



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
UYGULAMALARINDA SENSÖR VE SENSÖR
TABANLI TEKNOLOJİLERİN KULLANIMI
VE KATKILARININ İNCELENMESİ

Mehmet Akif ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran- 2022
KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Akif Arslan tarafından hazırlanan “İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA SENSÖR VE SENSÖR TABANLI TEKNOLOJİLERİN KULLANIMI VE KATKILARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 21/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Abdülkerim İLGÜN

Danışman

Doç. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mehmet Akif ARSLAN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARINDA SENSÖR VE SENSÖR TABANLI TEKNOLOJİLERİN KULLANIMI VE KATKILARININ İNCELENMESİ

MEHMET AKİF ARSLAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ

2022, 104 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN
Dr. Öğr. Üyesi Abdülkerim İLGÜN

Endüstriyel devrim olarak tanımlanabilecek endüstride dijitalleşmeyi temsil eden Endüstri 4.0 kavramı ile gelişen teknolojilerin inşaat sektöründe de etkileri görülmektedir. Bu kapsamda araştırmacılar yapı bilgi modellemesi (BIM), yapay zekâ, 3 boyutlu yazıcılar ve robotlar, büyük veri ve sensör teknolojileri gibi teknolojilerin inşaat sektöründe kullanımı üzerine çalışmalar yapmaktadır. İnşaat sektörü diğer endüstrilere göre dinamik, üretimin standartlaştırılması ve saha kontrolü daha güç bir sektör olup, bu çalışmaların amacı inşaat imalatlarını ve sahasını daha verimli, kontrol edilebilir, güvenli hale getirmektir. İnşaat işleri çok tehlikeli işler sınıfında yer almakla beraber sağladığı hizmetler, şehirlerin altyapı ve üstyapısını oluşturmaktan dolayı ortaya çıkan ürünler insanların can ve mal güvenliği açısından önem arz etmekte ve yapıların kalitesi ve güvenliğinin takip edilmesi hayati önem taşımaktadır. İnşaat sektörü ülke ekonomisinde büyük bir paya sahip olup, iş gücüne dayalı olması sebebiyle yüksek oranda istihdam sağlamakta fakat iş kazaları açısından da çok tehlikeli işler sınıfında sayılmaktadır. Sayıca fazla çalışanın bulunması, çalışanların eğitim düzeyinin düşük olması ve tehlikeli işlerden olması sebebiyle iş sağlığı güvenliğinin yönetilmesi de önemli bir konu haline gelmektedir. İnşaat 4.0 kapsamında gelişen teknolojilerden birisi olan sensör teknolojileri de yapıların, iş ve işçi sağlığının, iş güvenliğinin takibinde otomasyon sağlamayı amaçlayan, kontrol edilmesi güç değişkenleri kolaylıkla kontrol etmeyi amaçlayan ve karar verme mekanizmasını kolaylaştıran bir sistem olarak araştırmacıların üzerine yoğunlaştığı bir teknolojidir. Bu çalışmada sensör ve sensör tabanlı teknolojiler ile yapı sağlığı izleme ve iş sağlığı güvenliğine yönelik yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu teknolojinin sektöre sağlayacağı katkılar tartışılmıştır. Çalışma kapsamında 11 farklı sensör ile yapılan farklı uygulamalar incelenmiştir. Bu sensörler fiber optik, sıcaklık, RFID, giyilebilir teknolojiler, ivme ölçer, piezoelektrik, WLAN, GPS, UWB, Ultrasound ve kendiliğinden algılayabilen beton (Self-sensing) teknolojileridir. İncelenen çalışmalar neticesinde, sensörlerin birçok değişkeni ölçerek karar verme mekanizmasına yardımcı olması yönünden inşaat sektörüne katkı sağlayacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sensör, Yapı sağlığı izleme, iş sağlığı ve güvenliği, yapı, iş kazası, teknoloji

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE USAGE AND BENEFITS OF SENSORS AND SENSOR-BASED TECHNOLOGIES IN CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS

Mehmet Akif ARSLAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ

2022, 104 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ

Asst. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN

Asst. Prof. Dr. Abdülkerim İLGÜN

The concept of Industry 4.0, which represents digitalization in the industry, which can also be defined as the industrial revolution, and the developing technologies have also affected the construction industry. In this context, researchers focus on the use of technologies such as building information modeling (BIM), artificial intelligence, 3D printers and robotics, big data and sensor technologies in the construction industry. The construction industry is a dynamic industry branch that is more difficult to standardize production and site control than other industries, and the purpose of these studies is to make construction productions and field more efficient, controllable and safe. Since the services provided by the construction works constitute the infrastructure and superstructure of the cities, the resulting products are important for the safety of people's life and property and it is vital to monitor the quality and safety of structures. In addition, the construction sector has a large share in the country's economy and provides employment at a high rate due to its labor force, and it is also considered in the category of heavy and dangerous works in terms of work accidents. Occupational health and safety management in construction is also an important issue due to the large number of employees, the low level of education of the employees and the fact that they are from dangerous jobs. Sensor technologies, one of the developing technologies within the scope of Construction 4.0, are a technology that researchers focus on as a system that aims to provide automation in the monitoring of structures and worker health, to easily control variables that are difficult to control, and to facilitate the decision-making mechanism. In this study, studies on sensor and sensor-based technologies, structural health monitoring and occupational health safety applications were investigated and the contributions of this technology to the sector were discussed. Within the scope of the study, different applications made with 11 different sensors were investigated. These sensors are fiber optic, temperature, RFID, wearable technologies, accelerometer, piezoelectric, WLAN, GPS, UWB, Ultrasound and self-sensing technologies. As a result of the studies examined, the sensors will contribute to the construction sector in terms of helping the decision-making mechanism by measuring many variables.

Keywords: Sensor, Structural health monitoring, occupational health and safety, construction, work accident, technology

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim, akademik hayatım ve bu tez çalışması boyunca tecrübelerini ve bilgisini benimle paylaşan, desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli hocam danışmanım Doç. Dr. Mustafa Tolga Çöğürçü 'ye en kalbi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında ve akademik hayatta her zaman tecrübelerinden ve bilgisinden faydalandığım değerli hocam Arş. Gör. Dr. Mehmet Uzun'a, ayrıca tez çalışmasının birçok adımında bilgilerine başvurduğum değerli arkadaşım Elektrik Elektronik Mühendisi Fatih Erkin'e de desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Bugünlere gelmemde emekleri çok büyük olan, beni her zaman destekleyen babam Hulusi Arslan'a ve annem Zeliha Arslan'a ve kardeşlerim Selçuk Arslan ve Muhammet Fatih Arslan'a da en kalbi duygularıyla sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Akif ARSLAN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
2.1. Sensör Tabanlı İş Sağlığı ve Güvenliği Çalışmaları	11
2.2. Sensör Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Çalışmaları	16
3. İNŞAAT MÜHENDİLİĞİ UYGULAMALARINDA KULLANILAN SENSÖRLER; SENSÖRLER VE UYGULAMALAR.....	19
3.1. Fiber Optik Sensörler.....	19
3.1.1. Işık Şiddeti Tabanlı Fiber Optik Sensörler	21
3.1.2. İnterferometrik Fiber Optik Sensörler	21
3.1.3. Izgara Tabanlı Fiber Optik Sensörler.....	22
3.1.4. Dağınık Sensörler	23
3.1.5. Fiber Optik Sensörlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı ..	23
3.2. Sıcaklık Sensörü	31
3.2.1. Termostat	32
3.2.2. Termistör.....	32
3.2.3. Direnç Sıcaklık Detektörü (RTD).....	33
3.2.4. Termokupl.....	33
3.2.5. Sıcaklık Sensörlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	34
3.3. Giyilebilir Teknolojiler	37
3.3.1. Giyilebilir Teknolojilerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	38
3.4. Akselerometre (İvmeölçer)	41
3.4.1. İvmeölçer Sensörlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı .	41
3.5. RFID (Radyo Frekans ile Tanımlama)	46
3.5.1. RFID 'nin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	47
3.6. GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi).....	55
3.6.1. GPS 'in İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı.....	56
3.7. UWB (Ultra geniş bant teknolojisi)	58
3.7. UWB sistemlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı.....	58
3.8. Ultra-sound (Ultrasonik sensör).....	61
3.8.1. Ultrasonik Sensörlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı ...	62
3.9. WLAN	64
3.9.1. WLAN Tabanlı Sistemlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	64
.....	64
3.10. Piezoelektrik Sensörler	65

3.10.1. Piezoelektrik Sensörlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	66
3.11. Kendiliğinden Algılayabilen Fiber Takviyeli Kompozitler, Akıllı Betonlar (Self-sensing Concrete, smart concrete)	68
3.11.1. Kendiliğinden Algılayabilen Betonların İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	68
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	71
4.1. Sensör tabanlı teknolojilerin iş sağlığı güvenliği alanında sağlayabileceği katkılar	73
4.2. Sensör tabanlı teknolojilerin yapı sağlığı izleme alanında sağlayabileceği katkılar	79
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A; Harmonik Dalga Genliği,
E; Young modülü,
 ρ ; Yoğunluk,
p; Ortalama güç,
 λ ; Bragg dalga boyu,
 Λ ; Bragg Izgaralar arasında ki boşluk,
 n_e ; Bragg Izgaranın etkin kırılma indisi,
 α ; Isıl genleşme katsayısı,
 ζ ; Termal optik katsayısı,
 p_e ; Gerinim optik katsayısı.

Kısaltmalar

GPS: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
KKD: Kişisel Koruyucu Donanım
UWB: Ultra wide band (Ultra geniş bant)
RFID: Radyo frekans ile tanımlama
WLAN: Kablosuz Yerel Ağ

1. GİRİŞ

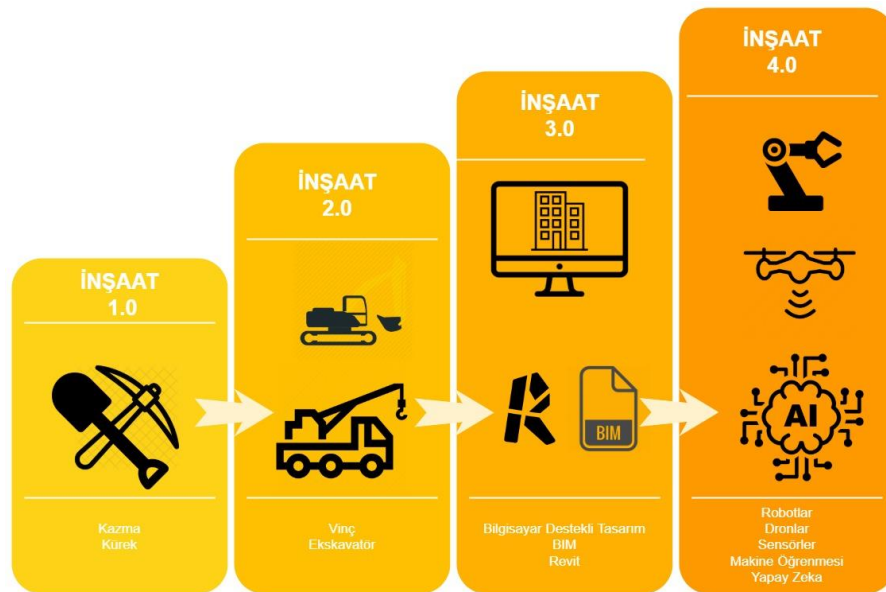
İnşaat sektörünün birçok sektörle bağlantılı olması, bir lokomotif sektör olması ve çok sayıda istihdam sağlaması dolayısıyla ülkelerin ekonomisinde önemli bir paya sahip olduğu bilinmektedir. Dünya nüfusun hızla yükselmesi sonucu ortaya çıkan altyapı, konut, ulaşım gibi ihtiyaçların artması, inşaat sektörünün dünya ekonomisinde ki etkisini arttırmıştır. Bu gelişme yüksek hammadde kullanımı ve karbondioksit salınımını beraberinden getirmiştir. Dünya Ekonomik Forumu tarafından yayınlanan raporda inşaat sektörü hammadde ve kaynak kullanımında en büyük paya sahip olup, örneğin dünya genelinde üretilen çeliğin %50'sini tek başına kullanmakta ve dünyada oluşan sera gazı etkisinin %30'una sebep olmaktadır. İnşaat sektörünün dünya genelinde bu çaplı büyük paya sahip olmasıyla beraber raporda imalatlardaki verimde sağlanacak %1'lik artışın dünya genelinde 100 milyar dolarlık bir para kazancının sağlanacağı belirtilmiştir (World Economic Forum & Boston Consulting Group, 2016). Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak konut, altyapı, ulaşım gibi ihtiyaçların arttığı gibi diğer endüstriyel ürünlere olan ihtiyaçta artmıştır. Bu sebeple son yıllarda daha hızlı, fazla ve verimli üretim sağlanabilmesi için bütün endüstri dallarında gelişim gözlenmiş ve evrime uğramışlardır (Craveiro ve ark., 2019). İlk defa Almanlar tarafından 2011 yılında tanıtilen Endüstri 4.0, üretimde kaliteyi ve hızı arttırırken, maliyeti ve israfı düşürmeyi amaçlamaktadır. Bu amacı teknolojiyi kullanarak, birbirleri ile ve insanlarla iletişim halinde olan sensörlerle veri toplayarak ve bu yolla mevcut durumu analiz ederek, gereklilikleri tespit ederek gerçekleştirir (YILDIZ, 2018). Endüstri 4.0 kavramı (veya diğer bir deyişle endüstride dijital dönüşüm) ile birlikte üretimde kullanılan bazı teknolojiler aşağıda ki gibidir:

- Otonom robotlar
- Sensörler
- Arttırılmış gerçeklik
- Dijital dizayn
- Simülasyon sistemleri ve diğer teknolojiler (Craveiro ve ark., 2019).

Endüstride yaşanan bu devrim inşaat sektöründe de birtakım gelişmelere yol açmış ve İnşaat 4.0 olarak adlandırılan bu gelişme, inşaat firmalarının üretkenliğinin artması, proje gecikmeleri ve hesaplanandan fazla maliyet gibi sorunların çözülmesi, kaynakların

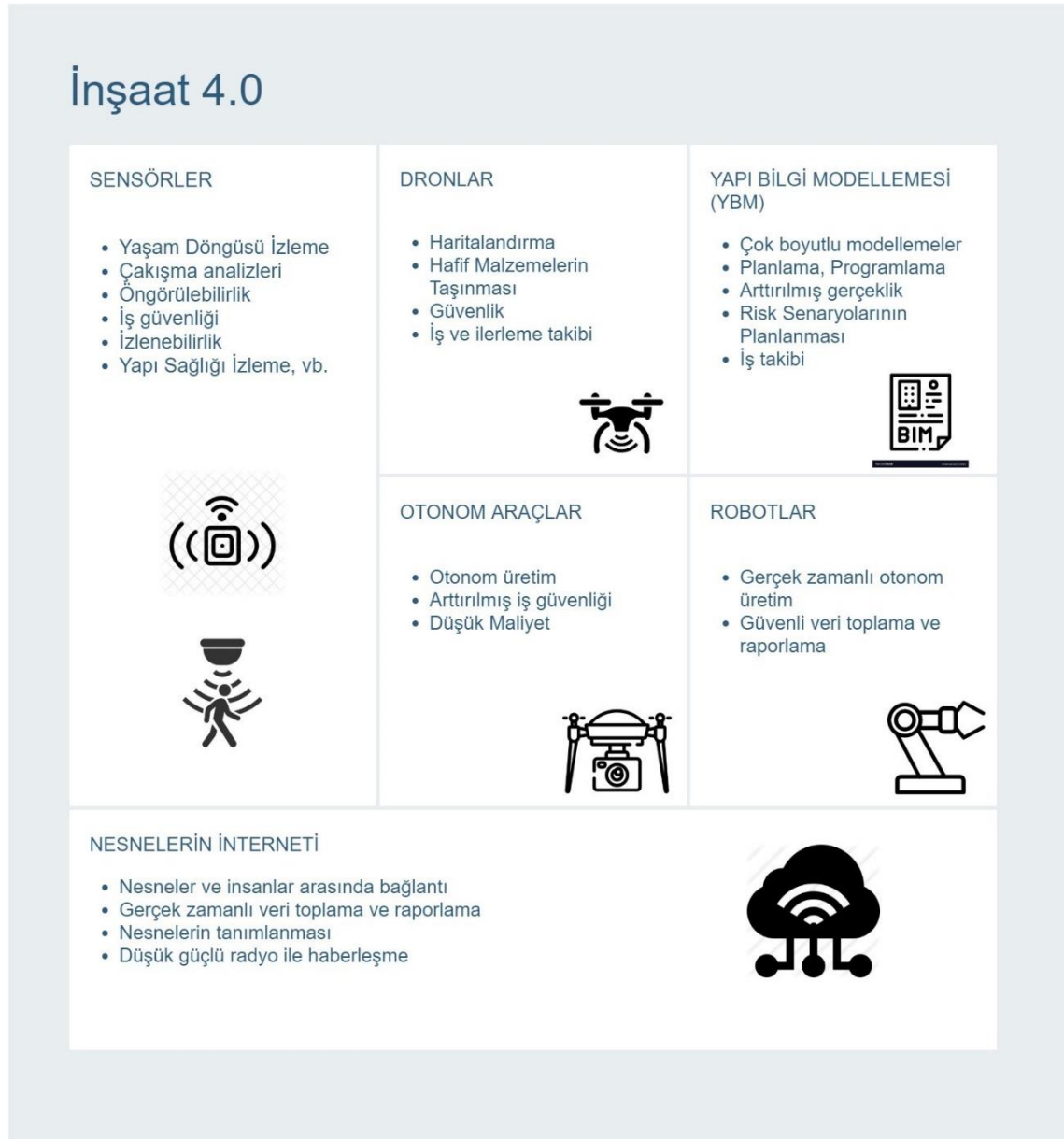
verimli kullanılması, kaliteli üretim ve iş sağlığının sağlanması noktalarında inşaat sektörüne katkı sağlayacaktır (Craveiro ve ark. 2019).

Bir inşaatın yaşam döngüsü ihtiyaçların belirlenmesi ile başlar, proje planlaması, tasarım, uygulama, işletme ve bakım, onarım ve kullanım ömrünü tamamlaması şeklinde son bulmakla beraber işletme ve bakım, onarım aşamaları yaşam döngüsünün en uzun kısmını oluşturmaktadır(Vähä ve ark., 2013). Bu kısımda yapının kullanım ömrü boyunca sağlıklı bir şekilde çalışması ve gerekli bakımların yapılabilmesi için takip edilmesi gerekmektedir. İnşaat sektörü dinamik bir sektör olması sebebiyle, inşaat alanını veya inşaat alanı dışında gerçekleşen olayları kontrol ve takip etmek hayli zordur. Ayrıca inşaat sektörünün lokomotif bir sektör olması, farklı disiplinlerin bir araya gelerek imalatı gerçekleştirmesi sebebiyle karmaşık bir yönetim ve takip süreci ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple inşaat sektöründe hizmet veren kurumsal yapısı gelişmiş firmalar hem yapı ve iş sağlığını hem de yapım yönetimi süreçlerini daha hızlı ve kolay bir şekilde kontrol edilebilir hale getirebilmek için yeni teknolojilere ihtiyaç duymaktadır (Keleş & Kaya Keleş, 2018). İnşaat 4.0 kavramından ilk defa 2016 yılında Roland Berger tarafından bahsedilmiş olup inşaat endüstrisinin dijitalleşmesini temsil etmektedir (Forcael ve ark., 2020). İnşaat sektöründe İnşaat 4.0 kapsamında gerçekleşen teknolojik gelişmeler inşaat imalat sürecinde verimliliği arttırmak, yapı ve işçi sağlığını takip etmek, israfların önüne geçmek, takibi kolaylaştırarak hızlı ve güvenli karar verme mekanizması oluşturmak hedefleri ile gelişme sağlayacaktır. Endüstri 4.0 kavramı ortaya çıkıncaya kadar birçok evrime uğramıştır. Bununla beraber inşaat sektörünün geçirdiği evrimlerde şekilde görülmektedir (Şekil 1.1.)(Gürkan, 2019)(Osunsanmi ve ark., 2018).



Şekil 1.1. İnşaat sektörünün evrimsel gelişimi

İnşaat 4.0 kavramı ile inşaat sektöründe yaygınlaşan teknolojiler aşağıda şekilde gösterilmiştir (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2. İnşaat 4.0 ile sektörde gelişen teknolojiler

Yapı bilgi modellemesi bir inşaat projesinde farklı disiplinleri bir araya getiren ve proje paydaşları arasında 3 boyutlu modeller, zaman ve maliyet bilgileri, tesis yönetimi gibi konularda bilgi paylaşımı yapmaya yarayan bir proje yönetim sistemidir. İki boyutlu çizimler, geleneksel maliyet ve zaman hesaplama gibi proje yönetimi araçlarına göre Yapı bilgi Modellemesi (Building Information Modeling) çok boyutlu modelleme (çizimler, zaman ve maliyet), maliyet tahmininde kolaylık ve daha yüksek doğruluk oranı, zamandan tasarruf gibi avantajlarıyla daha kullanışlı ve avantajlı bir proje yönetim

aracıdır(Gürkan, 2019). Ülkelerin gelişmişlik düzeyine göre yaygınlığı değişmekle beraber, ülkemizde kullanılmasının önünde de yüksek eğitim ve lisans ücretleri, deneyimli personel eksikliği, inşaat sektörünün geleneksel üretim yöntemlerinden kopamaması gibi birtakım engeller bulunmaktadır(Demircan & Alp, 2020).

Nesnelerin interneti (IoT) teknolojisi nesnelerin birbirleriyle ve insanlarla internet yoluyla haberleşmesi olarak tanımlanabilir. Sensörlerden alınan anlık verilerin nesnelerin interneti teknolojisi ile ilgili yerlere aktarılması sayesinde karar verme mekanizmaları hızlanır ve güvenilirliği artar. İnşaat sektöründe yapı sağlığı izleme, iş sağlığı ve güvenliği, yapıların enerji tüketimi takibi vb. alanlarında, sensörlerin kullanıldığı tüm alanlarda kullanılabilir.

İnşaat 4.0 kapsamında inşaat sektöründe gelişen bir diğer teknoloji 3 boyutlu yazıcı ve otonom robotlardır. Otomotiv ve diğer endüstriyel üretim tesislerinde halihazırda kullanılmakta olan robotlar insan kaynaklı hataları en aza indirmekte, hızlı üretim sağlamak ve işçilik maliyetlerini düşürmektedir. Bu avantajları ile inşaat sektöründe kullanılabilirliği üzerine çalışılmaktadır. Hollanda'da 3 boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak bir kanal üzerine 12 metre açıklıklı çelik köprü imal edilmiştir (Block, 2018)(Şekil 1.3.). Ayrıca, 3 boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilmiş konut yapıları da mevcuttur.

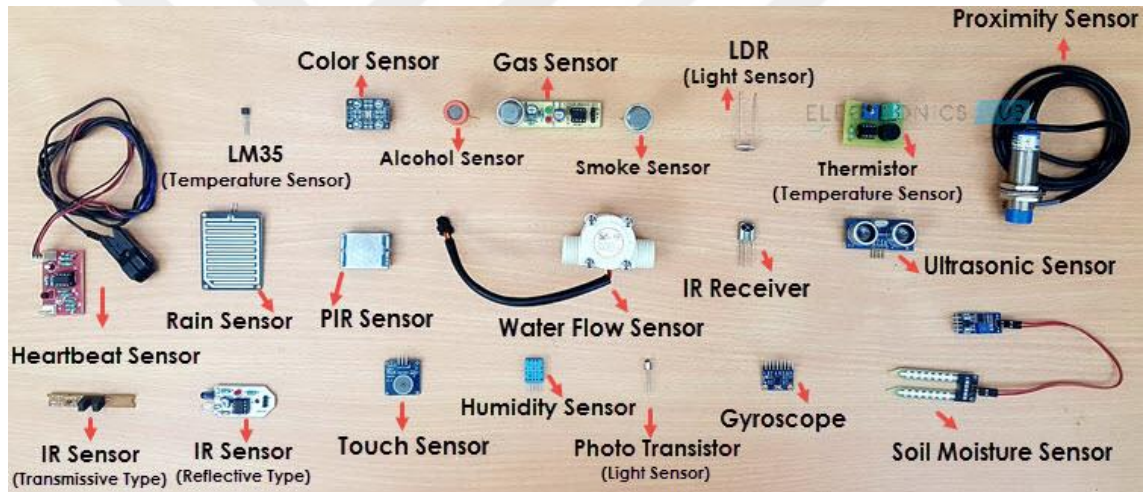


Şekil 1.3. 3 boyutlu yazıcı ve robotlarla üretilmiş çelik köprü (Block, 2018)

Bir diğerk teknoloji ise sensör ve sensör tabanlı teknolojilerdir. Sensörler ortamdaki fiziksel veya kimyasal değışimleri tespit ederek bu değışimleri birer çıktıya dönüştüren işlemcilerle gönderen cihazlardır. Günlük hayatta kullandığımız teknolojik cihazlar (telefon, bilgisayar, beyaz eşyalar, vb), araçlar, aydınlatma, havalandırma sistemleri, laboratuvar uygulamalarında sensörler büyük bir yere sahiptir.

1.1.Sensörler

Sensör ortamda meydana gelen fiziksel değışiklikleri algılayan ve anlamlı birer veriye dönüştüren cihazdır. Ortamdaki değışiklikleri tespit edip bir cihaza bildirebilen sensörler, sürekli kontrol edilmesi güç değışkenleri otomatik olarak kontrol ederek kolaylık sağlamaktadır. Şekil 1.1.1. de çeşitli sensörlerin görsellerine yer verilmiştir.



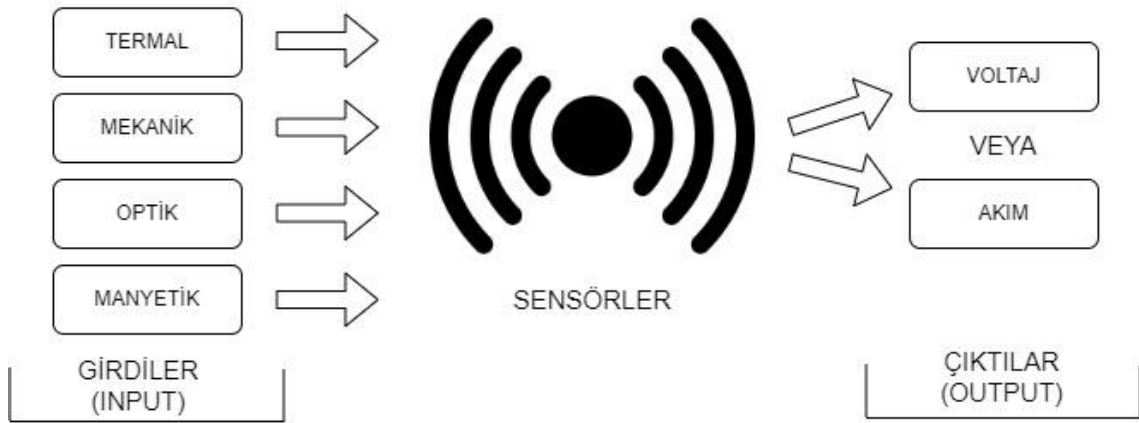
Şekil 1.1.1. Çeşitli sensör görselleri

Şekilde gösterilen sensörlerden bazıları şu şekildedir:

- Proximity Sensor(Yakınlık sensörü)
- Ultrasonic Sensor(Ses üstü algılayıcı)
- Soil Moisture Sensor(Zemin Nem sensörü)
- Gyroscope(Gyro sensör)
- Light Sensor(Işık sensörü)
- Humidity Sensor(Nem sensörü)
- Temperature Sensor(Sıcaklık sensörü),vb.

Ortamin durumu veya nem, sıcaklık, ışık, kuvvet, ivme gibi herhangi bir dış etkiyi elektriksel sinyale dönüştüren sensörler, çeşitlerine göre çok yüksek hassasiyette ölçümler yapabilmekte ve günlük hayatta ve otomotiv, sağlık, sanayi (imalat, robotik, makine) gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır(Işık, 2013).

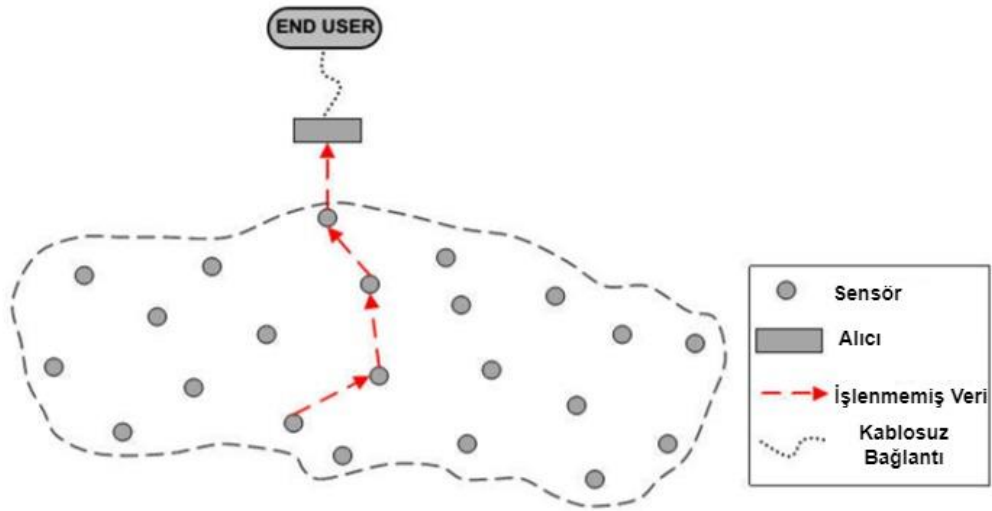
Sensörler ortamdaki fiziksel durum ve değişkenleri tespit eden cihazlar olup voltaj veya akım olarak çıktı üretmektedir. Termal, mekanik, optik ve manyetik olarak meydana gelen değişimler sensörler tarafından algılanır ve voltaj veya akım olarak çıktı üretilir. Bu çıktılar bir işlemcide anlamlı birer veriye dönüştürülür. Sensörlerin çalışma mekanizması Şekil 1.1.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1.2. Sensörlerin algılama mekanizması

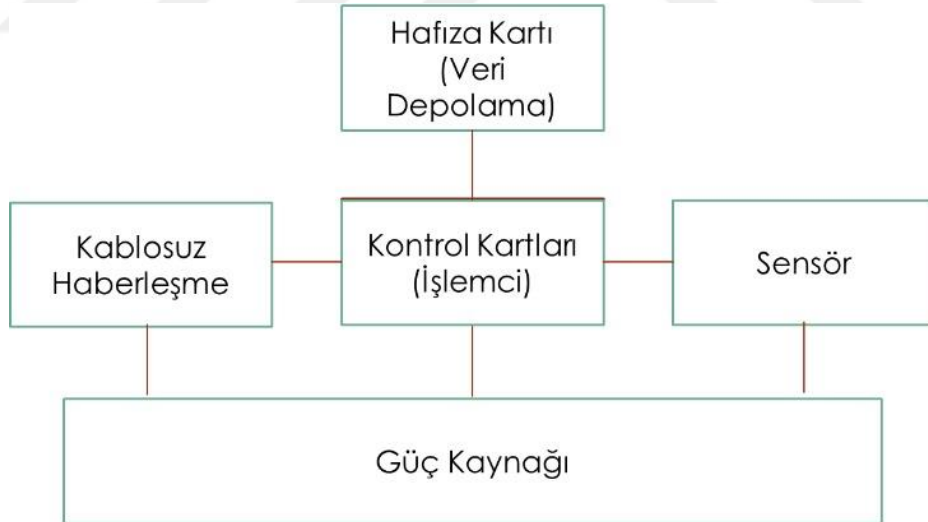
1.2. Kablosuz Sensör Ağları

Sensörler ölçüm yapılacak ortamın büyüklüğüne göre adet olarak değişim gösterecektir. Ölçümün doğru yapılabilmesi için ortamda ki sensörlerin birbirleri ile senkronize olarak çalışması gereklidir. Bunu sağlamak için sensör ağları kurulur. Kablolu ve kablosuz olarak kurulabilen bu sistemlerden kablosuz olanlar, uygun maliyetli, küçük boyutlara sahip ve sistemin diğer elemanları ile kablosuz hızlı bir şekilde iletişim kurması yönüyle avantajlar sağlamaktadır. Aşağıda ki şekilde tipik bir kablosuz sensör ağı modeli gösterilmiştir. (Şekil 1.2.1.)



Şekil 1.2.1. Kablosuz sensör ağları ve elemanları (Karl & Willig, 2006)

Kablosuz sensör ağlarında, fiziksel değişimleri tespit edip sinyallere dönüştüren sensörler, sensörlerin ara yüzü olan kontrol ünitesi, sensörden gelen sinyalleri yorumlayan işlemci ve hafıza kartı, kontrol ünitesinden gelen bilgiyi işlemciye ve diğer birimlere aktarabilen haberleşme protokolü ve tüm sistemin çalışması için gerekli enerjiyi sağlayan güç ünitesi bulunur. Bu cihazların şematik gösterimi aşağıda ki gibidir (Şekil 1.2.2.).



Şekil 1.2.2. Kablosuz sensör ağlarının elemanları (Yick ve ark., 2008)

Sensörler ortamda ki değişiklikleri ölçen birer donanım olmakla beraber değişimi anlamlı birer veriye çeviren farklı ekipmanların bir arada kullanılmasıyla bir ölçüm sistemi haline gelebilmektedir. Sayıca fazla sensör kullanılan sistemlerde sensörler ve sensörlerden alınan verileri anlamlı verileri dönüştüren sistemler bir arada çalışmak durumundadır. Bu bağlantı kablosuz sensör ağları oluşturarak yapılabilmektedir.

