

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AKILLI MALZEME TEKNOLOJİSİNİN ORTAMLARA ETKİSİ: AKILLI EVLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ecemnur BÜYÜKKAHRAMAN

1406010027

Anabilim Dalı: Mimarlık

Program: Mimari Mühendislik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU

NİSAN 2022

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AKILLI MALZEME TEKNOLOJİSİNİN ORTAMLARA ETKİSİ: AKILLI EVLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ecemnur BÜYÜKKAHRAMAN

1406010027

Anabilim Dalı: Mimarlık

Program: Mimari Mühendislik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Esra BOSTANCIOĞLU

Prof. Dr. Didem BAŞ

NİSAN 2022

ÖNSÖZ

Danışmanım Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Akıllı Malzeme Teknolojisinin Ortamlara Etkisi: Akıllı Evler” başlıklı yüksek lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu, farklı kaynaklardan edindiğim bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince desteğini esirgemeyen, akademik bilgi ve deneyimleriyle çalışmaya katkı sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU’na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında araştırılan yabancı kaynakların çevirisinde yardımcı olan ve manevi desteğini hep hissettiğim Gabriel ARAS’a teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her evresinde aldığım kararları destekleyen, inanç ve sevgileriyle yanımda olan değerli aile bireylerime teşekkür ederim.

Ecemnur BÜYÜKKAHRAMAN

Nisan 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	ii
KISALTMA LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	2
1.2. Çalışmanın Kapsamı.....	2
1.3. Çalışmanın Yöntemi.....	4
2. AKILLI MALZEMELER.....	5
2.1. Akıllı Malzeme Kavramı.....	5
2.2. Akıllı Malzemelerin Sınıflandırılması.....	9
2.2.1. Özellik Değiştiren Akıllı Malzemeler.....	13
2.2.1.1. Şekil Değiştiren Akıllı Malzemeler.....	14
2.2.1.2. Renk ve Optik Değiştiren Akıllı Malzemeler.....	18
2.2.1.3. Adezyon Değiştiren Akıllı Malzemeler.....	23
2.2.2. Enerji Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler.....	25
2.2.2.1. Işık Yayan Akıllı Malzemeler.....	26
2.2.2.2. Elektrik Üreten Akıllı Malzemeler.....	31
2.2.2.3. Enerji Depolayan Akıllı Malzemeler.....	35
2.2.3. Madde Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler.....	37
3. AKILLI ORTAMLAR VE BİLEŞENLERİ.....	38
3.1. Ortamların Akıllanmasıyla Ortaya Çıkan Akıllı Ev Kavramı.....	38
3.2. Kontrol Sistemleri.....	44
3.3. Akıllı Sistemler.....	48
3.3.1. Cephe Sistemleri.....	52
3.3.2. Aydınlatma Sistemleri.....	56
3.3.3. Enerji Sistemleri.....	58
3.3.4. Yapısal Sistemler.....	60

4. AKILLI EV ÖRNEKLERİ	63
4.1. Örneklerin İncelenmesi	63
4.1.1. House R 128	64
4.1.2. Villa Sophia.....	66
4.1.3. Soft House	68
4.1.4. Cellophane House	70
4.1.5. IVRV House.....	72
4.1.6. The W.I.N.D. House	74
4.1.7. Edgeland House	76
4.1.8. The Jungle House	78
4.1.9. DFAB House.....	80
4.2. Örneklerin Değerlendirilmesi.....	82
5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ	85
KAYNAKLAR	91

KISALTMA LİSTESİ

UV	Ultraviolet Radiation
PH	Power of Hydrogen
TEM	Thermal Expansion Materials
PTEM	Positive Thermal Expansion Materials
NTEM	Negative Thermal Expansion Materials
ZTEM	Zero Thermal Expansion Materials
TB	Thermobimetals
SMA	Shape Memory Alloys
EAP	Electroactive Polymers
IR	Infrared Radiation
PC	Photochromic Materials
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
TC	Thermochromic Materials
TT	Thermotropic Materials
EC	Electrochromic Materials
EO	Electrooptic Materials
TiO₂	Titanium Dioxide
BMS	Building Management System
EL	Electroluminescent Materials
LED	Light Emitting Diodes
RGB	Red, Green and Blue
OLED	Organic Light Emitting Diodes
DSC	Dye Solar Cells
TEG	Thermoelectric Generators
PVC	Polyvinyl Chloride
PEC	Piezoelectric Ceramics
PEP	Piezoelectric Polymers
PCM	Phase Change Materials
CO₂	Carbon Dioxide
PV	Photovoltaic

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Yapı malzemeleri	5
Tablo 2. Akıllı sistemleri ve ortamları ayırt etme	7
Tablo 3. Akıllı malzeme sınıflandırması	10
Tablo 4. Akıllı malzeme sınıflandırması	11
Tablo 5. Akıllı malzeme sınıflandırması	12
Tablo 6. Mimarlık alanında kullanım olanağı veya potansiyeli bulunan akıllı malzemeler ...	13
Tablo 7. Şekil değiştiren akıllı malzemeler	14
Tablo 8. Renk ve optik değiştiren akıllı malzemeler	19
Tablo 9. Adezyon değiştiren akıllı malzemeler	24
Tablo 10. Işık yayan akıllı malzemeler	26
Tablo 11. Elektrik üreten akıllı malzemeler	31
Tablo 12. Enerji depolayan akıllı malzemeler	35
Tablo 13. Akıllı ortamların karakterize edilmesi	39
Tablo 14. Farklı girdi/çıkı kontrol modelleri	47
Tablo 15. Potansiyel olarak uyarlanabilir akıllı malzemelerle ilgili tipik bina sistemi tasarım ihtiyaçlarının eşleştirilmesi	51
Tablo 16. Akıllı cam özelliklerinin karşılaştırılması	55
Tablo 17. İncelenen örneklerin analizi	82

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Termobimetal elemanların termal genişleme ile gölgeleme sağlanması	16
Şekil 2. Kendinden gölgelendirme pencereleri	16
Şekil 3. Şekil hafızalı alaşım kullanılan cephelerde doğal havalandırma sistemi	17
Şekil 4. Fotokromik pigmentlerin ışık etkisi ile renk değiştirme aşamaları	20
Şekil 5. Fotokromik camın ışık uyararı etkisinin gösterimi	20
Şekil 6. Termokromik malzemelerin dokunma hafızası	21
Şekil 7. Termotropik malzeme kullanılan camın opaklık durumu	22
Şekil 8. Elektrooptik camın şeffaf ve opak durumunun gösterimi	23
Şekil 9. Floresan boya detayı ve uygulaması	27
Şekil 10. Fosforesans içeren cam bloklar ve cam karolar	28
Şekil 11. Esnek beyaz LED şerit	29
Şekil 12. Desenli aydınlatma oda bölücülere	30
Şekil 13. Beyaz ışık yayan SMOLED ekran	31
Şekil 14. Boya güneş pili modülü	33
Şekil 15. Piezoelektrik malzemeden üretilen sensörler	35
Şekil 16. Elektrokromik cam uygulaması	54
Şekil 17. Elektrooptik camda özellik değişiminin gösterimi	55
Şekil 18. İç mekanda uygulanan LED ekranlar	57
Şekil 19. Organik ışık yayan diyotlar (OLED) ile oluşturulmuş cephe yüzeyi	58
Şekil 20. Çatıya entegre edilen fotovoltaik paneller	60
Şekil 21. House R 128 cephedeki ısı depolayan camlar	64
Şekil 22. House R 128 iç mekan tasarımı	65
Şekil 23. Villa Sophia genel görünüm	66
Şekil 24. Villa Sophia iç mekan tasarımı	67
Şekil 25. Villa Sophia RGB LED aydınlatma	67
Şekil 26. Soft House genel görünüm	68
Şekil 27. Soft House hareketli fotovoltaik paneller	69
Şekil 28. Soft House LED aydınlatmalı otomatik perde	69
Şekil 29. Cellophane House genel görünüm	70
Şekil 30. Cellophane House cephede fotovoltaik panel detayı	71
Şekil 31. Cellophane House LED uygulaması	71
Şekil 32. IVRV House genel görünüm	72
Şekil 33. IVRV House tasarımdaki boşluklar	73

Şekil 34. IVRV House TiO2 ile kaplanmış şeritler	73
Şekil 35. The W.I.N.D. House genel görünüm	74
Şekil 36. The W.I.N.D. House renkli cam kullanımı	75
Şekil 37. Edgeland House genel görünüm	76
Şekil 38. Edgeland House iç mekan tasarımı	77
Şekil 39. Edgeland House renkli ve vakumlu cam paneller	77
Şekil 40. The Jungle House genel görünüm	78
Şekil 41. The Jungle House çatı bahçesi	79
Şekil 42. The Jungle House cephede fotovoltaik panel kullanımı	79
Şekil 43. DFAB House genel görünüm	80
Şekil 44. DFAB House LED aydınlatma	81



Enstitü : Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı : Mimarlık
Programı : Mimari Mühendislik
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans-Nisan 2022

ÖZET

AKILLI MALZEME TEKNOLOJİSİNİN ORTAMLARA ETKİSİ: AKILLI EVLER

Malzemeler ve mimarlık her zaman birbiri ile ilişkili olmuştur. Mimarlık dinamik bir yapıya sahip olduğundan, malzemelerin de bu doğrultuda gelişmesi beklenmiştir. Sanayi devrimi ile birlikte yaşanan teknolojik gelişmeler, birçok uygulamada geleneksel malzemelerin yerini alması düşünülen “akıllı malzeme” kavramını ortaya çıkarmıştır. 21. yüzyılın teknolojik ihtiyaçlarının sonucunda ortaya çıkan akıllı malzemeler, çevresel uyaranlara tepki vererek bir değişim geçirmekte ve ortam koşullarına uyum sağlayabilmektedir.

Mimarlık alanında giderek artan akıllı malzeme kullanımı, beraberinde yeni çözüm ve tasarım olanakları getirmektedir. Çoğu uygulamada gömülü bir şekilde sensör ve/veya aktüatör olarak kullanılan akıllı malzemeler, teknoloji ile entegre edildiklerinde, bir ortamda sistem düzeyinde meydana gelen belirli davranışları bütünleştirme ve birden fazla eyleme dönüştürme özelliğine sahiptir. Akıllı malzemelerin gerçekleşen başarılı uygulamaları ve günlük kullanımlarının artması, bilgi ve iletişim teknolojileri için yeni bir alana dönüşen “akıllı ev” kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Akıllı evler kullanıcıların konfor ve güvenlik ihtiyaçlarını akıllı malzeme teknolojilerini kullanarak, enerji tasarrufu sağlayacak şekilde karşılamaktadır.

Çalışmanın amacı, akıllı malzeme teknolojilerindeki somut gelişmelere genel bir bakış sunarak ve gelecekteki tasarımların potansiyelini inceleyerek kullanıcıda çevresel bir bilinç oluşturmaktır. Bu amaçla çalışma; akıllı malzemelerin mimarlıktaki kullanım alanlarını detaylı olarak açıklamakta, akıllı ortamların ve sistemlerin çalışma prensibini anlatmakta, akıllı ev kavramını tanımlamakta ve örnek uygulamalarını inceleyerek değerlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Teknoloji, Akıllı Malzemeler, Akıllı Evler, Sistemler.

University : Istanbul Kultur University
Institute : Institute Of Graduate Studies
Department : Architecture
Literature Programme : Architectural Engineering
Literature Supervisor : Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU
Degree Awarded and Date : Master's Degree-April 2022

ABSTRACT

The Effect of Smart Material Technology on Environments: Smart Houses

Materials and architecture have always been related to each other. Since architecture has a dynamic structure, materials have also been expected to develop in this direction. Technological developments along with the industrial revolution have brought about the concept of “smart material”, which is considered to replace traditional materials in many applications. As a result of the technological needs of the 21st century, smart materials undergo a change by reacting to environmental stimuli and are able to adapt to environmental conditions.

The increasing use of smart materials in the field of architecture brings with it new solutions and design possibilities. Smart materials used as sensors and/or actuators in an embedded way in most applications have the ability to integrate certain behaviors that occur at the system level in an environment and convert them into multiple actions when they are integrated with technology. The successful applications of smart materials and the increase in their daily use have led to the emergence of the concept of “smart house”, which has become a new field for information and communication technologies. Smart houses meet the comfort and safety needs of users by using smart material technologies to save energy.

The aim of the study is to create an environmental awareness in the user by providing an overview of the concrete developments in smart material technologies and examining the potential of future designs. For this purpose, the study explains the areas of use of smart materials in architecture in detail, describes the principle of operation of smart environments and systems, defines the concept of a smart house and examines and evaluates its exemplary applications.

Keywords: Technology, Smart Materials, Smart Houses, Systems.

1. GİRİŞ

Malzemeler ve mimarlık arasındaki ilişki, 20. yüzyılda yaşanan sanayi devrimi ile birlikte daha fazla önem kazanmıştır. Gelişen teknoloji sayesinde potansiyel olarak kullanılacak yeni malzemelere erişim olanağı sunulmuştur. Geçmişte sıklıkla kullanılan geleneksel malzemeler çoğu durumda yetersiz kalmış ve gelişen teknolojiyle beraber “akıllı malzeme” kavramı ortaya çıkmıştır. Ortamdaki değişikliklere tepki verebilen bu malzemeler farklı tasarımların ve mimari formların oluşmasını sağlamıştır.

Akıllı malzeme kavramı incelendiğinde “ortam şartları ile mücadele eden” malzeme anlayışı yerini “çevresel uyarılara tepki vererek ortam şartlarına uyum gösteren” malzeme anlayışına bırakmaktadır. Mimarlar ve tasarımcılar tarafından tercih edilmeye başlanan akıllı malzemeler; uzun süredir devam etmekte olan ekolojik problemlere, yüksek enerji maliyetlerine ve tasarım kaynaklı sorunlara yeni çözümler getirmektedir. Tasarım esnekliğini ve işlevselliğini geliştiren akıllı malzemeler, yapıların ağırlığını ve karmaşıklığını azaltarak değişken tasarımlara olanak tanımaktadır. Akıllı malzemeler; yapılarda enerji tüketiminin azaltılmasında önemli ölçüde etki etmekte, maliyetleri düşürmekte ve sürdürülebilir tasarımlar ile ekolojiye doğrudan katkıda bulunmaktadır.

Akıllı malzemelerin verdiği tepkilerin kontrol edilebilir olması, tasarım ve mimarlık alanında yeni olanaklar sağlamaktadır. Teknoloji ile entegre edildikleri durumlarda, bir ortamda sistem düzeyinde meydana gelen belirli davranışları bir veya birden fazla eyleme dönüştürebilme özelliğini içermektedir. Bu eylemler, ortam düzeyinde sensör-aktüatör sistemleri ile gerçekleştirilmektedir. Ortamların akıllanarak tepki verebilmesi ve kullanıcının beklentileri doğrultusunda tasarlanması ile “akıllı ev” kavramını ortaya çıkarmıştır. Akıllı malzemeleri ve otomasyon teknolojilerini içeren akıllı evler, akıllı malzemelere benzer şekilde ortam koşullarına adapte olabilmekte, kullanıcının konfor ve güvenlik ihtiyaçlarını sürdürülebilir çözümler ile karşılamaktadır.

Kullanıcının beklentilerini karşılayan yapılar tasarlamak için akıllı malzemelerin mimarlıktaki potansiyellerini anlamak önem taşımaktadır. Mimari uygulamalarda tasarım, performans ve sürdürülebilirlik bağlamında yüksek potansiyel bulunduran akıllı malzemeler üzerine araştırmalar devam etmektedir. Geleneksel malzemelerin yerine tercih edilmeye başlanan akıllı malzemelerin yapılarda temel unsur olarak kullanılma düşüncesi, geleceğin mimarisini şekillendirmektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Malzeme teknolojisindeki gelişmelerin mimariyi etkilediği düşünüldüğünde, akıllı malzemelerin klasik tasarım anlayışını önemli ölçüde değiştirme özelliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Geleneksel malzemelerin kararlı yapılarına kıyasla çevre ile daha uyumlu nitelikler gösteren akıllı malzemeler, günümüzde yaşanan çevresel ve mimari problemlere doğrudan etki edebilmektedir. Ancak yapılara sağladıkları sürdürülebilir çözümlere, tasarımsal yeniliklere ve enerji yönetimindeki etkin işlevlerine rağmen kullanımlarının pek yaygın olmadığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda yapılan araştırmada akıllı malzemelerin mimarideki kullanım potansiyelleri ve kullanımlarının yaygın olmamasının nedenleri üzerine detaylı bir çalışma fikri esas alınmıştır.

Akıllı malzemelerin ve akıllı sistemlerin uygulamaları incelendiğinde, yapılarda sağladıkları çeşitli etkiler doğrudan gözlemlenmektedir. Akıllı malzemeler yapılarda performans kadar tasarıma da etki ederek yeni bir mimari bakış açısı oluşturmaktadır. Çalışmada akıllı malzemelerin yapılardaki uygulamaları; kullanıcı üzerindeki bireysel etkilerinin anlaşılması, tasarım potansiyelini daha esnek olarak yansıtması ve konut ölçeğinde sürdürülebilir çözümlerinin incelenmesi açısından akıllı evler üzerinden açıklanmaktadır. Akıllı malzeme teknolojilerindeki somut gelişmeler ve gelecekteki tasarımların potansiyeli incelenerek kullanıcıda çevresel bir bilinç oluşturmak amaçlanmaktadır.

1.2. Çalışmanın Kapsamı

Akıllı malzemeler ile ilgili yapılan çalışmaların genelinde kullanımlarının yaygınlaşacağına öngörülmesi, mimarlık alanında konunun önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda çalışma temel olarak akıllı malzeme teknolojilerinin mimarideki etkilerini, güncel uygulamalarını ve kullanım alanlarını ele almıştır. Konu kapsamında örnek incelemesi akıllı evler üzerinden yapılmıştır.

Bu konuda benzerlik gösteren çalışmalar aşağıda özetlenmektedir:

- Karana ve Kandachar (2006)'ın "Smart Surroundings: A New Era for Communication and Information Technologies" çalışmasında akıllı malzemelerin evrimi, bilgi ve iletişim teknolojilerine dayalı tasarım ürünleri üzerindeki etkilerine odaklanılmaktadır. Akıllı terimi ile eş zamanlı ilerleyen akıllı evler ve akıllı tekstiller konularının değerlendirilmesi ele alınmaktadır.

- Sadeghi ve vd. (2011)'nin "The Function of Smart Material's Behavior in Architecture" çalışmasında mimarlıkta akıllı malzemelerin kullanımı ile binaların enerji ve malzeme maliyetini önemli ölçüde düşürdüğünden ve tasarımcıların daha iyi koşullar sağlayan ortamlar tasarladığından bahsedilmektedir. Akıllı malzemelerin daha yaygın olarak kullanılan geleneksel malzemelerden ayıran özellikleri ve davranışları ele alınmakta, mimari tasarımlardaki potansiyelleri hakkında tahminde bulunmaktadır.

- Al-Baldawi (2015)'nin "Application of Smart Materials in the Interior Design of Smart Houses" çalışmasında akıllı malzemelerin akıllı evlerde kullanımına ve iç mekan tasarımında çevresel açıdan önemine değinilmektedir. Akıllı evleri konforlu ve enerji tasarrufu sağlayacak bir ortam haline getiren akıllı malzemelerin kullanımı ile enerji dönüşümü fikrini birleştirmektedir.

- Ayvaz (2019)'ın "Akıllı Malzemelerin Mimaride Kullanım Olanakları" çalışmasında akıllı malzemelerin; çeşitleri, kullanım alanları, avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmekte ve uygulama örnekleri analiz edilmektedir. Akıllı malzemelerin mimarinin üretken ve bütünleştirici bir parçası haline geleceği öngörülmektedir.

- Akıncı (2020)'nin "Malzeme Kullanımıyla Akıllanan Binalar" çalışmasında akıllı malzemelerin; işlevi, kullanıldığı yapılar ve kullanıldığı yapı elemanları incelenmektedir. İlerleyen teknolojiyle birlikte artan akıllı malzeme uygulamalarının yapılarda; güvenlik, konfor ve sürdürülebilirlik unsurlarını karşılayarak daha yaygın bir hale geleceği düşünülmektedir.

İncelenen çalışmalarda; akıllı malzemelerin mimarideki güncel ve potansiyel kullanım alanları açıklanmakta ve geleneksel malzemelere göre daha avantajlı olduğu belirtilmektedir. Akıllı evler konusunu içeren çalışmalarda akıllı malzemeler, ortamlar ve sistemler üzerinden detaylı olarak anlatılmamakta ve örneklerle desteklenmemektedir. Akıllı malzemeler ve akıllı evler konularına ilişkin kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamaktadır.

Çalışma temel olarak beş bölümden oluşmaktadır:

- Birinci bölümde; çalışmanın genel tanımı, amacı, kapsamı ve yöntemi aktarılmaktadır. Çalışmanın hangi problemleri irdelediği ve konunun ele alınış biçimi açıklanmaktadır.

- İkinci bölümde "Akıllı Malzemeler" başlığıyla; akıllı malzeme kavramı ve sınıflandırma yöntemi anlatılmaktadır. Tasarımlarda kullanım potansiyelinin anlaşılması amacıyla akıllı malzeme çeşitleri ve özellikleri açıklanarak akıllı malzemeler konusundaki bilgi karmaşası giderilmeye çalışılmaktadır.

