır. Bu nedenle çalışma, diğerlerinden büyük farklılıklar göstermekte ve farklı bulgular ortaya koymaktadır. Paris'in köprülerinin konu olarak seçilmesinin nedeni, yukarıda kısaca açıklanan özelliklerinden kaynaklanmıştır.

Paris'in köprüleri, bugüne kadar suyun akış yönünde hareket ederek ele alınmıştır. Burada ise aksi yönde, suyun akış yönünün tersine doğru giderek, aşağıdan yukarıya doğru incelenmiştir. Bunun nedeni ise kentin nehir boyunca gösterdiği değişim ve kentin dokusal özellikleridir.

Nehir, kentin güneydoğusundan, bir yay çizerek, güneybatısına doğru akmaktadır. Seine nehrinin periferi içinde olan ve güneydoğusunda yer alan eski-yeni endüstri alanları ve modern yapılar kentin bu bölümünün dokusunu oluşturmaktadır. Oysa kentin güneybatısında yer alan banliyölere, koruluk ve ormanlık alanlara bitişik olan kent dokusu Paris'in geleneksel yapılarını içermekte, doğu yönüne doğru devam ederek L'île de la Cité adasından sonra yerini yavaş yavaş yeni yapılara ve endüstri alanlarına bırakmaktadır.

Köprülerin nehirle kaynaştığı ve geleneksel yapıların yoğun olduğu bölgeyle başlayıp devam etmesi köprülerin kentin orijinal yapısı içinde analiz edilmesini sağlayacaktır. Çünkü kentin nehrin akış yönüne göre, periferi içindeki güneybatı bölümü daha kentsel, güneydoğu bölümü ise daha modern ve endüstriyel bir görünüm ortaya koymaktadır. Kentin geleneksel dokuya sahip merkezi ve büyük bölümü bu iki uç arasında yer almakta ve güneybatı bölümü ile daha iyi kaynaşmaktadır.

Ayrıca Seine nehri son derece durgun akan bir nehirdir. Kentin büyük bir bölümünde akış yönünü görsel olarak saptamak çok zordur. Bu olgu da bizim inceleme yön ve yöntemimizi desteklemektedir.

Paris'in köprülerinin incelenmesi süresi içinde, üzerinde yer aldıkları Seine nehrinin önemini ve felsefi değerini de belirtmek gerekir. Seine nehri ve Paris kenti o kadar iç içe bir doku oluşturmuştur ki asla birbirlerinden ayrı düşünülemez.

Seine nehri; kıyıları ve köprüleri tarih boyunca insanların maddi ve manevi yaşam kaynağı olmuştur. Nehir, Paris sakinlerinin yaşamının bir parçası gibidir. Sakinler için nehir ve kıyıları rekreasyon alanı, plaj, balıkçılık ve daha önemlisi psikolojik bir rahatlatma, boşalım alanıdır. Seine nehri, bölgeye sağladığı ekolojik denge ve nehir taşımacılığının yanı sıra, periferi sınırları içinde kent, köprüler ile bir bütün oluşturularak yaşamın her bölümünün fiziki ve felsefi bir kaynağı olmuştur.

Köprüler Fransızlar tarafından; farklı tarihi dönemleri yansıtan, kuyumcu titizliği ile çalışan mimarların yarattığı Seine nehrinin bilezikleri olarak anılır. Seine köprüleri fonksiyonel özelliklerinin yanı sıra; edebiyat, resim, heykel müzik, dans gibi sanat dallarının gece ve gündüz icra edildiği sihirli mekanlardır.

Köprüler aynı zamanda birer seyir teraslarıdır. Nehir tekneleri ile Seine katedilirlen, köprülerin alt ve üst yapılarını ortaya koyduğu taş, demir konstrüksiyonlar, üzerlerinde yer alan plastikler, kıyılarda yer alan yapıların büyüklü etkisi hissedilir. Paris köprülerinin her biri teknolojik ve sanatsal bir eserdir.

Dünyada az sayıda kent, bu çoklukta, bu derece teknik, mimari ve estetik kaliteye sahip köprüyü bünyesinde barındırır. Bu çalışmanın oluşturulmasında daha önce de belirtildiği gibi, nehir akışının ters yönünde yukarıya doğru bir yol izlenmiştir. L'île de la Cité ve Saint Louis adalarını karaya bağlayan köprülerden önce güneydekiler, sonra kuzeydekiler ele

alınmıştır.

1852 yılında kendisini önce cumhurbaşkanı seçtiren Louis Napoleon, sonradan III. Napoleon adı ile imparator oldu ve Paris için yeni bir dönem başladı. İmparator Parisi yeniden imar etmek için yönetimde yer alan Haussmann'ı görevlendirdi. Bugünkü Paris'in kurucusu sayılan Haussmann büyük yıkımlara girişerek geniş yollar açtırdı ve bunları bağlayan köprüler yaptırdı.

Eyfel Kulesi yer aldığı aks boyunca bağlandığı kuzeyde Ecole Militaire ve Champs de Mars, güneyde Léna köprüsü ile Seine nehrini geçerek ulaştığı Palais de Chaillou Sarayı ile örnek bir planlama bütünü oluşturur. Günümüzde Paris, her yıl yapılan fuarları, defileleri, yarışmaları dünyaca ünlü müzeleri ve sanatsal aktiviteleri ile adını tüm dünyaya duyurmuştur.

Bugün Paris'in nüfusu 14 milyona dayanmıştır. Yazın bu nüfus turizm nedeni ile 40 milyona çıkmaktadır. Sadece Paris'in turizm potansiyeli Türkiye'nin dört katıdır. Paris dünyanın en çok turist çeken kentidir. Kentin geleneksel dokusunu Barok stili yapılar oluşturmaktadır. Mimari stili ile kent olarak bir tarih mirası olan Paris geceleri ışıklandırılarak bir masal kentine dönüşür. Paris'e 'Ville de Lumiere' (Işık Kenti) denmesinin nedeni budur.

Yukarıda belirtildiği gibi Paris ile bütünleşmiş olan Seine nehri köprüleri teker teker ele alınmış ve köprülerin konumu, tarihi, teknik özellikleri, bağlantılı olduğu rihim, aks, meydan, yollar, köprülerin çevre ile bağlantıları, köprülerin diğer köprülerle oluşturduğu görsel ve yapısal ilişkiler, kıyı düzenlemeleri incelenmiştir.

Bu bölümde önemli olan iki örnek verilecek, daha sonraki bölümlerde ise periferide yer alan 38 köprü tek tek ele alınacaktır. Belirtilen iki örnekten biri Léna Köprüsü diğeri ise Alexandre III Köprüsüdür. Bu iki köprünün özellikleri özet olarak aşağıda verilmiştir.

### Léna Köprüsü (Le Pont d'Léna)

Léna Köprüsü (1808-1814), Ecole Militaire, Champs de Mars, Eyfel Kulesi, Palais de Chaillot ve Trocadero aksında yer alan, bu tarihi ve kentsel dokuyu birleştiren ve turistler tarafından çokça ziyaret edilen bir köprüdür. Palais de Chaillot ve Trocadero meydanı köprünün yaklaşık olarak kuzeyinde, Champs de Mars ve Ecole Militaire güneyinde yer alır. Nehir kıyısı ile birlikte bu bölüm Paris kentinin en önemli öğelerinden biridir. Seine nehri kıyı düzenlemesinin en iyi örneklerinden birini bu yörede görmektedir.

Ayak üstlerindeki yan yüzlerde imparatorluk kartalları ile dekore edilmiş köprünün dört ucunda Galya, Arap, Romen ve Grek harplerini temsil eden dört heykel yer alır. Köprü sonradan genişletilmiştir. Yapımı altı yıl sürmüştür. Léna Köprüsü Napolyonun istediği dört köprüden biridir. Köprü 155 m boyunda, 35 m eninde, taş yapıli kemerli bir köprüdür (Şekil 1, 2, 3, 4).



Şekil 1. Eyfel Kulesi ve Palais de Chaillou aksında yer alan Léna Köprüsü'nün güney kıyıya bağlandığı bölüm.

### Alexandre III Köprüsü (Le Pont Alexandre III)

7 Ekim 1896 tarihi köprünün ilk taşının konulduğu gündür. Rusya'nın tüm imparatorluk zevali temel atma törenine katılmıştır. Bunların arasında Nicolas II, Alexandre III'ün oğlu ve Alexandra Federovna da vardı. Çok



Şekil 2. Léna Köprüsü'nün nehir boyunca görünümü.



Şekil 3. Köprü'nün yan yüzeylerinde yer alan imparatorluk kartalları kabartmaları.

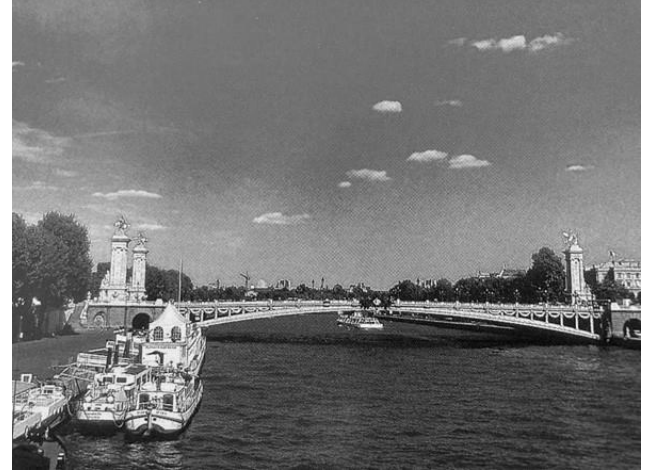


Şekil 4. Léna Köprüsü'nün Palais de Chaillou tarafından bağlandığı Palais de Chaillou Sarayının arkasında Trocadero Meydanı yer almaktadır. Resimde görüldüğü gibi kıyıda sahil yolu yer almaktadır.

geniş bir kemeri olan köprü, biten bir asrı, halk ve zamanla birlikte başlayan bir asra bağlamak için yapıldı. Buna bağlı olarak da köprüye özgü bir felsefe yaratıldı.

Alexandre III Köprüsü Paris'in en şatafatlı köprülerinden biridir. Sağ kıyıda Winston Churchill Caddesi'ni, sol kıyıda Invalides meydanına bağlar. Dönemin mimar ve mühendisleri tarafından 1900 yılındaki evrensel sergi için inşa edilmiştir. 107.50 metre uzunluğundaki tabla açıklığı büyük bir kemer ve ek kemerler üzerine oturur.

Toplam 15 kemerden oluşur. Her kemer üç eklemlidir. Kemerler 150 - 390 cm boyutu olan civatalar ile tutturulmuştur. Köprü çelik konstrüksiyonludur.



Şekil 5. Winston Churchill Caddesini Invalides Meydanına bağlayan Alexandre III Köprüsü. Köprü sanatsal açıdan Paris'in en önemli köprüsüdür.



Şekil 6. Alexandre III Köprüsü'nün güneybatı kıyı bağlantısı.



Şekil 7. Alexandre III Köprüsü üzerinde yer alan heykel ve aydınlatma elemanları.



Şekil 8. Alexandre III Köprüsü'nün güneybatısında yer alan altın yaldızlı bronz heykel.



Şekil 9. Alexandre III Köprüsü üzerinde yer alan bakır "Géine sur un poisson" heykeli.

## 2. KAYNAKÇA

M. Hary, Paris La Seine (Promenade d'un pont à l'autre), L'apart édition, Paris, 2012.

Sebastien Recouvrance, Les Ponts de Paris, Éditions Jean-Paul Gisserot, Paris, 2007.

Jean Favier, Paris deux mille ans d'histoire, Édition Fayard, Paris, 1997.

**Bu makaleye atıfta bulunmak için:**  
Alptekin, İ.V. (2026). "Paris'in Köprüleri I", *İYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemli-Akademik*, 1(1):21-24.  
<https://doi.org/10.66125/0.2026.1>

# YENİ NESİL YAPAY BÖBREK TEKNOLOJİLERİ VE KLİNİK UYGULAMALARDAKİ GELECEĞİ

## (New Generation Artificial Kidney Technologies and Their Future in Clinical Applications)

Bahar Mammadlı, Sezen Canım Ateş \*

\* Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
sezen.canimates@yeniyyuzuil.edu.tr

(\* Biomedical Engineering Department, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yuzuil University, Istanbul, Turkey)

Alınma Tarihi: 03 Ağustos 2025 Kabul Tarihi: 28 Ağustos 2025 Yayın Tarihi: Şubat 2026  
(Received: 03 August 2025 Accepted: 28 August 2025 Published: February 2026)  
Dijital Nesne Tanımlayıcı (Digital Object Identifier): <https://doi.org/10.66125/0.2026.4>

Derleme Makalesi  
(Review Paper)

### ÖZET

Böbrekler, vücudun sıvı dengesini düzenleyen, elektrolitleri kontrol eden, toksik atıkları kandan süzen ve hormon üretiminde görev alan hayati organlardır. Kronik böbrek yetmezliği (KBY) gibi hastalıklarda bu fonksiyonlar kalıcı olarak bozulur ve hastaların yaşamlarını sürdürürebilmeleri için diyaliz ya da organ nakli gerekir. Geleneksel hemodiyaliz sistemleri genellikle hastaları haftada üç gün hastaneye bağımlı hale getirir, büyük hacimli diyalizat sıvıları gerektirir ve uzun vadede yaşam kalitesini olumsuz etkiler. Bu sebeple, taşınabilir, giyilebilir veya vücut içine yerleştirilebilen (implante edilebilir) yapay böbrek sistemleri giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, son yıllarda geliştirilen yenilikçi yapay böbrek teknolojileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ninhidrin bazlı polimer sorbentler ve molibden disülfür ( $MoS_2$ ) gibi nano-yapılar sayesinde üre, kreatinin ve ürik asit gibi üremik toksinlerin uzaklaştırılmasında önemli ilerlemeler sağlandığı görülmüştür. Ayrıca biyomimetik membranlar, canlı hücre içeren biyoreaktör modülleri ve sensör destekli akıllı kontrol sistemleri; hem biyolojik uyumluluğu artırmakta hem de hasta-özel tedavi uygulamalarına olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler sadece mühendislik açısından değil, aynı zamanda sosyal, klinik ve ekonomik boyutlarıyla da gelecekteki sağlık çözümlerine yön verecek potansiyele sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapay böbrek, taşınabilir diyaliz,  $MoS_2$ , ninhidrin, biyoyumlu membran

### ABSTRACT

The kidneys are vital organs responsible for regulating fluid balance, maintaining electrolyte levels, filtering toxic waste from the blood, and producing essential hormones. In chronic kidney disease (CKD), these functions are permanently impaired, requiring patients to rely on dialysis or organ transplantation to survive. Traditional hemodialysis systems often bind patients to hospital-based treatment three times a week, require large volumes of dialysate solution, and negatively affect long-term quality of life. Therefore, the development of portable, wearable, or implantable artificial kidney systems has become increasingly important. This study provides a comprehensive overview of recent advancements in artificial kidney technologies. It is seen that, innovations such as ninhydrin-based polymeric sorbents and nanostructured materials like molybdenum disulfide ( $MoS_2$ ) have demonstrated significant efficiency in the removal of uremic toxins such as urea, creatinine, and uric acid. In addition, biomimetic membranes, bio-reactor modules containing living renal cells, and sensor-supported intelligent control systems enhance both biocompatibility and patient-specific treatment capabilities. These technologies not only represent engineering progress but also hold great promise for future healthcare solutions across social, clinical, and economic dimensions.

**Keywords:** Artificial kidney, portable dialysis,  $MoS_2$ , ninhydrin sorbent, biomimetic membrane

## 1. Giriş

Böbrekler, vücutta birçok hayati fonksiyonu yerine getiren, çift organ yapısına sahip filtreleme sistemleridir. Bu organlar, vücuttaki su ve elektrolit dengesini korumak, kan basıncını düzenlemek, hormon üretimini sağlamak ve metabolik atıkları kandan süzerek idrar yoluyla uzaklaştırmak gibi temel görevleri üstlenir. Ancak çeşitli nedenlerle (örneğin diyabet, hipertansiyon, kalıtsal hastalıklar) böbrek fonksiyonlarının geri dönüşümsüz şekilde kaybı, KBY ile sonuçlanır. KBY hastalarının yaşamlarını sürdürürebilmeleri için ya sürekli diyaliz tedavisine girmeleri ya da böbrek nakli olmaları gerekir (1).

Günümüzde uygulanan en yaygın yöntem olan hemodiyaliz, haftada genellikle üç gün, her biri 3-4 saat süren merkez temelli tedavi seansları ile gerçekleştirilir. Ancak bu sistemler; sabit, taşınamaz yapıları, yüksek

hacimli diyalizat kullanımı (yaklaşık 120 litre/seans), diyet ve sıvı kısıtlamaları, enfeksiyon riski ve sınırlı hareket özgürlüğü nedeniyle hastaların yaşam kalitesini ciddi şekilde düşürmektedir. Aynı zamanda tedavi maliyetlerinin yüksekliği ve sağlık merkezlerine erişim sorunları da özellikle gelişmekte olan ülkelerde önemli bir sorun teşkil etmektedir (2).

Tüm bu kısıtlamalar, son yıllarda bilim insanlarını taşınabilir, giyilebilir ve hatta vücuda implante edilebilir yapay böbrek sistemleri geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu yeni nesil teknolojiler, daha az hacimde sıvı kullanarak toksinleri uzaklaştırabilen, biyoyumlu ve hastaya özel çözümler sunan yenilikçi yaklaşımlar içermektedir. Geliştirilen sistemlerde özellikle adsorpsiyon temelli sorbentler, nano-yapılar, biyoyumlu membranlar ve akıllı sensör destekli kontrol üniteleri gibi çok disiplinli teknolojiler ön

plana çıkmaktadır (3).

Bu derleme çalışması kapsamında, günümüzde yapay böbrek alanında yapılan güncel araştırmalar; kullanılan malzemeler, teknolojik sistemler ve biyomedikal yaklaşımlar çerçevesinde ele alınarak değerlendirilmiştir. Amaç, hem mühendislik hem de klinik bakış açısıyla geleceğin böbrek replasman tedavilerine ışık tutacak potansiyel çözümleri ortaya koymaktır.

## 2. Taşınabilir ve Giyilebilir Yapay Böbrekler

Kronik böbrek yetmezliği hastalarının yaşamlarını sürdürebilmesi için uygulanan geleneksel hemodiyaliz yöntemleri, sabit klinik merkezlere bağımlı olması, seans başına yaklaşık 120 litre diyalizat sıvısı gerektirmesi ve hastanın hareket özgürlüğünü ciddi biçimde kısıtlaması gibi nedenlerle önemli sınırlamalara sahiptir. Bu durum, özellikle yaşlı, çalışmak zorunda olan veya kırsal bölgelerde yaşayan hastalar açısından yaşam kalitesini olumsuz etkileyen önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda geliştirilmekte olan taşınabilir ve giyilebilir yapay böbrek sistemleri, bu sınırlamaları aşmaya yönelik çığır açıcı çözümler sunmaktadır (4).

Taşınabilir yapay böbrekler, genellikle küçük hacimli, batarya destekli, hastanın yanında taşıyabileceği şekilde tasarlanmış, düşük debili ve geri dönüştürülebilir diyalizat kullanan sistemlerdir. Bu sistemlerde en büyük teknolojik engel, üre, kreatinin, ürik asit ve fosfat gibi üremik toksinlerin küçük hacimdeki diyalizat içerisinde etkili biçimde uzaklaştırılabilmesidir. Geleneksel sistemlerde bu görev, büyük hacimli diyalizatla sağlanırken, taşınabilir sistemlerde adsorpsiyon temelli sorbentler ve yeniden kullanılabilir filtrasyon üniteleri ön plana çıkmaktadır.

Bu kapsamda yapılan çalışmalarda özellikle ninhidrin tabanlı gözenekli polimer yapılar, yüksek üre bağlama kapasiteleriyle dikkat çekmiştir. Tek adımda sentezlenebilen bu sorbentler, küçük hacimde dahi üreyi etkili biçimde uzaklaştırarak rejeneratif diyaliz sistemlerinin gelişimine katkı sağlamaktadır. Ayrıca elektrokimyasal yıkım sistemleri, enzimatik hidroliz, iyon değiştirici reçineler gibi yöntemler de literatürde alternatif yaklaşımlar olarak değerlendirilmiştir (5).

Bir diğer önemli gelişme ise geniş katman aralıklı MoS<sub>2</sub> gibi nano-malzeme temelli sorbentlerin kullanımınıdır. MoS<sub>2</sub>, yüksek yüzey alanı, biyouyumluluğu ve kimyasal bağ yapabilme özelliği sayesinde üre, kreatinin ve ürik asit gibi molekülleri yüksek seçicilikle adsorbe edebilmektedir (6). Ayrıca bu malzemeler, protein gibi büyük molekülleri geçirmeyerek seçici filtrasyon sağlamaktadır. Bu da hem üreaz enzimi kullanımını ortadan kaldırmakta, hem de sistemin daha kararlı ve uzun ömürlü olmasına imkân tanımaktadır.

Giyilebilir yapay böbrek sistemleri ise genellikle bir kemer, çanta veya giysi içerisine entegre edilen daha kompakt cihazlardır. Bu cihazlar, hastanın günlük yaşamına entegre olabilen, sürekli çalışan ve genellikle düşük akış hızlarında çalışan mini-diyaliz sistemleridir. Giyilebilir sistemlerde tasarımın hafiflik, sessizlik, batarya süresi ve güvenlik gibi kriterlere uygun olması gerekmektedir. Ayrıca bu sistemlerde mikroakışkan tabanlı membran teknolojileri, biyosensör destekli geri bildirim kontrol üniteleri, alarm sistemleri ve kendi kendini temizleyebilen filtre modülleri kullanılmaktadır.

Özellikle son dönemde yapılan çalışmalarda, giyilebilir sistemlerin sorbent modüllerinde kullanılan malzemeler; karbonlaştırılmış selüloz aerogeller (C-CAJ), nanofiber membranlar, grafen oksit kompozitleri ve bioaktif kaplamalı hibrid yapılar gibi gelişmiş fonksiyonel bileşenlerden oluşmaktadır. Bu sayede yalnızca üre değil, aynı zamanda ürik asit, kreatinin ve fosfat gibi çok sayıda üremik toksin aynı anda tutulabilmekte; aynı zamanda bakteriyel bulaş ve biyofilm oluşumu gibi istenmeyen etkiler de azaltılmaktadır (7).

Taşınabilir ve giyilebilir yapay böbrekler üzerinde yapılan tüm bu çalışmalar, yalnızca mühendislik başarısı değil, aynı zamanda hastanın tedaviye erişimini kolaylaştıracak, bağımsızlığını artıracak ve yaşam kalitesini iyileştirecek sosyal bir dönüşüm potansiyeli de taşımaktadır. Henüz tam anlamıyla klinik uygulamaya geçmemiş olsa da, bu sistemlerin test prototipleri insan üzerinde kısa süreli deneylerle başarı göstermeye başlamış ve FDA gibi otoritelerin dikkatini çekmiştir. Önümüzdeki yıllarda daha küçük, daha etkili, daha ucuz ve daha entegre çözümlerin ortaya çıkmasıyla birlikte taşınabilir ve giyilebilir yapay böbreklerin, geleneksel diyaliz sistemlerinin yerini alma potansiyeli oldukça yüksektir.

## 3. İmplant Edilebilir Yapay Böbrek Sistemi (İBAK)

Geleneksel diyaliz yöntemleri ve taşınabilir sistemler, böbrek yetmezliği tedavisinde önemli gelişmeler sunsa da hâlâ günlük yaşamda tam bağımsızlık sağlamaktan uzaktır. Hastaların tedaviye sürekli bağlı olması, yaşam kalitesini düşürmekte ve sosyal yaşama katılımı sınırlamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda üzerinde çalışılan en ileri yapay böbrek yaklaşımı vücut içine yerleştirilebilen, yani implante edilebilir yapay böbrek sistemleridir (İBAK).

İBAK sistemlerinin temel hedefi, insan vücuduna cerrahi olarak yerleştirilebilecek, dış enerji veya büyük hacimli sıvı ihtiyacı duymadan çalışabilecek, biyolojik yapılarla uyumlu ve uzun ömürlü bir cihaz geliştirmektir. Bu sistemler, yalnızca bir filtreleme ünitesi değil, aynı zamanda biyolojik geri emilim (reabsorpsiyon) süreçlerini de taklit edebilecek kapasitede, çok katmanlı ve modüler olarak tasarlanmaktadır (8).

İBAK sistemleri genellikle iki temel modülden oluşur:

• **Hemorheolojik Filtrasyon Modülü (HFM):** Bu modül, glomerül benzeri bir yapıyla kandan toksinleri süzmek amacıyla geliştirilmiştir (9). Özellikle silikon bazlı nanoporlara sahip filtreleme sistemleri kullanılır. Bu nanoporlar, yaklaşık 5–10 nanometre çapındadır ve:

- Üre, kreatinin gibi küçük toksinleri geçirirken
- Albumin, globulin gibi büyük molekülleri tutar

• **Biyoreaktör Modülü (BRM):** Bu modüle, gerçek böbrek tübül hücrelerine benzer şekilde çalışan canlı hücreler (çoğunlukla proksimal tübül epitel hücreleri) yerleştirilir (10). Bu hücreler, sodyum, glukoz ve su gibi molekülleri geri emerek homeostazı sağlar. Ayrıca, hormon sinyallerini ve asit-baz dengesi gibi işlevlerde de katkı sunar.

İBAK sisteminin en dikkat çekici özelliği, herhangi bir elektrik kaynağına ya da pompalama sistemine ihtiyaç duymadan, vücudun kendi kan basıncı ile çalışabilecek şekilde tasarlanmış olmasıdır. Cihaz, kalpten gelen kanı doğrudan alır, toksinleri filtreler ve geri emilmesi gereken maddeleri seçici şekilde hücre tabakalarından geçirir. Bu süreç sonunda ortaya çıkan sıvı, idrar olarak mesaneye yönlendirilir. Bu yapı sayesinde hasta, herhangi bir makineye bağlı kalmadan, vücudu içinde sürekli çalışan bir "mikro böbreğe" sahip olur.

İBAK cihazlarında kullanılan membranlar ve yüzeyler mutlaka biyouyumlu, kanla temas edebilecek özellikte, pıhtılaşmayı tetiklemeyen ve bağışıklık sistemini uyarmayan yapıda olmalıdır. Bunun için, Silikon elastomerler; Titanyum kaplamalar; Polietersülfon gibi polimerik yüzeyler kullanılmaktadır. Ayrıca, cihazın çevresel dokularla etkileşimde fibrozis oluşturmaması, protein birikimi yapmaması ve hücre dışı matris oluşumunu tetiklememesi gerekir. Bu doğrultuda yapılan deneysel çalışmalar, hayvan modellerinde olumlu sonuçlar vermiştir.

İBAK sistemleri ile ilgili birçok prelinik çalışma, özellikle küçük hayvan modelleri (fare, tavşan) üzerinde yürütülmüştür. Bu çalışmalarda:

- Cihazın kanla sorunsuz çalıştığı
- Filtrasyon kapasitesinin korunduğu
- Hücre tabakasının canlılığını uzun süre sürdürdüğü
- Enflamasyon, pıhtı veya fibrozis oluşmadığı

rapor edilmiştir. Bununla birlikte, uzun dönem biyolojik stabilite, enfeksiyon riski ve cerrahi entegrasyon gibi konular hâlâ aktif araştırma konusudur.

İmplant edilebilir yapay böbrekler, yalnızca teknik bir cihaz değil, böbrek yetmezliği tedavisinde organ nakline alternatif bir çözüm olabilir (11). Organ bağıışı azlığı ve nakil sonrası immün baskılayıcı ilaçların yan etkileri düşünüldüğünde, İBAK sistemlerinin hastalara çok daha sürdürülebilir ve risksiz bir yaşam sunabileceği öngörülmektedir. Yakın gelecekte insan denemelerinin başlaması ve cihazların uzun dönemli biyolojik güvenlik verilerinin elde edilmesiyle birlikte, İBAK sistemlerinin klinik uygulamalarda devrim yaratması beklenmektedir.

## 4. Malzeme Temelli Gelişmeler ve Membran Teknolojisi

Yapay böbrek teknolojilerinin başarısı yalnızca sistem tasarımına değil,

aynı zamanda kullanılan malzeme bileşenlerinin performansına da doğrudan bağlıdır. Özellikle membranlar ve adsorban materyaller, toksin uzaklaştırma, biyoyoumluluk, uzun ömür ve antibakteriyel özellikler gibi birçok kritik parametrenin belirleyicisidir. Bu nedenle, son yıllarda yapay böbrek sistemlerinde kullanılan malzemeler üzerinde önemli yenilikler gerçekleştirilmiştir.

Bir yapay böbrekteki en temel bileşenlerden biri olan membran, kandan toksinlerin ve atık maddelerin seçici şekilde ayrılmasını sağlar. Bu membranlar, aynı zamanda su, elektrolit ve bazı küçük moleküllerin geçişine izin verirken; büyük proteinleri, hücreleri ve bakterileri engelleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu işlevi yerine getirecek membranların hem yüksek geçirgenliğe, hem de yüksek seçiciliğe sahip olması gerekir. Ayrıca, uzun süreli kullanımda tıkanma, kirlilik ve bakteriyel birikim gibi istenmeyen etkileri minimumda tutmalıdır.