Kablosuz sensör ağları Wi-fi, WiMAX, WiMedia, Bluetooth, Zigbee, Bluetooth Low-Energy gibi sensörlerle bilgisayar arasında iletişim kurmayı sağlayan cihazlar kullanılarak oluşturulmaktadır. Aşağıda ki tabloda kablosuz sensör ağlarında kullanılan bu teknolojilerin çeşitli özellikleri gösterilmiştir (Tablo 1.2.1.).

Tablo 1.2.1. Kablosuz sensör ağları için çeşitli iletişim cihazları ve özellikleri (Rault ve ark., 2014)

Kablosuz Sensör Ağı	Wi-fi	WiMAX	WiMedia	Bluetooth	Zigbee	Bluetooth Low-Energy
Uygulamalar	İnternet Erişimi, web, e-mail, video	Genişbant bağlantı	Gerçek zamanlı Multimedya akışı	Kablosuz veri aktarma	Düşük güce sahip cihazlar arasında bağlantı	Düşük güce sahip cihazlar arasında bluetooth ile bağlantı
Kullanılan Cihazlar	Bilgisayarlar, tabletler, telefonlar	Bilgisayar	Kablosuz mikrofön, yazıcı, televizyon	Telefonlar, Mouselar, klavyeler	Gömülü sistemler, sensörler	Saatler, sensörler, kablosuz klavye ve mouselar
Hedef Kullanım süresi	1 -24 saat	-	-	1 -6 ay	6 aydan 2 yıla kadar	1 -2 yıl
Avantajları	Esnek - hızlı	Uzun menzilli	Yüksek veri aktarabilme	Maliyet açısından elverişli	Güvenilir, düşük güç gerektirir	Düşük güç gerektirir

İnşaat mühendisliği uygulamalarında sensör ve sensör tabanlı diğer teknolojilerin kullanımı, inşaatların yapım aşamasında ve ayrıca işletme, bakım onarım aşamalarında yapı sağlığının takibine ve iş sağlığı güvenliğine yardımcı olmayı hedefleyen bir uygulama türü olup, üzerinde çalışmalar yapılmış olmasına karşın, ülkemizde de sayıca az miktarda çalışmalar bulunmaktadır. Isı ve sıcaklık, basınç, gerilme, deformasyon, korozyon, yer değiştirme, ivme, konum, vb. büyüklükleri tespit etmede kullanılan birçok sensör çeşidi bulunmaktadır. Ayrıca, radyo frekansları, dalgaları ve ses dalgalarını kullanılan sensör tabanlı teknolojiler, inşaatların çok çeşitli alanlarında uygulama hedefleri olmakla birlikte inşaatta kullanımından bazı örnekler şu şekildedir: giyilebilir

veya sabit, alan tarayan sensörler ile iş ve işçi sağlığı takibi ve yönetimi, inşaatın temel malzemesi olan betonun sağlığının takibi için kullanılan ve yapı sağlığını takip eden sensörler, vb. Bu tez yenilikçi bir teknoloji olan sensör ve sensör tabanlı uygulamaların çeşitlerini ve kullanım yöntemlerini inceleyerek inşaat sektörüne ve literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında verimi arttırabilecek ve sürekli kontrolü sağlayabilecek yenilikçi bir yaklaşım olan sensörlerin kullanımı konusunda bir altyapı oluşturmayı hedefleyen bu çalışma, Türk inşaat sektörünün ve çalışanlarının inşaat sektöründe dijitalleşmeye geçilmesinde yaşayacakları zorlukların ortadan kaldırılmasına yardımcı olması ve literatüre katkı sağlaması açısından önem arz etmektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İnşaat mühendisliği uygulamalarında yenilikçi teknolojilerden olan sensör uygulamalarının sektörde kullanımı üzerine birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar bu bölümde farklı alt disiplinlere göre ayrılmış şekilde incelenmiştir. Bunlar: sensör tabanlı iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları, sensör tabanlı yapı sağlığı izleme uygulamalarıdır.

Zhang ve ark. tarafından 2017 yılında yapılan derleme çalışmasında inşaat iş sağlığı yönetiminin iyileştirilmesi için kullanılan sensör tabanlı uygulamalar derlenmiştir. Çalışmada bu alanda yapılan çalışmaların 2008 yılından sonra arttığı belirtilmiştir. Yapılan araştırma da RFID (radyo frekans ile tanımlama), WLAN- WiFi (kablolu yerel ağlar ve sensör ağları), UWB (Ultrawide band), Ultrasound (Ultrason, ultrasonic sensörler), GPS (küresel konumlandırma sistemleri) şeklinde sensör sistemlerinin inşaat iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarında ön planda olduğu belirtilmiştir. Ayrıca inşaat iş güvenliğinin sağlanmasında önemli bir etken olan yapısal sağlık izleme üzerine de sıcaklık sensörü, fiber optik sensörler, basınç sensörlerinin kullanıldığı belirtilmiştir.

2010 yılında Sun ve ark. tarafından yapılan derleme çalışmasında yapı sağlığı izleme üzerine kullanılan sensör tabanlı uygulamalar derlenmiştir. Otomatikleştirilmiş, iş gücü gerektirmeyen ve gerçek zamanlı ve sürekli takip üzerine kullanılan sensörler üzerine yapılan çalışmalar derlenerek sunulmuştur. Çalışma kapsamında fiber optik sensörler, piezoelektrik sensörler, kendi kendini algılayabilen kompozit malzemeli sistemler incelenmiştir.

Çalışmada incelenecek sensör çeşitleri derleme çalışmalarında belirtilen inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan sensörler olarak belirlenmiştir. Bu sensörler:

- Fiber optik sensörler
- Sıcaklık sensörleri
- Giyilebilir sensör teknolojileri (basınç sensörleri, RFID, ivmeölçer)
- İvmeölçerler
- RFID (Radyo frekans ile tanımlama)
- GPS (Küresel konumlandırma sistemi)
- UWB – Ultra wide band (Ultrasonic sensörler)
- WLAN (Kablolu yerel ağ sistemleri)
- Piezoelektrik sensörler

- Self-sensing (Kendi kendini algılayabilen betonlar) olarak belirlenmiştir.

Tezin bu bölümünde sensör tabanlı inşaat iş sağlığı güvenliği uygulamaları ve yapısal sağlık izleme uygulamaları üzerine yapılan çeşitli sensör uygulamalarından örnekler gösterilmektedir.

2.1. Sensör Tabanlı İş Sağlığı ve Güvenliği Çalışmaları

Doğan (2019), gerçekleştirdiği yüksek lisans tezi çalışmasında, yüksekte düşme sonucu yaralanmalara erken müdahale edilebilmesi için, kazanın gerçekleşmesinin hemen ardından yöneticilere bilgi veren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Giyilebilir sensörler sayesinde (Şekil 2.1.1.), ani yükseklik değişimleri tespit edilebilmiş ve proje yöneticilerine bildirim iletilmiştir. Giyilebilir sensör uygulanan maket, farklı kat yüksekliklerinden serbest bırakılmış (Şekil 2.1.2.), sonuçlar incelendiğinde sensörün kat yüksekliklerini doğru tespit ettiği ve yöneticilere hızlı bir şekilde bildirdiği görülmüştür.



Şekil 2.1.1. Giyilebilir Sensör(Doğan, 2019)



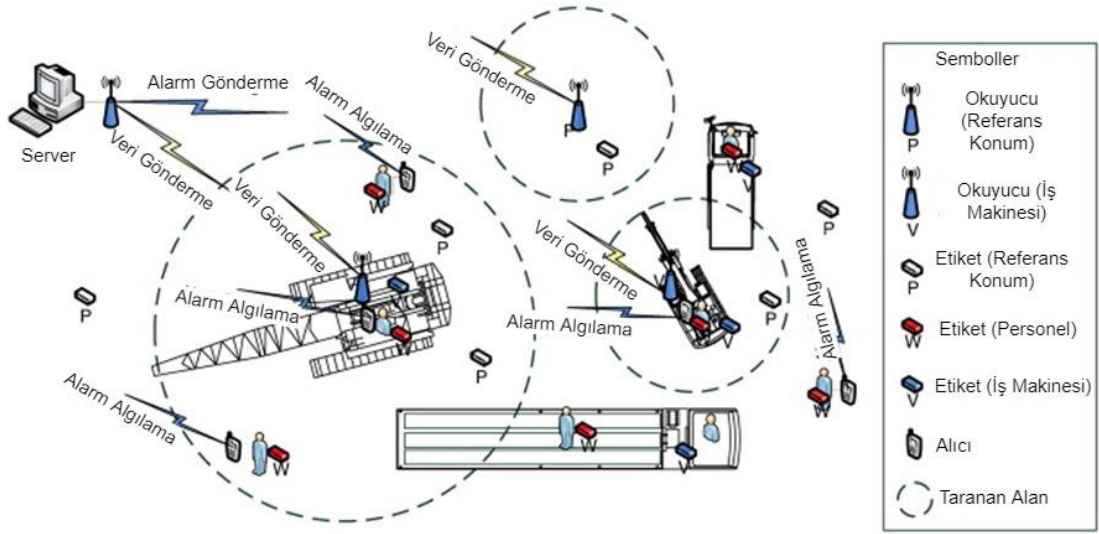
Şekil 2.1.2. Giyilebilir sensörlü maketin yüksekten düşme anı (Doğan, 2019)

Yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde, yükseklik tespitinde ortalama %10.8 lik bir hata payı oluşurken, bütün testlerde yüksekten düşme olayı sensör tarafından tespit edilmiş, ve otomatik olarak mail yoluyla bildirim yapılmıştır (Doğan, 2019).

Asadzadeh ve ark. 'nın 2020 yılında “Sensör Tabanlı İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetimi” isimli araştırma çalışmasında bazı detaylara yer verilmiştir. İnşaat sahaları iş kazalarının fazlaca yaşandığı alanlar olup, son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte sensör tabanlı iş sağlığı güvenliği yönetimi gündeme gelmiştir. Yapılan çalışmaya göre 2008 yılından itibaren arttığını ve özellikle son yıllarda (2018 itibariyle) araştırmaların yoğunlaştığını göstermiştir. Yapılan çalışmalarda yazar, kablosuz sensörler, radyo frekansı ile tanımlama (RFID), ultra- geniş bant (UWB), inersiyel ölçme üniteleri (IMUs), yürüme analizi, nesne algılama, görüntü analizi gibi teknolojilerin kullanıldığını ve geliştirilmeye devam edildiğini belirtmiştir. Sensör tabanlı sistemlerin, şantiyelerin sürekli ve otomatik olarak izlenmesi için kullanabileceğini belirten Amin ve ark., sensör sistemlerinin uygulanmasında aydınlatılması ve çalışılması gereken konular olduğunu belirtmiştir. Bu konulardan bazıları, ramak kala olaylarının otomatik olarak tanımlanması için yapılması gereken çalışmalar ve inşaat ortamına özgü karmaşıklıklardan dolayı bilgisayarla görünün (computer vision) kullanımına yönelik konulardır (Asadzadeh vd., 2020).

Chae ve Yosida tarafından 2010 yılında ağır ekipmanlarla (hidrolik ekskavatör ve vinç gibi) çarpışma sonucu oluşan kazaları önlemek için RFID sensör (Radyo frekans ile tanımlama) teknolojisinin kullanılması üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Çalışma alanında hareket halinde olan ekipman ve çalışanlara takılan bu sensörler aracılığıyla birbirleriyle yaklaşan ve tehlike oluşturabilecek konumda bulunan, makine-makine, makine- çalışan çarpışmalarını önleyebilmek için uyarı veren bir model tasarlanmıştır. Modelde RFID etiketleri (RFID tags) ve RFID okuyucuları (RFID readers) makinelere ve işçilere uygulanmıştır. Şekilde sistem detayı gösterilmiştir. (Şekil 2.1.3.) Örneğin vincin çalışma alanı RFID okuyucular ile taranması amaçlanmış, bu çalışma alanına giren diğer ekipmanlar ve işçilere alarm reseptörleri (Alert Receiving) ile bildirim gönderilmesini hedeflemektedir.



Şekil 2.1.3. Tasarlanan çarpışma önleme için uyarı sistemi detayı (Chae & Yoshida, 2010)

Bu sistemi sağlayabilmek için bir şantiye sahasında uygulama yapılmış ve veriler toplanmıştır. Sensörlerden alınan veriler ile işçilerin ve makinelerin çalışma alanlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. RFID etiket verileri şantiyeden elde edilmiş ve modelin çarpışma kazalarının önlenmesi için çalışma alanlarının tahmininde uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak sistemin çalışanların konumlarının tespitinde kullanılarak kazaları önlemede başarılı olabileceğini fakat sensör sayısının artırılması ve frekans karışıklıklarının önlenmesi için sensör konumlarının dikkatli ayarlanması ve sistemin geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir (Chae & Yoshida, 2010).

Guo ve ark. tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada giyilebilir sensörlerle toplanan fiziksel veriler ile işçilerin psikolojik durumlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. İnşaat sektöründe gerçekleşen iş kazalarında işçilerin güvenli olmayan davranışlarının da etkisinin olduğu belirtilmiş olup, işçilerin psikolojik durumlarının tespiti iş kazalarının önlenmesinde önemli bir etken olabilecektir. Çalışma kapsamında

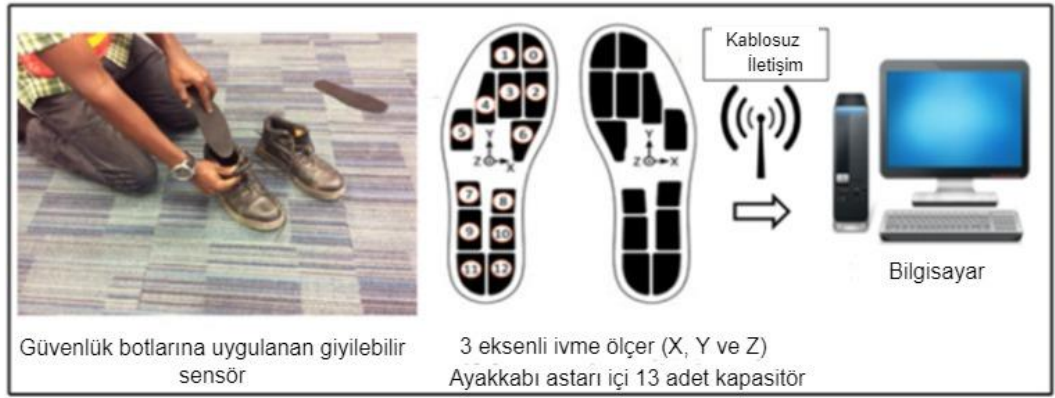
işçilerden akıllı saatlerde (Şekil 2.1.4.) bulunan sensörler vasıtasıyla kalp ritmi, vücut ısısı, adım sayısı ve harcanan kalori miktarı indikatör olarak alınmış ve bu veriler ile psikolojik durum arasında bir korelasyon olup olmadığı incelenmiş ve anket çalışması ile doğruluğu kontrol edilmiştir.



Şekil 2.1.4. Veri toplamak için kullanılan sensör içeren akıllı saat (Guo ve ark., 2017)

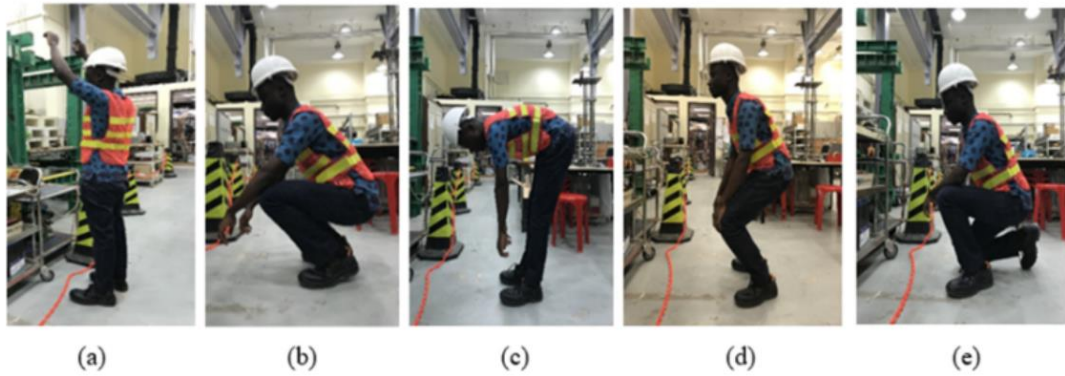
Sonuç olarak, alınan veriler ve psikolojik durum arasında bir korelasyon olduğu, ve sadece basit psikolojik durumun tespit edilebileceği sonucuna ulaşılmış olup, çalışmanın zaman ve maliyet açısından olumsuz etkiler oluşturabileceği ve geliştirilmesinin iş kazalarının önüne geçilmesinde rol oynayacağı belirtilmiştir (Guo ve ark., 2017).

Antwi-Afari ve ark. tarafından 2018 yılında yapılan bir çalışmada inşaat işçilerinin inşaat alanında vücutta hasar oluşturabilecek çalışma pozisyonlarının, ayak tabanına yerleştirilen basınç ve ivme sensörleri tarafından tespit edilebilmesini amaçlamaktadır. Bu sensörler çalışanların iş güvenliği için kullandığı botların tabanlarına yerleştirilmiş ve veriler toplanmıştır. Sensörlerin yapmış olduğu ölçümler kablosuz iletişim yoluyla bilgisayarlara aktarılmıştır (Şekil 2.1.5).



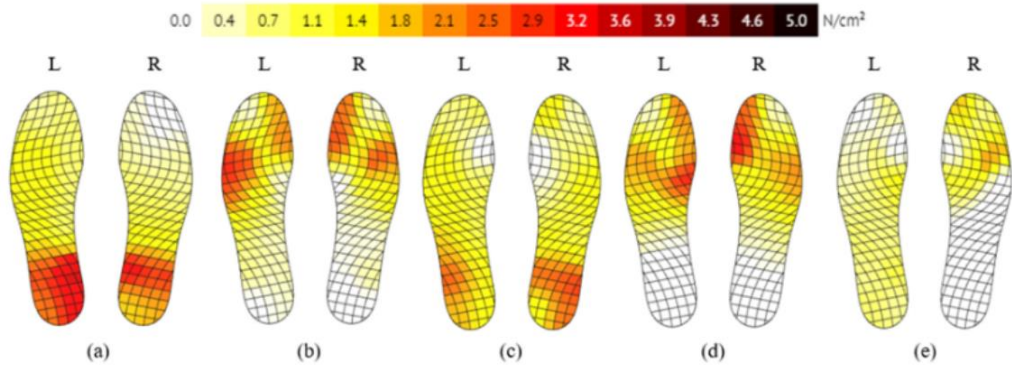
Şekil 2.1.5. Botlara yerleştirilen sensörler (Antwi-Afari ve ark., 2018)

Çalışma kapsamında, işçilerin a) baş üstü çalışma, b) çömelerek çalışma, c) eğilerek çalışma, d) yarı çömelerek çalışma ve e) diz çökerek çalışma pozisyonlarında ölçümler yapılmıştır (Şekil 2.1.6.).



Şekil 2.1.6. Verilerin ölçüldüğü farklı pozisyonlarda çalışma (Antwi-Afari ve ark., 2018)

Sonuçlar incelendiğinde, ayak tabanında oluşan basınç dağılımı aşağıdaki gibidir (Şekil 2.1.7).

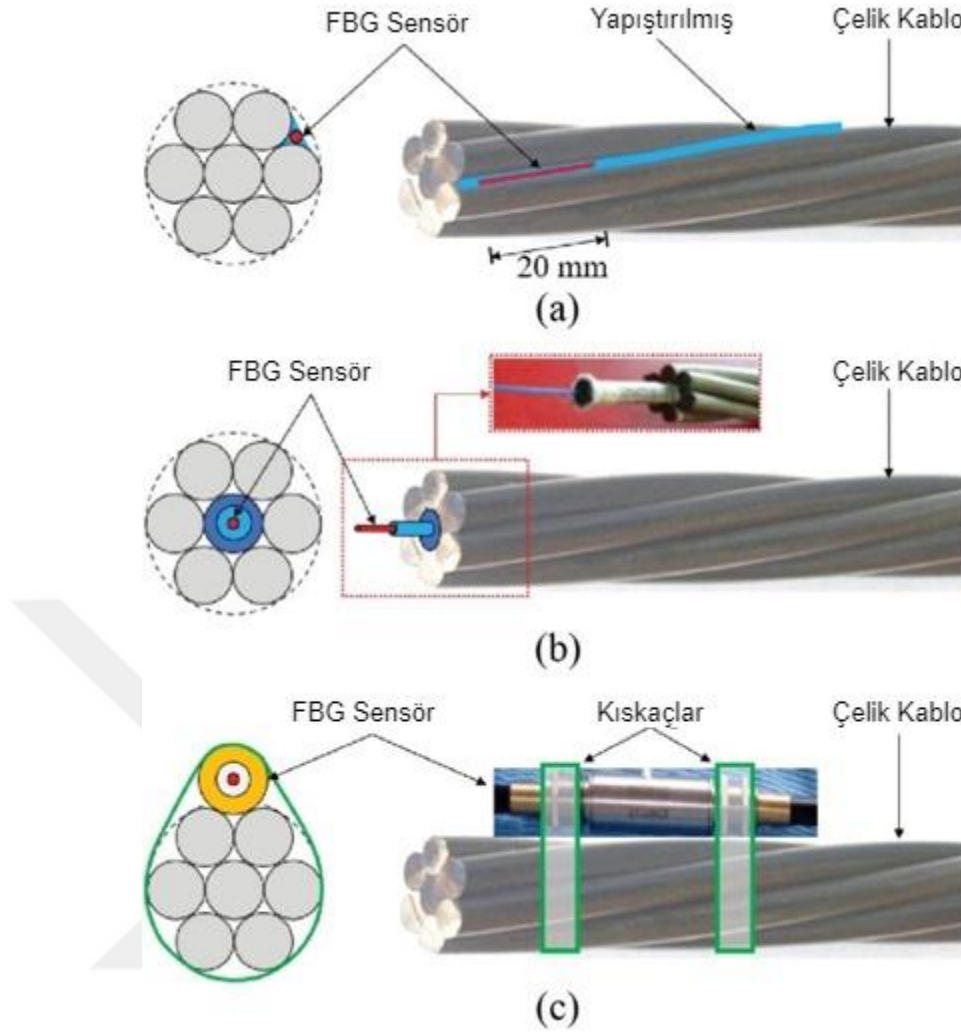


Şekil 2.1.7. Ayak tabanında oluşan basınç dağılımı (Antwi-Afari ve ark., 2018)

Ergonomik olmayan çalışma biçimlerinin işçi sağlığını olumsuz etkilediği bilinmektedir. İş sağlığı çalışmalarının bir parçası olan ergonomik olmayan çalışma biçimlerini minimize etmek amacıyla, çalışma alanında düzenlemeler yapılabilmesi için, çalışma biçiminin tespit edilmesinde klasik yöntemlerden olan bildirim sonucu raporlama, gözlem sonucu tespit etme gibi yöntemlere alternatif olarak kullanılacak olan bu sistemin faydalı olacağı belirtilmiştir (Antwi-Afari ve ark., 2018).

2.2. Sensör Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Çalışmaları

Yao ve ark. tarafından 2021 yılında yapılan bir araştırma çalışmasında fiber optik sensörler aracılığıyla asma köprülerdeki çelik kablolar ve ön germeli betonarme elemanlara uygulanan çeliklere etkileyen kuvvetleri tespit eden fiber optik sensör çeşitleri kıyaslanmıştır. Fiberle güçlendirilmiş polimer veya çelik olarak kullanılan bu kablolar yüksek derecede çekme kuvvetine maruz kalırlar. Bu elemanlarda oluşacak bir hasar büyük felaketlere sebep olabilecektir ve bundan dolayı kapasitesinden fazla yük almaması için fiber optik sensörler ile kontrol yapılabilmektedir. Günümüzde basınç transmitterleri, klasik şekil değiştirme(strain) hesabı, manyetik akı sensörleri gibi metotlar kablo üzerinde ki yükün hesaplanmasında kullanılmakla beraber, bu metotlarla yapı boyunca bütün kabloları etkileyen yükü hesaplamak oldukça zor bir uygulama olup, yapılsa bile çok maliyetli olacağı belirtilmiştir. Ayrıca ölçümün doğruluğu sıcaklık gibi diğer etkenlerden etkilenebileceği için tartışılabilir. Bu noktada fiber optik sensörler küçük boyutları, hafif olması, elektromanyetik etkilerden korunmuş, yüksek ölçüm doğruluğu oranları ve sağlamlığıyla büyük avantajlar sağlamaktadır. Fiber optik sensörler kabloları ki yükü hesaplamak için 3 şekilde uygulanmıştır: a) Sensörleri kabloların üzerine yapıştırıcı kullanarak sabitleme b) Kablonun demetleri tarafından sarılmış şekilde c) Kabloları kenetlenmiş şekilde monte edilmiştir. (Şekil 2.2.1.)



Şekil 2.2.1. Fiber optik sensörlerin kabloları uygulanma biçimleri (Yao ve ark., 2021)

Çalışmanın sonuçları değerlendirme kısmında fiber optik sensörlerin kabloların üzerine düşen yük değerleri, ABD Ulaştırma Bakanlığının belirlediği hesap yöntemleri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak Fiber optik sensörler üzerine düşen yükü tespit etmede kullanılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca Şekil 1.'de kullanılan farklı montaj teknikleri kıyaslanmış ve 2. ve 3. yöntemlerin daha doğru ölçümler yaptığı tespit edilmiştir. Yapının imalat aşamasında doğru montajın ve inşaatın kalitesinin sağlanmasında bu sistemin kullanılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca yapının işletme aşamasında yapı sağlığının sürekli olarak izlenmesi içinde kullanılabileceği belirtilmiştir (Yao ve ark., 2021).

Nielsen & Sørensen tarafından sensörlerle ilgili yapılan çalışmada bakım için asfalt kaplaması kaldırılan bir köprüde beton yüzeyine membran uygulamadan önce betonda bir boşluk oluşturularak nem ölçebilen bir kablolu sensör yerleştirilmiştir (Şekil 2.2.2.). Bu sensör köprünün taşıyıcı elemanlarında gerçekleşebilecek nem artışının yani bakım onarım zamanının geldiğini ve hasara sebep olmaması için gerekli bakımın

yapılacağı zamanı sensörler sayesinde tespit edebilmeyi amaçlamaktadır (Nielsen & Sørensen, 2010).



Şekil 2.2.2. Tasarlanan sensörün köprüye yerleştirilmesi (Nielsen & Sørensen, 2010)

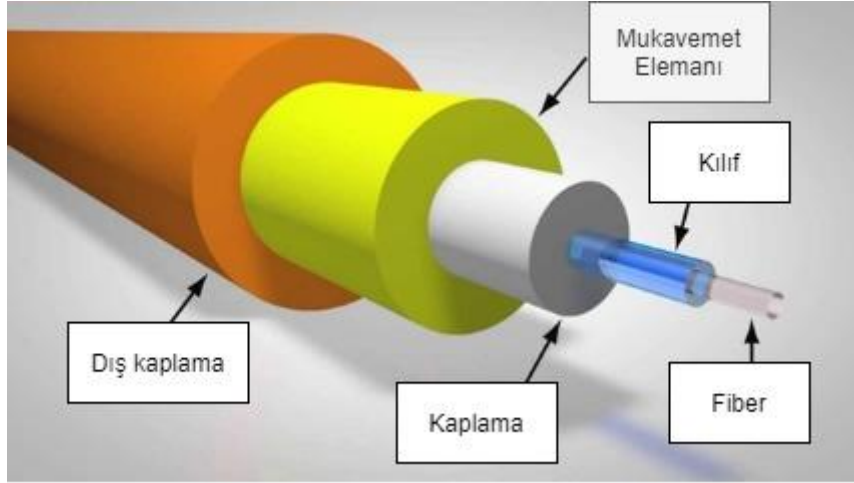
Sonuçlar incelendiğinde verilerin doğru bir şekilde aktarıldığı görülmüştür. Fakat, köprü gibi uzun yıllar bakım gerektirmeyecek yapılarda, sensörde kullanılan bataryanın yetersiz geleceği belirtilmiştir. Aynı sistemin doğrudan drenaj sistemlerinde kullanılmasının mümkün olduğu ve daha verimli olacağı belirtilmiştir.

3. İNŞAAT MÜHENDİLİĞİ UYGULAMALARINDA KULLANILAN SENSÖRLER; SENSÖRLER VE UYGULAMALAR

İnşaat mühendisliği uygulamalarında sensörler ile sürekli kontrol edilmesi zor değişkenleri kontrol etmek ve verileri depolamak ve karar verme mekanizmasını kolaylaştırmak amacıyla birçok alanda kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu uygulamalarda kullanılan sensörler çoğunlukla; fiber optik sensörler, sıcaklık sensörü, nem sensörü, ivme ölçer, basınç sensörü, giyilebilir teknolojiler, RFID etiket ve okuyucuları, piezoelektrik sensörler, GPS, Ultrasound, Ultra-wide band, self sensing sensör teknolojileridir. Tezin bu bölümünde belirtilen sensörler ile yapılan çeşitli uygulamalar ve ölçüm yapılabilen değişkenler gösterilmektedir.

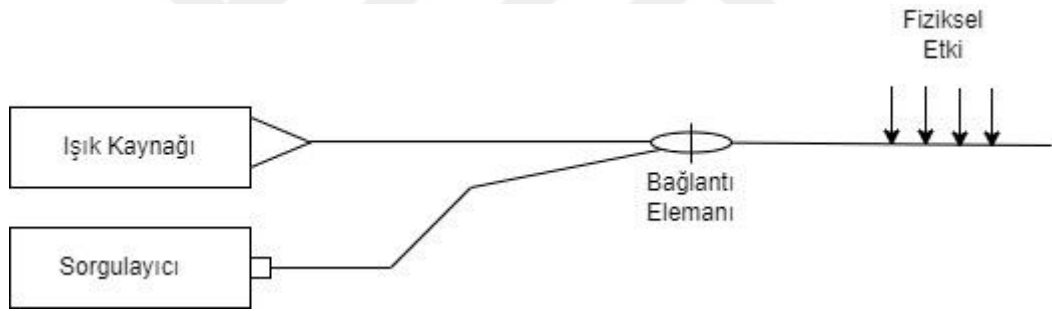
3.1. Fiber Optik Sensörler

Fiber optik teknolojisi 1970’li yıllarda uzun mesafe haberleşme için kullanılmaya başlanmış olmasıyla beraber son yıllarda kullanımında büyük bir artış olmuştur. Fiber optik sensör teknolojisi de bu teknolojinin gelişmelerinden faydalanmış ve ayrı bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır (Alfredo & Sierra-Pérez, 2013). Fiber optikler ışığın yalıtkan bir cam üzerinde tam yansıma ilkesi ile iletilmesi prensibiyle çalışmaktadır. Fiber optik kablolar genel olarak fiber, kılıf, kaplama, mukavemet elemanı ve dış kaplamadan oluşmaktadır. Işık fiber üzerinde yayılmakta, kılıf ise ışık kaybını önlemekte ve core kısmının hasar görmemesini sağlamaktadır. Fiber optik kablo detayı aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.1.1.).



Şekil 3.1.1. Fiber optik kablo detayı

Fiber optik kabloları etkileyen basınç, sıcaklık gibi dış etkenler, ışığın iletilmesine etki etmektedir. Bu etkiler, dalga boyu, ışık şiddeti gibi optik parametrelerde değişikliğe sebep olmaktadır. Fiber optik sensörler bu değişikliklerin ölçülerek bir nicel büyüklüğe çevrilmesi prensibine göre çalışmaktadır. Şekil 3.1.2. de gösterildiği üzere bu büyüklükler sorgulayıcı tarafından ölçülür (Güemes, 2014)(Günaydın ve ark., 2019).

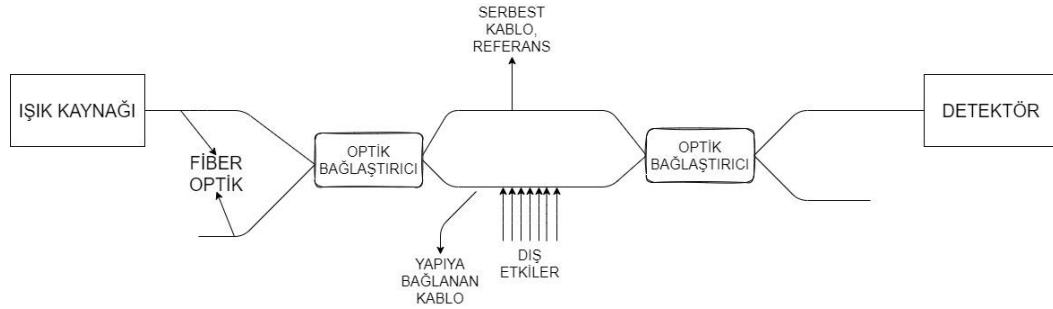


Şekil 3.1.2. Fiber Optik Sensör Şeması(Günaydın ve ark., 2019)

Fiber optik sensörler birçok bakımdan sınıflandırılabilir. Bu sensörler bir elektromanyetik dalga olan ışık ile çalışmakta ve ışık frekans, yoğunluk, faz ve polarizasyon parametreleri ile tanımlanmaktadır. Dış etkenler bu parametrelerde farklı değişikliklere sebep olabildiğinden bu değişiklikleri ölçen farklı sensörler geliştirilmiştir. Sensörler bu parametrelerin değişkenliklerine göre aşağıda sınıflandırılmıştır:

1. Işık şiddeti tabanlı sensörler
2. İnterferometrik sensörler
3. Izgara tabanlı sensörler
4. Dağınık sensörler

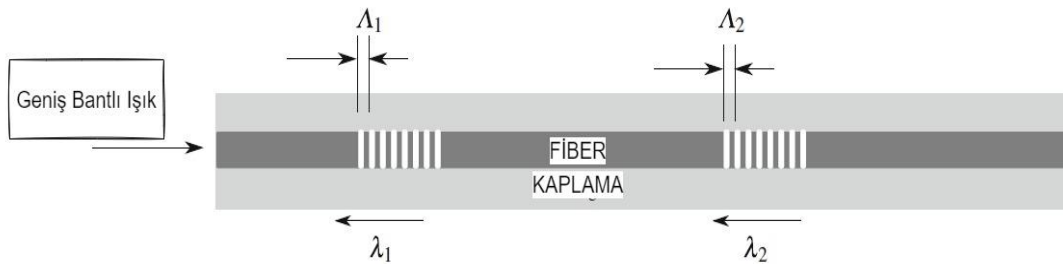
değişimlere neden olarak ölçüm yapılmasını sağlayacaktır (Şekil 3.1.2.1.) (Leung ve ark., 2015).



