

## Veri Füzyonu: Veri Kaynakları, Mimariler, Zorluklar ve Çözüm Yaklaşımları

Berna ÇENGİZ<sup>1\*</sup>, Resul DAŞ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup>brnpolatt@gmail.com, <sup>2</sup>rdas@firat.edu.tr,

(Geliş/Received: 09/07/2022;

Kabul/Accepted: 08/08/2022)

**Öz:** Nesnelerin İnterneti, yeni teknoloji ve cihazları kullanarak insan müdahalesi olmadan nesnelerin iletişimini ve karar verme yetilerini sağlayan insanların problemlerine çözüm sağlayan sistemlerdir. Nesnelerin İnterneti çözümleri insanların konfor, güvenilirlik, hareketlilik, sağlık ve refah seviyesinin yükseltilmesinde etkin rol almaktadır. Karmaşık ve zorlu uygulamalar içeren IoT çözümlerinden elde edilen büyük veriler, birbirinden farklı ve çok kaynaklı heterojen veri kümelerini içerebilir. Sensör teknolojilerini kullanan teknolojik çözümlerinde veri ve sensör füzyonu işlemleri büyük önem taşımaktadır. Veri boyutunun azaltılması, veri trafik yoğunluğunu optimize edilmesi ve ham verilerden yararlı bilgileri çıkarılması gibi işlemlerin gerçekleştirilmesi kritik ve çok önemlidir. Bu bağlamda, veri birleştirme sürecinde, sorunlu verilerin düzeltilmesi, veri güvenilirliğinin artırılması ve veri bütünlüğünün korunması hedeflenmektedir. Akıllı sistemler kullanılarak gerçekleştirilen IoT çözümlerinde en çok yaşanan veri füzyonu zorluklarının tespit edilmesi ve olası çözüm yaklaşımlarının sunulması çalışmamızın özgün yönünü ön plana çıkartmaktadır. Bu makale çalışmada, güncel literatür çalışmaları detaylıca incelenmiş, akıllı şehirlerde uygulanan IoT çözümlerindeki veri tipleri, füzyon seviyeleri, kullanılan yöntem ve elde edilen sonuçlar tablo halinde sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri, Akıllı Şehirler, Veri Füzyonu, Enerji Tüketimi

## Data Fusion: Data Sources, Architectures, Challenges and Solution Approaches

**Abstract:** The Internet of Things (IoT) are internet-based systems that provide solutions to people's problems that enable communication of objects and decision-making skills without human intervention by using new technologies and devices. Internet of Things solutions play an active role in raising people's comfort, reliability, mobility, health and well-being. Big data generated from IoT solutions with complex and demanding applications can contain heterogeneous datasets with different and multiple sources. Data and sensor fusion processes are of great importance in technological solutions using sensor technologies. It is critical and very important to be able to perform operations such as reducing data size, optimizing data traffic density, and extracting useful information from raw data. In this context, it is aimed to correct problematic data, increase data reliability and protect data integrity in the data fusion process. Identifying the most common data fusion challenges in IoT solutions using smart systems and presenting possible solution approaches highlights the unique aspect of our work. In this study, current literature studies are examined in detail, data types, fusion levels, methods used and results obtained in IoT solutions applied in smart cities are presented in tabular form.

**Keywords:** Internet of Things, Big Data, Smart Cities, Data Fusion, Energy Consumption.

### 1. Giriş

İnsan yaşamını kolaylaştırmak ve hayat kalitesini arttırmak için birçok alanda kendisine yer bulan Nesnelerin İnterneti, fiziksel dünyadaki ve siber uzaydaki nesnelerin birbirleri ile iletişim halinde olduğu bir topluluk sunmaktadır. IoT, fiziksel nesnelerin iletişimi, bilgi paylaşımı ve faaliyetlerini kontrol etme bakımından görme, duyma, düşünme ve karar verme gibi insan özelliklerini taklit etme yeteneği taşımaktadır. Bu yetenekler, basit nesnelere gerçek zamanlı olarak çalışabilen, koşullara uyum sağlayabilen ve insan müdahalesi veya denetimi olmadan işlev görebilen akıllı cihazlara dönüştürmektedir. IoT sistemleri, elde ettikleri verileri bir araya getirmek, diğer nesnelere iletişim halinde kalmak ve üzerinde analiz yapmak için işlemciler, sensörler ve iletişim donanımı gibi birleşik sistemleri kullanan web özellikli akıllı cihazları içermektedir [1]. Nesnelerin İnterneti toplanan verilerin yardımıyla etrafımızda gördüğümüz herşey hakkında bilgiye sahip olması ve bir öngörde bulunabilmesi toplumların daha akıllı hale gelmesine olanak tanımaktadır. Son yıllarda popüler olan Akıllı Şehir Sistemleri [2]–[8], IoT ile birlikte birçok açıdan ele alınabilmektedir. Bugün dünya nüfusunun %50'den fazlası şehirlerde yaşamakta ve önümüzdeki 30 yıl içerisinde kentsel alan yerleşiminin %68'e ulaşacağı düşünülmektedir. Birleşmiş Milletler'e göre, dünya nüfusu 2050'de 2,5 milyar artacağı tahmin edilmektedir. Bu muazzam büyüme, şehirlerin sürdürülebilir yönetimi ve kalkınmasının yanı sıra vatandaşlar için daha iyi yaşam kalitesini garanti etme yeteneği de dahil olmak

\* Sorumlu yazar: brnpolatt@gmail.com. Yazarların ORCID numaraları: <sup>1</sup>0000-0002-1564-0604, <sup>2</sup>0000-0002-6113-4649,

üzere birçok zorluğu beraberinde getirecektir. Bu nedenle, akıllı şehirlerin geliştirilmesi, artan nüfusun çeşitli ihtiyaçlarının karşılanması için hem etkili hem de acil bir çözüm olarak düşünülmelidir. Akıllı şehirlerde eyleme dönüştürülebilir bilgiler oluşturmak için çok sayıdaki IoT cihazının uzaktan ve gerçek zamanlı olarak takibi, yönetimi ve çalıştırılmasına ihtiyaç vardır. Akıllı bir şehrin en temel özelliği yüksek düzeyde bilgi teknolojisi entegrasyonu ve bilgi teknolojisinin sağlam bir şekilde uygulanması yer almaktadır [5]. Akıllı sensörler ve aktüatörler şehirlerin farklı bölgelerine yerleştirilerek büyük miktarda veri toplanmasına sağlamaktadır [9]. Toplanan veriler, yararlı bir biçimde sunulabilmesi için önce saklanmalı, analiz edilmeli ve işlenmelidir. Akıllı şehir çevre izleme, kontrol, kaynak yönetimi, anormallik tespiti gibi temel ve önemli durumlarda veri kaynaklarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Akıllı şehir uygulama alanlarında paralel veri kaynaklarının mevcudiyeti ile birden çok veri kaynağını birleştiren veri birleştirme teknikleri, akıllı şehir platformu entegrasyonunun merkezinde yer almaktadır. Veri birleştirmenin ana hedefleri, veri güvenilirliğini artırırken ve birden fazla veri kaynağından bilgi çıkarımı yaparken sorunlu verileri ele almaktır. Veri birleştirme, birden çok kaynaktan gelen büyük hacimli verilerin optimum kullanımı için etkili bir yoldur [10]. Çok sensörlü veri birleştirme, tek bir sensör veya kaynaktan mümkün olmayan çıkarımlara ulaşmak için birden fazla sensör ve kaynaktan gelen bilgileri birleştirmeyi amaçlamaktadır. Farklı fiziksel özelliklere sahip sensörlerden gelen bilgilerin birleştirilmesi, karar verme ve akıllı makinelerin kontrolünü daha anlaşılır kılmaktadır.

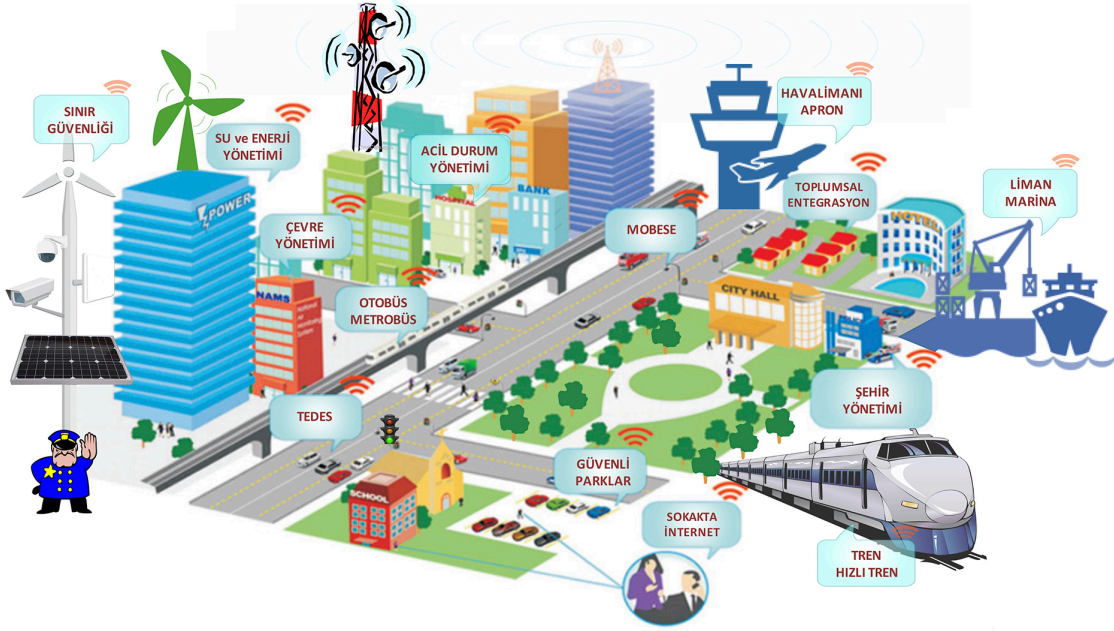
Bu makale çalışmada 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2’de akıllı şehirler kapsamında gerçekleştirilen akıllı uygulamalar sunulmuştur. Özellikle sensör ve veri füzyonu uygulamalarının etkin kullanıldığı akıllı yapılar incelenmiştir. Çalışmamızın 3.bölümünde veri füzyonu kavramı detaylıca incelenmiş, veri kaynaklar, veri füzyon mimarileri sunulmuştur. Bu kapsamda güncel literatür çalışmaları tablo halinde verilmiştir. Veri füzyonu süreçlerinde yaşanan zorlukların giderilmesi için önerilen çözüm yaklaşımları ise çalışmanın özgün yönünü olarak ön plana çıkmaktadır. Son olarak 4. bölümde sonuç sunulmuştur.

## 2. Akıllı Şehirler

Akıllı şehir, sürdürülebilir bir metropol, yenilikçi ticaret ve vatandaşları için zenginleştirilmiş yaşam kalitesi oluşturmak için gelişmiş yeni teknolojileri kullanan, yüksek teknolojili, bağlantıları yüksek bir şehir olarak tanımlanır[11]. Şekil’de 1 görüldüğü gibi Akıllı sistem teknolojileriyle birlikte kentsel alanlar bilgi iletişim teknolojisini kullanan dijital şehirlere dönüşmektedir. Bu teknolojinin kentsel alana uygulanması kentsel alan yönetimi, ekonomi, endüstri, yaşam kalitesi, çevre izleme, insan hareketliliği ve altyapı gibi faaliyetlerin geliştirilmesinde büyük rol oynamaktadır.