- Üçüncü bölümde "Akıllı Ortamlar ve Bileşenleri" başlığıyla; akıllı malzemelerin oluşturduğu ortamların akıllanmasıyla ortaya çıkan akıllı evlerden bahsedilmektedir. Akıllı ortamların ana bileşenleri olan kontrol sistemleri ve akıllı sistemler detaylı olarak incelenmektedir.
- Dördüncü bölümde "Akıllı Ev Örnekleri" başlığıyla; akıllı malzeme teknolojilerindeki somut gelişmelerin ve gelecekteki potansiyellerinin incelenmesi doğrultusunda örnek analizi yapılmaktadır. Akıllı malzemenin; türü, kullanım biçimi ve yapıdaki işlevi açıklanmaktadır. Örnekler, analiz tabloları oluşturularak değerlendirilmektedir.
- Beşinci bölümde; literatür araştırmaları ve incelenen örneklerin verileri doğrultusunda akıllı malzeme teknolojilerinin performansları üzerine değerlendirme yapılmaktadır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda araştırmayı yönlendiren problemler cevaplanarak ileride yapılacak tasarımlar için önerilerde bulunmaktadır.

1.3. Çalışmanın Yöntemi

Çalışma, iki aşamadan oluşan bir araştırma yöntemi kullanılarak yürütülmüştür. İlk aşamada yapılan literatür taraması sonucunda konuyla ilgili birincil ve ikincil kaynaklara ulaşılarak kuramsal bir çerçeve belirlenmiştir. Elde edilen verilere eleştirel bir bakış açısı yaklaşımını sunması sebebiyle nitel bir araştırma yöntemi tercih edilmiştir. Akıllı malzeme teknolojileri, akıllı sistemler, akıllı ortamlar ve akıllı evler konularıyla ilgili; yerli ve yabancı tezler, araştırma makaleleri, e-kaynaklar ve kitaplar incelenmiştir. İkinci aşamada ise akıllı malzeme konusuyla ilişkili olarak akıllı ev örnekleri araştırılmış ve örnekler akıllı malzeme teknolojilerindeki somut gelişmeler ve gelecekteki tasarımların potansiyeli doğrultusunda belirlenmiştir. Örnek olay inceleme yöntemiyle akıllı malzeme teknolojilerinin akıllı evlerdeki uygulama alanları ele alınmış ve analiz tabloları oluşturulmuştur. Tez çalışması kapsamında gerekli olan bilgiler düzenlenerek bir araya getirilmiştir.

2. AKILLI MALZEMELER

2.1. Akıllı Malzeme Kavramı

Yapılara farklı işlevler kazandırmak, kullanıcının konfor seviyesini arttırmak, ekonomik ve ekolojik kaygılara çözüm üretmek için yapı malzemelerinde gelişmeler yaşanmıştır. Geleneksel malzemeler geçmişte sıklıkla kullanılırken, takip eden süreçte kompozit malzemeler, sürdürülebilir ve modern malzemelerin kullanımıyla yapı malzemeleri çeşitlenmiştir (Ritter, 2007; Behl vd., 2008) (Tablo 1). Tez çalışmasının bu bölümünde modern yapı malzemelerinden biri olan akıllı malzemeler ele alınmaktadır.

Geleneksel	Kompozit	Sürdürülebilir	Modern
Ahşap	Taneli Kompozit		Akıllı
Beton	Tabakalı Kompozit		Nano
Cam	Liflerle Donatılı Kompozit		
Çelik			
Doğal Taş			
Pişmiş Toprak			
Plastik			

Tablo 1. Yapı malzemeleri (Ersoy, 2001; Mohammed, 2017)

Akıllılık kavramı, çevresel uyaranları algılayabilme ve tepki verebilme olarak tanımlanmaktadır (Addington ve Schodek, 2005). Akıllı malzeme kavramı mimari açıdan incelendiğinde “ortam şartları ile mücadele eden” malzeme anlayışı yerini “çevresel uyaranlara tepki vererek ortam şartlarına uyum gösteren” malzeme anlayışına bırakmaktadır. Bu yaklaşımla “akıllılık” kavramı, akıllı malzeme kullanılarak tasarlanan yapı elemanları veya bileşenlerini içermektedir (Orhon, 2012).

NASA (1970) akıllı malzeme tanımını; konfigürasyonları hatırlayan ve belirli bir uyaran verildiğinde uyum sağlayabilen malzemeler olarak açıklamaktadır.

Addington ve Schodek (2005) tarafından akıllı malzemeler; dış ortamdan gelen (ısı, ışık, pH vb.) fiziksel, kimyasal ve/veya biyolojik uyaran etkisiyle niteliğini değiştirerek ve/veya enerji dönüşümü yaparak tepki veren malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Ritter (2007)'e göre akıllı malzemeler; fiziksel ve/veya kimyasal etkilere tepki olarak şekillerini ve/veya renklerini geri dönüşümlü ve tekrarlanabilir olarak değiştirebilen malzemeler ve ürünlerdir.

Casini (2016) akıllı malzemeleri; dış ortamdaki gelen uyarıları algılayabilen ve değişen çevresel koşullara uyum sağlayarak hızlı tepki verebilen yenilikçi malzemeler olarak nitelendirmektedir.

Abdullah ve Al-Alwan (2019)'a göre akıllı malzemeler; sensörler, aktüatörler ve kontrol mekanizmaları aracılığıyla çevresel uyarıları algılayabilen, tahmin edilebilir bir şekilde tepki verebilen ve uyarı etkisi ortadan kalktığında eski yapısına geri dönebilen malzemelerdir.

Kimyasal Teknoloji Ansiklopedisi (2020)'nde akıllı malzemeler ve yapılar; çevresel olayları algılayan, duyuşsal bilgiyi işleyen ve çevre üzerinde etki eden nesnelere olarak açıklanmaktadır.

Literatür araştırması sonucunda akıllı malzemeler için standart bir tanım yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir. Araştırmacılar tarafından akıllı malzemelerle ilgili farklı tanımlar yapılsa da genelde benzer ifadeler üzerinden açıklanmaktadır. Genel bir tanım yapmak gerekirse, akıllı malzemeler harici bir uyarıya tepki olarak bir veya daha fazla özelliğini değiştirebilen malzemelerdir (Harrison ve Ounaies, 2001).

Akıllı malzemelerin farklı işlevleri yerine getirebilmesi, akıllı malzeme sistemlerinin oluşmasına yol açmıştır. Bu sistemler birden fazla akıllı malzemedeki oluşmakta, çeşitli işlevleri gerçekleştirebilmekte ve harekete geçmeyi tetikleyen değişikliği algılayabilmektedir (Zupan, 2020). Akıllı malzeme ve sistemlerin yeni teknolojiler ile sahip olduğu potansiyeller, tasarım ve yapım süreçlerini önemli ölçüde etkileyebilecek özelliktedir (Abdullah ve Al-Alwan, 2019).

Malzemeler, teknolojiler ve ortamlar arasında sıralı bir ilişki kuran bir düzenleniş biçimi açıklanmaktadır (Tablo 2). Düzenleniş biçimi, geleneksel sınıflandırma sisteminin temel uygulama odağını da korumaktadır (Addington ve Schodek, 2005).

Geleneksel Malzemeler	: Dış uyaranlara verilen sabit tepkiler
Yüksek Performanslı Malzemeler	: Dış uyaranlara verilen sabit tepkiler
Akıllı Malzemeler Tip 1 - Nitelik Değişimi	: Tip 1 - Malzemenin belirli iç veya dış uyarana içsel tepki oluşturması
Akıllı Malzemeler Tip 2 - Enerji Değişimi	: Tip 2 - Tepkiler hesaplama yoluyla kontrol edilebilir veya geliştirilebilir
Akıllı Cihazlar ve Sistemler	: Birden fazla dahili veya harici uyarana veya kontrole yönelik hesaplamalı geliştirmeler ile ilgili içsel tepki varyasyonlarına sahip sistemlere yerleşik akıllı malzemeler
Akıllı Ortamlar	: Akıllı cihazlardan ve sistemlerden oluşan tüm ortamın içsel ve bilişsel olarak yönlendirilmiş tepki çeşitliliklerini bir araya getirir

Tablo 2. Akıllı sistemleri ve ortamları ayırt etme (Addington ve Schodek, 2005)

Malzeme sektöründe gerçekleşen gelişmeler, yapı teknolojisi alanında yeni uygulama yöntemlerini oluşturmuştur. Gelişen teknoloji ile birlikte kullanıcıların konfor gereksinimlerini arttırmak, malzeme sektöründe belirleyici bir kriter olarak ele alınmış ve yeni arayışlar içerisine girilerek akıllı malzemelerin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Akıllı malzeme kavramı yeni olmamasına rağmen araştırmacılar akıllı malzeme teknolojisinin geliştirilmesine yönelik çalışmalarını sürdürmektedir. Daha uyarlanabilir özellikler sayesinde mimari mekanın konfor unsurları ile performansını kontrol edebilen ve yönetebilen sistem tasarımları araştırılmaktadır (Ritter, 2007; Abdullah ve Al-Alwan, 2019).

Sanayi Devrimi ile birlikte yeni malzeme arayışları içine girilmiştir (Günay, 2001; Orhon, 2006). Bu arayışlar sonucu akıllı malzemeler üzerine ilk araştırma 1932 yılında Arne Ölander tarafından yapılmıştır (Ritter, 2007). “Çevresel koşullara yanıt veren mimarlık” (responsive achitecture) kavramı 1970 yılında ilk kez Negroponte tarafından ortaya atılmıştır (Orhon, 2013). Bu kavram başlangıçta “yapıya bütünlük algılayıcılarla alınan ve bilgisayar ile değerlendirilen dış uyarılara, yapı elemanlarına bütünlük hareket mekanizmalarıyla yanıt vermek” anlayışını esas almıştır. Ancak akıllı malzemelerin kullanıma girmesi ile birlikte bilgisayarlara gerek duyulmadan akıllı malzemelerin sensör ve/veya aktüatör olarak kullanıldığı yapılar üretilmeye başlanmıştır (Negroponte, 1970). 1973’te yaşanan petrol kriziyle birlikte, cephe tasarımlarının fosil kaynaklı enerji tüketimini azaltacak şekilde değiştirilmesi gerektiği ve konfor koşullarının daha az enerji tüketimi ve çevreye daha az zarar veren enerji kaynaklarıyla karşılanması gerektiği anlaşılmıştır. Akıllı cephe tasarımları bu

dönemde ortaya çıkmıştır (Orhon, 2014). Akıllı cam terimi ilk kez 1985 yılında Svensson ve Granqvist tarafından kullanılmıştır (Pehlivan, 2007). Çevresel koşullara yanıt veren mimarinin ilk örneklerinden biri 1987 yılında Jean Nouvel tarafından tasarlanan ve Paris'te inşa edilen Arap Dünyası Enstitüsü (Institut du Monde Arabe)'dür. Cephenin maruz kaldığı ışığa bağlı olarak, otomatik hareket eden cephe panellerinin kullanıldığı yapının ışık sensörlerinde akıllı malzeme kullanılmıştır (Yağlı, 2019).

Akıllı malzemeler güncel bir kavram olsa da temeli teknolojik gelişmelerin hız kazandığı sanayi devrimine dayanmaktadır. Yapılan araştırmaların bir malzeme ya da sistemin, bir durum veya etkiye göstermesi istenilen tepki üzerinden ilerlediği görülmektedir. Akıllı malzemelerin ortaya çıkışı basit ve temel bir tepkiyle gerçekleşmiştir. Ancak takip eden süreçte tasarlanarak çeşitlenmiş ve güncel türleri oluşturmuştur.

Malzeme, geleneksel olarak formu takip etmekte ve genel olarak mimari yapının son görüntüsünü etkilemektedir. Ancak tasarım sürecinin erken bir aşamasında yer almamaktadır. Temelde hiyerarşik "form-yapı-malzeme" dizisinin yapı sistemleri açısından tasarım sürecine hakim olduğu görülmektedir. Akıllı malzeme kullanımı, geleneksel sistemin haricinde, yeni potansiyellerin oluşmasına imkan vermektedir (Mohammed, 2017).

Addington ve Schodek (2005), akıllı bir malzemeyi mimaride kullanılan daha geleneksel malzemelerden ayıran belirli karakteristik özelliklerin olduğunu belirtmektedir. Bu karakteristik özellikler; aciliyet (immediacy), geçicilik (transiency), kendi kendine harekete geçme (self-actuation), seçicilik (selectivity) ve doğrudanlıktır (directness).

- Aciliyet: Gerçek zamanlı tepki verir.
- Geçicilik: Birden fazla çevresel duruma tepki verir.
- Kendi kendine harekete geçme: Zeka, malzemeye dışsal olmaktan ziyade içseldir.
- Seçicilik: Tepkileri ayrık ve öngörülebilirdir.
- Doğrudanlık: Tepki, "etkinleştirme" olan bölgede gerçekleşir.

Akıllı malzemeler karakteristik özelliklerine göre organize edilerek gruplandırılabilir (Addington ve Schodek 2005). Bu gruplandırma; nitelik değişimi (property change), enerji değişimi (energy exchange), ayrık boyut/konum (discrete size/location) ve tersinirlik (reversibility) kavramlarını içermektedir.

- Nitelik değişimi: Akıllı malzemeler ortam koşullarındaki bir değişikliğe tepki olarak bir veya birden fazla niteliğini (kimyasal, termal, mekanik, manyetik, optik ve/veya elektriksel) değiştirmektedir.
- Enerji değişimi: Akıllı malzemeler bir çıktı enerjisi üretmek için bir girdi enerjisini başka bir forma dönüştürmektedir.
- Ayrık boyut/konum: Akıllı bir malzemeden oluşan bir bileşen veya element, geleneksel malzemelerden oluşan benzer bir yapıdan çok daha küçük olabilmekte ve daha az altyapı desteği gerektirmektedir. Daha küçük boyut, nitelik değişiminin veya enerji değişiminin doğruluğu ile birleştiğinde, malzemelerin özellikle sensörler olarak etkili olmasını sağlamaktadır. Sensörler, akıllı malzeme ve sistemlerin daha hızlı tepki vermesine olanak tanımaktadır.
- Tersinirlik: Malzemede gerçekleşen “nitelik değişimi” veya “enerji değişimi” tersine çevrilebilir.

Akıllı malzemeler, yüksek oranda uygulandıkları yapı endüstrisi ve mimari tasarım alanında önemli faydalar sağlamaktadır. Artmakta olan ekolojik problemler karşısında sürdürülebilir mimari için uygun kullanım alanları oluşurmaktadır. Temel amaç, uygun akıllı malzemeyi tercih ederek yapıya katkıda bulunabilecek değişimleri sağlayan yapı bileşenlerinin kullanılmasıdır. Akıllı malzemeler, enerji ve malzeme akışını optimize ederek yapının uzun ömürlü, yüksek mukavemetli ve hafif olmasını mümkün kılmaktadır (Temel, 2021).

2.2. Akıllı Malzemelerin Sınıflandırılması

Akıllı malzemeler, birçok bileşen ve uygulamada geleneksel malzemelerin yerine kullanılmalarının yanı sıra, yapısındaki aktif davranış akıllı malzemeleri aynı zamanda bir teknoloji unsuru olarak uygulanabilir kılmaktadır. Örneğin; bir akıllı malzeme aynı anda bir cam malzemesi, bir pencere, bir perde duvar sistemi, bir aydınlatma kontrol sistemi veya otomatik bir gölgeleme sistemi olabilmektedir. Bu özelliği sebebiyle akıllı malzemelerin geleneksel sistemlere göre ele alınarak sınıflandırması yapılamamaktadır. Normatif sınıflandırmada ürün birkaç farklı kategoriye ayrılırken, malzemenin çok yönlü karakterinin ve performansının dikkate alınması güçleşmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Literatürde akıllı malzeme sınıflandırmaları temelde benzer özellikler taşımaktadır. Ancak malzemenin davranış özelliklerine ve tepki verdiği uyaranlara bağlı olarak farklı Şekillerde ele

alınmaktadır. Bu bölümde Michelle Addington ve Daniel Schodek (2005), Axel Ritter (2007) ve Marco Casini (2016)'nin akıllı malzeme sınıflandırma yöntemleri incelenmektedir.

Michelle Addington ve Daniel Schodek "Smart Materials and New Technologies" (2005) kitabında akıllı malzemeleri davranış özelliklerine göre; özellik değiştiren ve enerji alışverişi yapan olarak iki ayrı grupta sınıflandırmakta ve enerji alışverişi yapan akıllı malzemeleri, uyaran-tepki ilişkisini ele alarak, tek yönlü ve çift yönlü (tersinir) olarak ayırmaktadır (Tablo3).

Tip 1 Özellik Değiştiren Malzemeler	Uyaran	Tepki
Termokromik	Sıcaklık Farkı	Renk Değişimi
Fotokromik	Radyasyon (Işık)	Renk Değişimi
Mekanokromik	Deformasyon	Renk Değişimi
Kemokromik	Kimyasal Konsantrasyon	Renk Değişimi
Elektrokromik	Potansiyel Elektrik Farkı	Renk Değişimi
Sıvı Kristal	Potansiyel Elektrik Farkı	Renk Değişimi
Asılı Parçacık	Potansiyel Elektrik Farkı	Renk Değişimi
Elektroreolojik	Potansiyel Elektrik Farkı	Sertlik/Viskozite Değişimi
Manyetoreolojik	Potansiyel Elektrik Farkı	Sertlik/Viskozite Değişimi
Tip 2 Enerji Alışverişi Yapan Malzemeler	Uyaran	Tepki
Elektrolüminesans	Potansiyel Elektrik Farkı	Işık
Fotolüminesans	Radyasyon	Işık
Kemolüminesans	Kimyasal Konsantrasyon	Işık
Termolüminesans	Sıcaklık Farkı	Işık
Işık Yayan Diot	Potansiyel Elektrik Farkı	Işık
Fotovoltaik	Radyasyon (Işık)	Potansiyel Elektrik Farkı
Tip 2 Enerji Alışverişi Yapan (Tersinir)	Uyaran	Tepki
Piezoelektrik	Deformasyon	Potansiyel Elektrik Farkı
Piroelektrik	Sıcaklık Farkı	Potansiyel Elektrik Farkı
Termoelektrik	Sıcaklık Farkı	Potansiyel Elektrik Farkı
Elektrostriktif	Potansiyel Elektrik Farkı	Deformasyon
Manyetostriktif	Manyetik Alan	Deformasyon

Tablo 3. Akıllı malzeme sınıflandırması (Addington ve Schodek, 2005)

- Tip 1: Ortam koşullarındaki bir değişime tepki olarak özelliklerinden birini (kimyasal, mekanik, optik, elektrik, manyetik veya termal) harici kontrol gerektirmeden değiştiren bir malzemedir.
- Tip 2: İstenen son durumu elde etmek için enerjinin bir formdan diğerine dönüştüğü bir malzeme veya cihazdır (Addington ve Schodek, 2005).

Addington ve Schodek (2005)'e göre Tip 1 ve Tip 2 kategorileri arasında temel bir fark bulunmaktadır. Enerji alışverişi yapan akıllı malzemeler; özellik değiştiren akıllı malzemelerin aksine, bir işlevi gerçekleştirecek şekilde birkaç malzemedен oluşan sistemlerle ilişkilidir.

Axel Ritter "Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design" (2007) kitabındaki sınıflandırmada akıllı malzemeler için tetikleyici uyarıları; ışık, ultraviyole ışığı, sıcaklık, basınç, elektrik alanı, manyetik alan, kimyasal çevre olarak tanımlamakta ve davranış özelliklerine bağlı olarak özellik değiştiren, enerji alışverişi yapan ve madde alışverişi yapan akıllı malzemeler olarak üç gruba ayırmaktadır (Tablo 4).

Özellik Değiştiren Akıllı Malzemeler	
Şekil Değiştiren Akıllı Malzemeler	: Fotostriktif, Termostriktif, Elektroaktif, Piezoelektrik, Kemostriktif, Manyostriktif
Renk ve Optik Değiştiren Akıllı Malzemeler	: Fotokromik, Termokromik/Termotropik, Kemokromik, Elektrokromik/Elektrooptik, Mekanokromik
Adezyon Değiştiren Akıllı Malzemeler	: Fotoadezyon, Termoadazyon, Elektroadezyon, Hidroadezyon, Biyoadezyon
Enerji Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler	
Işık Yayan Akıllı Malzemeler	: Fotolüminesans, Elektrolüminesans, Kemolüminesans, Biyolüminesans, Radyolüminesans, Kristallüminesans, Radyofotolüminesans, Tribolüminesans
Elektrik Üreten Akıllı Malzemeler	: Fotoelektrik, Termoelektrik (Piroelektrik), Piezoelektrik, Kemoelektrik
Enerji Depolayan Akıllı Malzemeler	: Isı Depolayan, Işık Depolayan, Elektrik Depolayan, Hidrojen Depolayan
Madde Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler	
Gaz/Su Depolayan Akıllı Malzemeler	
Partikül Depolayan Akıllı Malzemeler	

Tablo 4. Akıllı malzeme sınıflandırması (Ritter, 2007)

Marco Casini “Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance” (2016) kitabında akıllı malzemeleri harici enerji alanına verilen reaksiyon türüne göre; özellik değiştiren ve enerji alışverişi yapan olarak iki ayrı grupta sınıflandırmakta ve enerji alışverişi yapan akıllı malzemeleri, çevresel uyaran-tepki ilişkisini dikkate alarak, tek yönlü ve çift yönlü (tersinir) olarak ayırmaktadır (Tablo 5).