Şekil 3.1.2.1. Mach-Zehnder interferometresi ile çalışan sensör şeması (Fidanboyulu & Efendioğlu, 2020)

3.1.3. Izgara Tabanlı Fiber Optik Sensörler

Izgara tabanlı fiber optik sensörler dalga boyundaki değişimi tespit etme metoduyla çalışan sensörlerdir. En yaygın olarak kullanılanları FBG (Fiber Bragg Gratings) yani Fiber Bragg Izgara sensörlerdir. Geniş bantlı veya ayarlanabilir bir ışık fiber optik kablodan geçirilmektedir. Fiber optik kablounun üzerinde belirli noktalarda bulunan holografik ızgaralar arasında ki mesafe, sıcaklık veya yüklemenden dolayı değişmektedir. Izgaralar arasında ki mesafede gerçekleşen bu değişim yansıyan sinyalin dalga boyunda değişikliklere sebep olmaktadır ve değişimler ölçüm sonucunu oluşturur.(Leung ve ark., 2015) Fiber Bragg ızgaraların çalışma metodu şekil 3.1.3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.3.1. Fiber Bragg Izgara Sensör Şeması (Leung ve ark., 2015)

Dalga boyu ızgaralar arasında boşluk aşağıdaki formülle ilişkilendirilmiştir:

$$\lambda = 2n_e\Lambda \quad (3.1.1)$$

λ ; Bragg dalga boyu,

Λ ; Izgaralar arasında ki boşluk

n_e ; Izgaranın etkin kırılma indisi

Fiber sıcaklık değişimi veya uzamaya maruz kaldığında dalga boyunda ani değişimlere sebep olmaktadır. Ölçümün yapılabilmesi için ayarlanabilir lazer, spektrometre veya dalga boyu filtresi sisteme uygulanır. Bragg dalga boyundaki değişim ile eksenel deplasman arasında ki ilişki aşağıdaki formülle ilişkilendirilir.

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 - p_e)\varepsilon_{mech} + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (3.1.2)$$

α : Isıl genleşme katsayısı,

ζ : Termal optik katsayısı,

p_e : gerinim optik katsayısı.

3.1.4. Dağınık Sensörler

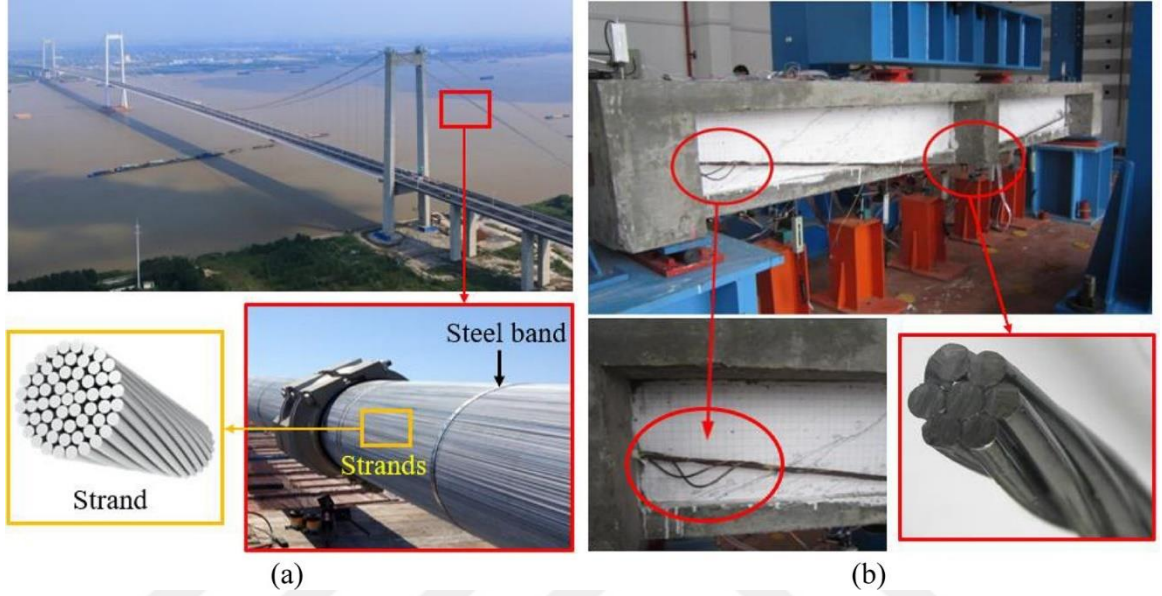
Optik zaman alanı yansıma (ODTR) metoduna göre çalışan bu sensörlerin 3 çeşidi bulunmaktadır. Bunlar: Rayleigh, Raman ve Brillion dağınık sensörleridir. Bu teknikte fibere bir titreşim veya darbe uygulanır. Bu dış etki sebebiyle fiber içerisinde yayılan ışık bir miktar geri yansıyacaktır. Bir foto detektör aracılığıyla bu geri yansıyan ışık miktarı ölçülür. Bu sinyalde zamanla üstel bir düşüş meydana gelmekte ve düşüş fiberin doğrusal zayıflamasıyla doğrudan ilişkilendirilmektedir. Eğer ışığın hızı biliniyorsa, ölçülen zaman bilgisi zaman, hız ve yer değiştirme bağıntısıyla yer değiştirme ölçülmektedir.

3.1.5. Fiber Optik Sensörlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Günümüzde yapı sağlığının tespit edilmesi için kanıtlanmış bir ölçüm yöntemi bulunmamaktadır. Yapıda hasar ve bozulmalar, belirgin şekilde ortaya çıkmaya başladığında yapının durumu test edilmektedir. Fakat bu durumda yapı çoktan hasar almış veya işlevini yitirmiş halde olmaktadır. Bazı ülkelerde köprüler gibi önemli yapıların düzenli aralıklarla görsel incelemelere tabi tutulması zorunlu olsa da bu durum yapıda oluşan bütün hasarları tespit etmek için yeterli olup olmadığı tartışılabilir (H. N. Li ve

ark., 2004). Bu noktada fiber optik sensörlerin yapı sağlığını izleme noktasında kullanılması üzerine birçok çalışma görülmektedir.

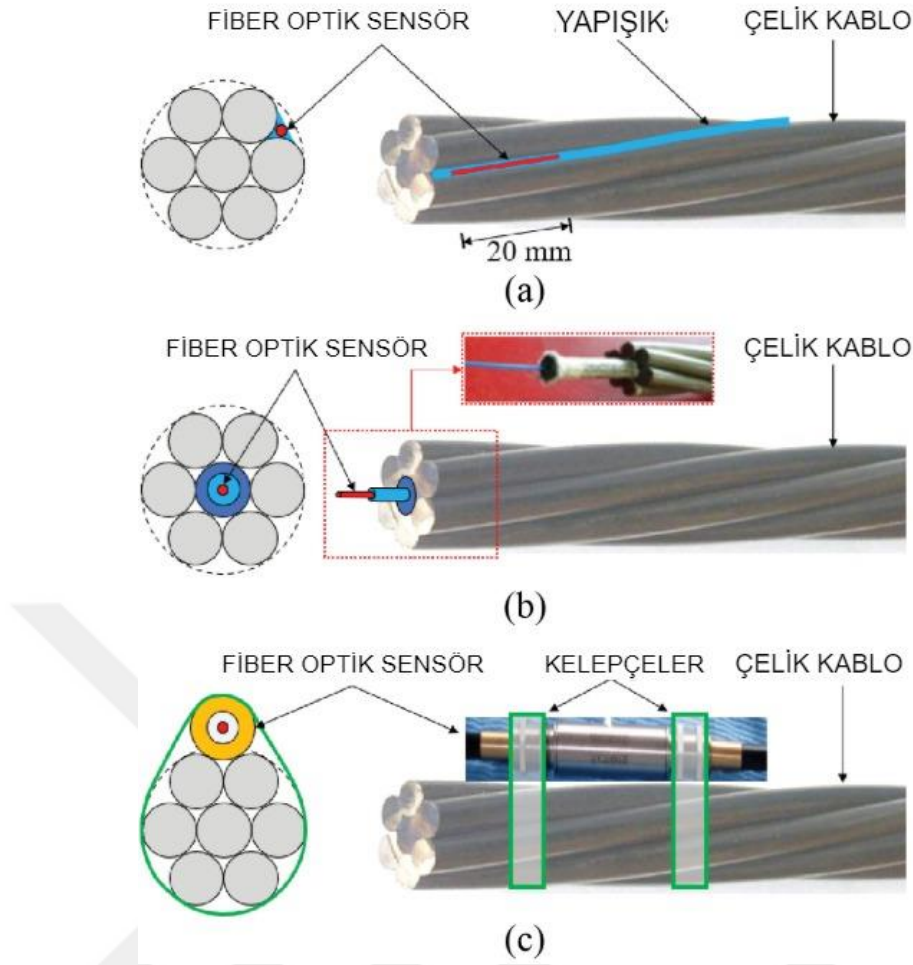
Şekil 3.1.5.1 'de görüldüğü üzere kablolar günümüzde köprü ve binalarda gerilme direnci sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle asma köprülerde ve ön gerilmeli beton elemanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.1.5.1. a) Asma köprülerde kullanılan çelik kablolar, b) ön gerilmeli betonda kullanılan çelik kablolar (Yao ve ark., 2021)

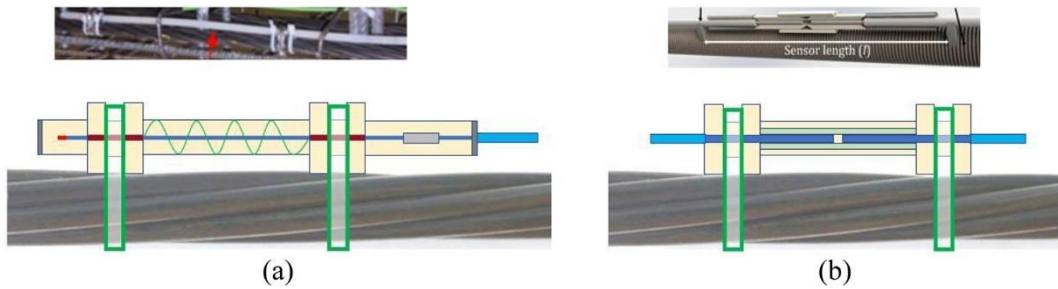
Kullanılan bu kablolarda meydana gelmesi muhtemel hasarlar, büyük felaketlere neden olabileceğinden kablolara düşen gerilmelerin doğru ölçülmesi önem arz etmektedir. Fiber optik sensörler, yüksek ölçüm hassasiyeti, hafifliği, küçük boyutları, yüksek fiziksel ve kimyasal stabilitesi sayesinde kablolara düşen yüklerin tespitinde kullanılması tercih edilebilir sistemlerdir (Yao ve ark., 2021)(Zhu ve ark., 2021).

Yao ve ark. tarafından yapılan derleme çalışmasında farklı fiber optik sensörlerin (ızgara, interferometrik ve dağınık) çelik kablolara düşen yükü hesaplamada kullanımı ve karşılaştırılması, ölçümlerin doğruluğu araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda çelik kablolara farklı şekillerde uygulanan ızgara fiber optik sensörler Şekil 3.1.5.2. de gösterilmiştir. İlk olarak fiber optik sensör kablolara yapıştırılmış, daha sonra kablo demetinin iç noktasına yerleştirilmiş ve son olarak kablolara kenetleyerek uygulanmıştır. Uygulanan yöntemlerin kablolarda ki gerilmeleri ölçmede ki hassasiyetleri ve doğrulukları kıyaslanmıştır.



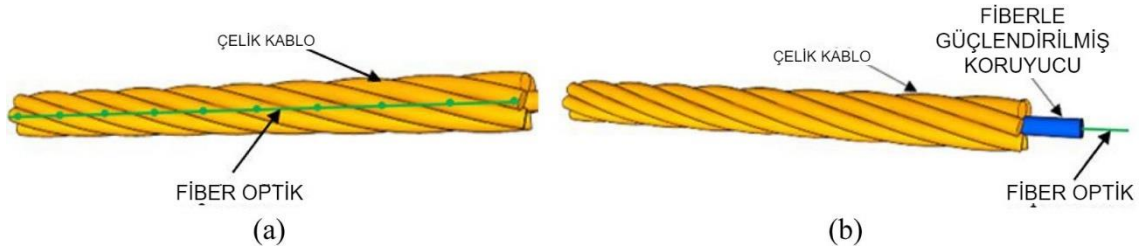
Şekil 3.1.5.2. Dağınık fiber optik sensörlerin farklı uygulama yöntemleri (Yao ve ark., 2021)

İnterferometrik sensör çeşitlerinden Michelson ve Fabry- Perot interferometreleri çelik halatlara kenetlenerek uygulanmıştır. Uygulama yöntemi Şekil 3.1.5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.1.5.3. a) Michelson interferometresi, b) Fabry- Perot interferometresi (Yao ve ark., 2021)

Son olarak dağınık sensörler ise çelik kablo yüzeyine kablo yüzeyine yapıştırılarak ve kablo demeti tarafından sarılmış şekilde uygulanmıştır. Dağınık fiber optik sensörlerin uygulanış biçimi Şekil 3.1.5.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.1.5.4. a) Yüzeye yapıştırılmış fiber optik b) Kablo demeti tarafından sarılmış fiber optik (Yao ve ark., 2021)

Yapılan uygulamalarda fiber optik sensörler çelik kabloların üzerine düşen yükleri hesaplamak amacıyla kullanımı incelenmiştir. Bu noktada dağınık, interferometrik ve ızgara tabanlı fiber optik sensörlerin performansları ölçüm doğruluğu, maliyet, teknoloji hazırlık seviyesi olarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ölçüm doğruluğu açısından dağınık sensörler, interferometrik ve ızgara tabanlı sensörlere göre yüksek oranda çıkmaktadır. Dağınık sensörler, ızgara tabanlı sensörlerin bazı çeşitleriyle aynı teknolojik altyapı hazırlık seviyesine sahip olmakla beraber, interferometrik sensörler bu noktada düşük kalmaktadır. Maliyet açısından karşılaştırıldığında dağınık sensörlerin daha düşük maliyetli olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırma aşağıda ki tablo da gösterilmiştir (Tablo 3.1.5.1.).

Tablo 3.1.5.1. Çelik kabloları düşen yüklerin hesaplanmasında kullanılan farklı fiber optik sensörleri karşılaştırılması (Yao ve ark., 2021)

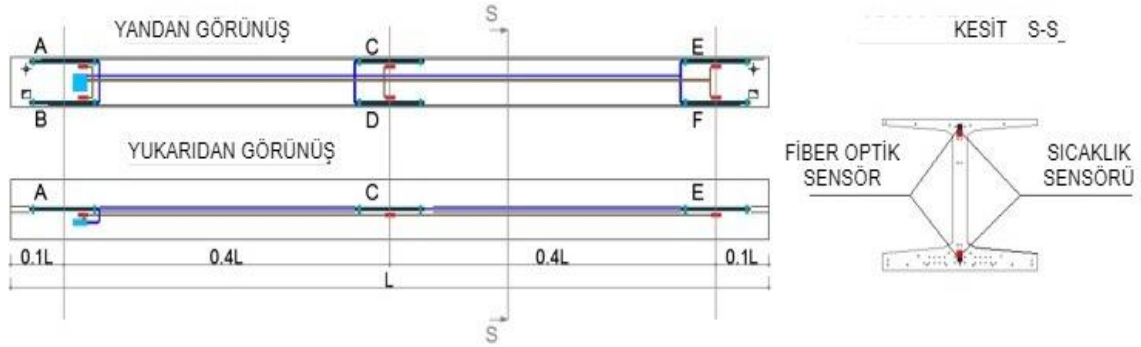
Sensör	Ölçüm doğruluğu	Sensör Maliyeti	Ekipman Maliyeti	Teknoloji Hazırlık Seviyesi*
Izgara Tabanlı Sensörler				
Yüzeye Yapıştırılmış	Orta	Yüksek	Orta	Seviye 4-5
Kablo Demeti ile Sarılmış	Orta	Yüksek	Orta	Seviye 6-8
Kenetlenmiş	Orta	Yüksek	Orta	Seviye 6-8
İnterferometrik Sensörler				
Michelson	Orta	Yüksek	Orta	Seviye 4-5
Fabry- Perot	Orta	Yüksek	Orta	Seviye 3-4
Dağınık Sensörler				
Yüzeye Yapıştırılmış	Yüksek	Düşük	Yüksek	Seviye 6-8
Kablo Demeti ile Sarılmış	Yüksek	Düşük	Yüksek	Seviye 6-8

* Teknoloji hazırlık seviyesi ABD Federal Karayolu İdaresi tarafından belirlenmiş değerlendirme sistemi olup 1- 9 arasında seviyelerden oluşur. Seviye 1: Henüz araştırma aşamasında ki teknolojiler için kullanılan seviye iken, Seviye 9: Sektöre adapte edilmiş, kanıtlanmış teknolojileri ifade eder.

Uva ve ark. tarafından 2014 yılında yapılan bir çalışmada İtalya Bari de bulunan ön gerilmeli betonarme viyadüğün inşaat aşamasında yapı sağlığının izlenmesi amacıyla fiber optik sensörler uygulanmıştır. Çalışmada interferometrik bir sensör tipi olan SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques) kullanılmıştır. Viyadüğün 16,4 m genişliğinde ki tabliyeleri, 9 adet ön gerilmeli betonarme kirişler ile desteklenmektedir. Çalışma ile sağlanmak istenenler;

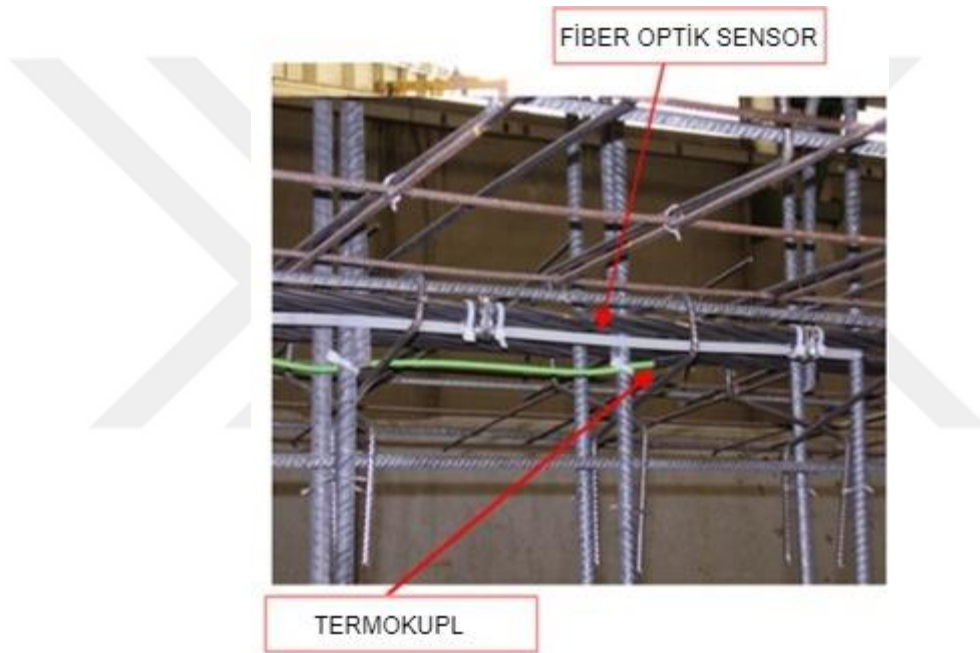
1. Ön gerilme uygulanan çelikteki gerilme kayıpları dikkate alınarak inşaatın farklı aşamalarında prekast elemanların tepkisi
2. Köprünün inşaatın farklı aşamalarında yapısal tepkisinin deformasyonların tespiti ile belirlenmesi
3. Çalışan teknik ekibin kabul sürecinde köprü hakkında fikir sahibi olabilmesi için teknik bilgi sağlama
4. Kullanım ömründe devamlı olarak yapının durumu hakkında gerçek zamanlı veriler sahip olma.

Ortam sıcaklığının betonarme elemanlarda ki deformasyon değerlerini etkileyeceği bilinmektedir. Sıcaklık ve eğilme kaynaklı deformasyonları birbirinden ayırabilmek için ölçüm sistemine termokupl sıcaklık sensörü de eklenmiştir. Köprünün en hassas noktalarının belirlenmesi için öncelikle köprünün tamamı modellenmiş, sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve non-lineer statik analiz ile en kritik mesnet noktası belirlenmiştir. Bu nokta fiber optik sensörlerin uygulanacağı bölge olarak belirlenmiştir (Uva ve ark., 2014). Uygulama planı Şekil 3.1.5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1.5.5. Fiber optik sensör uygulanan bölgenin plan görünüşü (Uva ve ark., 2014)

Fiber optik sensörlerin planda belirtilen kirişlere uygulanış biçimi Şekil 3.1.5.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.1.5.6. Fiber optik ve sıcaklık sensörlerinin beton dökülmeden önce uygulanışı (Uva ve ark., 2014)

Ölçüm sonuçları ile teorik olarak beklenen davranış kıyaslanmıştır. Çalışmada viyadüğün servis kullanımı sırasında elde edilen veriler henüz paylaşılmamış olup, üretim ve köprünün tamamlanma aşamalarında meydana gelen deplasman değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde araştırmacı teorik olarak güvenli bölgede olmayan değerler ölçüldüğünde gerekli önlemlerin alınabileceği, ölçümlerin bu noktada fikir verebileceğini belirtmiştir.

Kazılar, barajlar, tüneller, şevler gibi geoteknik yapıların güvenliğinin kontrolü açısından gerinme ve yer değiştirme değerlerinin ölçülmesi önem arz etmektedir. Fiber optik sensörler bu ölçümlerin yapılabilmesi için son yıllarda üzerinde çalışılan bir alan

olup birçok avantajından dolayı tercih edilmektedir. Yukarıda bahsedilen kullanım alanları dışında geoteknik yapılarda:

- Toprak ve zemin kaymaları,
- Zeminlerin ve temellerin oturması,
- Kazık temellerin gerinim dağılımlarını tespit etmek amacıyla kullanımı üzerinde çalışılmaktadır(Zheng ve ark., 2020)

Fiber optik sensörlerin demiryolu ve altyapılarının kullanılmasına yönelikte birçok çalışma bulunmaktadır. Demiryolu ulaşımı türünün yolcu ve yük taşımacılığında yüksek verim oranlarından dolayı önemli bir hal almıştır. Bu sebeplerden dolayı demiryolu ulaşımı sistemleri için gerekli alt ve üst yapılarının sağlığının izlenmesi de önem arz etmektedir. Bu hususta demiryolları yapısal sağlığının izlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bir kısmının amaçları ve yöntemleri Tablo 3.1.5.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1.5.2. Demiryolu Yapısal Sağlık İzleme Uygulamaları ve Kullanılan Fiber Optik Sensör Çeşitleri (Du ve ark., 2020)

Ölçüm Amacı - Uygulaması	Ölçümde Kullanılan Yöntem
Yük, Yanal Yer Değiştirme, Düşey Deformasyonlar	Brillion Dağınık Fiber Optik Sensörler
Balast Yanal Yer Değiştirme	Fiber Bragg Izgara Sensörler
Raylarda Oturma	Fiber Bragg Izgara Sensörler
Demiryolu Viyadükleri Yer Değiştirme	Fiber Bragg Izgara Sensörler
Demiryolu Zemin Titreşimleri	Dağınık Akustik Algılayıcılar
Balast Yorulması	Rayleigh Dağınık Sensörleri

Günümüzde binaların, barajların, tünellerin, köprülerin ve diğer önemli altyapı inşaatlarının kontrolü inşaat mühendisleri tarafından gerçekleştirilmekte, fakat kontrol eden mühendisin bilgi birikimine göre kontrol sonucu değişkenlik göstermekte, kesin bilgiye ulaşmak güçleşmektedir. Son yıllarda fiber optik sensörlerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması için çalışmalar hızlanmış, sensörlerin yüksek hassasiyetli, fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklı, hafif olması, vb. avantajlarından dolayı yapı sağlığının kontrol edilebilmesi ve sonuçların doğruluğunun sağlanabilmesi için kullanılması üzerinde çalışılmaktadır.

Betonarme yapılarda donatı korozyonunun yapılarda oluşan hasarların başlıca nedenleri arasında olduğu bilinmektedir. Donatı korozyonunun takibi yapı sağlığı izleme noktasında önem arz etmektedir. Ramani & Kuang tarafından 2021 yılında interferometrik fiber optik sensörlerle korozyon tespiti üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 150 x 100 x 80 mm boyutlarında bir kiriş numunesinde ikisi alt bir tanesi üst donatı olmak üzere donatı mevcuttur. Tasarlanan deney düzeneği korozyon sonucu oluşan çatlakların takibi üzerinden korozyon takibi yapılmaktadır. Betonarme numuneye üç nokta eğilme deneyi sonrasında hızlandırılmış korozyon deneyi uygulanmıştır. Üç noktalı eğilme deneyi sonucu oluşan ön çatlığa fiber optik sensör, LVDT ve strengçe (strain - gauge) uygulanmış ve ölçümler karşılaştırılmıştır. Çatlakların genişlemesi sonucu strengçeler kullanılmaz hale gelirken fiber optik sensörler ölçüme devam edebilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında uygun maliyetli bir sistem olarak fiber optik sensörlerin korozyon takibinde uygulanabileceği belirtilmiştir(Ramani & Kuang, 2021).

Çalışmaların fiber optik sensörler yapı sağlığı izleme noktasında önem arz ettiğini göstermektedir. Ölçüm sonucunda yapı sağlığı izleme uygulamalarında kullanılabilecek fiber optik sensör çeşitleri ve uygulamaları aşağıda ki tabloda gösterilmiştir.

Viyadük inşaatında kullanılan betonarme prefabrik elemanlar üretim, montaj ve sonrasında gerilme kayıplarına uğramaktadır. Uva ve ark. tarafından tasarlanan sistemde yük artışları ve stres kayıplarının tespiti mümkün hale gelmektedir. Zheng ve ark. tarafından yapılan bir başka çalışmada tasarlanan fiber optik sensör sistemiyle zeminlerde meydana gelen oturmaların tespiti mümkün hale gelmektedir. Betonarme yapılarda meydana gelen çatlaklar betonda korozyonun başlayarak betonarme sistemin kullanım ömrünü azaltmaktadır. Han ve ark. tarafından tasarlanan sensör sistemiyle çatlakların oluşumu ve takibi mümkün hale gelmektedir. Fiber optik sensörlerin geoteknik mühendisliği uygulamaları üzerine de çalışmalar yapılmakta, zeminde ki bozulmalar, oturmalar, şevlerde ki hareketler, ankraj ve zemin çivilerinin yapısal sağlıkları da incelenebilmektedir. Aşağıdaki tabloda paylaşılan çalışmalarda, fiber optik sensörlerle yapısal sağlık izleme üzerine yapılan çalışmaların güncel olarak devam ettiğini göstermektedir (Tablo 3.1.5.3.).

Tablo 3.1.5.3. Fiber optik sensörlerle yapısal sağlık izleme uygulamaları üzerine yapılan güncel tarihli birtakım çalışmalar

Sensör Tipi	Uygulama	Kaynak
SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques)	Prefabrik elemanlarda, üretimden işletme süresince oluşan gerilmelerin değişimi	(Uva ve ark., 2014)
OTDR (optical time domain reflectometer)	Yol altyapısında meydana gelen oturmaların ölçülmesi	(Zheng ve ark., 2022)
BGS (Brillouin gain spectrum)	Betonarme yapılarda çatlak takibi	(Han ve ark., 2021)
FBG (Fiber Bragg Gratings)	Geoteknik mühendisliği – Zeminde oturmalar, şev stabilitesi, zeminde bozulmalar, ankrajların yapı sağlığı takibi	(Zheng ve ark., 2020)
LPOF (lens tabanlı plastik fiber optik sensör)	Donatı Korozyonu	(Ramani & Kuang, 2021)

3.2. Sıcaklık Sensörü

Sıcaklık sensörü bir nesnenin veya ortamın sıcaklığını tespit etmeye yarayan cihazlardır. Bu sıcaklık değeri sensör tarafından algılanır ve dijital veya analog olarak çıktı iletir. Sıcaklık sensörleri birçok endüstri dalında katı, sıvı ve gazların sıcaklığını ölçmek için kullanılmaktadır. Uygulamanın çeşidine göre farklı sıcaklık sensörleri mevcuttur. Temelde iki çeşit sıcaklık sensörü mevcuttur. Bunlar: temaslı ve temassız sıcaklık sensörleri. Temaslı sensörler sıcaklığı ölçülen maddeye fiziksel olarak temas ederek ölçüm yaparken, temassız ölçüm yapan sensörler radyasyon ve konveksiyon özelliklerini kullanırlar. Sıcaklık sensörlerinin çeşitleri şunlardır: Termostat, termistör, direnç sıcaklık detektörü, termokupl.

3.2.1. Termostat

Termostatlar birbiri üzerine yapıştırılan farklı termal özelliklere sahip metallerin sıcaklık değişiminde farklı davranışlar göstermesi üzerin çalışan sensörlerdir. Bi-metalik ve elektromekanik bileşenlerden oluşan bu sistem, sıcaklık değişimlerinde metallerden birinin diğerinden farklı davranış göstermesiyle kontakların açılıp kapatılmasını sağlar. Şekil 3.2.1.1. de bi-metalik termostat örneği gösterilmiştir. Şekilde endüstride kullanılan bir termostat örneği görülmektedir. (Şekil 3.2.1.1.)



Şekil 3.2.1.1. Bi-metalik termostat sıcaklık sensörü (Anonim, URL-1)

3.2.2. Termistör

Termistör sıcaklık sensörleri nesne sıcaklığına göre dirençte değişiklik oluşması sebebiyle sıcaklığı ölçmek için kullanılan bir başka cihazdır. Ortamın veya sıcaklığı ölçülen nesnenin sıcaklığı değiştiğinde yarı iletken malzemeden oluşan bu cihazda ki direnç değeri de değişecektir. Kullanılan yarı iletken malzemenin de direnç değişimine etkisi olduğundan hassasiyeti değişmektedir. Şekilde endüstride kullanılan bir termistör örneği görülmektedir. (Şekil 3.2.2.1.)



Şekil 3.2.2.1. Termistör sıcaklık sensörü (Anonim, URL-2)

3.2.3. Direnç Sıcaklık Detektörü (RTD)

Dirençli termometre olarak da bilinen direnç sıcaklık sensörü termistöre benzer şekilde çalışmaktadır. Bakır, nikel ve platin gibi iletken metallere oluşan bu sensör, bu malzemelerin elektrik direnç değişimleri bir fonksiyona bağlı olan bir bobine bağlanmasıyla oluşur. Şekilde endüstride kullanılan bir direnç sıcaklık detektörü örneği görülmektedir. (Şekil 3.2.3.1)



Şekil 3.2.3.1. Direnç sıcaklık detektörü (Anonim, URL-3)

3.2.4. Termokupl

Termokupllar farklı iki iletken telin bir noktadan (uç kısım) bağlantı oluşturulmasıyla imal edilir. Bağlı nokta ile ayrı iki ucun sıcaklık değerleri farklı tutularak bu sıcaklık farkına orantılı olarak oluşan termoelektrik voltajın ölçülmesiyle termokupl sensörleri oluşmaktadır. -200 °C ile 2000 °C arasında ölçüm aralığı mevcut olup oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekilde endüstride kullanılan bir termokupl örneği görülmektedir. (Şekil 3.2.4.1.)