### 2.1 Akıllı Yaşam

Akıllı yaşam, kentsel alanlardaki yaşam kalitesi, çalışma verimliliği, konfor seviyesi ve güvenlik gibi kavramlara internet temelli çözümler barındırmayı hedeflemektedir. Akıllı ev, akıllı sağlık bu alanın araştırma çerçevesi içerisinde bulunmaktadır. Bu alanda insan temelli verilerin doğrudan kullanılabilir olması güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir. İnternet aracılığıyla evin güncel durumu hakkında bilgi alış verişi yapabilen akıllı evler, konut sakinlerinin günlük aktivitelerinin incelenmesi ve yaşam kalitesinin artırılması açısından önemlidir. Akıllı evlerin modern teknolojiye ayak uyduran yaşam tarzının artması enerji tüketimini de arttırmaktadır ve dolayısıyla enerji tüketimi konusu önemli bir konu haline gelmektedir. IoT ve derin öğrenme teknikleri de dahil olmak üzere yeni teknolojiler, enerji verimliliği ve tasarruf sağlamak için enerji kullanımlarını gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir. Akıllı ev sistemleri birçok IoT cihazı ve sensörü bünyesinde barındırmaktadır. Bu cihazlar ortamdaki verileri toplayarak enerji tüketimini izler ve daha düşük enerji maliyetleri için analiz yaparlar[7]. Teknolojinin sağlık alanında yaygınlaşması yaşlı nüfus ve kronik hastalığı olan bireyler için yeni çözüm önerileri sunmaktadır. Akıllı sağlık hizmeti, sağlık kayıtlarına sorunsuz bir şekilde erişmek, bireyleri, kaynakları ve kuruluşları birbirine bağlamak ve daha sonra bunları etkin bir şekilde yönetmek için giyilebilir cihazlar, Tıbbi Nesnelerin İnterneti (IoMT), gelişmiş makine öğrenimi algoritmaları ve kablosuz iletişim teknolojisi gibi teknolojileri kullanan bir çerçevedir [12]. Sağlık hizmetlerine ayrılmış nesnelerin internetinde (IoT), farklı vücut sensörlerinden, çevresel sensörlerden ve kameralar, ses kaydediciler vb. gibi diğer veri kaynaklarından heterojen veriler toplanabilir. Bu heterojen verilerin toplanması, senkronizasyonu, işlenmesi ve birleştirilmesi kritik öneme sahiptir [13]. IoT’de sağlık hizmetleri için gerçek zamanlı aktivite izleme, düşme tespiti, anormallik tespiti ve hastalık teşhisi [14]–[17]



Şekil 1: Akıllı şehirler kapsamında gerçekleştirilen akıllı uygulamalar

gibi uygulama örnekleri verilebilmektedir. Çoklu sensör füzyon teknikleri, daha iyi hizmet kalitesi için birlikte işlenecek birbiriyle alakasız birkaç cihazı ve veri kaynağını birleştiren tekniklerdir. Yukarıda belirtilen farklı kaynaklardan daha iyi sonuçlar elde etmek için çoklu sensör veri füzyonu sunulmaktadır [18].

## 2.2 Akıllı Kentsel Alan Yönetimi

Akıllı bir şehir sürdürülebilirlik ve yaşanabilirlik açısından gerçek zamanlı olarak verilerden yararlanabilmeli, böylece dayanıklılık hedeflerini ilerletmek için bireysel, organizasyonel ve toplu düzeylerde etkili ve verimli karar alabilmelidir. Akıllı kentsel alan yönetimi akıllı topluluk, akıllı yönetim, akıllı şehir planlaması, akıllı bina gibi alanları kapsamaktadır. Akıllı topluluk, bireyler ve kurumlar için bilgi teknolojisinin kullanıldığı bir mahalleden daha büyük alana hizmet sağlayan bir topluluktur. Yerel yönetim, iş dünyası, sağlık ve genel kamuoyunun olumlu bir şekilde dönüşümünü sağlamak için teknolojiyi kullanan bir kümesel alandır [19].

Vatandaşların sokak arızaları, çukurlar veya bozuk sokak lambaları gibi yaygın kentsel sorunları bildirmelerine yardımcı olmak ve yerel kamu idaresinin bu sorunlara hızlı bir şekilde müdahale edip düzeltilmesini desteklemek için akıllı bir kentsel arıza raporlama platformu [20], akıllı ulaşım sistemlerini kullanan bir afet yönetim sistemi [21], sürücü yardım sistemleri için yolda bulunabilecek çok sayıda nesneyi tanımak amacıyla çeşitli sensörler ve karar algoritmaları kullanılarak [22] akıllı yönetim ve şehir planlaması yapılabilmektedir.

Diğer bir alan olan kentsel bina yönetimi, bina kaynaklarının yönetimini otomatikleştirirken bina sakinine binanın enerji tüketim oranını anlaması için bir platform sağlamaktadır. Küresel binalar, toplam enerji tüketiminin ve karbon emisyonunun yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. Bu nedenle, enerji verimli ve yeşil binaların ilerlemesi için yeni akıllı bina enerji yönetimi teknolojilerinin geliştirilmesi önemlidir. Nesnelerin İnterneti teknolojisinin ve hesaplama yeteneğinin hızla gelişmesiyle birlikte, yapay zeka teknolojisi kontrol ve optimizasyonunda önemli katkıları bulmaktadır. Genel bir yapay zeka teknolojisi olarak, derin pekiştirmeli öğrenme, karşılaşılan birçok zorluğun üstesinden gelmektedir [23]. Bina yönetim sistemi, iyi tanımlanmış bir dizi kontrol girdisi kullanılarak bina parametrelerinin izlenebildiği ve kendi kendine ayarlanabildiği çeşitli akıllı binalara uygulanabilmektedir [24]. Gao ve arkadaşları merkezi bir tesis veri tabanı oluşturmak için düşük maliyetli bilgisayarlar, sensör modülleri, geliştirilmiş yazılım araçları ve mevcut bina Wi-Fi ağını kullanan IoT özellikli bir veri toplama çerçevesi önermektedir [25]. Shapi ve arkadaşları Microsoft Azure bulut tabanlı makine öğrenimi platformunda enerji tüketimi için tah-

mine dayalı bir model geliştirerek sorunları çözmeyi amaçlamaktadır. Tahmine dayalı modelin algoritması için Destek Vektör Makinesi, Yapay Sinir Ağı ve k-En Yakın Komşu olmak üzere üç metodoloji önermişlerdir [26].

### 2.3 Akıllı Çevre

Akıllı çevre, bir şehrin iç ve dış çevresini kapsayan belirli bir alan çerçevesini inceler [2]. Akıllı çevre uygulamalarında IoT, mekansal ve zamansal bilgilerle sensörlerin entegrasyonu kullanılarak elde edilebilen kapsamlı, çok seviyeli ve tamamen kapsanan bir ekolojik izleme ağı oluşturmak için kullanılır [11]. Çevresel alanlarda IoT ve büyük verilerin inşası ve uygulanması, özellikle endüstride stratejik yeni bir ortamın geliştirilmesi, tanıtılması ve yönetimi için önemli bir durum teşkil etmektedir [3]. Akıllı çevresel uygulamalar için IoT’de önemli ilerleme kaydedilmiş olsa da, büyük hacimli veri hesaplama zekası tekniklerini yakalamak, depolamak, işlemek ve analiz etmek hala zorlu bir görev olabilmektedir. İstenen sonuçları elde etmek için akıllı ortam uygulamaları, yüksek hızlı veri akışları üzerinden gerçek zamanlı veya hatta neredeyse gerçek zamanlı işleme gerektirir; bu da hızlı, verimli ve büyük ölçekli veri akışı analizi gerektirir [27]. Akıllı çevre; peyzaj izleme, kentsel şehir modelleme, atık yönetimi gibi uygulama alanlarında geliştirmeler yapmaktadır. Dağlar ve ormanlar gibi bir kentsel kentin çevresindeki doğal kaynaklar, bir kentin önemli varlıkları olarak kabul edilir. Şehir alanının modellenmesinde en yaygın veri kaynakları, kullanmadan önce [28], [29] gibi veri iyileştirmeleri gerekmektedir. Akıllı şehirlerde, atıkların verimli yönetimi, IoT’nin ele alma eğiliminde olduğu çevre için çok önemli bir zorluktur [30]. Atık yönetimi [31], [32], bir şehirde üretilen atığın, vatandaşların atıklarını ürettiği başlangıcından, toplama, taşıma ve depolama, yakma veya geri dönüşüm olabilecek nihai konaklama yerine varmasına kadar izlenmesi için gerekli tüm faaliyetleri kapsar. Etkin ve verimli bir katı atık yönetim programının yokluğunda, hem endüstriyel hem de evsel kentsel faaliyetlerden kaynaklanan atıklar sağlık risklerine neden olabilir ve çevreye zarar verebilir. Pardini ve arkadaşları atık yönetimini optimize etmeyi ve sürece bir vatandaşı dahil etmeyi amaçlayan bir çözüm (donanım, yazılım ve iletişim) önermektedir [33].

### 2.4 Akıllı Endüstri

Akıllı endüstri ve üretim, üretim değer zincirindeki tüm bileşenlerden gerçek zamanlı olarak ilgili sensör verilerinin ve süreç bilgilerinin elde edilmesini gerektirmektedir [34]. Veri biliminin ana hedeflerinden biri, kritik olayları ve hasarları öngörmek için endüstriyel makinelerde, araçlarda ve süreçlerde anormal davranışları etkili bir şekilde tahmin etmek ve sonuçta önemli ekonomik kayıpları ve güvenlik sorunlarını öngörmektir [35]. Akıllı endüstrinin, akıllı üretim, akıllı bakım, akıllı tarım alanlarında etkilerini görmek mümkündür. Endüstri 4.0’ın ortaya çıkışı, üreticileri akıllı üretim ve dijitalleşmeye daha fazla yatırım yapmaya teşvik etmektedir. Günümüzde üretimin birçok aşamasında kullanılan yeni kavramların dünya genelinde gözlemlenmesi mümkündür. Endüstri 4.0, esas olarak fabrikalardaki otomasyon sistemlerini geliştirebilecek bir bilgi teknolojisi altyapısı oluşturarak geleneksel üretim ortamlarının verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır [36]. Endüstri 4.0, bir üretim ortamındaki insan operatörlerin zamanlarının çoğunu daha yaratıcı ve iletişim görevlerine harcadığını, parçaların ve malların taşınması gibi rutin işlemler ise mobil robotlar gibi otonom cihazlar tarafından yürütüldüğünü öne sürmektedir. Gültekin ve arkadaşları birden fazla bağlı sensörden ölçülen sinyalleri kullanan bir ATV (Otonom Transfer Araçları) aracının akıllı arıza algılamasına odaklanmaktadır [37]. IoT, akıllı fabrika ortamında harcanan enerji miktarının yönetimi, ürün kalitesinin artırılması, fabrika atık yönetimi, operasyonel ve kesinti maliyetlerinin azaltılması, müşteri deneyiminin kalitesi ve yatırım getirisinin iyileştirilmesi gibi durumlarda etkinleştirici olarak hizmet verebilmektedir [38]. Wang ve arkadaşları akıllı üretime yönelik Endüstriyel İnternet tarafından desteklenen dijital ikiz tabanlı büyük veri sanal ve gerçek füzyon (DT-BDVRL) referans çerçevesi önermektedir [39]. Tarımsal üretimi artırmak amacıyla son yıllarda tarım sektöründe IoT ve büyük veri gibi yeni çözümler ve teknolojiler uygulanmaya başlanmıştır. Uygulamalarının birincil motivasyonu, akıllı tarımın hızla artan gelişimi ve sürdürülebilir çevre yönetiminin geleceğindeki kaçınılmaz rolüdür [40]. Akıllı tarım [5], [41], [42] sektöründe, otomasyon çözümleri ve teknolojileri, mekanik makineler, bilgi, karar verme araçları, hizmetler ve yazılımlar sorunsuz bir şekilde entegre edilerek çiftçilerin üretkenliği, ürün kalitesini ve karlılığı artırmalarına yardımcı olmaktadır.

## 2.5 Akıllı Ekonomi

Akıllı ekonomi, bir şehre potansiyel ticari değer sağlayan tedarik zinciri, lojistik, finans merkezi ve turizme kadar uzanan genel ticari faaliyetlerdir [2]. Akıllı ticaret, akıllı tedarik zinciri, akıllı turizm akıllı ekonominin ilgilendiği güncel çalışma alanlarıdır.