Geleneksel membranlar genellikle selüloz, polietersülfon (PES) ve poliviniliden florür (PVDF) gibi polimerlerden üretilirken; yeni nesil yapay böbrek sistemlerinde çok daha fonksiyonel, akıllı ve çok katmanlı malzemeler kullanılmaktadır. Bu gelişmeler aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:

**A. Karbon Bazlı Aerojeller (C-CAJ):** Karbonlaştırılmış selüloz arojeller, oldukça düşük yoğunluklu, yüksek yüzey alanlı ve gözenekli yapılar sunar. Bu özellikleri sayesinde hem üre adsorpsiyonu için sorbent malzeme olarak, hem de filtrasyon modülünde membran destek katmanı olarak kullanılabilirler. Ayrıca karbon bazlı yapı, antibakteriyel özellik göstererek biyolojik kontaminasyonu azaltır (12).

**B. Nanofiber ve Nanokompozit Membranlar:** Elektrospin yöntemiyle üretilen nanofiber membranlar, gözenek boyutları 100 nanometrenin altında olan, çok hafif ve dayanıklı yapılardır. Bu membranlara gümüş nanoparçacık, grafen oksit, zirkonyum, hidroksiapatit gibi fonksiyonel bileşikler eklenerek; antifouling, antibakteriyel ve iyon seçici özellikler kazandırılmaktadır. Bu kompozitler sayesinde hem toksinler uzaklaştırılır, hem de protein birikimi engellenir (13).

**C. Fotokatalitik Membranlar:** Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) gibi fotokatalitik ajanlar içeren membranlar, UV ışık altında kendini temizleme özelliği gösterir. Bu da uzun vadede membranın tıkanmasını engelleyerek cihaz ömrünü uzatır. Aynı zamanda reaktif oksijen türleri (ROS) oluşturarak bakteri ve biyofilm oluşumunu baskılar (14).

**D. Biyoyoumlu ve Hücre Destekli Membranlar:** Doğal böbrek tübül yapılarını taklit eden biyoyoumlu membranlar, canlı hücrelerle kaplanarak geri emilim (reabsorpsiyon) fonksiyonunu yerine getirebilir. Bu tür membranlar genellikle mikroakışkan sistemlerle birlikte çalışır ve elektrolit, glukoz, su gibi moleküllerin seçici taşınmasını sağlar (15).

Etkin bir yapay böbrek membranı için aşağıdaki kriterlerin optimize edilmesi gerekir (16):

Tablo 1.

Özellik	Açıklama
<b>Gözenek Yapısı</b>	Uygun molekül geçişini sağlamak için boyut, şekil ve dağılım kontrolü gereklidir.
<b>Yüzey Hidrofilikliği</b>	Hidrofilik yüzeyler suyu sever ve protein birikimini azaltır. Bu, daha uzun süreli ve temiz çalışmayı sağlar.
<b>Mekanik Dayanıklılık</b>	Uzun süreli kullanıma dayanabilmesi için elastikiyet ve kopma direnci önemlidir.
<b>Biyoyoumluluk</b>	Kanla sürekli temas eden bu yüzeyler, pıhtı oluşumuna neden olmamalı ve bağışıklık sistemini tetiklememelidir.
<b>Kimyasal Kararlılık</b>	Düşük pH, yüksek iyon yoğunluğu gibi ekstrem koşullarda yapısını koruyabilmelidir.

Malzeme bilimi alanındaki bu gelişmeler, yapay böbrek sistemlerini daha kompakt, akıllı, hijyenik ve uzun ömürlü hale getirmektedir. Gelecekte, 3D yazıcılarla kişiye özel membran üretimi, yapay zeka destekli membran performans takibi ve yenilenebilir biyomalzeme kullanımı gibi yaklaşımlar sayesinde bu sistemlerin klinik uygulamaya entegrasyonu hızlanacaktır.

Özellikle biyoyoumlu yapılarla canlı hücreleri entegre eden hibrit membranlar, yalnızca toksin temizlemeyi değil, hormon dengesini ve su-elektrolit kontrolünü de sağlayarak böbreğin tüm işlevlerini taklit edebilecek seviyeye ulaşacaktır.

## 5. Otomasyon ve Akıllı Kontrol Sistemleri

Yapay böbrek sistemlerinin başarısı yalnızca toksin uzaklaştırma kapasitesiyle değil, aynı zamanda bu işlemlerin güvenli, dinamik, kullanıcıya özel ve kesintisiz biçimde gerçekleştirilmesiyle de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle son yıllarda taşınabilir ve giyilebilir yapay böbrek prototiplerinde otomasyon, geribildirim kontrolü, sensör entegrasyonu ve akıllı yazılım destekli yönetim sistemleri büyük önem kazanmıştır.

Klasik hemodiyaliz sistemlerinde sıvı çekimi (ultrafiltrasyon), genellikle sabit debili pompalarla ayarlanır ve hastadan hastaya farklılık göstermez. Ancak bu uygulama, bazı hastalarda hipotansiyon (tansiyon düşmesi), aşırı sıvı kaybı, kas krampları, intrakraniyal basınç artışı gibi ciddi komplikasyonlara yol açabilir. Bu sorunları önlemek amacıyla geliştirilen akıllı yapay böbrek sistemlerinde, sıvı çekim hızı, toksin temizleme oranı ve elektrolit dengesi sensörlerden gelen gerçek zamanlı verilerle dinamik olarak yönetilir (17).

Akıllı kontrol sistemleri genel olarak aşağıdaki bileşenleri içerir:

### 1. Sensörler:

- Basınç sensörleri:  
Kan veya diyalizat hattındaki basınç değişimlerini ölçer.
- Akış sensörleri:  
Sıvı debisini sürekli izleyerek pompa ayarlarını kontrol eder.
- Sıcaklık sensörleri:  
Vücutla uyumlu sıcaklıkta işlem yapılmasını sağlar.
- İletkenlik sensörleri:  
Elektrolit konsantrasyonlarını izler.

**2. Mikrodenetleyici/Mikroişlemci:** Toplanan verileri işler ve kontrol algoritmaları yardımıyla sistemin davranışını gerçek zamanlı olarak ayarlar. Bu bileşen genellikle Arduino, STM32, Raspberry Pi gibi gömülü sistem platformlarıdır.

### 3. Aktif Kontrol Elemanları:

- Mini pompalar (peristaltik, diyafram vb.):  
Debi ayarı yapar.
- Valfler:  
Akış yönünü ve miktarını kontrol eder.
- LCD/ekran arayüzleri:  
Hasta veya doktorun sisteme müdahale etmesini sağlar.

**4. Geribildirim Algoritmaları:** Bu algoritmalar sayesinde cihaz, hastanın hemodinamik durumuna göre otomatik olarak sıvı çekimini artırabilir, durdurabilir veya sınırlayabilir. Bu kontrol yapısı genellikle, PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrol; Model tabanlı tahmin algoritmaları; Lyapunov kararlılık teorisine dayalı denetleyiciler gibi matematiksel altyapılara dayanır (18).

Yeni nesil akıllı yapay böbrek sistemlerinde, makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak hastanın, geçmiş sıvı çekim profilleri, hipotansiyon riski, gündelik aktiviteleri, elektrolit dengesi değişimleri gibi veriler analiz edilerek kişiselleştirilmiş tedavi protokolleri oluşturulabilir.

Bu sayede, her hastaya özel ultrafiltrasyon oranı profili tanımlanabilir, otomatik alarm sistemleri ile erken uyarılar verilebilir, uzaktan izleme ve telemetri özellikleriyle klinik kontrol sürdürülebilir.

Akıllı sistemlerde hastayı korumaya yönelik aşağıdaki önlemler de entegre edilmektedir:

- Basınç artışıyla akışı durduran valfler
- Hatalı değerlerde alarm sistemleri

- Enerji kesintisine karşı batarya destekli çalışabilme
- Veri kaydı ve hata günlüğü sistemleri

Bu özellikler, cihazın yalnızca teknik olarak değil, klinik güvenlik açısından da yeterli olmasını sağlar (19).

Akıllı kontrol sistemleri, sadece yapay böbrek alanında değil; diğer taşınabilir tıbbi cihazlar (örneğin insülin pompaları, kalp destek cihazları) ile birlikte düşünüldüğünde, kişiye özel sağlık hizmetleri açısından bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Giyilebilir yapay böbrek sistemlerine entegre edilen bu akıllı kontrol mekanizmaları sayesinde, hemodiyaliz artık klinikten bağımsız, daha güvenli ve yaşam tarzına entegre bir tedavi yöntemi hâline gelebilecektir.

## 6. Sonuç

Böbrek yetmezliği, hem bireysel hem de toplumsal ölçekte ciddi sağlık, yaşam kalitesi ve ekonomik sonuçlar doğuran kronik bir hastalık tablosudur. Günümüzde en yaygın tedavi yöntemi olan hemodiyaliz, yaşamı sürdürülebilir kılmakla birlikte hastaları haftada birçok kez sağlık merkezlerine bağımlı hâle getirerek fiziksel, psikolojik ve ekonomik açıdan yıpratıcı sonuçlar doğurmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda geliştirilen yeni nesil yapay böbrek sistemleri, yalnızca teknik açıdan değil; hasta yaşam kalitesi, sağlık sistemlerinin sürdürülebilirliği ve tedaviye erişim yönünden de devrimsel nitelikte yenilikler sunmaktadır.

Bu çalışmada incelenen taşınabilir, giyilebilir ve implante edilebilir yapay böbrek sistemleri, hem mühendislik hem de biyomedikal inovasyonların etkileyici özelliklerini yansıtmaktadır. Özellikle taşınabilir ve giyilebilir sistemlerde küçük hacimli diyalizat kullanımı, sorbent bazlı toksin uzaklaştırma, yeniden kullanılabilir sıvı döngüsü ve kompakt tasarım gibi özellikler, klasik hemodiyalize kıyasla çok daha hasta dostu çözümler ortaya koymaktadır. Bu sistemlerde kullanılan nihhidrin tabanlı polimerler, MoS<sub>2</sub> gibi geniş yüzey alanına sahip nano-yapılar, iyon değiştirici reçineler ve enzim destekli biyokatalizörler, üremik toksinlerin etkin şekilde tutulmasını sağlamaktadır. Ayrıca, fotokatalitik ve antibakteriyel özellikler kazandırılmış nanofiber membranlar, diyaliz sırasında oluşabilecek kirlilik ve enfeksiyon riskini azaltarak sistemin ömrünü ve güvenliğini artırmaktadır.

İBAK sistemleri ise bu alandaki en ileri ve iddialı yaklaşımlardan biri olarak dikkat çekmektedir. Canlı hücre tabakalarıyla desteklenen biyoreaktör modülleri, sadece toksinleri filtrelemekle kalmayıp, su-elektrolit dengesini ve hormon üretimini de biyolojik yollarla düzenleyerek gerçek böbrek işlevini büyük oranda taklit edebilmektedir. Vücutun kendi kan basıncıyla çalışan, dış enerji kaynağına ihtiyaç duymayan bu sistemler, hem teknik hem biyolojik yönden gerçek bir "yapay organ" tanımını karşılamaktadır. Henüz sınırlı sayıda hayvan modelinde test edilmiş olan bu sistemler, yakın gelecekte insan denemelerine geçildiğinde böbrek nakline alternatif olma potansiyeli taşımaktadır.

Tüm bu teknolojilerin başarısı, yalnızca malzeme bilimi veya sistem tasarımı ile değil; aynı zamanda otomasyon, sensör destekli kontrol, yapay zekâ ile kişiselleştirme, gerçek zamanlı izleme ve uzaktan müdahale gibi alanlarla da desteklenmektedir. Geliştirilen yapay böbrek sistemlerinin büyük çoğunluğu, hastanın hemodinamik verilerine göre sıvı çekimini ve toksin uzaklaştırma hızını ayarlayan geribildirim kontrollü algoritmalarla çalışmaktadır. Bu da, tedavinin bireye özel hâle getirilmesini ve komplikasyonların önlenmesini mümkün kılmaktadır.

Ancak tüm bu yeniliklerin yaygın klinik kullanıma geçebilmesi için bazı önemli aşamaların başarıyla tamamlanması gerekmektedir. Bunlar arasında; biyoyuumluluk ve uzun dönem doku tepkisi çalışmaları, seri üretime uygunluk, sterilizasyon ve taşınabilirlik kriterlerinin karşılanması, regülasyon süreçleri ve sağlık sigorta sistemlerinin adaptasyonu yer almaktadır. Aynı zamanda maliyet etkinliği analizlerinin yapılması, düşük ve orta gelirli ülkelerde de uygulanabilir modellerin geliştirilmesi, bu teknolojilerin küresel ölçekte benimsenebilmesi için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, yapay böbrek sistemlerinde ulaşılan bu yeni nesil çözümler; hasta merkezli, mobil, akıllı, biyolojik olarak entegre ve uzun vadeli sürdürülebilir yapısıyla sadece teknik bir cihaz olmanın ötesine geçerek, çağdaş tıbbın gelecekteki yönelimlerini şekillendiren bütüncül tedavi platformları hâline gelmiştir. Her biri ayrı bir mühendislik başarısı ve biyomedikal buluş olan bu sistemler, yalnızca hastaların hayatını

kolaylaştırmakla kalmayacak; aynı zamanda sağlık hizmetlerinin ev merkezli, bireyselleştirilmiş ve teknoloji destekli hâle dönüşümünde temel taşlardan biri olacaktır.

## 7. Kaynakça

1. Himmelfarb, J., Vanholder, R., Mehrotra, R., & Tonelli, M. (2020). *The Current and Future Landscape of Dialysis. Nature Public Health Emergency Collection*
2. Scribner, B. H. (1964). *The ethical problems of using artificial organs to sustain human life. Transactions of the American Society for Artificial Internal Organs*
3. Karakaş, A. & Yıldız, T. (2022). *Are We Ready for the Next Generation Artificial Kidney? Journal of Biomedical Science and Engineering*
4. Zhang, H. et al. (2022). *A Compact Wearable Artificial Kidney with Improved Electrolyte Balance Control. Nature Communications*.
5. Gokmen, M.T. et al. "Designing a Nihhidrin-Based Sorbent for Selective Urea Removal in Wearable Artificial Kidney Systems", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023.
6. Li, Y. et al. "A Urease-Free Wearable Artificial Kidney Based on Expanded-Layer MoS<sub>2</sub> Nanosheets", *Nature Communications*, 2023.
7. Zhang, H. et al. "Ultralight Carbon Aerogels for Efficient Uremic Toxin Removal in Wearable Dialysis Devices", *Advanced Functional Materials*, 2022.
8. Roy, S. et al. "Engineering an Implantable Artificial Kidney", *Nature Biomedical Engineering*, 2022.
9. Fissell, W. H., Roy, S., Davenport, A., & Goodwin, T. J. (2021). Microelectromechanical systems (MEMS) for implantable renal devices. *Artificial Organs*, 45(5), 502–510.
10. Deb, D., Lee, C. H., & Morizane, R. (2023). Tissue-engineered renal tubule constructs for implantable bioartificial kidney devices. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 29(1), 1–15.
11. Cohen, D., Shemesh, N., & Rousoo-Noori, L. (2021). Bioartificial kidney for the treatment of end-stage renal disease: Status and perspectives. *Kidney International Reports*, 6(3), 456–467.
12. Chen, S., Li, J., & Zhang, X. (2022). Porous carbon aerogels for adsorption and regeneration in blood purification. *Carbon*, 190, 256–267.
13. Wang, J. et al. "A Monophasic Hybrid Nanofiber Membrane for High-Performance Dialysis", *Journal of Membrane Science*, 2023.
14. Wang, Y., Zhang, S., Chen, H., & Liu, Y. (2022). *TiO<sub>2</sub>-Modified Electrospun Nanofiber Membranes with Photocatalytic Self-Cleaning Properties for Advanced Hemodialysis Applications. Journal of Membrane Science*, 658, 120728.
15. Tang, C., Zhang, Y., Sun, S., & Zhang, X. (2022). *Development of biofunctional membranes with renal epithelial cells for artificial kidney applications. Acta Biomaterialia*, 144, 314–326.
16. Park, J., Kim, S. Y., & Lee, S. H. (2022). *Engineering design considerations for high-performance hemodialysis membranes: Pore structure, surface chemistry, and mechanical stability. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 110(5), 1034–1046.
17. Chen, M. et al. "Integrated Biosensor-Driven Feedback Systems in Artificial Kidney Prototypes", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023.
18. Jansen, J. et al. "Automated Control in Wearable Dialysis Devices: A Review of Sensor-Driven Approaches", *Biomedical Engineering Reviews*, 2023.
19. Singh, R., Kapoor, D., & Prakash, A. (2023). *Adaptive feedback control strategies for smart wearable dialysis systems: A real-time sensor-integrated approach. Biomedical Signal Processing and Control*, 85, 104851.

### Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Mammadlı, B. & Canım Ateş, S. (2026). "Yeni Nesil Yapay Böbrek Teknolojileri ve Klinik Uygulamalardaki Geleceği", *İYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemli-Akademik*, 1(1):25-28.  
<https://doi.org/10.66125/0.2026.4>

# VESTİBÜLER SİSTEM BOZUKLUKLARININ TSALLIS ENTROPİSİ TABANLI TANISINDA TEK AYAK BASINÇ VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNİN DOĞRULUK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

(The Effect of Evaluating Single Foot Pressure Data on Accuracy in the Diagnosis of Vestibular System Disorders Based on Tsallis Entropy)

Serhat İkizoğlu<sup>1,\*</sup>, Harun Yaşar Köse<sup>2</sup>

<sup>1,\*</sup> Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi (İYYÜ), İstanbul, Türkiye.  
serhat.ikizoglu@yeniuyuzuil.edu.tr  
(Department of Biomedical Engineering, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yuzuil University, Istanbul, Turkey)

<sup>2</sup> Mekatronik Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), İstanbul, Türkiye. kose21@itu.edu.tr  
(Mechatronics Engineering Graduate Program, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey)

Alınma Tarihi: 13 Ağustos 2025 Kabul Tarihi: 24 Kasım 2025 Yayın Tarihi: Şubat 2026  
(Received: 13 August 2025 Accepted: 24 November 2025 Published: February 2026)  
Dijital Nesne Tanımlayıcı (Digital Object Identifier): <https://doi.org/10.66125/0.2026.5>

Araştırma Makalesi  
(Research Paper)

## ÖZET

Vestibüler sistem (VS), bireyin denge ve hareket kontrolünde temel bir rol oynamaktadır. Bu sistemdeki bozukluklar, bireyin yaşam kalitesi ve bağımsızlığını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu çalışmada, yürüyüş sırasında ayak tabanına yerleştirilen kuvvet algılayıcılarından elde edilen işaretlerden üretilen Tsallis entropisi (TE) tabanlı özneliklerin, VS bozukluklarının tespiti açısından tanısal gücü araştırılmıştır. Karmaşık biyolojik sinyallerin analizinde etkili bir araç olan TE, bu çalışmada  $q = 0,82$  parametresiyle uygulanmıştır. Her adım döngüsünden elde edilen trendden arındırılmış kuvvet sinyallerinden sağ ve sol ayak için sekizer, iki ayağın birleşik analizi için on altı öznelik türetilmiştir. Önceki çalışmamızda her iki ayak verilerinin birleşik analizi üzerinden %95 doğrulukla (Eğri altı alan  $AUC = 0,989$ ) tanı koyabilen Gauss çekirdekli destek vektör makinesi (SVM) modeli, bu çalışmada hiper-parametreleri sabit tutularak yalnızca sağ ayak ve yalnızca sol ayak verisi şeklinde ilave iki farklı senaryoda yeniden eğitilmiştir. Otuz hasta ve otuz sağlıklı gönüllüden oluşan örnekleme, 10 katlı çapraz doğrulama ile yapılan değerlendirmede sağ ayak verisiyle %91,67 ( $AUC = 0,902$ ), sol ayak verisi ile ise %93,33 ( $AUC = 0,962$ ) oranında doğruluk elde edilmiştir. Sol ve sağ ayak verilerinin az da olsa farklı doğruluk sunması, VS bozukluklarına eşlik edebilecek unilaterale adaptasyonların tanısal değeri olabileceği şeklinde değerlendirilmektedir. Bu çalışma, kısa süreli yürüyüş verilerinden dahi yüksek doğrulukla tanı yapılabileceğini ortaya koymaktadır. Düşük maliyetli ve taşınabilir sensörlerle uygulanabilirliği sayesinde, TE tabanlı bu yöntemin vestibüler sistem bozukluklarının hızlı ve güvenilir tanısında klinik kullanıma uygun güçlü bir aday olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** vestibüler sistem, yürüyüş analizi, Tsallis entropisi, öznelik çıkarımı

## ABSTRACT

The vestibular system (VS) plays a fundamental role in an individual's balance and movement control. Disorders in this system can significantly impact an individual's quality of life and independence. This study investigated the diagnostic power of Tsallis entropy (TE)-based features generated from signals obtained from force sensors placed on the soles of the feet during walking in detecting VS disorders. TE, an effective tool for analyzing complex biological signals, was applied in this study for a  $q$ -parameter of  $q=0.82$ . Eight features were derived for the right and left feet from the detrended force signals obtained from each step cycle, and sixteen features were derived for joint analysis of both feet. In our previous study, a Gaussian kernel support vector machine (SVM) model, which achieved 95% accuracy ( $AUC=0.989$ ) for joint analysis of both feet, was retrained in this study using only the right foot and only the left foot data, keeping the hyper-parameters constant. In a sample of 30 patients and 30 healthy volunteers, 10-fold cross-validation yielded 91.67% accuracy ( $AUC=0.902$ ) with right foot data and 93.33% ( $AUC=0.962$ ) with left foot data. The slight difference in accuracy between left and right foot data suggests that unilateral adaptations that may accompany VS disorders may have diagnostic value. This study demonstrates that high accuracy can be achieved even from short-term gait data in detecting VS dysfunction. Its applicability with low-cost and portable sensors makes this TE-based method a strong candidate for clinical use in the rapid and reliable diagnosis of vestibular system disorders.

**Keywords:** vestibular system, gait analysis, Tsallis entropy, feature extraction

## 1. GİRİŞ

Vestibüler sistem (VS), merkezi sinir sistemine başın uzamsal konumu, mekânsal yönelimi ve hareketi hakkında sürekli bilgi sağlayarak postür denge ve stabilitenin korunmasında kilit rol oynar [1]. Ancak, vestibüler bozuklukların tanısı klinik uygulamalarda hâlâ sınırlı yer bulmakta ve bu

alan araştırma gereksinimini sürdürmektedir [1].

Mevcut klinik standartlardan biri olan bilgisayarlı dinamik postürografi (CDP), VS'nin çeşitli bileşenlerini nicel olarak değerlendirebilse de, yüksek maliyeti, uzun uygulama süresi ve geniş fiziksel alan gereksinimi nedeniyle rutin klinik kullanımı kısıtlıdır [2]. Bu durum daha taşınabilir,

düşük maliyetli ve hızlı uygulanabilir değerlendirme yöntemlerine olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Son yıllarda, yürüyüş verilerinden (gait data) öznelik çıkarımı yapılarak makine öğrenmesi (ML) yöntemleriyle sınıflandırma gerçekleştirilmesi, CDP'ye pratik ve erişilebilir bir alternatif olarak öne çıkmıştır [3, 4]. Yürüyüş analizi yalnızca vestibüler bozukluklarda değil, aynı zamanda Parkinson, Huntington ve ALS gibi nörodejeneratif hastalıkların objektif değerlendirilmesinde de etkin bir araç olarak kullanılmaktadır [5–7].

Karmaşık biyolojik sistemlerde gözlenen doğrusal olmayan ve uzun menzilli bağımlılıkları yakalama kapasitesiyle öne çıkan Tsallis entropisi (TE), yürüyüş gibi doğal olarak gözlenen zaman serilerinden anlamlı bilgiler çıkarmak için uygun bir yaklaşım sunmaktadır [8–10]. TE, EEG, kalp atım aralığı ve benzeri fizyolojik sinyallere uygulandığında, çeşitli patolojik durumların göstergesi olarak başarılı sonuçlar verdiği çalışmalarla desteklenmiştir [11].

Önceki bir çalışmamızda, taban içi kuvvet algılayıcılarından elde edilen verilerin TE tabanlı analizi sayesinde VS bozukluğu olan bireyler %88,3 doğrulukla sınıflandırılmıştır [12]. Yöntemin daha geniş bir veri kümesine uygulanmasıyla bir sonraki çalışmada doğruluk oranı %95'e yükselmiştir [13].

Dikkat çeken bir husus, mevcut literatürde sağ ve sol ayakta elde edilen verilerin çoğunlukla birleşik olarak analiz edilmiştir; vestibüler sistemin olası asimetrik yapısı çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Oysa VS'nin unilateral lezyonlar ya da asimetrik dejenerasyonlar sergileyebileceği klinik olarak bilinmektedir. Bu nedenle tek ayak-altı kuvvet verisi bazı analizlerin tanısız sürece ek katkı sunabileceği düşünülmektedir.

Bu bağlamda yürütülen mevcut çalışmada, sağ ve sol ayakta ayrı ayrı elde edilen TE tabanlı öznelik setlerinin tam gücü karşılaştırmalı olarak analiz edilmekte, ayrıca bu iki veri kümesinin birleştirilmesiyle oluşturulan referans modelle olan ilişkisi değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, vestibüler fonksiyon bozukluklarının erken tanısında ayak altı kuvvet bazlı analizlerin potansiyel katkısını incelemeyi ve kişiye özgü rehabilitasyon stratejilerinin geliştirilmesine zemin hazırlamayı amaçlamaktadır. Çalışma, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Odyoloji Kliniği ile sürdürülen geniş kapsamlı bir projenin [14–16] devamı olup, literatüre klinikte uygulanabilir nitelikte yeni bir değerlendirme yöntemi kazandırmayı hedeflemektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Entropi, genellikle dinamik sistemlerdeki düzensizlik düzeyini nicel olarak ifade etmek için kullanılan temel bir ölçüttür. Klasik Boltzmann-Gibbs istatistiksel mekanikine dayanan Shannon entropisi (SE), kısa vadeli bağıntılarla tanımlanan sistemlerin analizinde etkili olsa da, uzun menzilli etkileşimlerin baskın olduğu yapılar karşısında yetersiz kalmaktadır [8]. Bu tür sistemlerin incelenmesinde alternatif bir yaklaşım olarak önerilen Tsallis entropisi (TE), zaman serisi verilerinde gömülü olan karmaşık ve doğrusal olmayan yapıları ortaya çıkarmada güçlü bir araç sunmaktadır [9].

Tsallis entropisi yalnızca teorik fizikte değil, biyomedikal araştırmalar başta olmak üzere çeşitli disiplinlerde artan bir ilgiyle kullanılmaktadır. Özellikle biyolojik sistemlerin dinamiklerini anlamaya yönelik çalışmalarda TE'nin temel avantajı, bu sistemlerde yaygın olarak gözlenen doğrusal olmayan yapıların ve uzun menzilli bağımlılıkların etkili biçimde yakalanabilmesidir [10].

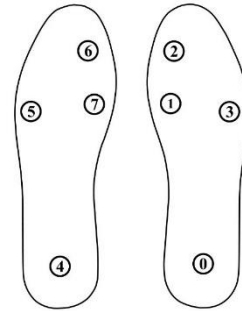
$$TE = \frac{1}{q-1} \left( 1 - \sum_{i=1}^N p_i^q \right) \quad (1)$$

Tsallis entropisi ifadesinde (denklem (1))  $p_i$   $i$ 'inci olayın olasılık değerini,  $q$  ise sistemin eklenti-olmayan (non-extensive) yapısını denetleyen parametreyi temsil eder.  $q > 1$  durumunda düşük olasılıklı olaylar,  $q < 1$  durumunda ise yüksek olasılıklı olaylar vurgulanır [16];  $q = 1$  için, Tsallis entropisi Shannon entropisine indirgenir.  $q$  değeri belirli kriterlere göre değil, fakat analiz edilen veri kümesinin özelliklerine göre belirlenmektedir [17].  $q$ 'nın değerini ayarlayarak, analiz edilen veri setinde bulunan belirli özellikler yakalanabilir.

## 2.1 Verilerin Toplanması

Bu çalışmada, araştırma ekibinin daha önce yürüttüğü bir projede elde edilen mevcut veri seti kullanılmıştır [14]. Ayak tabanında yer alan dört ana ağırlık dağılım noktası, önceki çalışmaları ve uzman odyologların görüşleri doğrultusunda belirlenmiş, bu noktalara kuvvet algılayıcıları yerleştirilmiştir [18, 19].