Şekil 3.2.4.1. Termokupl sıcaklık sensörü (Anonim, URL-4)

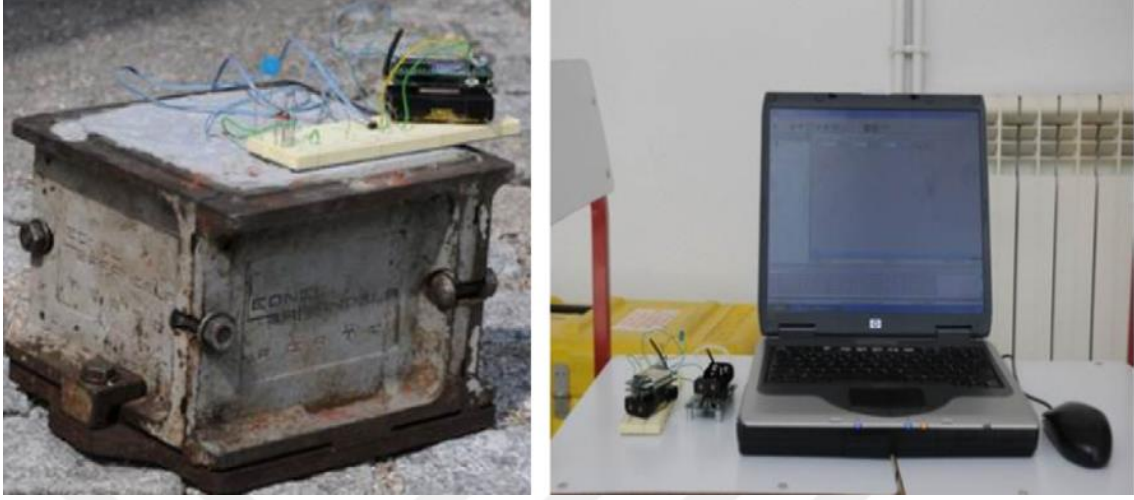
3.2.5. Sıcaklık Sensörlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Yapılarda oluşan hasarların nedenlerinden biride yapısal elemanlarda meydana gelen hasarlardır. Bir köprünün, barajın veya bir yapının çökmesi büyük problemlere sebep olabilecektir. Bu noktada sıcaklık sensörü yapısal elemanların durumu ile ilgili tahmin yapabilme noktasında sıcaklık değerlerinin ölçülmesinde kullanılabilir. 2013 yılında Barraco ve ark. tarafından yapılan çalışmada beton yapıların yönetilmesi için izlenebilirliği üzerine bir çalışma yapılmıştır. Betonun sıcaklığı özellikle erken ve kür dönemlerinde önemli bir parametre olmaktadır. Betonun sıcaklığı düştüğünde, hidrasyon tepkimesi de yavaşlamaktadır. Tam tersi durumda tepkime hızlanmakta ve ekzotermik bir reaksiyon oluşturmaktadır. Bu sıcaklık değişimi betonda çatlamalara sebep olmaktadır. Bu sebeple önemli hale gelen sıcaklık parametresinin ölçülmesi için bu çalışma da betonun erken ve kür döneminin takip edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında erken dönemi izleyebilmek amacıyla 4 farklı sensör sistemi tasarlanmıştır. Bunlar;

1. Negatif sıcaklık termistörü
2. SHT 15 dijital sıcaklık ve nem sensörü
3. SHT21S sıcaklık ve nem sensörü
4. SHT15 ve SHT21S sistemlerinin beraber kullanılması

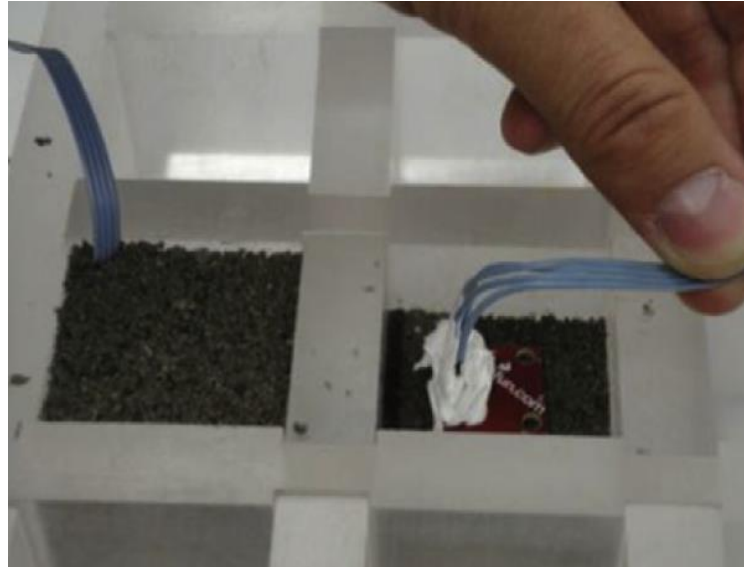
İlk olarak negatif termistörler direkt olarak 10 cm x 10 cm x 10 cm beton numunelerin içerisine uygulanmıştır. Sistemin bileşenleri olarak sensor devre kartı ve IRIS modülü (IRIS: Kablosuz sensör ağının oluşturulması için kullanılır(Babu ve ark., 2013))

kullanılarak betonun içerisinde alınan verilerin kablosuz olarak bilgisayara verilmesi amaçlanmıştır. Sistemin uygulaması Şekil 3.2.5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.5.1. Negatif termistör uygulanmış beton numunesi (Barroca ve ark., 2013)

Bir diğer uygulamada SHT15 VE SHT21S dijital sıcaklık ve nem sensörü uygulanmıştır. Uygulamada kullanılan sensörler betonun içerisine yerleştirilmeden önce yüksek geçirim özelliğine sahip 4 cm x 4 cm x 4 cm boyutlarında harç numunelerinin içerisinde koruma amaçlı yerleştirilmiştir. Uygulama Şekil 3.2.5.2. 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.5.2. Sensörün korunması amaçlı harç numuneye yerleştirilmesi (Barroca ve ark., 2013)

Şekilde 3.2.5.2.'de gösterildiği gibi sensörler küçük küplere yerleştirildikten sonra beton numunenin içerisine eklenerek veriler kablosuz olarak izlenmiştir. Bu noktada koruyucu küçük küplerin geçirimliliği test edilmiş ve küplerin geçirimliliği sayesinde ölçümlerin

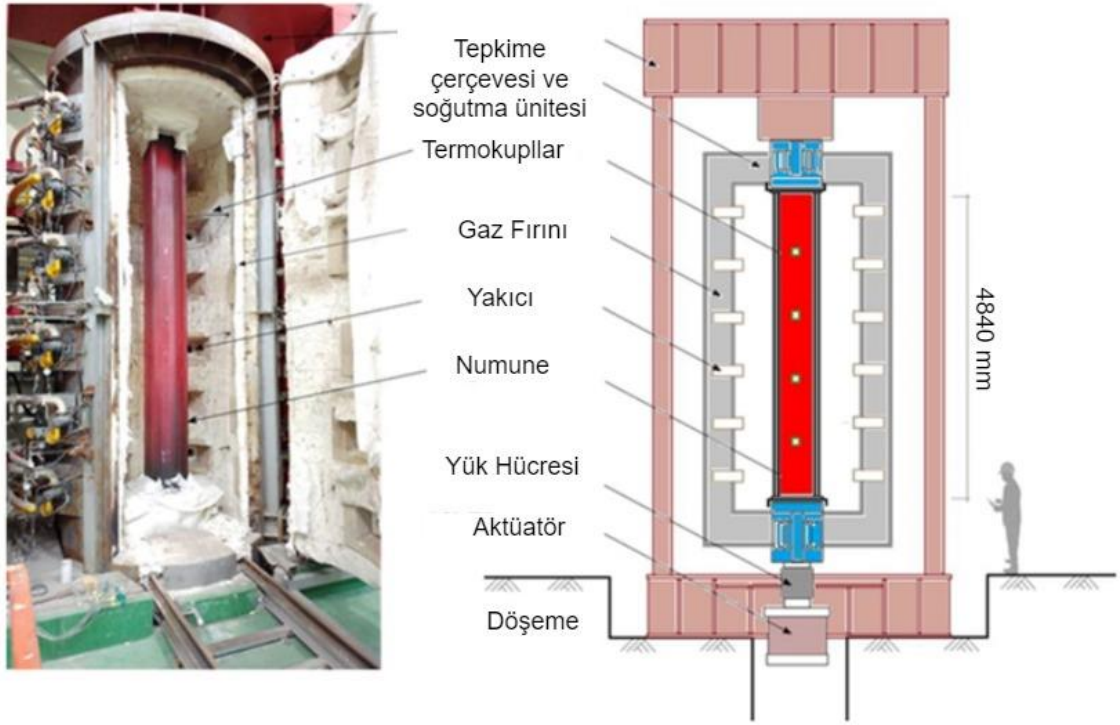
yapılabildiği belirtilmiştir. Sensörlerin test edilmesi için farklı sıcaklık ve nem ortamları oluşturulmuş ve deney sonuçları izlenmiştir. Koruyucu küplerin beton numunelerinin içerisine yerleştirilmiş hali Şekil 3.2.5.3.'te gösterilmektedir.



Şekil 3.2.5.3. Beton numunesine yerleştirilmiş sensörlerden bir görüntü (Barroca ve ark., 2013)

Sıcaklık sensörlerinin yapısal elemanların durumu hakkında bilgi vermesi açısından kullanım yöntemleri gösterilmiştir. Çalışmaların sonuçları incelendiğinde betonun erken yaş ve kür fazlarında ki sıcaklık ve nem değerleri kısmen takip edilebilmiştir. Betonun yüksek nemli alkali ortamı sensör bileşenlerinin hasar görerek çalışmamasına neden olmaktadır. Bu problem aşıldığında uzun dönemli izleme yapılabilecektir.

Bir diğer çalışmada yapıların yangın güvenliğinin sağlanabilmesi için yangın takibi yapan kablosuz sıcaklık sensör uygulaması tasarlanmıştır. Çelik yapıların, özellikle yüksek yapıların, yangın sırasında davranışları değişmektedir. Yangının yapının farklı kısımlarından farklı hızlarla ve şiddetle yayılması ve bu sebeple hasar gören taşıyıcı elemanların hasar seviyelerinin farklı olması nedeniyle yükün taşıyıcı elemanlara dağılımında değişiklikler olmakta ve bu durum yapının kısmen veya tamamen yıkılmasına sebep olabilmektedir. Termokupl çeşidi sıcaklık sensörü kullanılan sistem sensör yüzey sıcaklığını tespit etmekte ve 4,84 metre yüksekliğinde W14x 311 kesitli çeliğin farklı yerlerine yerleştirilen termokupllar sayesinde yapının farklı kısımlarının sıcaklıkları tespit edilebilmektedir. Numuneye ISO834 kapsamında standart yanma deneyi uygulanmıştır (Şekil 3.2.5.4).



Şekil 3.2.5.4. Yanma testi uygulanan numune ve termokuplların konumu (Kim ve ark., 2019)

Çalışma sonuçlarında kablosuz, uygun maliyetli bu sistemin kablolu alternatiflerinin yerine kullanılabileceği, çok yüksek sıcaklıklarda ölçüm yapabileceği belirtilmiştir (Kim ve ark., 2019).

3.3. Giyilebilir Teknolojiler

Giyilebilir cihazlar olarak da adlandırılan bu teknoloji kıyafet veya benzeri aksesuarlara entegre edilmiş elektronik cihazlar (sensörler) olup konfor seviyesini düşürmeden ölçüm yapabilen teknolojilerdir (Wright & Keith, 2014). Giyilebilir teknolojiler diğer sensör teknolojilerinden ayrı bir teknoloji olmamakla beraber entegre edilmiş sensor tabanlı teknolojilerdir. Giyilebilir teknolojilerin kullandığı sistemler: GPS, Manyetik alan, RFID, Bluetooth, Radar teknolojileri, UWB, Gyroscope, İvmeölçer, Laser, Kamera ve Video teknolojileridir.

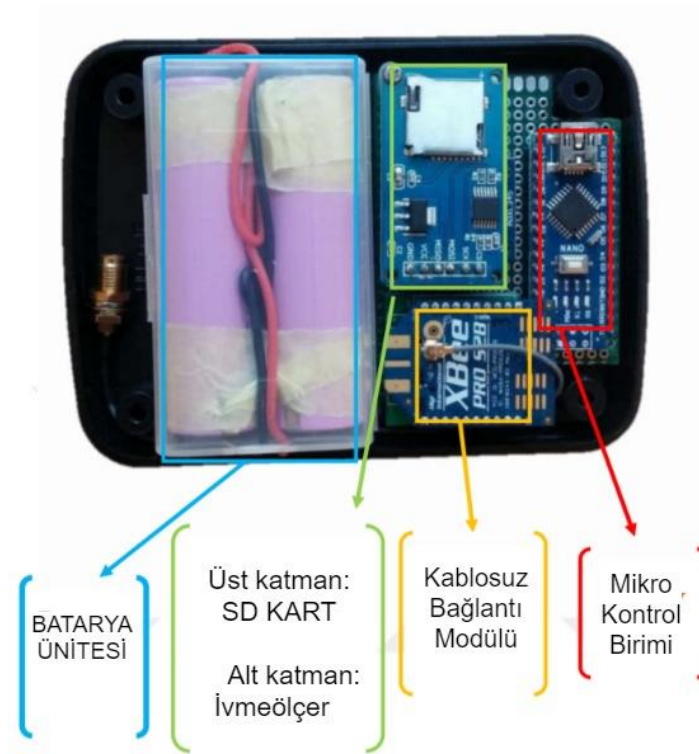
3.3.1. Giyilebilir Teknolojilerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Giyilebilir teknolojiler ile inşaat iş sağlığı ve güvenliğinin izlenebilirliği sağlanmak amaçlanmaktadır. Aşağıda ki tabloda izlenebilecek inşaat tehlikeleri ve kullanılan giyilebilir sensör teknolojileri gösterilmektedir.

Tablo 3.3.1.1. İnşaat Alanı Tehlike ve Risklerinin Giyilebilir Sensörlerle İzlenmesi Yöntemleri (Awolusi ve ark., 2018)

İnşaat Alanı Tehlike ve Riskleri	Ölçülen	Sensör Çeşidi
Yüksekten Düşme	Vücut postürü	İvmeölçer, Jiroskop, Manyetikölçer
Kayma	Vücut postürü, hızı, rotasyonu	İvmeölçer, Jiroskop
Ateş veya Patlama	Duman ve Yangın Algılayıcı	Kızılötesi
Cisim ile temas, çarpışma	Yakınlık Ölçümü	RFID, UWB, Bluetooth
Elektrik akımına kapılma	Konum tespiti, yakınlık ölçümü	RFID, UWB, GPS, Kızılötesi

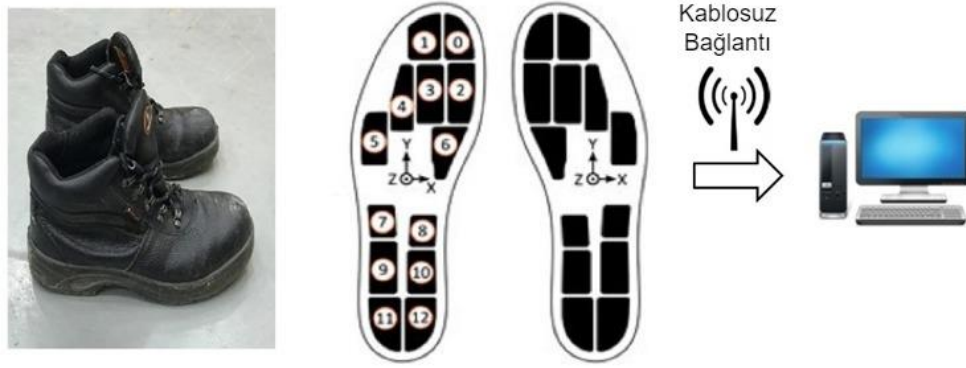
2019 yılında yapılan bir çalışmada yüksekten düşme sonucu gerçekleşen kazalara erken müdahale edilmesi için giyilebilir kablosuz sensör sistemleri tasarlanmıştır. Yüksekten düşmelerde erken müdahalenin önemi literatürde belirtilmekle beraber, inşaat iş kazalarında yüksekten düşme en yüksek paya sahiptir. Tasarlanan sistem ivmeölçer sensör içerip, düşme olayı sonucunda meydana gelecek ani ivme değişimlerini tespit ederek çalışmaktadır. Çalışmada ani ivme değişimi sonucu düşme olayını tespit eden sistem kablosuz olarak bilgiyi aktararak uyarı veren bir mail sistemi oluşturulmuştur. Tasarlanan giyilebilir sensörün detayı Şekil 3.3.1.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3.1.1. Tasarlanan giyilebilir cihaz (Doğan, 2019)

Tasarlanan bu sistem işçilerin üzerine kemer olarak yerleştirilebilir ve yüksekten düşme gibi ani ivme değişimine sebep olan olayların tespit edilebilir olduğu belirtilmiştir (Doğan, 2019).

Antwi- Afari ve ark. tarafından 2018 yılında yapılan bir çalışma da giyilebilir basınç sensörleri ve ivme ölçerler ile inşaat işçilerinin çalışma esnasında denge kaybı olaylarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yüksekten düşme olaylarının inşaat iş kazalarının büyük çoğunluğunu oluşturmakla beraber, ölümcül olmayan aynı seviyede denge kaybı sonucu düşme olayları da yaralanmalı iş kazalarına sebep olmaktadır. Bu kazaların önlenmesi, güvenli olmayan çalışma ortamlarının teşhis edilmesi, tasarlanan sistem ile verilerin toplanarak denge kaybının nedenleri de tespit edilerek ortamların düzenlenmesi açısından önem arz etmektedir. Çalışmada kişisel koruyucu donanımlardan olan iş ayakkabılarının tabanlarına yerleştirilen basınç sensörlerinden alınan veriler kablosuz olarak bilgisayara aktarılmakta ve tasarlanan makine öğrenmesi algoritmalarına aktararak denge kaybının nedenleri otomatik olarak tespit edilmektedir. Tasarlanan sistem şekilde gösterilmektedir (Şekil 3.3.1.2.).



Güvenlik Ayakkabası

3 eksenli ivmeölçer (X, Y ve Z)

Ayakkabı astarı içi 13 adet kapasitör

Şekil 3.3.1.2. Tasarlanan kablosuz sensör sistemi (Antwi-Afari, Li, Seo, ve ark., 2018)

Çalışmada 4 farklı durumda kayma, takılma, basamaktan inme ve bilek burkulması senaryoları için ortamlar oluşturulmuştur (Şekil 3.3.1.3.).



Şekil 3.3.1.3. Laboratuvar ortamında tasarlanan 4 farklı senaryo (Antwi-Afari, Li, Seo, ve ark., 2018)

Aynı zamanda bu senaryolar gerçekleştirilirken video kayıt alınmış ve verilerin alındığı zaman aralıkları ile olayların gerçekleştiği zaman aralıkları eşleştirilmiştir. Ayak tabanında bulunan basınç sensörlerinden alınan veriler farklı olaylarda ayak tabanının farklı bölgelerindeki basınç değişimleri, denge kaybı olayının otomatik olarak algılanabilmesi için farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak test edilmiş ve

Random Forest yöntemini verileri en iyi şekilde sınıflandırarak farklı olaylar için denge kaybı olayını %97,1 doğruluk oranıyla tespit edebilmektedir (Antwi-Afari, Li, Seo, ve ark., 2018).

3.4. Akselerometre (İvmeölçer)

Bir çeşit mikro elektro mekanik sistem olan bu sensörler yerçekimi ivmesini dikkate alarak bir cismin ivmesini ve yönünü tespit etmede kullanılır. Akselerometre de meydana gelen mekanik hareket, piezo-elektrik, kapasitif bileşenler ve piezo-direnç bileşenleri ile elektriksel sinyale çevrilir (Patel ve ark., 2020).

3.4.1. İvmeölçer Sensörlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

TBDY 2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği)' de 13.8 numaralı başlık ile yüksek binalarda yapı sağlığı izleme sistemlerinin kurulmasını zorunlu hale gelmiştir. Buna göre Deprem Tasarım Sınıfı 1, 1a, 2, 2a olanlardan zemin seviyesinden bina yüksekliği 105 metreden yüksek olanlar için yapı sağlığı izleme sistemleri ivmeölçerler kullanılarak projede belirtilecek şekilde kurulacaktır (TDBY, 2018). 2020 yılında konu ile ilgili Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Uygulama Yönergesi hazırlamıştır. Bu yönergeye göre, yapı sağlığı izleme sistemi için kullanılacak minimum ivme ölçer sayısı Tablo 3.4.1.1.'de gösterilmektedir.

Tablo 3.4.1.1. Kat yüksekliğine göre kullanılacak ivmeölçer sayısı (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020)

Bina yüksekliği	Minimum İvmeölçer sayısı
105 – 155	16
156 – 205	24
>205	32

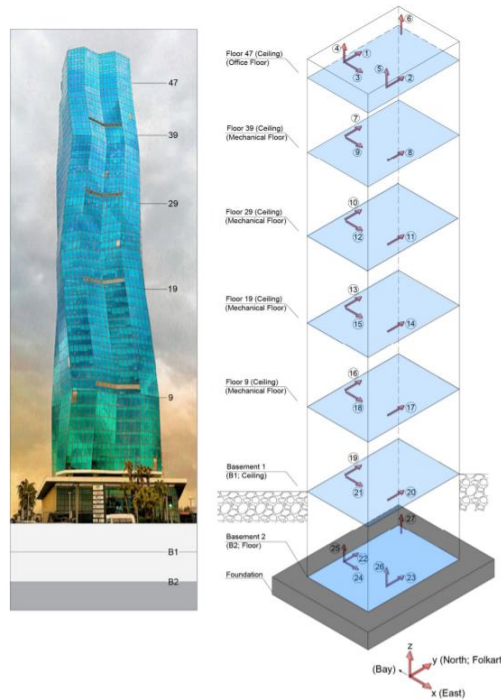
Bu sistemde kullanılan ivmeölçerler senkronize edilerek en az 24- bit duyarlılığında ve GPS zaman kartlı dijital bir kayıt sistemine bağlanacaktır. Yönergede ivmeölçer sensörlerinin yüksek binalarda uygulanış yöntemlerine de yer verilmiştir. Yönergede uygulama için belirtilen maddeler:

zamanlı olarak veri alınmak amaçlanmış ve bu kapsamda yapının bulunduğu bölgede meydana gelen depremlerde yapının tepkisi ölçülmüştür. Ölçüm yapılan binanın yüksekliği 216 metre ve ölçümlerin yapılabilmesi için farklı eksenli ivmeölçerler, dijital recorder, senkronizasyon ünitesi, GPS anteni kullanılmıştır. Şekil 3.4.1.2.'de binanın 47. Katına uygulanmış yatay ve düşey ivmeölçerlerden bir görüntü gösterilmektedir.



Şekil 3.4.1.2. Yatay ve düşey ivmeölçerler (Gümüş, 2021)

İvmeölçerleri binanın yüksekliği boyunca konumlandırılması Şekil 3.4.1.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4.1.3. İvmeölçerlerin konumlandırılması (Gümüş, 2021)

2019 yılı içerisinde Ege bölgesinde meydana gelen çeşitli büyüklükte ki depremlerde yapının tepkileri ivmeölçerle ölçülerek kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Ayrıca yapı ETABS da modellenmiş, sonlu eleman modelinden hesaplanan titreşim mod şekilleri ve doğal titreşim frekansları ile ivmeölçerler sayesinde hesaplanan verilerin uyduğu görülmüştür(Gümüş, 2021).

2020 yılında Tronci ve ark. tarafından yapılan çalışmada titreşim tabanlı otomatikleştirilmiş yapı sağlığı izleme sistemi tasarlanmıştır. 1940 yılında İtalya da yığma yapı olarak inşa edilen ayarlı kütle sönümleyici yapıya sahip The Civic Tower binası üzerinde pasif titreşim kontrol sistemi yüksek hassasiyetli ivmeölçerler kullanılarak kurulmuştur. Sistem yapıda ki operasyonel titreşimler ve depremler sonucu oluşan hareketler sonucu yapının tepkisini tespit etmektedir. Tasarlanan sistem uzun süreli yapı sağlığı izlemeyi amaçlamaktadır. Tasarlanan sistemde 6 adet yüksek hassasiyetli ivme sensörleri yapının en üst katına ve 2 adet izolatöre uygulanmıştır. Sensörlerden alınan veriler otomatik olarak algoritmalarda değerlendirilerek sürekli olarak yapının frekans değerlerinin ölçülmesini sağlamıştır(Tronci ve ark., 2020).

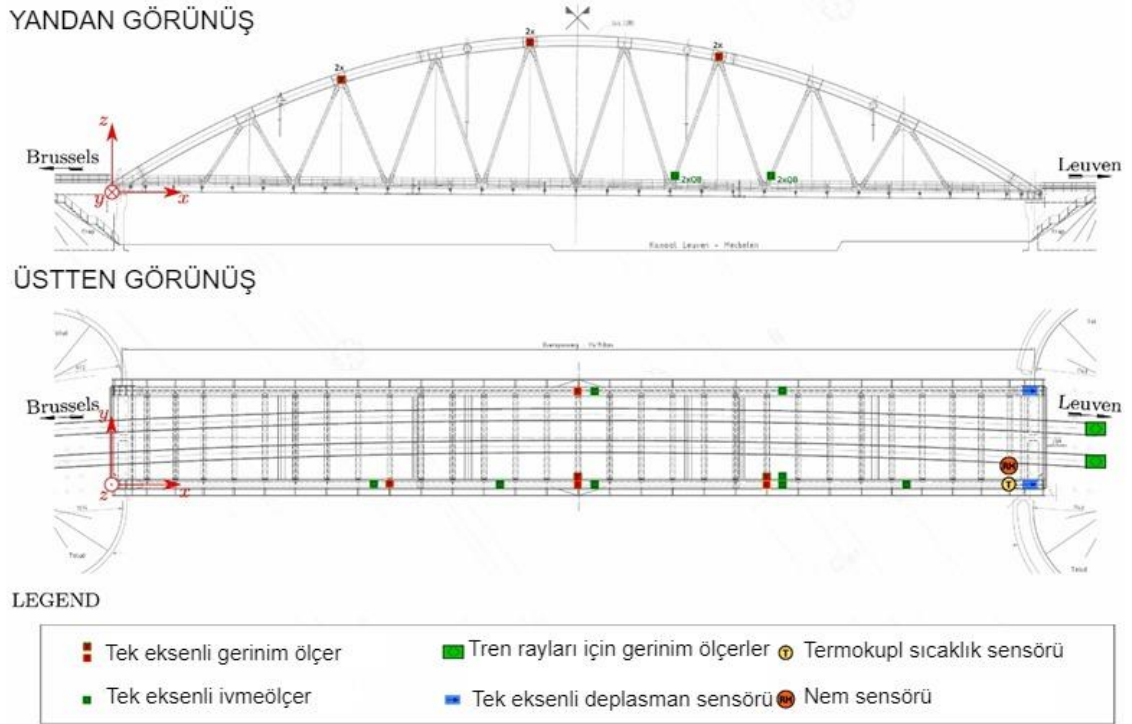
2022 yılında yapılan bir diğer çalışmada Belçika'da bulunan KW51 adlı çelik demiryolu köprüsünün titreşim tabanlı sürekli olarak yapı sağlığı izlemesi için bir sistem tasarlanmıştır. Köprü tabliyesi ve kemerlerinden ivmeölçerler ile alınan veriler kullanılmıştır. Ölçümler esnasında köprüde güçlendirme işlemi yapıldığından güçlendirme öncesi ve sonrası ölçümler yapılarak güçlendirmenin etkileri de incelenmiştir. Ayrıca sıcaklık gibi çevresel faktörlerin verilerin doğruluğunu etkilememesi açısından termokupllar(sıcaklık sensörü) ve nem sensörleri de kullanılmıştır. KW51 köprüsü aşağıda ki şekilde görülmektedir (Şekil 3.4.1.4.)



Şekil 3.4.1.4. Yapı sağlığı izlemenin yapıldığı KW51 köprüsü, Belçika (Maes ve ark., 2022)

Tasarlanan sistem kullanılan sensörler ve konumlandırılmaları:

- Köprü tabliyesi için 6 adet ivme ölçer (Yanal ve düşey)
- Köprü kemeri için 6 adet ivme ölçer (Yanal)
- Köprü tabliyesi için 8 adet strenger
- Köprü tabliyesi ve kemer bağlantı noktasına 4 adet strenger
- Yüzey sıcaklık ve nem değerleri için 1 adet sıcaklık ve nem sensörü
- Raylarda 2 adet strenger(Şekil 3.4.1.5.)



Şekil 3.4.1.5. Kullanılan sensörler ve konumlandırılmaları (Maes ve ark., 2022)

Çalışmada köprünün uzun süreli yapı sağlığı takibi için çevresel etkilerin doğal frekanslar üzerinde ki etkilerinin kaldırılması için iki farklı yöntem alınan veriler ile karşılaştırılmıştır. Bunun nedeni doğal frekanslarda hasar tespitinin sağlanması için çevresel etkilerin dikkate alınmaması esasıdır. Çalışma sonucunda sensörlerden elde edilen veriler sayesinde güçlendirme işleminin doğal frekanslarda kaymaya sebep olduğu bildirilmiştir (Maes ve ark., 2022). Bu bölümde belirtildiği üzere ivmeölçer sensör teknolojileri çeşitli yapılarda yapı sağlığı izleme noktasında yapıların deprem davranışlarının tespitinde, doğal titreşim frekanslarının izlenmesinde kullanılması üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

3.5. RFID (Radyo Frekans ile Tanımlama)

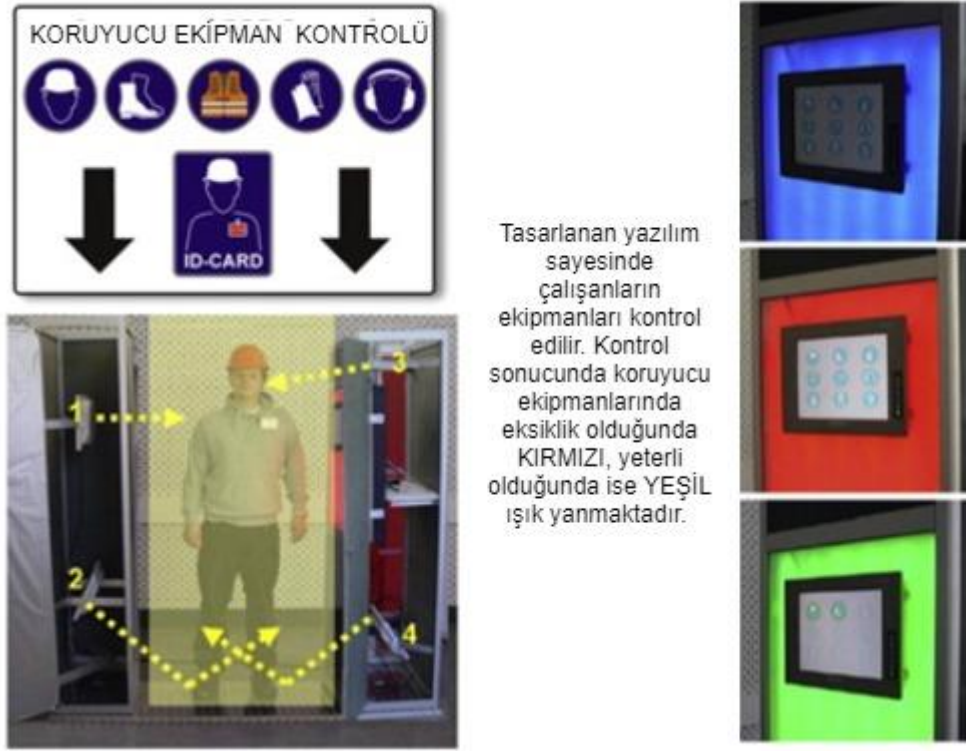
Radyo sinyalleri ile üzerinde etiket (tag) bulunduran bir nesnenin tanımlanmasını ve konumunun belirlenmesinde kullanılan sistemlerdir. Bu sistemin elemanları donanım ve yazılım olarak ikiye ayrılır ve bu elemanlar şunlardır: RFID etiketleri (içerisinde mikroişlemci bulunur), RFID anteni, RFID okuyucu, denetleyici ve ara yüz(yazılım). İnşaat mühendisliği uygulamalarında, yapı sağlığı takibi ve yönetiminde, iş sağlığı ve güvenliğinde, bakım ve onarım alanlarında kullanılmaktadır(Gu ve ark., 2009).

3.5.1. RFID 'nin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

İnşaat mühendisliği uygulamalarında Radyo Frekans ile Tanımlama sistemlerinin kullanımı konusu özellikle son on yılda belirgin şekilde artan çalışma sayısı ile güncel bir konu haline gelmiştir (Duan & Cao, 2020). Yapıların yaşam döngüsü boyunca birçok süreci kolay ve hızlı bir hale getiren bu teknoloji birçok kısıtlamaya sahip olsa da sensör teknolojileri ile beraber kullanıldığında bu sınırlamalar büyük ölçüde azaltılabilmektedir. İnşaat işleri çok tehlikeli işler sınıfında yer almakta ve kaza ve ölüm oranları bakımından diğer tüm endüstrilere göre en yüksek oranlara sahiptir (Zorluer & Eleren, 2011). İnşaat işlerinde gerçekleştirilecek kazaları önlemek veya etkisini azaltabilmek için koruyucu ekipmanların kullanımının önemi bilinmektedir. 2013 yılında Kelm ve ark. tarafından yapılan çalışma da çalışma ortamına girişte çalışanların kişisel koruyucu ekipmanlarını kullanıp kullanmadığı hakkında geri dönüş yapan bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistemin gerekli kontrolleri yapabilmesi için çalışanların koruyucu kask, yelek ve ayakkabılarına RFID etiketleri yerleştirilmiştir. Çalışma alanının girişinde konumlandırılan RFID okuyucuları, belirli mesafelerde RFID etiketlerini okuyarak kişinin ekipmanlarının varlığını kontrol etmektedir. Bu okuma kişilerin kimlik kartlarında ki RFID etiketler sayesinde kişiye ait bilgi olarak kaydedilmektedir. Sistemin detayları Şekil 3.5.1.1. ve Şekil 3.5.1.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.5.1.1. Kişisel Koruyucu Ekipmanlara Yerleştirilen RFID Etiketler (Kelm ve ark., 2013)



Şekil 3.5.1.2. Tasarlanan Uyarı Sistemi (Kelm ve ark., 2013)

RFID teknolojilerinin inşaat sektöründe kullanılabileceği çok sayıda alan bulunmaktadır. Bahsedildiği üzere bunlardan bir tanesi RFID sistemleriyle inşaatlarda iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanabilmesi amacıyla kullanılan kişisel koruyucu ekipmanların şantiye ortamında kontrolünün sağlanabilmesidir. Uygulama yöntemi gösterilmiş olan sistemin sonuçları incelendiğinde RFID etiketlerinin çalışanların kişisel koruyucu ekipmanlarını çalışma alanına girişlerinde kullanıp kullanmadığı tespit edilebilmiştir. Ölçümlerde çok düşük hata oranları oluşmuş olsa da sistem çoğunlukla başarılı olarak tespitler yapabilmektedir(Kelm ve ark., 2013).