Akıllı ticaret [43]–[45] günümüzde modern e-ticaret platformları, müşterilerine ulaşmak ve daha iyi anlamak için çok modlu veri kaynaklarını kullanmaktadır. Bu, e-ticaret satıcılarının müşterilerine daha iyi ürün tavsiyeleri vermesine ve müşterilerin kararlarını kolayca vermelerine yardımcı olur. Mobilite, kredi kartı satın almaları ve sosyal medya etkileşimleri gibi müşteri verilerini birleştirmek, modern tavsiye sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Akıllı üretim kavramı, bireysel makinelerin basit sayısallaştırılmasından ve otomasyonundan, makinelerin IoT teknolojilerini kullanarak birbirine bağlanmasına ve hareket halindeyken kararlar almak için bağlı sistemlerden gelen verilerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Müşterilere sunulan hizmeti iyileştirmeye ve süreç israfını azaltmaya odaklanan akıllı tedarik zinciri [46]–[50] en yaygın olarak benimsenen süreç yönetim sistemlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Akıllı bir şehir aynı zamanda sosyal - kültürel hayata da odaklanır ve kentsel sosyal etkileşimleri geliştirebilir. Akıllı şehirler, teknolojinin muazzam gelişimi ile turizm alanını hızlı bir şekilde ileriye taşımaktadır. Akıllı turizm [51], [52] seyahat deneyimlerini daha zengin, verimli ve sürdürülebilir kılmak için dönüştürmek için gelişmiş bilgi teknolojilerinin kullanımıyla birlikte çeşitli kaynaklardan elde edilen verileri toplamak ve analiz etmek için desteklenen yeni bir turizm kapsamını yansıtır.

## 2.6 Akıllı İnsan Hareketliliği

Akıllı insan hareketliliği [53]–[55], insanların hareket etme şeklini daha iyi anlamak ve iyileştirmek için sakinlerin hareketinin farklı yönleriyle ilgili çeşitli veri kaynaklarını toplamak, yönetmek ve analiz etmektir. Akıllı konum tabanlı çalışmalar ve akıllı ulaşım sistemleri akıllı insan hareketliliği uygulama alanlarındandır. Trau-mueller ve arkadaşları kalabalık kentsel ortamlarda hareketlilik yörüngelerini modellemek için büyük ölçekli WiFi araştırma istek verilerini kullanan bir model geliştirmişlerdir [56]. Arazi kullanımı, insan hareketliliği arasındaki ilişkileri incelemek amaçlı Chen ve arkadaşları cep telefonu izleme verilerini kullanarak insan hareketliliğinin erişilebilirlik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir[57]. IoT teknolojisi genişledikçe, insanların hayatlarını daha iyi hale getirmek için yeni uygulamalar meydana gelmektedir. IoT'nin ulaşım alanına girmesiyle birlikte ulaşım sistemleri algılamaya ve düşünmeye başlayarak Akıllı ulaşım sistemlerinin [58], [59] gelişmesine yol açmıştır. Akıllı ulaşım, daha fazla iyileştirme için birçok fırsat olduğu için birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Akıllı ulaşımın en önemli ilgi alanlarından biri navigasyon veya rota optimizasyonudur[60]. Kullanıcıların mobil cihazlarından [61] veya yol üzerinde belirli konumlara yerleştirilmiş yan birimlerden gelen verileri kullanmaya [62], uygulamalar trafik sıkışıklığını tahmin etmeye çalışır ve seyahat sürelerini en aza indirmek için optimum rota seçenekleri önerir ve bu nedenle araç emisyonlarını ve enerji tüketimini azaltır.

## 2.7 Akıllı Alt Yapı

Akıllı altyapı kavramı, belirli bir coğrafi alanın insanlar, yönetim, çevre, ekonomi, hareketlilik ve yaşam koşulları gibi farklı unsurları içeren kapsamlı bir sistem olarak tanımlanan akıllı şehir fikrinden türetilmiştir[63]. Akıllı şebeke, akıllı enerji, akıllı tesis, akıllı iletişim akıllı alt yapı alanında dikkat çeken başlıklardır. Akıllı şebekeler, geleneksel elektrik sistemlerinin modernizasyonunu temsil eder. Geleneksel güç ağlarını IoT teknolojileriyle donatmak, akıllı şebeke kavramını ortaya çıkarır[64]. Geleneksel güç sistemlerinde bilgi ve iletişim teknolojileri geliştirilip uygulandıkça, akıllı şebeke siber-fiziksel sistemlerinin gelişimi de artmaktadır[65]. Akıllı şebeke ağlarında güvenlik ve gizlilik en önemli endişelerdendir. Khan ve arkadaşları bu sorunların üstesinden gelmek için, akıllı şebekelerde güvenlik ve gizlilik özelliği sağlayan bir kimlik doğrulama ve anahtar anlaşma protokolü önermektedir[66]. Enerji talebindeki üstel artışı karşılamak, karbon emisyonunu azaltmak ve düşük maliyeti azaltmak için araştırmacılar, yenilenebilir enerji kaynakları ile yeni enerji üretimi yöntemleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Rehman ve arkadaşları elektrik şebekesi ve yenilenebilir enerji kaynakları, yani güneş enerjisi, kontrol edilebilir ısı ve güç ve rüzgar enerjisi kapsamında enerji kullanım planlaması ve yönetimine dayalı bir çalışma yapmışlardır [67].

## Veri Füzyonu: Veri Kaynakları, Mimariler, Zorluklar ve Çözüm Yaklaşımları

IoT, çeşitlendirilmiş ağların, kablosuz teknolojilerin ve cihazların entegrasyonunu sağlamaktadır. Bu durum çeşitli cihazların kendi aralarında akıllı iletişim sağlamaya yardımcı olmaktadır. Kentsel bir şehirde iletişim, çeşitli uygulama platformlarının birbirleriyle iletişim kurması için temel bir altyapı olmaya devam etmektedir. Her biri farklı amaçlara hizmet ettiği için tüm iletişim platformları ve standartları eşit olarak tasarlanmamıştır. Bu nedenle, değişen gereksinimleri karşılamak için farklı standartlar ve protokoller oluşturulmuştur. Artırılmış gerçeklik, yüksek çözünürlüklü video akışı, sürücüsüz arabalar, akıllı çevre, e-sağlık hizmetleri vb. gibi Nesnelerin İnterneti (IoT) merkezli kavramlarla yaşamın her alanında karşılaşmak mümkün. Bu uygulamalar daha yüksek veri hızları, geniş bant genişliği, artırılmış kapasite, düşük gecikme süresi ve yüksek verim gerektirmektedir. Ortaya çıkan bu kavramların ışığında IoT, heterojen ağlar (HetNets) arasında kesintisiz bağlantı sağlayarak dünyada büyük bir yaratmaktadır. Beşinci Nesil (5G) hücreli ağlar, IoT teknolojisinin her yerde dağıtımını için temel etkinleştirme teknolojileri sağlamaktadır.

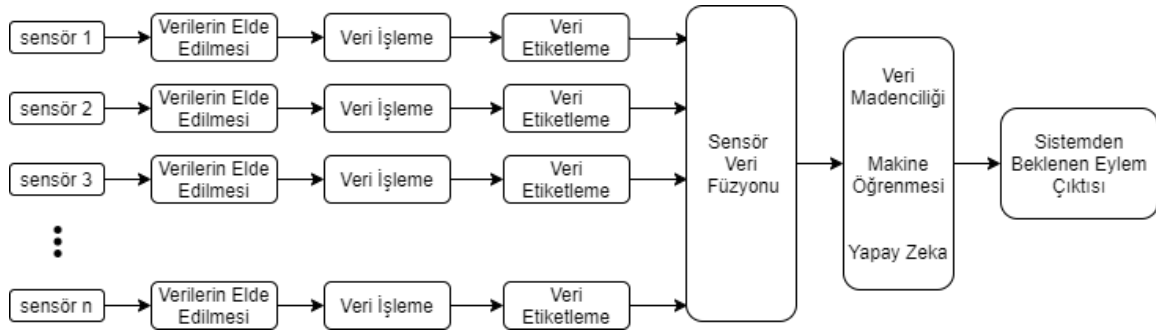
Tablo 1: Akıllı yapılarda enerji tüketimi üzerine yapılmış veri füzyonu uygulamalarının incelenmesi

Referans	Uygulama Alanı	Amaç	Veri Tipi	Füzyon Seviyesi	Yöntem	Sonuçlar
[68]	Akıllı Bina	Sensör füzyonu kullanılarak enerji verimliliği ve konfor kontrolü için bina doluluk izlemesi	Fiziksel veri	Sensör seviyesi	ANFIS	Tek bir sensörden elde edilemeyen gelişmiş güvenilirliğe sahip bilgi çıkarımı sağlanmıştır.
[69]	Kamusal Alan	Enerji tüketimi farkındalığı ve yönetimi	Hibrit veri kaynakları	-	Kural tabanlı bir karar destek makinası	GreenSoul ile geliştirilmiş gündelik şeyler (örneğin cihazlar, ışık ve HVAC sistemleri) enerji tüketimini son kullanıcılara sezgisel olarak gösterecek, böylece kullanıcıları eğitecek ve daha duyarlı hale getirecektir.
[70]	Akıllı Ev	Giyilebilir akıllı teknoloji, yapay zeka ve sensör birleştirme teknolojilerini entegre ederek çok sensörlü veri birleştirme teknolojisi tabanlı bir akıllı ev sistemi geliştirmek	Fiziksel veri kaynakları	Sinyal seviyesi	3D Hareket tanıma algoritması	Kullanılan algoritmalarda farklı çaprazlama oranlarıyla %92,0, %94,8, %95,3 ve %87,7 başarımlar elde edilmiştir.
[71]	Akıllı Ofis	Düşük çözünürlüklü ve düşük maliyetli ısı sensörleri kullanarak büyük iç mekan ortamlarının doluluğunu belirlemek	Fiziksel veri kaynakları	Sensör seviyesi	Yapay Sinir Ağları-CNN	Deneysel tasarımların ve elde edilen sonuçların, geleceğin akıllı alanları için doluluk tahmini çözümlerinin bulunmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
[57]	Akıllı Ofis	Doluluk tahmini oluşturmak için veriye dayalı modeller ile doluluk modellerini birleştiren bir füzyon çerçevesi sunmak	Fiziksel veri kaynakları	Sensör seviyesi	Aşırı öğrenme makinesi (ELM)	Önerilen füzyon çerçevesi, farklı metodolojiler arasında tahmin doğruluğu ve algılama doğruluğu (varlık/yokluk) için sırasıyla %5-14 ve %3-12 civarında iyileştirmeler sağlayabildiğini göstermiştir.
[72]	Üniveriste Kampüsü	WiFi cihaz sayısı, elektrik enerjisi talebi ve su tüketim oranı - kullanarak doluluk tahmini yapmak	Fiziksel veri kaynakları	Özellik seviyesi-Karar Seviyesi	k-means kümeleme algoritması	Çalışma, karar düzeyi füzyonu ile doluluk-veri kaynağı ilişkisine dayalı kümelemenin %13,22 doğruluk elde ettiğini göstermektedir.
[73]	Akıllı Ofis	Ofis binalarında çeşitli elektrik yüklerini, aydınlatma yüklerini, bina sakinlerini ve iç ısı kazanımlarını tahmin etmek	Fiziksel veri kaynakları	-	Uzun Süreli Bellek (LSTM) Ağları	Önceden belirlenmiş çizelgelerle karşılaştırıldığında, LSTM'ler, 1. bina da tahmin hatalarını %12'den %8'e ve 2. bina da %26'dan %16'ya düşürdüğü görülmüştür.
[74]	Otel	Bina sakinlerine bilgi ve özel tavsiyeler aktararak enerji verimliliğinin nasıl daha da geliştirilebileceğini göstermek	Fiziksel ve kullanıcı veri kaynakları	-	-	Bu çalışma enerji, iç mekan çevre kalitesi ve sağlık konularında birleşik geri bildirim sağlayarak bütünsel bir yaklaşım uygulanmasının gerekliliğinin altını çizmektedir.
[75]	Akıllı Bina	Akıllı bina içinde çeşitli düşük maliyetli sensörlerin veri birleştirmesine dayalı bir doluluk tespit sistemi oluşturmak	Fiziksel veri kaynakları	Sensör seviyesi	Sınıflandırma (MLP, kNN, DT ve RF)	Daha fazla sensör kullanılarak sakinlerin sayısının daha güvenilir bir şekilde tespit edilmesi ve tahmin edilmesini kolaylaştırılacağı sonucuna varılmaktadır.
[76]	Akıllı Ofis	Veriye dayalı doluluk tahmini için çoklu verileri füzyon işlemine tabi tutarak üç makine öğrenimi algoritmasının karşılaştırmalı analizi	Fiziksel veri kaynakları,	Sensör seviyesi	kNN, SVM, YSA	Sonuçlar, yalnızca ANN modellerinin birleştirilmiş bir veri setinden yararlanabileceğini, kNN ve SVM modellerinin ise bireysel veri setlerine benzer performans gösterdiğini göstermektedir.
[77]	Akıllı Ofis	Bina fiziğine dayalı doluluk tahmini yapmak amacıyla makine öğrenimi tabanlı modelleri entegre etmek için bir veri birleştirme çalışması önermektedir	Fiziksel veri kaynakları	Sensör seviyesi	YSA	Yapılan çalışmada gerçek zamanlı doluluğun ortalama mutlak hatası 2,18'e düşürülebilmektedir ve dört seviyeli doluluk için doğruluğu yaklaşık %84,36'dır.
[78]	Akıllı Kampüs	Çok kaynaklı verileri normalleştirme, analiz etmek ve tahmin etmek için kullanılabilir çok boyutlu bir durumsal bilgi birleştirme yöntemi önermektedir	Hibrit veri kaynakları	Bilgi Seviyesi	kNN	Beklenen enerji tasarrufu hedefine ulaşmak için farklı durumlara göre ekipman kullanarak enerji hızlı ve doğru bir şekilde kontrol edilebilir, kampüste su ve elektrik kullanımının verimliliğini artırılabilir