Özellik Değiştiren Malzemeler	Çevresel Uyarın	Tepki
Termokromik	Sıcaklık Farkı	Renk Değişimi
Fotokromik	UV Radyasyon	Renk Değişimi
Mekanokromik	Deformasyon	Renk Değişimi
Kemokromik	Kimyasal Konsantrasyon	Renk Değişimi
Elektrokromik	Elektriksel Gerilim	Renk Değişimi
Sıvı Kristal	Elektriksel Gerilim	Renk Değişimi
Asılı Parçacık	Elektriksel Gerilim	Renk Değişimi
Fotokatalitik	UV Radyasyon	Kimyasal Tepki
Termotropik	Sıcaklık Farkı	Faz Değişimi
Elektroreolojik	Elektriksel Gerilim	Viskozite Değişimi
Manyetoreolojik	Manyetik Alan	Viskozite Değişimi
Şekil Hafızalı	Sıcaklık Farkı	Kristal Faz Değişimi
Enerji Alışverişi Yapan Malzemeler	Çevresel Uyarın	Tepki
Elektrolüminesans	Elektriksel Gerilim	Görünür Işık Emisyonu
Fotolüminesans	Radyasyon	Görünür Işık Emisyonu
Kemolüminesans	Kimyasal Konsantrasyon	Görünür Işık Emisyonu
Termolüminesans	Sıcaklık Farkı	Görünür Işık Emisyonu
Fotovoltaik	Güneş Radyasyonu	Elektriksel Gerilim
Çift Yönlü Enerji Alışverişi Yapan Malzemeler	Çevresel Uyarın	Tepki
Piezoelektrik	Deformasyon	Elektriksel Gerilim
Termoelektrik	Sıcaklık Farkı	Elektriksel Gerilim
Piroelektrik	Sıcaklık Farkı	Elektriksel Gerilim
Elektrokimyasal	Kimyasal Konsantrasyon	Elektriksel Gerilim
Elektrostriktif	Elektriksel Gerilim	Deformasyon
Manyetostriktif	Manyetik Alan	Deformasyon

Tablo 5. Akıllı malzeme sınıflandırması (Casini, 2016)

Akıllı malzemelerle ilgili detaylı çalışmalar yapan Addington ve Schodek (2005), Ritter (2007) ve Casini (2016) araştırmalarında benzer yöntemler kullanmaktadır. Addington ve Schodek (2005) ve Casini (2016) malzeme odaklı bir inceleme yaparken, Ritter (2007) ise genel başlıkları tekrar alt başlıklara ayırarak akıllı malzemeleri incelemektedir. Bir diğer ayırımın ise madde alışverişi yapan akıllı malzemeler başlığı olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında, genel başlıkları daha kapsamlı bir şekilde alt başlıklara ayırarak inceleyen Ritter (2007)'in sınıflandırma yöntemi ele alınmaktadır. Yapılan detaylı sınıflandırma içerisinde tasarımcılar ve mimarlar tarafından deneysel çalışma yapılmış ya da uygulama alanı bulmuş akıllı malzemeler incelenmektedir (Tablo 6).

Özellik Değiştiren Akıllı Malzemeler	
şekil Değiştiren Akıllı Malzemeler	: Termotriktif, Elektroaktif
Renk ve Optik Değiştiren Akıllı Malzemeler	: Fotokromik, Termokromik/Termotropik, Elektrokromik/Elektrooptik
Adezyon Değiştiren Akıllı Malzemeler	: Fotoadezyon
Enerji Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler	
Işık Yayan Akıllı Malzemeler	: Fotolüminesans, Elektrolüminesans
Elektrik Üreten Akıllı Malzemeler	: Fotoelektrik, Termoelektrik, Piezoelektrik
Enerji Depolayan Malzemeler	: Isı Depolayan
Madde Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler	
Gaz/Su Depolayan Akıllı Malzemeler	

Tablo 6. Mimarlık alanında kullanım olanağı veya potansiyeli bulunan akıllı malzemeler (Ritter, 2007)

2.2.1. Özellik Değiştiren Akıllı Malzemeler

Özellik değiştiren akıllı malzemeler; ortam koşullarındaki bir değişime tepki olarak kimyasal, mekanik, optik, elektrik, manyetik veya termal özelliklerini değiştirebilen malzemelerdir (Addington ve Schodek, 2005). Bu malzemeler; şekil değiştiren, renk ve optik değiştiren ve adezyon değiştiren akıllı malzemeler olarak üç alt başlıkta incelenmektedir.

2.2.1.1. Şekil Değiştiren Akıllı Malzemeler

Şekil değiştiren akıllı malzemeler; ışık, sıcaklık, basınç, bir elektrik veya manyetik alan ya da kimyasal bir uyarının etkisiyle bir veya daha fazla uyarana tepki olarak şekillerini ve/veya boyutlarını tersinir olarak değiştirebilen malzemeleri ve ürünleri içermektedir. Bunlar arasında, boyutlarını değiştirmeden şekillerini değiştirebilen malzemeler ve ürünler ile şekillerini değiştirmeden boyutlarını değiştirebilen malzemeler ve ürünler bulunmaktadır. Bazıları her iki parametreyi de aynı anda değiştirebilmektedir (Ritter, 2007). Şekil değiştiren akıllı malzemeler, tetikleyici uyarılarına göre ayırt edilebilmektedir (Tablo 7).

Fotostriktif Akıllı Malzemeler
Işık etkisi (elektromanyetik enerji) ile uyarılır.
Termostriktif Akıllı Malzemeler
Sıcaklığın etkisi (termal enerji) ile uyarılır.
Piezoelektrik Akıllı Malzemeler
Basınç veya gerilimin etkisi (mekanik enerji) ile uyarılır.
Elektroaktif Akıllı Malzemeler
Bir elektrik alanının etkisi (elektrik enerjisi) ile uyarılır.
Manyetostriktif Akıllı Malzemeler
Bir manyetik alanın etkisi (manyetik enerji) ile uyarılır.
Kemostriktif Akıllı Malzemeler
Kimyasal ortamın etkisi (kimyasal enerji) ile uyarılır.

Tablo 7. Şekil değiştiren akıllı malzemeler (Ritter, 2007)

Termostriktif, piezoelektrik ve elektroaktif akıllı malzemeler uzun süreli kararlı yapıları sayesinde günümüzde mimarlık alanında tercih edilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde termostriktif ve elektroaktif akıllı malzemeler incelenmektedir. Piezoelektrik akıllı malzemeler aynı zamanda elektrik üreten akıllı malzemeler alt başlığında yer aldığından bu bölümde açıklanmamaktadır.

Termostriktif Akıllı Malzemeler

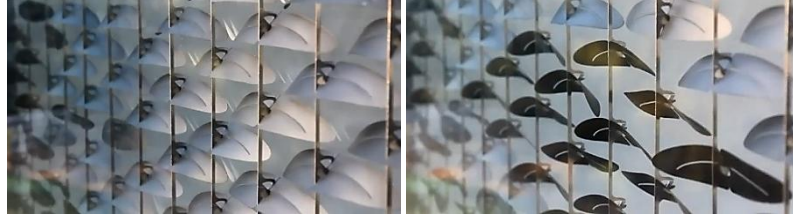
Termostriktif akıllı malzemeler, ortam sıcaklığı değişikliklerine tepki olarak şekillerini ve/veya boyutlarını tersinir olarak değiştirebilen özelliklere sahiptir. Sıcaklık değişimleri malzemenin iç termal durumunu yüzeyinden doğal çevresine sürekli olarak ayarladığı pasif bir etki göstermesini sağlamaktadır. Ayrıca ısıtma veya soğutma yoluyla aktif bir etkiye sahip olabilmektedir. Aktif ısıtma, bir elektrik alanının uygulanmasıyla doğrudan ısıtma veya radyasyon ya da ısı iletimiyle dolaylı ısıtma olabilmektedir (Ritter, 2007). Mimarlık alanında en yaygın olarak bilinen çeşitleri; termal genişleme malzemeleri, termobimetaller ve şekil hafızalı alaşımlardır.

Termal genişleme malzemeleri (TEM) belirgin şekilde pozitif, negatif veya neredeyse sıfır olan bir termal genişleme katsayısına sahip malzemelerdir. Bu malzemeler; pozitif termal genişleme malzemeleri (PTM), negatif termal genişleme malzemeleri (NTEM) ve sıfır termal genişleme malzemeleri (ZTEM) olarak adlandırılmaktadır (Ritter, 2007).

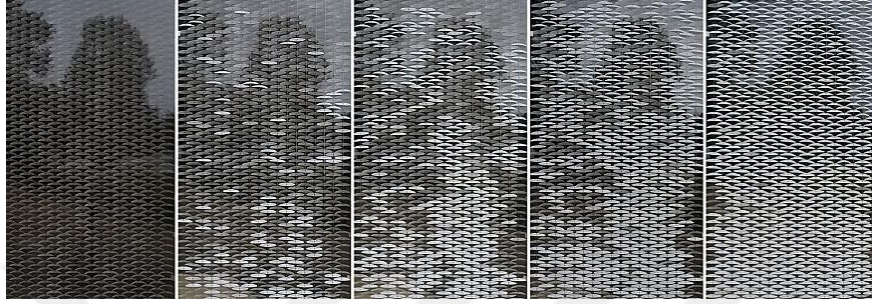
Termal genişleme malzemeleri mimarlık alanında bazı uygulamalar için yeni olanaklar sunmaktadır. Merkezi olmayan oda havalandırma sistemlerinde bina cephelerinde aktüatör veya konumlandırıcı olarak kullanılmaktadır. Kapalı odaların havalandırılmasını sağlamak için belirli sıcaklıklarda açılıp kapanan otomatik havalandırma ünitelerinde bulunmaktadır. Genellikle çatılarda veya bina cephelerinde hareket eden özel havalandırma elemanları olarak tercih edilmektedir. Termal genişleme malzemeleri yağmurlama sistemlerindeki cam ampullerde bileşen olarak yer almaktadır (Yağlı, 2019).

Termobimetaller (TB), farklı termal genişleme katsayılarına sahip metallere oluşan lamine kompozit malzemelerdir. Örneğin; kaplama ile birbirine bağlanmış en az iki bileşenden, bantlardan veya şeritlerden oluşmaktadır. Düşük termal genişleme katsayısına sahip olan bileşene pasif, yüksek katsayıya sahip olan bileşene aktif denmektedir (Akgün, 2020).

Termobimetaller, yeşil binalarda otomatik olarak açılan ve kapanan havalandırma kapakları için geliştirilmiş ve yangın koruma kapaklarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Ayrıca yanma gazlarının binanın diğer bölümlerine geçmesini ve kapının bükülmesini engellemek amacıyla termobimetallere dayalı sıkıştırma mekanizmaları da geliştirilmiştir (Ritter, 2007). Dış ortamdaki sıcaklıklara tepki verebilecek cepheler için kendi kendine çalışan ve hava giriş-çıkış açıklıklarına sahip sistemlerin geliştirilmesi üzerine araştırmalar devam etmektedir. Bu sistemlerin; panjur görevi görerek, yapının ısı kazancını ve yapay iklimlendirme ihtiyacını azaltarak enerji tasarrufu sağlayabileceği ön görülmektedir (Andrade vd., 2021).



Şekil 1. Termobimetal elemanların termal genişleme ile gölgeleme sağlanması, Doris Sung (2018) (URL-1)



Şekil 2. Kendinden gölgelendirme pencereleri, InVert Auto-Shading Windows, Doris Sung (2018)

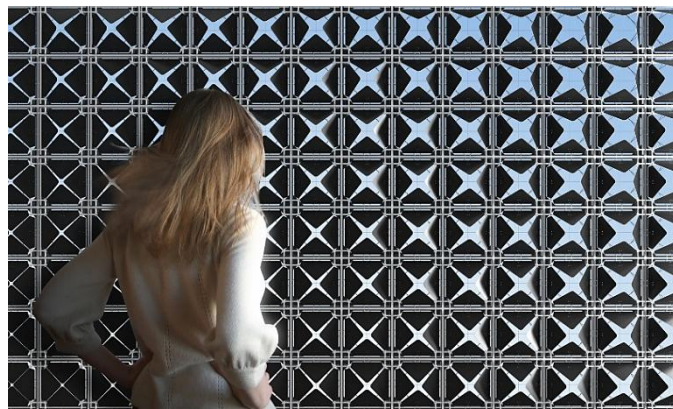
Şekil hafızalı alaşımlar, ortam sıcaklığındaki değişimin etkisiyle şeklini değiştirmekte ve bu özelliği sebebiyle termobimetalere benzemektedir. Ancak şekil hafızalı alaşımlarda şekil değişikliği iki ayrı malzemenin özelliklerindeki farklılıklarla önceden tanımlanmamıştır. Şekildeki değişimin nasıl ve ne zaman gerçekleşmesi gerektiğine alaşımın moleküler yapısı karar vermektedir (Modin, 2014).

Şekil hafızalı alaşımlar (SMA), şekil hafızalı metaller veya bellek metalleri olarak da adlandırılmaktadır. En az iki farklı metal bileşenden oluşmakta ve termomekanik bir işlemde sonra daha önceden tasarlanmış bir şekli sıcaklığa bağlı ve tersinir olarak geri alma özelliğine sahiptir. Bu özellik, iki kristal yapı arasında oluşan tekrarlanabilir bir faz değişikliğinden kaynaklanmaktadır (Ritter, 2007).

Şekil hafızalı alaşımlarda moleküler bir yeniden düzenleme meydana gelmektedir. Örneğin; yüksek bir sıcaklıkta malzemenin orijinal şekli tasarlanabilmekte, düşük bir sıcaklıkta malzeme deforme olabilmekte ve daha sonra malzemeye bir elektrik akımı da dahil olmak üzere herhangi bir biçimde ısı uygulandığında orijinal şekline geri dönebilmektedir. Yüksek sıcaklık fazına östenit durumu, daha düşük sıcaklık fazına martenzit durumu denmektedir. Östenit ve martenzit durumundaki malzemenin fiziksel yapılarında farklılıklar bulunmaktadır. Östenit durumundaki malzeme güçlü ve sertken, martenzit durumundaki malzeme yumuşak ve sünek (Addington ve Schodek, 2005).

Şekil hafızalı alaşımların kendine özgü, anlık ve tasarlanabilen tepkileri sayesinde akıllı malzeme sistemlerindeki pek çok parametrenin kontrol edilmesinde ve ayarlanmasında kullanılmaktadır. Şekil hafızalı alaşımların akıllı sistemlere; şekil, pozisyon (yer), uzama, sönümlenme, bükülmezlik, sürtünme, buhar geçirgenliği ve yüzey gerilimindeki değişiklikler gibi farklı katkılar sağladığı görülmektedir (Bedeloğlu, 2011). Yapı uygulamalarındaki kullanım alanları; güneş kırıcı eleman, yenilikçi kolon (betonarme köprü kolonu), akustik panel, klimalardaki sensör/aktüatör, deprem damperi ve yangın güvenlik valfi şeklindedir (Gezer ve Aksu, 2021).

Şekil hafızalı alaşımların mimaride olası birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Yangın anında yanıcı ve zehirli gazların çıkmasını engelleyecek şekilde tasarlanan yangın güvenlik valfleri bu uygulamalardan birine örnek olarak verilebilir (Ayvaz, 2019). Şekil hafızalı alaşımlar, sabit sıcaklıklarda konvansiyonel metallerle göre daha elastik olma özelliği göstermektedir. Süper elastisite olarak adlandırılan bu özellikleri sayesinde yapıların deprem dayanımını arttırmak amacıyla kullanımları mümkün olabilmektedir. Devam eden araştırmalarda, deprem yüklerini dağıtmak üzere, kritik noktalarda (kolon-kiriş bağlantıları) veya aktif yapısal kontrol sistemlerinde (deprem damperleri) şekil hafızalı alaşımların kullanımı detaylı olarak incelenmektedir (Çakmaklı vd., 2015). Cephelerde termal ve görsel konfor sağlama potansiyeli bulunmaktadır. Örneğin, güneş ışığı ile uyarılan ve güneş hareketine göre açılıp kapanabilen gözeneklere sahip şekil hafızalı alaşım sistemleri iç ortamın kontrolsüz ısınmasını önleyebilmektedir.



Şekil 3. Şekil hafızalı alaşım kullanılan cephelerde doğal havalandırma sistemi, The Air Flower (2013) (URL-2)

Elektroaktif Akıllı Malzemeler

Elektroaktif akıllı malzemeler, ortam koşullarındaki bir elektriksel uyarana tepki olarak şekillerini değiştirmektedir. Bu malzemeler; elektroaktif polimerleri, elektrostriktif kağıtları, elektrostriktif seramikleri ve elektrostriktif graft elastomerleri içermektedir (Ritter, 2007). Bu bölümde mimaride potansiyel kullanım alanı bulunan elektroaktif polimerler anlatılmaktadır.

Elektroaktif polimerler (EAP), malzemeye uygulanan bir elektrik alanının mukavemetindeki bir değişikliğe tepki olarak elektriksel iletkenliklerini değiştiren malzemelerdir. Malzemede molekülleri belirli bir düzende hizalayan ve elektronları serbest bırakan moleküler bir yeniden düzenleme meydana gelmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Elektroaktif polimerler, akıllı sistemler içerisinde yer alabilmektedir. Ayrıca sensörler ve aktüatörler oluşturulmasında da kullanılabilir (Ritter, 2007). Eğrilen, genişleyen veya daralan elektroaktif polimer esaslı aktüatörler; uygun geometri seçimi, kısıtlama şekli ve yapısı ile oluşturulabilmektedir.

Elektroaktif polimerler için birçok farklı potansiyel uygulama alanı bulunmaktadır. Biyolojik kaslarla olan davranış benzerlikleri sebebiyle “yapay kaslar” üretmek için kullanılabilir. Elektroaktif polimerlerin günümüzde biyomimetik alanında kullanımları araştırılmaktadır. Örneğin, balık yüzgeci hareketlerini taklit etme üzerine denemeler yapılmıştır (Ümütlü, 2020). İlerleyen zamanlarda mimarlık alanında elektriksel olarak deforme olabilen duvar kaplamalarında veya duvar kağıdında çeşitli dokular üretmek için elektroaktif polimer filmlerinden geniş yüzey oluşturucu bileşenler yapılabileceği ön görülmektedir (Yağlı, 2019).

2.2.1.2. Renk ve Optik Değiştiren Akıllı Malzemeler

Renk ve optik değiştiren akıllı malzemeler; harici bir enerji kaynağındaki bir değişikliğin malzemenin emilimi, yansıması veya iletilmesi ile optik özelliklerinde bir özellik değişikliği ürettiği malzeme sınıfını oluşturmaktadır. Bu sebeple “renk değiştiren” malzemeler gerçek anlamda renk değiştirmemektedir. Optik özelliklerini bir renk değişimi olarak algıladığımız farklı uyarılar (örneğin; ısı, ışık veya kimyasal bir ortam) etkisiyle değiştirmektedir. Renk algılaması harici faktörlere (ışık ve insan gözünün doğası) ve yukarıda belirtilen iç faktörlere bağlı olmaktadır (Addington ve Schodek, 2005).

Renk ve optik olarak değişen akıllı malzemeler; ışık, sıcaklık, basınç, bir elektrik veya manyetik alan ya da kimyasal bir uyarının etkisiyle bir veya daha fazla uyarana tepki olarak renklerini ve/veya optik özelliklerini tersinir olarak değiştirebilen malzemeleri ve ürünleri içermektedir (Ritter, 2007). Renk ve optik değiştiren akıllı malzemeler, tetikleyici uyarılarına göre ayırt edilebilmektedir (Tablo 8).

Fotokromik Akıllı Malzemeler
Işığın etkisi (elektromanyetik enerji) ile uyarılarak renklerini değiştirir.
Termokromik/Termotropik Akıllı Malzemeler
Sıcaklığın etkisi (termal enerji) ile uyarılarak renklerini ve/veya optik özelliklerini değiştirir.
Mekanokromik Akıllı Malzemeler
Sıkıştırma, gerginlik veya sürtünme etkisi (mekanik enerji) ile uyarılarak renklerini değiştirir.
Elektrokromik/Elektrooptik Akıllı Malzemeler
Elektrik alanları, elektronlar veya iyonların etkisi (elektrik enerjisi) ile uyarılarak renk ve/veya optik özelliklerini değiştirir.
Kemokromik Akıllı Malzemeler
Kimyasal bir ortamın etkisi (kimyasal enerji) ile uyarılarak renklerini ve/veya optik özelliklerini değiştirir.

Tablo 8. Renk ve optik değiştiren akıllı malzemeler (Ritter, 2007)

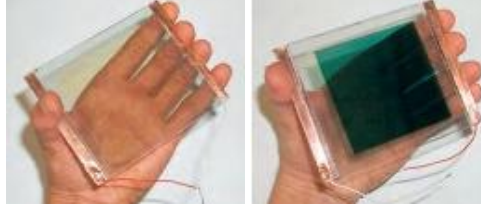
Fotokromik, termokromik/termotropik ve elektrokromik/elektrooptik akıllı malzemeler kullanılabilir olmaları ve uzun süreli kararlı yapıları sayesinde günümüzde mimarlık alanında tercih edilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde fotokromik, termokromik/termotropik ve elektrokromik/elektrooptik akıllı malzemeler incelenmektedir.

Fotokromik Akıllı Malzemeler

Fotokromik akıllı malzemeler, ışığa (görünür ışık, UV ışığı, IR ışığı; elektromanyetik radyasyon) tepki olarak renklerini değiştirmektedir. Bu malzemeler; fotokromik pigmentleri, fotokromik camları ve fotokromik plastikleri (fotokromik polimerler) içermektedir. Fotokromik malzemeler, fotokromikler ve ultraviyole (UV)'ye duyarlı malzemeler, ışığa tepki olarak renklerini tersinir olarak değiştirebilen özelliklere sahip malzemeler veya bileşenlerdir (Ritter, 2007).