Ülkemizde halihazırda kullanılmakta olan Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve ASELSAN tarafından hazırlanan EBİS (Elektronik Beton İzleme Sistemi) sistemi RFID etiket ve okuyucuları ile oluşturulmuş bir sistemdir. Ülkemizde betonun kalite kontrolü Yapı Denetim firmaları tarafından yapılmaktadır. 2019 yılında kullanıma geçen bu sistem ile taze betondan numune alınması, basınç dayanım testleri süreçleri EBİS sistemi ile internet üzerinden takip edilebilir hale gelmiştir. Bu sistemde betondan numune alınması esnasında alınan küp numunelere RFID etiketleri yerleştirilir. EBİS sisteminin kullanım adımları aşağıda sıralanmıştır(Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2019):

- Şantiyede beton dökümü esnasında küp numunelerin yarısına gelecek kadar beton dökülür ve şişleme yoluyla kalıba yerleşmesi sağlanır.



Şekil 3.5.1.3. Numuneye yerleştirilen RFID etiketi (Anonim, URL-5)

- RFID etiketi yarısı beton ile dolu kalıbın içine bırakılır ve kalıp tamamen beton ile doldurularak şişlenir ve numune hazır hale getirilir.
- Laboratuvar elemanı EBİS sistemine cep telefonu üzerinden kendi şifresiyle giriş yapar ve numune bilgilerini sisteme girer, daha sonra numuneler el terminaller ile (RFID okuyucular) okutulur ve numune bilgileriyle eşleştirilir.



Şekil 3.5.1.4. El terminali ile numunelerin tanımlanması (Anonim, URL-5)

- Yapı denetim kuruluşu denetçisi veya kontrol elemanı kendi şifresiyle EBİS sistemine girerek şahitlik beyanında bulunur.

- Laboratuvar sorumlusu EBİS üzerinden şantiye çıkış bölümüne laboratuvara gönderilecek numuneleri el terminalleri ile tekrar okutur.
- Laboratuvara gelen numuneler EBİS üzerinden kürlenme bölümüne girecek numuneleri el terminalleri ile okutur. Bu sayede numunenin 16 -72 saat bekletilip kürlenme işlemine girmesi süreci de takip edilmiş olur.
- Daha sonra ASELSAN'ın EBİS için üretmiş olduğu beton basınç dayanımı testi yapılacak olan cihaza laboratuvar sorumlusu şifresiyle giriş yapar. Ağırlığı ölçülen numunenin boyutlarına göre ölçüm yapılacak test yöntemi seçilir. Bu esnada cihazın kendi RFID okuyucuları sayesinde test yapılacak olan numune otomatik olarak tanımlanır.



Şekil 3.5.1.5. ASELSAN tarafından üretilen beton basınç dayanım testi cihazı (Anonim, URL-5)

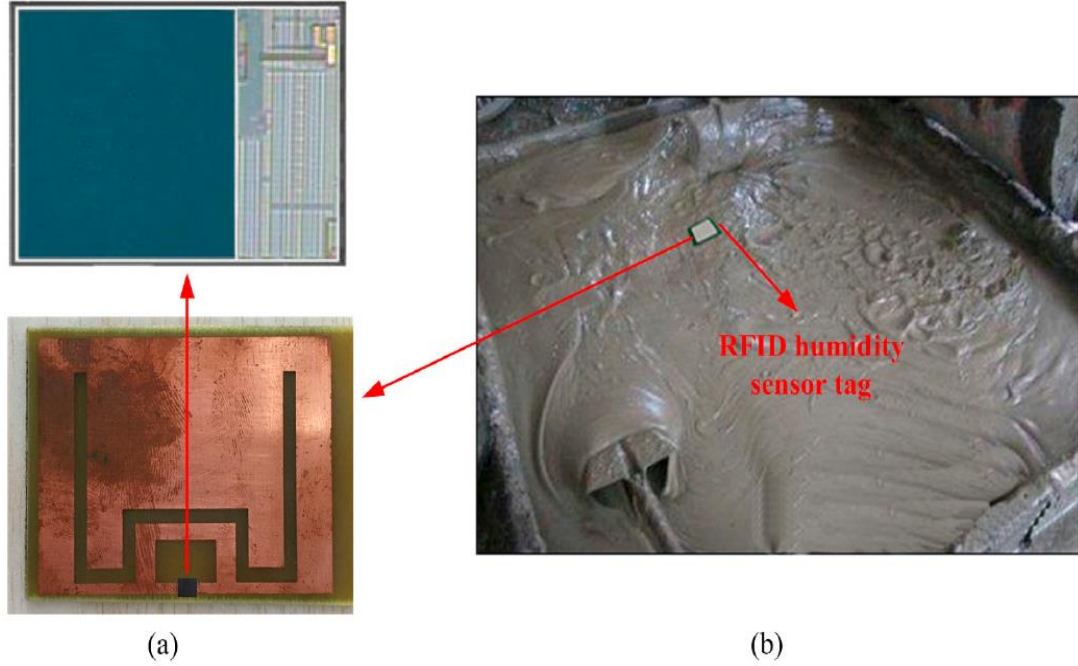
- Testin yapıldığı sıra test cihazındaki kamera sayesinde işlem canlı takip edilebilir.

Test sonuçları, tanımlı numune için otomatik olarak EBİS sistemine tanımlanır.

EBİS sistemi sayesinde numune alma, kürlenme ve beton basınç dayanım testleri güvenli şekilde izlenebilmekte, herhangi bir müdahalenin de önüne geçilmiş olmaktadır.

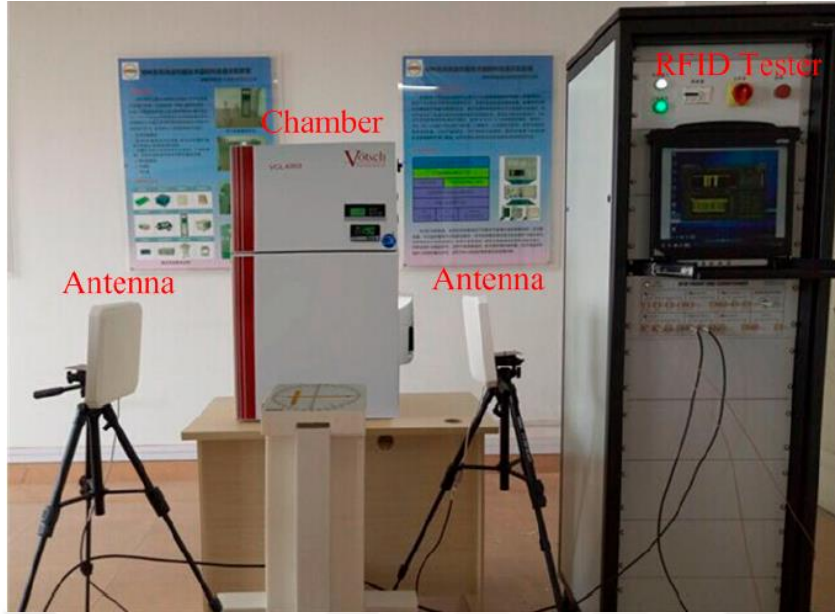
2016 yılında yapılan bir diğer çalışmada üzerine nem sensörü entegre edilmiş RFID etiketlerin betonunun nem değerinin ölçülmesi amacıyla kullanılmıştır. Farklı sensörler kullanılarak betonun sıcaklık ve nem değerlerinin takip edilmesi amaçlansa da bu sensörler ya betonun yüksek nem değerlerinden etkilenmiş ve uzun süre ölçüm yapılamamış veya bataryaları yetersiz gelerek ölçüm devam ettirilememiştir. Bu

çalışmada şekilde görüldüğü üzere RFID etiketlerinin üzerine nem sensörleri yerleştirilerek harcın içerisine bırakılmıştır (Şekil 3.5.1.6.)



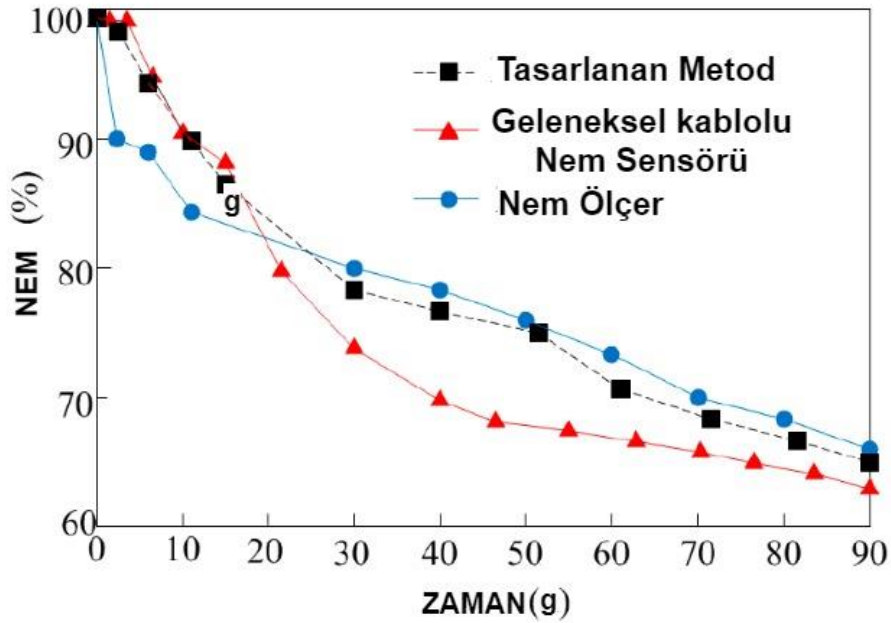
Şekil 3.5.1.6. a) Nem sensörü entegre edilmiş RFID etiketi b) Ölçüm ortamından bir görüntü (Zhou ve ark., 2016)

Ölçüm yapan RFID etiketlerinin ölçüm sonuçlarının alınabilmesi amacıyla ortama RFID Test cihazı, antenler ve sensör performansının ölçülmesi amacıyla kullanılan ayarlanabilir nem değerleri sağlayan bir kabin kullanılmıştır. RFID etiketleri dışında kullanılan bu diğer ekipmanlar Şekil 3.5.1.7’te gösterilmektedir.



Şekil 3.5.1.7. Antenna (RFID anteni), RFID tester cihazı, Chamber (Nem Kabini)

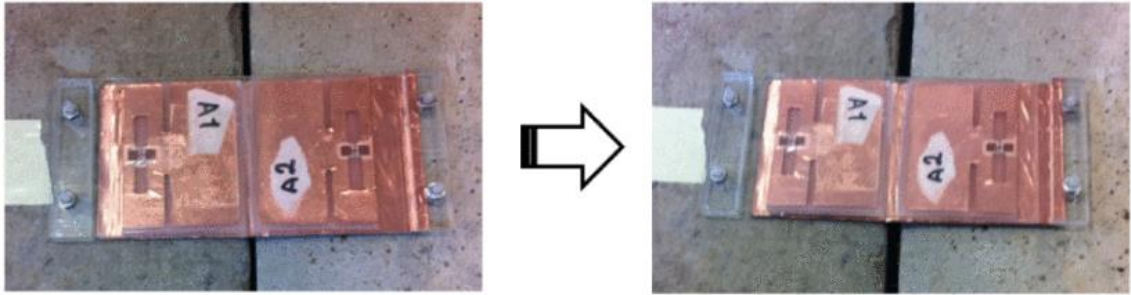
Bu çalışmada betonun nem değerlerinin ölçülebilmesi için nem sensörü entegre edilmiş RFID etiketlerinin betonun nem değerlerinin ölçülebilmesinde kullanımı araştırılmıştır. Bu sistem ile yapılan ölçümler geleneksel kablolu nem sensörleri ve nem problemleri (elektronik nem ölçüm cihazı) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu Şekil 3.5.1.8’te gösterilmektedir.



Şekil 3.5.1.8. Ölçüm Sonuçları ve Diğer Yöntemlerle Kıyaslanması (Zhou ve ark., 2016)

Betonun içerisinde ki korozyondan kaynaklı mali ve zaman kayıpları çok büyük boyutlara ulaşmaktadır. Amerika da trafik gecikmeleri ve bunlardan kaynaklı aksamaların ekonomik etkisi dikkate alınmadığında, sadece otoyol köprülerinde ki korozyonun ekonomik etkisi yıllık 8.29 milyar \$ olarak bildirilmiştir(SASTRI, 2015). Fakat üretimde ki gecikmeler ve benzer gecikmeler düşünüldüğünde bu miktar çok daha yüksek seviyelerde olacaktır. Korozyonun erken tespit edilmesi veya izlenmesi planlı bir bakım imkânı sağlayarak ekonomik kayıpların önüne geçmesinin yanı sıra, korozyondan kaynaklı oluşan büyük hasarların ve can kayıplarının önüne geçilerek fayda sağlanabilecektir. Korozyon tespitinde kullanılması amaçlanan nem sensörü entegre edilmiş RFID sistemleri bu problemin uzun süreli takibinde düşük enerji harcayan ve uygulama maliyetleri düşük olan tercih edilebilir sistemlerdir.

RFID sistemleri inşaat mühendisliği uygulamalarında diğer birçok alanda kullanılması amaçlanmaktadır. RFID üzerinde yapılan diğer çalışmalardan biri 2015 yılında yapı malzemelerinde oluşan (beton) çatlakların zarar verici boyutlara ulaşmaması için çatlakların genişliğinin takip edilebilmesi için kullanılan RFID etiketleridir. Tasarlanan sistemle çatlak genişliğinin kablosuz olarak milimetreden daha düşük değerlerde takip edilmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan sistemin çatlığa uygulanmış biçimi aşağıda ki şekilde gösterilmektedir (Şekil 3.5.1.9.)(Caizzone & DiGiampaolo, 2015).

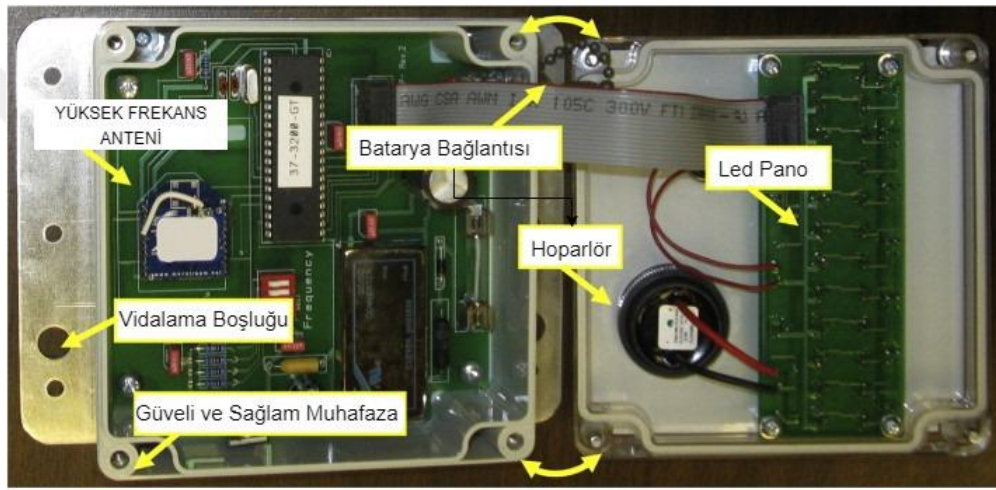


Şekil 3.5.1.9. Tasarlanan sistemin uygulanmış hali (Caizzone & DiGiampaolo, 2015)

Çalışma sonucunda araştırmacılar modellenmiş ölçümler ile ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğunu sistemin yapılarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

İnşaat sektörü iş kazalarının diğer sektörlerle göre yoğun olduğu bilinmektedir. Fakat inşaat sektörü üretimin sabit olmadığı dinamik bir sektör olduğundan şantiye alanın sürekli takibi diğer endüstri dallarına göre zordur. İnşaat alanının sürekli takibinin yapılabilmesi için yeni teknolojiler araştırılmaktadır. Bu noktada 2010 yılında yapılan bir çalışma da RFID sistemleri kullanılarak şantiye ortamında gerçek zamanlı olarak

 arpışmalardan kaynaklanan kazaların önüne geçmek için yakınlık tespiti yaparak uyarı oluşturan bir sistem tasarlanmıştır. Algılama teknolojilerinden radyo frekans ile tanımlama sistemlerine benzer olarak ultrasound, video ile algılama sistemleri, infrared gibi birçok çeşit bulunmasına rağmen bu sistemler arasında radyo frekans ile tanımlama küçük boyutları, düşük maliyeti gibi etkenlerden dolayı bu çalışmada tercih edilen sistem olmuştur. Radyo frekans dalgaları yayarak iş makinelerinin birbirleri ile ve çalışanlarla çarpışmasını  onlemek için ölçümün yapılabilirdiği mesafe içerisinde birbirleri ile yakınlık cihazlar görsel veya sesli olarak uyarı oluşturmaktadır(Teizer ve ark., 2010). Tasarlanan sistem şekil 3.5.1.10. 'da gösterilmektedir.



şekil 3.5.1.10. Tasarlanan Sistemin Bileşenleri (Teizer ve ark., 2010)

Tasarlanan cihazlar iş makinelerine, şantiye çalışanlarına ve şantiye içerisinde servis sağlayan araçlara yerleştirilerek yakınlık derecesi arttığında sesli veya led panel vasıtasıyla ışık ile görsel uyarı vermektedir. şantiye alanında uygulandığı şekil 3.5.1.11.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.5.1.11. Tasarlanan Sistemin Şantiye Ortamında Davranışı. EPU (Equipment Protect Unit, Ekipman Koruyucu Ünitesi), PPU (Personal Protect Unit: Personel Koruyucu Ünitesi) (Teizer ve ark., 2010)

Bir diğer çalışmada betonarme yapılarda donatı korozyonun ölçülebilmesi için RFID tabanlı sistem tasarlanmıştır. 2016 yılında yapılan bu çalışma da tasarlanan sistem beton içerisinde lineer polarizasyon, açık devre potansiyeli (open circuit potential) ve sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir. Ölçüm sonucunda RFID etiketlerin donatıda ki korozyonu tespit etmekte mevcut sistemler kadar doğruluğa sahip olduğu, yeni yapılacak yapılara veya boyutlarından dolayı mevcut yapılara da entegre edilebileceği belirtilmiştir (Leon-Salas & Halmen, 2016).

3.6. GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi)

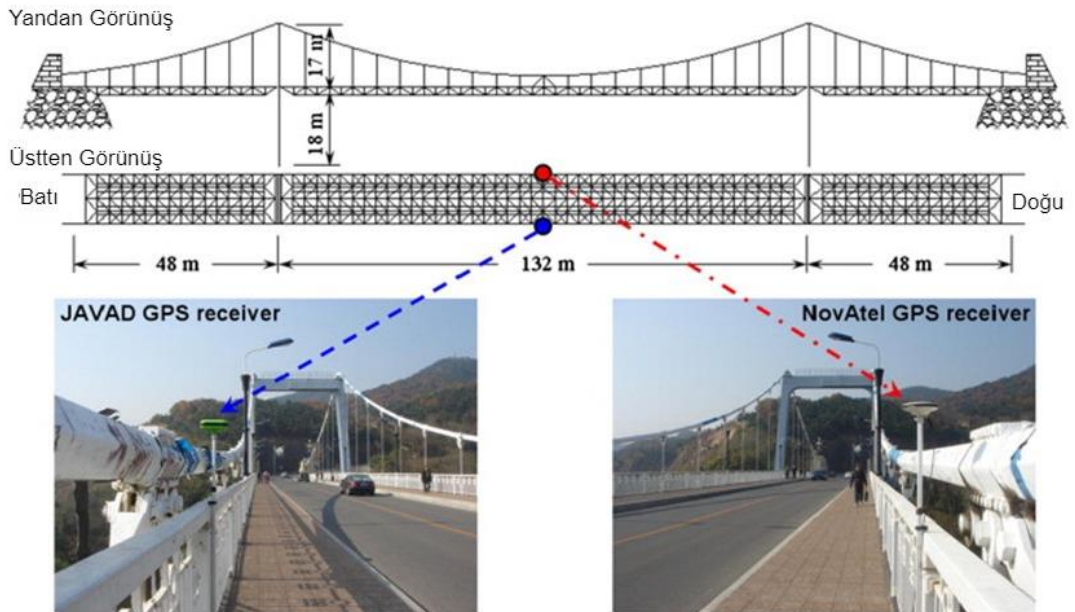
Uydular, dünya üzerinde bulunan istasyonlar ve alıcı cihazlar arasında radyo sinyalleri aracılığıyla alıcının dünya üzerinde ki konumunun ve yüksekliğinin hızlı bir şekilde tespitini sağlayan sensörlerdir. Son yıllarda binalarda ki veya bileşenlerinde ki deformasyonları tespit etmek için kullanılan sensörler, makine- teçhizat takibinde de

kullanılmaktadır. GPS sistemleri dış ortamda konum belirlemede kullanılmaya uygunken, bodrum kat, tünel, menfez gibi kapalı ortamlarda konum takibinde sinyallerin zayıf iletilmesinden dolayı hatalı sonuçlar vermektedir(Pradhananga & Teizer, 2013).

3.6.1. GPS 'in İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

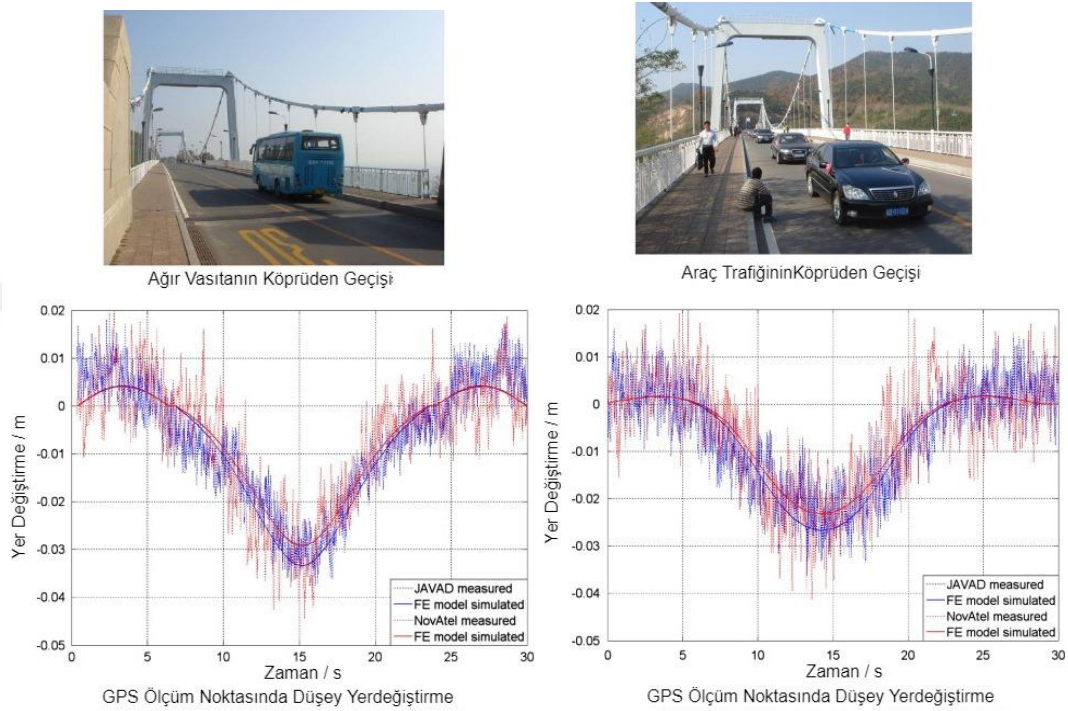
2013 yılında yapılan bir çalışmada köprülerde ki deformasyonların GPS algılayıcı sistemleri kullanılarak ölçülmesi amaçlanmıştır. Köprülerde meydana gelebilecek hasarlar yüksek maliyet ve hatta can kayıplarına sebep olabilmektedir. Dolayısıyla köprülerin yapısal olarak izlenmesi bu hasarların ve deformasyonların önceden tespit edilmesi büyük fayda sağlayacaktır. Çin de yer alan Dalian BeiDa köprüsü 230 metre açıklığa sahip 12 metre genişliğinde bir asma köprüdür. Çalışma da köprünün ANSYS programında modeli oluşturulmuş ve dinamik analizi yapılmıştır. Daha sonra en yüksek yer değiştirme değerinin görüleceği köprü açıklığının orta noktasına JAVAD ve NovAtel olmak üzere iki farklı sırasıyla 100 Hz ve 50 Hz frekanslarla çalışan GPS alıcıları yerleştirilmiştir. GPS konumlandırılması Şekil 3.6.1.1.'de gösterilmektedir.

YANDAN GÖRÜNÜŞ



Şekil 3.6.1.1. JAVAD ve NovAtel GPS lerinin köprü üzerinde konumlandırılması (Yi ve ark., 2013)

Çin de bulunan Dalian BeiDa köprüsünün düşey yer değişimleri GPS sistemleri ile tespit edilmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlar ANSYS yazılımından yapılan analizler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarında ki benzerlik GPS sistemlerinin kullanılabilirliğini ispatlar niteliktedir (Şekil 3.6.1.2.).



Şekil 3.6.1.2. Köprüden Ağır Vasıta ve Araç Trafik Geçiş Sırasında Alınan Ölçümler ve ANSYS Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları (Yi ve ark., 2013)

Ölçüm sonuçları incelendiğinde tasarlanan sistemin teorik analizlere göre tutarlı olduğu ve sistemin köprülerin dinamik yükler altında ki tepkilerinin gerçek zamanlı olarak takip edilebileceği anlaşılmaktadır.

2008 yılında yapılan bir çalışma da GPS sistemi kullanılarak yüksek yapıların sıcaklık ve rüzgâr etkisi altında yer değiştirmelerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Almanya Stuttgart da bulunan TV kulesi 1955'te betonarme olarak tasarlanmış bir yapı olmakla beraber uzun yıllardır hizmette olması dolayısıyla yapısal sağlığının izlenmesinin önemli olduğunu belirten araştırmacılar, kulenin rüzgâr ve sıcaklık etkisi altında yer değiştirmesini izlemeyi amaçlamıştır. Sonuçlar tartışıldığında gerçekçi olduğu ve bu sistemin yüksek yapılarda kullanılabileceği belirtilmiştir (Breuer ve ark., 2008).

3.7. UWB (Ultra geniş bant teknolojisi)

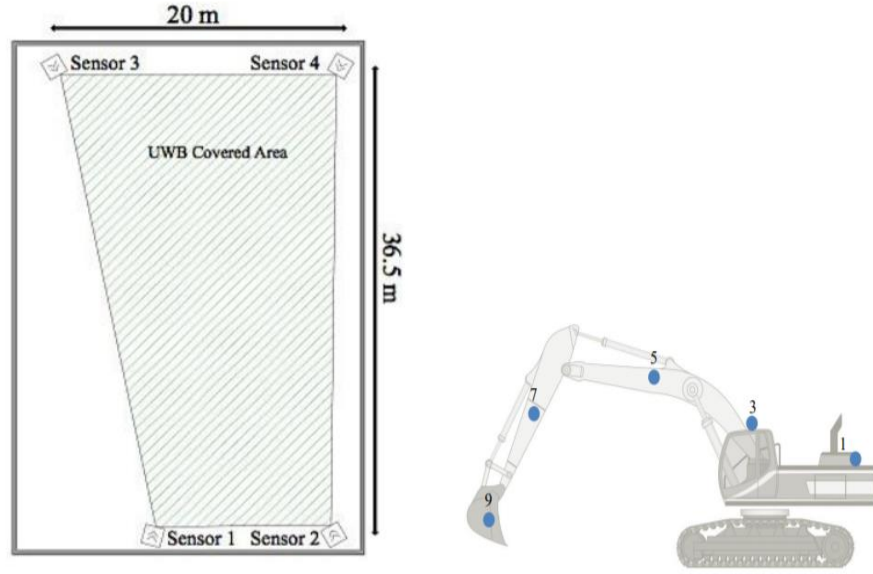
Son yıllarda geliştirilen, radyo frekans teknolojisini kullanan kablosuz konum tespitine yarayan sistemlerdir. Diğer sistemlere göre hızlı ve daha çok veri aktarabilmesi yönüyle avantajlıdır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında inşaat alanı içerisinde makine-ekipman ve çalışanların konum tespitinde kullanılmaktadır.

3.7. UWB sistemlerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

UWB teknolojisi son yıllarda inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere üzerinde çalışmalar yapılan teknolojilerdir. İnşaat alanları dinamik alanlar olduğundan güvenliğin sağlanması ve verimliliğin takip edilmesi diğer endüstrilere göre zorlaşmaktadır. Gerçek zamanlı verilerin elde edilmesi inşaat aşamalarında hızlı ve doğru kararların verilebilmesi için önem arz etmektedir. UWB teknolojisi inşaat sektöründe:

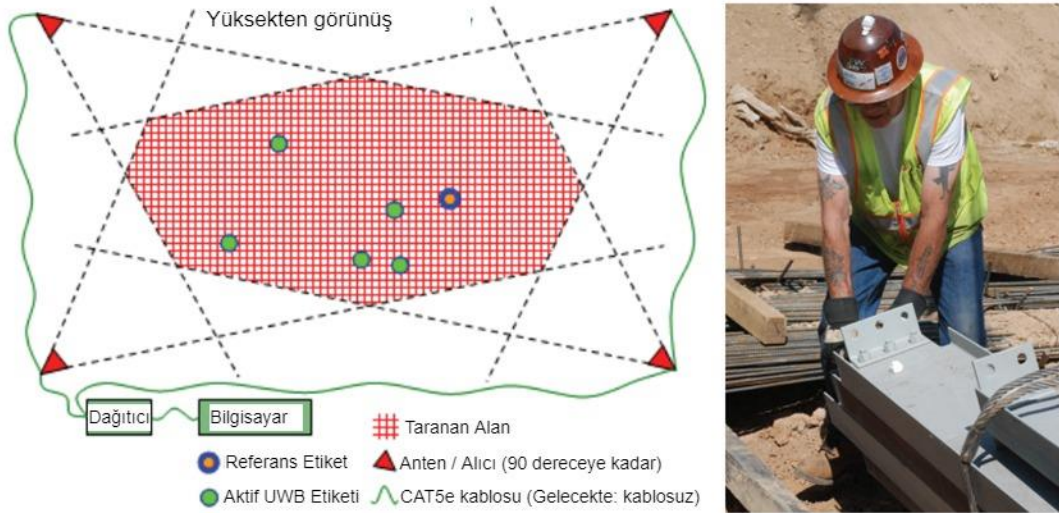
- İnşaat kaynaklarının (Malzeme, ekipman, insan kaynakları, finansal kaynaklar) otomatik gerçek zamanlı olarak takip edilebilmesi için pozisyon ve konum takibi uygulamaları
- İnşaat sahalarında gerçek zamanlı olarak iş sağlığı ve güvenliği yönetimi
- Acil durum uygulamaları, vb. uygulamalarda kullanılması üzerine çalışılmaktadır(Jiang ve ark., 2008).