### 3. Veri Füzyonu

Veri füzyonu (data fusion) kelimesi çoklu algılayıcı füzyon (multi-sensor fusion), çoklu algılayıcı veri füzyonu (multi-sensor data fusion), algılayıcı füzyon (sensor fusion), algılayıcı ver füzyonu (sensor data fusion), bilgi füzyonu (information fusion), iz birleştirme (combination of evidence), gibi tanımlamaları da içermektedir. Ayrıca kaynaşım (merging), birleşim (combining), sinerji (synergy), tamamlama ve toplama (integration and aggregation), algılayıcı yönetimi (sensor management), algılayıcı koordinasyonu (sensor coordination), algılayıcı planlaması ve kontrolü (sensor planning and control) gibi ifadeler de füzyon ile aynı kavramı belirtmektedir. Veri füzyonu esas olarak bir bilgi bütünleştirme problemi. Bu yöntem çoklu algılayıcıdan gelen verilerin birleştirilerek ilgili durum için tek bir algılayıcı kullanımından daha iyi bir analiz yapılmasına ve daha iyi kararların verilmesini sağlamaktadır.

Veri Füzyonu Yönteminin basit bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir ancak füzyon sistemlerinin tasarlanması ve uyarlanması oldukça karmaşık bir işlemdir. Sistemin modellenmesi şekil 2, verilerin birleştirilmesi, sensör verilerinin analizi ve bilgi çıkarımı zorlu bir süreçtir. Uygun yapıdaki verilerin eksikliği füzyon performansını etkilemektedir.



Şekil 2: Veri Füzyonu

#### 3.1 Veri Kaynakları

IoT sistemlerinde farklı kaynaklardan çeşitli veriler elde edilir. Bu veri türleri aşağıdaki gibi Fiziksel Veri Kaynakları, Siber Veri Kaynakları, Kullanıcı Veri Kaynakları ve Hibrit Veri Kaynakları olmak üzere dört başlıkta kategorize edilmektedir.

##### 3.1.1 Fiziksel Veri Kaynakları

Fiziksel veri kaynakları, ortama dağıtılmış sensörlerden elde edilir. Fiziksel sensörlerin örnekleri arasında sıcaklık, nem, hava kalitesi, mesafe, ses, görüntü verilerinin elde edilebildiği cihazlar ve sensörler örnek verilebilir. Bu sistemler bir enerji verimliliği sistemine uygulanmak istenirse eğer, binaların içinde toplanan sıcaklık, nem, parlaklık, CO2 emisyonları gibi veriler iç ortam ortamdand toplanan fiziksel veri kaynaklarıdır. Dış hava koşullarından toplanan fiziksel veri kaynakları ise sisteme daha fazla bağlamsal veri eklemek için çevrimiçi kaynaklardan dış ortam çevre verilerinin toplanmasıdır. Bu tür veriler sıcaklık, nem, rüzgar hızı/yönü ve güneş radyasyonunu içermektedir.

##### 3.1.2 Siber Veri Kaynakları

Siber veri kaynakları, sosyal medya bilgileri, web erişim verileri ve açık veri kümeleri gibi İnternet alanından yaygın olarak elde edilen verileri ifade etmektedir. Sosyal medya verileri genellikle veri madenciliği teknikleri ile elde edilmektedir. Web erişim verileri web uygulamaları programlama arayüzünden (API) elde edilebilir. Açık veri kümeleri ise telekom operatörü veya hazır verilere sahip bir şirket gibi üçüncü taraf satıcılardan gelen verileri ifade etmektedir.

### 3.1.3 Kullanıcı Veri Kaynakları

Kullanıcı etkinlikleriyle ilgili bilgileri ifade eder. Katılımcı veri kaynakları, akıllı yapı kullanıcıların cep telefonları, giyilebilir cihazlar, tabletler vb. gibi kişisel cihazlarının katkıda bulunduğu kitle algılama [79] ve kitle kaynak kullanımı verilerini içerir. Kullanıcılar verileri gönüllü olarak veya bazı teşvik mekanizmaları aracılığıyla sağlamaktadır. Kullanıcının doluluk oranı, termostat ayarları, pencere ve kapı açıklıkları gibi fiziksel aktivitelerini izlemek için sensörler yerleştirilerek kullanıcı verileri elde edilebilmektedir.

### 3.1.4 Hibrit Veri Kaynakları

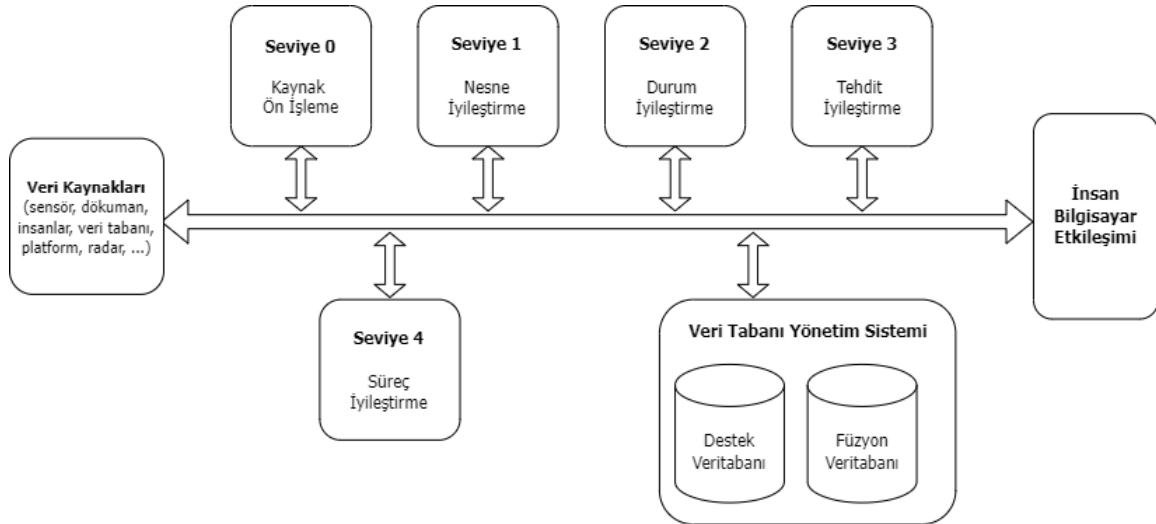
Hibrit veri kaynakları, farklı veri kaynaklarından elde edilen verilerin birleştirilmesini ifade etmektedir. Örneğin katılımcı ve fiziksel sensör verilerinin birleştirilmesiyle, tek veri kaynağına kıyasla daha yüksek verim elde edebilir.

## 3.2 Veri Füzyonu Mimarileri

Sensörler tarafından üretilen ham veriler, veri eksikliği, veri çelişkisi ve veri tutarsızlığı gibi birçok nedenden dolayı tahmin veya diğer uygulamalar için genellikle iyi sonuçlar vermeyebilir. Bu nedenle, veri kusuru ile başa çıkmak için farklı yöntemler mevcuttur. Ayrıca ham verilerden tek seferde yüksek değerli bilgi çıkarımı yapılamamaktadır. Verileri sistematik olarak işlemek için hiyerarşik bir dönüşüme ihtiyaç vardır. Veri birleştirme, verileri işlemek için birkaç parçadan oluşan karmaşık bir sistem olduğundan, her parçanın işlevlerini ve karakterlerini tanımlamak için ifadeleri veya terminolojileri birleştirmek gerekmektedir. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan bazı veri birleştirme mimarileri tanıtılmaktadır.

### 3.2.1 Joint Directors of laboratories

JDL veri füzyon modeli, bir veri füzyon sistemindeki her bir süreci tanımlamak için bir dizi kavram ve işlevi tanımlayan işlevsel bir modeldir. Şekil 3 JDL veri füzyon mimarisini göstermektedir. Veri işleme düzeyleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 3: JDL Mimarisi

- **Seviye 0 – Kaynak Ön İşleme:** Sinyal veya piksel seviyelerindeki ham verilerle ilgilenen en düşük veri işleme seviyesidir. Bir sonraki adımlar için bu seviyede verilerin iyi hazırlanması gerekmektedir. Bu nedenle asıl görevi, verileri daha sonraki işlemler için uygun bir düzeye dönüştürmektir. Bu veri işleme adımı, sistem yükünü azaltabilir.

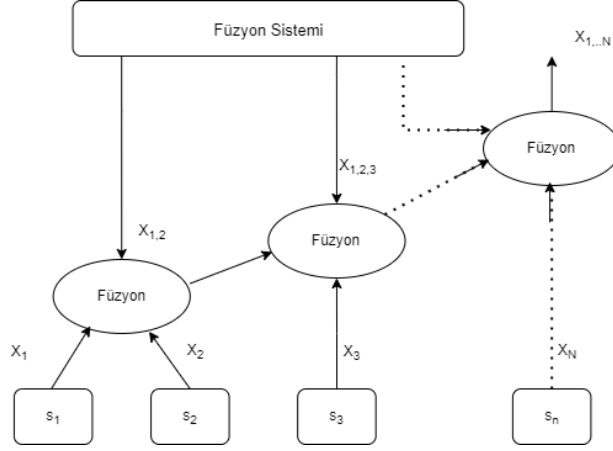


- **Seviye 1 – Nesne İyileştirme:** Bu seviye de nesnelerin kimlik bilgileri çıkarılmaktadır. Belirli bir varlığı tanımlamaya odaklanır. Bir varlığın konumu, yönü, durumu ve diğer nitelikleri hakkındaki tüm statik bilgiler toplanır ve tutarlı bir modelde birleştirilir. Ardından sistem, daha ileri bir tahmin için hem zaman boyutundan hem de mekansal boyuttan kapsamlı bir görünüm elde edebilir.
- **Seviye 2 – Durum İyileştirme:** Nesnenin önceki seviyeden edindiği bilgilere dayanarak, bu seviye nesnenin çevresiyle ilgili bilgi edinimini kapsamaktadır. Nesnelerin kendi aralarındaki etkileşim ve ortamla ilişkisi seviye 2'nin temel odak noktasıdır.
- **Seviye 3 – Tehdit İyileştirme:** Riskleri, güvenlik açıklarını ve operasyonel olasılığı tahmin eden seviyedir. Belirsizlik seviyesi yüksek olduğundan, seviye 3'te zorlu bir süreç bulunmaktadır.
- **Seviye 4 – Süreç İyileştirme:** Bu seviye, tüm işleme seviyelerinin yönetildiği kısımdır. Diğer seviyeleri gerçek zamanlı olarak izleme, sistemin performansını kaydetme ve sistem verimliliğini artırmak için kararlar almaktadır. Örneğin bu seviyede sistem, ne tür bilgilerin yetersiz olduğunu bulabilmekte, kaynaklardan veri alma açısından her seviyenin çalışmasını onaylayabilmekte ve tüm sistemi yönlendirebilmektedir.
- **Kaynaklar:** Sistem kaynakları, sensörler (yerel sensörler veya dağıtılmış sensörler), veri tabanları vb. gibi temel bileşenleridir.
- **İnsan-bilgisayar etkileşimi:** Komutlar, bilgi sorgulamaları, sistem sonuçları ve kararları hakkında mesajlar vb. dahil olmak üzere sistem üzerinde sorunsuz bir şekilde işlemleri yürütmeye olanak tanımaktadır. Aslında İnsan-bilgisayar etkileşimi, insan ve bilgisayar arasındaki iletişimi sağlar.
- **Veri yönetimi:** Bu bileşen, verileri ham veri ve bilgiler içeren farklı biçimlerde depolamaktadır. Farklı işleme seviyeleri, veri yönetimiyle sıklıkla etkileşime girmektedir. Bu seviyenin görevleri arasında veri alma, veri depolama, veri güvenliği ve veri sıkıştırma yer almaktadır. Dahil edilen büyük miktarda veri ve hızlı etkileşim ihtiyacı, veri yönetimini zor bir görev haline getirmektedir.