Yürüyüş sırasındaki plantar basınç ölçümleri için FSR402 (Interlink) tipi kuvvet algılayıcıları tercih edilmiştir [20]. FSR402–short tail modelinin klinik uygulamalara uygunluğu, saha kullanımında yaygın kabul görmesi, ince form faktörü ( $\varphi_{\text{pad}} = 18,3$  mm; kalınlık = 0,46 mm) ve  $< 3$   $\mu\text{s}$  yükselme süresi gibi teknik avantajlarına dayanmaktadır [21]. Tabanlık üzerine yerleştirilen sekiz sensör, S0–S7 şeklinde numaralandırılmış ve Şekil 1'de gösterildiği şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 1: Alglayıcıların S0'dan S7'ye numaralandırılması [12].

Veri toplama işlemi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Odyoloji Kliniği'nde, Helsinki Bildirgesi'ne uygun etik standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde Üniversite Etik Kurulu'nun onayı alınmış ve tüm katılımcılardan bilgilendirilmiş onam formları temin edilmiştir. Katılımcıların doğal yürüyüş paternini korumak amacıyla ölçümler hafta sonları yapılmış, 30 VS hastası ve 30 sağlıklı olmak üzere toplam 60 gönüllü birey, 12 metrelik bir parkurda yürütülerek veri toplanmıştır.

Katılımcı konforunu artırmak ve veri güvenilirliğini sağlamak amacıyla beş farklı ayak numarası için (EU 36–44) tabanlık prototipleri üretilmiş ve her bireye yürüyüş öncesinde uygun boyutta tabanlık giydirilmiştir.

## 2.2 Verilerin İşlenmesi

Sonuçların daha sağlıklı değerlendirilebilmesi adına, öznelik çıkarımından önce ham veriler çok aşamalı bir ön işleme sürecinden geçirilmiştir. Bu süreç altı temel adımdan oluşmaktadır:

### 2.2.1. Analize Uygun Zaman Aralıklarının Belirlenmesi

İlk olarak, yürüyüşün gerçekleşmediği ya da analiz açısından anlamlı bilgi içermeyen kısımlar veri setlerinden çıkarılmıştır. Ardından, her bireyin sekiz farklı algılayıcısından elde edilen veriler, bireyler arası karşılaştırmaya olanak tanıyacak şekilde 0 ile 1 aralığında normalize edilmiştir. Bu adım, örüntü farklılıklarının gözlemlenebilmesini kolaylaştırmak amacıyla uygulanmıştır.

### 2.2.2. Adım Verilerinin Tespiti

Her iki ayağa ait sensör verileri gruplanarak, ayağın yere temas etmeye başladığı ve teması sonlandırdığı zaman noktaları belirlenmiştir. Bu bilgilerden yola çıkarak adım süreleri ve temas zamanları gibi yürüyüş dinamiklerine ilişkin temel özellikler elde edilmiştir.

### 2.2.3. Zaman Çözünürlüğünün Artırılması

Önceki adımda belirlenen, ayağın yer ile temas etmediği kısımlar veri setinden çıkarılmıştır. Kalan sinyallerin zamansal çözünürlüğü artırmak amacıyla, veriler 20 kat daha sık örneklendirilmiştir. Böylece histogramlara düşen örnek sayısı artırılmış, bu da olasılık dağılımlarının istatistiksel açıdan daha anlamlı şekilde oluşturulmasını sağlamıştır.

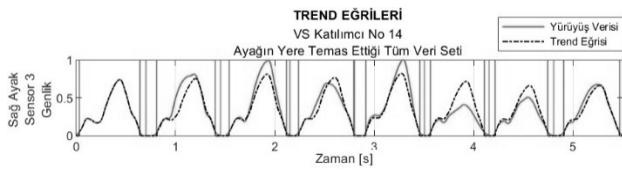
Bu aşamada sinyalin yapısını ve taşıdığı bilginin doğruluğunu korumak kritik önemdedir. Bu nedenle doğrusal interpolasyon yerine, türev sürekliliğini sağlayan kübik Hermite interpolasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, gerek sinyalin lokal değişimlerine daha hassas

yanıt vermekte gerekse zarf bütünlüğünü koruyarak analiz için daha güvenilir bir temel sunmaktadır [22].

Son olarak, ileride hesaplanacak olan trendden (eğilimden) arındırılmış sinyallerin ve entropi değerlerinin bireyler arasında kıyaslanabilir olması adına, her birey için sekiz algılayıcıya ait sinyaller ayrı ayrı yeniden normalize edilmiş ve 0–1 aralığına ölçeklenmiştir.

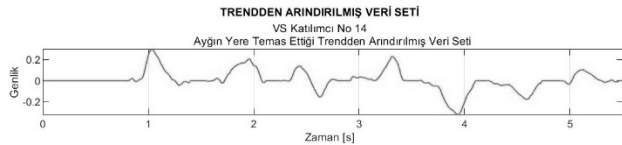
#### 2.2.4. Verilerin Trend Bileşeninden Arındırılması

Her sensörün adım döngüsü içerisinde aktif olarak veri sağladığı zaman aralıkları belirlenmiştir. Bu aralıklar temel alınarak, bireye özgü trend bileşenleri, ağırlıklı ortalamalara dayalı bir algoritma yardımıyla hesaplanmıştır. Elde edilen bu trend eğrisi, adım süresince sensör tarafından kaydedilen anlık değerlerle karşılaştırılmıştır. Böylece, her zaman noktasında ölçülen değerden aynı ana karşılık gelen trend değeri çıkarılmış ve sinyalin düşük frekanslı bileşeni elimine edilmiştir. Bu işlem sonucunda, yürüyüşün anlık özelliklerini yansıtan ve genel eğilimden arındırılmış yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu süreçle ilişkin örnek bir görselleştirme, Şekil 2 ve Şekil 3'te, örnek bir katılımcıya ait S3 sensörü üzerinden sunulmaktadır.



Şekil 2: Trend eğrilerinin oluşturulması [12].

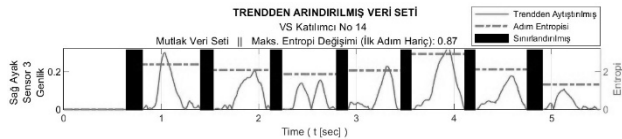
Şekil 2'de kırmızı dikey çizgiler, ayağın yere temas etmeye başladığı ve bu temasın sonlandığı zaman noktalarını göstermektedir. Mavi dikey çizgiler ise, ilgili sensörün aktif veri ürettiği zaman aralığının başlangıcı ve bitişini temsil etmektedir.



Şekil 3: Trendden arındırılmış veri [12].

#### 2.2.5. Tsallis Entropi Hesaplamaları

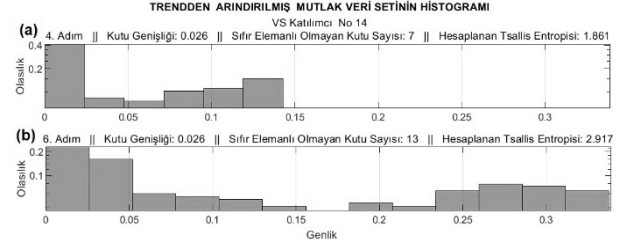
Trend bileşeninden arındırılan sinyaller, bireyin yürüme davranışı etrafında oluşan lokal dalgalanmaları temsil etmektedir. Bu dalgalanmalar hem pozitif hem de negatif yönde gerçekleşebilmekte olup, analizde esas alınan öznelilik bu sınımların büyüklüğüdür. Dolayısıyla, işaretlerinden bağımsız olarak aynı genlikteki sapmaları aynı sınıfta değerlendirmek amacıyla, sinyallerin mutlak değerleri kullanılmıştır. Böylece, trend etrafındaki toplam sapma miktarı tekil bir dağılım olarak ifade edilebilmiştir. Bu yaklaşım Şekil 4'te görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 4: Trendden arındırılmış verilerin mutlak değer dönüşümü ve sensörün veri üretmediği bölümlerin hariç tutulması (siyah çubuklar ile gösterilmiştir) [12].

Histogram tabanlı dağılım elde edilirken, veri çözünürlüğünü yeterli düzeyde tutmak adına en fazla 25 kutu (bin) kullanılmıştır. Her bir histogram kutusunun genişliği, mutlak değer dönüşümünden elde edilen verinin maksimum değeri esas alınarak belirlenmiş ve toplam aralık kutu sayısına bölünerek hesaplanmıştır. Bu işlemin çıktıları, Şekil 5(a)'da örnek bir hastaya ait dördüncü adım için, Şekil 5(b)'de ise aynı bireyin altıncı adımı için sunulmuştur.

Entropi hesaplamalarında kullanılan Tsallis entropi parametresi  $q$  farklı değer aralıkları üzerinden sistematik olarak değerlendirilmiş ve sınıflandırma başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan parametrik analiz sonucunda  $q = 0,82$  değeri, öznelilik çıkarımı açısından en yüksek ayırt edici gücü sağlayan konfigürasyon olarak önceki çalışmamızda belirlenmiştir [13].



Şekil 5: (a) Örnek hasta bireyin 4. adımına ilişkin mutlak veri histogramı, (b) Aynı bireyin 6. adımına ilişkin dağılım [12].

#### 2.2.6. Öznelilik Çıkarımı

Bu aşamada amaç her adıma karşılık gelen Tsallis entropi değerlerinden yürüyüşün kalitesi hakkında anlamlı öznelilikler türetmektir. Trendden arındırılmış sinyaller dikkate alındığında sağlıklı bireylerin yürüyüşlerine ait adımların entropi değerlerinin genellikle sıfıra yakın, yani düşük dalgalanmalı olması beklenir. Buna karşın patolojik yürüyüşlerde bu değerler daha yüksek sapmalar gösterebilir. Bu varsayımdan yola çıkılarak her adımın entropi değerinin sıfıra olan uzaklığı temelinde bir öznelilik tanımlanmıştır.

Her birey için adım bazında hesaplanan Tsallis entropi değerleri (2) ifadesi ile tanımlanabilir.

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}, \quad e_j \in \mathbb{R}; \quad j \in \mathbb{Z}^+ \quad (2)$$

Burada  $e_j$ ,  $j$ 'inci adıma ait Tsallis entropi değerini,  $m$  ise toplam adım sayısını göstermektedir. Sapma miktarını daha anlamlı şekilde ölçülebilmek adına, bu küme negatif elemanları da içerecek şekilde genişletilmiş ve simetrik bir dağılım elde edilmiştir:

$$E' = \{e_1, e_2, \dots, e_m, -e_1, -e_2, \dots, -e_m\} = \{t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1}, t_{n+2}, \dots, t_{2n}\} \quad (3)$$

Bu genişletilmiş küme üzerinden hesaplanan standart sapma, her adıma ait entropi değerlerinin sıfıra olan ortalama uzaklığını yansıtan bir öznelilik olarak değerlendirilmiştir. Standart sapma (4) eşitliği ile formüle edilmiştir:

$$\sigma(E') = \sqrt{\frac{1}{2m} * \sum_{i=1}^{2m} (t_i - \mu)^2} \quad (4)$$

Burada  $\mu$ ,  $E'$  kümesinin ortalama değerini göstermektedir.

Bu öznelilik çıkarım süreci sonucunda elde edilen değerler, farklı sınıflandırma algoritmaları ile değerlendirilmiştir. MATLAB ortamında yer alan Classification Learner Tool kullanılarak çeşitli denemeler gerçekleştirilmiş; Destek Vektör Makineleri (SVM), Yapay Sinir Ağları (NN) ve Karar Ağaçları (DT) gibi yöntemlerin, sınıflar arasında en yüksek ayırt edici güce sahip modelleri sunduğu gözlemlenmiştir.

### 3. SONUÇLAR

Önceki çalışmamızda, Gauss çekirdek fonksiyonuna sahip destek vektör makineleri (SVM) kullanılarak sağ ve sol ayak verilerinin birlikte değerlendirildiği birleşik veri kümesi üzerinde %95,00 doğruluk oranına ulaşılmıştır [13]. Bu çalışmada, aynı hiper-parametreler korunarak model üç farklı senaryo üzerinde yeniden eğitilmiş ve değerlendirilmiştir:

- Yalnızca sağ ayak sensör verileri (8 öznelilik)
- Yalnızca sol ayak sensör verileri (8 öznelilik)

- Birleşik veri seti (16 öznitelik) – referans model

Tüm modeller, 10 katlı çapraz doğrulama (10-fold cross-validation) yöntemiyle eğitilmiş ve değerlendirmeye alınmıştır. Elde edilen sınıflandırma performans metrikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1:** Gauss çekirdekli SVM modellerine ait performans ölçütleri.

Veri Kümesi	Doğruluk (%)	AUC	Duyarlılık (%)	Seçicilik (%)
Sağ Ayak	91,67	0,902	86,67	96,67
Sol Ayak	93,33	0,962	90,00	96,67
Birleşik (Sağ+Sol)	95,00	0,989	96,67	93,33

Elde edilen sonuçlar, yalnızca tek ayak verileriyle dahi yüksek sınıflandırma başarımı (%92–93 oranında doğruluk) sağlanabildiğini göstermektedir. Sağ ve sol ayak verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan referans model, önceki çalışmada raporlanan %95,00 doğruluk düzeyini bu çalışmada da doğrulamıştır.

#### 4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, [13] referans numaralı yayımlarımızda %95 doğrulukla en başarılı model olarak belirlenen Gauss çekirdekli destek vektör makineleri (SVM) algoritması, hiper-parametre ayarları korunarak yalnızca sağ ayak, yalnızca sol ayak ve birleşik veri kümeleri üzerinde yeniden eğitilmiştir. Bu yaklaşım, modelin farklı alt gruplar üzerinde de yüksek doğruluk düzeyini koruyarak çalışabilmesi sayesinde yöntemin bir anlamda genelleştirilebilir olduğunu değerlendirme imkânı sunmuştur. Tek ayak kuvvet verisi temelli öznitelik kümeleriyle dahi %90–93 seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Böylece, yöntemin duyarlılığı ve kararlılığı önceki çalışmalarımızdaki bulgularla karşılaştırılabilir olarak pekiştirilmiştir.

Sol ayak verilerinin, sağ ayağa kıyasla yaklaşık %1,7 daha yüksek doğruluk sunduğu belirlenmiştir; bu durumun vestibüler sistem bozukluklarında sıkça rastlanan unilateral adaptasyon mekanizmaları ya da yük dağılımı farklılıkları nedeniyle gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir. Bu tür asimetrik, geleneksel analizlerde genellikle her iki ayak verisinin tek blok hâlinde değerlendirilmesi nedeniyle gözden kaçabilmektedir.

Kapsamlı denge analiz platformlarının (CDP) yüksek maliyetli ve zaman alıcı yapısı göz önünde bulundurulduğunda, yalnızca kısa süreli yürüyüş kayıtlarıyla %95 doğruluk seviyelerine ulaşabilen bu yöntemin, taşınabilir ve düşük maliyetli bir değerlendirme aracı olarak klinik uygulamalara entegre edilmesi gerçekçi görünmektedir. Tsallis entropisine dayalı öznitelikler, yürüyüş sinyallerindeki doğrusal olmayan karmaşık yapıları ortaya koyma kapasitesi sayesinde özellikle erken evre vestibüler disfonksiyonların belirlenmesinde avantaj sağlayabilir. Bu bağlamda, yöntem yalnızca tanı amaçlı değil, aynı zamanda kişiye özgü rehabilitasyon stratejilerinin geliştirilmesinde de anlamlı katkılar sunabilir.

Hiperparametre ayarlarının farklı veri alt kümelerinde değiştirilmeksizin başarılı sonuçlar vermesi yöntemin gücü açısından dikkat çekicidir. Ayrıca sağ ve sol ayak için sekizer öznitelikle oluşturulan düşük boyutlu modeller, birleşik 16 öznitelikli modele kıyasla yalnızca %2–3 oranında doğruluk kaybı göstererek, daha az veriyle dahi yüksek performansın korunabileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle donanımlı taşınabilir sistemlerde veri işleme maliyetini düşürme açısından önemli bir avantajdır.

Bu çalışmanın geliştirilmesi beklenen bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Bu çerçevede özellikle denek sayısının yeterliliği sorgulanmaktadır. Katılımcı örneklem büyüklüğünün artırılması ve vestibüler dışı denge bozuklukları (örneğin serebellar ataksi) gibi farklı klinik tabloların da çalışmaya dâhil edilmesi, yöntemin ayırt edicilik düzeyini daha kapsamlı değerlendirmeye olanak tanyacaktır. Verilerin günlük yaşam koşullarında toplanması, laboratuvar ortamına bağlı kısıtlamaları azaltarak, yürüyüş davranışının doğal varyasyonlarını daha iyi yansıtabilir. Rehabilitasyon süreçlerinin izlenmesi amacıyla zamana yayılmış (boylamsal) veri toplama protokolleri planlanmalı ve yöntemin duyarlılığı zaman içindeki değişimlere karşı test edilmelidir. Ayrıca, entropi tabanlı özniteliklerin ivmeölçer veya IMU sensörleri gibi diğer hareket verileriyle birleştirilmesi, sınıflandırma performansının daha da artırılmasına katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, trend bileşeninden arındırılmış sinyaller üzerinden hesaplanan Tsallis entropisine dayalı analiz, vestibüler sistem bozukluklarının hızlı, taşınabilir ve düşük maliyetli bir yaklaşımla değerlendirilmesinde umut vadeden bir yöntem olarak düşünülebilir. Gelecek çalışmalarda çok-modlu veri kaynaklarının entegre edilmesi ve geniş katılımcı profilleriyle yöntemin klinik geçerliliğinin daha da güçlendirilmesi hedeflenmektedir.

#### 5. KAYNAKÇA

- [1] Khan, Sarah ve Chang, Richard. "Anatomy of the vestibular system: A review". *NeuroRehabilitation*. Cilt: 32, s:437-443, 2013.
- [2] Vanicek N, King SA, Gohil R, Chetter IC, Coughlin PA. "Computerized dynamic posturography for postural control assessment in patients with intermittent claudication." *J Vis Exp*. 2013.
- [3] Ahmadi, S., Vivar, G., Navab, N., et Al. Modern machine-learning Can Support Diagnostic Differentiation Of Central and Peripheral Acute vestibular disorders. *Journal of Neurology*, S1(267), 143-152, 2020.
- [4] Korda, A., Wimmer, W., Wyss, et Al. Artificial Intelligence For Early Stroke Diagnosis In Acute Vestibular Syndrome. *Frontiers in Neurology*, 13, 2022.
- [5] Giladi, N.; Horak, F.B.; Hausdorff, J.M. Classification of gait disturbances: Distinguishing between continuous and episodic changes. *Mov. Disord.* 2013, 28, 1469–1473.
- [6] Bovonsunthonchai, S.; Vachalathiti, R.; Hiengkaew, V.; Bryant, M.S.; Richards, J.; Senanarong, V. Quantitative gait analysis in mild cognitive impairment, dementia, and cognitively intact individuals: A cross-sectional case-control study. *BMC Geriatr.* 2022, 22, 767.
- [7] Guo, Y.; Yang, J.; Liu, Y.; Chen, X.; Yang, G.-Z. Detection and assessment of Parkinson's disease based on gait analysis. *Front. Aging Neurosci.* 2022, 14, 916971.
- [8] Xiong W, Faes L, Ivanov PC. "Entropy measures, entropy estimators, and their performance in quantifying complex dynamics: Effects of artifacts, nonstationarity, and long-range correlations." *Phys Rev E*. Cilt 95, No: 6-1, 2017.
- [9] C.Ji, Pengjian S. "Multiscale Tsallis permutation entropy analysis for complex physiological time series". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Cilt:529, s: 10-20, 2019.
- [10] S. Tong, A. Bezerianos, J. Paul, Y. Zhu, N. Thakor. "Nonextensive entropy measure of EEG following brain injury from cardiac arrest." *Statistical Mechanics and its Applications*. Cilt: 305, No: 3-4, s:619-628, 2002.
- [11] Zhang, D.; Jia, X.; Ding, H.; Ye, D.; Thakor, N.V. Application of Tsallis entropy to EEG: Quantifying the presence of burst suppression after asphyxial cardiac arrest in rats. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2010, 57, 867–874.
- [12] Köse, H. Y., & İkizoğlu, S. (2023). Development of an entropy-based method for determining the balance problem in individuals. In H. B. Bingöl (Ed.), *Proceedings of the 8th International Battalgazi Scientific Studies Congress* (pp. 57–58). IKSAD Publishing House
- [13] Köse HY, İkizoğlu S. Nonadditive Entropy Application to Detrended Force Sensor Data to Indicate Balance Disorder of Patients with Vestibular System Dysfunction. *Entropy (Basel)*. 2023 Sep 27;25(10):1385. doi: 10.3390/e25101385. PMID: 37895507; PMCID: PMC10660935.
- [14] İkizoğlu, S., & Heydarov, S. Accuracy comparison of dimensionality reduction techniques to determine significant features from IMU sensor-based data to diagnose vestibular system disorders. *Biomedical Signal Processing and Control*, 61, 2020.
- [15] Günaydin, B., İkizoğlu, S. "Multifractal detrended fluctuation analysis of insole pressure sensor data to diagnose vestibular system disorders." *Biomed. Eng. Lett.*, 2023.
- [16] Sigalotti LDG, Ramirez-Rojas A, Vargas CA. "Tsallis q-Statistics in Seismology". *Entropy*. 2023; Cilt: 25, No:3, s:408, 2023.
- [17] Wilk G, Włodarczyk Z. Some Non-Obvious Consequences of Non-Extensiveness of Entropy. *Entropy*. Cilt: 25, No: 3, s: 474, 2023.
- [18] Healy, A., Burgess-Walker, P., Naemi, R., & Chockalingam, N. "Repeatability of WalkinSense in shoe pressure measurement system: A preliminary study." *The Foot*, Cilt: 22, No: 1, s:35-39, 2012.
- [19] Saito M, Nakajima K., Takano C., Ohta Y., Sugimoto C., "An in-shoe device to measure plantar pressure during daily human activity." *Medical Engineering & Physics*, Cilt: 33, No: 5, s:638-645, 2011.
- [20] FSR Technical Paper. Available online: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/3899023/Interlinkelectronics%20November2017/Docs/Datasheet\\_FSR.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/3899023/Interlinkelectronics%20November2017/Docs/Datasheet_FSR.pdf)
- [21] Tahir, A.M.; Chowdhury, M.E.; Khandakar, A.; Al-Hamouz, S.; Abdalla, M.; Awadallah, S.; Reaz, M.B.I.; Al-Emadi, N. A Systematic Approach to the Design and Characterization of a Smart Insole for Detecting Vertical Ground Reaction Force (vGRF) in Gait Analysis. *Sensors* 2020, 20, 957.
- [22] Burden, Richard L., ve J. Douglas Faires. "Numerical Analysis.", MA: Cengage Learning, s:144-172, 2019.
- [21] Tahir, A.M.; Chowdhury, M.E.; Khandakar, A.; Al-Hamouz, S.; Abdalla, M.; Awadallah, S.; Reaz, M.B.I.; Al-Emadi, N. A Systematic Approach to the Design and Characterization of a Smart Insole for Detecting Vertical Ground Reaction Force (vGRF) in Gait Analysis. *Sensors* 2020, 20, 957.
- [22] Burden, Richard L., ve J. Douglas Faires. "Numerical Analysis.", MA: Cengage Learning, s:144-172, 2019.

#### Bu makaleye atıfta bulunmak için:

İkizoğlu, S. & Köse, H.Y. (2026). "Vestibüler Sistem Bozukluklarının Tsallis Entropisi Tabanlı Tanısında Tek Ayak Basınç Verilerinin Değerlendirilmesinin Doğruluk Üzerindeki Etkisi", *IYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemli-Akademik*, 1(1):29-32. <https://doi.org/10.66125/0.2026.5>

# DAHİLİ MODEL KONTROL TABANLI VE ORANSAL İNTEGRAL TÜREVSEL TABANLI DENETLEYİCİ TASARIMLARININ YAPAY PANKREAS KONTROLÜ İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI

## (Comparison of Internal Model Control (IMC) Based and Proportional Integral Derivative (PID) Based Controller Designs for Artificial Pancreas Control)

Ravan Şenen Al Ekhwan<sup>1</sup>, Ercüment Özer<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Biyomedikal Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. rawanshanan.96@gmail.com  
(Biomedical Engineering, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Istanbul Yeni Yuzuil University, Istanbul, Turkey)

<sup>2,\*</sup> Dr. Öğr. Üy., Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, İstanbul, Türkiye. ercument.oz@yeniuyuzuil.edu.tr, drozer@protonmail.com  
(Asst. Prof. Dr., Biomedical Engineering Department, College of Engineering and Architecture, Istanbul Yeni Yuzuil University, Istanbul, Turkey)

Alınma Tarihi: 11 Kasım 2025 Kabul Tarihi: 24 Kasım 2025 Yayın Tarihi: Şubat 2026  
(Received: 11 November 2025 Accepted: 24 November 2025 Published: February 2026)  
Dijital Nesne Tanımlayıcı (Digital Object Identifier): <https://doi.org/10.66125/0.2026.6>

Araştırma Makalesi  
(Research Paper)

### ÖZET

Diyabetes Mellitus (Tıp I) hastalarında kan glikoz seviyelerinin tam olarak kontrol edilememesi ciddi sağlık riskleri doğurur ve bireysel farklar, hipoglisemi riski, birbirine ters yönde tepki üreten insülin ve glukagon hormonlarının yarılanma süreleri, ölü zamanlar ve taşınabilir çift hormonlu yapay pankreas proseslerinde kullanılan deri altı sensörlerden ve infüzyonundan kaynaklanan yüksek gecikmeler bu kontrolü zorlaştırır. Bu çalışmada, bireysel farkları ve proses-model uyumsuzluklarını elimine edebilme potansiyeline sahip gelişmiş Dahili Model Denetleyicisi ile klasik tipteki Oransal İntegral Türevsel denetleyici, çift hormonlu taşınabilir yapay pankreas kontrolü açısından karşılaştırılmıştır. IMC, bir sürecin modelinin tersi kullanılarak tasarlanan bir model öngörülü denetçi olup, model ile süreç çıktıları arasındaki farkları da hata terimine ekleyebilmesi nedeniyle, özellikle süreç-model uyumsuzluklarının bulunduğu durumlar için etkili bir kontrol yöntemi olarak kabul edilir ve bu uyumsuzluklar denetçinin tek ayar parametresi olan filtre sabiti ile yönetilir. PID tabanlı klasik denetleyicilerde ise çıktının kontrolü, girdi değerinin hataya, hatanın integraline ve hatanın türevine oranlı bir şekilde manipüle edilmesiyle yapılmaktadır. Bu çalışmada, IMC denetleyicisi tasarımı için, endokrin pankreasın doğal proses kinetiği ile ticari olarak kullanılan analog insülin ve glukagon ürünlerin kinetik parametreleri esas alınmıştır. Testler C programlama dili ve dinamik simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Proses-model uyumsuzlukları, literatürde yer alan proses değerleri ve analog hormon kinetik parametre değerleri dahilinde test edilmiştir. Simülasyonlarda, hem IMC'nin, hem de PID'nin bozucu etki kontrolünü hormonların yarılanma sürelerinden kaynaklanan yüksek uyumsuzluklara ve sensör gecikmesi ve ölü zamanlar nedeniyle kontrol aralıklarının geniş tutulması zorunluluğuna rağmen başarıyla gerçekleştirebildiği gözlemlenmiştir fakat göreceli olarak set değerine daha kısa zamanda ulaşması nedeniyle IMC'nin PID'ye göre daha yüksek bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Diyabetes Mellitus, IMC, PID

### ABSTRACT

Inability to fully control blood glucose levels in patients with Type 1 Diabetes Mellitus poses serious health risks. Individual differences, the risk of hypoglycemia, the opposing half-lives of insulin and glucagon, dead times, and the high delays associated with the subcutaneous sensors and infusion used in portable dual-hormone artificial pancreas processes make this control challenging. In this study, the advanced Internal Model Controller, which has the potential to eliminate individual differences and process-model mismatches, was compared with the conventional Proportional Integral Derivative Controller for dual-hormone portable artificial pancreas control. IMC is a model-predictive controller, designed using the inverse of a process model. Because it incorporates differences between the model and process outputs into the error term, it is considered a particularly effective control method for situations where process-model mismatches occur. These mismatches are managed by the controller's single tuning parameter; the filter constant. In conventional PID-based controllers, output control is achieved by manipulating the input value proportionally to the error; the integral of the error; and the derivative of the error. In this study, the IMC controller design was based on the natural process kinetics of the endocrine pancreas and the kinetic parameters of commercially available analog insulin and glucagon products. Tests were conducted using the C programming language and dynamic simulations. Process-model mismatches were tested within the literature for process values and analog hormone kinetic parameter values. In the simulations, it was observed that both IMC and PID successfully controlled the disturbances despite high mismatches due to the hormones' half-lives and the necessity of wide control ranges due to sensor delay and dead times. However, IMC exhibited higher performance than PID due to its relatively shorter time to reach the setpoint.