2019 yılında Kanada da yapılan bir çalışmada dar bir alanda gerçekleştirilen bir inşaat alanının UWB teknolojisi ile taranması ve alanda çalışan makinelerin takip edilebilirliği araştırılmıştır. Şantiye alanını tarayacak şekilde 4 adet UWB algılayıcı ve alanda çalışan ekskavatöre de UWB etiketleri yerleştirilmiştir. Tasarlanan sistem Şekil 3.7.1.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7.1.1. UWB sensörleri ile taranan alan ve ekskavatöre yerleştirilen sensörlerin konumları (Siddiqui ve ark., 2019)

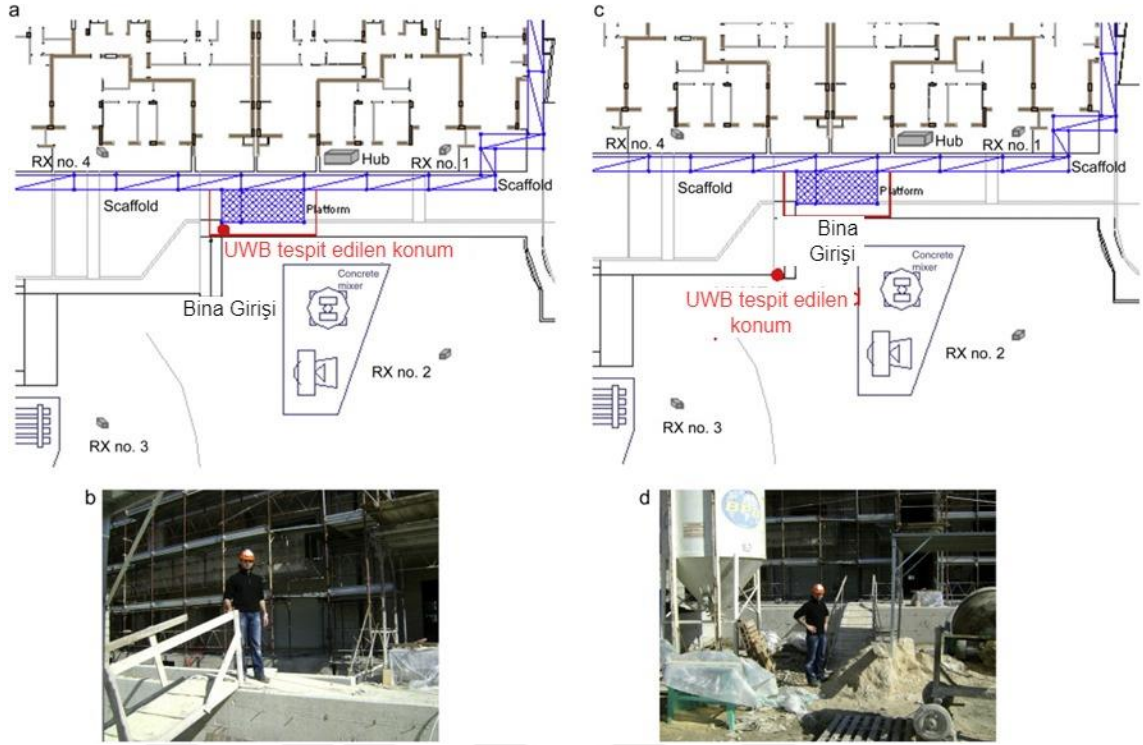
İnşaat sahalarının malzeme, iş gücü ve iş sağlığı açısından takip edilebilmesi iş performansının ve başarısının tespit edilebilmesi açısından önem arz etmektedir. İşin başarısı işin takibi ile ölçülebildiği gibi, şantiyelerin sürekli olarak takip edilmesi, iş gücü, kaynak takibi, malzeme ve ekipman temini konularında proje yöneticilerine yardımcı olarak verimliliği arttırmaktadır (Teizer ve ark., 2007). UWB teknolojisi bu alanda kullanılan teknolojilerden bir tanesidir. Teizer ve ark. tarafından yapılan çalışmada UWB teknolojisi ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak personel ve ekipman takip çalışması yapılmıştır. Sistem reseptör(receiver), anten(antenna), etiketler (Active UWB Tags), dağıtıcı(hub) ve bilgisayardan(computer) oluşmakta, sistem kablolu sensör ağı olarak çalışmaktadır (Şekil 7.1.1.2.) Etiketler reseptörler tarafından taranarak hareketleri ve konumları tespit edilmekte ve kaydedilmektedir. Etiketler çalışanlara, malzemelere, vince ve vincin kancasına uygulanmıştır. Tasarlanan sistem şekilde görülmektedir (Şekil 7.1.1.2.).



Şekil 7.1.1.2. Tasarlanan sistem ve elemanları(sol), üzerinde etiket bulunan çalışan ve çelik eleman (sağ) (Teizer ve ark., 2007)

Ayrıca, tasarlanan sistem UWB ile taranan alanda önceden belirlenmiş tehlikeli alanlara giren çalışanlara alarm ile uyarı oluşturan bir sistemi de içermektedir. Tasarlanan sistem başarıyla çalışmakta, ve belirlenen tehlikeli alanlara giren işçileri uyarmakta ve ayrıca işçilerin ve diğer etiket içeren elemanların taranan alan içerisinde ki rotalarını tespit edebilmektedir (Teizer ve ark., 2007).

Bir diğer çalışmada gerçek zamanlı iş sağlığı güvenliği yönetimi için UWB teknolojisi ile şantiyelerde risk oluşturabilecek tehlikeli bölgelerin tanımlanması ve uyarı oluşturan bir sistem tasarlanmıştır. Malzeme düşmesi sonucu gerçekleşen iş kazaları toplam iş kazaları arasında yüksek bir orana sahip olması bu çalışmanın önemini göstermektedir. Çalışma kapsamında gerçek bir inşaat sahasında iskelelere malzeme yükleme ve boşaltma amacıyla kurulan platformun altı ve yakın çevresi tehlikeli bölge olarak belirlenmiştir. Belirlenen tehlikeli bölgenin plan içerisinde ki görünüşü ve gerçek görünüşü aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Ayrıca şekilde sistem için kullanılan 4 adet alıcılar (RX1-4), dağıtıcı (Hub), ve UWB etiketi takılmış baret giyen işçi de gösterilmektedir (Şekil 7.1.1.3.).



Şekil 7.1.1.3. UWB ekipmanları, riskli alan ve etiketli baret kullanan işçinin plan üzerinde ve gerçekte pozisyonları (Carbonari ve ark., 2011)

Hareketli UWB etiketleri GUI isimli JavaTM tarafından geliştirilen yazılımla bir ara yüz üzerinden gerçek zamanlı olarak görüntülenmektedir. Tasarlanan sistem testler sonucun da tehlikeli bölgeye giriş yapan işçinin tespit edilmesinde başarılı olduğunu göstermekte ve araştırmacılar sistemin uygulanabilir olduğunu belirtmektedir (Carbonari ve ark., 2011).

UWB teknolojisi ile hareket ve rotaların takip edilebilmesi, çalışanların tehlikeli alanlarda bulunmasını tespit edebilmesi ve gün içerisinde şantiye alanı içerisinde çizdikleri rotaların zaman ile grafiğinin çıkarılabilmesi, işçi performanslarının takip edilip gerekli müdahale ve iyileştirmelerin yapılması noktasında şirketlere avantaj sağlayacağı gibi inşaat sektörü çalışanlarının bilinçsiz davranış ve hareketlerinden kaynaklanan iş kazalarının şirketlere olan mesuliyetini azaltması yönünden de fayda sağlayabilecektir.

3.8. Ultra-sound (Ultrasonik sensör)

Ses dalgalarının gönderilmesi ve geri dönüşü arasında ki zamana göre hedef nesnenin konumu belirleyen sistemlerdir. Ultrasonik sensörlerden bir görüntü şeklinde gösterilmektedir (Şekil 3.8.1.)

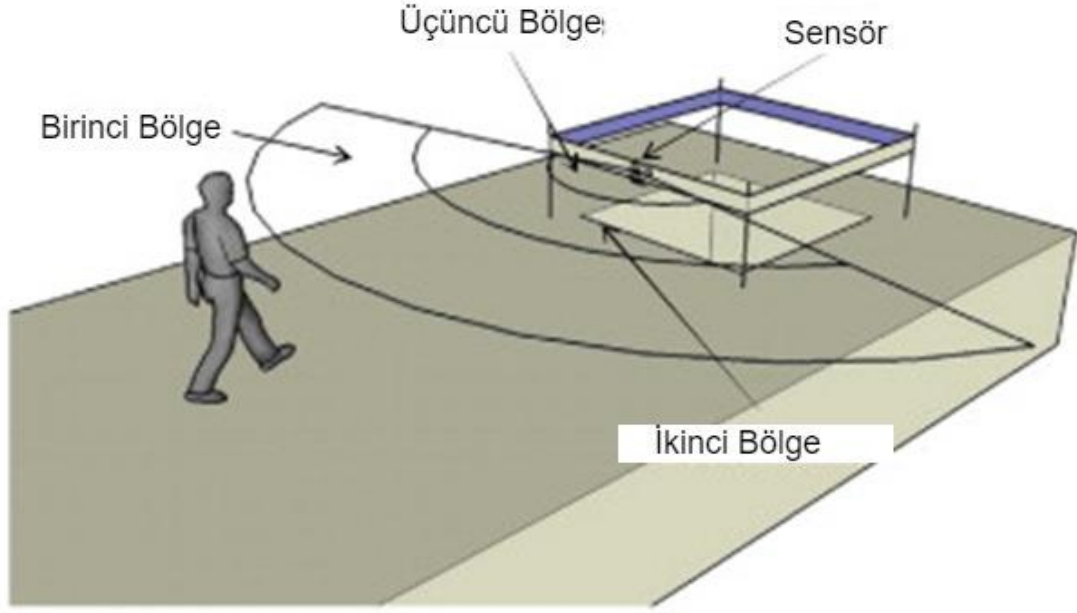


Şekil 3.8.1. Ultrasonik sensör (Anonim, URL-6)

İnşaat mühendisliği uygulamalarında konum belirlemede kullanıldığı gibi, yapılarda oluşan hasarların tespitinde de kullanılabilir (Zhang ve ark., 2017).

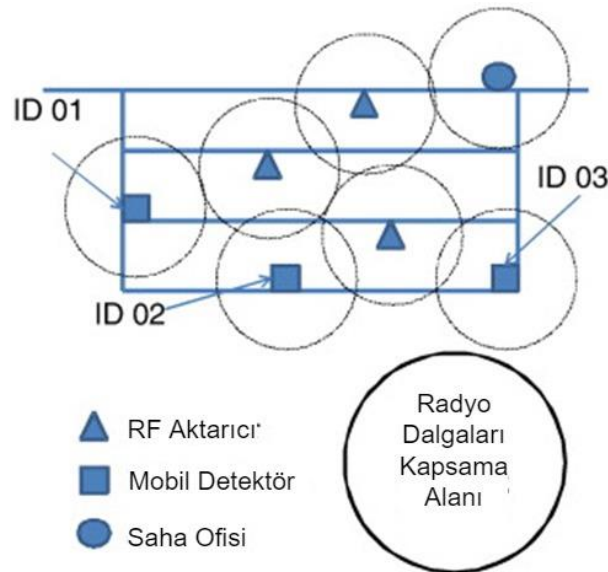
3.8.1. Ultrasonik Sensörlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Lee ve ark. tarafından ultrasonik sensörlerle yüksekten düşme kazalarının önlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İnşaatlarda yaşanan iş kazalarının büyük çoğunluğu yüksekten düşme sonucu gerçekleşmekte ve sonuçları ölüm veya ağır yaralanma şeklinde olmaktadır. Tasarlanan sistem bu kazaların önüne geçmeyi hedeflemektedir. Çalışma da ultrasonik sensörler ve infrared sensörler beraber kullanılmıştır. Bunun amacı ise infrared sensörler ile sıcaklık algılaması yapılarak taranan alanda hareket eden cismin insan veya malzeme olup olmadığının seçilmesidir. Ultrasonik sensör ise riskli alanda bulunan insanların yakınlığını tespit etmektedir. Ultrasonik sensörle taranan alanda tehlikeli bölgeye yakınlığı artan çalışanların tespit edilmesinden sonra, sesli uyarı oluşturan ayrıca bir sistem mevcuttur. Sensörle taranan alan tehlikeli olarak belirlenen bölgeye yakınlığa göre 3 bölüme ayrılmıştır. Örneğin yapı içerisinde bulunan bir boşluğa yerleştirilen ultrasonik sensör cihazı, boşluğa yaklaşan inşaat işçisinin mesafesinin 1,5 metreden daha az olduğunda “Do not approach(yaklaşma)” şeklinde sesli bir uyarı oluşturmaktadır. Tasarlanan sistemin şematik gösterimi şekilde ki gibidir (Şekil 3.8.1.1.).



Şekil 3.8.1.1. Tasarlanan sistem (MSD: Ultrasonik ve infrared sensörler) (Lee ve ark., 2009)

Tehlikeli bölgeye (Şekil 3.8.1.1. Third zone) giren inşaat işçilerinin bilgileri ofiste bulunan ana bilgisayara gönderilmektedir. Bu bilgi kablosuz olarak radyo frekans dalgalarıyla aktarılmaktadır. Şantiye içerisinde yüksekten düşme olayının birçok yaşanabilme ihtimali birçok sensör kullanılmasına neden olmakta fakat, yaklaşma bilgisinin uzaktaki ofiste ki ana bilgisayara gönderilip değerlendirilip alarm oluşturma sürecinde gecikme yaşanmaması gerekmektedir. Bunun için sistemde birden fazla radyo frekans yineleyiciler kullanılarak bilginin uzaktaki cihaza aktarılması sağlanmaktadır. Bu sistemin şematik gösterimi şekilde ki gibidir.



Şekil 3.8.1.2. RF repeater: Radyo frekans yineleyici, Mobile detector: sensör sistemi, Site Office: ofis (Lee ve ark., 2009)

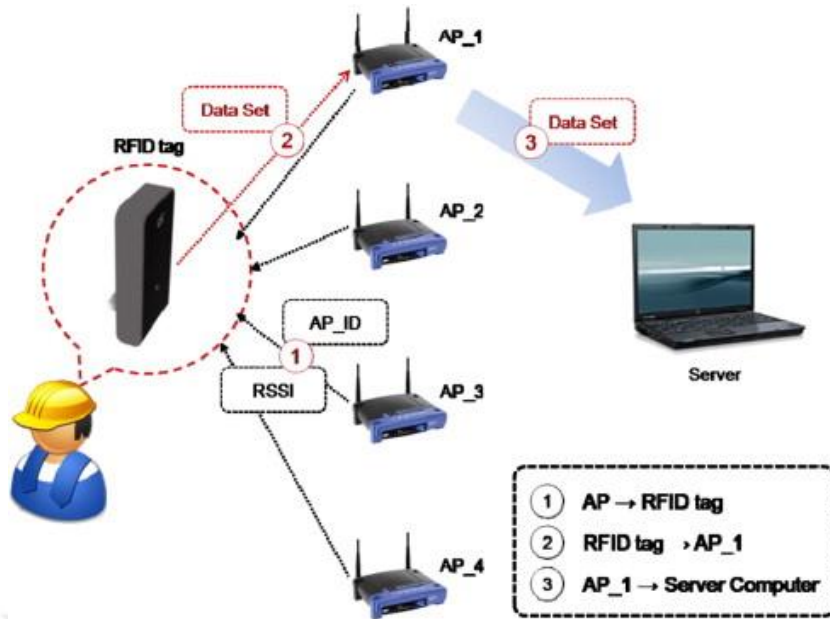
Şekil 3.8.1.2.'de gösterildiği üzere dairesel alanlar sensörün ve radyo frekans yineleyicilerin kapsamı alanlarını göstermektedir. Araştırmacıların sistemin başarılı olarak çalıştığını ve görünmeyen alanların (dead zone) takip edilebildiğini belirtmişlerdir. Bununla beraber tehlikeli bölgeye giren işçinin kimlik tespiti için RFID sistemlerinin bu sisteme eklenmesiyle daha verimli sonuçların ortaya çıkacağını belirtmişlerdir(Lee ve ark., 2009).

3.9. WLAN

Radyo frekans teknolojisini kullanarak kablosuz sinyallerin ulaştığı bölgede bulunan hedef nesnenin pozisyonunu belirleyen sistemlerdir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında; inşaat alanı içerisinde makine-ekipman ve çalışanların konum tespitinde ve iş sağlığı güvenliği uygulamalarında kullanılmaktadır(Li ve ark., 2016)(Zhang ve ark., 2017).

3.9.1. WLAN Tabanlı Sistemlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

2011 yılında Woo ve ark. tarafından kapalı mekanlarda Wi-Fi tabanlı konum takibi üzerine bir çalışma yapılmıştır. İnşaat proje yönetimi ve iş sağlığı yönetimi açısından karar verme noktasında iş gücünün, makine ekipmanların, malzemelerin takibi önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında tasarlanan sistem bir tünel şantiyesinde denenmiştir. Araştırmacılar, WLAN tabanlı pozisyon takibi sistemlerinin tezde de bahsedilen diğer algılama sistemleri olan ultrawide band (UWB), küresel konumlandırma sistemi (GPS) ve radyo frekans ile tanımlama (RFID) sistemlerine göre sinyal mesafesi, ekonomikliği ve stabilite açısından daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Sistemin bileşenleri RFID etiketler (RFID tags), erişim noktası ve bir bilgisayardan(server) oluşmaktadır. RFID etiketleri çalışanların baretlerinde konumlandırılmıştır. Tasarlanan sistemin şematik gösterimi şekilde gösterilmektedir (Şekil 3.9.1.1.).

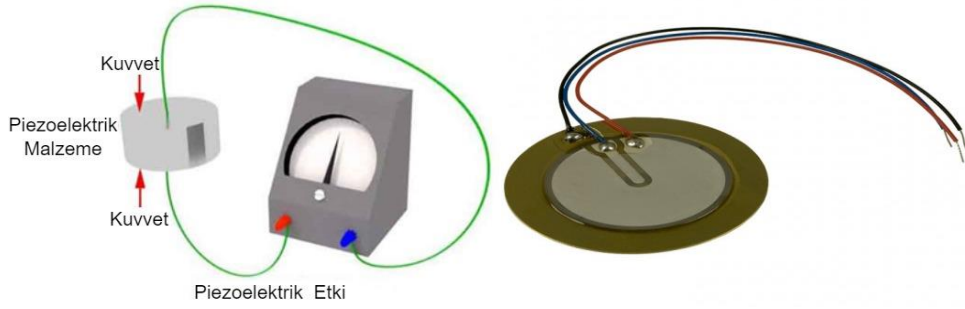


Şekil 3.9.1.1. Tasarlanan sistemin bileşenleri barete konumlandırılan RFID etiketleri (RFID tag), Access Point (AP, erişim noktası), ve Server (bilgisayar) (Woo ve ark., 2011)

Araştırmacılar tünel alanına giden merdivenlerde, tünelin giriş kısmında ve kazı yapılan alanda konum tespiti üzerine ölçümler yapmıştır. Merdiven ve giriş kısmında yapılan ölçümler için bir noktaya sabitlenmiş RFID etiketleri kullanılmış, kazı alanı için RFID etiketli baret takan bir çalışan üzerinde test edilmiştir. Ortalama olarak 5m hata payı ile ölçümlerin yapılabildiği bildirilmiştir. Araştırmacılar bu hatanın kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu belirtmişlerdir(Woo ve ark., 2011).

3.10. Piezoelektrik Sensörler

Titreşim, çarpma ve sıkıştırma gibi fiziksel büyüklükleri elektrik akımına dönüştürerek ölçebilen sensörlerdir. Bir çeşit basınç sensörü olarak çalışan bu sensörler, üzerine uygulanan kuvvet ile oluşan elektrik sinyalinin ölçülmesi prensibiyle çalışmaktadır. Piezoelektrik seramik, piezoelektrik polimer ve piezoelektrik polimer şeklinde çeşitleri mevcuttur. Piezoelektrik sensör şeması ve bir görüntü aşağıda ki şekilde gösterilmektedir (Şekil 3.10.1.).



Şekil 3.10.1. Piezoelektrik sensör şematik gösterim(sol) (Anonim, URL-7), Piezoelektrik sensörlerden bir görüntü(sağ) (Anonim, URL-8)

3.10.1. Piezoelektrik Sensörlerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Chen ve ark. tarafından 2016 yılında yapılan bir çalışmada betonun erken dayanımının izlenmesi için piezoelektrik sensör tabanlı kablosuz sensör ağı kullanılmıştır. Betonun erken dayanımının tespiti için iki metod vardır, bunlardan ilki betondan alınan numunenin laboratuvar ortamında kırılması yoluyla tespit edilmesidir. İkinci metod ise non-destructive yani hasar vermeden ölçme yöntemi. Bunun sağlanabilmesi için hidrasyon ısısı ile tespit, ultrasonic sistemler ile tespit ve piezo elektrik sensörleri ile tespittir. Bu çalışmada son yöntem olan piezoelektrik sensörleri ile betonun erken dayanımı izlenmeye çalışılmıştır. Akıllı agrega olarak tanımlanan bir nesnenin içerisine titreşim dalgaları oluşturan bir sensör ve ikinci bir agreganın içerisine de titreşim dalgalarını algılayan bir sensör yerleştirilip, betonun içerisine yerleştirilir. Belirli aralıklara ölçüm yapan sistem, teoride belirlenen aşağıda gösterilen formüle göre, beton hidrasyon sırasında dayanım kazandıkça, Young modülü artacaktır ve formüle bağlı olarak harmonik dalga genliği azalacaktır.

$$A = \left(\frac{1}{\omega}\right) \left(\frac{4p^2}{E\rho}\right) \quad (3.10.1)$$

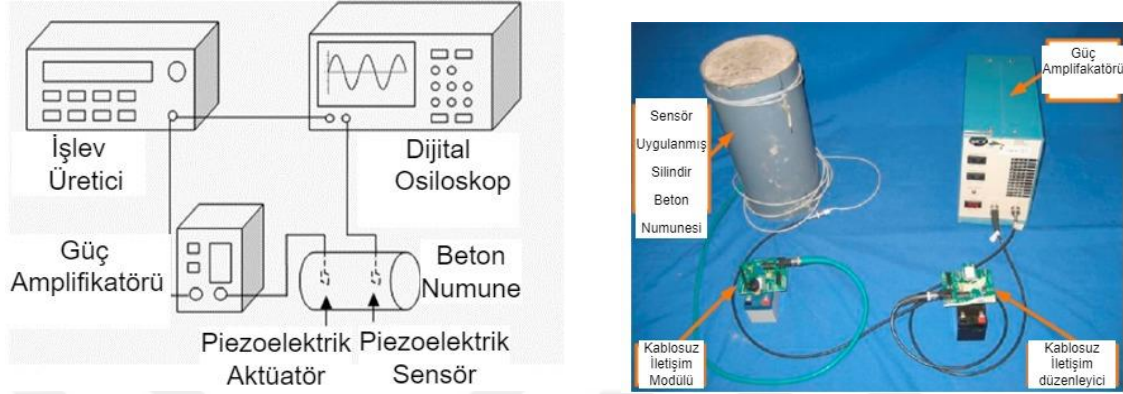
A; Harmonik Dalga Genliği

E; Young modülü,

ρ ; Yoğunluk,

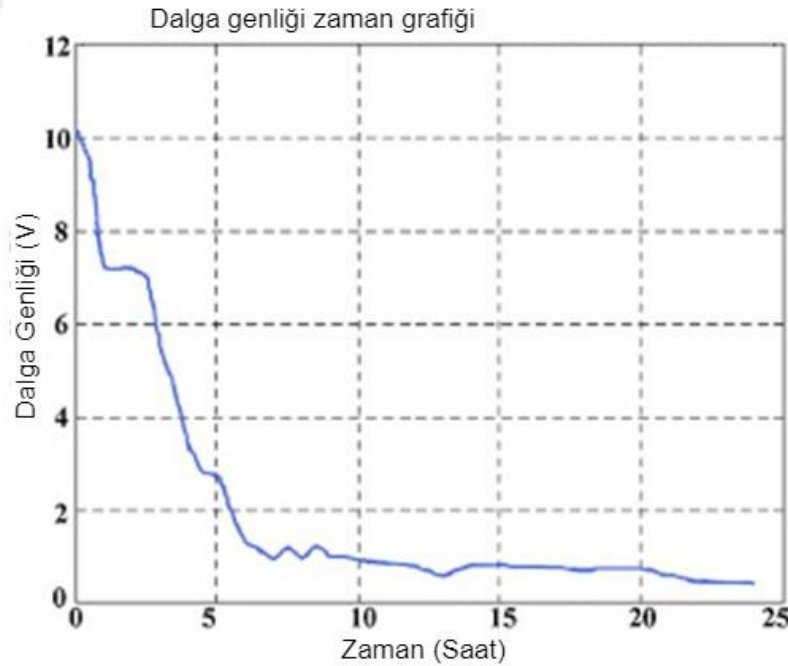
p; Ortalama güç,

Uygulama kolaylığı, bakım gerektirmemesi sebebiyle kablosuz sensör ağı kurularak sistemin sensörden okunan verilerin bilgisayar ortamına aktarılması sağlanmıştır. Kurulan sistem detayı aşağıda gösterilmektedir (Şekil 3.10.1.1.).



Şekil 3.10.1.1. Sistem detayı ve uygulaması (Chen ve ark., 2016)

Deney sistemi kurulduktan sonra her yarım saatte bir ölçümler yapılmış ve 24. saatte tamamlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde harmonik dalga boyunda 24 saat boyunca sert bir düşüş gerçekleşmiştir (Şekil 3.10.1.2.).



Şekil 3.10.1.2. Dalga genliğindeki ölçümlerin sonuçları (Chen ve ark., 2016)

Sistemde kablosuz sensör ağlarının kullanılması boyut ve maliyet açısından avantajlı olmakla birlikte, sağlamlığı ve esnekliği yönünden de avantajlıdır. Çalışmanın

sonuç kısmında bu sistem betonun erken dayanımının izlenmesinde kullanılabilir bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Chen ve ark., 2016).

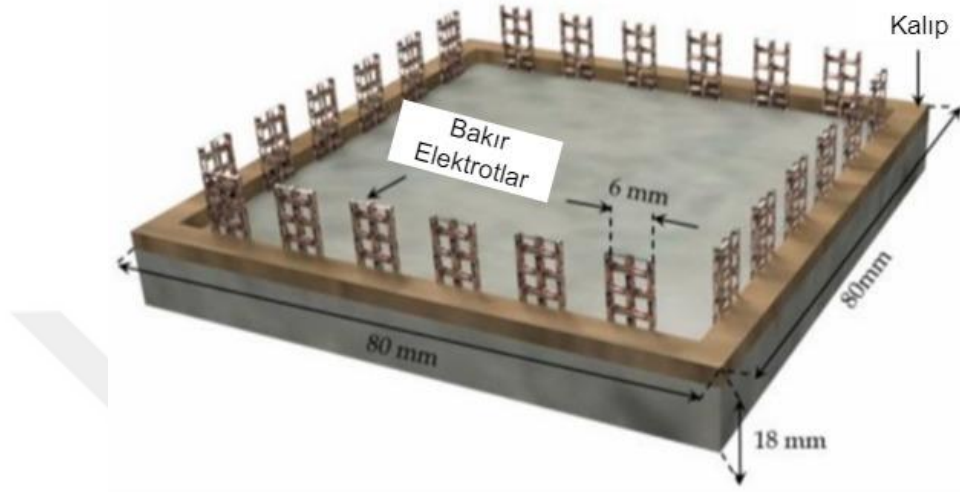
3.11. Kendiliğinden Algılayabilen Fiber Takviyeli Kompozitler, Akıllı Betonlar (Self-sensing Concrete, smart concrete)

Son yıllarda üzerinde çokça çalışmalar yapılan self-sensing uygulamaları inşaat mühendisliği uygulamalarında sensör tabanlı yapısal sağlık izleme sistemleri olarak çalışılmaktadır. Diğer sensör sistemlerine kıyasla betonda katkı olarak kullanılan karbon fiber, çelik lif, karbon nanotüp, nikel tozu gibi iletken malzemeler (küçük boyutlu), betonun kendi kendine sıcaklık, hasar ve gerilme durumlarını elektriksel dirençte ki değişim ile tespit etmesini sağlamaktadır. Self-sensing algılama yönteminin en önemli avantajı kullanılan katkıların hem mekanik olarak yapısal eleman olarak çalışmaları hem de sensör olarak algılamada kullanılmalarıdır. Fakat, kullanılan katkıların karışım beton içerisinde yayılması, elektriksel direnç değişimlerinin çevresel etkilerden kaynaklı değişmesi gibi sebepler üzerinde çalışılması gereken problemler olarak belirtilmektedir (Sun ve ark., 2010).

3.11.1. Kendiliğinden Algılayabilen Betonların İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

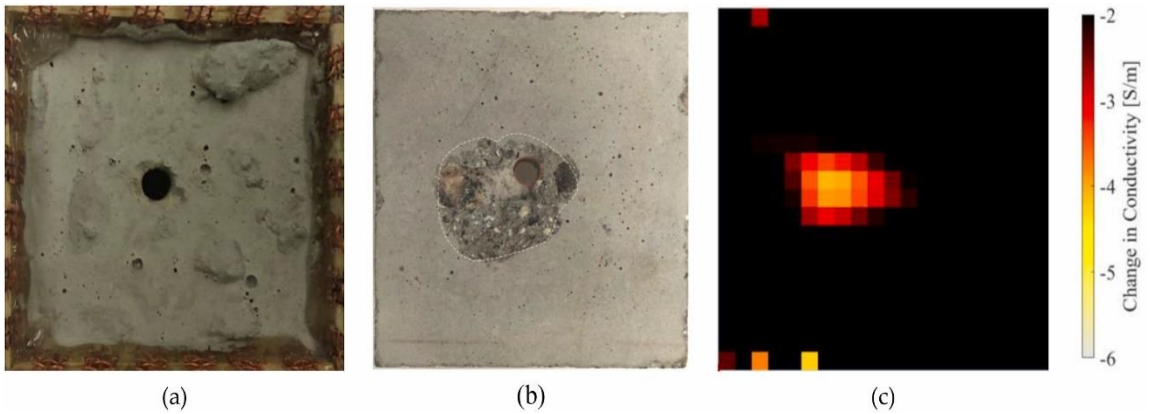
Gupta ve ark. tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada havaalanları pist betonu için kendiliğinden algılayabilen beton üzerine çalışılmıştır. Uygulamada karbon nanotüp ince filmler ince ve iri agregalara spreyci şeklinde uygulanmış ve agrega yüzeyleri kaplanmıştır. Elektriksel direnç tomografisi yöntemiyle hızlandırılmış pist kaplaması testleri ile oluşan hasarlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Elektriksel direnç tomografisi (ERT – Electrical resistance tomography) yöntemi önceden tanımlanmış bir ölçüm bölgesinde elektriksel iletkenlik dağılımını tespit edebilmek için yapılan elektriksel ölçümleri ifade etmektedir. Tasarlanan sistem de nanotüp ince filmle kaplanmış agregalarla oluşturulan beton elektriksel iletkenlik kazanmakta ve kullanılan elektrotlar sayesinde betonun belirli bölgelerinde (ölçüm yapılan bölge) voltaj değişimleri tespit edilmekte ve bir dizi algoritmalar sayesinde ölçüm bölgesinin tomografisini oluşturmaktadır. Betona uygulanan testler sonucunda oluşan çatlaklar akıllı beton olarak da değerlendirilen bu ölçüm bölgesinde betonun iletkenliğinde değişime sebep

olmaktadır. Bu değişimlerin ölçülmesi ve ERT yöntemi sayesinde betonda oluşan çatlakların konumları da tespit edilebilmektedir. Şekilde 3.11.1.1. tasarlanan deney numunesi görülmektedir. Nanotüp sprej uygulamasıyla kaplanmış olan agregalarla hazırlanan beton ve belirli aralıklarla yerleştirilen elektrotlar ile ahşap kalıp kullanılarak numuneler hazırlanmıştır.

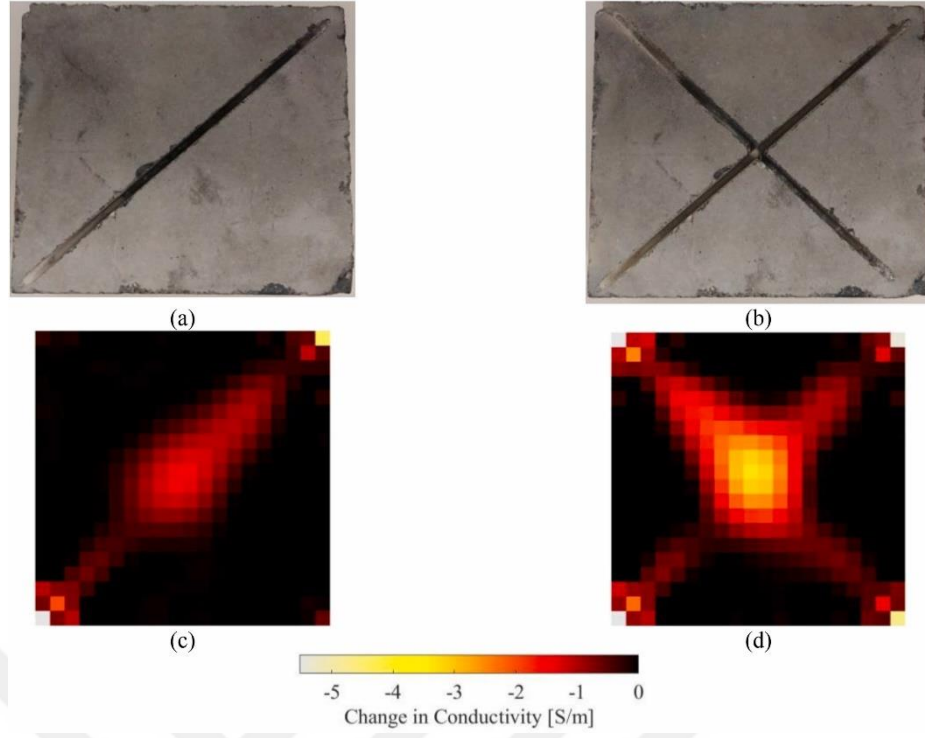


Şekil 3.11.1.1. Çalışma kapsamında laboratuvar testleri için üretilmiş numune örneği (Copper Mesh Electrode: Elektrotlar) (Gupta ve ark., 2021)

Numunenin kalınlığına göre bir miktar daha uzun ve eşit aralıklarla yerleştirilen elektrot çiftlerine bir dizi elektrik verilerek diğer elektrotların voltaj değerleri ölçülerek numune boyunca iletkenliğin nasıl değiştii gözlenmiştir. Çalışma kapsamında numunelere şekillerde (Şekil 3.11.1.2. ve Şekil 3.11.1.3.) görüldüğü üzere delik açılarak ve çatlak şeklinde derin kesikler atılarak hasarlar verilmiş ve ERT yöntemi ile elektrik iletkenliğinde ki değişim haritalandırılmıştır.