Şekil 4. Fotokromik pigmentlerin ışık etkisi ile renk değiştirme aşamaları (Ritter, 2007)



Şekil 5. Fotokromik camın ışık uyararı etkisinin gösterimi (Ritter, 2007)

Fotokromik malzemeler (PC), ultraviyole alanındaki elektromanyetik enerjiyi absorbe ederek dahili bir özellik değişikliği üretmektedir. Malzeme, gelen enerji yoğunluğuna bağlı olarak görünür spektrumun yansıtıcı ve emici kısımları arasında geçiş yapmaktadır. Belirli bir dalga boyundaki fotonlara maruz bırakıldığında, moleküler strüktür uyarılmış bir duruma dönüştürülmekte ve görünür spektrumdaki daha uzun dalga boylarında yansıtmaya başlamaktadır. Ultraviyole ışık kaynağının uzaklaştırılması ile molekül orijinal durumuna geri dönmektedir (Akgün, 2020). Örneğin, fotokromik film belirli dalga boylarını (saydam mavi gibi) yansıtmaya veya iletmeye başladığında güneş ışığına maruz kalana kadar saydam ve renksiz olabilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Fotokromik malzemeler genel olarak cam teknolojisinde tercih edilmektedir. Mimaride cephe uygulamalarında ve çeşitli pencerelerde güneş enerjisi kazancını kontrol etmek ve parlaklığını azaltmak için kullanılabilir (Addington ve Schodek, 2005). Fotokromik camlar, HVAC (ısıtma, soğutma ve iklimlendirme) sistemine duyulan ihtiyacı azaltarak yapının enerji tüketiminde tasarruf sağlamaktadır. İç mekandaki parlamayı engelleyerek dışarıdan gelen ultraviyole ışıklarına karşı korumaktadır. Dolayısıyla yapılarda herhangi bir gölgeleme elemanına (perde veya panjur) ihtiyaç duyulmamaktadır (Yaşar vd., 2010). Pencerelerde ve cephelerde fotokromik camın kullanımı potansiyeli yüksek bir uygulama olmasına rağmen; uyarana yavaş tepki vermeleri, ısıya karşı hassasiyetleri, uzun süreli davranışları ve yüksek üretim maliyetleri sebebiyle beklenen ilgiyi görememektedir.

Termokromik/Termotropik Akıllı Malzemeler

Termokromik akıllı malzemeler, renklerini ve/veya optik özelliklerini tersinir olarak değiştirerek sıcaklığa (termal enerji) tepki vermektedir (Ritter, 2007). Bu malzemeler; termokromik pigmentleri, termokromik camları, termokromik plastikleri (termokromik polimerleri) ve termotropik camları içermektedir.

Termokromik malzemeler (TC) ve termokromikler, sıcaklığa tepki olarak renklerini tersinir olarak değiştirebilen özelliklere sahip malzemeler veya bileşenlerdir. Bunun yanı sıra, termotropik malzemeler (TT) ve termotropikler, sıcaklığa tepki olarak optik özelliklerini (örneğin, opaklık) tersinir olarak değiştirebilen özelliklere sahip malzemeler veya bileşenlerdir (Ritter, 2007).

Termokromik renk değişimi genellikle tersinir olmasının yanı sıra geri dönüşü olmayan renk değişimi gösteren termokromik malzemeler de bulunmaktadır (Ümütlü, 2020). Termokromik etki, malzemenin türüne bağlı olarak belirli sıcaklıkta ani bir biçimde olabilmekte veya bir sıcaklık aralığında kademeli olarak gerçekleşebilmektedir. Farklı sıcaklık aralıklarında farklı renklerde olabilmekte ve renk değişimlerini sayısız defa tekrarlayabilmektedir (Ferrara ve Bengisu, 2014).



Şekil 6. Termokromik malzemelerin dokunma hafızası (Addington ve Schodek, 2005)

Termokromik malzeme uygulamaları mimarlık alanında fotokromik malzemelere göre daha yaygındır. Termokromik malzemelerin en yaygın kullanım alanı cam yüzeylerdir (Yağlı, 2019). Cam yüzeylerde kullanımı yapı içerisine giren ışık miktarını otonom olarak düzenlemede, enerji tasarrufu sağlamada ve parlamayı önlemede etkili olmaktadır. Benzer şekilde, termotropik malzemelerin yaygın kullanım alanı cam yüzeylerdir. Ancak bu malzemelerin yalnız sıcaklıktaki değişimlerden etkilenmesi, kullanıcının konforuna göre kontrol edilememesi ve kullanıcının dış mekanla görsel ilişkisini sınırlamasından dolayı genellikle tercih edilmemektedir (Pahlavan, 2011).



Şekil 7. Termotropik malzeme kullanılan camın opaklık durumu (Pahlavan, 2011)

Termokromik malzemeler, cam yüzeyler haricinde boyaların yapısına entegre edilerek duvar yüzeylerinde ve mobilyalarda; seramiklerin yapısına entegre edilerek lavabolarda ve banyolarda kullanılmaktadır. Örneğin, banyolarda termokromik malzeme entegre edilmiş seramik duvar karolarının kullanımı esnasında, seramikler aşamalı olarak renklenerek suyun sıcaklığını göstermektedir (Akgün, 2020). İç mekan duvarlarına termokromik pigmentli boyalar uygulanabilmektedir. Yapı cephelerinde termokromik boyaların kullanımı tasarım anlamında yüksek potansiyele sahip olsa da termokromik boyaların güneş ışığındaki ultraviyole ışığına maruz kalması, malzemenin yapısının bozulmasına ve renk değiştirme yeteneğini kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple termokromik boyaların günümüzde cephelerde kullanımı mümkün değildir (Addington ve Schodek, 2005).

Elektrokromik/Elektrooptik Akıllı Malzemeler

Elektrokromik akıllı malzemeler, renklerini ve/veya optik özelliklerini tersinir olarak değiştirerek elektrik alanlarına tepki vermektedir. Bu malzemeler; polimer dispersiyonlu sıvı kristalleri içeren elektrooptik cam sistemlerini, askıda partikül cihazları içeren elektrooptik cam sistemlerini, metal oksitleri içeren elektrokromik cam sistemlerini içermektedir.

Elektrokromik malzemeler (EC) ve elektrokromikler, ışığa tepki olarak renklerini tersinir olarak değiştirebilen malzemeler veya bileşenlerdir. Bunun yanı sıra, elektrooptik malzemeler (EO), sıcaklığa tepki olarak optik özelliklerini (örneğin; şeffaflık veya opaklık) tersinir olarak değiştirebilen özelliklere sahip malzemeler veya bileşenlerdir (Ritter, 2007).

Elektrokromik etki, bir elektrik akımının veya potansiyelinin uygulanmasından kaynaklanan bir malzemenin tersinir bir renk değişimi gerçekleştirmesidir. Örneğin, elektrokromik bir cam elektrik akımı ile rengini koyulaştırmakta veya açmaktadır. Düşük bir voltaj cam malzemesinin koyulaşmasına neden olurken, voltajı tersine çevirmek camın renginin açılmasını sağlamaktadır (Yağlı, 2019).

Elektrikle aktive edildiğinde renk ve optik özelliklerini değiştirebilen; elektrokromikler, elektrooptik sıvı kristaller ve elektrooptik asılı parçacıklar olmak üzere üç ana malzeme sınıfı

bulunmaktadır. Bu malzemeler birlikte çalışan farklı malzemelerin çok katmanlı birleşimlerinden meydana gelmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Elektrokromik camlar, istenmeyen güneş ısısını ve parıltısını absorbe ederek iç mekanda optimum konforu sağlarken aynı zamanda yapıların enerji tasarrufunda etkili olmaktadır. Parlamayı kontrol ederek kullanıcının dış mekanla görsel ilişkisini sınırlamadan bir renk değişimi gerçekleştirmektedir. Kullanıcılar tarafından manuel veya bina yönetim sistemi (BMS) tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir (Akgün, 2020). Elektrooptik camlar ise elektrik akımının etkisi ile şeffaflık durumunu değiştirmektedir. Şeffaflık derecesi kontrol edilemediğinden dolayı sadece şeffaf ya da sadece opak durumda olabilmektedir (Dam ve Daniel, 2015). Elektrooptik camlar, opak duruma getirildiğinde ışık iletimini engellemeden mahremiyet sağladığı için genelde iç mekanlarda bölücü eleman olarak kullanılmaktadır. Elektrochromik camlar sadece başlangıçta elektrik enerjisine ihtiyaç duyarken, elektrooptik camların şeffaf durumda kalabilmesi için sürekli bir elektrik enerjisi gerekmektedir (Oltean, 2006). Bu durum, yapıların enerji yönetimi açısından olumsuz sonuçlar yaratabilmektedir.



Şekil 8. Elektrooptik camın şeffaf ve opak durumunun gösterimi (Ritter, 2007)

2.2.1.3. Adezyon Değiştiren Akıllı Malzemeler

Adezyon değiştiren akıllı malzemeler; bir uyarana tepki olarak bir katı, sıvı veya gaz halindeki bileşenin bir atomunun veya molekülünün adsorpsiyonunun (yüzeğe tutunma) veya absorpsiyonunun (emilim) çekim kuvvetlerini tersinir olarak değiştirebilen malzemeleri ve ürünleri içermektedir. Adezyon değişimi; ışığın, sıcaklığın, bir elektrik alanının veya bir sıvının ve/veya biyolojik bileşenin etkisinden kaynaklanabilmektedir (Ritter, 2007).

Adezyon farklı bileşenlerin atomları ve molekülleri arasındaki çekim kuvvetlerini ifade ederken, kohezyon aynı bileşenin atomları ve molekülleri arasındaki çekim kuvvetini tanımlamaktadır. Adsorpsiyon; bir bileşenin bir atomunun veya molekülünün, emici olan bir malzeme veya ürünün iç yüzeyine tutunmasıdır. Absorpsiyon, bir bileşenin bir atomunun

veya molekülünün, emici olan bir malzeme veya ürünün serbest hacmine dahil edilmesidir (Ritter, 2007). Adezyon değiştiren akıllı malzemeler, tetikleyici uyarılarına göre ayırt edilebilmektedir (Tablo 9).

Fotoadezyon Akıllı Malzemeler
İşığa tepki olarak katı, sıvı veya gaz halindeki bileşenlerin atomlarının veya moleküllerinin adsorpsiyonunun veya absorpsiyonunun çekim kuvvetlerini değiştirmesidir.
Termoadezyon Akıllı Malzemeler
Sıcaklığa tepki olarak katı, sıvı veya gaz halindeki bileşenlerin atomlarının veya moleküllerinin adsorpsiyonunun veya absorpsiyonunun çekim kuvvetlerini değiştirmesidir.
Elektroadezyon Akıllı Malzemeler
Bir elektrik alanına tepki olarak katı, sıvı veya gaz halindeki bileşenlerin atomlarının veya moleküllerinin adsorpsiyonunun veya absorpsiyonunun çekim kuvvetlerini değiştirmesidir.
Hidroadezyon Akıllı Malzemeler
Sıvı bileşenlere (örneğin, su) tepki olarak katı, sıvı veya gaz halindeki bileşenlerin atomlarının veya moleküllerinin adsorpsiyonunun veya absorpsiyonunun çekim kuvvetlerini değiştirmesidir.
Biyoadezyon Akıllı Malzemeler
Biyolojik bileşenlere (örneğin, bakteriler) tepki olarak katı, sıvı veya gaz halindeki bileşenlerin atomlarının veya moleküllerinin adsorpsiyonunun veya absorpsiyonunun çekim kuvvetlerini değiştirmesidir.

Tablo 9. Adezyon değiştiren akıllı malzemeler (Ritter, 2007)

Fotoadezyon akıllı malzemeler günümüzde mimarlık alanında tercih edilmektedir (Ritter, 2007). Tez çalışmasının bu bölümünde fotoadezyon akıllı malzemeler titanyum dioksit üzerinden incelenmektedir.

Fotoadezyon Akıllı Malzemeler: Titanyum Dioksit

Fotoadezyon akıllı malzemeler, ışığa tepki vererek adezyonlarını tersinir olarak değiştirmektedir (Ritter, 2007). Bu malzemeler, adsorpsiyon veya absorpsiyon ile kendilerine tutunan kirletici maddeleri (uçucu organik bileşikler, azot oksitler vb.) ışık etkisi ile su ve karbondioksite parçalayarak kendini temizleyebilme özelliği göstermektedir (Orhon, 2012).

Fotoadezyon akıllı malzeme olan Titanyum dioksit (TiO₂) mimarlık alanında önemli bir yere sahiptir. Titanyum dioksit, ışıkla aktive edilebilen yarı iletken bir malzemedir. Işık etkisi altındaki malzeme organik maddeleri parçalama eğilimi göstermektedir. Güneş ışığının

sadece %5'ini absorbe edebilse de güneş enerjisinin kimyasal dönüşümü ve depolanması amacıyla kullanılan en iyi yarı iletkenlerdir (Acharya ve Gokhale, 2015).

Fotoadezyon özelliğinin gerçekleşebilmesi için ultraviyole ışığı, oksijen ve neme ihtiyaç duyulmaktadır (Akgün, 2020). Titanyum dioksit ile fotoadezyon özelliğe sahip olan bir yüzeyde reaksiyon ışık etkisiyle başlamaktadır. Reaksiyon için gereken ışık, güneş ışığından gelen ultraviyole olabileceği gibi floresan aydınlatmadan gelen az miktardaki ultraviyole de olabilmektedir (Bilgin, 2014). Işık etkisiyle başlayan reaksiyon sonucu kirletici maddeler parçalanmakta ve su yardımıyla yüzeyden uzaklaştırılmaktadır (Orhon, 2014). Fotoadezyon özelliği bir yapı elemanına titanyum dioksit pigment veya titanyum dioksit film kaplaması ile kazandırılmaktadır (Orhon, 2012).

Fotoadezyon akıllı malzemeler yapılar seramik plakalar, yapı membranları ve cam panelleri şeklinde uygulanabilmektedir (Yağlı, 2019). Titanyum dioksitli seramik plakalar; büyük oranda bakım gerektirmemesi, uzun süreli kullanımı, yangına karşı dayanıklılığı sebebiyle yapılarda tercih edilmektedir. Titanyum dioksitli cam paneller, fotoadezyon özellikleri ile geleneksel cam panellerine oranla daha temiz yüzeylere sahip olmakla beraber doğal ışık geçirgenlikleri de daha yüksektir. Dolayısıyla, aydınlatma için kullanılacak enerji miktarında azalma görülebilmektedir (Bilgin, 2014).

2.2.2. Enerji Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler

Belirli bir malzemenin enerji durumu, çevresinin enerji durumuna eşdeğer olduğunda, o malzeme denge halinde bulunmaktadır. Dolayısıyla hiçbir enerji alışverişi yapılmamaktadır. Malzeme farklı bir enerji durumunda olduğunda enerji alışverişine yönlendiren bir potansiyel oluşmaktadır. Enerji alışverişi yapma özelliği gösteren tüm malzemeler atomik enerji seviyelerini içermektedir. Giriş enerjisi seviyeyi yükseltmekte, çıkış enerjisi ise seviyeyi taban durumuna geri döndürmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Tüm malzemelerin, hem geleneksel hem akıllı, enerji tasarrufu sağlaması gerekmekte ve bu sebeple enerji girildiğinde veya eklendiğinde malzemenin enerji seviyesinde artış görülmektedir. Çoğu malzeme için enerjideki artış malzemenin iç enerjisini genellikle ısı şeklinde artırarak gerçekleşir. Enerji alışverişi yapan akıllı malzemeler, iç enerjiyi daha kullanışlı bir şekilde geri kazanma yeteneğine sahiptir. Genellikle tersinir olarak enerjiyi ısı yerine elektrik veya ışık gibi başka bir tür çıkış enerjisine dönüştürmektedir. Enerji alışverişi yapan akıllı malzemeler; ışık yayan, elektrik üreten ve enerji depolayan akıllı malzemeler olarak üç alt başlıkta incelenmektedir (Ritter, 2007).

2.2.2.1. Işık Yayan Akıllı Malzemeler

Işık yayan akıllı malzemeler, enerji etkisiyle uyarılan moleküllere sahip malzemeleri veya ürünleri içermektedir. Örneğin, ışık veya elektrik alanı etkisiyle ışık yaymaktadır. Bu durum, moleküllerin tekrar ayrılmadan önce geçici süreliğine daha yüksek bir enerji seviyesinde olmasının bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Absorbe edilen enerjinin bir kısmı görünür elektromanyetik radyasyon şeklinde yayılmaktadır. Bu optik yayılma etkisine lüminesans denmektedir (Ritter, 2007). Işık yayan akıllı malzemeler, tetikleyici uyarılarına göre ayırt edilebilmektedir (Tablo 10).

Fotolüminesans Akıllı Malzemeler
Bir molekülün ışığın etkisi ile uyarılarak ışık yaydığı optik bir olaydır.
Elektrolüminesans Akıllı Malzemeler
Bir molekülün bir elektrik alanının etkisi ile uyarılarak ışık yaydığı optik bir olaydır.
Biyolüminesans Akıllı Malzemeler
Canlı bir organizmadaki bir molekülün ışık yayması için uyarılarak kimyasal bir reaksiyonun meydana geldiği optik bir olaydır.
Kemolüminesans Akıllı Malzemeler
Bir molekülün ışık yayması için uyarılarak kimyasal bir reaksiyonun meydana geldiği optik bir olaydır.
Kristallüminesans Akıllı Malzemeler
Bir molekülün kristalleşme nedeniyle uyarılarak ışık yaydığı optik bir olaydır.
Radyolüminesans Akıllı Malzemeler
Bir molekülün radyoaktif radyasyonun etkisi ile uyarılarak ışık yaydığı optik bir olaydır.
Radyofotolüminesans (Termolüminesans) Akıllı Malzemeler
Bir molekülün radyoaktif radyasyon sonrası termal radyasyonun etkisi ile uyarılarak soğuk ışık yaydığı optik bir olaydır.
Tribolüminesans Akıllı Malzemeler
Bir molekülün mekanik bir etki ile uyarılarak ışık yaydığı optik bir olaydır.

Tablo 10. Işık yayan akıllı malzemeler (Ritter, 2007)

Fotolüminesans ve elektrolüminesans akıllı malzemeler yüksek verimlilikleri sayesinde günümüzde mimarlık alanında tercih edilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde fotolüminesans ve elektrolüminesans akıllı malzemeler incelenmektedir.

Fotolüminesans Akıllı Malzemeler

Fotolüminesans malzemeler, harici bir ışık kaynağından gelen enerjiyi emerek görünür spektrumda farklı bir dalga boyunda yaymaktadır (Casini, 2016). Bu malzemeler ve ürünler, zamana göre parlama davranışlarının niteliklerine bağlı olarak floresan ve fosforesan olmak üzere iki türde incelenmektedir.

Floresan akıllı malzemeler, tersinir olarak değiştirilebilir bir kapasiteye sahip malzemeler veya bileşenlerdir. Elektromanyetik radyasyonun ışık şeklinde absorbe edilmesiyle uyarılmış bir durumdan nötr durumuna geçmesi 8-10 saniyeden daha az bir süre içinde gerçekleşmektedir. Bu süre içerisinde ışık yayma kapasitesine sahiptir (Blasse ve Grabmaier, 2012).

Mimari uygulamalarda, doğal ışık ile parlayan organik pigmentler ve ultraviyole ışığı ile parlayan inorganik pigmentler içeren ürünler bulunmaktadır. Floresan ürünler, iç meknlarda özellikle alçı yüzeylerde gün ışığına dayanım sağlayan dispersiyon bazlı boyalar şeklinde uygulanabilmektedir. Zemin kaplamaları, kapı panelleri ve metal gibi düz yüzeylerde gün ışığı filmleri olarak da kullanılmaktadır (Yağlı, 2019). Ürünlerin kullanım ömrünün uzun olmasını sağlamak ve renk yoğunluğunu arttırmak için belirli bir kalınlıkta uygulanmalıdır. Örneğin, ek bir koruyucu kaplamanın (cila vb.) uygulanmasıyla aşınmaya karşı direnç artırılabilir. Açık renkler sadece yapay ultraviyole ışık altında parladıklarından dolayı iç meknlarda kullanıma uygundur (Ritter, 2007).



Şekil 9. Floresan boya detayı ve uygulaması, Zwei Räume, Christina Kubisch (2004) (URL-3)

Fosforesans akıllı malzemeler; floresansın aksine, malzemelerdeki veya bileşenlerdeki fosforesansın optik özelliği, belirli bir miktardaki gün ışığına maruz kalması sonucunda ışık yaymaktadır. Bu durum, bir molekül ışığı absorbe ettiğinde ve uyarılmış bir durumdan nötr durumuna geçiş sırasında 8-10 saniyeden daha fazla bir süre boyunca tekrar ışık yaydığına

meydana gelmektedir (Blasse ve Grabmaier, 2012). Sürekli ışık yayabilme özelliğine sahip malzemeler veya bileşenler fosfor olarak adlandırılmaktadır.

Günümüzde mimari uygulamalarda fosforlu inorganik pigmentleri içeren ürünler bulunmaktadır. Fosforlu ürünler genellikle güvenlikle ilgili uygulamalarda kullanılmaktadır (Akgün, 2020). Örneğin; elektrik kesintisinin olduğu acil durumlarda yön okları ile kaçış yollarının işaretlemesi ya da merdiven kenarlarının görünebilmesi amaçlı işaretlenmesi şeklinde uygulanmaktadır. Güvenlik uygulamaları haricinde fosforesans iplikli kumaşlar ve fosforesans pigmentler içeren duvar kağıdı, boya, plastik, beton ve cam gibi geleneksel malzemeler de mevcuttur (Ritter, 2007).