**Keywords:** Diabetes Mellitus, IMC, PID

## 1. GİRİŞ

Tıbbi bir hayati risk ve aciliyet durumu olan “hipoglisemi” bir aşırı kan şekeri düşüklüğü durumu olup genellikle Diyabetes Mellitus tedavileri sırasında ve bu tedaviler nedeniyle yaşanmaktadır [1, 2, 3]. Yapay pank-

reas kullanan TİP I Diyabetes Mellitus hastalarında şeker hipoglisemi seviyelerine asla düşmemeli veya düştüğünde hızlı bir şekilde yükseltilebilmelidir [4]. Çalışma kinetikleri açısından piyasada çok farklı özellikler ve davranışlar gösteren insülinler bulunmaktadır ve bireysel farklardan kaynaklanan süreç-model uyumsuzluğuna bağlı nedenler ve

kullanılan farklı insülinlerin kendine özgü yarılanma süreleri, belli limitler dahilinde gerçekleşmek zorunda olan kontrolü zorlaştırmaktadır [10].

IMC, süreç-model uyumsuzluklarından kaynaklanan sorunların yönetilmesindeki başarısı ile tanınan bir kontrol stratejisidir [5, 6]. IMC, süreç ile model arasındaki farkları da hata terimine ekleyebilmesi nedeniyle, model süreçten farklı dahi olsa kontrol görevlerini başarılı şekilde gerçekleştirebilmektedir [7]. IMC tasarımı stabil prosesler için "kusursuz" olarak tabir edilen denetçiyi verir [8, 9]. Süreç-model uyumsuzluğunun hiç olmadığı stabil proseslerde ise kelimenin tam anlamıyla "kusursuz" bir kontrol söz konusudur [8, 9]. Bu yeteneklerinden dolayı, IMC, özellikle çok girdili çok çıktılı proseslerdeki karmaşıklık (iç etkileşim), yüksek ölü zamanlar ve non-linearite gibi nedenlerden kaynaklanan sorunlarda bile başarılı ve etkili bir çözüm olmaktadır [2, 10, 11, 13].

IMC bir model bazlı denetçidir ve en temel anlatımıyla modelin tersi alınarak elde edilir. Filtre, IMC denetçinin bir parçasıdır, IMC denetçinin tek ayar parametresi filtre sabitidir ve özellikle yüksek süreç-model uyumsuzluklarında gerekli olabilmektedir [10]. Çok girdili çok çıktılı proseslerdeki manipüle edilen girdi ve kontrol edilen çıktı maliyetlerine bağlı olmak üzere tasarımlara manipülasyon miktarlarını sınırladığı matrisler de eklenebilmektedir. Oransal İntegral Türevsel denetim yapan PID denetçilerde ise çıktının kontrolü, girdi değerinin "hataya", "hatanın integraline" ve "hatanın türevine" oranlı bir şekilde manipüle edilmesiyle yapılır ve klasik PID denetleyicilerde model ile proses arasındaki uyumsuzluk hata terimine eklenmediği için model-proses uyumsuzluklarını otomatik olarak hesaba katma özelliği yoktur.

Yukarıda belirtildiği şekilde TİP I Diyabetes Mellitus özel bir kontrol problemi oluşturur. Kandaki şeker seviyesinin bazal limitin altına inmesi istenmediği gibi, şekerin aşırı yükselmesi ve yüksek seviyelerde uzun süre kalması da ciddi tıbbi sonuçları olan bir durumdur.

Sağlıklı insan pankreası, endokrin sistemin bir parçası olup belli kontrol aralıklarıyla çalışan doğal bir denetçidir. Bu çalışmada, IMC denetçisi tasarımı için, sağlıklı insan endokrin pankreasının doğal çalışma kinetiği ve ticari olarak satılan analog hormonların kinetik parametreleri esas alınmıştır ve denemeler 1. Derece Euler İntegrasyonu ve 4. Derece Runge-Kutta İntegrasyon yöntemleriyle dinamik simülasyonlar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle, yaratacağı hayati riskler nedeniyle deneysel olarak yapılması mümkün olmayan denemeler bu çalışmalarda test edilmiştir. Aynı şekilde PID performansları da simülasyonlarla test edilmiştir. Bu tür bir proses için Cohen-Coon gibi PID ayar yöntemlerinin kullanılması proses limitasyonları nedeniyle mümkün olmadığı için farklı ayar değerlerinin sonuçları karşılaştırmalı grafikler üzerinden incelenmiştir. Kişisel farkların da dikkate alındığı durumlarda doğru ayarlandığı zaman PID denetleyicisinin de IMC denetleyicisine çok yakın performans gösterebileceği gözlemlenmiştir [10, 12].

Bu çalışmanın amacı çift hormonlu yapay pankreas kullanan TİP I Diyabetes Mellitus hastalarındaki bireysel farklardan, ölü zamanlardan, sensör ve infüzyon gecikmelerinden ve hormon yarılanma sürelerinden kaynaklanan kontrol problemlerini ve süreç-model uyumsuzluklarını elimine edebilme yeteneği açısından gelişmiş Dahili Model Denetçisi yaklaşımı ile piyasada yaygın şekilde kullanılan Oransal İntegral Türevsel denetim yaklaşımını karşılaştırmaktır.

## 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

### 2.1 ENDOKRİN PANKREAS

Pankreas işlevsel olarak birbirinden farklı iki organdan oluşur: vücudun ana sindirim bezi olan "ekzokrin (*exocrine*) pankreas" ve insülin, glukagon, somatostatın, pankreas polipeptidi (PP) ve grelin üreten "endokrin (*endocrine*) pankreas" (endokrin, hormonlar aracılığıyla vücut fonksiyonlarını düzenleyip kontrol eden iç salgı bezlerinin genel adıdır) [14, 15, 16, 17].

Ekzokrin pankreasın temel görevi yutulan gıdaların emilim için kullanılabilir hale getirilmesidir. Ekzokrin pankreas "enzim" üreten hücrelerden ve bu enzimleri oniki parmak bağırsağı (*duodenum*) boşluğuna (lümenine) ileten kanal (*duct*) sisteminden oluşur [14, 15, 16, 17]. Yetişkinlerde, bir günde yaklaşık 800 - 900 cm<sup>3</sup> arasında pankreas

özsuyu salgılanır ve besinlerin parçalamasına yardımcı olan çeşitli enzimleri ve bikarbonatı içeren bu pankreas özsuyu (ve karaciğer tarafından üretilen safra) bir kanal aracılığıyla onikiparmak bağırsağına dökülür.

Endokrin pankreas "hormonları" ise gıdaların adsorpsiyonunun hızından, hücrel depolamaya ve besin metabolizmasına kadar hücrel beslenmenin her yönünü düzenlerler. Endokrin pankreasın işlev bozukluğu veya hedef dokuların anormal tepkileri durumunda, adına "diabetes mellitus" denilen önemli bozukluklar oluşur [14, 15, 16, 17].

Endokrin pankreas, ekzokrin pankreasın salgılama yapan glandüler maddesinin her tarafına dağılmış olarak bulunan ve Langerhans adacıkları (*Islets of Langerhans*) adı verilen yaklaşık 1 milyon küçük endokrin bezden (bölgelerden) oluşur. Adacıklar pankreasın toplam hacminin % 1,0 - % 1,5'ini oluştururlar ve yetişkin insanlarda yaklaşık 0,9 - 1,2 gram ağırlığındadırlar [14, 15, 16, 17]. Sağlıklı bir yetişkindeki pankreasın ağırlığı 75-100 gram civarındadır.

Langerhans adacıklarında birçok farklı hücre tipi bulunur; alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), delta ( $\delta$ ), epsilon ( $\epsilon$ ), pankreas polipeptidi (PP) hücreleri. Bu hücreler toplam adacık hacminin sırasıyla % 25, % 55, % 10, % 3, % 5 ve % 2 diğer olmak üzere içeriğini oluştururlar ve bu hücreler sırasıyla glukagon, insülin, somatostatın, ghrelin ve PP üretirler. Bu üretici hücreler her bir adacık içerisinde dağınık şekilde bulunurlar ve adacıklar arasında da homojen şekilde dağılmışlardır.

Adacıklar damarlıdırlar ve çevrelerindeki ekzokrin pankreas dokusunun beş ila on katı oranında kan akışı alırlar. Her adacık, beyinde ve omurilikte bulunan hücrelere benzeyen hücrelerden oluşan bir kafesle çevrilidir ve "sempatik" (acil durumlarda harekete geçen), "parasempatik" (aktiviteleri gevşeten ve azaltan, rahatlatıcı), "duyuşal" (iç-dış uyarıları algılayıp tanıyan) nöronlar içeren sinirlerle kaplıdırlar [20, 21].

Beta hücreleri tarafından salgılanan insülin, karaciğerin, iskelet kasının ve yağ dokusunun glikoz alımını özel reseptörler yoluyla uyararak kandaki glikoz konsantrasyonunu azaltır [14]. Alfa hücreleri tarafından salgılanan glukagon ise (vücuttaki birincil katabolik hormondur) tam tersine kan dolaşımındaki glikoz ve yağ asitlerinin konsantrasyonunu artırır [14, 17, 22, 23].

Hem kan şekeri seviyesini düşüren insülin hormonunu, hem de kan şekeri seviyesini yükselten glukagon hormonunu salgılayan endokrin pankreas, vücuttaki kan şekerini hem arttıran hormonları, hem de azaltan hormonları üreterek kan şekeri için bir denetleyici (*controller*) işlevi görür [14].

Aşırı miktarda glukagon ve insülin sekresyonunu önleyen somatostatini salgılayan delta ( $\delta$ ) hücreleri; yağ depolamasını artıran, iştahı ve hipofiz bezinden büyüme hormonu salınımını uyararak ghrelini salgılayan epsilon ( $\epsilon$ ) hücreleri; mide asidi salgısını, boşalmasını ve üst bağırsak hareketliliğini azaltan bir tokluk hormonu olan polipeptitleri salgılayan pankreatik polipeptit (PP) hücreleri de bu denetimde dolaylı olarak etki yaparlar fakat insülin salgılayan "beta hücreleri" adacık kütesinin çoğunluğunu (yaklaşık % 60'ını) oluştururlar [17, 24].

#### 2.1.1 İnsülin ve Hipoglisemi

Endokrin pankreastaki beta ( $\beta$ ) hücreleri tarafından üretilen insülinin temel fonksiyonu alınan besin maddelerinin depolanmasını sağlamaktır fakat vücuttaki hemen hemen her dokunun işlevini de doğrudan veya dolaylı olarak etkiler [25, 26].

İnsülin, kan dolaşımı aracılığıyla vücuda gönderilir. Langerhans adacıkları damarlı oldukları ve çevrelerindeki ekzokrin pankreas dokusunun beş ila on katı oranında kan akışı aldıkları için bu gönderim hızlı gerçekleşir. İnsülin, insülin reseptörleri aracılığıyla etki ederek hedef organlarda karbonhidrat, yağ ve protein sentezini artırır (insülin reseptörü, "büyüme faktörü" reseptörü ailesinden bir reseptördür). Karaciğerde, glikoz kullanımında rol oynayan enzimlerin sentezini uyarır ve glikoz üretiminde rol oynayan enzimlerin sentezini engeller.

İnsülinin vücuttaki dolaşım yarı ömrü 3 ila 5 dakikadır. Karaciğerdeki ve böbrekteki insülinazlar tarafından parçalanır [27]. Karaciğerden tek bir geçiş, kanın sıvı kısmını oluşturan plazma insülininin yaklaşık % 50'sini

uzaklaştırır. Vücuttaki kan dolaşımının bir tam devrinin süresi çok tartışmalı bir konu olsa da genellikle yaklaşık 60 saniye (1 dakika) olarak kabul edilebilir ama bu sürenin “vücut büyüklüğüne”, “kalp atım hızına” ve “aktivite düzeyine” bağlı olarak 20 saniye ile 120 saniye (0,33 dakika ile 2 dakika) arasında değişebileceği de kabul edilmektedir.

Pankreas tarafından üretilen az miktarda pro-insülin de insülin ile birlikte kan dolaşımına salgılanır (insan pankreasından salgılanan immünoreaktif insülinin yaklaşık % 3 ila % 5'i aslında pro-insülidir). Pro-insülin karaciğer tarafından atılmadığı için, yarı ömrü insülinin üç ila dört katıdır. Böbrek, proinsülin bozunmasının ana yeridir. Uzun yarı ömrü, pro-insülinin kanda birikmesine olanak tanır ve insanlarda bazal durumda dolaşan immünoreaktif insülinin % 12 ila % 20'sini oluşturur. Pro-insülin, insülinin biyolojik aktivitesinin yaklaşık % 7 ila % 8'ine sahiptir.

Besin alımından sonra periferik (çevresel) insülin konsantrasyonu 8-10 dakika içinde artar, 30 - 45 dakikada zirve konsantrasyonlara ulaşır ve daha sonra yemekten sonra 90 - 120 dakika içinde hızla başlangıç değerlerine düşer.

Bazal insülin salgılanması, açlık durumunda, ekzojen (dışarıdan kaynaklanan/üretilen) uyarıların yokluğunda meydana gelir. 80 ila 100 mg/dL'nin (4,4 - 5,6 mmol/L) altındaki plazma glikoz seviyeleri insülin salınımını uyarmaz ve insülin salgılanmasının diğer fizyolojik düzenleyicilerinin çoğu yalnızca uyarıcı glikoz seviyelerinin varlığında işlev görür.

Uyarılmış insülin salgılanması, ekzojen uyarılara yanıt olarak meydana gelir. Canlı organizmada, yenen yemekler insülin salgılanması için başlıca uyarımları sağlarlar. Glikoz, insülin salınımının en güçlü uyarıcısıdır. Pankreas, glikoz uyarımına yanıt olarak iki fazda insülin salgılar.

Glikoz konsantrasyonu aniden arttığında, başlangıçta kısa süreli bir insülin salınımı patlaması meydana gelir (ilk faz); glikoz yükselmesi devam ederse, insülin salınımı kademeli olarak düşer ve sonra tekrar sabit bir seviyeye yükselmeye başlar (ikinci faz). Ancak, yüksek glikoz uyarımının sürdürülen seviyeleri (in vitro 4 saat veya in vivo 24 saatten fazla)  $\beta$  hücrelerinin glikoza verdiği yanıtın geri dönüşümlü duyarısızlaşmasına neden olur (ancak diğer uyarılara karşı duyarısızlaşmaz).

$\beta$  hücresi, metabolizması yoluyla glikozu algılar. Glikoz metabolizmasını engelleyen 2-deoksiglukoz gibi ajanlar insülin salınımını engeller. Glikoz, pankreas  $\beta$  hücresine, glikoz taşıyıcıları olarak adlandırılan zar proteinleri tarafından kolaylaştırılan pasif difüzyonla girer.

Kan şekerinin aşırı düşmesi durumuna hipoglisemi (hypoglycemia) denir ve şiddetli (*severe*) hipoglisemi acil müdahale gerektiren çok tehlikeli bir tıbbi durumdur. Geç müdahale ölümlerle sonuçlanabilir. Hipoglisemi, genellikle diyabet tedavisi ile ilgili durumlarda yaşanmakta ve uygulanan diyabet tedavilerinin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Acil hipoglisemi durumunda vücuda glukagon ve/veya glikoz enjeksiyonu yapılması gerekir. Glukagon enjeksiyon bölgeleri, tıpkı insülin enjeksiyonunda olduğu gibi, kolların üst dış kısmı, uylukların üst dış kısmı, göbek deliğinden uzaktaki karın bölgesi ve kalçanın üst kısmıdır [35].

### 2.1.2 İnsülin'in Ticari Sunum Şekilleri

Piyasada insülin farklı güçlerde satılmaktadır ve en yaygın olanı U-100'dür. Buradaki U-100 ifadesi 100 ünite/mL (mililitrede 100 ünite) anlamına gelmektedir. Bu insülin, manuel olarak, genellikle 0,1 ml aralıklarla işaretlenmiş olan 1 ml toplam kapasiteli U-100 İnsülin Şırıngası ile kullanılmaktadır. Yani, vücuda 0,1 ml hacminde U-100 insülin enjekte edildiğinde, 10 ünite insülin enjekte edilmiş olur [31, 32].

### 2.1.3 Glukagon

Glukagon hormonu karaciğerdeki enerji depolarını glikoz ve ketonlar şeklinde serbest bıraktıran hormondur. Endokrin pankreastaki alfa ( $\alpha$ ) hücreleri tarafından üretilir [33, 34].

Sağlıklı insanlarda, ortalama açlık glukagon seviyesi 75 pg/mL'dir (25 pmol/L) ama gerçekte bunun sadece % 30 ila % 40'ı glukagondur, geri

kalanı pro-glukagon, glisentin ve oksintomodulin gibi glukagon reaktivitesine sahip daha yüksek moleküler ağırlıklı moleküllerin heterojen bir bileşimidir. Dolaşımdaki glukagonun yarı ömrü (karaciğer ve böbrek tarafından uzaklaştırılması nedeniyle) 3 ila 6 dakikadır.

Glikoz, insülin salgısını uyarmasına (tetiklemesine) karşın glukagon salgısını engeller (inhibe eder). Çeşitli dokularda enerji depolanmasını destekleyen insülinin aksine glukagon karaciğerden diğer dokulara enerji iletmek için salgısal bir mekanizma sağlar. İnsülin-glukagon oranı, besinlerin depolanmasını (depoya girip çıkmasını) kontrol ederek temel hedef dokuları etkiler.

Karaciğer, damar aracılığıyla pankreasa bağlı olması nedeniyle glukagonun başlıca hedef organıdır ve erişimsel (portal) damar glukagon konsantrasyonları açlık sırasında 300-500 pg/mL (100-166 pmol/L) kadar yüksek seviyelere ulaşabilir. Karaciğerdeki glukagon sinyalizasyonu, depolanmış glikojenin parçalanmasını uyarır. Glukagon sinyalleme, karaciğerde hazır bulunan enerji depolarının glikoz ve ketonlar şeklinde net olarak serbest bırakılmasıyla sonuçlanır [35].

### 2.1.4 Somatostatin, Grelin ve Pankreas Polipeptidi

#### Somatostatin

Delta ( $\delta$ ) hücreleri tarafından üretilen somatostatinin insülin ve glukagon gibi diğer pankreas hormonlarının salgılanmasını engelleyici özelliği vardır. Bilinen insülin salınımı uyarıcılarının çoğu aynı zamanda somatostatin salınımını da desteklemektedirler, dolayısı ile somatostatin aşırı insülin hormonu salgılanmasını engeller. Somatostatinin fizyolojik seviyeleri nadiren 80 pg/mL'yi (49 pmol/L) aşar. Ekzojen infüze edilen somatostatinin metabolik temizlenmesi de son derece hızlıdır; hormonun yarı ömrü 3 dakikadan azdır [14].

Somatostatinin kimyasal olarak üretilmiş eşdeğerleri hastalarda aşırı hormon salgılanmasını kontrol etmek amacıyla tıbbi tedavi olarak kullanılmaktadır fakat aşırı somatostatin birçok endokrin hormonun salgılanmasında da aşırı azalmaya neden olur (somatostatinin hücre yenilenmesini uyarıcı ve doku çoğalmasında destekleyen büyüme hormonunu (*growth hormone*) engelleyici özelliğinin olduğu da bilinmektedir).

#### Grelin

Epsilon ( $\epsilon$ ) hücreleri tarafından üretilen ghrelinin açlık sırasında enerji tasarrufu yapılmasında ve kan şekeri seviyelerinin korunmasında rol oynadığı bilinmektedir. Grelin sinyalizasyonu büyüme hormonu salgılanmasını da uyarır ve destekler.

#### Pankreas Polipeptidi

PP (*pancreatic polypeptide*) hücreleri tarafından üretilen pankreas polipeptidinin ekzokrin pankreas salgısının düzenlenmesinde ve safra kesesi kasılmasında rol oynadığı rapor edilmiş olmasına rağmen fizyolojik etkileri henüz tam olarak çözümlenmemiştir fakat pankreas endokrin tümörlü hastaların çoğunda 300 pmol/L'nin üzerindeki değerlere rastlanır. Sağlıklı bireylerde PP'nin bazal düzeyleri ortalama  $24 \pm 4$  pmol/L'dir ve yaşlılık, alkol bağımlılığı, kronik böbrek yetmezliği, hipoglisemi veya inflamatuvar bozukluklar gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak yükseldiği gözlemlenmiştir [35].

### 2.1.5 İç Etkileşimler ve Doğal Kontrol Süreci

Alfa hücreleri, beta hücreleri, delta hücreleri, epsilon hücreleri ve pankreatik polipeptid hücreleri hücre dışı boşluklar ve boşluk bağlantıları aracılığıyla iletişim kurarlar ve birbirlerinin hormon salınımını etkilerler. Örneğin, alfa hücreleri tarafından glukagon salınımı, beta hücreleri tarafından insülin salınımını baskılar veya bunun tersi de olur. Delta hücreleri tarafından somatostatin salınımı da alfa ve beta hücreleri tarafından glukagon ve insülin salgılanmasını inhibe eder. Kan temini ve innervasyon (sinir bağlantısı), her adacığa beta hücrelerinin merkezi çekirdeği yoluyla nüfuz eden bir nörovasküler demet (beyin ve omurilik giden kan akışı ve kan damarları benzeri) tarafından sağlanır.

İnsülinin üretilmesi prosesi ve salgılanması prosesi birbirlerinden bağımsız iki prosedir. Üretilen insülin pankreasta depolarını ve depolanmış olan insülin gerektiğinde salgılanır. Salgılanma aktivasyonu,

pankreas tarafından algılanan yüksek glikoz değerleri ile tetiklenir ve insülin direk olarak kan dolaşımı sistemine bırakılır. İnsülin üreten hücreler vasküler sisteme (kan dolaşımı sistemine) entegre oldukları için insülinin etki etme ve dolayısı ile de tepki alma süresi hızlı olmaktadır, yani, beta hücrelerinin vasküler sistemle direk bağlantılı olması, tepki süresi ve verimliliği artırmaktadır.

Doğal insülin, verilmiş şekline göre “bazal” ve “bolus” insülin olarak adlandırılır. Bazal insülin, öğünlerden bağımsız olarak, düşük miktarda ve hemen hemen sürekli aynı düzeyde olmak üzere gün boyunca salgılanır ve açlık durumunda kan glukoz düzeylerinin normal sınırlar içerisinde kalmasını sağlar. Bolus insülin, öğünlerle birlikte hızlı ve daha yüksek dozda salınarak yemekten sonraki kan glukoz düzeyinin çok yükselmesini önler. İnsülinin vücuttaki kayboluş süreci ve vücuttan atılım süreci insülin hormonunun kinetiği ile ilgilidir.

Glukagon karaciğerde depolanan şekerleri parçalayarak vücuttaki kan şekeri seviyesini artırır. Vücuda glukagon enjekte edildikten sonra glukagon kan dolaşımına girerek glikozu kana salması için karaciğere sinyal verir. Enjeksiyondan sonra kan şekerinin normale dönmesi yaklaşık 10-15 dakika sürer. Glukagon, suda az çözünür (ancak 3'ten az veya 9,5'tan fazla pH'ta çözünür). Glukagonun etkileri insülinin neden olduğu etkilerin tam tersidir. İki hormon (glukagon ve insülin) kan şekeri seviyesini dengede tutmak için birbirleriyle ortaklaşa çalışırlar.

Pankreas, vücuttaki çok karmaşık bir doğal kontrol sistemi olan endokrin sistemin bir parçasıdır. Endokrin sistem, çeşitli bezler ve organlardan oluşan bir ağdır ve hormonlar aracılığıyla vücudun metabolizmasını, enerji seviyesini, üremesini, büyümesini, gelişmesini ve yaralanmaya, strese ve ruh haline tepkisini kontrol eder. Endokrin sistem, içerdiği ölü zamanlar (*dead times*), zaman sabitleri (*time constants*), kazançlar (*gains*), doğrusal olmama (*nonlinearity*), iç etkileşimler (*interactions*) gibi süreç karakteristikleri açısından kimya mühendisliğindeki prosesler ile de yakın benzerlikler gösterir [35].

### 2.1.6 Diyabetes Mellitus

Pankreasın görevini tam olarak yapamadığı durumlarda, kandaki glikoz seviyesi yetersiz kontrol edildiğinde (örneğin, pankreas yeterli insülin üretmediğinde) adına diabet (Diabetes Mellitus - DM) denilen hastalık ortaya çıkar. Çok sayıda alt türü olmakla birlikte diyabetin iki yaygın türü vardır, TİP I ve TİP II. TİP I diyabet, pankreasın hiç insülin üretmemesi nedeniyle kan şekeri (şeker) düzeyinin çok yüksek olduğu durumdur. TİP II diyabette ise pankreasın ürettiği insülin ya düzgün çalışmıyordur veya kullanılmıyordur ya da pankreas yeterince çok miktarda insülin üretilmiyordür. TİP I diabet genellikle çocuk yaşta kendini belli ederken, TİP II diabet genellikle zaman içerisinde obezite, ilerleyen yaş, genetik faktörler gibi nedenlerle ortaya çıkar.

Özellikle TİP I diabette kan şekeri oranlarının ideal değerler aralıklarında tutulabilmesi yaşam kalitesini düşüren bir zorluk olarak ortaya çıkar. Bu sorunun çözümüne yönelik olarak “insülin pompası” adı verilen taşınabilir ticari cihazlar geliştirilmiştir. İnsülin pompaları, kan şekerinin kapalı döngü (*feedback*) kontrolünün yapılmasına yönelik olarak tasarlanmış olan ve genellikle bir glikoz sensörü, bir kontrol algoritması ve bir insülin infüzyon cihazından oluşan sistemlerdir [38].

İnsülin pompası, kan şekeri seviyesinin kontrol edilmesi için, hem çalışma şekli açısından, hem de kontrol kuramı açısından tam anlamıyla bir pankreas muadili veya yapay pankreas değildir çünkü kan şekerini yönetmeye ve kontrol etmeye değil, sadece düşürmeye yönelik olarak çalışır ve bu da hipoglisemi (hypoglycemia) denilen aşırı düşük kan şekeri riskini ortaya çıkarır ki hipoglisemi acil müdahale gerektiren tehlikeli bir sağlık durumudur ve özellikle de diyabet tedavisi ile ilgili durumlarda ortaya yaşanmaktadır.

Normal veya sağlıklı kabul edilen kan şekeri değerleri, açlık kan şekeri için 70-100 mg/dl, tokluk kan şekeri için 70-140 mg/dl arasındadır. Sağlıklı bir bireyde, vücuda alınan glikoz glikojene dönüştürülür (glikojen, glikozun vücut tarafından depolanan bir şeklidir ve vücut glikojeni öncelikle karaciğerlerde ve kaslarda depolar) ve pankreas tarafından salgılanan glukagon (*glucagon*) hormonu da bu glikojenin parçalanmasını teşvik eder ve gerektiğinde kan şekeri seviyesini yükselterek kan şekeri seviyesinin çok fazla düşmesini önler. Kandaki normal glukagon konsantrasyonu mililitre başına 50-100 pikogram'dır (1 pikogram = 10<sup>-12</sup> gram).

### 2.1.7 Yapay Pankreas

Gerçek beslemeli (*feedback*) kapalı döngü bir yapay pankreas sistemi hakkındaki ilk öncü çalışma 1963 yılında yayınlanmıştır. O çalışmadaki kullanılmış olan deneysel düzenekte kan şekeri değeri önceden belirlenmiş olan bir üst sınırdan üstüne çıktığında (örneğin, >150 mg/dl) insülin pompası aktive olmakta, alt sınırın altına inildiğinde ise (örneğin, <50 mg/dl) glukagon veya glikoz şırıngası aktive olmaktadır, normal olarak belirlenen bir aralıkta ise (örneğin, 50 mg/dl - 150 mg/dl aralığında) herhangi bir kontrol aksiyonu uygulanmamaktadır. O çalışmada rapor edilmiş olan örnekleme aralığı 15 saniyedir fakat taşınabilir bir unite değildi ve direk olarak kandan ölçüm yaparak yine direk olarak kana hormon veriyordu. Günümüzde taşınabilir yapay pankreaslarda ölçüm ve infüzyon deri altından yapılmaktadır.

Sonrasında, 1974-1978 yılları arasında beş benzer çalışma daha yayınlandı ve 1977 yılında hastanede yatarak tedavi gören hastalar için The Biostator adıyla ilk ticari yapay pankreas piyasaya çıktı. Sonrasında, benzer bir ticari ürün olan Nikkiso marka, STG-22 model Kan Şekeri Denetçisi (*Blood Glucose Controller*) piyasada yer aldı. Bir Japon firması olan Nikkiso'nun bugün de benzer bir ürünü, STG-55 modeli adıyla ürettiği ve Japonya dahilinde piyasaya sunduğu görülmektedir. Başucu tipi (*bedside-type*) bu ekipmanın, hatanın oransal ve türevsel değişimine bağlı olarak çalıştığı beyan edilmiştir [35].

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan malzeme ve yöntemler aşağıda başlıklar halinde açıklanmıştır.

#### 3.1 ENDOKRİN PANKREAS DOĞAL PROSES KİNETİĞİ

Bu bölümde endokrin pankreasın doğal proses kinetiği, “Kontrol Edilen Çıktı ve Manipüle Edilen Girdiler”, “Proses Kazançları”, “Kontrol Aralıkları, Zaman Sabitleri, Ölü Zamanlar”, “Set Değerleri”, “Bozucu Etkiler ve Bozucu Etki Kontrolü” gibi proses kontrol terimleri ve kavramları ile ifade edilmiştir. Tıbbi amaçlarla toplanan deneysel veriler, tıbbi merak doğrultusunda toplandıkları için, özellikle proses kontrol amacıyla kullanılabilmeleri açısından bazen ya yetersiz kalmaktadırlar, ya da mühendislik amaçları için kullanılmayacak şekilde toplanmış veya ifade edilmiş olmaktadır. Aşağıda, endokrin pankreas doğal proses kinetiği ile ilgili temel değişkenlerin sayısal limitleri ve parametrelerinin sayısal karşılıkları da proses kontrol terimlerinin ve kavramlarının karşılığı olarak ifade edilmişlerdir.