### 3.2.2 Luo and Kay Mimarisi

Luo ve Kay, çoklu sensör entegrasyonu ve füzyonu üzerinde yaptıkları çalışmalar [80] ile Şekil4'de gösterildiği gibi, kullanılan entegre verilerin soyut seviyesine dayalı yeni bir çoklu sensör füzyonun genel mimarisini oluşturmaktadır. Luo ve Kay mimarisinde, sensörlerden gelen ham veriler bir bilgi sisteminin düğümlerinde birleştirilir. Örneğin, sensör 1 ve 2'den gelen veriler, veri  $x_{1,2}$  olarak birleştirilebilir. Bundan sonra, çıktı verileri  $x_{1,2}$ , bir sonraki füzyon düğümünde sensör 3'ten gelen verilerle birleşerek veri  $x_{1,2,3}$ 'e dönüştürülür.  $x_{1,2}, \dots, x_n$  füzyon düğümü en son füzyonun sonucudur. Farklı seviyelerden oluşan füzyon sürecinde her seviye farklı girdi veri modelleri ile ilgilenir, çeşitli sistemlerde çeşitli amaçlar için uygulanmaktadır.

- **Sinyal Seviyesi:** Sensör verileri, doğrudan birleştirilecek füzyon modellerine girdi olarak verilmektedir. Bu füzyon işleminden sonra verilerin gürültü oranı düşeceği için daha yüksek doğruluk ve sistem verimini arttıracak özelliklerle ortaya çıkmaktadır. Ham veriler birbirine paralelse bu düzeyde füzyon işlemine tabi tutulabilirler. Sinyal seviyesi füzyonu bazen gerçek zamanlı füzyon senaryolarında meydana gelir veya sinyallerin ön işlenmesinde ek bir adım olabilmektedir. Düşük seviyeli füzyon veya ham veri füzyonu olarak adlandırılmaktadırlar.
- **Piksel Seviyesi:** Sinyal seviyesi füzyonunun görüntü işleme için kullanılan özel bir durumudur. Piksel düzeyinde füzyon, segmentasyon gibi bazı görüntü işleme uygulamalarını desteklemektedir.
- **Özellik Seviyesi:** Füzyon işlemi öncesinde gerekli özellikleri elde edebilmek için sensör verileri ön işlemden geçirilmektedir. Bu seviyede karar düzeyindeki veriler elde edebilir. Özellik düzeyinde veri birleştirme, orta düzey birleştirme veya karakteristik düzey birleştirme olarakta bilinmektedir.
- **Karar Seviyesi:** Karar seviyesindeki veri birleştirme, yüksek seviyeli birleştirme olarakta adlandırılmaktadır. Düşük seviyeli füzyonla karşılaştırıldığında, karar seviyesi füzyon yöntemleri genellikle ön sınıflandırma oluşturur ve farklı veri türlerini birleştirerek daha doğru füzyon sonuçları elde edilebilir.

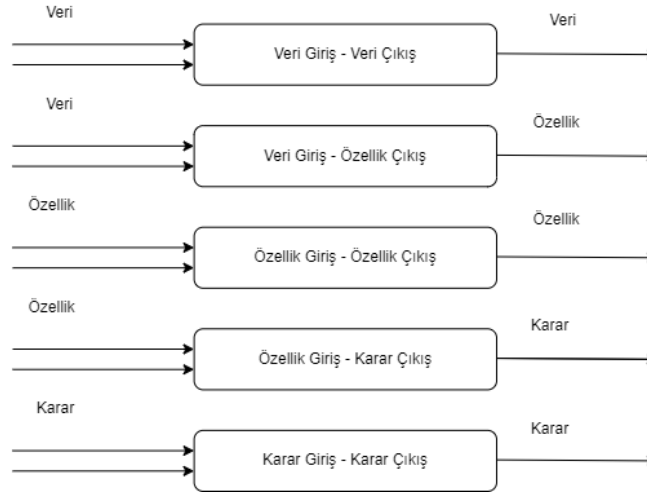


Şekil 4: Luo ve Kay Mimarisi

Luo ve Kay mimarisi, karar verme ve tahmin etme amaçlı yüksek düzeyde bilgi çıkarımı için hiyerarşik bir füzyon sistematığı kullanmaktadır. Yani ham sensör verilerinden anlamlı bir bilgi çıkarımına kadar geçen süre bir işlem sırasına dayanmaktadır.

### 3.2.3 Dasarathy Mimarisi:

Üç katmanlı mimarideki bazı belirsiz koşulların daha kesin bir tanımına gerek duyan Dasarathy 1997'de Luo ve Kay'in üç katmanlı (veri-özellik-karar) füzyon mimarisine ek olarak, I/O (giriş/çıkış) karakterizasyonuna göre füzyon aşamalarını beşe yükselterek daha net bir tanımlama ortaya koymuştur[80]. Şekil 5'de gösterildiği gibi eski mimari I/O perspektifi de dikkate alınarak genişletilmiş oldu.



Şekil 5: Dasarathy Mimarisi

- **Veri Giriş - Veri Çıkış:** Veri füzyonunun en temel basamağıdır. Girdi verilerini daha kullanılabilir hale getirmeye çalışmaktadır. Sinyal işleme ve görüntü işlemeyi içermektedir.
- **Veri Giriş - Özellik Çıkış:** Veri setleri önce özellik adı verilen bazı soyut bilgilere entegre edilir. Bu füzyon uygulanarak ham verilerden bazı basit ve sezgisel sonuçlar elde edilebilmektedir.

- **Özellik Giriş- Özellik Çıkış** Veri girişlerinden farklı olarak, özellik girişleri önceden çıkarılmış olan bazı iyileştirilmiş özellikleri belirleyebilmektedir.
- **Özellik Giriş-Karar Çıkış:** Veri füzyonu algoritmaları genellikle bu mimariyi kullanmaktadır. Sınıflandırma amaçlı kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu füzyonun bir başka örneği de örüntü tanımadır. Çoklu sensörlerden iletilen özellikler girdileri ile bir karar oluşturularak bilgi çıkarımı yapılmaktadır.
- **Karar Giriş-Karar Çıkış:** Dasarathy mimarisindeki en yüksek füzyon seviyesidir. Alt seviyedeki veya yerel füzyon düğümlerindeki bazı kararları dikkate alarak daha kapsamlı bir karar bilgileri elde edilebilmektedir.

### 3.3 Veri Füzyonundaki Zorluklar ve Çözüm Yaklaşımları

Veri füzyonu performansının en üst seviyeye çıkarılabilmesi için bir takım zorlukların üstesinden gelinmelidir. IoT uygulamalarında sensörlerin dağıtıldığı ortamlarının karmaşıklığı ve veri türlerinin çeşitliliği bu zorlukların genel nedenleridir. Veri füzyonunda karşılaşılan zorluklar bu bölümde incelenmektedir.

#### 3.3.1 Veri Kusurları

Veri kusurları, veri birleştirme yöntemleri için çözülmesi gereken temel ve yaygın bir problemdir. Sensörlerin üretmiş oldukları veriler kesin olmayan, tutarsız ve eksik verilerdir. Veri kusurları mevcut bilgiler ve güçlü matematiksel araçlarla modellenerek veri kalitesi iyileştirilebilir. Veri kusuru füzyon kalitesini ciddi şekilde etkileyeceği için veri birleştirme ile kesin ve faydalı veriler çıkarılamayabilir. Uygulama ortamındaki sensör ölçümlerinden gürültü kaynaklı tutarlı olmayan veriler elde edilebilmektedir. Bu tutarsızlıklar veri düzensizliğine sebep olmaktadır. Bir füzyon modeli bu veri tutarsızlığına neden olan etkenleri ayırt edemiyorsa, bu sorun veri füzyon kalitesini etkileyecektir. Veri tutarsızlığı sorununun üstesinden gelebilmek için Veri birleştirme teknikleri etkili bir şekilde kullanılmalıdır.

*Çözüm yaklaşımı:* Sensörlerden alınan veriler ile bilgi çıkarımı ve karar verme yetileri geliştirmek amacıyla veri analizi yapılırken belirsizlikler ortadan kaldırılmalıdır. Veri kaynakları tutarsız, kusurlu, eksik veriler üretebilmektedir. Veri işleme katmanında, verinin gürültüden arındırılması, aykırı olan verilerin değer tespiti, eksik veri atama gibi farklı sorunların giderilmesini amaçlanmaktadır. Veri birleştirme yöntemi kaliteyi etkileyecek sorunları ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Sorunlu verilerin giderilmediği durumlarda güvenilirlik problemi oluşmaktadır. IoT’de eksik veriler yaygın olmakla birlikte analiz yapan öğrenme algoritmaları bu verilerin eksik olmadığını kabul ederler. Dolayısıyla veri analitiği yüksek olmayan sonuçlar üretebilmektedir. Hatalı sensör verileri, zayıf ağ bağlantıları, çevresel faktörler, eş zamanlama işlem yapabilmeme problemleri eksik verilerin oluşma nedenleridir. Gauss Karışım Modeli (GMM) [81], Mekansal ve zamansal korelasyon [82], [83] Artımlı Uzay-Zaman Modeli (ISTM) [84], Olasılıksal Matris Çarpanlara ayırma (PMF) [85] eksik veri sorununda kullanılan yöntemlerdendir. Sensör düğümleri dağıtık ve heterojen bir yapıya sahiptir. Fiziksel dünyada çevresel faktörlerinde etkisiyle bu ağ yapısı sorunlara neden olmaktadır. Bu durum orjinal IoT sensör verilerinin daha fazla farklı sonuç vermesine ve aykırı değer üretmeye yatkın bir hale getirmektedir. Veri analizi yapılırken bu aykırı değerlerin tespiti önemli bir aşamadır. Aykırı değer tespiti için Çoğunluk Oylaması [86], Sınıflandırma [87], Temel Bileşen Analizi [PCA] [88] kullanılmaktadır.

#### 3.3.2 Çakışan Veriler

Sensörlerden veya akıllı yapılardan alınan aynı, yani mükerrer veriler varsa bu durum da büyük bir problemdir. Bağımsız şekilde ele alınamayan problemler temsil hatası oluşturabilir. Çakışan veriler kirli veri olarak adlandırılır ve veri analizi sonuçlarını kötü etkileyebilir. Genellikle Kanıtsal İnanç ve Dempster-Shafer teorilerini uygulayan sistemlerde ortaya çıkar. [89]

*Çözüm yaklaşımı:* Dempster’in kombinasyon kuralı kullanılırken çakışan verilerin birleştirilmesi sorunlu olabileceğinden, veri çakışmasının derecesini makul ve etkili bir şekilde yargılamak çok önemlidir. Bu konu ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Çakışan katsayı tabanlı ifade yöntemleri, mesafeye dayalı çakışma ifade yöntemleri gibi yöntemler uygulanabilmektedir[90].

### 3.3.3 Veri Hizalama

Farklı sensörlerden alınan veriler çeşitlilik gösterebilmektedir. Veri birleştirme işlemi gerçekleştirilmeden önce bu verilerin ortak bir çerçevede hizalanması gerekmektedir, bu durum veri hizalama veya veri kaydı olarak adlandırılmaktadır. Veri setinin birden fazla hesaplanması durumunda veya kaynaştırıldığında korelasyon zorluğu meydana gelmektedir. Özellikle tahmine dayalı bir füzyon sisteminde ilişkili verilerin veri füzyonu algoritmaları tarafından ortadan kaldırılması sistemi olumlu yönden etkileyecektir.