Şekil 3.11.1.2. a) Ortasından delik açılma numune b) numunenin alt tarafında delikten kaynaklı oluşan hasar c) ERT ile tomografi haritası çıkarılması (Gupta ve ark., 2021)

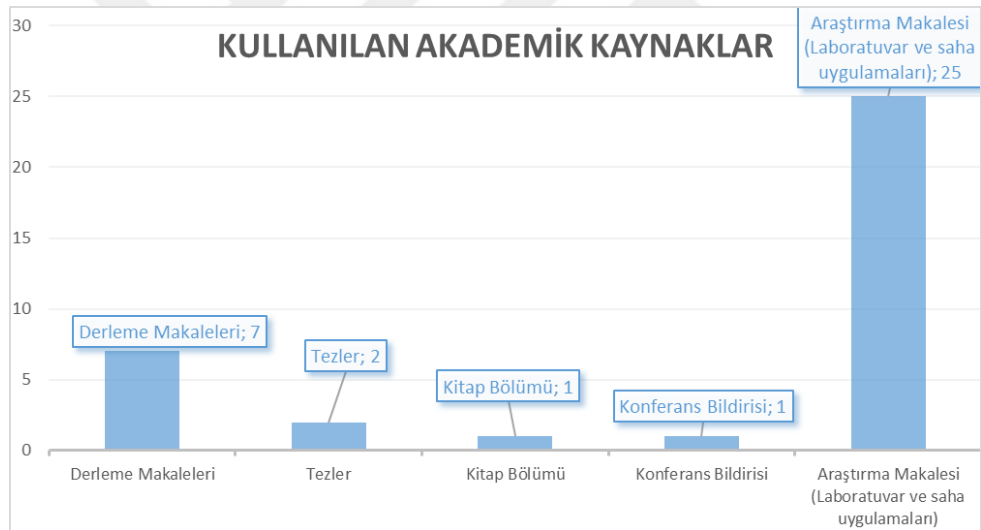


Şekil 3.11.1.3. a) ve b) Numuneye atılan derinliği değişen kesikler c) ve d) ERT tomografisinde görüntülenen sonuçlar (Gupta ve ark., 2021)

Sonuçlar incelendiğinde ERT ve nanotüp film kaplı agregaların betonda oluşan hasarın tespitinde ve ayrıca hasarın konumunun tespitinde kullanılabileceği görülmüştür.

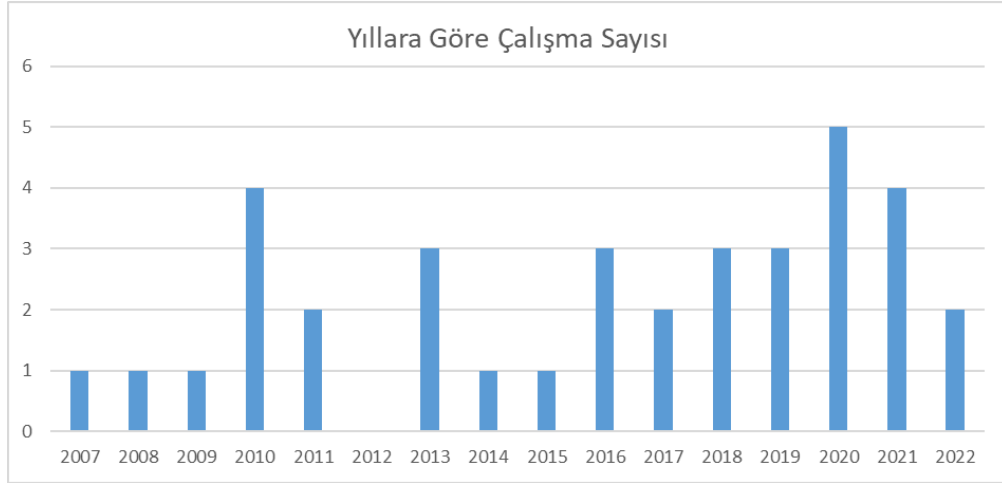
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

İnşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan sensörlerin araştırılması üzerine hazırlanan bu çalışmada 11 farklı sensör ve farklı uygulamalar gösterilmektedir. Bu tezde gösterilen uygulamalar çeşitli araştırma makaleleri, derleme çalışmaları, konferans bildirileri ve lisansüstü tezlerden derlenmiştir. Sensör uygulamaları üzerine toplamda 36 farklı çalışma incelenmiştir. Bu çalışmalardan 7 tanesi derleme çalışması olup farklı uygulamaları bir araya getirerek incelemesi yönünden avantaj sağlamıştır. Çalışmada kullanılan kaynaklardan 2 tanesi lisansüstü tezlerden oluşmakta, ayrıca 1 adet kitap bölümü ve 1 adet konferans bildirisi sensör tabanlı uygulamaların kaynaklarındandır. Tezde 25 adet inşaat mühendisliğinde yapılan çeşitli uygulamalar (laboratuvar ve vaka çalışmaları) incelenmiştir. Kaynakların dağılımı aşağıda ki grafikte gösterilmektedir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Tez çalışmasında kullanılan kaynak türleri

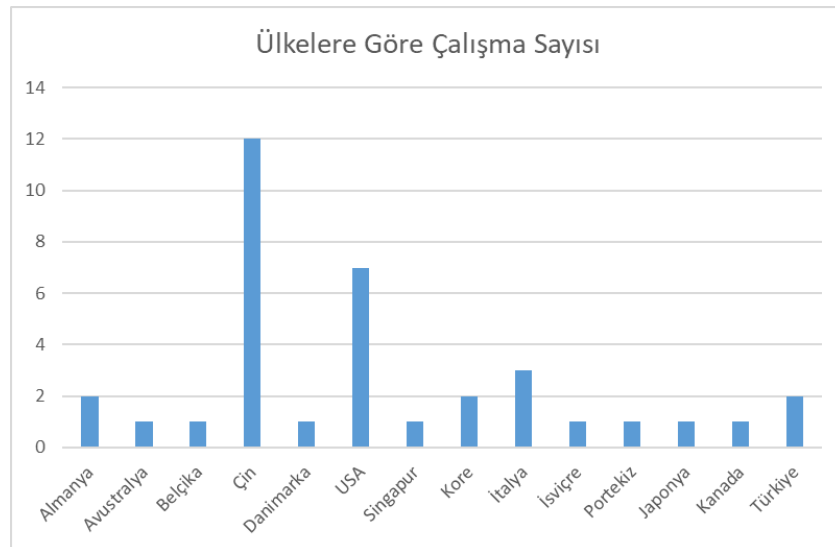
Çalışmaların yılları incelendiğinde, kullanılan kaynakların 2007 – 2022 yılları arası değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Çalışmaların güncel tarihli olması inşaat mühendisliğinde uygulanan sensör sistemlerinin halihazırda güncel olarak çalışıldığına işaret etmektedir. Tezde kullanılan çalışmaların yıllara göre dağılımı şekilde gösterilmektedir (Şekil 4.2.)



Şekil 4.2. Tezde kullanılan çalışmaların yıllara göre dağılımı

İncelenen çalışmaların kalite değerlendirmesi yapılacak olursa çalışmaların 32 tanesi SCI (Science Citation Index) indeksli Q1 ve Q2 dergilerde yayınlanmış makalelerden oluşmaktadır. Bu durum inşaat mühendisliğinde sensör tabanlı uygulamaların inşaat mühendisliğinin akademik tarafında araştırmacılar tarafından dikkate alındığını kanıtlar niteliktedir.

Son olarak tezde kullanılan çalışmaların ülke bazlı dağılımı incelendiğinde Çin (12) ve USA (6) olarak en fazla çalışmanın olduğu ülkelerdir. Ülkelerin gelişmişlik düzeyi teknoloji kullanım seviyesi ile doğru orantılı olması, Çin ve USA gibi ülkelerde inşaat mühendisliğinde sensör teknolojileri tabanlı çalışmaların daha fazla olmasının sebebi olarak yorumlanabilir. Çalışmaların ülkelere göre dağılımı şekilde gösterilmektedir (Şekil 4.3.).



Şekil 4. 3. Tezde incelenen çalışmaların ülkelere göre dağılımı

Bu tezde inşaat mühendisliği uygulamalarında sensör ve sensör tabanlı teknolojilerin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu uygulamalar elbette ki inşaat sektörüne katkı sağlamayı amaçlayan uygulamalardır. Uygulamaların sağlayabileceği katkıların tespit edilebilmesi için sektörün mevcut durumunu ve problemlerini tespit etmek gerekmektedir. Yapı kazaları ve inşaat iş kazaları ülkelere ve sektöre ekonomik ve can kaybı açısından büyük bir yük oluşturmaktadır. Bu bölümde iş kazalarının ve yapısal kazaların sebep olduğu sonuçlar ve bu kazaların önlenmesi için kullanılabilecek sensör tabanlı uygulamalar gösterilmektedir. Sensör ve sensör tabanlı uygulamaların inşaat sektörüne katkıları aşağıda;

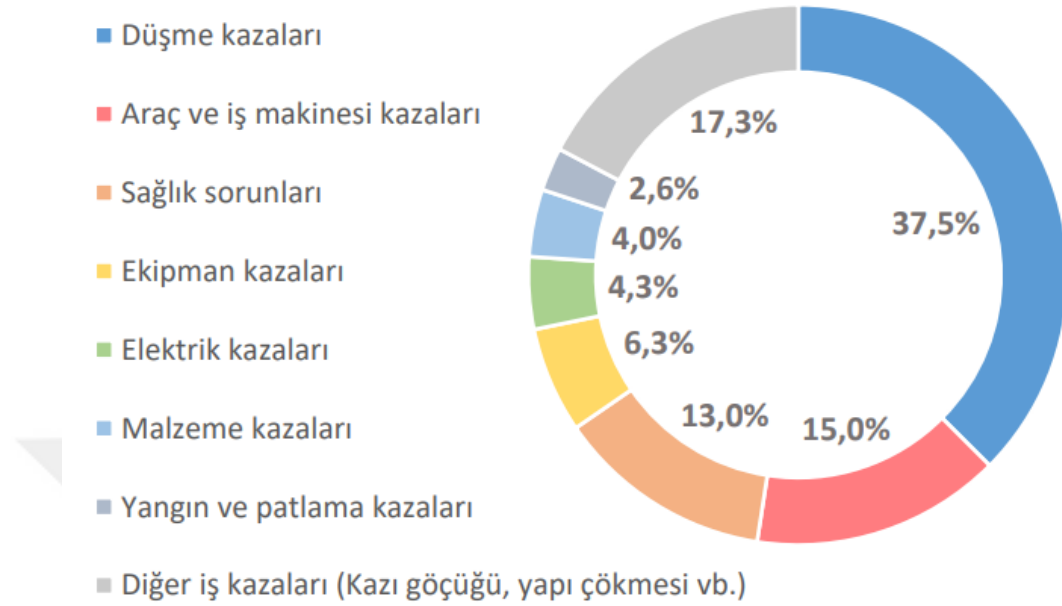
- Sensör tabanlı teknolojilerin iş sağlığı güvenliği alanında sağlayabileceği katkılar
- Sensör tabanlı teknolojilerin yapı sağlığı izleme alanında sağlayabileceği katkılar olarak iki başlıkta tartışılmıştır.

4.1. Sensör tabanlı teknolojilerin iş sağlığı güvenliği alanında sağlayabileceği katkılar

İş kazalarının önlenmesi için sensör tabanlı birçok güvenlik uygulamalarının üzerinde çalışılmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilebilecek faydanın tahmin edilebilmesi için mevcut iş kazası istatistikleri incelenmiştir. İş kazası 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununda “İşyerinde veya işin yürütümü nedeniyle meydana gelen, ölüme sebebiyet veren veya vücut bütünlüğünü ruhen ya da bedenlen engelli hâle getiren olay.” olarak tanımlanmaktadır. Türkiye’de 2020 yılında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının istatistikleri Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan dokümandan incelenmiştir. Bu dokümana göre 2020 yılında 44304 iş kazalı çalışan sayısı mevcut olup, 347 vatandaşımız iş kazası sonucu hayatını kaybetmiştir. İş kazalarında hayatını kaybedenlerin %57’si bina inşaatlarında %28’i bina dışı inşaatlarda %15’i ise özel inşaat faaliyetlerinde hayatını kaybetmiştir. Bina inşaatlarında yukarı yönlü hareketliliğin çok fazla olması, imalatların yukarı yönlü ilerlemesi diğer inşaatlara göre yüksekten düşme kazalarının daha fazla yaşanmasına sebep olmaktadır.

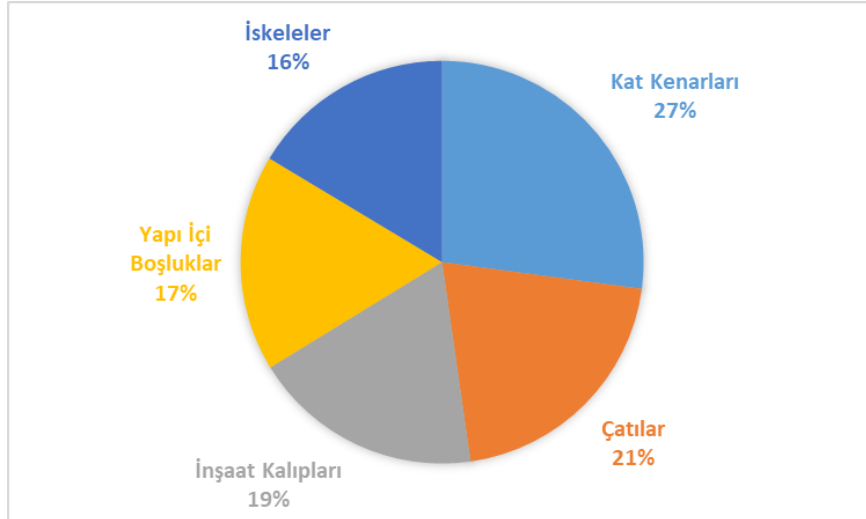
Paylaşılan istatistiklerde ölümlü iş kazalarının %37,5’u yüksekten düşme sonucu gerçekleşmiş olup bu oran en fazla can kaybına sebep olan kaza nedenini göstermekte olup 130 kişiye tekabül etmektedir. Diğer sebepler ise araç ve iş makinesi kazaları: %15, sağlık sorunları: %13, ekipman kazaları: %6,3, elektrik kazaları: %4,3, malzeme kazaları:

%4, yangın ve patlama: %2,6 ve diğer nedenler (Kazı göçüğü, yapı çökmesi,vb.): %17,3 olarak belirtilmiştir(*İnşaat sektörü iş kazası infografikleri*, 2022)(Şekil 4.1.1.).



Şekil 4.1.1. Ölümlü iş kazası nedenleri (*İnşaat sektörü iş kazası infografikleri*, 2022)

Yüksekten düşme ölümlü inşaat iş kazalarının en büyük nedeni olduğu istatistiklerden görülmektedir. İnşa aşamasında ki yapının farklı bölümlerinde veya farklı imalatlarda düşme riski altında çalışmalar yapılmaktadır. Yüksekten düşme kazalarının önlenmesi için şantiyelerde birtakım tedbirler alınsa da istatistikler yüksekten düşmenin en yüksek oranla inşaat iş kazalarında ölüme sebep olduğunu göstermektedir. Bu önlemlerden bazıları: yapı kat kenarlarına güvenlik ağlarının kurulması, yapı içi boşluklara korkuluklar, yüksekte çalışanlar için emniyet kemerleri, kaymaz tabanlı ayakkabılar, yüksekte çalışma eğitimleri, vb.dir.



Şekil 4.1.2. Yüksekten düşme kazalarının gerçekleştiği kısımlar

İstatistikler incelendiğinde yüksekten düşme kazalarının büyük çoğunluğu kat kenarlarından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.1.2.). Sensör tabanlı iş sağlığı güvenliği uygulamalarıyla iş kazalarının azaltılması üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. İş kazalarının sebeplerinden en başta koruyucu ekipmanların kullanılmaması gelmektedir. Bölüm 3.6.'da gösterildiği üzere şantiye girişinde kullanılan RFID tanımlayıcı sensörler ile personellerin kişisel koruyucu ekipmanlarını kullanıp kullanmadıkları tespit edilebilmektedir. Bir başka çalışmada da yüksekten düşme olayının hızlı tespiti ile erken müdahale imkânı sağlayan giyilebilir teknoloji geliştirilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda önlenebilecek iş kazalarından sağlanabilecek faydaların en başında iş ve işçi sağlığının korunması gelmektedir. Bununla birlikte iş kazalarının iş gücü kaybı ve iş kazasının şirketlere ekonomik etkisi düşünüldüğünde inşaat sektöründe büyük kayıplara da yola açmaktadır.

Bu kayıplardan doğrudan olanlar:

- Ödemeler ve tazminat (tedavi, vb.),
- Mahkeme masrafları,
- Tıbbi masraflar,

Dolaylı olanlar:

- İş gücü ve gün kaybı,
- İmalatın durması, yavaşlaması,
- Verimin azalması,
- Kalitenin düşmesi,
- Çalışanların olumsuz etkilenmesi,

- Yasal yükümlülükler ve sorumluluklar,
- Yeni işçi bulunup yetiştirilmesi,
- Tüm çalışanlarda motivasyon kaybı olarak sıralanabilir.

Doğrudan kayıplar, dolaylı kayıplara görece hesaplanması daha mümkün kayıplar olup, dolaylı kayıplar işin aksamamasından kaynaklanan maliyet artışları olduğundan hesaplaması oldukça güçtür. Araştırmacılar doğrudan ve dolaylı kayıpları buzdağı benzetmesiyle, doğrudan kayıpların buzdağının görünen yüzü olup toplam kayıpların 1/3' ini, dolaylı kayıpların ise 2/3'sini oluşturduğunu öne sürmektedir. Bazı çalışmalara göre ise dolaylı kayıpların doğrudan kayıpların 4- 10 katı kadar olabileceği de belirtilmiştir(Bekar ve ark., 2017; Koç & Akbıyık, 2011).

Akcay (2021) tarafından yapılan bir çalışmada iş kazasının şirkete maliyetleri araştırılmıştır. Bununla beraber iş kazasından doğan maliyetlerle iş sağlığı güvenliği önlemleri için harcanan maliyetler kıyaslanmış, proje bütçesine oranları gösterilmiştir. Çalışmada 7 farklı iş kazası meydana gelmiş şantiyenin şirkete iş kazası maliyetleri gösterilmiştir. Toplam kapalı alan ve iş kazası maliyetleri aşağıda ki tabloda gösterilmiştir (Tablo 4.1.1.).

Tablo 4.1.1. Toplam Kapalı Alan ve İş Kazası Maliyetleri (Akcay, 2021)

Vaka	İş Kazası Sayısı/Ölümlü kaza / Yaralanma	Toplam Kapalı Alan (m ²)	İş Kazası Maliyeti (TL)
1	3/1/2	28.000	950.000
2	19/0/20	95.596	1.750.000
3	1/0/1	10.000	36.000
4	1/0/1	6.000	25.000
5	5/0/5	40.000	122.750
6	1/0/1	4.000	160.000
7	2/0/2	3.250	171.000

Görüldüğü üzere iş kazalarının şirketlere ve dolayısıyla ülke ekonomisine etkisi oldukça fazladır. Görülen değerler iş kazalarının doğrudan maliyetleri olup, dolaylı maliyetlerin 4-10 kat arasında olduğu varsayıldığında maliyetlerin ciddi boyutlara ulaştığı görülmektedir. İş kazalarının toplam maliyetlerini hesaplamak pek mümkün

olmamaktadır. Nedeni ise iş kazası sonucu yaralanmanın boyutu, tedavi çeşidi, çalışılmayacak gün sayısı, vb. kriterler maliyeti etkilediğinden genelleme yapılması pek mümkün olmamaktadır. Her ne kadar iş sağlığı güvenliği önlemleri alınsa da iş kazalarının gerçekleştiği görülmektedir. Şantiyelerin dinamik çalışma alanları olması, kontrol edilmesinin güç olması, inşaat sektörü çalışanlarının eğitim seviyelerinin düşük olması gibi sebepler iş kazalarının önlenmesi için alınan önlemlerin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Sensörler ortamları sürekli olarak ölçebildiğinden şantiye ortamında takibi kolaylaştırmakta, gerçek zamanlı veri elde etmeyi sağlamaktadır.

Sensör tabanlı iş sağlığı güvenliği uygulamaları iş kazalarından doğacak kayıpları sıfırlamak veya en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu tezde iş sağlığı güvenliğinde sürekli denetimi sağlamak kayıpları en aza indirmek amacıyla sensör tabanlı birtakım uygulamalar gösterilmiştir. Aşağıda ki tablo da uygulama çeşidi ve önlem eşleştirmesi görülmektedir (Tablo 4.1.2.).

Tablo 4.1.2. Sensör Uygulamaları ve İş Sağlığı Takibi

Sensör Tipi	İş Kazası Tipi	Uygulama	Kaynak
RFID	Araç ve iş makinesi kazaları	Makine -makine, makine – personel çarpışmalarını önlemek amacıyla geliştirilen uyarı sistemi	(Teizer ve ark., 2010)
RFID	KKD eksikliğinden kaynaklanan kazalar	Şantiye giriş bölgesinde KKD'lerin otomatik kontrolü	(Kelm ve ark., 2013)
Giyilebilir Sensör (İvmeölçer)	Yüksekten düşme	Yüksekten düşme kazalarına erken müdahale için düşme tespiti ve otomatik uyarı sistemi	(Doğan, 2019)
Giyilebilir Sensör (Basınç Sensörü)	Meslek hastalıkları	Çalışma pozisyonlarının ayak	(Antwi-Afari ve ark., 2018)

		tabanında oluşturduğu basınçla uzun süreli meslek hastalıklarının önlenmesi	
Giyilebilir sensörler (Akıllı saat)	Yüksekten düşme ve diğer iş kazaları	Kalp ritmi, vücut sıcaklığı ölçümleri neticesinde çalışanların psikolojik durumlarının tespiti	(Guo ve ark., 2017)
RFID	Araç ve iş makinesi kazaları	Makine ekipman ve personel çarpışmalarının önlenmesi için uyarı sistemi	(Chae & Yoshida, 2010)
Giyilebilir Teknolojiler (Basınç Sensörü)	Düşme, yüksekten düşme	İşçilerin denge kaybı olayının nedeninin otomatik takibi ve tespiti	(Antwi-Afari, Li, Seo, vd., 2018)
UWB (Ultra-wide Band)	Malzeme düşmesi, elektrik kazaları, yüksekten düşme	Şantiye içerisinde riskli alanların tespiti ve kaza önleme uyarı sistemleri	(Carbonari ve ark., 2011)
Ultrasound	Yüksekten düşme	Yüksekten düşmenin engellenmesi için uyarı oluşturan tespit sistemi	(Lee ve ark., 2009)

İncelenen çalışmalarda maliyetler hakkında herhangi bir veri paylaşılmadığından iş kazalarının önlenmesinden doğacak faydaların sensör sistemleriyle kıyaslanması yapılamamıştır. Fakat özellikle RFID gibi sistemler maliyet yönünden avantajlarıyla

bilinmektedir. İş kazalarından doğacak maliyetler çok yüksek olduğundan, uygulanacak sensör sistemlerinin büyük kazançlar sağlayacağı düşünülmektedir.

4.2. Sensör tabanlı teknolojilerin yapı sağlığı izleme alanında sağlayabileceği katkılar

Betonarme yapıların tamamen veya kısmen kullanılmaz hale gelmesinde (çökme, yıkılma, vb.) çeşitli faktörler etkilidir. Betonarme yapıların hasar görme sebeplerinden bazıları:

- Tasarım sürecinde şartname ve yönetmeliklere uygun olmayan tasarım (Düzensizlikler, yumuşak kat etkisi, kısa kolon etkisi, vb.),
- Deprem dayanıklılığının yetersiz olması,
- Tasarım sürecinde çevresel etkilerin dikkate alınmaması (zeminin sülfat içeriği, donma çözünme, yangın, aşınma, olaylarının dikkate alınmaması),
- İmalat sürecinde yapılan hatalar,
- Yetersiz kalite kontrolü,
- Uygun malzemelerin seçilmemesi (korozyonun dikkate alınmaması),
- Betonda kürleme işleminin eksik yapılması veya hiç yapılmaması olarak sıralanabilir.

Altyapı ve üst yapılarda meydana gelen hasarlar yapıların kısmen veya tamamen yıkılmasına, ölümlere ve büyük maddi kayıplara yol açmaktadır. Bu açıdan yapıların sürekli takip (yapı sağlığının izlenmesi) edilmesi bu kazaların önüne geçmekte büyük rol oynayacaktır. Sensörler ile yapı sağlığının izlenmesinden doğabilecek faydaların tespit edilebilmesi için akademik kaynaklardan yapılarda meydana gelen hasarlar, tamamen veya kısmi göçmelerin sebeplerinin tespiti üzerine veriler toplanmış ve bunların hangi tip sensörlerle önlenebileceği üzerine tespitlerde bulunulmuştur.

Tablo 4.2.1. Çeşitli yapılarda meydana gelen kısmi veya tamamen yıkılma durumları, sebepleri ve sonuçları

Yapı Adı	Kaza Nedeni	Ölüm / Yaralanma Sayısı	Kaynak
Silver Bridge, USA (1928-1967)	Korozyon	46 Ölüm	(Morgese ve ark., 2020)
Polcevera Viyadüğü, İtalya (2018)	Köprü halatlarında korozyon ve yorulma	51 Ölüm	(Morgese ve ark., 2020)
I -35W Köprüsü, USA (2007)	Ana kirişler, döşeme kirişleri, çapraz kirişlerde kesit kayıpları, Korozyon	13 Ölüm, 145 Yaralanma	(Morgese ve ark., 2020)
Mainus River Köprüsü, İngiltere (1983)	Yetersiz kontrol, yetersiz drenaj, çatlaklar	3 Ölüm	(Morgese ve ark., 2020)
Brumadinho barajı, Brezilya (2019)	Sızıntı ve sonucu olarak zeminde sıvılaşma	259 ölüm, 11 kayıp	(Silva Rotta ve ark., 2020)
Situ Gintung barajı, Endonezya (2009)	Sızıntı ve çatlaklar sonucu yıkılma	-	(Nabilah ve ark., 2020)
Çaycuma köprüsü, Türkiye (2012)	Köprü ayağında oyulma, oyulma sonucunda oturma ve dönme olayı sonucu yıkılma	15 ölüm	(Schaap & Caner, 2020)

2006 yılında yapılan bir çalışmada Kore de yapımı esnasında çökmüş Hang-ju Grand Bridge isimli eğik askılı köprünün çökme sebepleri Reliability- based assesment metoduyla araştırılmıştır. Araştırmacılar bu metot ile yapılarda yer alan belirsizlikler ve arızaları ele alarak, en kritik arıza senaryosunu belirlemek için çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda 155 farklı kritik arıza senaryosu ortaya çıkmış ve çelik kabloların kopması senaryosu da bunlardan bir tanesidir. Çalışma sonucunda çelik kabloların çökmesi senaryosu gerçekleşme ihtimali yüksek senaryolardan bir tanesi olarak

belirtilmiştir (Choi ve ark., 2006). Kazanın çalışma saatleri dışında gerçekleşmesi, herhangi bir ölüme sebep olmamasını sağlasa da ekonomik olarak büyük problemlere sebep olması kaçınılmazdır. Köprüde yaşanan kazanın sebeplerinden olan kablo ile alakalı problemler, geliştirilen fiber optik sensör teknolojisi ile engellenebilecek ve kazanın sebep olduğu ekonomik yükün çok daha az değerine sorun takip edilebilecektir.

Hindistan hükümetinin yayınladığı rapora göre Hindistan’da 2001 – 2015 yılları arasında ortalama günlük 7 kişinin yapıların yıkılmasından dolayı hayatını kaybettiği belirtilmektedir. Bu denli yüksek ölümlerin sebeplerinden en başta konut yapılarının yıkılması gelmekte, devamında ticari yapılar, köprüler, barajlar seyretmektedir(DUBBUDU, 2019).

Schaap & Caner tarafından yapılan bir çalışmada Türkiye’de 2000- 2019 yılları arasında yıkılan köprülerin istatistikleri ve yıkılma nedenleri tartışılmıştır. Çalışmada 87 farklı tamamen veya kısmen yıkılma durumu incelenmiş ve sebeplerin %45 hidrolik (zeminde aşınma (yoğun yağış veya akıntı sonucu)), %20 çarpışma veya kaza (Ağır vasıtaların çarpması), %9 aşırı yükleme, %8 yapı hataları olduğu belirtilmiştir(Schaap & Caner, 2020).

Yukarıda gösterilen yapılarda meydana gelen kazaların yıkıcı etkileri ölüm ve yaralanma oranlarından anlaşılmaktadır. Yapısal sağlığın izlenmesi bu kazaların önüne geçilmesi hususunda önem arz etmektedir. Sensör teknolojisi ile yapısal sağlık takibi gerçek zamanlı verilerle daha güvenli ve doğru olarak gerçekleştirilmektedir. Bu tezde sensör ve sensör tabanlı teknolojiler ile birtakım yapısal sağlık takibi uygulamaları gösterilmiştir. Bu uygulamalar aşağıda ki tabloda gösterilmektedir (Tablo 4.2.2.).

Tablo 4.2.2. Sensör tabanlı yapısal sağlık izleme uygulamaları

Sensör ve sensör tabanlı teknolojiler	Uygulama	Kaynak
Fiber optik sensör	Çelik kablolarda ki gerilmelerin tespiti (öngerilmeli betonarme elemanlar, asma köprü halatları)	(Yao ve ark., 2021)
Nem Sensörü	Köprülerin betonarme elemanlarının korozyondan önlenmesi ve bakım onarım vakitlerinin tespiti için membran altı uygulama	(Nielsen & Sørensen, 2010)

Fiber optik sensör (SOFO)	Prekast elemanların yapısal sağlığının (üretimden kullanımı boyunca gerilme değişimi ve kayıpları) takibi	(Uva ve ark., 2014)
Fiber optik sensörler	Toprak ve zemin kaymaları, Zemin ve temellerde oturmalar	(Zheng ve ark., 2020)
Fiber optik sensörler	Demiryolu raylarında oturmalar, Balast yorulması, Demiryolunda yanıl yer değıştirme, düşey deformasyonlar, Zemin titreşimleri, Balast yanıl yer değıştirme	(Du ve ark., 2020) (Derleme)
RFID	Betonarme yapılarda korozyon takibi ve tespiti	(Leon-Salas & Halmen, 2016)
Fiber optik sensörler	Betonarme yapılarda korozyon takibi ve tespiti	(Ramani & Kuang, 2021)
Sıcaklık Sensörü	Betonun erken dayanımının ve kütleme takibi	(Barroca ve ark., 2013)
İvmeölçer Sensörü	Yüksek katlı yapıların deprem davranışlarının tespiti ve takibi	(Gümüş, 2021)
İvmeölçer Sensörü	Tarihi yığma yapının deprem ve çevresel titreşimlere verdiği tepkiler ve uzun dönem yapı sağlığı izlenmesi	(Tronci ve ark., 2020)
İvmeölçer Sensörü	Çelik köprülerde titreşim frekanslarının takibi ve yapısal sağlık izleme	(Maes ve ark., 2022)
Piezoelektrik Sensör	Betonun erken dayanımının ve dayanım kazanma sürecinin izlenmesi	(Chen ve ark., 2016)
RFID	Yapılarda çatlakların ilerlemesinin takibi	(Caizzone & DiGiampaolo, 2015)
GPS	Köprülerde düşey yer değıştirmelerin takibi	(Yi vd., 2013)

GPS	Yüksek yapıların sıcaklık ve rüzgâr altında yer değiştirmelerinin takibi	(Breuer ve ark., 2008)
Kendiliğinden algılayabilen beton	Betonarme yapılarda hasar izleme, hasar konumun tespiti	(Gupta ve ark., 2021)

ABD otoyol idaresinin paylaştığı raporda Amerika’da otoyol köprülerinde ki korozyonların doğrudan maliyeti yıllık 8.29 milyar dolara mal olmakla beraber, tamirat için trafikteki gecikmeler ve diğer doğrudan olmayan etkiler düşünüldüğünde çok daha yüksek maliyetlere sebep olmaktadır(Leon-Salas & Halmen, 2016)(SASTRI, 2015). Bununlar beraber yukarıda paylaşılan yapı kazalarından bir kısmının korozyon sebebiyle gerçekleştiği görülmektedir. Korozyon sebebiyle oluşan hasarlar ölümcül sonuçlar doğurmakta ve yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Sensör tabanlı hasar vermeden yapılacak takipler, korozyonun erken tespitini ve erken müdahaleyi sağlayarak büyük ekonomik kazançlar sağlayacaktır.