Şekil 10. Fosforesans içeren cam bloklar ve cam karolar (Ritter, 2007)

Elektrolüminesans Akıllı Malzemeler

Elektrolüminesans akıllı malzemeler, belirli bir molekülün bir elektrik alanındaki elektronların etkisiyle ışık yaydığı optik bir olayı gerçekleştirmektedir. Bu malzemeler; enjeksiyon elektrolüminesansı, ince film elektrolüminesansı, kalın film elektrolüminesansı, polimer/küçük molekül elektrolüminesansı ve toz elektrolüminesansı içermektedir (Ritter, 2007). Bu bölümde enjeksiyon, kalın film ve polimer/küçük molekül elektrolüminesans malzemeler ve ürünler anlatılmaktadır.

Enjeksiyon elektrolüminesans, ışık yayan diyotlar (LED) gibi yarı iletken ışık kaynaklarının ardındaki ana unsurdur (Yağlı, 2019). Burada yük taşıyıcıları, enjeksiyon akımı olarak adlandırılan bir akım sayesinde dışarıdan dahil edilerek ışık elektronların ve boşlukların yeniden dizilimi ile yayılmaktadır. Katkılı galyum arsenit LED'lerde lüminesans malzeme olarak işlev görmektedir. Çevresel faktörlerden ayırmak için şeffaf plastik ile kapsüllenmiş haldeki iki elektrot arasına yerleştirilmektedir (Ritter, 2007).

Işık yayan diyotların ilk kullanım alanı, işlev kontrolü ve operasyonel veri ekranları için uygulandığı elektronik cihazlardır. Günümüzde, daha önce çok sayıda LED kullanılan

uygulamaların, LED sayısını azaltmak amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, çeşitli mekanları aydınlatmak için bağlı esnek fiber optik kablolar içeren tek veya birkaç merkezi ışık kaynağı kullanılmaktadır. Fiber optik kablolarına benzer olarak cam veya şeffaf plastik paneller uygulanmaktadır (Ritter, 2007). Tasarımlarının ilk aşamalarında LED'ler sadece kırmızı, sarı ve yeşil renkte bulunurken, takip eden süreçte mavi LED'lerin de geliştirilmesiyle farklı renklerin kombinasyonu ile beyaz LED'ler de üretilmiştir.



Şekil 11. Esnek beyaz LED şerit, Colors (2019) (URL-4)

LED'ler çeşitli form ve fonksiyonlarla entegre şekilde tasarımlara dahil edilebilmektedir (Ümütlü, 2020). Mimarlık alanında; cephe tasarımlarında, kentsel aydınlatmalarda ve iç mekan aydınlatmalarında kullanılabilir. Geleneksel ampullerin aksine uzun süreli kullanıma sahip olmalarının yanı sıra %90'a kadar daha az enerji tüketmektedir. LED'lerin düşük voltajla çalışabilmeleri ve dayanıklı yapıları onları zor iklim şartlarında dahi iç ve dış mekanlarda kullanılabilir kılmaktadır (Temel, 2021). Tasarıma bağlı olarak şerit veya levha şeklinde uygulanabilmektedir. Kırmızı, yeşil ve mavi renklere sahip LED'lerin kompakt hallerine RGB LED denmektedir. Bu üç renk belli oranlarda karıştırıldığında 16 milyondan fazla renk seçeneğine sahip olmaktadır (Tokuç ve Köktürk, 2015).

Kalın film elektrolüminesans, elektrolüminesans malzemeden (EL) yapılmış düz ışık kaynakları için bir çalışma ilkesidir. Birkaç işlevsel katmanın etkileşimine dayanmaktadır. Malzeme bir elektrik alanına maruz bırakıldığında, biriken ışık pigmenti (fosfor) uyarılarak soğuk bir ışık yaymaktadır (Ritter, 2007). Bu teknolojiyle geliştirilen ürünler; elektrolüminesans filmler, elektrolüminesans kablolar ve elektrolüminesans mürekkeplerdir.

Mimarlık alanında elektrolüminesans filmleri iç ve dış mekanlarda kullanılmaktadır. Birkaç elektrolüminesans filmini bir araya getirerek büyük aydınlık yüzeyler oluşturulabilmektedir (Yağlı, 2019). Elektrolüminesans kabloları; yapılarda şekiller ve kenarlar oluşturmakta, aydınlık yüzeylerde doğrusal özellikler yaratmakta veya cephelerde aydınlatmalı görseller

oluşturmak için kullanılmaktadır (Ümütlü, 2020). Elektrolüminesans filmleri için kullanım alanları içerisinde kamusal alanlardaki geniş format ekranları ve aydınlık zemin kaplamaları bulunmaktadır. Örneğin; televizyon stüdyolarında ve sanatsal çalışmalarda görülmektedir. Kalın film elektrolüminesans filmleri ve kabloları, akkor ampullere kıyasla, esnek tabaka bileşenleri kullanılarak kavisli alt tabakaların uygun ürünlerle kaplanabilmesini sağlamaktadır. Elektrolüminesans mürekkepleri ise cephe elemanlarına renkli desenler halinde serigrafı (baskı yapma işlemi) yapılarak uygulanmaktadır. Tasarımlarda çeşitli modül ve desen kombinasyonlarında bir aydınlatma sağlamaktadır (Ritter, 2007).



Şekil 12. Desenli aydınlatma oda bölücüleri, Rachel Wingfield ve Mathias Gmachl (2004) (URL-5)

Polimer/küçük elektrolüminesans, organik ışık yayan diyotların (OLED) arkasındaki ana unsurdur. OLED'ler, organik yarı iletken polimerlere veya küçük moleküllere dayanan düz LED'ler şeklinde üretilmektedir (Yağlı, 2019). Bu malzemeler elektronların absorbe edilmesiyle soğuk ışık yaymaktadır. Kullanılan bileşenlere bağlı olarak; polimerlerle üretilen OLED'lere PLED veya POLED, küçük moleküllerle üretilen OLED'lere SOLED veya SMOLED denmektedir. Bununla beraber esnek yapıya sahip OLED'ler veya fosforlu bileşenlerin kullanıldığı OLED'ler, FOLED'ler veya PHOLED'ler olarak adlandırılmaktadır. OLED'ler genelde birbirini üzerine yerleştirilmiş birkaç fonksiyonel katmandan oluşmaktadır (Ritter, 2007).

Malzeme bir elektrik alanına maruz bırakıldığında, pozitif ve negatif yüklerin bulunduğu yayıcı katmandaki (rekombinasyon katmanı) pigmentin tetiklenmesine ve kullanılan pigmente göre beyaz veya renkli soğuk ışık yaymasına neden olmaktadır. İstenilen tasarıma göre pigment değişikliği yapılabilmektedir. OLED'ler katmanlı olmalarının yanı sıra ince bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla esnek bir formları bulunmaktadır. Günümüzde OLED teknolojisi, LED üzerine gelişen son teknoloji olarak görülmektedir. Tasarımsal avantajları ile aydınlatmalarda ve akıllı ekranlarda kullanılmaktadır (Ümütlü, 2020).



Şekil 13. Beyaz ışık yayan SMOLED ekran (Ritter, 2007)

2.2.2.2. Elektrik Üreten Akıllı Malzemeler

Elektrik üreten akıllı malzemeler; ışık etkisinden veya sıcaklık ve/veya basınçtaki değişikliklerden kaynaklanan bir veya daha fazla uyarana tepki olarak bağlı bir tüketiciyle (örneğin, direnç yükü) bir elektrik akımı üretebilen malzemeleri ve ürünleri içermektedir (Ritter, 2007). Elektrik üreten akıllı malzemeler, tetikleyici uyarılarına göre ayırt edilebilmektedir (Tablo 11).

Fotoelektrik Akıllı Malzemeler
Bir tüketicinin bağlantısından sonra ışığın etkisi (elektromanyetik enerji) ile uyarılarak bir elektrik akımı üretir.
Termoelektrik (Piroelektrik) Akıllı Malzemeler
Bir tüketicinin bağlantısından sonra sıcaklığın etkisi (termal enerji) ile uyarılarak bir elektrik akımı üretir.
Piezoelektrik Akıllı Malzemeler
Bir tüketicinin bağlantısından sonra sıkıştırma veya gerilimin etkisi (mekanik enerji) ile uyarılarak bir elektrik akımı üretir.
Kemoelektrik Akıllı Malzemeler
Bir tüketicinin bağlantısından sonra kimyasal bir ortamın etkisi (kimyasal enerji) ile uyarılarak bir elektrik akımı üretir.

Tablo 11. Elektrik üreten akıllı malzemeler (Ritter, 2007)

Fotoelektrik, termoelektrik ve piezoelektrik akıllı malzemeler günümüzde mimarlık alanında tercih edilmektedir (Ritter, 2007). Tez çalışmasının bu bölümünde fotoelektrik, termoelektrik ve piezoelektrik akıllı malzemeler incelenmektedir.

Fotoelektrik Akıllı Malzemeler

Fotoelektrik akıllı malzemeler, bağı bir tüketiciyle bir elektrik akımı üreterek ışığa (görünür ışık, ultraviyole ışığı; elektromanyetik radyasyon) tepki vermektedir. Bu malzemeler; boya güneş pillerini, silikon güneş pillerini, ince film güneş pillerini ve organik güneş pillerini içermektedir (Ritter, 2007). Bu bölümde mimaride kullanım alanı bulunan boya güneş pilleri anlatılmaktadır.

Boya güneş pilleri (DSC), ışığın absorbe edilmesiyle (elektromanyetik radyasyon) bağı bir tüketici sayesinde elektrik akımı üreten bileşenler olarak kullanılan katman kompozitleridir (Yağı, 2019). Bu piller aynı zamanda; Grätzel hücreleri, foto-elektrokimyasal güneş pilleri veya nano güneş pilleri olarak da adlandırılmaktadır. Boya güneş pilleri birbiri üzerine yerleştirilen birkaç farklı fonksiyonel katmandan oluşmaktadır. Şeffaf bir anot ve kalay oksit, cam gibi destekleyici bir yüzey katmanı üzerine yerleştirilmektedir. Birkaç mikron kalınlığında bir titanyum dioksit macunu, bir nanokristalin yarı iletken tabaka oluşturması için, kalay oksit üzerine serigrafi ile basılarak pişirilmektedir. Titanyum dioksitin ışık emici bir boya ile kaplanmasının ardından, katalizör görevi gören platin veya grafit gibi bir tabaka ile iyot çözültisi olabilen bir elektrolit tabakası gelmektedir. Son katman önceden yerleştirilmiş şeffaf elektrotlu bir alt yüzey tabakasıdır. Boya güneş pillerinin uzun ömürlü olabilmesi için iki cam tabaka arasındaki bileşenlerin kenarlardan sızmasına izin verilmemelidir (Ritter, 2007).

Boya güneş pilleri, görünür ışığı elektrik enerjisine dönüştürebilen fotovoltaik bir hücre olarak da tanımlanabilmektedir. Boya, pillerin fotoaktif malzemesidir. Dolayısıyla hücre ışığa duyarlı hale gelerek elektrik üretebilmektedir (Ümütlü, 2020). Boya, gelen ışıktaki fotonları yakalayıp, enerjilerini elektronları uyarmak için kullanmaktadır. Bu özelliğı doğadaki fotosentez olayına benzetilmektedir (Yağı, 2019). Uyarılan elektronlar boya aracılığıyla titanyum dioksit içine aktarılmaktadır. Titanyum dioksitin nano ölçekli kristalize formuyla elektronlar uzaklaştırılmaktadır. Hücredeki kimyasal bir elektrolit, elektronların boyaya geri dönebilmesi için devreyi kapatır. Herhangi bir elektrikli cihazda depolanan enerji, bu elektronların hareketi ile üretilmektedir (Ümütlü, 2020).

Boya güneş pilleri, silikon veya ince film güneş pilleri gibi, bina cephelerine ve çatılarına takılabilmekte veya entegre edilebilmektedir. Farklı sıcaklıklarda çalışabilmeleri, düşük yoğunluktaki ışık ile elektrik üretebilmeleri ve 5000 saate kadar çalışarak kısmen uzun ömürlü olmaları sebebiyle tercih edilmektedir (Ritter, 2007). Ünitelerin bakım ve onarım için kolaylıkla sökülüp değıştirilmesi kullanım ömrü için önemlidir.

Boya güneş pilleri çalışma prensibi gereği renkli bir yapıya sahiptir. Cephelerde ve çatılarda biçimsel veya kontrast tasarım nesneleri olarak uygulanabilmeleri veya renkli filtrelerle birlikte kullanıldıklarında optik olarak benzer renkli çatı alanlarına entegre edilebilmeleri ile mimarlar tarafından tercih edilmektedir (Ritter, 2007).



Şekil 14. Boya güneş pili modülü (URL-6)

Termoelektrik Akıllı Malzemeler

Termoelektrik akıllı malzemeler, ısıyı (termal enerji) absorbe ederek ve bağlı bir tüketiciyle bir elektrik akımı üreterek, sıcaklık farklılıklarına (sıcaklık gradyanları) tepki vermektedir. Bu malzemeler; termoelektrik jeneratörleri, termoelementleri ve radyonüklid pilleri içermektedir. Bu bölümde mimaride potansiyel kullanım alanı bulunan termoelektrik jeneratörler anlatılmaktadır.

Termoelektrik jeneratörler (TEG), aynı zamanda termojeneratörler olarak da bilinmektedir. Genel olarak yüksek katkı yarı iletkenlerden yapılan, daha az sıklıkla bir sıcaklık gradyanına tepki olarak ısıyı (termal enerji) emerek elektronları hızlandıran veya elektron deliği çiftleri üreten iki farklı metal kablodan yapılan termoelektrik bileşenlerden oluşmaktadır. Araştırmacılar yarı iletkenleri optimize etmenin yanı sıra, farklı malzemeleri de derecelendirerek yeni silikon tabanlı teknolojiler oluşturmaya çalışmaktadır (Ritter, 2007).

Sıcaklık farkının büyüklüğüne bağlı olarak daha verimli olabilen termoelektrik jeneratörler, yanma işlemleriyle açığa çıkan ısıda ya da konsantre güneş radyasyonunda kullanılmaktadır. Bina cephelerinde iç ve dış mekan arasındaki sıcaklık farkı kendiliğinden oluştuğundan, termoelektrik malzeme kullanılarak üretilen cepheler elektrik üretebilmektedir (Orhon, 2013). İç mekanların aktif iklimlendirilmesi için cephe sistemlerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Termoelektrik jeneratörlerin bina cephelerinde bilinen bir uygulaması olmamasının yanı sıra, tekstil membran kaplamalarına uygun dönüştürücülerin entegrasyonu ile bina cephelerinde potansiyel kullanım alanı bulabileceği ön görülmektedir (Ritter, 2007; Yağlı, 2019). İletken iplikler içeren bir membran, plastik polimer (PVC) ile kaplanarak ve daha sonra elektrik teması oluşturularak uygulanabilir.

Piezoelektrik Akıllı Malzemeler

Piezoelektrik akıllı malzemeler, mekanik etkilerle (örneğin, sıkıştırma) deforme olduklarında, elektrik enerjisi üretmelerini sağlayan özelliklere sahiptir. Bu malzemeler; piezoelektrik seramikleri, piezoelektrik polimeri ve piezoelektrik monokristalleri içermektedir (Ritter, 2007). Bu bölümde mimaride kullanım alanı bulunan piezoelektrik seramikler ve piezoelektrik polimerler anlatılmaktadır.

Piezoelektrik seramikler (PEC) ve piezoelektrik polimerler (PEP), mekanik bir yüke maruz bırakıldığında, yük dağılımındaki değişikliklerden kaynaklanan deformasyon sonucu yüzeylerinde elektrik yükleri üreten organik veya inorganik malzemelerdir. Ters olarak, bir voltaj uygulandığında ise şekillerini değiştirebilmektedir. Bu olaylar sırasıyla piezoelektrik ve ters piezoelektrik etki olarak nitelendirilmektedir. Dolayısıyla piezoelektrik malzemeler şekil değiştiren ve elektrik üreten akıllı malzemeler gruplarının her ikisinde de yer almaktadır. Piezoelektrik etki sensörlerde kullanılırken, ters piezoelektrik etki aktüatörlerde kullanılmaktadır (Ritter, 2007). Piezoelektrik etki anlık olmakla birlikte, piezoelektrik cihazlar düşük basınçlara veya voltajlara karşı yüksek duyarlılık gösterebilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Piezoelektrik malzemeler; geniş bant açıklıkları, hızlı elektromekanik tepkileri, düşük güç gereksinimleri ve yüksek üretim kuvvetlerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Harrison ve Ounaies, 2001). Yapısal titreşim ve hareketlerden (örneğin; rüzgar veya insanların hareketi) kaynaklanan enerji üretme özelliğine sahip bu malzemeler, düşük enerji tüketimi ile karbondioksit emisyonunu azaltarak daha sürdürülebilir yapı bileşenlerine olanak tanımaktadır (Temel, 2021). Yapı bileşenlerinde aktif ses azaltma ve titreşimi absorbe etmek için piezoelektrik malzemeler içeren bileşenlerin kullanılması etkili olmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin; yapıların güvenilirliğini, dayanıklılığını ve ekonomik fizibilitesini iyileştirebilme özellikleri bulunmaktadır.

Araştırmacılar, piezoseramik malzemelerin ve ürünlerin sensör teknolojisi için enerjiden bağımsız mikro ve makro ölçekli sistemlerde uygulanmak üzere jeneratörlerin geliştirilmesi

üzerine çalışmalarını sürdürmektedir. Bu ürünler, mimaride uzaktan kumanda sensörlerinde bağımsız bir elektrik sağlamak için geliştirilmiştir. Piezoseramik malzemelerden üretilen aktüatörler ise jeneratör olarak kullanılabilir (Ritter, 2007).



Şekil 15. Piezoelektrik malzemedan üretilen sensörler (Ritter, 2007)

2.2.2.3. Enerji Depolayan Akıllı Malzemeler

Enerji depolayan akıllı malzemeler; ışık, ısı, elektrik veya hidrojen şeklindeki gizli enerjiyi depolayabilen ve bir miktar da olsa tersinir özellik gösteren malzemeleri ve ürünleri içermektedir (Ritter, 2007). Enerji depolayan akıllı malzemeler tetikleyici uyarılarına göre ayırt edilebilmektedir (Tablo 12).

Isı Depolayan Akıllı Malzemeler
Enerjiyi ısı ve soğuk (negatif ısı) şeklinde depolamalarını sağlayan doğal özelliklere sahiptir.
Işık Depolayan Akıllı Malzemeler
Enerjiyi ışık şeklinde depolamalarını sağlayan doğal özelliklere sahiptir.
Elektrik Depolayan Akıllı Malzemeler
Enerjiyi elektrik şeklinde depolamalarını sağlayan doğal özelliklere sahiptir.
Hidrojen Depolayan Akıllı Malzemeler
Enerjiyi hidrojen şeklinde depolamalarını sağlayan doğal özelliklere sahiptir.

Tablo 12. Enerji depolayan akıllı malzemeler (Ritter, 2007)

Isı depolayan akıllı malzemeler günümüzde mimarlık alanında tercih edilmektedir (Ritter, 2007). Tez çalışmasının bu bölümünde ısı depolayan akıllı malzemeler faz değişim malzemeleri üzerinden incelenmektedir.

Isı Depolayan Akıllı Malzemeler: Faz Değişim Malzemeleri

Isı depolayan akıllı malzemeler, gizli enerjiyi ısı ve soğuk (negatif ısı) olarak depolamaktadır. Bu bölümde ısı depolayan akıllı malzemeler, mimarlık alanında tercih edilen faz değişim malzemeleri üzerinden incelenmektedir (Ritter, 2007).

Birçok malzeme faz olarak bilinen katı, sıvı veya gaz olarak birkaç farklı durumda bulunabilmektedir. Bir malzemedeki sıcaklık veya basınç değişikliği, bir faz durumundan diğerine geçmesine neden olabilmektedir. Bu durum faz değişimi olarak adlandırılmaktadır (Addington ve Schodek, 2005).

Faz değişim malzemeleri, dış etkilere tepki olarak durumlarını tersine çevirebilen malzemelerdir. Faz değişimini tetikleyen etkinin veya yüklemenin türü önemli değildir. Yaygın olarak kullanılan malzemelerin çoğu sıcaklığa bağlı faz değişiklikleri göstermektedir. Faz değişimlerini tetikleyebilecek kimyasal uyarılar veya madde alımı gibi etkiler de bulunmaktadır (Ritter, 2007).

Faz değişim süreci; yüksek miktarda enerjinin gizli ısı olarak absorbe edilmesini, depolanmasını ve serbest bırakılmasını içermektedir. Malzeme katıdan sıvı durumuna ve daha sonra gaz haline dönüştüğünde yüksek miktarda enerji absorbe edilmektedir. Bu durumun tersine, malzeme gazdan sıvı durumuna ve daha sonra katı haline dönüştüğünde yüksek miktarda enerji açığa çıkmaktadır. Bu dönüşümler tersinir özellik göstermektedir. Faz değiştiren malzemeler deformasyona uğramadan sınırsız sayıda dönüşüme maruz kalabilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Mimarlık alanında faz değişim malzemeleri, gizli ısı veya gizli soğuk depolama alanı gibi sıcaklık düzenleyici olarak kullanılabilir. Genel olarak duvar ve tavan bileşenlerinin pasif iklimlendirilmesinde uygulanmaktadır. Yüksek ısı yalıtımı ve ısı depolama bileşenlerine sahip dış duvarlar; alçıpanlar, sıvalar ve cephe sistemleri gibi faz değiştiren malzeme esaslı gizli ısı depolama ürünlerinin uygun şekilde kullanılmasıyla oluşturulabilmektedir. Günümüzde yeni tasarlanan veya mevcut yapılarda kullanılabilen ürünleri bulunmaktadır (Yağlı, 2019).