### 3.3.4 Önemsiz Veriler

IoT sistemleri geniş çaplı uygulama alanlarına sahip oldukları için farklı durumları algılama amaçlı yüzlerce sensör bulunabilir. Elde edilen büyük veri içerisinde önemsiz ve yararsız verilerde bulunmaktadır. Veri birleştirme işlemi yapmadan önce alakalı verilerin seçilmesi gerekmektedir.

*Çözüm yaklaşımı:* Tek bir kaynaktan gelen veri, beklenen çıktıyı sağlamak için yetersiz kalabilmektedir. Sistem bütünsel olarak ele alındığında aynı tür ya da farklı tür birden fazla veri kaynağının birleştirilmesi daha verimli sonuçlar ortaya çıkaracaktır. Örneğin günlük bir nesnenin tanınması için görme, işleme, tatma ve algılama gibi birçok duyunun aynı anda kullanılması gerekmektedir. Sensör verilerinin birleştirilmesi de IoT sistem çıktısını iyileştirecektir.

### 3.3.5 Heterojen Veriler

İnsanların duyu organları ve amaçları farklı olduğu gibi her bir sensöründe farklı amacı bulunmaktadır. Dolayısıyla IoT uygulama alanında sensörlerden alınan veri türleri çeşitlilik göstermektedir. Veri birleştirme yöntemleri bir sistemden üst düzey bilgi çıkarımı yapabilmek için farklı veri türlerini birleştirebilmelidir.

*Çözüm yaklaşımı:* Sowe ve arkadaşları büyük veri bulut platformunda heterojen sensör verilerini yönetmek için anahtar bir ara katman yazılımı olarak bir Hizmet Kontrollü Ağ (SCN) içeren entegre bir IoT mimarisi önermektedirler [91]. Önerilen bu mimari, sensörlerden elde edilen büyük verilerini etkin bir şekilde yönetmek için bir şablon veya sistematik bir çözüm biçimi sağlayabilir ve sonuç olarak veri yoğun araştırma toplulukları için gelişmiş hizmetler sağlamak için değerli bilgilerin çıkarımını yapabilmektedir.

### 3.3.6 Füzyon Konumu

Verilerin merkezi bir düğümde ya da yerel bir düğümde birleştirilmesi bant genişliği ve maliyet açısından önemlidir. Merkezi bir düğümde gerçekleştirilen füzyon işlemi daha fazla bant genişliği gerektirmektedir. Veri Füzyonu yaparken maliyet ve füzyon kalitesi dengesi sağlanmak zorundadır.

Veri Madenciliği, Makine Öğrenmesi ve Yapay Zekada yaşanan gelişimler birçok kaynaktan elde edilen verilerin analizi ve bilgi çıkarımı için veri birleştirme mimarisine etkileri büyüktür. Örneğin akıllı ulaşım sistemlerinde toplu taşımayı iyileştirmek için bir veri kaynağından elde edilen verilerin yeterli olmayıp birkaç sensör bilgisi birleştirilerek üst düzey bilgi çıkarımı sağlanabilmektedir. Yeni nesil yapay zeka teknikleri maliyet ve füzyon kalitesi açısından kıymetlidir.

### 3.3.7 Dinamik Yapılı Füzyon

Üretilen verilerin gerçek zamanlı olması durum tahmini yapmanın belirli süre zarfında gerçekleştirilmesi zorluğunu beraberinde getirmektedir. Füzyon mekanizması doğru veri sırasını ayırt edebilmeli ve zamanla değişen sistemi doğru bir şekilde takip edebilmelidir.

*Çözüm yaklaşımı:* IoT sistemlerinde oluşturulan sensör verileri, çoğunlukla gerçek zamanlı karar verme ile veri analizine ihtiyaç duyar. Sensör verileri yüksek hızlı, büyük hacimli ve dinamik değerler içermektedir. Ayrıca sensör verileri, gerekli veri analizini ve gerçek zamanlı karar verme işlemi gerçekleştirirken çok fazla gürültü oluşur. Gürültü, sinyalin orijinal vektörleri üzerinde istenmeyen değişiklikler meydana getiren ilişkisiz bir sinyal bileşenidir [92]. Gürültü özelliği, kaynakların gereksiz şekilde işlenmesine ve kullanılmasına yol açar. Dalgacık dönüşüm yöntemi, sinyalleri gürültüden arıtmada yüksek başarımlı göstermektedir. Zaman-frekans düzeyinde sinyal analizini hedefleyen Sürekli Dalgacık Dönüşümü (CWT) ve bir zaman düzeyinde sinyal analizini hedefleyen Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT) olmak üzere iki tür dalgacık dönüşümü vardır.

#### 4. Sonuç

Bir füzyon işlemi için çok çeşitli veri kaynakları, özdeş sensörlerden kaynaklanacak şekilde belirtilmemiştir. Doğrudan füzyon veya dolaylı füzyon şeklinde ayırt edilebilir. Doğrudan füzyon, bir dizi heterojen veya homojen sensörden, yumuşak sensörlerden ve sensör verilerinin geçmiş değerlerinden gelen sensör verilerinin birleştirilmesidir. Dolaylı veri birleştirme ise çevre ve insan girdisi hakkında ön bilgi gibi birçok bilgi kaynaklarını kullanır. Çoklu sensör veri füzyonu, ölçüm ve algılama yoluyla ortamın daha doğru bir tahminini yapmak için birden fazla sensörden gelen verileri birleştirmek için gelişmekte olan bir teknolojidir. Akıllı sistemler kapsamında yer alan akıllı şehirler, akıllı yapılar, akıllı yaşam, akıllı çevre, akıllı ekonomi gibi bir çok alanda veri ve sensör füzyonu uygulamaları aktif rol almaktadır. Özellikle bu uygulamalarda veri bazlı yaşanan zorluklar bulunmaktadır. Veri ve sensör füzyonu işlemlerinde çok çeşitli parametreler ve süreçler bulunduğundan sıkıntılı ve zorlu süreçler yaşanmaktadır. Bu nedenle bu süreçlerin hatasız ve sıkıntısız giderilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma ile yaşanan veri bazlı füzyon zorlukları incelenmiş ve çözüm yaklaşımları kısaca sunulmuştur.

#### 5. Bilgilendirme

Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı doktora öğrencisi Berna ÇENGİZ'in Doktora Tezi, TÜBİTAK tarafından "2211-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Doktora Burs Programı" kapsamında desteklenmektedir.

#### Kaynakça

- [1] M. M. Gaber, A. Aneiba, S. Basurra, *et al.*, "Internet of things and data mining: From applications to techniques and systems," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 9, no. 3, May 1, 2019, ISSN: 1942-4787. DOI: 10.1002/widm.1292.
- [2] B. P. L. Lau, S. H. Marakkalage, Y. Zhou, *et al.*, "A survey of data fusion in smart city applications," *Information Fusion*, vol. 52, pp. 357–374, Dec. 1, 2019, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2019.05.004. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253519300326> (visited on 06/07/2022).
- [3] F. Alam, R. Mehmood, I. Katib, N. N. Albogami, and A. Albeshri, "Data fusion and IoT for smart ubiquitous environments: A survey," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9533–9554, 2017, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2697839. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7911293/> (visited on 06/07/2022).
- [4] J. Liu, T. Li, P. Xie, S. Du, F. Teng, and X. Yang, "Urban big data fusion based on deep learning: An overview," *Information Fusion*, vol. 53, pp. 123–133, Jan. 1, 2020, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2019.06.016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253519301393> (visited on 05/18/2022).
- [5] R. Kumar, R. Mishra, H. P. Gupta, and T. Dutta, "Smart sensing for agriculture: Applications, advancements, and challenges," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 51–56, Jul. 1, 2021, ISSN: 2162-2248, 2162-2256. DOI: 10.1109/MCE.2021.3049623. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9316711/> (visited on 06/13/2022).
- [6] A. Shamsuzzoha, J. Nieminen, S. Piya, and K. Rutledge, "Smart city for sustainable environment: A comparison of participatory strategies from helsinki, singapore and london," *Cities*, vol. 114, p. 103194, Jul. 1, 2021, ISSN: 0264-2751. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103194. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275121000925> (visited on 06/16/2022).
- [7] S. B. Atitallah, M. Driss, W. Boulila, and H. B. Ghézala, "Leveraging deep learning and IoT big data analytics to support the smart cities development: Review and future directions," *Computer Science Review*, vol. 38, p. 100303, Nov. 1, 2020, ISSN: 1574-0137. DOI: 10.1016/j.cosrev.2020.100303. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013720304032> (visited on 05/26/2022).
- [8] A. S. Syed, D. Sierra-Sosa, A. Kumar, and A. Elmaghraby, "IoT in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 2, pp. 429–475, Jun. 2021, Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2624-6511. DOI: 10.3390/smartcities4020024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2624-6511/4/2/24> (visited on 06/28/2022).

- [9] R. Frank, *Understanding Smart Sensors*. Artech House, 2013, 390 pp., Google-Books-ID: v4G9jKBCghMC, ISBN: 978-1-60807-507-2.
- [10] R. Das and I. Turkoglu, "Creating meaningful data from web logs for improving the impressiveness of a website by using path analysis method," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 3, pp. 6635–6644, Apr. 1, 2009, ISSN: 0957-4174. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.08.067. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417408005952> (visited on 08/08/2022).
- [11] C. Gomez, S. Chessa, A. Fleury, G. Roussos, and D. Preuveneers, "Internet of things for enabling smart environments: A technology-centric perspective," *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, vol. 11, no. 1, pp. 23–43, Jan. 1, 2019, Publisher: IOS Press, ISSN: 1876-1364. DOI: 10.3233/AIS-180509. [Online]. Available: <https://content.iospress.com/articles/journal-of-ambient-intelligence-and-smart-environments/ais180509> (visited on 06/07/2022).
- [12] G. Muhammad, F. Alshehri, F. Karray, A. E. Saddik, M. Alsulaiman, and T. H. Falk, "A comprehensive survey on multimodal medical signals fusion for smart healthcare systems," *Information Fusion*, vol. 76, pp. 355–375, Dec. 1, 2021, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2021.06.007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253521001330> (visited on 06/01/2022).
- [13] R. M. Abdelmoneem, E. Shaaban, and A. Benslimane, "A survey on multi-sensor fusion techniques in IoT for healthcare," in *2018 13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, Dec. 2018, pp. 157–162. DOI: 10.1109/ICCES.2018.8639188.
- [14] M. Gochoo, S. B. U. D. Tahir, A. Jalal, and K. Kim, "Monitoring real-time personal locomotion behaviors over smart indoor-outdoor environments via body-worn sensors," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 70 556–70 570, 2021, Conference Name: IEEE Access, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078513.
- [15] R. Gravina, P. Alinia, H. Ghasemzadeh, and G. Fortino, "Multi-sensor fusion in body sensor networks: State-of-the-art and research challenges," *Information Fusion*, vol. 35, pp. 68–80, May 1, 2017, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2016.09.005. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156625351630077X> (visited on 06/03/2022).
- [16] Z. Qin, Y. Zhang, S. Meng, Z. Qin, and K.-K. R. Choo, "Imaging and fusing time series for wearable sensor-based human activity recognition," *Information Fusion*, vol. 53, pp. 80–87, Jan. 1, 2020, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2019.06.014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253519302180> (visited on 06/03/2022).
- [17] S. Qiu, L. Liu, H. Zhao, Z. Wang, and Y. Jiang, "MEMS inertial sensors based gait analysis for rehabilitation assessment via multi-sensor fusion," *Micromachines*, vol. 9, no. 9, p. 442, Sep. 2018, Number: 9 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi9090442. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-666X/9/9/442> (visited on 06/03/2022).
- [18] T. Diethe, N. Twomey, M. Kull, P. Flach, and I. Craddock, "Probabilistic sensor fusion for ambient assisted living," arXiv, arXiv:1702.01209, Feb. 3, 2017, type: article. DOI: 10.48550/arXiv.1702.01209. arXiv: 1702.01209 [cs, stat]. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1702.01209> (visited on 06/03/2022).
- [19] H. Lindskog, "Smart communities initiatives," Jan. 1, 2004.
- [20] S. Consoli, D. Reforgiato Recupero, M. Mongiovi, V. Presutti, G. Cataldi, and W. Patatu, "An urban fault reporting and management platform for smart cities," in *Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web*, ser. WWW '15 Companion, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, May 18, 2015, pp. 535–540, ISBN: 978-1-4503-3473-0. DOI: 10.1145/2740908.2743910. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2740908.2743910> (visited on 06/06/2022).
- [21] Z. Alazawi, O. Alani, M. B. Abdjbar, S. Altowajri, and R. Mehmood, "A smart disaster management system for future cities," in *Proceedings of the 2014 ACM international workshop on Wireless and mobile technologies for smart cities*, ser. WiMobCity '14, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Aug. 11, 2014, pp. 1–10, ISBN: 978-1-4503-3036-7. DOI: 10.1145/2633661.2633670. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2633661.2633670> (visited on 06/06/2022).
- [22] P. Xu, F. Davoine, J.-B. Bordes, H. Zhao, and T. Denœux, "Multimodal information fusion for urban scene understanding," *Machine Vision and Applications*, vol. 27, no. 3, pp. 331–349, Apr. 1, 2016, ISSN: 1432-1769. DOI: 10.1007/s00138-014-0649-7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00138-014-0649-7> (visited on 06/07/2022).