##### 3.1.1 Kontrol Edilen Çıktı ve Manipüle Edilen Girdiler

İnsandaki doğal “kan şekeri (plazma glikoz konsantrasyonu) kontrol döngüsünün” kontrol edilen “temel” çıktısı bir tane (glikoz) olsa da, manipüle edilen “temel” girdileri iki tanedir (insülin ve glukagon). İnsülin ve glukagon, kan şekeri üzerinde, birbirlerine tamamen aksi yönde tepki üretirler ve bu tepkileri farklı biyokimyasal mekanizmalar (alt süreçler) üzerinden üretirler.

Bu doğal kontrolde, manipüle edilen girdilerin ulaşabilecekleri maksimum alt ve üst sınır değerleri de vardır. Hem insülinin, hem de glukagonun konsantrasyonları fiziksel olarak sıfırdan daha küçük olamaz, yani, negatif değerler alamazlar, dolayısı ile de matematiksel olarak ulaşabilecekleri “teorik” alt sınır konsantrasyonu sıfırdır. Pratikte ise, “açlık durumunda dahi” ne insülin ne de glukagon konsantrasyonlarının mutlak sınıra ulaşmaması gerekmektedir çünkü insan vücudu yaklaşık olarak 37 °C iç sıcaklıkta sürekli çalışması gereken prostestir. Vücuttaki glukagon ve insülin miktarları arasında çoğu zaman doğal olarak korunmakta olan bir oran olduğu da bilinmektedir. Bu iki hormonun üst sınır konsantrasyonlarının ise yine endokrin pankreas tarafından salgılanan somatostatin hormonu tarafından limitlendiği anlaşılmaktadır. Zaten, bu üç temel hormonu salgılayan dokular endokrin pankreasın % 90'ını oluştururlar (insülin, glukagon, somatostatin için sırasıyla % 55, % 25, % 10).

Somatostatinin fonksiyonu, yapay pankreas kontrolüne benzerlik açısından şöyle ifade edilebilir. İnsülin ve glukagon manipüle edilen girdilerdir ama somatostatin girdiler için bir (üst) limitlendiricidir. Doğal olarak somatostatin hormonu ile gerçekleştirilen bu üst limitlendirme (insülin ve glukagon için maksimum konsantrasyonun sınırlandırılması) yapay pankreasta veya dual hormonlu insülin pompalarında kontrol

yazılımının içine yerleştirecek komutlarla kolayca ve değişik kriterlere göre yaptırılabilir bir işlemdir.

Yukarıda da belirtildiği gibi, insanlardaki sağlıklı süreçlerde, kan şekeri kontrolü için, manipülasyon amacıyla, birbirinin salgılanma miktarlarını dolaylı olarak etkileyebilen (ortamda aynı anda bulunabilen ve çalışabilen) ama birbirinin tamamen tersi yönde çıktı tepkisi üreten iki temel hormonun (insülin ve glukagon) kullanımını söz konusudur fakat bunların miktarlarının üst sınırlandırılması üçüncü bir hormon (somatostatin) tarafından yapılmaktadır.

Bu süreçteki temel itici güç, tabiki vücuda dışarıdan alınan gıdalardır ve dışarıdan gıda alımı konusundaki temel motivasyon da açlık hissidir. Tokluk hissi de hormonlar ve peptitler aracılığıyla yaratılmaktadır (örneğin barsaklardan salgılanan GLP-1 ve pankreastan insülinle birlikte salgılanan amilin gibi). Vücudun glikoz dengesi üzerinde “tokluk hissi” üreten hormonların ve peptitlerin kinetiğinin de önemli bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır ama bu hormonların matematiksel kinetiğini yukarıda adı geçen diğer hormonların kinetiğiyle bağlantılı olarak ortaya koyan ve proses kontrol simülasyonları için de kullanılabilir türde bir literatür bilgisinin henüz birikmediği söylenebilir.

Bu çalışmada, dual (çift) hormonlu yapay pankreas kontrolü için, sağlıklı doğal mekanizmadakine benzer şekilde, aynı kontrol edilen çıktı üzerinde birbirlerinin tam tersi yönde tepki üreten, iki farklı kontrol döngüsü kullanılmıştır (hem IMC, hem de PID için).

Bu çalışmada, kontrol edilen çıktı plazma glikoz konsantrasyonudur (mg glikoz/dL), manipüle edilen girdiler ise analog insülin konsantrasyonu (U insülin/dL) ve analog glukagon konsantrasyonudur (IU glukagon/dL). Buradaki birimler, bireyde bulunan her 1 dL plazma içindir. İnsanda ortalama olarak vücut ağırlığının yaklaşık % 7 - % 8'i oranında kan bulunduğu bilinmektedir ama bu miktar bireye bağlı olarak da değişebilmektedir (örneğin, bireyin yaşına veya hamile olup olmama durumuna). Bunun da yaklaşık % 55'i plazmadır. O nedenle dozlanacak olan hormon miktarı, bireyin plazma hacmine ve kullanılan ticari hormonun konsantrasyonuna oranlanmalıdır. Örneğin, vücudunda 4 kilogram kan olan bir bireyde yaklaşık olarak 22 dL plazma var demektir ve dolayısıyla manipüle edilen girdinin dozlama miktarı da 22 ile çarpılarak uygulanmalıdır (plazmanın özgül ağırlığı yaklaşık olarak 1 kabul edilirse).

### 3.1.2 Proses Kazançları

İnsülin ve glukagon için proses kazancı, en basit şekliyle, “birim hormonun, birim glikoz konsantrasyonu üzerinde yarattığı toplam fark” olarak tanımlanabilir. Analog insülinin ve analog glukagonun proses kazançları farklı ve ters yöndedir. Biri (glukagon), kan şekeri üzerinde sadece pozitif kazanç (*gain*) üretebilirken diğeri (insülin) sadece negatif kazanç üretebilir.

Ticari olarak satılan analog insülin ve glukagon ürünler de tabiki ters proses kazançlarına sahiptirler fakat zorunlu olarak sadece standardize edilmiş olan birimler (U veya IU) üzerinden satışa sunulabildikleri için, piyasadaki farklı ürünler için proses kazancı (process gain) değerleri standart, bilenebilir ve sabittir.

Aşağıdaki bölümlerde insülin ve glukagon kazançlarının rakamsal karşılıkları da irdelenecektir, fakat, kontrol açısından, şunun da dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır: hastaya verilen insülin ve glukagonun vücut içerisindeki miktarları verildikten sonra değişime uğramaya başlarlar çünkü bunların yarılanma süreleri vardır (yani vücut içerisindeki konsantrasyonları hızla düşer). Kullanılan ürün tipine göre yarılanma süreleri de değişir ve bu da proses kinetiğini çok ciddi şekilde değiştirerek kontrolü zorlaştırır. Uzun ölü zamanlar, sensör gecikmeleri ve yarılanma süreleri hep birlikte düşünüldüğünde, oldukça zorlu bir kontrol problemi ile karşı karşıya kalınmaktadır.

Şu anda kullanılmakta olan taşınabilir formdaki tek veya çift hormonlu insülin pompaları aslında gerçek anlamda sıkı bir “set değeri” kontrolü yapmamaktadırlar. Çok yüksek (veya çift hormonlu olduğunda, aynı zamanda, çok düşük) glikoz seviyelerini kabul edilebilir bir bant aralığına çekmek hedefiyle çalışırlar.

Şu anda ameliyatlarda veya yatan hastalarda kullanılan yapay pankreaslar ise çoğu zaman direk olarak kandan ölçüm yapıp, yine direk olarak kana

hormon verebildikleri için sıkı bir set değeri kontrolü yapabileme yetenekleri daha yüksektir ama bunlar genellikle taşınabilir değildirler ve dünya genelinde az sayıda firma tarafından üretilmektedirler.

Bu çalışmada, deri altı dokudan veri toplayıp yine deri altı dokudan hormon veren, dolayısı ile de kontrol aralıkları uzun olması gereken yapay pankreasların tasarımlarını mümkün kılacak bir yaklaşımla (model-proses farklarının ve hormon yarılanma sürelerinin var olduğu şartlar altında bile) sıkı ve net bir set değeri kontrolü yapabileme yeteneklerini ortaya koyabilecek şekilde, gelişmiş IMC yaklaşımı ile piyasanın alışkın olduğu, ama IMC gibi “model bazlı” olmayan, PID'nin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu süreçte, yukarıda açıklandığı ve aşağıda rakamsal karşılıklarının verileceği üzere, ilgili hormonlar zorunlu olarak sadece standardize edilmiş olan birimler (U veya IU) üzerinden satışa sunulabildikleri için, proses kazançları isabetli şekilde bilinebilmektedir. Kullanılan analog hormon bazında zaman sabitleri ve yarılanma süreleri de bilinebilmektedir.

### 3.1.3 Kontrol Aralıkları, Zaman Sabitleri, Ölü Zamanlar

Doğal insan endokrin pankreası belli zaman aralıkları ile kontrol yapar ve bu aralık yaklaşık 5 dakikadır. Doğal endokrin pankreas, çok yoğun bir kan damarları ağı içerdiği için, doğal kan şekeri şu anda piyasada satılmakta/kullanılmakta olan deri altı dokusu sensörlerinden çok daha hızlı algılayabilmekte ve salgıladığı hormonlar da aynı kalcal damar ağları üzerinden hızlı bir şekilde kana karışabilmektedir. Ani bir plazma şekeri yükselişine karşı depolanmış formdaki insülin pankreastan 20 saniye içerisinde ani bir patlama şeklinde salımlanabilmektedir. Kandan direk ölçüm yapılabilen ve yine kana direk hormon verebilen yapay pankreaslar için (özellikle ameliyatlarda ve yatan hastalar için) daha kısa kontrol aralıkları kullanmak mümkün olsa da, günlük hayatta, deri altı dokusundan veri toplayan ve yine deri altı dokusundan hormon enjekte edilebilen ekipmanlar doğal pankreas ile aynı sıklıkla (aynı kontrol aralığı ile) çalışmazlar. Piyasadaki bilinen en hızlı tepki ileten deri altı glikoz sensörünün toplam gecikmesi 5 dakikaya yakın bulunmaktadır. Deri altından infüzyon süresi de yine 5 dakikaya yakındır. Bu durumda, bir girdi değişikliğine karşı, bir hastadan, güvenilir bir sensör (çıkıtı) okuması alınabilmesi için, 5 dakikası sensör gecikmesi ve 5 dakikası da infüzyon süresi olmak üzere yaklaşık 10 dakika gecikmesi gerekmektedir. Bu süre içerisinde, yarılanma süreleri nedeniyle, verilen hormonda da tabiki azalma olacaktır Bu çalışmada kontrol aralığı 10 dakika olarak seçilmiştir fakat farklı değerler için de simülasyonlar yapılabilir.

Verilen bir hormonun tepkisinin ilk hissedilmeğe başladığı ana kadar geçen süre, (yani, kontrol terminolojisindeki “ölü zaman” olarak ifade edilen süre), kontrol aralıklarının belirlenmesi için önemlidir. Ölü zamandan daha sık aralıklarla kontrol yapılması risklidir çünkü henüz ölçülmemiş, ve dolayısı ile de henüz bilinmeyen bir değere karşı kontrol girişiminde bulunulmuş olur, yani bir nevi ileri doğru (*feed-forward*) kontrol yapılmış olur. Bu süre, vücutun kendi salgıladığı doğal hormonlar için standart olsa da analog hormonlar için üründen ürüne değişir.

Zaman sabiti, en kaba tanımıyla, bir prosesin, bir denge konumundan yeni bir denge konumuna gelinece kadar geçirdiği süre olarak tanımlanabilir. Birinci derece proseslerde (birinci derece adi diferansiyel denklem ile ifade edilebilen stabil proseslerde), basamak benzeri bir girdi değişikliğine karşı, iki denge konumu arasındaki çıktı değerleri farkının % 63,2'sine gelindiği zamana kadar geçen süre, zaman sabiti olarak kabul edilir. Bu çalışmadaki proses için, zaman sabiti, kullanılan analog insülin veya analog glukagonun bir proses karakteristiğidir ve üründen ürüne farklılık gösterir.

Sağlıklı bireylerdeki doğal bolus insülin, pro-insülin, glukagon, pro-glukagon v.b. için ölü zamanlar (*lag-times*) ve yarılanma süreleri sabit olsa da, ticari analog ürünlerdeki ölü zamanlar, zaman sabitleri ve yarılanma süreleri üründen ürüne ciddi farklılıklar göstermektedirler ve ideal kontrol ayarlarını direk olarak etkilemektedirler.

Sensör gecikmeleri de kullanılan yöntemle göre (kandan veya deri altından ölçüm) dikkate alınması gereken önemli bir geciktirici fark yaratabilmektedir. Sensör gecikmeleri ve ölü zamanlar dikkate alındığında, kontrol aralıklarının da göreceli olarak geniş tutulması gerektiği ortaya çıkmaktadır fakat hormonların vücut içindeki yarılanma süreleri de var olduğu için verilen bir hormonun vücut içindeki derişimi bir sonraki kontrol anına gelinene kadar ciddi değişim geçirmiş

olmaktadır ve bu durumun, aralıklı kontrol açısından, kullanılan denetçi tarafından yönetilebilmesi gerekmektedir.

Bir başka geciktirici unsur, infüzyon süresidir. Bu çalışmada infüzyon süresi de ölü zamana eklenmiştir. Piyasada satılan analog insülinler, hipoglisemi riskini azaltmak için oldukça düşük konsantrasyonlarda satılmaktadır fakat U-500 (500 U/mL) gibi göreceli olarak daha yüksek konsantrasyonlarda satılan ürünler de mevcuttur. Deri altından verilen çok düşük konsantrasyonlu ürünler infüzyon hacmini, dolayısı ile de infüzyon süresini uzatacaktır (subkutan dokudan yapılan otomatik infüzyonun hacimsel akış hızının sınırsız olarak yükseltilmemesi gerekeceği için). Ticari olarak satılan analog glukagonlardaki stabilite problemi de şu anda bu tür amaçlarla kullanımını oldukça zorlaştırır da bu sorun sonuçta bir mühendislik problemidir ve bu zorluğun zaman içerisinde azalması veya ortadan kalkması teknolojinin gelişimine bağlıdır. Özellikle acil hipoglisemi kontrolü için glukagon yerine direk açlık glikoz kullanılması da bir çok açıdan avantajlı bir seçenektir ama hormona oranla kullanılması gereken miktarın yükseliği uygulanabilirlik açısından pratikliğini sınırlamaktadır.

### 3.1.4 Set Değerleri

İnsanda ortalama vücut sıcaklığının 37 °C olması gibi, kan şekeri için de doğal set değerlerinin var olması gerektiği varsayılabilir fakat literatürde rapor edilmiş olan bazı değerler ve aralıklar bulunmasına rağmen açlık kan şekeri set değeri için vücut sıcaklığındakine benzer şekilde çok net sayılar literatürde yer almamaktadır. Bu kısmen beklenebilir bir durumdur çünkü insülin ve glukagon hormonlarının yarılanma süreleri nedeniyle tek bir set değeri yerine bir denge konumu aralığının (bantının) var olması matematiksel olarak beklenebilir. Bu çalışmada açlık kan şekeri denge konumu değeri için 90 mg glikoz/dL baz olarak alınmıştır fakat ayrıca değiştirilebilir bir tolerans aralığı da tanımlanmıştır. Örneğin, glikoz set değeri 90,0 mg glikoz/dL ise ve tolerans da 0,6 mg/dL olarak seçilmiş ise 90,6 ile 89,4 arasında ulaşıldığında set değerine ulaşılmış kabul edilir ve denge konumu insülin ve glukagon değerleri uygulanmaya başlanır. Bu  $\pm 0,6$  bandının dışına çıkıldığında ise denetleyiciler yeniden çalışmaya başlar. Endokrin pankreasın literatürdeki doğal tolerans değeri yaklaşık olarak 10,0 mg glikoz/dL (80-100 mg glikoz/dL arasında) olarak bilinmektedir. Normal açlık insülin seviyeleri 5 ila 15  $\mu$ U/mL arasında değişir (yani, 0,0005 U/dL ile 0,0015 U/dL arasında değişir). Normal açlık glukagon seviyeleri ise mililitre başına 50 ila 100 pikogramdır (pg/mL) (yani, 0,00005 mg/dL ile 0,0001 mg/dL arasında değişir). Piyasada da kullanıldığı şekliyle, aktivitesi 1 mg doğal insan glukagonuna eşit olan glukagon 1 IU (international unit) olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmadaki simülasyonlarda açlık denge konumu değerleri olarak, insülin için 0,0005 U/dL, glukagon için de 0,0001 IU/dL değerleri kullanılmıştır. Bu değerlerle birlikte, insülin proses kazancı -18 mg/U ve glukagon proses kazancı 900 mg/IU olarak kullanılmıştır.

### 3.1.5 Bozucu Etkiler ve Bozucu Etki Kontrolü

TİP I diyabet hastaları için temel bozucu etki tabiki yemektir. Yemek sonrası yükselen kan şekeri olabildiğinde hızlı bir şekilde normal kabul edilen değere indirilebilmelidir. Aynı şekilde, herhangi bir nedenden ötürü kan şekerinin normalin altına inmesi de kontrol açısından bir bozucu etkidir fakat hipoglisemi riski dikkate alındığında, bir bozucu etki olduğu kadar aynı zamanda tehlikeli bir risk durumudur ve denetçinin bu sorunu da yönetebilmesi gerekir.

### 3.1.6 Sensör Gecikmeleri

Vücuttan sürekli olarak glikoz okuması yapabilen sensörler çok çeşitli olmakla birlikte Türkiye piyasasında yaygın şekilde bulunmakta olanlar için rapor edilmiş olan gecikme zamanı (*lag-time*) 5 dakikadır. Bu gecikmenin yüksekliğinin temel nedeni bu sensörlerin direk olarak kandan değil derinin altındaki subkutan (*subcutaneous*) hücreler arasındaki interstisyel sıvıdan (*interstitial fluid*) okuma yapmalarındır. Parmak ucundan (kandan) yapılan direk okumalarda ise *lag-time* süresi 6 saniye civarındadır.

Glikoz sensörü teknolojisi son yıllarda gelişmektedir ve uzaktan (*non-invasive*) farklı yöntemlerle okuma yapabilen yeni tasarımlar ve yöntemler sürekli olarak rapor edilmektedir. Örneğin, infrared lazer (*infrared laser*) ile ölçüm yapabilen veya kulağa mandallanarak çeşitli

dalgalar (*ultrasonic, electromagnetic, thermal*) yoluyla ölçüm yapabilen sensörler gibi. Varlığı internette duyurulmuş olan başka non-invasive ve kablosuz glikoz monitörü örnekleri de görülmektedir. Örneğin, avuç içinden ölçüm yapabilenler, alt göz kapağı içine yerleştirilen nanosensör veya göze yerleştirilen kontakt lens (*contact lens*) formunda olanlar gibi.

Sensör gecikmesi, insülin veya glukagon gibi girdilere (*inputs*) karşı vücudun kendi doğal tepki vermeye başlama sürelerine (ölü zamanlara) eklendiğinde, gecikme zamanı uzun olan sensörler kontrol açısından önemli sayılabilecek sonuçlar doğurabilmektedir çünkü, ek olarak, insülin ve glukagonun yarılanma süreleri de prosesi kısıtlamaktadır. Bu çalışmada, simülasyon testleri, sensör gecikmelerinin 6 saniye ile 5 dakika arasında olacağı varsayılarak, 6 saniye ve 5 dakika uç noktaları da dahil olmak üzere, karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

## 3.2 KİNETİK PARAMETRELER

### 3.2.1 Glukagon Kinetik Parametreleri

Glukagon hormonu insülin hormonunun tam aksi yönde bir tepki üreterek kan glikoz seviyesinin yükselmesine neden olur fakat bu tepkiyi, sağlıklı bireylerde, belli şartların sağlanması durumunda vermeye başlar (yaklaşık olarak 80 mg glikoz/dL altına inildiğinde). Bu çalışmada 90 mg/dL glikoz açlık denge konumu değeri olarak kullanılmıştır (10 mg/dL tolerans kullanılırsa alt sınır 80, üst sınır 100 olur). Şekerin 70 mg/dL altına düşmesi bir hipoglisemi (aşırı kan şekeri düşüklüğü) durumu olarak kabul edilir. Doğal dengenin bozulduğu diyabet hastalarının kan şekeri seviyesi için ise 45 mg/dL tehlikeli bir alt sınırdır ve acil müdahale gerekir. Bu çalışmada da hipoglisemi durumundaki denetleyici performanslarını test etmek için 45 mg/dL değeri kullanılmıştır ve hastanın kan şekerinin 10 dakika boyunca 45 mg/dL değerinde kaldığı durum karşısındaki denetleyici performanslarına bakılmıştır.

Sağlıklı bireylerde her durumda kanda belli bir miktarda glukagon bulunur (vücudun organlarının çalışması için gerekli olan enerjinin sürekli olarak üretilmesi için bu gereklidir) fakat kan şekerinin normalin üzerine çıktığı ve dolayısı ile insülinin normal bazal konsantrasyonun üzerindeki yüksek oranlara ulaştığı durumlarda, glukagon salgılanması durur.

Tersi durumda, kan şekerinin normalin altına indiği ve dolayısı ile insülin salgılanmasının düştüğü durumlarda ise glukagon salgılanması artar ve kan şekeri seviyesi yükseltilir. Birbirini etkileyen, bazı durumlarda aynı anda üretilen fakat birbirinin tersi yönde tepki üreten, çalışma biyokinetikleri açısından da birbirlerinden bağımsız kabul edilebilecek bir mekanizma söz konusudur. Teorik olarak, açlık kan şekeri denge konumu durumunda insülin tarafından uzaklaştırılan glikoz miktarı ile glukagon tarafından kazandırılan glikoz miktarının teorik olarak eşit olması gerekmektedir.

Her ne kadar, başlangıçta TİP I Diabetes Mellitus tedavisi gören hastalarda aşırı glukagon salgılanması gözlenmekte olsa da beş yıldan daha uzun süre diyabet tedavisi gören hastalarda hipoglisemiye karşı glukagon tepkisi verme yetisinin kaybedildiği de rapor edilmiştir. O nedenle, TİP I diyabet hastalarında hipoglisemi riski zamanla artmaktadır. Bu tür hastaların yakın çevresindeki kişilere glukagon acil müdahale kiti kullanma eğitimi verilmektedir fakat müdahalenin yetersiz kalması halinde (10 dakika içerisinde hasta tedaviye yanıt vermeye başlamazsa), glukagonu damardan vermek gerektiğinde ve bu da yakın çevre tarafından yapılmadığında, hastalara glikoz veya benzer oranda bal verilmesi önerilmektedir. Hatta, kriz durumunda, hastanın hayatını kaybetmesi veya kalıcı sinirsel bozukluk yaşamasını önlemek için eğer ağızdan besleme yapılmıyorsa bunun rektal olarak verilmesi önerilmektedir.

Glukagon hormonu analog olarak 1 mg doğal insan glukagonuna eşdeğer olan 1 IU (1 International Unit) birimi üzerinden satılmaktadır. Glukagon karaciğerdeki glikojeni hareketlendirir ve 1 IU doğal insan glukagonu kan şekerini 36 mg glikoz / dL arttırır. Bu durumda glukagonun proses kazancı  $36 \text{ (mg glikoz)} / \text{[(mg glukagon) (dL) (kişi)]}$  olarak, yani  $36 \text{ mg} / \text{(IU dL kişi)}$  olarak gerçekleşir. Bu çalışmada, bir kişideki kan plazma hacmi dikkate alınarak,  $900 \text{ (mg glikoz)} / \text{(IU glukagon)}$  değeri proses kazancı olarak kullanılmıştır.

Doğal insan glukagonunun vücuttaki yarı ömrünün 3-6 dakika arasında olduğu bilinmektedir fakat ticari analog glukagonlar için beyan edilmiş

farklı ve çelişkili değerlerin olduğu da görülmektedir ve anlaşıldığı kadarıyla yarılanma değerleri glukagonun hastaya verilmiş şekliyle etkilenmektedir. Bu çalışmada, standart bazal insülin yarılanma süresi ile karşılaştırılabilir olması açısından glukagon yarılanma süresi olarak 14,5 dakika olarak kullanılmıştır yazılımdaki değerler değiştirilerek farklı yarılanma süreleri için de istenilen simülasyonlar yapılabilir.

Glukagon damardan verildiğinde, 1-2 dakika içinde etkinliğinin görülmeye başlaması, 5-7 dakika içinde *peak* glikoz değerine ulaşması ve etkinliğinin toplam 10-15 dakika sürmesi beklenmektedir.

Hayvansal kaynaklı, domuz ve sığır pankreasından çıkarılan, glukagon hormonu da piyasada mevcut olmakla birlikte rekombinant olarak genetiği değiştirilmiş *Saccharomyces cerevisiae* mayası şuşundan elde edilmiş analog glukagon da piyasada bulunmaktadır.

Mikrobiyal kökenli analog glukagon için rapor edilmiş olan vücut içi yarılanma ömrü de yaklaşık 3-6 dakikadır (ortalama 4,5 dakika). Bu tür analog glukagon, damardan verildiğinde, ölü zamanı 1 dakikadır; kastan verildiğinde ise ölü zamanı 10 dakikadır (5-15 dakika arası). Ticari olarak satılan analog glukagonlar için 10 – 42 dakika arasında değişen farklı zaman sabiti değerleri beyan edildiği görülmektedir, örneğin gecikme süresi (*onset time*) 5-20 dakika, en yüksek derişime ulaşma süresi (*peak time*) 30 dakika, toplam etkinlik süresi (*duration time*) 60- 90 dakika şeklinde beyan edilmiş olan ürün de bulunduğu görülmektedir. Bu çalışmada glukagon için proses ölü zamanı 5 dakika olarak alınmış, zaman sabiti olarak ise farklı değerler karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır.

Medikal piyasasında analog glukagon hormonu genellikle acil hipoglisemi (aşırı kan şekeri düşüklüğü) durumları için “anti-hipoglisemik ajan” (*antihypoglycemic agent*) veya “insülin karşıtı pankreas hormonu” (*insulin antagonist pancreatic hormone*) adlarıyla satılmaktadır. Çözeltilerinde stabilite sorunları oluşabildiği için, 1 mg (1 IU) insan glukagonuna eşdeğer olarak, glukagon (toz formda) ve çözücüsü (sıvı formda) şeklinde satılmakta, kullanım öncesi karıştırılmaktadır. Glukagonun stabilite sorunu, glukagonun “yapay pankreas” ve “dual (çiftli) insülin pompası” amaçlı kullanımını sınırlayan bir sorundur.

Çözelti halindeyken glikoz stabil bir malzemedir ve kan şekeri üzerindeki etkisi direktir. Ayrıca, daha ekonomik bir seçenektir. Hipoglisemi durumunda, özellikle acil durumda, hastaya glukagon yerine direkt olarak glikoz verilebilmektedir fakat o durumda tabiki vücuttaki depolanmış mevcut glukojenin kullanılması engellenir. Bu çalışmada yarılanma süresi ve yüksek ölü zamanı nedeniyle daha zor bir kontrol problemi oluşturan glukagonun kullanımı incelenmiştir fakat daha direkt bir tercih olan (çok düşük ölü zamanlı) glikoz kullanılması da yapay pankreas veya çift hormonlu insülin pompaları için geçerli bir seçenek olabilir, ama, o durumda, glikozun glukagon hormonuna kıyasla çok daha yüksek miktarlarda kullanılması gerekeceği için pratiklik sorunları yaratması da beklenir.

### 3.2.2 İnsülin Kinetik Parametreleri

Ticari insülinler piyasada üç kinetik parametre ile satışa sunulmaktadır. Dolayısı ile yapay pankreaslarda veya insülin pompalarında kullanılacak olan ticari insülinlerin kinetiğinin de pratikte yine bu üç parametre üzerinden tanımlanması ve kullanılması gerekmektedir. Bu parametreler “başlangıç zamanı (veya ölü zaman)” (*Onset Time*), “aktivitenin doruk noktasına ulaşma zamanı” (*Peak Time*), “toplam etki süresi” (*Duration Time*) değerleridir. Aktivitenin doruk noktaya ulaşma zamanı ile insülin konsantrasyonunun doruk noktaya ulaşma zamanı farklı kavramlardır. İlki, aktivitenin (yani glikoz konsantrasyonundaki değişimin) en hızlı olduğu anı ifade ederken, ikincisi kandaki insülin konsantrasyonunun en yüksek olduğu anı ifade eder. Bu süreçte, insülinin sürekli olarak yarılanmakta olduğu da unutulmamalıdır.