Faz değişim malzemeleri, iç ortam sıcaklığını düzenleyerek iklimlendirme için harcanan enerjiden tasarruf sağlayarak güneş enerjisinden pasif olarak faydalanmaktadır (Akgün, 2020). Bu malzemeler geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilmektedir. Faz değiştiren malzemelerin üretimi için kullanılan malzemeler ve bileşenler, yüksek sayıdaki şarj

ve deşarj döngüsü süresince çalışabilmeli ve hacminde önemli ölçüde değişiklik göstermemelidir (Leydecker, 2008).

2.2.3. Madde Alışverişi Yapan Akıllı Malzemeler

Madde alışverişi yapan akıllı malzemeler; madde depolayan akıllı malzemeler de dahil olmak üzere, fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerle maddeyi molekül olarak katı, sıvı veya gaz bileşenler halinde tersinir olarak tutabilen, bağlayabilen ve serbest bırakabilen malzemeleri ve ürünleri içermektedir (Ritter, 2007).

Gaz/Su Depolayan Akıllı Malzemeler

Gaz/su depolayan akıllı malzemeler; gazların ve/veya su buharı şeklindeki suyun, su veya sulu çözeltileri iç yüzeylerine tutturarak veya hacimlerine alarak tepki vermelerini sağlamaktadır (Yağlı, 2019). İşleme bağlı olarak hacimlerini, yoğunluklarını ve optik özelliklerini ve/veya enerji durumlarını tersinir olarak değiştirmektedir.

Depolama, alınan maddenin veya bileşenlerin bir dönüşümünü içerebilmekte ve bu sayede enerji salınımı da gerçekleşebilmektedir. Önceden tutunmuş veya gömülü olan madde; belirli bir sıcaklığın, belirli bir kimyasal ortamın veya bir elektrik alanının uzaklaştırılması gibi bir veya birkaç uyaran etkisi ile serbest bırakılmaktadır (Ritter, 2007).

3. AKILLI ORTAMLAR VE BİLEŞENLERİ

3.1. Ortamların Akıllanmasıyla Ortaya Çıkan Akıllı Ev Kavramı

Mimaride birçok unsur değişkenlik göstermekte (örneğin, belirli saatlerde değişen gün ışığı gibi) ve yapının değişikliklere uyum sağlayabilmesi gerekmektedir. Mimari, dinamik bir yapıya sahip olduğundan akıllı malzemeler gibi ortam koşullarına adapte olarak özelliklerini değiştirmesi beklenmektedir (Tokuç ve Köktürk, 2015).

Günümüzde kullanılan akıllı malzemelerin çoğu yapay olarak üretilen mühendislik ürünleridir. Dolayısıyla üretimleri sırasında performansları ve davranışları kontrol edilebilmektedir. Akıllı malzemelerin verdikleri tepkilerin kontrol edilebilmesi, tasarım ve mimarlık alanında yeni olanaklar sağlamaktadır. Bu malzemelerle tasarlanan herhangi bir nesne, uyarılara tepki verebileceğinden, akıllı olarak nitelendirilebilmektedir. Akıllı malzemelerin entegre edildiği tasarımlar ise bu davranışı geliştirebilmekte ve kontrol edebilmektedir (Markopoulou, 2015).

Akıllı malzeme; malzeme bilimciler tarafından geliştirilmiş, teknolojileri mühendisler ile inşa edilmiş olsa da tasarımlarını günlük yaşama mimarlar ve tasarımcılar entegre etmiştir. Malzemeler ve teknolojiler, tasarımların belirleyici unsurları olmakta ve çevreyi tanımlayan tüm sistemleri üretmektedir. Mimarlık alanındaki yenilikler sadece yapıların tasarımı için değil, aynı zamanda malzemelerin bileşimi ve yapısal tasarım için evrimsel süreçlerden yararlanmayı içermektedir. Geleneksel bir malzemedan farklı olarak akıllı malzemeler, ortamdaki değişikliklere tepki verebilecek şekilde tasarlanabilen ve işlevsel ihtiyaçları estetik algısı ile birleştirebilen özelliklere sahiptir (Karana ve Kandachar, 2006).

Malzemeler ve mimarlık arasındaki yakın ilişki her zaman var olmuştur. Ancak 20. yüzyıl, malzemelerin ve teknolojilerin daha fazla işlev kazandığı bir dönemi temsil etmektedir. Malzemeler nasıl performans gösterdiklerine göre değil, ne ifade ettiklerine göre tercih edilmektedir (Markopoulou, 2015). Ancak akıllı malzemeler ve teknolojiler performanslarına göre seçilmektedir. Akıllı malzemeler ve teknolojiler; bir yapı veya bir ortamda sistem düzeyinde meydana gelen belirli davranışları veya hareketleri bütünleştirme ve birden fazla eyleme dönüştürme özelliğine sahiptir. Bir eylemi tetiklemek için çeşitli sensörler ve diğer teknolojiler kullanılmaktadır. Bu eylemler, basit sensörlerden karmaşık yüz tanıma sistemlerine kadar farklılık göstermektedir. Akıllı bir ortamdaki bu cihazlar genellikle kullanıcı tarafından görünmeyen şekillerde gizlenmektedir. Eylemler çoğunlukla otomatik olarak gerçekleşmekte, ancak belirli durumlarda kullanıcı başlatmaları veya geçersiz kılmaları gerekmektedir (Addington ve Schodek, 2005). Akıllı ortamlar; işlevsel tanımları, akıllı

davranışların çevreye gömülme veya kontrol edilme biçimleri ve genel biliş düzeyleri açısından karakterize edilerek tanımlanmaktadır (Tablo 13).

- Ortam özellikleri: Mekanın kullanımını destekleyen yaklaşımlar yer almaktadır.
- Biliş özellikleri: Ortamda meydana gelen insan duygularını, düşüncelerini ve bilişlerini içermektedir.
- Uygulama özellikleri: Geliştirmelerin nasıl çalıştırıldığı ve kontrol edildiği üzerine odaklanmaktadır.

Ortamlar		Biliş		Uygulama	
Çeşitler	Davranışlar/ Parametreler	Yaklaşım	Seviyeler	Model	Strateji
Çevreleyen Ortamlar	Tekil	Hiçbiri	Doğrudan Tepkiler	Doğrudan Mekatronik	Ayrık Bileşen ve Sistem Kontrolü
Hava Isı Aydınlatma Ses Yapısal Diğer		Çok Bilgili Sistemler		Bilgilerin Kullanımı/ Yorumlanması	
Kullanım Ortamları	Çoklu	Uzman Sistemler	Rehberli Tepkiler	Temel ve Gelişmiş Modeller Oluşturmak	Modlu (Görsel, İşitsel, Koku, Dokunma, Tat)
Yaşam Eğlence İş Sağlık Ergonomik Diğer		Yapay Zeka		Muhakeme/ Değerlendirme	
Toplam Bağlam	Tüm İlgililer	Metafor Modelleri	Yansıma		İçsel Tepkiler
	Ele Alınan Davranışların Arttırılması		Artan Biliş Seviyeleri		Artan Bir Şekilde Gömülü ve Şeffaf Arayüzler

Tablo 13. Akıllı ortamların karakterize edilmesi (Addington ve Schodek, 2005)

Akıllı ortamların çoğu farklı türlerde sensör-aktüatör sistemlerine dayanan algılama, izleme ve kontrol eylemlerini içermektedir. Örneğin; bir sensör-aktüatör sistemi kullanan bir yapı çevresindeki hava, sıcaklık ve aydınlatma koşullarını izleyebilmekte ve kontrol edebilmektedir. Benzer şekilde, depremlere bağlı olarak sismik hareketleri algılayan ve sönümleyebilen sensör sistemlerine sahip yapısal sistemler de bulunmaktadır. Sensör-aktüatör sistemleri karmaşık sistemler olabilmektedir. Akıllı bir ortam, bağımsız bir şekilde hareket eden birçok tekil davranış ögesinden veya bileşeninden meydana gelmektedir. Bir ögenin veya bileşenin tepkisi diğerlerini etkilememektedir. Akıllı ortam uygulamalarında çoklu davranışlar birbirinden bağımsız olarak hareket edebilmektedir. Tekil bir davranış ögesinden veya bileşeninden meydana gelen ortamlar da akıllı sayılmakta ancak akıllılık derecesi düşük olarak tanımlanabilmektedir. Ortam, bilişsel davranışları ne kadar çok sergiliyorsa o kadar akıllı sayılabilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Akıllı ortamlar; sensörler, aktüatörler vb. ögeler ile görünmez bir şekilde iç içe geçmiş bir ağ üzerinden bağlanan fiziksel bir ortamı tanımlamaktadır. Dinamik bir akıllı ortam olan akıllı yapılar ise, değişken ve kişiselleştirilmiş kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamaktadır (Lee vd., 2021).

Akıllı bir yapı, meydana gelen belirli durumları algılayabilen ve tepki verebilen sistemler bütünü olarak tanımlanmaktadır. Sistemlerden biri, önceden geliştirilen algoritmalara göre, diğer sistemlerin davranışlarını kontrol etmektedir. Akıllı yapılar, bireysel alt sistemlerin tek bir merkezden yönetilmesini sağlamaktadır (Demianchuk, 2019). Bu alt sistemler, sensörler ile değişikliklere ve acil durumlara tepki vererek, yapının akıllı tepkiler vermesini sağlamaktadır.

Demianchuk (2019)'a göre bir yapının akıllı olarak tanımlanabilmesi için belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir.

- Yapının tüm sistemlerinin entegre çalışma yeteneğine sahip olması gerekir.
- Kontrol ve karar verme fonksiyonları, yapı yönetim sisteminin alt sistemlerine aktarılır.
- Yapının herhangi bir alt sistemindeki kullanıcıyı kontrol etmek için acil bir kapatma ve iletim özellikleri göstermesi beklenir.
- Yapı yönetim sisteminin veya herhangi bir alt sistemin arızalanması durumunda diğer sistemler işlevlerini yerine getirir.
- Alt sistemlerin uygulanmasında ortak standartların kullanılmasıyla sisteme sonradan eklenen yeni cihazların veya sistemlerin yapılandırılabilmesi gerekir.

- Yapının, cihazları ve sistem modüllerini bağlamak için döşenen bir iletişim ağı bulunur.

Akıllı malzemelerin çeşitli alanlarda artan kullanımları ve gerçekleşen başarılı uygulamaları, bu malzemelere gösterilen ilgiyi arttırmıştır. Günlük kullanımlarının artması, bilgi ve iletişim teknolojileri için yeni bir alana dönüşen, “akıllı ev” kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Akıllı bir ev, cihazların ve sistemlerin otomatik olarak kontrol edilmesini sağlayan teknolojiyi içeren bir ortam olarak tanımlanmaktadır. Akıllı evler, bilgisayarlar ve ağlar ile tek bir merkezden kontrol edilme prensibiyle çalışmaktadır (Karana ve Kandachar, 2006).

Akıllı evler, günlük yaşam ve ileri teknolojilerle ilgili çeşitli alt sistemlerin organik bir birleşimidir. Temel amacı sistem ve yönetimi entegre eden; verimli, konforlu, güvenli ve sürdürülebilir bir yaşam ortamı sağlamaktır (Li vd., 2018). Teknolojiler sayesinde kullanıcıların ihtiyaçlarına cevap verebilen, güvenlik ve konfor unsurlarını arttıran ve enerji korunumu sağlayabilen evlerdir. Otomatik işlevleri ve sistemleri kullanıcının kontrol edebildiği cihazları içermektedir. Akıllı evler; sıcaklık, nem, ışık yoğunluğu ve diğer unsurları algılayabilen ve kontrol edebilen sistemlerdir (Güğü, 2008).

Akıllı evler kullanıcıya, evi uzaktan kontrol etme imkanı sunmakta ve otomasyon fonksiyonları gibi çeşitli kontrol olanakları sağlamaktadır. Akıllı evler; otomatik evler veya akıllı yaşam ortamları olarak da tanımlanabilmektedir. Bir evde kullanılan teknoloji geliştikçe, o evin fonksiyonu veya görevi de aynı şekilde değişmektedir (Innocenti, 2017).

Lütolf (1992) akıllı ev kavramını; kullanıcının ihtiyaçları göz önüne alınarak çeşitli hizmetlerin ortak bir iletişim ağı üzerinden ekonomik, güvenlik ve konfor şartlarını karşılayan bir ev olarak tanımlamaktadır.

Barlow ve Gann (1998) akıllı evler, zeki evler veya ev otomasyonu tanımını; ev içerisinde programlanmış uygulamalar ve cihazlar aracılığıyla bilgi paylaşımı yapabilen ve kullanıcı konforunu sağlamak için harici bilgi hizmetlerinden yararlanabilen bir teknoloji şeklinde açıklamaktadır.

Aldrich (2003)'e göre akıllı evler; kullanıcıların ihtiyaçlarını öngörebilen ve tepki verebilen, ev içerisindeki teknolojiyi kontrol ederek konforlarını, güvenliklerini ve yaşam kalitelerini arttıran, bilgi işlem ve teknoloji ile donatılmış bir yaşam alanı olarak nitelendirilmektedir.

Kitchin ve Dodge (2011) akıllı evleri; düzenli iç mekanlar yaratabilen ve zaman tasarrufu sağlayan, uzun süredir devam eden modernist bir teknolojinin en son enkarnasyonu olarak tanımlamaktadır.

Elektrik teknolojisinin 20. yüzyılın ilk dönemlerinde evlere dahil olması, günümüzdeki akıllı ev kavramının temelini oluşturmaya yol açmıştır. Evlerde kullanılan bu yeni teknoloji gaz lambalarını elektrik lambaları ile değiştirmesinin yanı sıra, elektronik cihazların da evlerde kullanılmasını sağlamıştır (Innocenti, 2017). Le Corbusier 1920’de evi, “içinde yaşamak için bir makine” olarak tanımlamıştır. 1950 yılında ilk akıllı ev sayılabilen “Push Button Malikanesi” tasarlanmıştır. Otomatikleşmiş birçok düzeneği bulunan ev; perdelerin hareket etmesi, yağmurlu havalarda camların kapanması ve ziyaretçileri karşılamak için aydınlatmaların açılması gibi farklı sistemlere sahiptir (Tomaş, 2019). 1953’te tamamlanan “tamamı elektrikli ev”, kullanıcının yatak odasındaki bir düğmeyle mutfaktaki kahve makinesini çalıştırmasını sağlamıştır. Bu tasarım sonrası otomasyon “akıllılık” kavramı ile eşdeğer görülmüştür. 1957 yılında Disneyland’da “geleceğin evi” olarak tanımlanan ve tamamı plastikten üretilen ev tanıtılmıştır (Addington ve Schodek, 2005). 1966 yılında evin sıcaklığına göre cihazları açıp kapatabilen ilk akıllı sistem olan mutfak bilgisayarı geliştirilmiştir. Akıllı evlerin ilk versiyonları 1970’li yıllarda kullanılmasına rağmen, ev otomasyon teknolojisinin gelişim süreci bilgisayar ve ağ teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak gerçekleşmiştir (Innocenti, 2017). 1980’li yıllarda evlerde analog teknolojilerden dijital teknolojilere geçiş başlamıştır (Barlow ve Venables, 2003). 2000’li yılların başlarında ise kullanıcının konfor ve güvenlik gereksinimleri doğrultusunda “akıllı ev” kavramı yaygınlaşmıştır.

Akıllı ev teknolojileri, endüstri alanında kullanılan kontrol sistemlerinin evlere uyarlanması şeklinde açıklanmaktadır. Ev otomasyonu, akıllı ev teknolojilerinin kişiye özel olarak uygulanmasıdır. Akıllı evler ise bu teknolojiler sayesinde kullanıcının ihtiyaçlarını karşılamakta, konfor şartlarını optimize etmekte ve güvenli bir ortam sağlamaktadır. Bu evler otomatik fonksiyonları ve sistemleri, kullanıcıya uzaktan kontrol etme imkanı sunmaktadır (Stefanov vd., 2004).

Akıllı ev otomasyon sistemi, önceden belirlenmiş senaryolar ile veya programlanmış şekilde, istenilen işlemleri gerçekleştirmektedir. Otomasyon sistemleri kullanıcı odaklı çalışmakta ve kişisel tercihlere göre ayarlanmaktadır. Otomasyonun önemli bir bölümü programlamadan oluşmaktadır. Ev otomasyon sistemi; evi dönüştüren teknolojilere, cihazlara ve uygulamalara bir müdahale olarak görülebilmektedir. Bu sistemlerin temel amacı; daha yüksek verimlilik, enerji tasarrufu ve zaman kazanımı sağlamaktır (Innocenti, 2017; Tomaş, 2019).

Otomasyon, farklı işletim elemanlarını kullanarak bir sistemi kontrol etme işlemidir. Ev otomasyonu, evin çeşitli elektronik fonksiyonlarının kontrolünü ifade etmektedir. Aydınlatma sistemi, HVAC sistemi, güvenlik sistemi, iletişim sistemi vb. sistemlerinin kontrolünü

içermektedir. Ev otomasyon sistemi, evdeki elektronik cihazların uzaktan ve birbirlerine entegre şekilde kontrol edilebilmesini sağlamaktadır (Simon ve Kavitha, 2017).

Francis Aldrich, Richard Harper'ın "Inside the Smart Home" (2003) kitabında akıllı evleri işlevselliklerine göre; akıllı nesnelere içeren evler, akıllı ve haberleşen nesnelere içeren evler, ağ bağlantılı evler, öğrenen evler ve özenli evler olmak üzere beş grupta sınıflandırmaktadır.

- Akıllı nesnelere içeren evler: Akıllı bir şekilde işlev gören tek ve bağımsız cihazları ve nesnelere içermektedir. Örneğin; güneş ışığına bağlı olarak panjurları otomatik açıp kapatabilen veya akıllı cihazlara sahip olan evlerdir.

- Akıllı ve haberleşen nesnelere içeren evler: Kendi başlarına akıllıca işlev görebilen ve aynı zamanda işlevselliği artırmak için kendi aralarında bilgi alışverişinde bulunan cihazları ve nesnelere içermektedir. Örneğin, hava durumunu takip ederek, güneş ışığının evi ısıtmak için yeterli olduğu günlerde enerji tasarrufu sağlamak için ısıtma sistemini kapatabilen evlerdir.

- Ağ bağlantılı evler: Sistemlerin etkileşimli ve uzaktan kontrolünün yanı sıra, hem evin içinden hem de dışından hizmetlere ve bilgilere erişim izni veren dahili ve harici ağlar içermektedir. Örneğin; aydınlatma sistemi, ısıtma ve soğutma sistemi, güvenlik sistemi, sensörler ve diğer sistemlerin ortak bir ağ ile birbirlerine bağlı olduğu evlerdir.

- Öğrenen evler: Evdeki faaliyetler kaydedilmekte ve veriler kullanıcıların ihtiyaçları doğrultusunda öngörülebilir bir şekilde sistemler tarafından uygulanabilmektedir. Örneğin, kullanıcı her sabah aynı saat aralığında banyoyu kullanıyor ise, bu veri bilgisayar tarafından kaydedilir ve sonraki günlerde banyoyu aynı saatte kullanıcı için hazırlar.

- Özenli evler: Kullanıcıların ve nesnelere etkinliği ve yeri sürekli olarak kaydedilmekte, kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda teknoloji ile kontrol edilebilmektedir. Örneğin, aydınlatma sistemi bir etkileşime ihtiyaç duyulmadan kullanıcıyı evin içinde takip eder.

Aldrich (2003) akıllı ev sınıflandırmasında; evdeki farklı bilgi iletişim seviyelerini vurgulamakta ve öğrenen sistemleri öğrenemeyenlerden ayırmaktadır. Sınıflandırma hiyerarşik bir yapıya sahip olmakta ve her sınıf işlevsellikte bir miktar artış içermektedir. Teknik donanım olarak incelendiğinde her sınıfta bir önceki sınıfın sistemleri yer almaktadır.

Akıllı evler, akıllı malzeme teknolojilerini kullanarak, kullanıcıların konfor ve güvenlik ihtiyaçlarını enerji tasarrufu sağlayacak şekilde karşılamaktadır. Sensör ve aktüatör sistemleri ile algılama, izleme ve kontrol eylemlerini gerçekleştiren akıllı evler, sistemlerin teknoloji ile

entegre edildikleri birer akıllı ortamdır. Akıllı malzemelerin gömülü bir şekilde sensör ve/veya aktüatör olarak kullanılmalarının yanı sıra, malzeme düzeyinde uygulamalarının bulunduğu akıllı evler, kullanıcı odaklı sürdürülebilir yapılarıdır.

Addington ve Schodek (2005) araştırmasında, malzeme odaklı bir inceleme yaparak akıllı malzemeleri ortam ve sistem düzeyinde incelemektedir. Ritter (2007) ise araştırmasında, mimari alanda deneysel çalışma yapılmış ya da uygulama alanı bulmuş akıllı malzemeleri ele almakta, ancak ortam ve sistemler üzerinden açıklamamaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde, akıllı malzemeleri ortam ve sistem düzeyinde kapsamlı bir şekilde inceleyen Addington ve Schodek (2005)'in araştırmasından yararlanılmaktadır.

3.2. Kontrol Sistemleri

Enerjinin bir formdan diğerine dönüşümü için birçok cihaz (dönüştürücü) kullanılmaktadır. Örneğin, bir jeneratör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Benzer şekilde enerjinin fiziksel veya kimyasal bir eylem halini aldığı birçok cihaz da kullanılmaktadır. Akıllı malzemeler birçok farklı formda ve işlevde bulunabilmektedir. Eylem ve davranışlarının çoğu sensörler, dönüştürücüler veya çalıştırma aygıtları şeklindedir (Tetik, 2014). Bu davranışların klasik olarak sensörlerin, dönüştürücülerin ve aktüatörlerin yaptıklarıyla aynı olduğu, ancak malzemenin kendi içinde bütünsel olarak gerçekleştirdiği görülmektedir.