- [23] L. Yu, S. Qin, M. Zhang, C. Shen, T. Jiang, and X. Guan, "A review of deep reinforcement learning for smart building energy management," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 15, pp. 12 046–12 063, Aug. 2021, Conference Name: IEEE Internet of Things Journal, ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3078462.
- [24] R. Eini, L. Linkous, N. Zohrabi, and S. Abdelwahed, "Smart building management system: Performance specifications and design requirements," *Journal of Building Engineering*, vol. 39, p. 102 222, Jul. 1, 2021, ISSN: 2352-7102. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102222. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221000784> (visited on 06/07/2022).
- [25] X. Gao, P. Pishdad-Bozorgi, D. R. Shelden, and S. Tang, "Internet of things enabled data acquisition framework for smart building applications," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 147, no. 2, p. 04 020 169, Feb. 1, 2021, Publisher: American Society of Civil Engineers, ISSN: 1943-7862. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001983. [Online]. Available: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001983> (visited on 06/07/2022).
- [26] M. K. M. Shapi, N. A. Ramli, and L. J. Awalın, "Energy consumption prediction by using machine learning for smart building: Case study in malaysia," *Developments in the Built Environment*, vol. 5, p. 100 037, Mar. 1, 2021, ISSN: 2666-1659. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100037. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266616592030034X> (visited on 06/07/2022).
- [27] Y. Hajjaji, W. Boulila, I. R. Farah, I. Romdhani, and A. Hussain, "Big data and IoT-based applications in smart environments: A systematic review," *Computer Science Review*, vol. 39, p. 100 318, Feb. 1, 2021, ISSN: 1574-0137. DOI: 10.1016/j.cosrev.2020.100318. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013720304184> (visited on 06/08/2022).
- [28] M. Wu, C. Wu, W. Huang, *et al.*, "An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining landsat and MODIS data to generate daily synthetic landsat imagery," *Information Fusion*, vol. 31, pp. 14–25, Sep. 1, 2016, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2015.12.005. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253515001177> (visited on 06/08/2022).
- [29] Y. Zeng, W. Huang, M. Liu, H. Zhang, and B. Zou, "Fusion of satellite images in urban area: Assessing the quality of resulting images," in *2010 18th International Conference on Geoinformatics*, ISSN: 2161-0258, Jun. 2010, pp. 1–4. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5568105.
- [30] M. Marchiori, "The smart cheap city: Efficient waste management on a budget," in *2017 IEEE 19th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 15th International Conference on Smart City; IEEE 3rd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, Dec. 2017, pp. 192–199. DOI: 10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2017.25.
- [31] A. A. Khan, A. A. Sajib, F. Shetu, S. Bari, M. S. R. Zishan, and K. Shikder, "Smart waste management system for bangladesh," in *2021 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, Jan. 2021, pp. 659–663. DOI: 10.1109/ICREST51555.2021.9331159.
- [32] Y. A. Fatimah, K. Govindan, R. Murniningsih, and A. Setiawan, "Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of indonesia," *Journal of Cleaner Production*, vol. 269, p. 122 263, Oct. 1, 2020, ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122263. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620323106> (visited on 06/08/2022).
- [33] K. Pardini, J. J. P. C. Rodrigues, O. Diallo, A. K. Das, V. H. C. de Albuquerque, and S. A. Kozlov, "A smart waste management solution geared towards citizens," *Sensors*, vol. 20, no. 8, p. 2380, Jan. 2020, Number: 8 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20082380. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2380> (visited on 06/08/2022).
- [34] H. P. Breivold, "Internet-of-things and cloud computing for smart industry: A systematic mapping study," in *2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES)*, ISSN: 2572-6609, Sep. 2017, pp. 299–304. DOI: 10.1109/ES.2017.56.
- [35] A. Diez-Olivan, J. Del Ser, D. Galar, and B. Sierra, "Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards industry 4.0," *Information Fusion*, vol. 50, pp. 92–111, Oct. 1, 2019, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2018.10.005. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253518304706> (visited on 06/08/2022).

- [36] J. Leng, D. Wang, W. Shen, X. Li, Q. Liu, and X. Chen, “Digital twins-based smart manufacturing system design in industry 4.0: A review,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 60, pp. 119–137, Jul. 1, 2021, ISSN: 0278-6125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.05.011. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612521001151> (visited on 06/08/2022).
- [37] Ö. Gültekin, E. Cinar, K. Özkan, and A. Yazıcı, “Multisensory data fusion-based deep learning approach for fault diagnosis of an industrial autonomous transfer vehicle,” *Expert Systems with Applications*, vol. 200, p. 117055, Aug. 15, 2022, ISSN: 0957-4174. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117055. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417422004699> (visited on 06/08/2022).
- [38] V. U. Ihekoronye, C. I. Nwakanma, G. O. Anyanwu, D.-S. Kim, and J.-M. Lee, “Benefits, challenges and practical concerns of IoT for smart manufacturing,” in *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, ISSN: 2162-1233, Oct. 2021, pp. 827–830. DOI: 10.1109/ICTC52510.2021.9620771.
- [39] P. Wang and M. Luo, “A digital twin-based big data virtual and real fusion learning reference framework supported by industrial internet towards smart manufacturing,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 16–32, Jan. 1, 2021, ISSN: 0278-6125. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.11.012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612520301990> (visited on 06/08/2022).
- [40] V. K. Quy, N. V. Hau, D. V. Anh, *et al.*, “IoT-enabled smart agriculture: Architecture, applications, and challenges,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 7, p. 3396, Jan. 2022, Number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app12073396. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3396> (visited on 06/09/2022).
- [41] A. Vangala, A. K. Das, N. Kumar, and M. Alazab, “Smart secure sensing for IoT-based agriculture: Blockchain perspective,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 16, pp. 17591–17607, Aug. 2021, Conference Name: IEEE Sensors Journal, ISSN: 1558-1748. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3012294.
- [42] M. Ayaz, A. Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and H. Aggoune, “Internet-of-things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, Aug. 1, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932609.
- [43] K. M. Nahiduzzaman, M. Holland, S. Sikder, P. Shaw, K. Hewage, and R. Sadiq, “Urban transformation toward a smart city: An e-commerce-induced path-dependent analysis,” *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 147, p. 04020060, Mar. 1, 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000648.
- [44] W. Wenji, “Recognition of rural e-commerce smart assistant system based on smart voice technology,” *International Journal of Speech Technology*, Sep. 3, 2021, ISSN: 1572-8110. DOI: 10.1007/s10772-021-09887-z. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10772-021-09887-z> (visited on 06/14/2022).
- [45] D. Zhang, L. G. Pee, and L. Cui, “Artificial intelligence in e-commerce fulfillment: A case study of resource orchestration at alibaba’s smart warehouse,” *International Journal of Information Management*, vol. 57, p. 102304, Apr. 1, 2021, ISSN: 0268-4012. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102304. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401220315036> (visited on 06/14/2022).
- [46] X.-F. Shao, W. Liu, Y. Li, H. R. Chaudhry, and X.-G. Yue, “Multistage implementation framework for smart supply chain management under industry 4.0,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 162, p. 120354, Jan. 1, 2021, ISSN: 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120354. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004016252031180X> (visited on 06/14/2022).
- [47] T. Dzhuguryan and A. Deja, “Sustainable waste management for a city multifloor manufacturing cluster: A framework for designing a smart supply chain,” *Sustainability*, vol. 13, no. 3, p. 1540, Jan. 2021, Number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su13031540. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1540> (visited on 06/14/2022).
- [48] B. K. Dey, S. Bhuniya, and B. Sarkar, “Involvement of controllable lead time and variable demand for a smart manufacturing system under a supply chain management,” *Expert Systems with Applications*, vol. 184, p. 115464, Dec. 1, 2021, ISSN: 0957-4174. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115464. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417421008769> (visited on 06/14/2022).
- [49] S. Gupta, V. A. Drave, S. Bag, and Z. Luo, “Leveraging smart supply chain and information system agility for supply chain flexibility,” *Information Systems Frontiers*, vol. 21, no. 3, pp. 547–564, Jun. 1, 2019, ISSN: 1572-9419. DOI: 10.1007/s10796-019-09901-5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09901-5> (visited on 06/14/2022).



- [50] S. S. Bhattacharyya, D. Maitra, and S. Deb, "Study of adoption and absorption of emerging technologies for smart supply chain management: A dynamic capabilities perspective," *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, vol. 11, no. 2, pp. 14–54, Jul. 1, 2021, Publisher: IGI Global, ISSN: 1947-9573. DOI: 10.4018/IJAL.2021070102. [Online]. Available: <https://www.igi-global.com/article/study-of-adoption-and-absorption-of-emerging-technologies-for-smart-supply-chain-management/> [www.igi-global.com/article/study-of-adoption-and-absorption-of-emerging-technologies-for-smart-supply-chain-management/279068](https://www.igi-global.com/article/study-of-adoption-and-absorption-of-emerging-technologies-for-smart-supply-chain-management/279068) (visited on 06/14/2022).
- [51] W. Wang, N. Kumar, J. Chen, *et al.*, "Realizing the potential of internet of things for smart tourism with 5g and AI," vol. 34, no. 6, Oct. 23, 2020, Accepted: 2021-03-09T03:08:27Z, ISSN: 0890-8044. DOI: 10.1109/MNET.011.2000250. [Online]. Available: <https://repository.um.edu.mo/handle/10692/31690> (visited on 06/14/2022).
- [52] P. Lee, W. C. Hunter, and N. Chung, "Smart tourism city: Developments and transformations," *Sustainability*, vol. 12, no. 10, p. 3958, Jan. 2020, Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su12103958. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/10/3958> (visited on 06/14/2022).
- [53] S. Hasan, C. M. Schneider, S. V. Ukkusuri, and M. C. González, "Spatiotemporal patterns of urban human mobility," *Journal of Statistical Physics*, vol. 151, no. 1, pp. 304–318, Apr. 1, 2013, ISSN: 1572-9613. DOI: 10.1007/s10955-012-0645-0. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10955-012-0645-0> (visited on 06/14/2022).
- [54] L. Rosa, F. Silva, and C. Analide, "Mobile networks and internet of things: Contributions to smart human mobility," in *Distributed Computing and Artificial Intelligence, 17th International Conference*, Y. Dong, E. Herrera-Viedma, K. Matsui, S. Omatsu, A. González Briones, and S. Rodríguez González, Eds., ser. Akıllı Sistemlerdeki Gelişmeler ve Bilgi İşlem, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 168–178, ISBN: 978-3-030-53036-5. DOI: 10.1007/978-3-030-53036-5\_18.
- [55] L. Rosa, H. Faria, R. Tabrizi, S. Gonçalves, F. Silva, and C. Analide, "Sentiment analysis based on smart human mobility: A comparative study of ML models," in *Bio-inspired Systems and Applications: from Robotics to Ambient Intelligence*, J. M. Ferrández Vicente, J. R. Álvarez-Sánchez, F. de la Paz López, and H. Adeli, Eds., ser. Bilgisayar Bilimleri kitap serisindeki Ders Notlarının, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 55–64, ISBN: 978-3-031-06527-9. DOI: 10.1007/978-3-031-06527-9\_6.
- [56] M. W. Traunmueller, N. Johnson, A. Malik, and C. E. Kontokosta, "Digital footprints: Using WiFi probe and locational data to analyze human mobility trajectories in cities," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 72, pp. 4–12, Nov. 1, 2018, ISSN: 0198-9715. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.07.006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971517305914> (visited on 06/14/2022).
- [57] Z. Chen, M. K. Masood, and Y. C. Soh, "A fusion framework for occupancy estimation in office buildings based on environmental sensor data," *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 790–798, Dec. 1, 2016, ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.10.030. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816312543> (visited on 03/31/2021).
- [58] J. Yan, J. Liu, and F.-M. Tseng, "An evaluation system based on the self-organizing system framework of smart cities: A case study of smart transportation systems in china," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 153, p. 119 371, Apr. 1, 2020, ISSN: 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.07.009. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518301021> (visited on 06/14/2022).
- [59] L. Guevara and F. Auat Cheein, "The role of 5g technologies: Challenges in smart cities and intelligent transportation systems," *Sustainability*, vol. 12, no. 16, p. 6469, Jan. 2020, Number: 16 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su12166469. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6469> (visited on 06/14/2022).
- [60] F. Zantalis, G. Koulouras, S. Karabetos, and D. Kandris, "A review of machine learning and IoT in smart transportation," *Future Internet*, vol. 11, no. 4, p. 94, Apr. 2019, Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1999-5903. DOI: 10.3390/fi11040094. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/4/94> (visited on 06/14/2022).
- [61] J. Yang, Y. Han, Y. Wang, B. Jiang, Z. Lv, and H. Song, "Optimization of real-time traffic network assignment based on IoT data using DBN and clustering model in smart city," *Future Generation Computer Systems*, vol. 108, pp. 976–986, Jul. 1, 2020, ISSN: 0167-739X. DOI: 10.1016/j.future.2017.12.012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X17310609> (visited on 06/14/2022).
- [62] A. Al-Dweik, R. Muresan, M. Mayhew, and M. Lieberman, *IoT-based multifunctional Scalable real-time Enhanced Road Side Unit for Intelligent Transportation Systems*. Apr. 1, 2017, 1 p., Pages: 6. DOI: 10.1109/CCECE.2017.7946618.