#### 3.2.2.a İnsülin İçin Başlangıç Zamanı (*Onset Time*)

Başlangıç Zamanı (*Onset Time*), kullanılan insülinin ne kadar çabuk etki etmeye başladığını gösteren zamandır. Yani, insülinin uygulanması ile ilk etkisinin hissedilmeye ve görülmeye başladığı an arasında geçen ölü zamandır. Deri altına (subkutan dokuya) enjeksiyon yapılırken ultra hızlı etkili analog insülin kullanılması durumunda dahi, insülinin etki etmeye

başlaması yaklaşık 5 dakika almaktadır. Bu süreye, sürekli kontrol yapılırken, kullanılan sensörün gecikmesinin de eklenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, sensör gecikmesi 5 dakika olarak ve insülin ölü zamanı da 5 dakika (veya simülasyonda kullanılan ticari insülinin beyan edilmiş ölü zamanı esas alınarak) kullanılmıştır.

#### 3.2.2.b İnsülin İçin Doruk Noktaya Ulaşma Zamanı (*Peak Time*)

Doruk Noktaya Ulaşma Zamanı (*Peak Time*) kullanılan insülinin etkisinin en yüksek noktaya ulaştığı zamandır. Şeker derişimi üzerindeki insülin etkisinin en yüksek oranda gerçekleştiği bu an bir nevi dönüm noktası (*inflection point*) olmaktadır ve kandaki glikoz derişiminin zamana karşı değişiminin en yüksek olduğu anı göstermektedir. Bazen *Peak Time* kavramı insülinin kandaki en yüksek konsantrasyona ulaştığı zaman anlamında da kullanılabilir, o nedenle *Peak Time* zamanı dikkatli kullanılması gereken bir bilgidir.

Glikoz sensörleri (kullanılan sensörün özelliklerine bağlı olmak üzere) direkt damardan ölçümlerde 6-7 saniye kadar kısa bir sürede kandaki glikoz derişimini ölçebilmektedirler fakat subkutan dokudan ölçüm yapılırken, son teknoloji sensörlerin bile 5 dakikaya kadar varan gecikmeleri söz konusudur. Yani, direkt kandan ölçüm yapılması ile deri altından ölçüm yapılması arasında yaklaşık olarak en az 5 dakikalık bir sensör gecikmesi farkı söz konusudur. Ameliyatlarda kullanılan yapay pankreaslar için direkt kandan ölçüm yapmak mümkün olsa bile, günlük hayatta sürekli olarak kullanılması gereken yapay pankreas (veya çift hormonlu insülin pompaları) için subkutan dokudan veri alınması daha pratik bir çözüm olmaktadır.

İnsan insülininin vücuttaki doğal ölü zamanı da yaklaşık 5 dakika kadardır ve piyasadaki ultra hızlı etkili analog insülinler kullanıldığı durumda dahi, insülinin etki etmeye başlaması yaklaşık 5 dakika almaktadır fakat ultra hızlı etkili analog insülinlerde yarılanma süreleri de kısa olduğu için ölü zamanlar kısılırken başka kontrol sorunları ortaya çıkmaktadır. Ölü zamanlardan kaynaklanan nedenlerle ve sensör gecikmelerinden dolayı kontrol aralıklarının geniş tutulması gerekse bile bekleme aralıklarının olabildiğince kısa tutulması önemli bir tehlike olan hipoglisemi riskinin çabuk tespitini mümkün kılacağı için önemlidir çünkü bir alarm mekanizması oluşturulmasını veya yüksek hipoglisemi riski teşhis edildiğinde, bir sonraki kontrol zamanının gelmesi beklemeden anında müdahale edilebilmesini mümkün kılar. Bu müdahalenin glukagon hormonu yerine (veya onu destekleyici olarak) direkt olarak glikoz ile de yapılabilmesi teknik olarak mümkündür.

#### 3.2.2.c İnsülin İçin Proses Kazancı

Proses kazancı (*process gain*) manipüle edilen bir girdinin (*input*) değerindeki belli bir değişimin (artış veya azalışın) kontrol edilen bir çıktının (*output*) değerinde yarattığı fark (artış veya azalış) olarak tanımlanabilir.

Farmakolojide, ÜNİTE (U veya UNIT), bir maddenin ölçülen “biyolojik aktivitesine” (veya etkisine) dayanan bir ölçü birimi olup 1 U insülin (bir ünite insülin) 45,5 µg (tam olarak 1/22 mg) saf kristal insülinin “biyolojik eşdeğeri” olarak tanımlanmaktadır. Bir ÜNİTE’nin tanımı her maddeye göre farklıdır ve uluslararası anlaşma ve uzlaşma ile belirlenir. Piyasada satılan çok farklı türde insülinler bulunduğu için, girdi (*input*) birim değeri olarak ÜNİTE kullanılması mantıklı bir yaklaşım tarzı olmaktadır.

Piyasada insülinler genellikle hacimleri söylenmeden isimlendirilmektedirler, örneğin, 1 U insülin aslında 1 U/mL insülin anlamında kullanılmaktadır veya 100 U (U100 olarak da gösterilir) insülin aslında 100 U/mL insülin anlamında kullanılmaktadır.

1 U (UNIT) hızlı etkili (bolus) insülin 12 gram - 15 gram (ortalama 13,5 gram) karbonhidratı uzaklaştırır. Bu sayı, bireysel hassasiyetlere bağlı olarak 4 gram - 30 gram arasında da olabilmektedir. Bu orana insülin:karbonhidrat (I:C veya I:K) oranı denir. Örneğin, yemekte 50 gram karbonhidrat tüketmiş olan bir kişi teorik olarak yaklaşık 50 gram × (1 U / 13,5 gram) oranında, yani 3,70 U hızlı etkili insüline ihtiyaç duyar denebilir.

Genelde 1 U (bolus) insülin kan şekeri 50 mg/dL düşürür. Bu sayı, bireye bağlı olarak 15 mg/dL - 100 mg/dL arasında da değişebilmektedir.

Bu çalışmada da -18 mg/(dL U) olarak kullanılmıştır. Bu sayı tabii ki bireye bağlı olarak -15 mg/(dL U) ile -100 mg/(dL U) değişiklik gösterebilir.

### 3.2.2.ç Sağlıklı Bireylerde İnsülin İçin Proses Zaman Sabiti ve Ölül Zaman

Sağlıklı bir insanda, yemek yedikten sonraki kan insülin değeri 8-10 dakika içerisinde yükselmeye başlamakta, 30-45 dakikada en yüksek değerine ulaşmakta, sonra 90-120 dakikada taban-çizgisi değerine geri dönmektedir fakat bu süreçte vücudun kendi doğal kontrol mekanizmalarının da çalışmakta olduğu unutulmamalıdır.

Bu süreçte vücudun ürettiği pro-insülinin ve insülinin yarılma süreleri (sırasıyla yaklaşık olarak 14,5 dakika ve 4 dakika) ile salınım aralıkları (yaklaşık 5 dakika) sürecin kinetiğini etkileyen önemli parametreler olmaktadır.

Eğer uzaklaştırılmazsa, kandaki insülin, kan şekerini düşürmeye devam edebilir ve hipoglisemiye (*hypoglycemia*) neden olabilir. Kan şekerinin aşırı düşmesi durumuna hipoglisemi (*hypoglycemia*) denilmektedir ve "yukarıda da belirtildiği gibi" şiddetli (*severe*) hipoglisemi acil müdahale gerektiren çok tehlikeli bir tıbbi durumdur. Geç müdahale ölümlerle sonuçlanabilir. Yukarıda da belirtildiği gibi, hipoglisemi, genellikle diyabet tedavisi ile ilgili durumlarda yaşanmakta ve uygulanan diyabet tedavisinin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

İnsülin genellikle cildin hemen altındaki yağlı dokuya enjekte edilmektedir, enjeksiyon yapılan dokuya subkutan (subcutaneous) deri altı dokusu denmektedir, ama direk damar içine de verilebilmektedir. Ticari insülinler için beyan edilen süreler, aksi belirtilmedikçe, genellikle deri altı dokusu enjeksiyonu için verilen sürelerdir.

Sentetik insülininin kimyasal yapısı ile doğal insülinin kimyasal yapısı oldukça benzerdir fakat deri altına enjekte edildiğinde doğal insülin kadar hızlı etki edemez çünkü emilimi göreceli olarak daha uzun sürer. O nedenle doğal insülinin kullanımı piyasada gittikçe azalmaktadır ve onun yerini kinetik davranışları daha tahmin edilebilir olan insülin analogları kullanılmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan hızlı etkili insülin analoglarının kana karışma süreleri genellikle 5-15 dakika arasında gerçekleşmektedir ve vücuttaki aktivitesinin zirvesine de yaklaşık 75 dakikada ulaşmaktadır. Yaklaşık 4 saat sonra da aktivitesi tamamen sona ermiş olmaktadır. Yüksek dozlar kullanılırlarsa, aktivitenin sona erme süresi biraz uzayabilmektedir ama 5 saati aşmamaktadır.

Daha hızlı etki eden (çok hızlı etkili) bolus insülin analogları da bulunmaktadır, bunların aktivite süreleri daha kısa olmaktadır. İnsülin pompalarında da bu tür daha hızlı etki eden insülinler tercih edilmektedir fakat insülin pompalarının çalışmasındaki genel mantık çoğu zaman insülinin belli üst limitleri aşması durumunda enjeksiyon yapılması şeklindedir. Pompa kullanıldığında bazal (*basal*) insülin ihtiyacı da yine bu tür hızlı etkili insülinin miktarı manipüle edilerek karşılanmaktadır. Örneğin, çok hızlı etkili Faster Aspart analog insülinin etki başlangıcı 5 dakika, en yüksek etki anı 30 dakika, toplam etki süresi de yaklaşık 3 saat kadardır. Bu insülin 2017 yılından beridir kullanılmaktadır ama bu tür ultra hızlı analog insülinler için en önemli ve tehlikeli yan etki tabii ki (iyi kontrol edilmediğinde) aşırı kan şekeri düşmesi olan hipoglisemi (*hypoglycemia*) riski oluşturmasıdır. Bu çalışmada ise sağlıklı insan vücudundaki çalışmaya yakın tepkiler elde edilmesine yönelik bir kontrol stratejisi öngörülmüştür.

### 3.2.2.d Sağlıklı Pankreas İçin Kontrol Aralığı

Sağlıklı bireylerde doğal pankreas yaklaşık 5 dakikada bir patlama (*burst*) şeklinde insülin salınımı yapar. Dolayısı ile vücudun kendi doğal insülin kontrol aralığı yaklaşık 5 dakikadır. İnsülini salgılayan Langerhans adacıkları kan damarlarıyla örülüdür ve pankreasın diğer bölgelerinden 5-10 kat daha fazla kan akışı alır. Dolayısıyla 5 dakikada bir salgılanan insülin kana hızlı bir şekilde karışır fakat kana karışan insülin sürekli olarak aynı derişimde kalmaz, karaciğerde ve böbrekte insülinaz enzimi tarafından parçalanır. Yarılma süresi (ömrü) doğal ve ticari insülinler için süreç dinamiklerini direk olarak etkileyen önemli bir kinetik parametredir.

Vücutta doğal olarak salgılanan insülin "hızlı etkili" (insülin) ve "yavaş etkili" (pro-insülin) olmak üzere iki tür insülin oluşur ve birlikte salgılanarak kana karışır. Bu iki insülinin vücuttaki yarılma ömürleri farklıdır.

Salgılanan insülinin yaklaşık % 4'ü pro-insülinidir. Pro-insülinin aktivitesi insülinin aktivitesinin yaklaşık % 7,5'i kadardır fakat pro-insülinin yarı ömrü insülininkinden yaklaşık % 3,5 kat daha fazla olduğu için kanda birikir ve kandaki insülinin ortalama % 16'sı pro-insülin olur (pro-insülin karaciğer tarafından uzaklaştırılmaz, böbrekte parçalanır).

Bu çalışmada kontrol aralığı için 10 dakika temel olarak alınmıştır fakat yazılımdaki değerler değiştirilerek farklı kontrol aralıkları ile de simülasyon testleri yapılabilir.

### 3.2.2.e Fizyolojik Süreçlerde Doğal Kontrol

Fizyolojik süreçlerdeki en yaygın kontrol biçimi "geri beslemeli" (feedback) kontroldür ve örnekleri çoktur. İnsülin ve kan şekeri arasındaki bağlantı bu tür bir kontrol örneğidir. Fizyolojik süreçlerdeki kontrol biçimleri açısından, Pozitif Geri Besleme ve Ritmik Endokrin Kontrolü önemli kavramlardır.

Endokrin sistemi, birçok farklı kontrol seviyesi içeren karmaşık (*complex*) moleküler ve metabolik dinamikler sergiler. Hormonlar, endokrin bezleri hiyerarşisinden salınan ve dolaşım yoluyla hücre tipleri hiyerarşisine yayılan kimyasal sinyallerdir.

### 3.2.2.f Pozitif Geri Besleme

Çıktıdaki bir değişim girdide bir değişikliğe neden oluyorsa ve bu değişim çıktıdaki değişimle aynı yöndeysse buna "pozitif geri besleme" (*positive feedback*) denmektedir. Böyle bir süreç, özünde istikrarsız bir süreçtir, ancak böyle bir kontrolün değerli ve gerekli olduğu özel fizyolojik durumlar da vardır. Fizyolojik süreçlerde pozitif geri besleme durumunda, sinyal çıktısı daha fazla yanıt gerekmeden devam eder. Örneğin, bebeklerin meme emmesi buna bir örnektir; emzirme süreci reseptörlerin daha fazla uyarılması, arka hipofizden artan bir oksitosin salınımına ve buna karşılık gelen süt akışına bir artışa neden olur. Uyarının kaldırılması oksitosin salınımının durmasına neden olur.

### 3.2.2.g Ritmik Endokrin Kontrolü

Hormonların pek çok fonksiyonu hormonların ritmik salınımı ile gerçekleşir ve endokrinoloji literatüründe buna "ritmik endokrin kontrolü" (*rhythmic endocrine control*) adı verilmektedir. Bu, bir çeşit ayrı (*discrete*), yani aralıklı, kesikli veya darbeli olarak tanımlanabilecek bir manipülasyon türüdür. Pankreas temel endokrin bezlerinden biridir ve insülin, glukagon, somatostatin hormonları pankreasta üretilir ve salınır; insülin salınımı da atımlı (*pulsatile*) bir salınım şeklinde gerçekleşir. İnsülin salınımı Langerhans adacıklarında, hızlı patlamalar ve ardından durgunluk dönemleri şeklinde aksiyonlarla gerçekleşir. Bu fenomeni niceliksel olarak modellemek için ilk defa 1983 yılında girişimde bulunulmuştur.

### 3.2.2.h Pankreas'ın Kendi Doğal Kontrol Dinamikleri

İnsan pankreası 30 ünite/gün insülini normal yetişkinlerin dolaşımına yaklaşık 5 dakikalık (270 - 324 saniye) aralıklarla "belirgin atımlar halinde" salgılar. Yani, sağlıklı bir yetişkin bireyde, yaklaşık 288 salgılama/gün gerçekleşir ve her seferinde ortalama olarak yaklaşık 0,10417 ünite/salgılama olur. Sağlıklı bir yetişkin bireyde, besin alınından sonra periferik (çevresel) insülin konsantrasyonu 8-10 dakika içinde artar, 30-45 dakikada zirve konsantrasyonlara ulaşır ve daha sonra sonra 90-120 dakika içinde başlangıç değerlerine geriler.

Bu çalışmada aç insanların periferik kanındaki insülinin bazal konsantrasyonu olarak 0,0005 U/dL değeri kullanılmıştır.

### 3.3 DÖRDÜNCÜ DERECE RUNGE KUTTA YÖNTEMİ

Bu çalışmadaki dinamik simülasyonlar C programlama dili kullanılarak hem Birinci Derece Euler İntegrasyonu, hem de Dördüncü derece Runge-Kutta İntegrasyonu yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Yazılan kod Microsoft Windows 10 Pro işletim sistemi ve

Intel(R) Core(TM) i5-7300HQ CPU @ 2.50GHz, 2501 Mhz, 4 Çekirdek, 4 Mantıksal işlemci üzerinde C++ derleyici kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu kodu kullanmak isteyen başka araştırmacıların istedikleri değişkenlerin değerlerini değiştirerek simülasyonlar yapabilmelerini mümkün kılmak için kodun üzerine açıklama satırları eklenmiştir. Kullanılan kod, isteyenler tarafından bu makalenin yazarlarından temin edilebilir.

Dördüncü derece Runge-Kutta yöntemi, adı diferansiyel denklemlerin dinamik simülasyonunda yaygın olarak kullanılan ve yüksek doğruluk sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle doğrusal olmayan sistemlerin simülasyonunda ve kontrol algoritmalarının dijital ortamda uygulanmasında tercih edilir. Euler gibi daha basit yöntemlere göre daha kararlı sonuçlar verdiği için Runge-Kutta yöntemi Euler yöntemine göre daha isabetli sonuçlar verir fakat adımları ve dolayısı ile simülasyon süresi Euler yöntemine göre belirgin şekilde uzundur.

PID gibi sürekli zamanlı kontrol algoritmalarının dijital olarak simülasyonunda da bu yöntem, sistem dinamiklerini daha gerçekçi şekilde temsil ederek, kontrol tepkilerinin doğruluğunu artırır. Bu sayede, simülasyon ortamında sistem davranışları daha güvenilir şekilde gözlemlenebilir. Birinci Derece (*First Order*) bir Adi Diferansiyel Denklem (*Ordinary Differential Equation; ODE*) ile ifade edilen bir prosesin 4ncü Derece Runge Kutta (*4th Order Runge-Kutta*) ile simülasyonunun yapılması aşağıdaki hesaplama basamaklarını içerir.

Birinci Derece Euler yöntemindeki integrasyon aralığı, dt, Dördüncü Derece Ruge-Kutta yönteminde altı parçaya bölünmüş olup, ilk adımda (1/6) dt, ikinci adımda (2/6) dt, üçüncü adımda (2/6) dt ve dördüncü adımda (1/6) dt ilerleme gerçekleşir.

İlerleme toplamda (1/6) dt + (2/6) dt + (2/6) dt + (1/6) dt = (6/6) dt = dt şeklinde gerçekleşmiş olur, yani 4 adımın toplamında dt kadar ilerlenmiş olunur.

4ncü Derece Runge Kutta döngüsündeki dört adım özetle aşağıdaki gibidir. Aşağıdaki denklemlerde  $y_{\text{eski}}$ ,  $y'$ 'nin (kontrol edilen çıktının) hesaplama öncesindeki değeridir;  $y_{\text{yeni}}$ ,  $y'$ 'nin hesaplamalar sonrasındaki yeni değeridir;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  her bir Runge-Kutta adımındaki  $y$  değişim miktarlarıdır. Bu çalışmada, dt değeri yeterince küçük seçildiğinde, Dördüncü Derece Runge-Kutta ile elde edilen değerler ile Birinci Derece Euler ile elde edilen değerler arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir fakat artan hesaplama adımları nedeniyle Dördüncü Derece Runge-Kutta simülasyonu göreceli olarak daha yavaş gerçekleşmiştir.

#### BİRİNCİ ADIM:

$$(dy/dt)_1 = f(y_{\text{eski}})$$

$$k_1 = (dy/dt)_1 (dt/6)$$

$$y_1 = k_1 + y_{\text{eski}}$$

#### İKİNCİ ADIM:

$$(dy/dt)_2 = f(y_1)$$

$$k_2 = (dy/dt)_2 (2 dt)/6$$

$$y_2 = k_2 + y_1$$

#### ÜÇÜNCÜ ADIM:

$$(dy/dt)_3 = f(y_2)$$

$$k_3 = (dy/dt)_3 (2 dt)/6$$

$$y_3 = k_3 + y_2$$

#### DÖRDÜNCÜ ADIM:

$$(dy/dt)_4 = f(y_3)$$

$$k_4 = (dy/dt)_4 (dt/6)$$

$$y_{\text{yeni}} = k_4 + y_3$$

### 3.4 ZAMANLAMA İLE İLGİLİ ÖNEMLİ KAVRAMLAR

Bu çalışmadaki zamanlama ile ilgili bazı önemli kavramlar şunlardır.

#### İNTEGRASYON (TÜREV) ARALIĞI:

Bu çalışmadaki örneklerde integrasyon (türev) aralığı (dt), 0.0000001 (dakikanın on milyonda biri) olarak seçilmiştir fakat pozitif bir gerçek sayı olmak üzere, başka değerler de seçilebilir. Seçilen değer küçüldükçe simülasyon doğruluğu artar fakat simülasyon süresi uzar.

#### ÖRNEKLEME ARALIĞI:

Runge-Kutta ile simüle edilen prostesten ne sıklıkla örnekleme yapıldığını gösterir. Bu çalışmada örnekleme aralığı kontrol aralığı ile aynı (10 dakika) olarak seçilmiştir ama türev aralığından daha büyük ve kontrol aralığından daha küçük bir pozitif gerçek sayı olmak şartıyla istenilen başka değerler de seçilebilir (tercihen, kontrol aralığı örnekleme aralığının pozitif tam sayı bir katı olarak seçilmelidir). Bu çalışmada glikoz sensörünün gecikmesinin (sensörün ölü zaman ve zaman sabiti değerlerinin toplamı) 5 dakika altında olacağı varsayılmıştır ama kullanılacak sensör tipine bağlı olarak bu aralık değiştirilebilir.

#### KONTROL ARALIĞI:

Hangi zaman aralığı ile prosesin manipüle edildiğini gösteren değerdir. Denetçinin çıktısı değiştirmek için yeni bir komut ürettiği bir sonraki ana kadar geçen süredir. Bu süre, kullanılan glikoz sensörünün toplam gecikmesinden (sensörün ölü zaman ve zaman sabiti değerlerinin toplamından) büyük olmalıdır. Bu çalışmada kontrol aralıkları minimum 10 dakika olarak seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan C kodu IMC denetçiyi otomatik olarak tasarlayıp hesaplayabildiği için negatif bir sayı olmamak şartı ile istenilen farklı kontrol aralıkları ile de simülasyonlar yapılabilir.

### 3.5 PROSES PARAMETRELERİ

#### PROSES KAZANCI (*Process Gain*):

Yukarıda daha detaylı açıklandığı üzere bu süreç için, insülin proses kazancı bireysel farklara bağlı olarak -15 mg glikoz / U ile -100 mg glikoz / U arasında değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada insülin proses kazancı -18 mg glikoz / U olarak seçilmiştir. Piyasada ticari olarak satılan insülinler de aktiviteleri açısından doğal insan insülininin aktivitesine göre normalize edilerek satılmaktadırlar. O nedenle, yukarıda daha detaylı açıklandığı üzere, U birimi üzerinden tüm insülin tiplerinde "aktivite" standarttır ve benzerdir. Bu çalışma için glukagon proses kazancı ise 900 mg glikoz / IU olarak seçilmiştir (bu değer, yukarıda da açıklandığı üzere, kişi bazında değil, plazma bazında geçerli olan değerdir).

#### PROSES ZAMAN SABİTİ (*Process Time Constant*):

Yukarıda daha detaylı açıklandığı üzere bir analog insülinin aktivitesinin zirvesine ulaşması insülin türüne göre büyük farklılıklar gösterir. Piyasada 30 dakikada maksimum aktivitesine ulaşan insülin olduğu gibi, 75 dakikada veya daha geç ulaşan analog insülinler de vardır. Gerçek zirve anının tespiti için bu değerlerden ölü zaman sürelerinin de çıkartılması gerekmektedir ki ölü zaman süreleri de yine kullanılan analog insülin türünün bir karakteristiğidir ve kullanılan analog insüline göre değişmektedir. Aktivitenin en yüksek noktasına ulaştığı net süre, bir bükülme (*inflection*) anı olup normal proseslerde zaman sabiti süresinin yaklaşık orta noktasına karşılık gelmektedir. Bu durumda, bir analog insülin için, zaman sabitinin, kullanılan insülinin bükülme (*inflection*) noktasına gelme süresinin yaklaşık iki katına denk geldiği söylenebilir. Bu çalışmada da o şekilde kullanılmıştır. İnsülin aynı zamanda sürekli olarak vücut tarafından eksiltildiği (yarılandığı) için sağlıklı insan vücudunda şeker için (aynı vücut sıcaklığında olduğu gibi) tek bir doğal set değeri veya denge konumu vardır. Bunun dışında çıkıldığında vücut glikozu ya kendisi üretmektedir ya da var olan glikozu depolamaktadır. Bu çalışmadaki simülasyonlarda, karşılaştırılabilirlik açısından, hem insülin, hem de glukagon zaman sabitleri 11,5 dakika olarak seçilmiştir fakat yazılımdaki zaman sabitleri (pozitif bir gerçek sayı olmak şartıyla) istenildiği gibi değiştirilerek farklı zaman sabitleri için simülasyonlar yapılabilir.

#### PROSES ÖLÜ ZAMANI (*Process Dead Time*):

Prosesse bir giriş (*input*) uygulandıktan sonra, sistemin bu girişe gözle görülür bir tepki vermeye başladığı ilk ana kadar geçen süredir. Bu süre kullanılan ticari analog insülin veya analog glukagon tiplerine de bağlı bir süredir. Bu çalışmada, karşılaştırılabilirlik açısından, hem analog insülin ve hem de analog glukagon için 5 dakika olarak seçilmiştir fakat bu değere sensör gecikmesi de eklenmiştir. Yazılımda farklı sensör gecikmesi değerleri kullanılabilir. Bu çalışmada deri altından okuma yapan sensörler için sensör gecikmesi 5 dakika olarak seçilmiştir. Yani, bir deri altı sensörün, tam ve doğru bir ölçüm okuyabilmesi için geçecek olan sürenin 5 dakika olduğu varsayılmıştır. Parmak ucundan kanatarak veya kandan direkt ölçüm yapıldığında kan glikoz değeri için 6-7 saniyede güvenilir bir ölçüm yapılabilir ama taşınabilir çift hormonlu yapay bir pankreas için kandan direkt ölçüm yapmak pratik bir seçenek değildir.

### 3.5.1 TGTÇ Birinci Derece (Ölü Zamansız) Proses İçin

Birinci derece bir sıradan diferansiyel denklem (*Ordinary Differential Equation*) ile ifade edilebilen bir Tek Girdili Tek Çıktılı (TGTÇ) prosesin denklemi genel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir. Bu denklemdeki  $t$  "zaman",  $y$  "çıktı",  $m$  "girdi" değişkenleridir.

$$a \frac{dy}{dt} + b y = c m$$

Denklemdeki  $a$ ,  $b$  ve  $c$  parametreleri  $b$ 'ye bölüldüğünde,  $\tau = a/b$  ve  $K = c/b$  olmak üzere denklem aşağıdaki hale dönüşür.

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = K m$$

yukarıdaki enklemler yeniden düzenlendiğinde

$$\frac{dy}{dt} = \left( \frac{K}{\tau} m - \frac{1}{\tau} y \right) = f(m, y, K, \tau)$$

halinde elde edilebilir. Denklem aşağıdaki şekilde yazılırsa

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_{t+\Delta t} - y_t}{\Delta t} = f(m, y, K, \tau)$$

şu sonuç elde edilir:

$$y_{t+\Delta t} = f(m, y, K, \tau) \Delta t + y_t$$

daha açık şekilde yazılırsa şöyle olur

$$y_{t+\Delta t} = \left( \frac{K}{\tau} m_t - \frac{1}{\tau} y_t \right) \Delta t + y_t$$

Yukarıdaki diferansiyel denklem ile ifade edilen bir prosesin sürekli dinamik simülasyonu, Birinci Derece Euler İntegrasyonu veya Dördüncü Derece Runge-Kutta İntegrasyonu gibi yöntemlerle, yukarıdaki eşitlikten faydalanılarak yapılabilir.

Eşitlikteki  $\Delta t$  değeri, integrasyon aralığına ( $dt$ ) karşılık gelmektedir ve simülasyonda olabildiğince ufak bir pozitif sabit sayı olarak seçilmesi simülasyon hassasiyetini artırır ama eğer proseste ölü zaman ( $t_d$ ) da varsa, yukarıdaki denklemler aşağıdaki formlara dönüşecektir.

### 3.5.2 TGTÇ Birinci Derece (Ölü Zamanlı) Proses İçin

$$\frac{dy}{dt} = \left( \frac{K}{\tau} m_{t-t_d} - \frac{1}{\tau} y_t \right) = f(m, y, K, \tau, t_d)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_{t+\Delta t} - y_t}{\Delta t} = f(m, y, K, \tau, t_d)$$

$$y_{t+\Delta t} = f(m, y, K, \tau, t_d) \Delta t + y_t$$

daha açık şekilde

$$y_{t+\Delta t} = \left( \frac{K}{\tau} m_{t-t_d} - \frac{1}{\tau} y_t \right) \Delta t + y_t$$

### 3.5.3 Transfer Fonksiyonu Derivasyonları

#### TGTÇ Birinci (Ölü Zamansız) Proses İçin Transfer Fonksiyonu Derivasyonu

Birinci derece bir sıradan diferansiyel denklem (*Ordinary Differential Equation*) ile ifade edilebilen Tek Girdili Tek Çıktılı (TGTÇ) ölü zamansız bir prosesin transfer fonksiyonu Laplace transformasyonu yoluyla şu şekilde türetilmektedir:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = K m$$

$$\tau L \left[ \frac{dy}{dt} \right] + L [y] = K L [m]$$

$$\tau s L [y(t)] + L [y(t)] = K L [m(t)]$$

$$(\tau s + 1) L [y(t)] = K L [m(t)]$$

$$\frac{L [y(t)]}{L [m(t)]} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

$$\bar{g}_{\text{proses}}(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{m}(s)} = \frac{K_{\text{proses}}}{\tau_{\text{proses}} s + 1}$$

Yukarıdaki  $y$  ve  $m$  değişkenlerinin sapma değişkenleri (*deviation variables*) olduklarının belirtilmesi için değişkenler  $y$  ve  $m$  üstü çizgili şekilde gösterilmişlerdir.