Tablo 4.2.2.’ de paylaşılan hasar nedenlerinden korozyon, kesit kayıpları, çelik kablolarda ki gerilmeler, çatlaklar ve çatlak kaynaklı sızıntılar çeşitli sensör uygulamalarıyla takip edilebilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu uygulamalar başta yapıların tamamen veya kısmen yıkılması, hasar alması gibi durumlardan doğacak can ve mal kayıplarını en aza indirerek ülke ve dünya ekonomisine büyük kazançlar sağlayacaktır. Özellikle baraj ve köprü gibi büyük yapılarda betonun nem ve sıcaklık değerinin takip edilebilmesi yapı sağlığının takibi açısından önem arz etmektedir. Beton hidratasyonu takip edilerek ve oluşabilecek çatlaklar hakkında fikir sahibi olarak betonun kalitesini artırmak mümkün hale gelmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, son zamanlarda inşaat mühendisliği uygulamalarında en yenilikçi yaklaşımlardan olan sensör ve sensör tabanlı teknolojiler incelenmiş ve potansiyel faydaları tartışılmıştır. 11 farklı sensör ile yapılan farklı uygulamalar yapısal sağlık izleme ve iş sağlığı güvenliği üzerine yapılan çalışmalar olarak iki bölümde incelenmiştir. Çalışmada, inşaat mühendisliğinde sensör uygulamaları ile ilgili 36 farklı akademik çalışmanın 25 adeti vaka çalışmasından oluşmaktadır ve bu tezde bütün detayları gösterilmiştir. Ayrıca çalışmaların çoğunlukla etki faktörü yüksek dergilerde yayınlanmış çalışmalar olması, çalışmaların güncel tarihli olması, konunun önemine işaret etmektedir. Ortamda ki sıcaklık, kuvvet, basınç, gerilme gibi fiziksel değişimleri tespit etmeye yarayan sensörler, endüstriyel üretimlerde birçok sektörde halihazırda kullanılmaktadır. Özellikle endüstri 4.0 kavramıyla birlikte otomasyon sistemlerinde ki gelişmeler, sürekli takip edilmesi güç değişkenleri otomatik olarak takip etmek amacıyla sensör sistemlerinin önem kazanmasını sağlamıştır. Endüstri 4.0 ile birlikte ortaya çıkan inşaat 4.0 kavramı da diğer sektörlerde gelişen teknolojilerin inşaat sektöründe de gelişmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmasını sağlamaktadır. Bu dönemde yapı bilgi modellemesi, 3D printing, robotlar, yapay zekâ ve nesnelerin interneti teknolojileri ile birlikte sensör teknolojileri de önem kazanmış ve akademik çalışmaların bir kolunun bu yöne eğilim göstermesini sağlamıştır. İnşaat sektörünün ülkemize, dünya ekonomisine ve çevreye etkisi oldukça fazladır. Dolayısıyla inşaat sektöründe yapılacak iyileştirmeler, ülkemiz özelinde ve dünya genelinde fazla miktarda sermayenin kaybolmasını engelleyecektir. İnşaat sektöründe iş sağlığı, iş güvenliği ve yapı sağlığı takibi problemlerinin inşaat sektörüne maliyet açısından büyük kayıplar doğurduğu bilinmektedir.

Son yıllarda gelişen teknolojiler inşaat sektörünün de gelişmesini sağlamış ve araştırmacıların çeşitli teknolojilerin inşaat sektöründe kullanılması üzerine yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Bu teknolojilerden bir tanesi olan sensör teknolojileri de iş sağlığı, iş güvenliği ve yapı sağlığı izleme uygulamaları için üzerinde çalışılan teknolojilerdendir. Buz tezde fiber optik, sıcaklık, ivmeölçer, WLAN, GPS, RFID, Piezoelektrik, UWB (Ultra wide band), Ultrasound (Ultrason), Self- Sensing ve giyilebilir sensör teknolojileri ile yapı sağlığı izleme ve iş sağlığı güvenliği uygulamaları incelenmiştir.

Çalışmaların incelenmesi ve derlenmesi neticesinde aşağıdaki sonuçlar ve öneriler sunulmuştur:

1. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TDBY 2018) göre, bina toplam yüksekliği 105 metreden fazla olan binalar için gerçek zamanlı yapı sağlığı izleme sistemi kurulması gerekmektedir. Yapı sağlığı izleme sistemi Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın 2020 yılında yayınladığı yönergeye göre uygulanmaktadır. Bu sistem ivme ölçer ve GPS sensör sistemlerinden oluşmaktadır. Yüksek binaların doğal titreşimler ve deprem esnasında ivme ölçer sensörleri ile ivme ölçümleri ile binanın dinamik davranışı gerçek zamanlı olarak takip edilerek, depremden sonra yapının güvenliğini tehdit edecek düzeyde hasar oluşup oluşmadığının tespit edilmesi amaçlanmıştır. 2020 yılında yayınlanan Türkiye Köprü Deprem Yönetmeliği incelendiğinde köprüler ve viyadükler için yapı sağlığı izleme sistemleri ile ilgili bir ibare görülememiştir. İş ve yapı kazaları, ekonomi ve can kaybı açısından geri dönülemez sonuçlara sebep olmaktadır. Örneğin, Türkiye'de Çaycuma köprüsünün yıkılması sonucu 15 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu çalışmada köprü ve viyadüklerin yapı sağlığının izlenmesi üzerine GPS, fiber optik ve ivme ölçer sensörleri ile yapılan çalışmalar sunulmuştur. Köprü ve viyadüklerinin yapı sağlığının izlenmesi için bu çalışmada sunulan sensörler ile yapılabilecekler:

- Asma köprülerde köprü halatlarına düşen gerilmeler fiber optik sensörlerle halat boyunca veya belirli bölgelerde ölçülerek köprü halatlarından kaynaklanacak yapı kazaları önlenmiş olacaktır.
- Viyadük elemanlarından ön gerilmeli olan betonarme elemanlarda gerilme halatlarının üretim, taşıma, montaj ve kullanımı sırasında oluşan gerilme kayıpları ve değişimleri fiber optik sensörlerle takip edilebilir.
- Özellikle servise açılmasının üzerinden uzun zaman geçmiş köprülerin tabliyelerinin yoğun trafik ve deprem gibi dinamik yükler altında dinamik davranışları GPS ve ivme ölçer sensörleri ile takip edilebilir.
- Kendinden algılama ve elektriksel direnç tomografisi yöntemiyle köprülerin ve viyadüklerin betonarme kısımlarında kullanılacak karbon fiber ve nanotüp gibi fiber katkılar sayesinde oluşan çatlaklar gözlemlenebilir.
- RFID veya fiber optik sensörler ile köprü ve viyadüklerin betonarme kısımlarında korozyon ve korozyona bağlı çatlaklar takip edilebilir.

2. Son yıllarda gelişen fiber optik sensör teknolojisi dış etkenlere dayanıklılık, yüksek ölçüm hassasiyeti ve doğruluğu, hafifliği, gibi avantajları sayesinde araştırmacıların yöneldiği sistemlerdir.

- Araştırma sonucunda fiber optik sensörlerin asma köprülerin köprü halatlarında, ön gerilmeli elemanların gergi halatlarında ki gerilmelerin tespit edilmesinde, betonarme elemanların korozyon tespitinde, demiryollarında ve zeminlerde oturmaların tespitinde kullanılmasına yönelik çalışmaların mevcut olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber kendi içerisinde çeşitlere ayrılan fiber optik sensörlerden, dağınık fiber optik sensörlerin tercih edilmesi maliyet, ölçüm doğruluğu ve uygulama kolaylığı açısından daha avantajlı olmaktadır. Dolayısıyla çalışmaların dağınık fiber optik sensörler tarafına yönelmesi avantajlı olacaktır. Fiber optik sensörler tek bir fiber optik kablo üzerinden birden fazla ölçüm alabilmesi yönünden diğer sensör sistemlerinden avantajlı kabul edilebilir. Örneğin bir yapının farklı bölümlerinde oluşan gerilmelerin takip edilebilmesi için birden çok sayıda gerinim ölçer kullanmak yerine tek bir fiber optik sensör sistemiyle birden fazla noktadan ölçüm alınabilir.

3. Ülkemizde yapı denetim firmaları tarafından kullanılması zorunlu olan EBİS (Elektronik Beton İzleme Sistemi) ile betonun kalite kontrolünün takip edilebilir olması sağlanmıştır. Bu kapsamda yapı denetim firmaları beton dökümü esnasında betonun içerisine RFID etiketlerinden yerleştirmekte ve kırım ve sonuçlar merkezi bir sistemden takip edilmektedir. Betonun kalite kontrolünün laboratuvar ortamından daha çok gerçek ortamda da takip edilebilmesi için RFID tabanlı nem ve sıcaklık ölçen sistemlerin sahada yerinde kullanılarak kürlenmenin takip edilebilmesi de mümkündür. Ayrıca betonda olgunluk prensibiyle betonun sıcaklığı ve dayanım kazanmasında ki ilişkiye bağlı olarak ölçüm yapılarak dayanım tahmini ile EBİS'e benzer şekilde verilerin nesnelerin interneti yöntemiyle internet üzerinden takip edilmesini sağlayacak bir sistemle betonun kalite kontrolünün iyileştirilebileceği aynı zamanda şantiye yöneticilerinin betonun dayanım kazanım sürecini takip ederek gerçek zamanlı planlama yapabilmesini sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle yağışlı ve soğuk bölgelerde priz alma sürelerinin sıcaklık ve nem değerlerinin ölçülerek takip edilmesi ile gerçek zamanlı veriler üzerinden takip ve yönetimin faydalı olacağı düşünülmektedir. Önerilen sistem için kullanılabilecek sensör tabanlı teknolojiler:

- Beton döküldükten sonra oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu dayanım kazanmaya başlar ve bu reaksiyonlar sonucu ısı açığa çıkar. Sıcaklık ve nem sensörleri betonun içerisinde ölçüm yaparak sıcaklık verilerini alabilmektedir. Bu sayede betonun olgunluk seviyesi tespit edilmektedir. Betonun olgunluk seviyesi ile dayanımı arasında ki ilişki ispatlanmış olup, sıcaklık verileri sonucu dayanım tahmini yapılabilir.
 - Betonun içerisinde gömülü olarak kullanılacak piezoelektrik sensörler titreşim dalgaları oluşturup okuyabilirler. Betonun içerisine yerleştirilecek bu sensörlerin oluşturduğu dalgaların dalga boyu beton dayanım kazandıkça azalmaktadır. Dalga boyu ile dayanım kazanma arasında ki ilişkiye bağlı olarak dayanım tahmini yapılabilir.
 - RFID entegre edilmiş nem sensörlerinin betonda kullanımı üzerine bir çalışma bu tezde gösterilmiştir. Bununla beraber RFID ile sıcaklık ölçümünün yapılabileceği de tespitler arasındadır. RFID etiketlerin sıcaklık ölçümünde kullanılması verilerin çok düşük enerji ve maliyet ile tespit edilmesine olanak sağlayacaktır. Alınan bu veriler beton dayanım tahmininde kullanılarak hasarsız tespit yöntemi geliştirilebilecek ve ayrıca proje yöneticilerinin planlama yapmasında kolaylık sağlayabilecektir.
 - Betonun sıcaklığının takip edilmesi için gömülü olarak kullanılan sıcaklık sensörleri betonun nemli ortamından dolayı bozulmaktadır. Kullanılacak sensörlerin koruyucu kaplama ile kaplanması veya kabloların uzatılarak işlemcilerin betonun dışında kalması bu soruna çözüm olabilecektir.
4. İnşaat işleri çok tehlikeli işler sınıfında olup iş kazası sayıları oldukça yüksektir. 2020 yılında Türkiye’de inşaat sektöründen gerçekleşen iş kazalarında 347 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu istatistik iş ve yapı kazalarının önlenmesinin önemini ispatlar niteliktedir. Ölümlü iş kazalarının gerçekleşme biçimleri incelendiğinde yüksekte düşme ve araç ve iş makinesi kazaları en başta gelmektedir. Şantiye sahaları genellikle geniş alana sahip olması, dinamik olması ve çalışan sayısının fazla olması sebebiyle kontrol edilmesi güçtür. Çalışanların psikolojik ve fiziksel durumları, işyerinin yetersiz veya hatalı organizasyonu, kontrol ve takip eksikliği, iş yerinde kullanılan makine ve teçhizatın bakım ve kontrollerinin yapılmaması, KKD’lerin temin edilmemesi veya çalışanlar tarafından kullanılmaması iş kazalarına sebep olmaktadır. Bu çalışmada detayları gösterilen sensörlerden bir

kısmı inşaat işlerinde iş ve işçi sağlığının yönetilmesinde, kontrol ve takibinde kolaylık sağlayacak ve iş kazalarının önlenmesini sağlayacaktır.

- RFID sistemleri şantiye alanı girişinde önceden tanımlanmış etiketler sayesinde yetkili olmayan kişilerin girmemesi için tespit edilmesini sağlayacaktır.
- RFID sistemleri ile, KKD'lere yerleştirilen RFID etiketleri sayesinde şantiye alanı girişinde veya antenlerin ölçüm yapabileceği belirli bölgelerde işçilerin ilgili donanımları kullanıp kullanılmadığı tespit edilebilecektir.
- Giyilebilir teknolojiler sayesinde işçilerin tansiyon, nabız ve vücut sıcaklığı gibi fiziksel durumları tespit edilebilmektedir. Örneğin yüksekte çalışacak işçilere uygulanacak giyilebilir sensörler ile işçilerin tansiyon ve nabız verileri izlenebilir, bu veriler değerlendirilerek anormallik durumunda çalışmaya başlamadan önce veya çalışma esnasında önlemler alınabilir. Araç ve iş makinesi operatörlerinin de işe başlamadan veya devam ederken sürekli tansiyon ve nabız ölçümlerinin alınması da olası iş kazalarına gerçekleşmeden müdahale imkanı sağlayacaktır.
- RFID etiket ve okuyucuların iş makineleri ve işçilere uygulanması ile çarpışma önleme sistemleri kurulabilecektir. Bu yöntem birbirleri ile belirli bir mesafede yaklaşan iş makineleri ve çalışanlar sesli ve görsel alarm oluşturularak çarpışmaların önlenmesini sağlamaktadır.
- Ultrasonik sensörler ile belirli bir bölgeye yaklaşan herhangi bir cisim tespit edilebilmektedir. Yüksekten düşme olaylarının önlenmesi için kat boşluklarına ve kat kenarlarına uygulanarak bu bölgelere yaklaşan işçilerin uyarılmasını sağlamaktadır. RFID sistemlerine göre daha az bileşene sahip olması ve kullanımının daha kolay olması sebebiyle tercih edilebilir.
- Çalışma şekillerinden kaynaklanan meslek hastalıklarının önlenmesi için şantiye içerisinde uzun süre eğilerek, çömelerek veya uygun olmayan çalışma biçimlerinin tespit edilerek önlem alınması için giyilebilir basınç sensörleri kullanılabileceği görülmüştür.
- Sensörlerle oluşturulacak sensör tabanlı iş ve işçi sağlığı yönetimi sistemleri, gerçek zamanlı veriler toplayacağından iş kazaları henüz

gerçekleşmeden önlem alınmasını sağlayacağı gibi geçmişe yönelik verilerin değerlendirilmesi ile geleceğe yönelik kazaların önlenmesini de sağlayacaktır. Örneğin giyilebilir basınç sensörleri denge kaybı ve sonucu olarak düşme olaylarının tahmin edilmesinde veri toplanması amacıyla kullanılmaktadır. Tespit edilen denge kaybı olayının nedenleri şantiye ortamında araştırılarak önlenebilecektir.

- İnşaat sektörü çalışanlarının eğitim seviyelerinin düşük olması ve inşaat işlerinin çok tehlikeli işler sınıfında olması çalışanların fevri hareketlerinin iş kazaları ile sonuçlanması ve şirketlere hukuki ve mali sorumluluklar doğurmasına sebep olmaktadır. KKD'lerin kullanılıp kullanılmadığı, RFID ile iş makinelerinin ve ekipmanlarının yetkisiz kişiler tarafından kullanılmasının tespiti gibi veriler sensörlerle alınabilecek ve şirketlerin bu noktada kazaların gerçekleşme biçiminin tespit etmesi ile mali ve hukuki sorumluluklarını azaltabilecektir.
- Sensör sistemleri ile şirketlerin personel hatalarından ve fevri davranışlardan kaynaklanan iş kazaların getirdiği mali ve hukuki sorumluluklarının azaltılabilmesi için 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na güvenilirliği çalışmalarla ispatlanmış sensör tabanlı iş sağlığı güvenliği uygulamalarının madde olarak eklenmesi gerekmektedir. Sensör tabanlı uygulamalar ancak bu şekilde mali ve hukuki sorumlulukları azaltabilecektir. Şantiye alanında kullanılacak sensör uygulamaları hakkında uygulama yönergeleri oluşturulmalı, ilgili personellere konu hakkında eğitimler verilmelidir.

Bu tez çalışmasında RFID, UWB, Ultrasound, WLAN ve giyilebilir sensör tabanlı teknolojiler ile iş sağlığı güvenliğinin iyileştirilmesi üzerine birçok çalışma gösterilmiştir. Türkiye'de inşaat sektöründe gerçekleşen kazaların sonuçları paylaşılmış olup yüksek seviyede can kaybı ve yaralanmalara sebep olmaktadır. Bu sensörlerle arttırılacak güvenlik önlemleri sayesinde iş kazaları azaltılacak ülkemiz inşaat sektörüne ve ülke ekonomisine olan etkisi azaltılacaktır. Ayrıca, fiber optik, ivme ölçer, sıcaklık, piezoelektrik, kendinden algılayabilen beton köprü, baraj, tünel, demiryolları gibi altyapılar ve konutlar sensörler sayesinde gerçek zamanlı takip edilecek ve önlemler alınabilecek ve yapı kazaları önlenebilecektir.

KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2020). *Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Uygulama Yönergesi*.
https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/Mevzuat/Yonergeler/Bakan_Onayli_YSIS_Yonergesi_1_.pdf
- Akçay, C. (2021). İNŞAAT SEKTÖRÜNDE İŞ KAZALARI VE İŞ GÜVENLİĞİ MALİYETLERİNİN İNCELENMESİ. *ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 328–336.
- Alfredo, J. G., & Sierra-Pérez. (2013). Fiber Optics Sensors. İçinde *New Trends in Structural Health Monitoring* (s. pp 265-316).
https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1390-5_5
- Anonim, URL-1. Tarihinde 18 Aralık 2021, adresinden erişildi
<https://www.rfparts.com/2450.html>
- Anonim, URL-2. Tarihinde 18 Aralık 2021, adresinden erişildi <https://epci.eu/non-linear-resistors/>
- Anonim, URL-3. Tarihinde 18 Aralık 2021, adresinden erişildi <https://tr.dhgate.com>
- Anonim, URL-4. Tarihinde 18 Aralık 2021, adresinden erişildi
<https://www.elektrikde.com>
- Anonim, URL-5. Tarihinde 15 Mayıs 2022, adresinden erişildi
<https://www.zekiyildirim.com.tr/ebis-elektronik-beton-izleme-sistemi-nedir-cipli-beton-nedir>
- Anonim, URL-6. Tarihinde 19 Nisan 2022, adresinden erişildi <https://www.mcu-turkey.com/hc-sr04-ultrasonic-sensor-ile-cisim-algilama-ve-mesafe-olcumu/>
- Anonim, URL-7. Tarihinde 18 Nisan 2022, adresinden erişildi
<https://riverglennapts.com/tr/transducer/881-piezoelectric-transducer.html>
- Anonim, URL-8. Tarihinde 18 Nisan 2022, adresinden erişildi
<https://www.fabtolab.com/piezoelectric-transducer-soldered>
- Antwi-Afari, M. F., Li, H., Seo, J. O., & Wong, A. Y. L. (2018). Automated detection and classification of construction workers' loss of balance events using wearable insole pressure sensors. *Automation in Construction*, 96(July), 189–199.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.09.010>
- Antwi-Afari, M. F., Li, H., Yu, Y., & Kong, L. (2018). Wearable insole pressure system for automated detection and classification of awkward working postures in construction workers. *Automation in Construction*, 96, 433–441.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.004>
- Asadzadeh, A., Arashpour, M., Li, H., Ngo, T., Bab-Hadiashar, A., & Rashidi, A. (2020). Sensor-based safety management. İçinde *Automation in Construction* (C. 113, s. 103128). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103128>
- Awolusi, I., Marks, E., & Hallowell, M. (2018). Automation in Construction Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending : Review of applicable devices. *Automation in Construction*, 85(October 2017), 96–106.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.010>
- Babu, S. S., Raha, A., Biswas, U., & Naskar, M. K. (2013). HelloMsgC: A Practical Implementation of Hello Message Protocol in Wireless Sensor Network. *Procedia Technology*, 10, 546–553. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.394>
- Barroca, N., Borges, L. M., Velez, F. J., Monteiro, F., Górski, M., & Castro-Gomes, J. (2013). Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures. *Construction and Building Materials*, 40, 1156–1166.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.087>

- Bekar, İ., Oruç, D., & Bekar, E. (2017). İş Kazası ve Meslek Hastalıklarının Maliyeti (2005-2014). *ULUSLARARASI EKONOMİK ARAŞTIRMALAR DERGİSİ*, 3(3).
- Block, I. (2018). *Robots complete span of 3D-printed bridge for Amsterdam canal*. [https://www.dezeen.com/2018/04/17/mx3d-3d-printed-bridge-joris-laarman-arup-amsterdam-netherlands/#:~:text=Dutch designer Joris Laarman is,from layers of molten steel](https://www.dezeen.com/2018/04/17/mx3d-3d-printed-bridge-joris-laarman-arup-amsterdam-netherlands/#:~:text=Dutch designer Joris Laarman is,from layers of molten steel.).
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., & Tarczyński, L. (2008). *The Stuttgart TV Tower — displacement of the top caused by the effects of sun and wind*. 30, 2771–2781. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.008>
- Caizzzone, S., & DiGiampaolo, E. (2015). Wireless Passive RFID Crack Width Sensor for Structural Health Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 15(12), 6767–6774. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2457455>
- Carbonari, A., Giretti, A., & Naticchia, B. (2011). A proactive system for real-time safety management in construction sites. *Automation in Construction*, 20(6), 686–698. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.019>
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2019). *Elektronik beton izleme sistemi*. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yapiisleri/icerikler/ebis-aciklama-kilavuzu--son-20190121152721.pdf>
- Chae, S., & Yoshida, T. (2010). Application of RFID technology to prevention of collision accident with heavy equipment. *Automation in Construction*, 19(3), 368–374. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.12.008>
- Chen, J., Li, P., Song, G., & Ren, Z. (2016). Piezo-based wireless sensor network for early-age concrete strength monitoring. *Optik*, 127(5), 2983–2987. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.170>
- Choi, H. H., Lee, S. Y., Choi, I. Y., Cho, H. N., & Mahadevan, S. (2006). Reliability-based failure cause assessment of collapsed bridge during construction. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(6), 674–688. <https://doi.org/10.1016/j.res.2005.05.005>
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in Construction*, 103(October 2018), 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- Demircan, K., & Alp, N. Ç. (2020). Yapı Bilgi Modellemesine Geçiş Sürecinde Yaşanan Anlaşmazlık ve Uyuşmazlıklar. *Artium*, 8, 135–144.
- Doğan, O. (2019). *Detecting Falls From Height With Wearable Sensors And Reducing The Consequences Of Occupational Fall Accidents Leveraging Internet Of Things*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Du, C., Dutta, S., Kurup, P., Yu, T., & Wang, X. (2020). A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 303, 111728. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111728>
- Duan, K. K., & Cao, S. Y. (2020). Emerging RFID technology in structural engineering – A review. *Structures*, 28(July), 2404–2414. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.036>
- DUBBUDU, R. (2019). *Between 2001 & 2015, an average of 7 people died per day in Collapse of Structures including Buildings*. <https://factly.in/more-than-13000-lost-lives-in-structure-collapses-in-the-last-5-years/>
- Fidanboyulu, K., & Efendioğlu, H. (2020). Fiber Optic Sensors and Applications. *Fiber Optic Sensors and Applications*, September. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03936-697-2>
- Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-vega, A., & Jesús, A. P.-A. (2020). Construction 4 . 0 : A

- Literature Review. *Sustainability*, 12(9755).
- Gu, Y., Lo, A., Member, S., & Niemegeers, I. (2009). Wireless Personal Networks. *Communications*, 11(1), 13–32.
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4796924
- Güemes, A. (2014). Fiber Optic Strain Sensors. *NATO-STO Lecture Series (STO-EN-AVT-220)*, 1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39490-7_48
- Gümüş, O. (2021). *GUIDELINES FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS ON TALL BUILDINGS AND A CASE STUDY* (Sayı February). Middle East Technical University.
- Günaydın, A., Hatipoğlu, A., & Fianboyu, K. (2019). Havacılık Sektöründe Fiber Optik Sensör Uygulamaları. *X. ULUSAL UÇAK, HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ KURULTAYI*At: Eskişehir, Türkiye, November 2020.
- Guo, H., Yu, Y., Xiang, T., Li, H., & Zhang, D. (2017). The availability of wearable-device-based physical data for the measurement of construction workers' psychological status on site: From the perspective of safety management. *Automation in Construction*, 82, 207–217.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.001>
- Gupta, S., Lin, Y. A., Lee, H. J., Buscheck, J., Wu, R., Lynch, J. P., Garg, N., & Loh, K. J. (2021). In situ crack mapping of large-scale self-sensing concrete pavements using electrical resistance tomography. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104154>
- Gürkan, A. (2019). *İNŞAAT 4.0 KAVRAMI VE TÜRK İNŞAAT FİRMALARININ YENİ TEKNOLOJİK GELİŞMELERE YAKLAŞIMI ÜZERİNE BİR İNCELEME*. Istanbul Technical University.
- Han, T., Wu, G., & Lu, Y. (2021). Crack monitoring using short-gauged Brillouin fiber optic sensor. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 179(March), 109461.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109461>
- İnşaat sektörü iş kazası infografikleri. (2022). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. <https://guvenliinssaat.csgeb.gov.tr/haberler/insaat-sektoru-is-kazasi-infografikleri-yayinlandi/>
- Işık, A. F. (2013). *SENSÖR ÇEŞİTLERİ, ROBOTİK ALANDA KULLANILAN SENSÖRLER VE FSR SENSÖR UYGULAMASI* [BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ].
<https://doi.org/10.1190/segam2013-0137.1>
- Jiang, S., Skibniewski, M., Yuan, Y., & Sun, C. (2008). *Ultra-Wide Band technology applications in construction : a review*. 207–213.
- Karl, H., & Willig, A. (2006). Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. *Çinde Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*.
<https://doi.org/10.1002/0470095121>
- KELEŞ, A., & KAYA KELEŞ, M. (2018). İnşaat Sektöründe Kullanımı Artan Bilgisayar Yazılımları ve Bilgi Teknolojilerinin İrdelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2), 610–617. <https://doi.org/10.31202/ecjse.386469>
- Kelm, A., Laußat, L., Meins-Becker, A., Platz, D., Khazaee, M. J., Costin, A. M., Helmus, M., & Teizer, J. (2013). Mobile passive Radio Frequency Identification (RFID) portal for automated and rapid control of Personal Protective Equipment (PPE) on construction sites. *Automation in Construction*, 36, 38–52.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.009>
- Kim, R. E., In, K., & Yeo, I. (2019). Wireless Network for Assessing Temperature Load of Large-Scale Structures Under Fire Hazards. *Sensors*.
<https://doi.org/10.3390/s19010065>

- Koç, M., & Akbıyık, N. (2011). TÜRKİYE'DE İŞ KAZALARININ MALİYETLERİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ. *AKADEMİK YAKLAŞIMLAR DERGİSİ*, 2(2), 129–175.
- Lee, U. K., Kim, J. H., Cho, H., & Kang, K. I. (2009). Development of a mobile safety monitoring system for construction sites. *Automation in Construction*, 18(3), 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.08.002>
- Leon-Salas, W. D., & Halmen, C. (2016). A RFID Sensor for Corrosion Monitoring in Concrete. *IEEE Sensors Journal*, 16(1), 32–42. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2476997>
- Leung, C. K. Y., Wan, K. T., Inaudi, D., Bao, X., Habel, W., Zhou, Z., Ou, J., Ghandehari, M., Wu, H. C., & Imai, M. (2015). Review: optical fiber sensors for civil engineering applications. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(4), 871–906. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0201-7>
- Li, H., Chan, G., Wong, J. K. W., & Skitmore, M. (2016). Real-time locating systems applications in construction. İçinde *Automation in Construction* (C. 63, ss. 37–47). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.001>
- Li, H. N., Li, D. S., & Song, G. B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, 26(11), 1647–1657. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>
- Maes, K., Van Meerbeeck, L., Reynders, E. P. B., & Lombaert, G. (2022). Validation of vibration-based structural health monitoring on retrofitted railway bridge KW51. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165(September 2020), 108380. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108380>
- Morgese, M., Ansari, F., Domaneschi, M., & Cimellaro, G. P. (2020). Post-collapse analysis of Morandi's Polcevera viaduct in Genoa Italy. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(1), 69–85. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00370-7>
- Nabilah, R. A., Sutjningsih, D., Anggraheni, E., & Murniningsih, S. (2020). Dam break analysis of Situ Gintung Dam collapse reconstruction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 599(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/599/1/012064>
- Nielsen, C. V., & Sørensen, H. E. (2010). Use of wireless sensors in the building industry, SensoByg. *Danish Technological Institute, January 2010*, 123–133.
- Osunsanmi, T. O., Aigbavboa, C., & Oke, A. (2018). Construction 4.0: Towards Delivering of Sustainable Houses in South Africa. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 12(3).
- Patel, D. B., Sinha, P. G., & Goel, N. (2020). Introduction to sensors. İçinde *Advances in Modern Sensors*. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-2707-7ch1>
- Pradhananga, N., & Teizer, J. (2013). Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data. *Automation in Construction*, 29, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.004>
- Ramani, V., & Kuang, K. S. C. (2021). Monitoring of rebar corrosion in concrete structures using a lens-based plastic optical fiber (LPOF) sensor. *Construction and Building Materials*, 276, 122129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122129>
- Rault, T., Bouabdallah, A., & Challal, Y. (2014). Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. İçinde *Computer Networks* (C. 67, ss. 104–122). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.03.027>
- SASTRI, V. S. (2015). Corrosion Costs. *Challenges in Corrosion*, 95–126. <https://doi.org/10.1002/9781119069638.ch2>
- Schaap, H. S., & Caner, A. (2020). Bridge collapses in Turkey: causes and remedies.

- Structure and Infrastructure Engineering*, 18(5), 694–709.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1867198>
- Siddiqui, H., Vahdatikhaki, F., & Hammad, A. (2019). CASE STUDY ON APPLICATION OF WIRELESS ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY FOR TRACKING EQUIPMENT ON A CONGESTED SITE. *Journal of Information Technology in Construction*, 24(October 2017), 167–187.
- Silva Rotta, L. H., Alcântara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., Mendes, T. S. G., & Souza Filho, C. R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90(April), 102119. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>
- Sun, M., Staszewski, W. J., & Swamy, R. N. (2010). Smart sensing technologies for structural health monitoring of civil engineering structures. *Advances in Civil Engineering*, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/724962>
- TDBY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, 416. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf>
- Teizer, J., Allread, B. S., Fullerton, C. E., & Hinze, J. (2010). Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system. *Automation in Construction*, 19(5), 630–640.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.02.009>
- Teizer, J., Lao, D., & Sofer, M. (2007). Rapid automated monitoring of construction site activities using ultra-wideband. *Automation and Robotics in Construction - Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, September*, 23–28. <https://doi.org/10.22260/isarc2007/0008>
- Tronci, E. M., De Angelis, M., Betti, R., & Altomare, V. (2020). Vibration-based structural health monitoring of a RC-masonry tower equipped with non-conventional TMD. *Engineering Structures*, 224(September), 111212.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111212>
- Uva, G., Porco, F., Fiore, A., & Porco, G. (2014). Structural monitoring using fiber optic sensors of a pre-stressed concrete viaduct during construction phases. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2(1), 27–37.
<https://doi.org/10.1016/j.csndt.2014.06.002>
- Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., & Gambao, E. (2013). Extending automation of building construction — Survey on potential sensor technologies and robotic applications. *Automation in Construction*, 36, 168–178.
<https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2013.08.002>
- Woo, S., Jeong, S., Mok, E., Xia, L., Choi, C., Pyeon, M., & Heo, J. (2011). Application of WiFi-based indoor positioning system for labor tracking at construction sites: A case study in Guangzhou MTR. *Automation in Construction*, 20(1), 3–13.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.07.009>
- World Economic Forum, & Boston Consulting Group. (2016). Shaping the Future of Construction. İçinde *Shaping the Future of Construction*.
http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf
- Wright, R., & Keith, L. (2014). *Wearable Technology : If the Tech Fits , Wear It* Nancy R. Glassman , Column Editor. 4065.
<https://doi.org/10.1080/15424065.2014.969051>
- Yao, Y., Yan, M., & Bao, Y. (2021). Measurement of cable forces for automated monitoring of engineering structures using fiber optic sensors: A review. İçinde *Automation in Construction* (C. 126, s. 103687). Elsevier B.V.

- <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103687>
- Yi, T. H., Li, H. N., & Gu, M. (2013). Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46(1), 420–432.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.07.018>
- Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>
- YILDIZ, A. (2018). Industry 4.0 and smart factories. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 1–1. <https://doi.org/10.16984/sofenbilder.321957>
- Zhang, M., Cao, T., & Zhao, X. (2017). Applying sensor-based technology to improve construction safety management. *Sensors (Switzerland)*, 17(8).
<https://doi.org/10.3390/s17081841>
- Zheng, Y., Li, Z., Yu, J., & Xiao, J. (2022). Experimental research on a novel spring-shaped fiber-optic displacement sensor for settlement monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 191(January), 110754.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110754>
- Zheng, Y., Zhu, Z. W., Xiao, W., & Deng, Q. X. (2020). Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring. *Optical Fiber Technology*, 54(November 2019), 102127. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.102127>
- Zhou, S., Deng, F., Yu, L., Li, B., Wu, X., & Yin, B. (2016). A novel passive wireless sensor for concrete humidity monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 16(9).
<https://doi.org/10.3390/s16091535>
- Zhu, Y., Klegseth, M., Bao, Y., Hoehler, M. S., Choe, L., & Chen, G. (2021). Distributed fiber optic measurements of strain and temperature in long-span composite floor beams with simple shear connections subject to compartment fires. *Fire Safety Journal*, 121(February 2020), 103275.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103275>
- Zorluer, İ., & Eleren, A. (2011). İnşaat Sektöründe İş Güvenliği ve Sağlığı Üzerine Risklerin Belirlenmesi ve Örnek Bir Uygulama. 3. *İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu*, 185–193.