- [63] A. Selim, P. Yousef, and M. Hagag, “Smart infrastructure by (PPPs) within the concept of smart cities to achieve sustainable development,” pp. 182–198, Jan. 1, 2018.
- [64] M. Gündüz and R. Das, *A comparison of cyber-security oriented testbeds for IoT-based smart grids*. Mar. 1, 2018, 1 p., Pages: 6. DOI: 10.1109/ISDFS.2018.8355329.
- [65] M. Z. Gunduz and R. Das, “Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions,” *Computer Networks*, vol. 169, p. 107094, Mar. 14, 2020, ISSN: 1389-1286. DOI: 10.1016/j.comnet.2019.107094. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619311235> (visited on 06/16/2022).
- [66] A. A. Khan, V. Kumar, M. Ahmad, and S. Rana, “LAKAF: Lightweight authentication and key agreement framework for smart grid network,” *Journal of Systems Architecture*, vol. 116, p. 102053, Jun. 1, 2021, ISSN: 1383-7621. DOI: 10.1016/j.sysarc.2021.102053. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383762121000461> (visited on 06/16/2022).
- [67] A. U. Rehman, Z. Wadud, R. M. Elavarasan, *et al.*, “An optimal power usage scheduling in smart grid integrated with renewable energy sources for energy management,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 84619–84638, 2021, Conference Name: IEEE Access, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3087321.
- [68] T. Ekwevugbe, N. Brown, and D. Fan, “A design model for building occupancy detection using sensor fusion,” in *2012 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST)*, ISSN: 2150-4946, Jun. 2012, pp. 1–6. DOI: 10.1109/DEST.2012.6227924.
- [69] G. Apostolou, S. Krinidis, D. Ioannidis, *et al.*, “GreenSoul□ a novel platform for the reduction of energy consumption in communal and shared spaces,” in *2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Sep. 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EFEA.2016.7748783.
- [70] Y.-L. Hsu, P.-H. Chou, H.-C. Chang, *et al.*, “Design and implementation of a smart home system using multisensor data fusion technology,” *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1631, Jul. 2017, Number: 7 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s17071631. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/7/1631> (visited on 04/13/2022).
- [71] S. Arvidsson, M. Gullstrand, B. Sirmacek, and M. Riveiro, “Sensor fusion and convolutional neural networks for indoor occupancy prediction using multiple low-cost low-resolution heat sensor data,” *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1036, Jan. 2021, Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21041036. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1036> (visited on 04/13/2022).
- [72] A. K. Das, P. H. Pathak, J. Jee, C.-N. Chuah, and P. Mohapatra, “Non-intrusive multi-modal estimation of building occupancy,” in *Proceedings of the 15th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, Delft Netherlands: ACM, Nov. 6, 2017, pp. 1–14, ISBN: 978-1-4503-5459-2. DOI: 10.1145/3131672.3131680. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3131672.3131680> (visited on 04/20/2022).
- [73] Z. Wang, T. Hong, and M. A. Piette, “Data fusion in predicting internal heat gains for office buildings through a deep learning approach,” *Applied Energy*, vol. 240, pp. 386–398, Apr. 15, 2019, ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.066. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919303630> (visited on 04/20/2022).
- [74] V. Barthelmes, V. Fabi, S. Corgnati, and V. Serra, “Human factor and energy efficiency in buildings: Motivating end-users behavioural change,” in *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, and Y. Fujita, Eds., vol. 825, Series Title: Advances in Intelligent Systems and Computing, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 514–525, ISBN: 978-3-319-96067-8 978-3-319-96068-5. DOI: 10.1007/978-3-319-96068-5\_58. [Online]. Available: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-96068-5\\_58](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-96068-5_58) (visited on 04/25/2022).
- [75] F. Fiebig, S. Kochanek, I. Mauser, and H. Schmeck, “Detecting occupancy in smart buildings by data fusion from low-cost sensors: Poster description,” in *Proceedings of the Eighth International Conference on Future Energy Systems*, Shatin Hong Kong: ACM, May 16, 2017, pp. 259–261, ISBN: 978-1-4503-5036-5. DOI: 10.1145/3077839.3081675. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3077839.3081675> (visited on 05/12/2022).
- [76] W. Wang, J. Chen, and T. Hong, “Occupancy prediction through machine learning and data fusion of environmental sensing and wi-fi sensing in buildings,” *Automation in Construction*, vol. 94, pp. 233–243, Oct. 1, 2018, ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.07.007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580518302656> (visited on 05/15/2022).

- [77] W. Wang, T. Hong, N. Xu, X. Xu, J. Chen, and X. Shan, “Cross-source sensing data fusion for building occupancy prediction with adaptive lasso feature filtering,” *Building and Environment*, vol. 162, p. 106 280, Sep. 1, 2019, ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106280. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319304901> (visited on 05/15/2022).
- [78] X. Jing, S. Li, J. Cheng, and J. Guo, “Multidimensional situational information fusion method for energy saving on campus,” *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 38, no. 4, pp. 4793–4807, Apr. 30, 2020, ISSN: 10641246, 18758967. DOI: 10.3233/JIFS-191513. [Online]. Available: <https://www.medra.org/servelet/aliasResolver?alias=iopress&doi=10.3233/JIFS-191513> (visited on 05/17/2022).
- [79] S. H. Marakkalage, S. Sarica, B. P. L. Lau, *et al.*, “Understanding the lifestyle of older population: Mobile crowdsensing approach,” *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 82–95, 2019, Conference Name: IEEE Transactions on Computational Social Systems, ISSN: 2329-924X. DOI: 10.1109/TCSS.2018.2883691.
- [80] R. Luo, C.-C. Yih, and K. L. Su, “Multisensor fusion and integration: Approaches, applications, and future research directions,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 107–119, Apr. 2002, Conference Name: IEEE Sensors Journal, ISSN: 1558-1748. DOI: 10.1109/JSEN.2002.1000251.
- [81] Z. Gao, W. Cheng, X. Qiu, and L. Meng, “A missing sensor data estimation algorithm based on temporal and spatial correlation,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 10, p. 435 391, Oct. 1, 2015, Publisher: SAGE Publications, ISSN: 1550-1329. DOI: 10.1155/2015/435391. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1155/2015/435391> (visited on 05/31/2022).
- [82] I. Mary and L. Arockiam, “Imputing the missing data in IoT based on the spatial and temporal correlation,” *2017 IEEE International Conference on Current Trends in Advanced Computing (ICCTAC)*, 2017. DOI: 10.1109/ICCTAC.2017.8249990.
- [83] Y. Li and L. E. Parker, “Nearest neighbor imputation using spatial–temporal correlations in wireless sensor networks,” *Information Fusion*, Special Issue: Resource Constrained Networks, vol. 15, pp. 64–79, Jan. 1, 2014, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2012.08.007. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253512000711> (visited on 05/31/2022).
- [84] P. Li, E. A. Stuart, and D. B. Allison, “Multiple imputation: A flexible tool for handling missing data,” *JAMA*, vol. 314, no. 18, pp. 1966–1967, Nov. 10, 2015, ISSN: 1538-3598. DOI: 10.1001/jama.2015.15281.
- [85] N. Vijayakumar and B. Plale. “Prediction of missing events in sensor data streams using kalman filters.” (2007), [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Prediction-of-Missing-Events-in-Sensor-Data-Streams-Vijayakumar-Plale/57c2a42693e615dc5cf4ae27eb2d3cce933732c2> (visited on 05/31/2022).
- [86] Faculty of Computer Science, Østfold University College, Halden 1783, Norway, A. Shahraki, and Ø. Haugen, “An outlier detection method to improve gathered datasets for network behavior analysis in IoT,” *Journal of Communications*, pp. 455–462, 2019, ISSN: 23744367. DOI: 10.12720/jcm.14.6.455-462. [Online]. Available: <http://www.jocm.us/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=221&id=1372> (visited on 05/31/2022).
- [87] M. Hasan, M. M. Islam, M. I. I. Zarif, and M. M. A. Hashem, “Attack and anomaly detection in IoT sensors in IoT sites using machine learning approaches,” *Internet of Things*, vol. 7, p. 100 059, Sep. 1, 2019, ISSN: 2542-6605. DOI: 10.1016/j.iot.2019.100059. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660519300241> (visited on 05/31/2022).
- [88] A. Gaddam, T. Wilkin, M. Angelova, and J. Gaddam, “Detecting sensor faults, anomalies and outliers in the internet of things: A survey on the challenges and solutions,” *Electronics*, vol. 9, no. 3, p. 511, Mar. 2020, Number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics9030511. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/3/511> (visited on 05/31/2022).
- [89] P. Smets, “Analyzing the combination of conflicting belief functions,” *Information Fusion*, vol. 8, no. 4, pp. 387–412, Oct. 1, 2007, ISSN: 1566-2535. DOI: 10.1016/j.inffus.2006.04.003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253506000467> (visited on 05/31/2022).
- [90] Z. Zhang, T. Liu, D. Chen, and W. Zhang, “Novel algorithm for identifying and fusing conflicting data in wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 14, no. 6, pp. 9562–9581, Jun. 2014, Number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s140609562. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/6/9562> (visited on 07/08/2022).
- [91] S. K. Sowe, T. Kimata, M. Dong, and K. Zettsu, “Managing heterogeneous sensor data on a big data platform: IoT services for data-intensive science,” in *2014 IEEE 38th International Computer Software and Applications Conference Workshops*, Jul. 2014, pp. 295–300. DOI: 10.1109/COMPACW.2014.52.

- [92] R. Krishnamurthi, A. Kumar, D. Gopinathan, A. Nayyar, and B. Qureshi, "An overview of IoT sensor data processing, fusion, and analysis techniques," *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6076, Jan. 2020, Number: 21 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20216076. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/21/6076> (visited on 05/31/2022).