#### TGTÇ Birinci Derece (Ölü Zamansız) Proses İçin Ayrık Transfer Fonksiyonu Derivasyonu

Yukarıda ölü zamansız ve ölü zamanlı prosesler için gösterilmiş olan denklemler Birinci Derece Euler İntegrasyonu veya Dördüncü Derece Runge-Kutta İntegrasyonu gibi yöntemler ile sürekli dinamik simülasyon yapmakta gerçek prosesi temsilen kullanılabilir. Gerçek prosesin üzerinde yapılacak olan kontrol simülasyonları içinse vurgulu bir modele ihtiyaç vardır. Özellikle model- proses uyumsuzluklarının testi için vurgulu (kesikli) bir model gereklidir.

Birinci derece, ölü zamansız bir Tek Girdili Tek Çıktılı (*Single Input Single Output - SISO*) prosesin HOLD eklenmemiş ayrık transfer fonksiyonu şöyle elde edilebilir.

$$y(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} m(s)$$

$$\mathcal{Z} \left[ \frac{1}{s + a} \right] = \frac{1}{1 - e^{-aT} z^{-1}}$$

olduğu için

$$\mathcal{Z} \left[ \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \right] = \mathcal{Z} \left[ \frac{K_p / \tau_p}{s + 1 / \tau_p} \right] = \frac{K_p / \tau_p}{1 - e^{-T / \tau_p} z^{-1}}$$

olur ( $T$ : örnekleme aralığı). Bu prosesin Sıfır Derece HOLD eklenmiş ayrık transfer fonksiyonu ise şöyle olacaktır,

$$\frac{y}{m} = Hg_p(z) = \frac{K_p (1 - e^{-T / \tau_p}) z^{-1}}{1 - e^{-T / \tau_p} z^{-1}}$$

#### TGTÇ Birinci Derece (Ölü Zamanlı) Proses İçin Ayrık Transfer Fonksiyonu Derivasyonu

Birinci derece, ölü zamanlı, Tek Girdili Tek Çıktılı (*Single Input Single Output - SISO*) bir prosesin transfer fonksiyonu ise şöyledir.

$$y(s) = \frac{K_p e^{-t_d s}}{\tau_p s + 1} m(s)$$

ve bu prosesin HOLD eklenmiş  $z$ -transformu da şöyle olur. Burada genellikle ( $t_d = k T$ ) olarak seçilir ( $k$ , pozitif bir tam sayıdır).

$$\frac{y}{m} = Hg_p(z) = z^{-k} K_p \left[ \frac{(1 - e^{-T / \tau_p}) z^{-1}}{1 - e^{-T / \tau_p} z^{-1}} \right]$$

### 3.5.4 IMC Tasarımları

Transfer fonksiyonları matrisleri, gerektirdiği durumlarda, tersi gerçek denetçi veren ( $G_M$ ) ve tersi sanal denetçi veren ( $G_{M+}$ ) fraksiyonların çarpımları şeklinde de ifade edilebilirler.

$$HG_p(z) = G_M = G_{M-} G_{M+}$$

Bu durumda, Model Öngörülü Denetçi (MPC) tasarımı

$$G_{MPC}(z) = G_{M-}^{-1}(z) F(z)$$

veya

$$G_{MPC} = G_M^{-1}(z) G_{M+}(z) F(z)$$

şeklinde olur.

$$G_M^{-1}(z) = G_{M-}^{-1}(z) G_{M+}^{-1}(z)$$

eşitliğinin her iki tarafı da  $G_{M+}(z)$  ile çarpılırsa  $G_M^{-1}(z) G_{M+}(z) = G_{M-}^{-1}(z) G_{M+}^{-1}(z) G_{M+}(z) = G_{M-}^{-1}(z) I(z)$  olacağı için ( $I$ : birim (*identity*) matris), bu denetçi  $G_{MPC} = G_M^{-1}(z) G_{M+}(z) F(z)$  formunda da olabilmektedir. Yukarıdaki denklemlerde yer alan  $F(z)$ , yani filtre, genellikle

$$F(z) = \begin{vmatrix} \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha) z^{-1}} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha) z^{-1}} \end{vmatrix}$$

şeklinde seçilen bir diyagonal filtredir. İdeal şartlarda, IMC formunda bir MPC denetçi, modelin tersine eşittir. Yani

$$G_{MPC} = G_M^{-1}(z) F(z)$$

fakat, bazı özel durumlarda, tersi hayali (*imaginary*) denetçiler veren bir modelin “gerçek” ve “hayali” fraksiyonlarına ayrılması gerekebilir.

Çok değişkenli prosesler için ölü zamanları açısından karmaşık durumlar yaratan özel modelleri fraksiyonlarına ayırmak için kullanılabilen farklı yöntemler literatürde vardır fakat bu örnekteki modelin fraksiyonlarına ayrılması aşağıda görüleceği şekilde yapılabilir.

### 3.5.5 Diyabetes Mellitus (TİP I) için IMC Tasarımı

Bu çalışmada, aşırı tepki (*overreaction*) sonucu oluşabilecek olan ve tıbbi bir acil ve tehlikeli durum olarak kabul edilen “hipoglisemi” riskine karşı insülin etkisine ters yönde bir manipülasyon aracı olarak glukagon kullanılması öngörülmüştür. Vücutun kendisinin aynı amaçla doğal olarak kullandığı ajan da glukagon hormonudur. Dışarıdan verilen glukagon hormonu için de insülininkine benzer bir ölü zaman vardır ve bu ölü zamanın “hipoglisemi” gibi tıbbi bir aciliyet durumunda risk yaratması ihtimali doğal olarak söz konusudur. O nedenle hem daha ekonomik olan, hem de kontrol edilen çıktıyı dolaylı olarak değil de, direkt olarak değiştirebilen glikoz enjeksiyonu tercih edilebilir fakat bu sadece aciliyet durumunda (kan şekerinin 45’in altına düşmesi durumu için) bir acil müdahale aracı olarak öngörülmelidir, sürekli bir manipülasyon aracı olarak kullanılması pratik olmamaktadır.

Yukarıda da belirtildiği ve ifade edildiği gibi, birinci derece bir sıradan diferansiyel denklem (Ordinary Differential Equation) ile ifade edilebilen bir Tek Girdili Tek Çıktılı (TGTC) ölü zamanlı prosesin denklemi genel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir. Bu denklemdeki  $t$  “zaman”,  $y$  “çıkıtı”,  $m$  “girdi” değişkenleridir.

$$y_{t+\Delta t} = \left( \frac{K}{\tau} m_{t-t_d} - \frac{1}{\tau} y_t \right) \Delta t + y_t$$

Buna karşılık gelen Laplace transfer fonksiyonu da tabi ki şudur:

$$\frac{y}{m} = HG_p(z) = z^{-k} K_p \left[ \frac{(1 - e^{-T/\tau_p}) z^{-1}}{1 - e^{-T/\tau_p} z^{-1}} \right]$$

Burada genellikle  $t_d = kT$  olarak seçilir ( $k$ , pozitif bir tam sayıdır) ve  $T$  de kontrol aralığıdır.

Yukarıda da belirtildiği gibi bir transfer fonksiyonu (veya transfer fonksiyonları matrisi), gerektirdiği durumlarda, tersi gerçek denetçi veren ( $G_M$ ) ve tersi sanal denetçi veren ( $G_{M+}$ ) fraksiyonların çarpımları şeklinde de ifade edilebilir.

$$HG_p(z) = G_M = G_{M-} G_{M+}$$

Bu durumda, Model Öngörülü Denetçi (MPC) tasarımı

$$G_{MPC}(z) = G_{M-}^{-1}(z) F(z)$$

veya

$$G_{MPC}(z) = G_M^{-1}(z) G_{M+}(z) F(z) \quad (3.33)$$

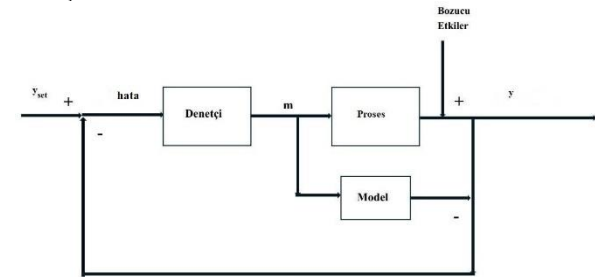
şeklinde olur. Bir filtre de,  $F(z)$ , proses ile model arasındaki uyumsuzluklardan çıkabilecek sorunların azaltılması için eklenmelidir ve genellikle şu formda kullanılır.

$$F(z) = \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha) z^{-1}}$$

Yukarıdaki HOLD eklenmiş kesikli transfer fonksiyonu gerçek denetçi veren fraksiyonuna ayrıştırılıp uygun bir filtre de eklenirse, IMC denetçi elde edilmiş olur.

Bu tür bir denetçi, stabil olan her proses için kusursuz denetçiyi verir ama esas üstünlüğü proses ile model arasındaki farkları HATA (*ERROR*) değerine eklemesi nedeniyle proses-model uyumsuzluğundan kaynaklanan sorunları azaltmasıdır.

Bu çalışmada, MODEL, transfer fonksiyonu ve transfer fonksiyonunun HOLD eklenmiş kesikli fonksiyonu kullanılarak temsil edilmiştir. IMC denetçi, MODEL kullanılarak tasarlanmıştır (modelin tersine filtre eklenmesi ile). IMC yöntemi, proses-model uyumsuzluğunu hataya ekleyen bir yöntem olduğundan dolayı denetçi oldukça başarılı sonuç vermiştir.



Şekil 3.1. IMC denetçi döngüsü.

### 3.5.6 PID Kuramı ve Tasarımı

PID denetçiler adını Proportional-Integral-Derivative sözcüklerinin baş harfleri olan P-I-D harflerinden alır. Türkçe olarak Oransal-İntegral-Türevsel Denetçi olarak da ifade edilen bu denetçilerde “oransal” sözcüğü “manipüle edilen girdinin” “hataya oranla”, “integral” sözcüğü “manipüle edilen girdinin” “hatanın integraline oranla” ve “türevsel” sözcüğü de “manipüle edilen girdinin” “hatanın türevine oranla” manipüle edildiği anlamlarına gelir.

Hata (*error*), set değeri ile gerçek değer arasındaki farktır. Set değerinden gerçek değer çıkarılması ile hesaplandığı için pozitif veya negatif bir sayı olabilir.

Hatanın integrali, bir kontrol aralığı süresince set değeri eğrisi ile gerçek değer eğrisi arasındaki birikmiş olan alandır. Hatanın integrali kullanılırken, en son kontrol aralığı süresince “zamana karşı” birikmiş olan bu hata miktarı kullanılır. Bu değer, set değerinden gerçek değer çıkarılması ve sonra da sonucun kontrol aralığı ile çarpılması yoluyla hesaplandığı için pozitif veya negatif olabilir. Kontrol aralığının çok geniş olduğu durumlarda, bu hesaplamada mevcut hatanın bir önceki hata ile ortalaması da kullanılabilir.

Hatanın türevi, bir kontrol aralığı sonunda elde edilmiş olan gerçek değer ile o kontrol aralığının başında elde edilmiş olan gerçek değer arasındaki farkın kontrol aralığına bölünmesi ile elde edilir. Bu hesaplamanın yapılabilmesi için bir önceki gerçek değer hafızada “saklanmış” olması gerekir.

PID denetçilerde bir oransal denetleme sabitinin var olması şarttır. O nedenle, tek başına I, D veya ID denetçiler tasarlanamaz.

**Denklem olarak, PID denetçi, piyasada da kullanıldığı şekliyle, en basit olarak aşağıdaki iki eşitlikle ifade edilebilir:**

$$\begin{aligned} \text{(manipüle edilen girdideki fark)} &= [(\text{oransal denetçi sabiti}) \times (\text{hata})] + \\ & [(\text{oransal denetçi sabiti}) \times (\text{hatanın integrali}) / (\text{integral denetçi sabiti})] + \\ & [(\text{oransal denetçi sabiti}) \times (\text{türevsel denetçi sabiti}) \\ & \times (\text{hatanın türevi})] \end{aligned}$$

$$\text{(manipüle edilen girdinin yeni değeri)} = \text{(manipüle edilen girdinin eski değeri)} + \text{(manipüle edilen girdideki fark)}$$

Sadece oransal-integral (PI) denetçi kullanıldığında ise, yukarıdaki ilk eşitlik şu şekli almaktadır:

$$\text{(manipüle edilen girdideki fark)} = [(\text{oransal denetçi sabiti}) \times (\text{hata})] + [(\text{oransal denetçi sabiti}) \times (\text{hatanın integrali}) / (\text{integral denetçi sabiti})]$$

### 3.5.6 İnsülin ve Glukagon Kinetiği

İnsülinin ve glukagonun kandaki glikoz değişimi üzerindeki etkisi, ticari olarak satılan analog insülin ve glukagon ürünlerin kinetik parametreleri üzerinden, en basit şekliyle aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir. Bu denklemlerde  $K_{\text{insülin}}$ ,  $K_{\text{glukagon}}$ ,  $\tau_{\text{insülin}}$ ,  $\tau_{\text{glukagon}}$ ,  $m_{(\text{insülin})}$ ,  $m_{(\text{glukagon})}$ ,  $Y_{(\text{glikoz})}$ ,  $dt$  sırasıyla insülin kazancı, (mg glikoz)/(U insülin), glukagon kazancı, (mg glikoz)/(IU glukagon), insülin zaman sabiti, (dakika), glukagon zaman sabiti, (dakika), plazma insülin konsantrasyonu, (U/dL), plazma glukagon konsantrasyonu, (IU/dL), plazma glikoz konsantrasyonu, (mg glikoz)/dL, türev/simülasyon aralığı, (dakika), değerleridir.

$$\frac{dy_{(\text{glikoz})}}{dt} = \frac{K_{\text{insülin}}}{\tau_{\text{insülin}}} m_{(\text{insülin})} - \frac{1}{\tau_{\text{insülin}}} Y_{(\text{glikoz})}$$

$$\frac{dy_{(\text{glikoz})}}{dt} = \frac{K_{\text{glukagon}}}{\tau_{\text{glukagon}}} m_{(\text{glukagon})} - \frac{1}{\tau_{\text{glukagon}}} Y_{(\text{glikoz})}$$

Denge konumundayken, matematiksel olarak, birim zaman içerisinde insülin tarafından plazmadan uzaklaştırılan glikoz miktarı ile glukagon tarafından kazandırılan glikoz miktarının aynı olması gerekmektedir. Örneğin,  $K_{\text{insülin}} = -18$  (mg glikoz)/(U insülin) ise ve  $K_{\text{glukagon}} = 900$  (mg glikoz)/(IU glukagon) ise ve birim zamanda (dakika) uzaklaştırılan ve kazandırılan glikoz miktarı  $\pm 0,009$  (mg glikoz / dL) / (dakika) ise  $m_{(\text{insülin})} = 0,0005$  U/dL ve  $m_{(\text{glukagon})} = 0,00001$  IU/dL olacaktır ve kan şekeri seviyesi vücudun doğal set değerinde sabit kalacaktır. Bu çalışmadaki simülasyonlarda vücudun plazma açlık doğal set değeri,  $y_{\text{set}}$ , 90 mg glikoz/dL olarak kabul edilmiştir fakat şu unutulmamalıdır ki hem insülinin, hem de glukagonun yarılanma süreleri vardır ve bu nedenle kontrol aralıkları arasındaki sürelerde  $m_{(\text{insülin})}$  ve  $m_{(\text{glukagon})}$  değerleri sabit kalmazlar ve salınım gösterirler. Simülasyonlardaki (yazılımlardaki) örnekleme aralıkları kontrol aralıklarından daha kısa alındıklarında, manipüle edilen girdilerdeki bu salınımlar da grafiksel olarak gözlemlenebilir. Manipüle edilen girdilerdeki

yarılanma kinetiği, kimya mühendisliğinde de yaygın şekilde kullanılmakta olan aşağıdaki yarılanma denklemiyle ifade edilmiştir ve simülasyon yazılımında kullanılmıştır. Denklemlerdeki  $T_{1/2, \text{insülin}}$  ve  $T_{1/2, \text{glukagon}}$  değerleri insülin ve glukagonun dakika olarak yarılanma süreleridir. Denklemdeki  $dt$  simülasyon aralığıdır.

$$m_{(\text{insülin}), \text{yeni}} = m_{(\text{insülin}), \text{eski}} e^{(- \ln 2 / T_{1/2, \text{insülin}}) \times dt}$$

$$m_{(\text{glukagon}), \text{yeni}} = m_{(\text{glukagon}), \text{eski}} e^{(- \ln 2 / T_{1/2, \text{glukagon}}) \times dt}$$

Bu çalışmadaki grafiklerde, kullanılan yöntemlerin daha iyi karşılaştırılabilmesi amacıyla, açlık denge konumu kan şekeri toleransı (gerçek kan şekeri değerinin kan şekeri set değerinin ne kadar altında veya üstünde olabileceği)  $\pm 0,6$  mg glikoz/dL olarak alınmıştır ama bu oldukça dar bir aralıktır. Tolerans değeri, örneğin,  $\pm 10,0$  mg glikoz/dL olarak da alınabilir ve o zaman kan şekeri set değeri 90 mg glikoz/dL ise, kan şekeri 80-100 mg glikoz/dL arasında tutulacak demektir.

Hem IMC denetleyici, hem de PID denetleyici için, kan şekerinin “yüksek” ve “düşük” olduğu durumlarda/bölgelerde birbirlerine ters yönde kazançlara sahip iki farklı aracın kullanılması gerekeceğinden (insülin ve glukagon), set değerinin üzerindeki kan şekeri değerleri için “insülin”, set değerinin altındaki kan şekeri değerleri için de “glukagon” kullanılması zorunludur (vücudun doğal kontrol mekanizması da bu şekildedir). Bu iki farklı aracın farklı kinetikleri olduğundan ve farklı bölgelerde çalıştıklarından, yüksek ve düşük kan şekeri için de aynı şekilde çalışan ama farklı ayar değerleri olan denetleyicilerin kullanılması zorunludur. Bu çalışmada da öyle yapılmıştır. Aşırı hormon salınımı, yukarıda açıklandığı üzere, vücut tarafından doğal olarak üretilen üçüncü bir enzim aracılığıyla sınırlandırılmaktadır ama bu çalışmadaki türde çift hormonlu bir yapay pankreas uygulamasında, bu sınırlandırma, çok kolayca, alt ve üst hormon konsantrasyonları için tanımlanmış olan limit değerleri ile yapılabilir. Bu çalışmadaki üst sınırların değerleri simülasyonlarda isteğe göre değiştirilebilir.

Bir model, en iyi şartlarda dahi gerçek sürecin (prosesin) bir tahminidir ve en iyi şartlarda dahi simülasyon tepkileri ile gerçek proses tepkileri arasında az veya çok bir model-proses uyumsuzluğu beklenmelidir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla ilgili olarak da bu geçerlidir.

## 4. BULGULAR

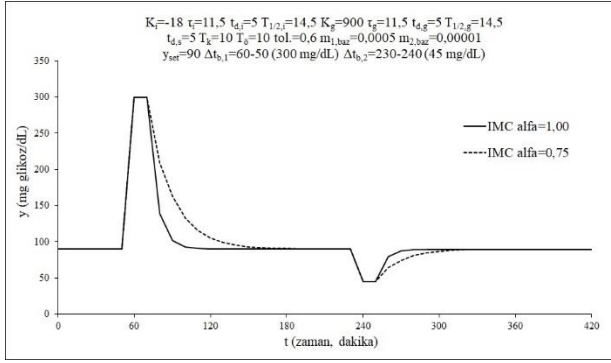
Bu bölümde, yapılan simülasyonlardan seçilmiş olan bazı karşılaştırmalı örneklerin grafikleri yer almaktadır. Tam bir karşılaştırmanın mümkün olmasının sağlanması için insülin ve glukagon proses kinetikleri için kullanılan zamanlarla ilgili bazı değerler (zaman sabitleri, ölü zamanlar ve yarılanma süreleri) geçerli aralıklarda ama benzer seçilmiştir.

PID için oransal denetleyici sabiti seçilirken de, kan şekeri seviyesini hipoglisemi bölgesine belirgin şekilde indirmeyen en yüksek değer seçilmiştir fakat aşağıdaki grafiklerde de görüleceği üzere, PID performansı IMC performansına çok yaklaşmış olmasına rağmen, IMC kan şekerini hipoglisemi bölgesine indirmeden, ama PID’ye görecek olarak daha hızlı şekilde düzenleyebilmektedir. Bu simülasyonlarda kullanılan kontrol aralıkları 10 dakikadır. Ekteki yazılımlar kullanılarak burada yer alan değerlerden farklı değerler için de bu simülasyonlar tekrarlanabilir. İlgili grafikler aşağıdadır. Öncelikle aşağıda şu üç karşılaştırmalı simülasyonun grafiklerine yer verilmiştir:

Şekil 4.1.a. IMC denetleyici performansı üzerindeki filtre etkisi (ÇIKTI), Şekil 4.1.b. IMC denetleyici performansı üzerindeki filtre etkisi (GİRDİ, insülin), Şekil 4.1.c. IMC denetleyici performansı üzerindeki filtre etkisi (GİRDİ, glukagon).

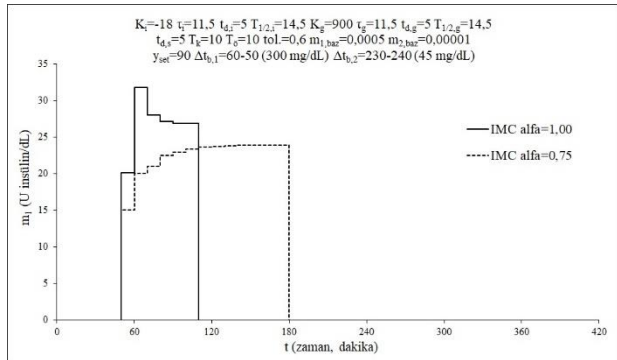
Şekil 4.2.a. PID denetleyici performansı üzerindeki oransal denetçi kazanç etkisi (ÇIKTI), Şekil 4.2.b. PID denetleyici performansı üzerindeki oransal denetçi kazanç etkisi (GİRDİ, insülin), Şekil 4.2.c. PID denetleyici performansı üzerindeki oransal denetçi kazanç etkisi (GİRDİ, glukagon).

Şekil 4.3.a. IMC ve PID karşılaştırması (ÇIKTI), Şekil 4.3.b. IMC ve PID karşılaştırması (GİRDİ, insülin), Şekil 4.3.c. IMC ve PID karşılaştırması (GİRDİ, glukagon).



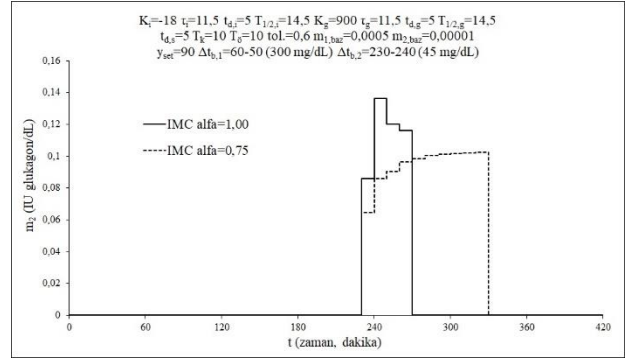
**Şekil 4.1.a.** IMC denetleyici performansı üzerindeki filtre etkisi. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı ikinci girdi (plazma glukoz seviyesi) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glukoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glukoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örneklem aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açlık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glukoz/dL; açlık denge konumu kan şekeri toleransı (tol.) = ± 0,6 mg glukoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; IMC denetleyici filtre sabiti  $\alpha$  (alfa) = 1,00 veya 0,75.

Bu örnek simülasyonda (Şekil 4.1.a.), filtre sabiti ( $\alpha$ ) değerleri 1,00 ve 0,75 için, kontrol edilen çıktı (plazma glukoz seviyesi) üzerindeki IMC performansı karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Glukoz seviyesinin, bir bozucu etki formunda, önce 300 mg/dL değerine, sonra da 45 mg/dL değerine ulaşması üzerine IMC denetçinin kan şekeri seçilmiş set değeri olan 90 mg/dL değerine getirmesi, filtre sabiti ( $\alpha$ ) değerleri 1,00 ve 0,75 için, görülmektedir. Beklenebileceği üzere filtre sabiti ( $\alpha$ ) değeri 0,75 olarak alındığında daha gecikmeli bir performans söz konusudur. Her iki filtre değeri için de, dual (çift) hormon (insülin ve glukagon) kullanılarak yapılan bu bozucu etkiye karşı kontrolde aşırı tepki (*overshoot*) gözlenmemiş olması, kontrol performansının açısından bir başarı olarak değerlendirilebilir. Kan şekeri tehlikeli 45 mg/dL değerine ulaştığı durumda hastaya glukagon dışında ayrıca glukoz da verilmesi söz konusudur fakat bu simülasyonda kontrol performansını gözlemleyebilmek açısından, kan şekeri  $< 90$  mg/dL olduğu durumda sadece glukagon uygulanmıştır.



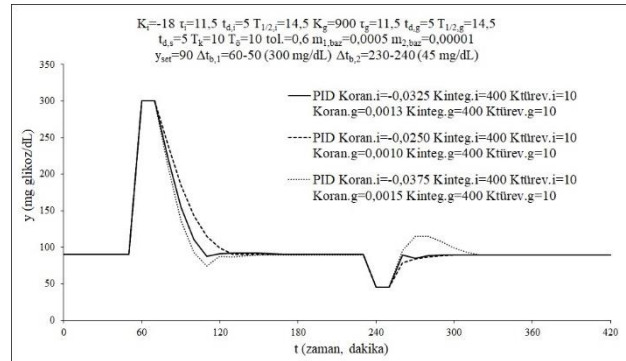
**Şekil 4.1.b.** IMC denetleyici performansı üzerindeki filtre etkisi. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı birinci girdi (insülin) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glukoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glukoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örneklem aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açlık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glukoz/dL; açlık denge konumu kan şekeri toleransı (tol.) = ± 0,6 mg glukoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; IMC denetleyici filtre sabiti  $\alpha$  (alfa) = 1,00 veya 0,75.

Yukarıdaki şekilde (Şekil 4.1.b.), Şekil 4.1.a'da yer alan çıktıların manipüle edilen insülin girdisi değerleri görülmektedir. Yukarıdaki örnek simülasyonda, filtre sabiti ( $\alpha$ ) değerleri 1,00 ve 0,75 için, kontrol edilen çıktı (plazma glukoz seviyesi) üzerindeki IMC performansı karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Glukoz seviyesinin, bir bozucu etki formunda, önce 300 mg/dL değerine, sonra da 45 mg/dL değerine ulaşması üzerine IMC denetçinin kan şekeri seçilmiş set değeri olan 90 mg/dL değerine getirmesi, filtre sabiti ( $\alpha$ ) değerleri 1,00 ve 0,75 için, görülmektedir.



**Şekil 4.1.c.** IMC denetleyici performansı üzerindeki filtre etkisi. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı ikinci girdi (glukagon) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glukoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glukoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örneklem aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açlık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glukoz/dL; açlık denge konumu kan şekeri toleransı (tol.) = ± 0,6 mg glukoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; IMC denetleyici filtre sabiti  $\alpha$  (alfa) = 1,00 veya 0,75.

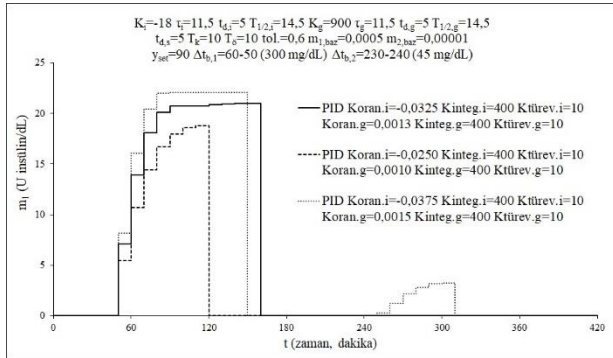
Bu şekilde (Şekil 4.1.c.), Şekil 4.1.a'da yer alan çıktıların manipüle edilen glukagon girdisi değerleri görülmektedir. Yukarıdaki örnek simülasyonda, filtre sabiti ( $\alpha$ ) değerleri 1,00 ve 0,75 için, kontrol edilen çıktı (plazma glukoz seviyesi) üzerindeki IMC performansı karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Glukoz seviyesinin, bir bozucu etki formunda, önce 300 mg/dL değerine, sonra da 45 mg/dL değerine ulaşması üzerine IMC denetçinin kan şekeri seçilmiş set değeri olan 90 mg/dL değerine getirmesi, filtre sabiti ( $\alpha$ ) değerleri 1,00 ve 0,75 için, görülmektedir.