Harici bir uyarana tepki olarak gerçekleşen malzemedeki bir özellik değişikliği aynı uyarana için bir sensör olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Örneğin, termokromik bir malzeme bir sıcaklık değişimine tepki vererek rengini değiştirebilmektedir. Rengindeki bir değişiklik, ortam sıcaklığındaki değişikliğin göstergesidir. Belirli sıcaklıklarda renklerini değiştirebildiklerinden, renkleri bir sıcaklık ölçüm cihazındaki sıcaklık seviyelerinin belirlenmesini sağlayabilmektedir. Termokromik malzemeler, belirli sıcaklıklarda renk değiştirmek için tasarlanabileceğinden, sıcaklık ölçüm cihazlarında yer almaktadır (Ümütlü, 2020). Benzer şekilde, fotokromik malzemeler ışık yoğunluğunu ölçmek için sensör olarak kullanılabilir.

Enerji alışverişi yapan malzemeler, hem sensör hem de dönüştürücü olarak işlev görebilmektedir. Bazıları ayrıca aktüatör olarak da uygulanabilmektedir (Tetik, 2014). Örneğin; piezoelektrik malzemeler mekanik bir kuvvetin etkisiyle elektrik enerjisi üretebilmekte ve bu durumun tersi de geçerli olabilmektedir. Dolayısıyla bir kuvvet sensörü olarak kullanılabilir. Piezoelektrik malzemedeki gelen çıkış sinyali algılanabilmekte, şartlandırılabilir ve bir forma dönüştürülebilir. Şartlandırılmış sinyal, mekanik bir cihazın hareketlerini yönetmek için kullanılan bir denetleyiciyi çalıştırabilir. Mekanik

bir kuvvet yaratmak için bir elektrik akımı kullanılabilmekte ve piezoelektrik malzeme mekanik bir kuvvet çalıştırma cihazı olabilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Akıllı malzemelerin temel davranışlarının çoğu; sensörler, dönüştürücüler veya aktüatörler olarak yapı sistemlerinde belirli işlevlere sahiptir. Bu akıllı malzeme bileşenlerinin bir arada kullanılmasının amacı; bir eylemi üretmek ya da istenilen tepkileri gerçekleştirmek için etkinleştirilen veya kontrol edilebilen, birbirine entegre bir sistem oluşturmaktır (Yağlı, 2019).

Sensörler, fiziksel veya kimyasal bir uyarıyı algılayabilen ve tepki verebilen cihazlardır (Kızıltoprak, 2019). Bir sensör, uyarıcı alan ile doğrudan etkileşime girmektedir. Bir ölçüm cihazının aksine, bir sensör sürekli bir enerji alışverişini veya enerjinin bir formdan diğerine değişimini içermektedir. Sensörler, ölçüm ya da kontrol için kullanılabilen bir çıkış sinyali üretmektedir. Sensörler ve dönüştürücüler enerji alışverişini yapabilmeleri yönünden birbirlerine benzemektedir. Dönüştürücü, enerjiyi bir formdan diğerine dönüştürebilen bir cihazdır. Ancak bir dönüştürücü, enerjiyi aynı formda da aktarabilmektedir. Dönüştürücüler genellikle enerjiyi iletmek, izlemek veya kontrol etmek için kullanılmaktadır (Akın, 2009). Buna karşılık sensörler, çevresel uyarı ile doğrudan etkileşime girerek tepki vermektedir.

Aktüatör, girdi enerjisini bir sinyal olarak mekanik veya kimyasal bir eyleme dönüştürebilen bir cihazdır (Matin ve Eydgahi, 2019). Genellikle bir aktüatör, bir voltaja tepki olarak mekanik bir eylem veya hareket üretmektedir. Bir sensör, harici uyarı etkisiyle voltaj şeklinde bir çıkış sinyali oluşturmaktadır. Sinyal birçok sistem elemanını veya hareketlerini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Çoğu durumda sensör işlevi gören cihazlar, aktüatör görevi görebilecek şekilde yeniden yapılandırılabilirlerdir.

Addington ve Schodek (2005) sensör çeşitlerini; başlangıçta kullanılan mekanik, termal, elektriksel, manyetik, radyant veya kimyasal enerji formlarına göre oluşturmaktadır. Ancak sensörlerde kullanılan akıllı malzeme çeşitlerinin tamamına yönelik bilgi bulunmamaktadır.

- Işık sensörleri: Yarı iletken bir malzemeye çarpan radyant enerji, algılanabilir bir elektrik akımı üretmektedir. İçeriğinde fotoelektrik akıllı malzeme bulunmaktadır (Al-Baldawi, 2015).
- Ses sensörleri: Akustik ses dalgası basınçları, bir mikrofona içindeki piezoelektrik akıllı malzeme bir kuvvet üreterek elektrik akımı oluşturmaktadır.
- Termal sensörler: Ortamdaki sıcaklık değişimlerinin etkisiyle bir elektrik akımı üretmektedir (termometreler, termokupllar, termostatlar vb.). Termoelektrik ve elektroaktif akıllı malzemeleri içermektedir (Albayrak, 2020).

- Nem sensörleri: Nem emici bir malzemenin, nemin emilmesiyle dielektrik özellikleri değişen bir kapasitans cihazıdır. Yapılarında elektroaktif ve fotoadezyon akıllı malzemeler bulunmaktadır (Kafy vd., 2016; Mullassery, 2015).

- Dokunmatik sensörler: Yüzeyle doğrudan temas edilmesi, cihazın içeriğindeki çapraz tellerde yüksek elektrik kapasitansları oluşturmaktadır. Böylece temasın gerçekleştiği konum saptanabilir ve algılama gerçekleşir. Bu işlem, piezoelektrik ve termoelektrik akıllı malzemeler ile gerçekleşmektedir.

- Konum sensörleri: Herhangi bir nesnenin konumunu, yerleşimini veya hareket yönünü ve hızını belirlemek için kullanılmaktadır. Piezoelektrik ve manyetostriktif akıllı malzemeleri içermektedir (Sobczyk vd., 2021).

- Yakınlık sensörleri: Fiziksel bir nesnenin diğer bir nesneye yakınlığının ölçülmesini, içerdiği elektroaktif ve fotoelektrik akıllı malzemeler ile sağlamaktadır.

- Hareket sensörleri: Genellikle kızılötesi teknolojilerin kullanımına dayanmakta, dolayısıyla hareketli bir nesne ile çevre arasındaki sıcaklık farkını tespit etmektedir. İçeriğinde piezoelektrik akıllı malzeme bulunmaktadır.

- Kimyasal, manyetik ve diğer temel sensörler: Bir veya birden fazla kimyasalın varlığını ve/veya ortamdaki seviyesini tespit edebilmektedir. Bununla beraber bir manyetik alanın ve/veya karbondioksit gibi spesifik gazların ortamdaki seviyelerini ölçmek için de kullanılmaktadır. Termoelektrik, piezoelektrik, elektroaktif ve manyetostriktif akıllı malzemelerden oluşmaktadır (Lane ve Craig, 2003; Sobczyk vd., 2021).

- Çevresel sensörler: Bir yapıdaki veya kentsel ölçekteki bir alanın çevresel koşullarındaki değişiklikleri ölçmek ve tespit etmek için kullanılmaktadır.

- Biyosensörler: Biyolojik bir elemanı içeren veya piezoelektrik, termoelektrik ve manyetostriktif akıllı malzemeler ile bunlara tepki verebilen bir cihazdır.

Addington ve Schodek (2005), belirli işlevleri yerine getirmeyi hedefleyen bir sensör ve aktüatör sisteminin farklı işlevlere sahip bir dizi bileşenden oluştuğunu belirtmektedir.

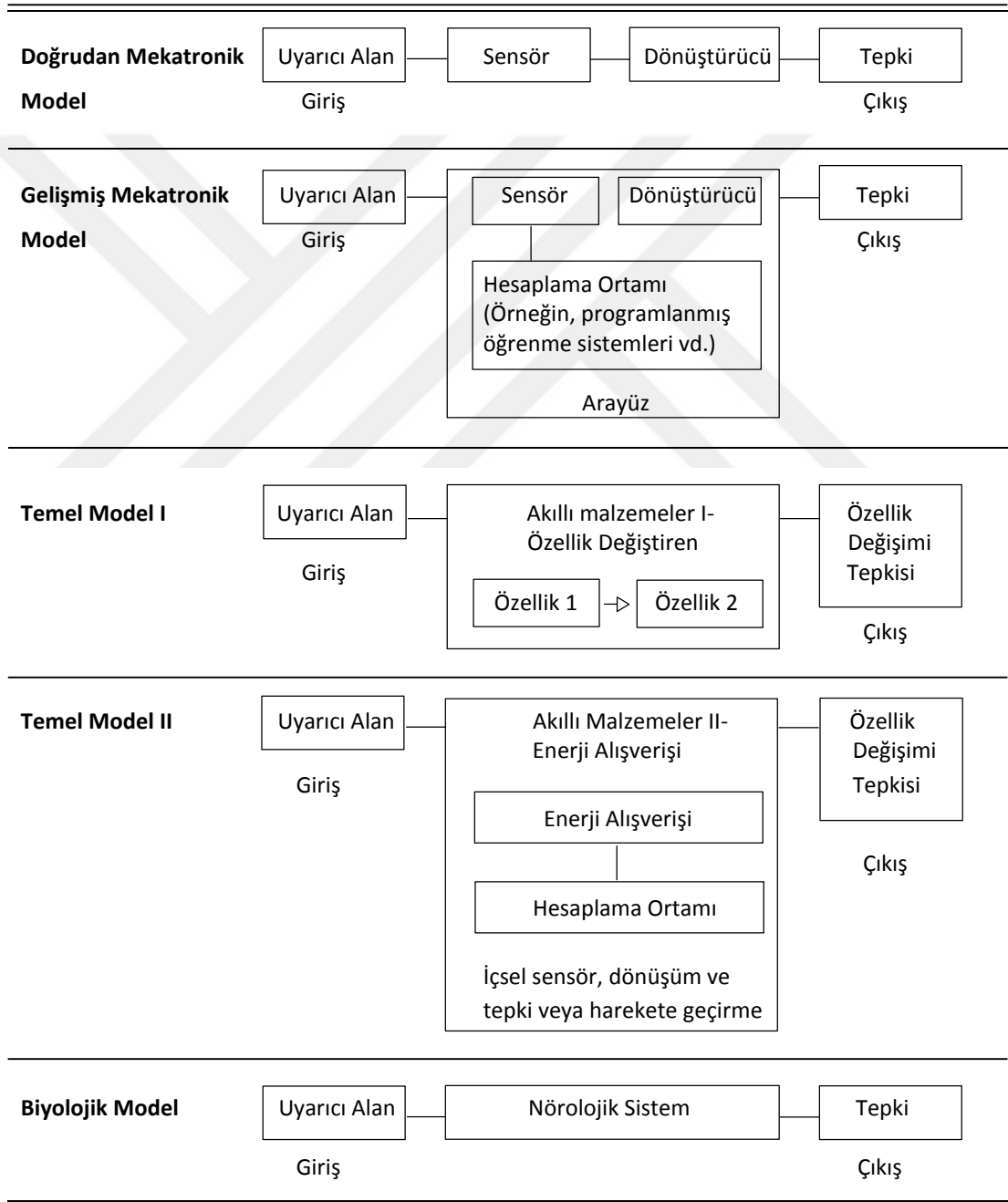
- Sensörler ve dönüştürücüler

- Sinyal koşullandırıcıları

- Vericiler/dönüştürücüler/alıcılar

- Mantık denetleyicileri
- Ekranlar/kaydediciler/aktüatörler

Akıllı malzemeler ve sistemler, bir uyarana tepki verebilmeleri doğrultusunda akıllı olarak nitelendirilmektedir. Bu özellikleri sayesinde biyolojik canlıların basit bir versiyonu gibi davranmaktadır. En basit sensör/aktüatör sistemi dahi, uyarana tepki verme yeteneği açısından, en karmaşık biyolojik sisteme benzetilmektedir (Tablo 14).



Tablo 14. Farklı girdi/çıkış kontrol modelleri (Addington ve Schodek, 2005)

Doğrudan mekatronik modelde fonksiyonların birçoğu birbirine entegre ve istenen tepkiyi sağlayan bileşenler tarafından sağlanmaktadır. Uyarılara tepki veren bir sensörün çıktı sinyali kullanılabilir bir durumda olabilir. Sensör çıktı sinyalini farklı bir enerji formuna dönüştürmek için dönüştürücülere ihtiyaç duyabilir. Çıkış sinyali, genliğini yükseltmek veya istenmeyen gürültüyü azaltmak için daha fazla şartlandırmaya ihtiyaç duymaktadır. Şartlandırılmış bir sinyalin her zaman farklı bir konuma iletilmesi gerektiğinden, farklı bir elemana girdi olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla alıcı ve verici cihazlara ihtiyaç vardır.

Geliştirilmiş mekatronik modelde şartlandırılmış sinyaller ilk olarak mantıksal bir amaca göre düzeltilerek aktüatörlere iletilmektedir. Mantık denetleyicileri, sistemin ilerlemesi gereken yönü belirlemektedir. Tasarımcı, hareket algılandığında etkisiz hale gelecek bir alarm sistemi veya hareket fark edildiğinde kendiliğinden açılacak bir kapı için hareket sensörü kullanmayı tercih edebilmektedir. Bu işlemler bir kapasitörde yükün biriktiği ve serbest bırakıldığı bir dizi işlemi gerçekleştirmek için elektronik cihazları kullanan kablolu devreler ile yapılmaktadır. Mantık özelliğine sahip devreler bu şekilde oluşturulabilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Özellik değiştiren ve enerji alışverişi yapan akıllı malzemeler, kontrol sistem eylemlerinin çoğunu dahili olarak gerçekleştirebilmektedir. Özellik değiştiren akıllı malzemelerin içsel ve tersine çevrilebilir özellik değişiklikleri bulunmaktadır (Ümütlü, 2020). Temel model I'de özellik değiştiren akıllı malzemelerin girdi/çıkış ilişkileri yer almaktadır. Enerji alışverişi yapan malzemelerin eylemleri programlanabilir olmamasına rağmen, karmaşık bir sistemin elemanı olabilmektedir. Temel model II'de enerji alışverişi yapan malzemelerin girdi/çıkış ilişkileri bulunmaktadır. Yürütülen araştırmalar genel sistem davranışlarını içselleştirmeye yöneliktir. Akıllı malzemeler genel sistemi sorunsuz hale getirme imkanı sunmaktadır (Soliman ve Aggour, 2010). Bu bağlamda biyolojik model, tamamen içselleştirilmiş ortamın temel davranışını göstermektedir.

3.3. Akıllı Sistemler

Akıllı malzemeler; belirli etkilere tepki verebilmek için tasarlanmış malzemeler olarak tanımlanmakta ve uyarılara verdikleri tepkilere göre alt başlıklarda incelenmektedir. Her akıllı malzeme yapısal olarak etkinin tepkiye dönüştüğü bir dizi işlemi içermektedir. Bu işlemler bazı malzemeler için doğrudan gerçekleşirken, bazı malzemeler için daha sistematik ve programlama ihtiyacı duyulan bir yapıda olabilmektedir (Ümütlü, 2020).

Sensörler, aktüatörler ve kontrol mekanizmaları malzemenin mikro yapısının bir bileşeni haline geldiğinde, malzemeler akıllı sistemleri oluşturmaktadır (Anderson vd., 1992). Akıllı malzeme uygulamalarının birçoğu standart yapı sistemleri ile sınırlıdır. Akıllı sistemler genellikle binanın altyapısına gömülü olduğundan akıllı malzemelerin çoğu gizli olma eğilimindedir (Addington ve Schodek, 2005).

Akıllı sistemler; akıllı ve geleneksel malzemelerden oluşan, bir çalışma düzeneği veya yöntemi ile programlanabilen ortam koşulları ya da tasarımsal olarak istenen bir durumu programlanarak algılaması sağlanabilen sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, içerdiği malzemenin türüne ve istenen işleve göre bir çalışma yöntemi göstermektedir. Kullanılan malzemelerin kendiliğinden tepki verebilmeleri durumunda, malzemeler ürüne doğrudan bir yöntemle entegre olabilmektedir. Akıllı malzemeler; akıllı bir sistemin bir bileşeni olarak veya kendi özelliklerine bağlı olarak birçok form alabilmekte ve tanımlanan işlevlere hizmet edebilmektedir (Ümütlü, 2020).

Akıllı sistemlerin çalışma prensibini içeriğinde bulunan malzeme, sensör ve dönüştürücüler belirlemektedir. Karmaşık bir yapıya sahip olan herhangi bir sistem, belirli performans ve kontrol özelliklerine sahip bileşenlerden oluşmaktadır. Bu sistemler içerisinde bulunan bileşenler genelde tekil işlevleri gerçekleştirmektedir. Akıllı sistemlerde ise sistem içerisinde bulunan bileşenler birden fazla işlevi karşılayabilmektedir. Örneğin; akıllı sistem içerisinde bulunan akıllı malzeme, bir sensör veya aktüatör olarak, bazen de her iki işlevi gerçekleştirmek için kullanılabilir (Addington ve Schodek, 2005).

Akıllı sistemler davranış şekillerine göre; iklim ve enerji performansı, yapısal performans ve mimari performans kategorileri altında incelenmektedir. İklim ve enerji performansı, kullanıcı konforunun optimizasyonu için iç mekan iklimlendirmesini kontrol etmektedir. Yapısal performans, yapıyı desteklemek ve optimize etmek için yapı sistemine gömülebilmektedir. Mimari performans ise, yapının işlevsel ve estetik yönlerini içermektedir (Lelieveld, 2013).

Akıllı sistemler, aktif veya pasif sistemlere dahil edilebilmektedir. Bir sistem, bir uyarın değişikliği algıladığında ve bir davranış veya harekete geçirme ile doğrudan bir tepki vermesi durumunda pasif olarak adlandırılmaktadır. Aktivasyonu başlatmak için ihtiyaç duyulan enerji çevresel kaynaklardan elde edilmekte ve kesintiye uğramamaktadır. Malzemenin davranış bir sistem tarafından kontrol edildiğinde, bu sistem aktif olarak nitelendirilmektedir. Bir sensör harici bir uyarının değişimini algılamakta, kontrol sistemi bu girdiyi işlemekte ve aktivasyon için uyarı vermektedir. Sistemin aktivasyonu için enerji girdisine ihtiyaç duyulmakta ve gerektiğinde ayarlanabilmektedir. Örneğin, aktif olarak kabul edilen otomatik

ışık sistemi ortamın ışık miktarı azaldığında aydınlatma sağlamaktadır. Işık miktarı bir ışık sensörü tarafından algılanır ve aydınlatma elemanları bir elektrik uyarıcısıyla aktive edilir. Hibrit sistemler ise aktif ve pasif sistemlerin özelliklerini birleştirmektedir. Aktivasyon pasif bir durumda gerçekleşebilmekte, ancak aktif bir sistem bu aktivasyonu geçersiz kılabilir. Örneğin; yüksek güneş ışığı algılandığında pasif sistem otomatik olarak cam yüzeyini gölgeleyerek bir tepki vermekte, ancak soğuk hava şartlarında yüksek güneş ışığı tercih edileceğinden aktif sistem gölgelemeyi engellemektedir. Hibrit sistemler yüksek verimlilik sağlayabileceği gibi daha karmaşık durumlara da yol açabilmektedir (Lelieveld, 2013; Spencer vd., 2003).

Akıllı malzemelerin uygulamaları incelendiğinde çeşitli sistemler içerisinde kullanımı görülmektedir. Akıllı sistemlerin içerisinde yer alan sensörlerin algılama özelliği genelde yapı sistemlerinde arka planda kalmasına rağmen önemli bir rol oynamaktadır (Yağlı, 2019). Örneğin, bir HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sisteminin rutin çalışmasında dahi iç mekanın sıcaklığı ve bağıl nemi gibi değişkenlerin kesin olarak saptanması sağlanmaktadır.

Akıllı malzemeler ve ilgili karakteristik özellikleri mevcut ve/veya belirli mimari uygulamalarla eşleşmektedir (Tablo 15). Tabloda belirtilen elektroeolojik ve manyetoeolojik akıllı malzemeler Addington ve Schodek (2005)'in sınıflandırma yönteminde yer alması sebebiyle bu tez çalışmasının "Akıllı Malzemeler" başlığı altında ele alınmamaktadır. Elektrostriktif akıllı malzemeler Ritter (2007)'in sınıflandırma yönteminde elektroaktif akıllı malzemeler başlığı altında açıklanmaktadır. Ancak manyetostriktif akıllı malzemeler sınıflandırma yönteminde yer almasına rağmen detaylı bir şekilde incelenmemektedir.