**Şekil 4.2.a.** PID denetleyici performansı üzerindeki oransal denetçi kazancı etkisi. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı ikinci girdi (plazma glukoz seviyesi) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glukoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glukoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örneklem aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açlık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glukoz/dL; açlık denge konumu kan şekeri toleransı (tol.) = ± 0,6 mg glukoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; insülin için integral denetleyici sabiti ( $K_{integ.i}$ ) = 400; insülin için türevsel denetleyici sabiti ( $K_{türev.i}$ ) = 10; glukagon için oransal denetleyici sabiti ( $K_{oran.g}$ ) = 0,0013 veya 0,0010 veya 0,0015; glukagon için integral denetleyici sabiti ( $K_{integ.g}$ ) = 400; glukagon için türevsel denetleyici sabiti ( $K_{türev.g}$ ) = 10.

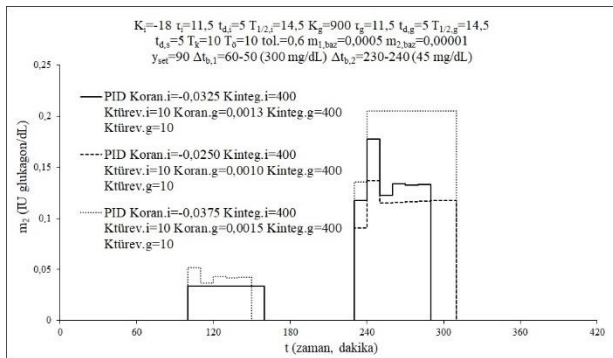
Bu örnek simülasyonda (Şekil 4.2.a.), oransal denetçi kazancı ( $K_{oran,i}$ ) değerleri -0,0325, -0,0250 ve -0,0375 için, kontrol edilen çıktı (plazma glukoz seviyesi) üzerindeki PID performansını karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Glukagon mekanizması için oransal denetçi kazancı,  $K_{oran,glukagon} = -K_{oran,i}/25,0$  olarak seçilmiştir. Glukoz seviyesinin, bir bozucu etki formunda, önce 300 mg/dL değerine, sonra da 45 mg/dL değerine ulaşması üzerine PID denetçinin kan şekeri seçilmiş set değeri olan 90 mg/dL değerine getirmesi, oransal denetçi kazancı ( $K_{oran,i}$ ) değerleri -0,0325, -0,0250 ve -0,0375 için görülmektedir. Beklenebileceği üzere oransal denetçi kazancı (kazancın mutlak değeri) azaltıldığında daha gecikmeli bir performans söz konusudur. Denetçi kazancı çok artırıldığında, dual (çift) hormon (insülin ve glukagon) kullanılarak yapılan bu bozucu etkiye karşı kontrolde aşırı tepki (*overshoot*) gözlenmemektedir ve bu durum kazanç değerinin seçiminde

dikkatli olmak gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durumda da, kan şekerinin tehlikeli 45 mg/dL değerine ulaştığı durumda hastaya glukagon dışında ayrıca glikoz da verilmesi söz konusudur fakat bu simülasyonda da kontrol performansını gözlemleyebilmek açısından, kan şekerinin < 90 mg/dL olduğu durumda sadece glukagon uygulanmıştır.



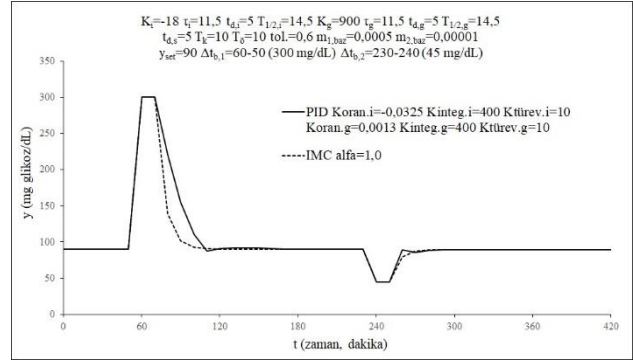
**Şekil 4.2.b.** PID denetleyici performansı üzerindeki oransal denetçi kazanç etkisi. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı birinci girdi (insülin) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glikoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glikoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örnekleme aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glikoz/dL; açık denge konumu kan şekeri toleransı ( $tol$ ) =  $\pm 0,6$  mg glikoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; insülin için oransal denetleyici sabiti (Koran.i) = -0,0325 veya -0,0250 veya -0,0375; insülin için integral denetleyici sabiti (Kinteg.i) = 400; insülin için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.i) = 10; glukagon için oransal denetleyici sabiti (Koran.g) = 0,0013 veya 0,0010 veya 0,0015; glukagon için integral denetleyici sabiti (Kinteg.g) = 400; glukagon için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.g) = 10.

Yukarıdaki grafikte Şekil 4.2.a'daki çıktıları üreten insülin girdisi görülmektedir. Denetçi oransal kazancı çok yükseltildiğinde (-0,0375 olduğunda) oluşan aşırı tepkiye neden olan girdideki yükselme grafik üzerinde açıkça görülebilmektedir.



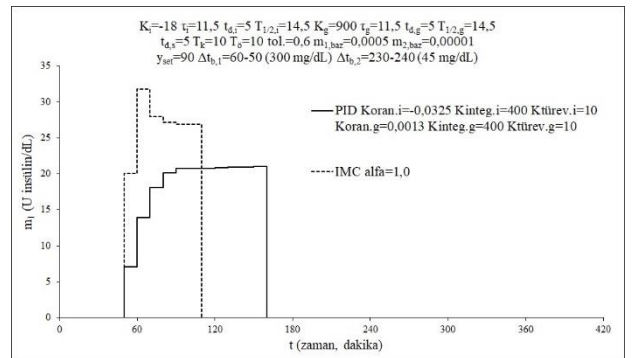
**Şekil 4.2.c.** PID denetleyici performansı üzerindeki oransal denetçi kazanç etkisi. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı ikinci girdi (glukagon) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glikoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glikoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örnekleme aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glikoz/dL; açık denge konumu kan şekeri toleransı ( $tol$ ) =  $\pm 0,6$  mg glikoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; insülin için oransal denetleyici sabiti (Koran.i) = -0,0325 veya -0,0250 veya -0,0375; insülin için integral denetleyici sabiti (Kinteg.i) = 400; insülin için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.i) = 10; glukagon için oransal denetleyici sabiti (Koran.g) = 0,0013 veya 0,0010 veya 0,0015; glukagon için integral denetleyici sabiti (Kinteg.g) = 400; glukagon için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.g) = 10.

Bu şekilde (Şekil Şekil 4.2.c), Şekil 4.2.a'da yer alan çıktıların manipüle edilen glukagon girdisi değerleri görülmektedir. Bu örnek simülasyonda, oransal denetçi kazancı (Koran,i) değerleri - 0,0325, -0,0250 ve -0,0375 için, kontrol edilen çıktı (plazma glikoz seviyesi) üzerindeki PID performansını karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Glukagon mekanizması için oransal denetçi kazancı,  $Koran.glukagon = -Koran,i/25,0$  olarak seçilmiştir. Glikoz seviyesinin, bir bozucu etki formunda, önce 300 mg/dL değerine, sonra da 45 mg/dL değerine ulaşması üzerine PID denetçinin kan şekerini seçilmiş set değeri olan 90 mg/dL değerine getirmesi, oransal denetçi kazancı (Koran,i) değerleri -0,0325, -0,0250 ve -0,0375 için görülmektedir.



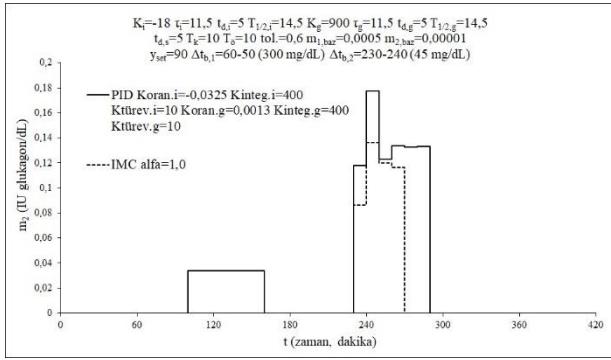
**Şekil 4.3.a.** IMC ve PID karşılaştırması. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı çıktı (plazma glikoz seviyesi) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glikoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glikoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örnekleme aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glikoz/dL; açık denge konumu kan şekeri toleransı ( $tol$ ) =  $\pm 0,6$  mg glikoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; IMC denetleyici filtre sabiti  $\alpha$  (alfa)=1,00; insülin için oransal denetleyici sabiti (Koran.i) = -0,0325; insülin için integral denetleyici sabiti (Kinteg.i) = 400; insülin için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.i) = 10; glukagon için oransal denetleyici sabiti (Koran.g) = 0,0013; glukagon için integral denetleyici sabiti (Kinteg.g) = 400; glukagon için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.g) = 10.

Bu örnek simülasyonda (Şekil 4.3.a), IMC ve PID denetçi performansları karşılaştırılmıştır. Performans karşılaştırılması için IMC'deki filtre devreden çıkartılmıştır ( $\alpha=1,00$  olarak alınmıştır). PID için de  $K_{oransal,i} = -0,0325$  olarak alınmıştır ( $K_{oransal,glukagon} = -K_{oransal,insülin}/25,0$ ). Bu tür bir proses için standart bir PID ayar (*tuning*) yöntemi mevcut olmadığından dolayı -0,0325 değeri simülasyonlarla belirlenmiştir. Değer belirleme sürecinde, önce geniş aralıklarla üç farklı kazanç değeri için simülasyonlar yapılmış, sonra en yüksek performansı veren değer aralığı için aralıkların daraltılması yöntemi uygulanmıştır. Aynı yöntem, yeterli sayıda simülasyon yapılarak, en uygun integral ve türevsel denetçi sabitlerinin bulunması için de uygulanmıştır. Bu şekilde ulaşılabilen en başarılı değerler üzerinden bu grafikteki karşılaştırma yapılmıştır. Her iki denetçinin de başarılı sonuç verdiğinin gözlemlenmesine rağmen IMC denetçinin çıktıyı aşırı tepki (*overshoot*) vermeden daha hızlı şekilde set değerine ulaşmasını daha yüksek bir başarı olarak kabul edilebilir.



**Şekil 4.3.b.** IMC ve PID karşılaştırması. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı birinci girdi (insülin) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glikoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glikoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_k$ ) = 10 dakika; örnekleme aralığı ( $T_s$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glikoz/dL; açık denge konumu kan şekeri toleransı ( $tol$ ) =  $\pm 0,6$  mg glikoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta b_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; IMC denetleyici filtre sabiti  $\alpha$  (alfa)=1,00; insülin için oransal denetleyici sabiti (Koran.i) = -0,0325; insülin için integral denetleyici sabiti (Kinteg.i) = 400; insülin için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.i) = 10; glukagon için oransal denetleyici sabiti (Koran.g) = 0,0013; glukagon için integral denetleyici sabiti (Kinteg.g) = 400; glukagon için türevsel denetleyici sabiti (Kttrev.g) = 10.

Şekil 4.3.b'de Şekil 4.3.a'da yer alan çıktıların manipüle edilen insülin girdisi değerleri görülmektedir. Performans karşılaştırılması için IMC'deki filtre devreden çıkartılmıştır ( $\alpha=1,00$  olarak alınmıştır). PID için de  $K_{oransal,i} = -0,0325$  olarak alınmıştır ( $K_{oransal,glukagon} = -K_{oransal,insülin}/25,0$ ). (- 0,0325 değeri simülasyonlarla seçilmiştir)



**Şekil 4.3.c.** IMC ve PID karşılaştırması. Karşılaştırmalı olarak zamana karşı ikinci girdi (glukagon) grafiği. İnsülin kazancı ( $K_i$ ) = -18 mg glikoz/U; insülin zaman sabiti ( $\tau_i$ ) = 11,5 dakika; insülin ölü zamanı ( $t_{d,i}$ ) = 5 dakika; insülin yarılanma süresi ( $T_{1/2,i}$ ) = 14,5 dakika; glukagon kazancı ( $K_g$ ) = 900 mg glikoz/U; glukagon zaman sabiti ( $\tau_g$ ) = 11,5 dakika; glukagon ölü zamanı ( $t_{d,g}$ ) = 5 dakika; glukagon yarılanma süresi ( $T_{1/2,g}$ ) = 14,5 dakika; sensör gecikmesi ( $t_{d,s}$ ) = 5 dakika; kontrol aralığı ( $T_1$ ) = 10 dakika; örnekleme aralığı ( $T_0$ ) = 10 dakika; insülin açık denge konumu seviyesi ( $m_{1,baz}$ ) = 0,0005 U/dL; glukagon açık denge konumu seviyesi ( $m_{2,baz}$ ) = 0,00001 IU/dL; açık denge konumu kan şekeri ( $y_{set}$ ) = 90 mg glikoz/dL; açık denge konumu kan şekeri toleransı ( $tol.$ ) =  $\pm$  0,6 mg glikoz/dL; birinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,1}$ ) 60-50 dakika ve 300 mg/dL; ikinci bozucu etki süresi ve seviyesi ( $\Delta t_{b,2}$ ) 230-240 dakika ve 45 mg/dL; IMC denetleyici filtre sabiti  $\alpha$  (alfa) = 1,00; insülin için oransal denetleyici sabiti (Koran.i) = -0,0325; insülin için integral denetleyici sabiti (Kinteg.i) = 400; insülin için türevsel denetleyici sabiti (Ktrev.i) = 10; glukagon için oransal denetleyici sabiti (Koran.g) = 0,0013; glukagon için integral denetleyici sabiti (Kinteg.g) = 400; glukagon için türevsel denetleyici sabiti (Ktrev.g) = 10.

Bu şekilde (Şekil 4.3.c), Şekil 4.3.a'da yer alan çıktıların manipüle edilen glukagon girdisi değerleri görülmektedir. Performans karşılaştırılması için IMC'deki filtreye devreden çıkartılmıştır ( $\alpha=1,00$  olarak alınmıştır). PID için de Koransal.i = -0,0325 olarak alınmıştır (Koransal.glukagon=-Koransal.insülin/25,00). Bu tür bir proses için standart bir PID ayar (tuning) yöntemi mevcut olmadığından dolayı -0,0325 değeri simülasyonlarla belirlenmiştir.

## 4.2 TARTIŞMA

Yukarıdaki bölümlerde detaylı olarak açıklandığı üzere, pankreas, iç içe geçmiş iki organdan oluşan doğal bir denetleyicidir (*controller*). Bunlardan endokrin pankreas olarak tanımlanan bölüm, kan şekerinin (kandaki glikoz seviyesini) üç temel hormon marifetiyle yönetir. Bu hormonlardan biri (insülin) kan şekeri seviyesini doku ve hücrelerde depolayarak düşürürken, diğeri (glukagon) karaciğerdeki glukojeni harcayarak artırır. Bu hormonların üst miktarları ise somatostatin hormonu ile kısıtlanır.

Taşınabilir yapay pankreas (ve dual hormonlu insülin pompaları) da doğal süreç benzer bir mantıkla çalışsa da, mevcut teknolojik şartlar altında, ortaya çıkan zorlu kontrol problemlerinin aşılabilirdiği söylenemez. Ölü zamanların büyüklüğü, hormonların yarılanma süreleri, çıktıdaki artış ve azalışın ters yönde çalışan iki farklı hormonla yapıyor olması bu problemlerin başlıcalarıdır.

Mevcut sensör ve infüzyon teknolojilerinin ve yöntemlerinin yetersizliğinden kaynaklanan ölü zamanlar, kontrol aralıklarını genişletici ve dolayısı ile de kontrolü zorlaştırıcı sonuçlar doğurmaktadırlar. Doğal endokrin pankreas, kan şekerindeki ani bir büyük yükseliş, dokusundaki kılcal damarlar ağı vasıtasıyla çok hızlı bir şekilde algılayıp, halihazırda depolanmış olan insülini salgılayarak, bu yükselişe 20 saniye gibi kısa bir sürede tepki verebilmekte ve bu tepkisini 5 dakikalık aralıklarda tekrarlayabilmektedir. Deri altından ölçüm yapıp, yine deri altından infüzyon yapan taşınabilir yapay pankreaslarda ise sensörden doğru bir ölçüm alabilme süresi 5 dakikaya kadar ulaşmakta, deri altından verilen hormonların etkisinin hissedilmeye başlaması da yine benzer süreler almaktadır. Bu nedenle bazı ticari insülin pompalarının, kan şekerinin tam ve doğru şekilde ölçülmesini beklenmeden, rutin aralıklarla insülin vermeye ayarlandığı görülebilmektedir çünkü, aynı anda, verilen hormon sürekli olarak yarılanmakta ve kandaki hormon miktarı sürekli olarak düşmektedir. Bu durum tabii ki tıbbi bir aciliyet durumu olan hipoglisemi riskini de beraberinde getiren bir durum olmaktadır.

Bu çalışmada, taşınabilir dual (çift) hormonlu yapay pankreas simülasyonları için, kontrol aralığı olarak, sensör gecikmesi ile birlikte infüzyon gecikmesini de kapsayacak şekilde, 10 dakika aralığı seçildi.

Ameliyatlarda veya yatarak tedavi gören hastalarda kullanılabilen ve direkt olarak kandan ölçüm alabilen ve yine direkt olarak kana hormon enjekte edebilen proseslerde doğal endokrin pankreasına benzer şekilde daha kısa kontrol aralıklarının seçilebilmesi tabii ki mümkündür fakat direkt olarak damardan ölçüm alıp yine direkt olarak damara infüzyon yapılması, taşınabilir yapay pankreaslar için, mevcut teknolojik şartlar altında, pratik bir uygulama olamamaktadır. Deri altından ölçüm alınıp yine deri altından infüzyon yapılması mevcuttaki en pratik yöntem olmaktadır fakat bu yöntemde ölü zamanlar, hormonların doğal bertaraf süreleri ile birlikte ciddi bir kontrol problemi oluşturmaktadır.

Hastaya verilen insülinin kandaki miktarının azaltılması, manipülasyon yoluyla değil, ancak insülinin doğal olarak yarılanması yoluyla gerçekleştirilebilmektedir ve bu yarılanma süresi de kullanılan ticari analog insülinin özelliklerine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Ticari insülinlerde ölü zamanlar ne kadar kısa ise genellikle yarılanma süreleri de göreceli olarak kısa olmaktadır ve bu durum geniş kontrol aralıkları ile kontrol yapılabilmesi açısından ciddi bir performans düşürücü sorun olarak ortaya çıkmaktadır.

Hem yapay hem de doğal süreçlerde, kan şekerinin yükseltilmesi ve alçaltılması, çıktı üzerinde birbirlerine ters sonuç üreten farklı iki hormonun kullanılması yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bu hormonların farklı kinetikleri (farklı kazanç miktarları, farklı zaman sabitleri ve farklı yarılanma süreleri) olduğu için, yapay süreçlerde, aynı kontrol süreci içerisinde iki farklı denetleyicinin birbirleri ile koordineli ve uyumlu çalıştırılması gerekmektedir. Doğal süreçlerde, kan şekeri plazma konsantrasyonunun belli bir değerin üzerinde veya altında olmasına bağlı olarak, bir hormon salgılanırken diğer hormon salgısı durmaktadır. Bu çalışmada da benzer şekilde kontrol uygulanmıştır. Kan şekerinin 80 mg/dL altında olduğu durumlarda glukagon, üstünde olduğu durumlarda da insülin infüzyonu simüle edilmiştir fakat açık durumunda dahi, az miktarda dahi olsa, kanda belli oranda glukagon ve insülin bulunması gerekmektedir. Bu miktarlar için de literatürde bulunan emperikal değerler esas alınmıştır. Bu emperikal değerler için, kan şekeri açık denge konumu (90 mg/dL), her iki hormonun difransiyel denklemler şeklinde ifade edilen kinetiğini de aynı anda sağlayacak şekilde, yani plazma glikoz konsantrasyonunun zamana karşı birinci türevi sıfır olacak şekilde düzenlenmiştir. Bunun detayları yukarıdaki malzeme ve yöntem bölümlerinde detaylı olarak açıklanmıştır.

Bu çalışmada, C programlama dilinde yazılmış bulunan kodlar kullanılarak, karşılaştırmalı olarak çok sayıda simülasyon yapılmıştır fakat yukarıda sadece belli sayıda karşılaştırmalı örnek simülasyonlara yer verilebilmiştir. Simülasyonlarda, özellikle ölü zamanlardan ve yarılanma sürelerinden kaynaklanan sorunların giderimi için IMC formundaki model öngörülü denetçilerin set değerine daha kısa sürede ulaşması nedeniyle PID formundaki denetçilerden daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, IMC denetçisi tasarımı için, sağlıklı insan pankreasının doğal çalışma kinetiği esas alınmış ve testler 1. Derece Euler İntegrasyonu ve 4. Derece Runge-Kutta İntegrasyon yöntemleriyle karşılaştırmalı dinamik simülasyonlar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yukarıdaki bölümlerde detayları açıklandığı üzere, ölü zamanların büyüklüğü, hormonların yarılanma süreleri, çıktıdaki artışların ve azalışların ancak ters yönde çalışan iki farklı hormonla manipüle edilebiliyor olması gibi nedenlerle çift hormonlu taşınabilir yapay pankreas prosesi zorlu kontrol problemleri içermektedir. Yapılan testlerde hem IMC'nin, hem de PID'nin bozucu etki kontrolünü hormonların yarılanma sürelerinden kaynaklanan yüksek uyumsuzluklara ve sensör gecikmesi ve ölü zamanlar nedeniyle kontrol aralıklarının geniş tutulması zorunluluğuna rağmen başarıyla gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir fakat göreceli olarak set değerine daha kısa zamanda ulaşması nedeniyle IMC'nin PID'ye göre daha yüksek bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Gelecekte bu alanda yapılacak olan çalışmaların özellikle sensör ve infüzyon gecikmelerinden kaynaklanan sorunlar üzerinde yoğunlaşması gerektiği söylenebilir çünkü bu çalışmada özellikle kısa yarılanma süreli ticari analog hormonların kullanım sırasında, sensör ve infüzyon gecikmelerinden kaynaklanan yüksek ölü zamanlardan dolayı kontrol aralıklarının geniş tutulmasının denetçi performansı problemleri üzerinde artışa neden olduğu gözlemlenmiştir.

Üzerinde çalışılabilecek bir başka ilgili konunun da, bu çalışmanın amacıyla direk olarak bağlantılı bir konu olmasa da, analog glukagon hormonunun daha stabil solüsyonlar halinde eldesinin sağlanması veya kristal haldeki glukagonun anlık olarak solubilize edilerek dozajlanmasını mümkün kılacak teknolojik yöntemlerin üretilmesi olduğu söylenebilir.

## 6. KAYNAKLAR

[1] Seaquist et al. (2013). Hypoglycemia and Diabetes: A Report of a Workgroup of the American Diabetes Association and the Endocrine Society. *Diabetes Care*, 36(5), 1384–1395.

[2] Lauren M. Huyett, Eyal Dassau, Howard Zisser & Francis J. Doyle III (2015)

[3] Artificial Pancreas System for Type 1 Diabetes—Challenges and Advancements” (2020)

[4] Kovatchev, B. et al. (2009). Control to Range for Artificial Pancreas Systems. *Diabetes Care*, 32(11), 2051–2054.

[5] Garcia, C. E., Prett, D. M., & Morari, M. (1989). Model predictive control: Theory and practice—A survey. *Automatica*, 25(3), 335–348.

[6] Rivera, D.E., Morari, M., & Skogestad, S. (1986). Internal model control: PID controller design. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(1), 252–265.

[7] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA

[8] Morari, M., & Zafiriou, E. (1989). *Robust Process Control*. Prentice Hall.

[9] Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733–764.

[10] Huyett, L. M., Dassau, E., Zisser, H. C., & Doyle, F. J. (2015). Design and Evaluation of a Robust PID Controller for a Fully Implantable Artificial Pancreas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(41), 10114–10123.

[11] Ivan Sala-Mira, Pedro Garcia, Jose Luis Dize, Jorge Bondia (2022) Internal model control based module for the elimination of meal and exercise announcements in hybrid artificial pancreas systems)

[12] Tagliavini, Alessia 2012/2013 Development and evaluation of pid controllers for glucose control in people with type 1 diabetes mellitus

[13] Matthew W, Howard Zisser, Lois Jovanoic, Francis J Doyle III, (2008), closed-Loop Control and Advisory Mode Evaluation of an Artificial Pancreatic  $\beta$  Cell: Use of Proportional–Integral–Derivative Equivalent Model-Based Controllers

[14] StatPearls, 2022, Physiology, Pancreas, NCBI Bookshelf.

[15] Zhu et al., 2024, Inter-organ crosstalk during development and progression of type 2 diabetes mellitus, *Nature Reviews – Pancreatic signaling and functions*.

[16] MDPI *J Clin Med*, 2024, Interactions between the Exocrine and the Endocrine Pancreas, *J Clin Med*, 13(4), 1179.

[17] *Frontiers in Endocrinology*, 2022, Exocrine-Endocrine Crosstalk: Influence of Pancreatic Cells, 13.

[18] Adam A. Rizk,1 Michael P. Dybala,1 Khalil C. Rodriguez,1 Marjan Slak Rupnik,2 and Manami Hara1, 2023, Pancreatic regional blood flow links the endocrine and exocrine diseases

[19] Joana Alma,ça, Alejandro Caicedo, 2020, Blood Flow in the Pancreatic Islet: Not so Isolated Anymore

[20] Leif Jansson, Leif Jansson, Andreea Barbu, Birgitta Bodin, Carl Johan Drott, Daniel Espes, Xiang Gao, Liza Grapensparr, Örjan

Källskog, Joey Lau, Hanna Liljebäck, Fredrik Palm, My Quach, Monica Sandberg, Victoria Strömberg, Sara Ullsten, Per-Ola Carlsson, 2016, Pancreatic islet blood flow and its measurement

[21] Richard Olsson, Per-Ola Carlsson, 2006, The pancreatic islet endothelial cell: Emerging roles in islet function and disease

[22] Leif Jansson, Per-Ola Carlsson, 2019, Pancreatic Blood Flow with Special Emphasis on Blood Perfusion of the Islets of Langerhans

[23] Ahmed Mansouri, 2012, Development and Regeneration in the Endocrine Pancreas

[24] Gabriela Da Silva Xavier, 2018, The Cells of the Islets of Langerhans

[25] Nabih A Baeshen, Mohammed N Baeshen, Abdullah Sheikh, Roop S Bora, Mohamed Morsi M Ahmed, Hassan A I Ramadan, Kulvinder Singh Saini, Elrashdy M Redwan, 2013, Cell Factories for Insulin Production,

[26] Maria Kyriakou, 2010, The hormone that converts sugar in the blood into a source of energy for our body's metabolic processes

[27] So Young Park, Jean Francois Gautier, Suk Chon, 2021, Assessment of Insulin Secretion and Insulin Resistance in Human

[28] Jens Brange, Aage Volund, 1999, Insulin analogs with improved pharmacokinetic profiles

[29] American Diabetes Association, 2023. Safe at School®: Overview of Insulin Concentration for School Nurses – U-100 insulin definition.

[30] PetPlace, approx. 2023. How to Convert U-100 Insulin in Units to Milliliters.

[31] BuyCanadianInsulin.com, 2025. A Guide on How to Read an Insulin Syringe – U-100 conversion.

[32] Pioneer Vet Products, approx. 2022. Insulin Syringes – What Size is Best? – IU to mL conversion for U-10

[33] FDA – Glucagon for Injection label: description of glucagon molecular structure and weight. (2018)

[34] ScienceDirect – Glucagon receptor overview: molecular weight and composition.

[35] Gardner DG, Shoback D, editors. *Greenspan's Basic & Clinical Endocrinology*. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2017. Chapter 17.

[36] Antonio Bellastella, Silvia Mercadante, 2024, Chrono-Endocrinology in Clinical Practice: A Journey from Pathophysiological to Therapeutic Aspects

[37] Kyungreem Han, Hyuk Kang, Jinwoong Kim & MooYoung Choi, 2012, Mathematical models for insulin secretion in pancreatic  $\beta$ -cells

[38] Cobelli C, Renard E, Kovatchev B. Artificial Pancreas: Past, Present, Future. *Diabetes*. 2011 Nov;60(11):2672–2682. doi:10.2337/db11-0654.

### Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Senen Al Ekhwan, R. & Özer, E. (2026). "Dahili Model Kontrol Tabanlı ve Oransal İntegral Türevsel Tabanlı Denetleyici Tasarımlarının Yapay Pankreas Kontrolü İçin Karşılaştırılması", *İYYÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Hakemli-Akademik*, 1(1):33-48. <https://doi.org/10.66125/0.2026.6>