Bina Sistem İhtiyaçları	İlgili Malzeme veya Sistem Özellikleri	Temsili Uygulanabilir Akıllı Malzemeler
Bina kabuğundan geçen güneş radyasyonunun kontrolü	Kabuk malzemelerinin spektral absorptivitesi/iletimi	Asılı parçacık panelleri, fotokromikler, elektrokromikler, sıvı kristal panelleri
	Kabuk malzemesinin göreceli konumu	Panjur veya panel sistemleri, radyasyon (ışık) sensörleri: Fotovoltaikler, fotoelektrikler Kontroller/aktüatörler: Elektrostriktif, manyetostriktif, şekil hafızalı alaşımlar
Bina kabuğundan geçen ısı transferinin kontrolü	Kabuk malzemelerinin ısı iletkenliği	Faz değişim malzemeleri, termotropikler
İç ısı üretiminin kontrolü	İç malzemenin ısı kapasitesi	Faz değişim malzemeleri
	Isı kaynağının göreceli konumu	Termoelektrikler
	Lumen/watt enerji dönüşümü	Işık yayan diyotlar, fotolüminesans, elektrolüminesans
Enerji dağıtımı	Ortam enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü	Fotovoltaikler, mikro ve mezo enerji sistemleri (termoelektrikler)
Aydınlatma sistemlerinin optimizasyonu	Gün ışığı algılama, aydınlık ölçümleri, doluluk algılama	Fotovoltaikler, fotoelektrikler, piroelektrikler (termoelektrikler)
	Kaynağın göreceli boyutu, konumu ve rengi	Işık yayan diyotlar(LED), elektrolüminesans
HVAC sistemlerinin optimizasyonu	Sıcaklık algılama, nem algılama, doluluk algılama, Co2 ve kimyasal algılama	Piroelektrikler (termoelektrikler), biyosensörler, kimyasal sensörler, optik MEMS
	Kaynağın ve/veya atık suyun bağlı konumu	Termoelektrikler, ısı boruları faz değişim malzemeleri
Yapısal sistemlerin kontrolü	Gerilme ve deformasyon denetleme, çatlak kontrolü, gerilme ve deformasyon kontrolü, titreşim denetleme ve kontrolü, euler burkulma kontrolü	Termoelektrikler, faz değişim malzemeleri, ısı boruları, fiber optik, piezoelektrikler, elektroeolojik, manyetoeolojik, şekil hafızalı alaşımlar

Tablo 15. Potansiyel olarak uyarlanabilir akıllı malzemelerle ilgili tipik bina sistemi tasarım ihtiyaçlarının eşleştirilmesi (Addington ve Schodek, 2005)

Akıllı malzemelerin kullanıcılar tarafından en belirgin olarak algılanabilen uygulaması, önbellek olarak da kullanıldığı pencere ve cephe sistemleridir. Bununla beraber, kullanıcının yapı algısı üzerinde etkili olan, aydınlatma sistemlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca küresel çevre sorunlarına çözüm getirebilmesi için enerji sistemlerinde uygulanmaktadır. Yapılardaki akıllı malzeme uygulamalarından kullanıcı tarafından en az fark edilen uygulama yöntemi, yapısal sistemlerin izlenmesi ve kontrolüdür (Addington ve Schodek, 2005). Tez çalışmasının bu bölümünde akıllı malzemelerin; cephe sistemleri, aydınlatma sistemleri, enerji sistemleri ve yapısal sistemler başlıkları altında kullanımları incelenmektedir.

3.3.1. Cephe Sistemleri

Cephe sistemleri; çevresel koşullara uyum sağlayarak iç mekandaki ışık, iklim, ses ve hava kalitesi gibi kullanıcının konfor ihtiyaçlarının karşılanmasında ve enerji maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir role sahip yapı elemanlarıdır. Doğal havalandırma ve güneş ışığı kontrolüyle yapının; havalandırma, iklimlendirme ve aydınlatma yüklerinin en aza indirilmesini sağlamaktadır.

Cephe sistemleri, mimarların tasarımlarında ele alması gereken öncelikli unsurlardan biridir. Cepheler, enerjiyi her zaman iki yönlü olacak şekilde aktarmaktadır. Isı dışarıdan yapının içerisine aktarılabilir gibi, içeriden dışarıya da iletilebilmektedir. Yapıya giren güneş ışınları termal enerjinin artmasına neden olmaktadır (Addington ve Schodek, 2005).

Cepheler, iç mekanda belirli bir dengenin sağlanmasına ve korunmasına etki etmektedir (Yağlı, 2019). İç ve dış mekanları ayıran cephelerin, enerji tüketimi üzerinde yüksek etkileri bulunmaktadır (Bayraktar ve Yılmaz, 2007). HVAC sistemleri, cephenin oldukça değişken olabilen termal enerjisini azaltmak için kullanılmaktadır. Ancak bu sistemler tasarıma bağlı olarak yüksek enerji maliyetlerine sebep olabilmektedir. Cephelerde cam kullanımındaki artış, yapıdaki termal dalgalanmayı arttırmaktadır. Bu soruna çözüm olabilecek güneş yansıtıcı filmler, otomatik panjurlar ve çift cidarlı cephe sistemleri gibi tasarımlar geliştirilmiştir (Addington ve Schodek, 2005).

Pencereler ve cepheler bir yapının en önemli görsel öğeleri olmaları sebebiyle tasarım sürecinde mimarlar için genelde birincil konumdadır. Bu alanda gerçekleşen girişimlerin çoğu akıllı malzemeyi tasarım pratiğine uygulanabilir şekilde ele almaktadır. Mimaride akıllı malzemeler üzerine yürütülen araştırmaların en yüksek uygulama potansiyeline sahip olduğu alan cephe sistemleridir (Sobczyk vd., 2021).

Akıllı malzemelerin cephelerde uygulanmasıyla, herhangi bir bilgisayar vb. sistem ve işlem gücü gerekmeden malzemelerin kendi özellikleri kullanılarak, ortama adapte olan akıllı cepheler oluşmuştur (Orhon, 2013). Akıllı malzemeye sahip cephelerin; enerji üreten ve/veya korunumunu sağlayan, kendini ve/veya havayı temizleyebilen, iklimlendirme ve enerji tüketimini dengeleyen, aydınlatma ve görüntüleme teknolojisini içeren özellikleri bulunmaktadır. Bu bağlamda, teknolojik gelişmeler ile akıllı malzemeler cam sistemlerinde önemli kullanım olanakları bulmaktadır (Yağlı, 2019).

Akıllı camlar, iç veya dış mekanlarda, etkileşimli veya dönüştürülebilir bir yüzeye sahip sistemleri tanımlamaktadır. Akıllı camlar; optik geçirgenliğin kontrolü, ısı geçirgenliğinin kontrolü, ısı emiliminin kontrolü ve görüş kontrolü gibi işlevlere sahiptir. Bu işlevlerin yapıda; güneş radyasyonunun engellenmesi, ısı dengesinin ve dolayısıyla iç mekan konforunun düzenlenmesi, gerekli durumlarda mahremiyet sağlanması gibi etkileri bulunmaktadır.

Fotokromik malzemeler, gözlüklerdeki kararan lenslere benzer şekilde, yapıların cephelerinde istenmeyen güneş radyasyonunun iletimini önlemek için kullanılmaktadır. Bununla beraber, gözlük lenslerine kıyasla, yapılarda ele alınması gereken bir diğer önemli faktör ısı dalgalanmalarıdır (Erkol ve Sayın, 2021). Örneğin; kış aylarında kuzey enleminde bulunan yapılar düşük güneş açısına maruz kalmakta ve parlama yapmaktadır. Güneş açısı fotokromik camın koyulaşmasına sebep olmakta, ancak kuzey ikliminin düşük sıcaklık seviyeleri açısından istenmeyen bir durum olabilmektedir. Termokromikler bu bağlamda daha elverişli, ancak görüş kontrolü değişken olabilen malzemelerdir. Termokromik camların tepki verme sıcaklıkları iç ortam sıcaklığına göre ayarlanabilmektedir (Döşemeciler, 2012). Ancak sınırlı bir aralıkta ışığı geçirebilme özelliğine sahip olduğundan uygulama alanları kısıtlıdır.

Termokromikler ile aynı uyarana tepki veren termotropik malzemelerin uygulama alanları daha geniştir. Termotropik malzemenin faz değişimi geçirmesi yapısında bir yeniden yapılanma gerçekleştirmekte ve böylece termal iletkenlikte önemli bir değişim meydana gelmektedir. Bu etki, çift cam arasına polimer folyoya kıyasla, hidrojel uygulandığında daha belirgin gözlemlenebilmektedir (Addington ve Schodek, 2005). Çevresel tepki iç mekan konfor gereksinimleri ile senkronize olamadığı durumlarda, bu cam teknolojilerinin verimliliğinden bahsetmek mümkün olmamaktadır.

Kullanıcı, elektrokromik camlar ile konfor gereksinimlerini karşılayabilmesinin yanı sıra, kendi ihtiyacına göre kontrol edebilmektedir. Ancak elektrokromik camlar gelişmiş sistemlerdir. Diğer sistemlerin (fotokromik, termokromik, termotropik) aksine, mevcut cephelere dahil

edilebilmeleri için gelişmiş destek altyapılarına ihtiyaç duymaktadır. Elektrokromik cam sistemlerinde elektrik akımı camın her iki yüzeyine de verilmekte ve genellikle özel bir tasarım ve kurulum gerektirmektedir. Buna ek olarak sistemin açık/kapalı konuma getirilmesini sağlamak için sensör ve mantık kontrol sistemi kullanılmaktadır (Erkol ve Sayın, 2021). Örneğin, yapay aydınlatma ile doğal ışık arasındaki dengeyi sağlamak için sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörler, cephenin ısı dalgalanmalarını dikkate alarak her iki ışık türü ile aradaki dengeyi sağlayabilmekte ve önceden belirlenmiş şekilde konfor seçeneklerini uygulayabilmektedir.



Şekil 16. Elektrokromik cam uygulaması, Colour House, Sanei Hopkins (2016) (URL-7)

Sıvı kristaller, büyük panel ekranlarında kullanılabilmesi sebebiyle cephe yüzeylerine de yerleştirilebilmektedir. Sıvı kristaller, elektrokromiklerden farklı olarak, test edilerek mimari uygulamalarda kullanılmıştır. Dayanımları, bakımları ve boyutlandırılmaları ile ilgili pek çok sorun çözülmüştür. Ancak sıvı kristal camlar saydam halden opak haline dönüştüğünde iletim enerjisi değişmemekte, dolayısıyla istenmeyen kızılötesi radyasyon engellenememektedir. Sıvı kristaller, elektrokromiklerin aksine, şeffaf durumlarında sürekli olarak elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Sıvı kristaller mahremiyetin ve ışığın istendiği iç mekanlarda verimli şekilde kullanılmaktadır. Asılı parçacıklar mahremiyet gerektiren uygulamalarda sıvı kristallere alternatif olabilmektedir. Benzer şekilde, kızılötesi radyasyonu iletmekte ve şeffaf durumda kalmak için sürekli elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Sıvı kristallere göre asılı parçacıklar spektral profillerini ayarlama daha az gelişmiştir (Addington ve Schodek, 2005). Akıllı camlar, içerdikleri akıllı malzemelere göre karşılaştırabilmektedir (Tablo 16).



Şekil 17. Elektrooptik camda özellik değişiminin gösterimi, Number 23 House (URL-8)

Sistem Türü	Spektral Tepki	Görsel İç Sonuç	Termal İç Sonuç	Giriş Enerjisi
Fotokromik	Yüksek UV seviyelerinde speküler-speküler iletim	Yoğunlukta azalma ancak hala şeffaf	İletilen radyasyonda azalma	UV radyasyonu
Termokromik	Yüksek IR seviyelerinde speküler-speküler iletim	Yoğunlukta azalma ancak hala şeffaf	İletilen radyasyonda azalma	Isı (yüksek yüzey sıcaklığı)
Termotropik	Yüksek ve düşük sıcaklıklarda speküler-diffüz iletim	Yoğunlukta ve görünürlükte azalma	İletilen, yayılan radyasyonda ve iletkenlikte azalma	Isı (yüksek ve/veya düşük yüzey sıcaklığı)
Elektrokromik	Kısa dalga boyuna karşı speküler-speküler iletim	Yoğunlukta azalma	İletilen radyasyonda orantılı azalma	Voltaj ve akım darbesi
Sıvı kristal (Elektrooptik)	Speküler-diffüz iletim	Yoğunlukta (minimum) ve görünürlükte azalma	İletilen radyasyona minimal etki	Voltaj
Asılı parçacık (Elektrooptik)	Speküler-diffüz iletim	Yoğunlukta ve görünürlükte azalma	İletilen radyasyona minimal etki	Akım

Tablo 16. Akıllı cam özelliklerinin karşılaştırılması (Addington ve Schodek, 2005)

Akıllı cam çeşitlerinin her birinin kendine özgü özellikleri bulunmaktadır. Cephe doğrudan iç mekan konforuna etki ettiğinden, burada önemli olan kullanıcının tasarımdan beklentisidir. Farklı fonksiyonlara sahip akıllı camlar, tasarımın gereklilikleri doğrultusunda tercih edilmektedir.

3.3.2. Aydınlatma Sistemleri

Aydınlatma, ortamların oluşmasında ve tanımlanmasında temel bir ihtiyaçtır. Herhangi bir yapı için mimari aydınlatma gerekirken ve tasarıma bağlı olarak farklılık göstermektedir. Aydınlatmalar, doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal aydınlatmalar güneş kaynaklı olması sebebiyle değişken bir yapıya sahiptir. Yapay aydınlatmalar ise kullanıcı konforunu optimum seviyede tutmak için geliştirilmiştir. Yapay aydınlatma sağlamak için çeşitli yöntemler bulunsa da en yüksek görsel konfor seviyesi ışığın kontrol edilebildiği, ayarlanabildiği ve yönlendirilebildiği zaman gerçekleşmektedir. Akıllı malzemeler yapılarda; ışığın düzenlenmesine, iletilmesine veya oluşturulmasına katkıda bulunan özelliklere sahiptir (Tokuç ve Köktürk, 2015).

Yapay aydınlatma kullanımı, yapılardaki en verimsiz süreç olarak tanımlanmaktadır. Yapay aydınlatma elemanlarının verimliliğini arttırmak için çalışmalar yürütülmüştür. Bu bağlamda geliştirilen floresanlar, akkor lambalardan beş kat daha verimlidir. Akıllı malzemeler, geleneksel sistemlere göre ışık üretmekte nispeten daha verimli olmalarına rağmen, enerji kullanımında yüksek oranda tasarruf sağlamaktadır. Tek bir aydınlatma kaynağının aksine, akıllı malzemelerin oluşturduğu aydınlatma sistemlerinde verim daha yüksektir. Akıllı malzemeler doğrudan ışık kontrolüne izin vermekte ve özel olarak tasarlanmış bir aydınlatma sistemi sağlamaktadır (Addington ve Schodek, 2005).

Akıllı malzemeler fiber optikler ile kullanıldıklarında aydınlatma elemanı olarak yüksek verimlilik sağlamaktadır. Fiber optikler ışığın iletilmesi için bir kanaldır. Yapılarında bir dönüşüm gerçekleşmediğinden akıllı malzeme sayılmamaktadır. Aydınlatma için fiber optik kullanımı, geleneksel aydınlatmalara göre daha farklı işlemektedir. Fiber optik kablolar bir ışık kaynağından yayılan ışığın bir kısmını yaymakta ve geleneksel sistemlerin aksine uzak konumlara ışığı iletebilmektedir. Dolayısıyla ışık kaynağından kaynaklanan ısı da aydınlatılan konumdan uzaktadır. Geleneksel aydınlatma, ışıktan daha fazla ısı enerjisi üretmekte ve bu sebeple verimsiz bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Bir binanın HVAC kaynaklı enerji tüketiminin üçte biri lambaların ürettiği fazla ısıyı gidermek için harcanmaktadır. Bu bağlamda uzak bir ışık kaynağı enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra, ısı kaynaklı oluşabilecek yangın riskini de düşürmektedir. Fiber optik kullanımında elektrik veya mekanik elemanlar

gerekmediğinden, sistemin altyapısı basitleşmektedir. Fiber optik aydınlatma sistemleri; aydınlatıcı, kablo ve uç bağlantı elemanları olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Fiber optik kabloların yapısındaki plastik, cam ile benzer iletim özellikleri göstermekte ancak çok daha esnek olduğundan farklı tasarımlara sahip olabilmektedir. Bununla beraber, yapay aydınlatmalar haricinde, doğal aydınlatmalar için de fiber optikler kullanılabilir (Addington ve Schodek, 2005).

Yapay aydınlatmaların bir başka türü olan katı hal aydınlatmaları, elektriği ışığa dönüştürmek için yarı iletken malzemeleri kullanmaktadır. Bunlara örnek olarak; inorganik ışık yayan diyotlar (LED), ışık yayan polimerler ve organik ışık yayan diyotlar (OLED) verilebilmektedir (Yağlı, 2019). LED'ler fiber optiklerin akıllı versiyonu olarak görülmektedir. Fiber optikler ışığın bölünmesini sağlarken, LED'ler herhangi bir katmandaki dizilerde rekombinasyona izin vermektedir. LED'ler; aydınlatılmayan alanlara yerleştirilmelerini sağlayan küçük boyutlarının yanı sıra, ışığın spektral özellikleri, kızılötesi radyasyonu ve ultraviyole radyasyonu ortadan kaldırarak kontrol edilebilmektedir.



Şekil 18. İç mekanda uygulanan LED ekranlar, Estudio Mariscal (2008) (URL-9)

OLED'ler ince film teknolojisine dayanmaktadır. Geleneksel LED sistemleri noktasal kaynaklardan üretilmekte ve renk değişimleri belirli bir bölgedeki diyotların kombinasyonunu gerektirmektedir. Buna karşılık ince filmler, piksellerin kombinasyonu önemsiz olduğundan, her türlü renk ve ışık dağılımını sağlayabilmektedir. OLED'lerin en önemli özellikleri; filmlerin esnek olmaları, eğriler etrafında biçimlendirilebilmeleri ve şeffaf olmalarıdır (Addington ve Schodek, 2005) .



Şekil 19. Organik ışık yayan diyotlar (OLED) ile oluşturulmuş cephe yüzeyi, Smartwrap, Ritter (2007)

Dinamik aydınlatma sistemleri genelde belirli bir oranda otomasyona ihtiyaç duymaktadır. RGB LED bileşenleri ile renkleri karıştırmak için uzaktan kumanda veya önceden programlanmış bir dizilim gerekmektedir. Geleneksel ışık kaynakları spektrumlarını ayarlayamadıkları için dinamik renklerde LED'ler kullanılmaktadır (Yağlı, 2019).

Aydınlatma kontrolü, enerji tüketimini azaltmakta ve LED sistemleriyle entegre bir şekilde çalışmaktadır. En yaygın aydınlatma kontrolleri; hareket sensörleri, doluluk sensörleri ve fotosensörleri içermektedir. Hareket ve doluluk sensörleri, kullanıcı ortama girdiğinde veya ortamda bulunurken ışıkları otomatik olarak açabilmektedir. Kullanıcı ortamda bulunmadığında ışıkları kapatarak gereksiz enerji tüketiminin önüne geçmektedir. Fotosensörler, dış ortamdaki ışıkların gündüz saatlerinde çalışmasını engellemekte ve yapının içindeki aydınlatmaları kontrol etme olanağı sunmaktadır (Ciabattoni vd., 2013). Bir aydınlatma sistemi yapının enerji tüketimine doğrudan etki edebilmektedir. Bu bağlamda, aydınlatma sisteminin yapıda bulunan diğer sistemlerle bağlantı kurabilmesi önem taşımaktadır (Yağlı, 2019).

3.3.3. Enerji Sistemleri

Yapılar; termal, mekanik ve elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Termal enerji; mekanın ısıtılması/soğutulması ve suyun ısıtılması için kullanılmaktadır. Mekanik enerji; fanlar, motorlar, kompresörler, pompalar ve çeşitli cihazlar için gereklidir. Elektrik enerjisi ise aydınlatma ve elektronik cihazlar için kullanılmaktadır. Bir binada doğrudan mekanik enerji sağlamak için uygun bir yöntem bulunmamakta ve herhangi bir ısıyı reddetme ihtiyacının kompresör olmadan çalışması mümkün olmamaktadır. Mekanik ekipmanlara güç sağlayan

elektrik enerjisi, yapıdaki en önemli enerji kaynaklarından biri olarak tanımlanmaktadır. Bir yapının enerji ihtiyacının üçte ikisi elektrik enerjisinden oluşmaktadır. Bu bağlamda elektrik tüketimini azaltmaya yönelik sistemler geliştirmek önem kazanmaktadır (Yağlı, 2019).

Akıllı malzemelerin enerji aktarımı özellikleri, onları yapılarda kullanım için ideal hale getirmektedir. Enerji sistemleri üzerine cephe ve aydınlatma sistemleri kadar araştırma yapılmamıştır. Ancak yapılan araştırmaların büyük bir bölümünde fosil yakıt kaynaklı elektrik üretiminin bir kısmının fotovoltaik üretim ile değiştirmenin amaçlandığı görülmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Fotovoltaik (PV) malzemeler, çok katmanlı kompozit birimlerden oluşan hücreler olarak tanımlanmaktadır. Fotovoltaik güneş pilleri olarak da adlandırılan fotovoltaik hücreler, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürebilen yarı iletken malzemelerden oluşmaktadır. Katmanlardan biri pozitif, diğeri ise negatif yüke sahiptir. Güneş ışığı negatif katmana geldiğinde ışık fotonları emilerek elektronların pozitif katmana geçmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla doğrusal elektrik akımı oluşmaktadır. Yeterli elektrik akımı oluşturmak için hücrelerin birbirine seri bağlanması gerekmektedir. Hücreler birbirlerine bağlandığında bir modülü, modüller de bir diziyi oluşturmaktadır. Elde edilen bu düzene; fotovoltaik panel, güneş paneli veya modül denmektedir (Yağlı, 2019; Akgün, 2020). Güneş enerjisinden elektrik üretmek için kullanılan fotovoltaik paneller, ışıkla elektron uyarımı sonucunda enerji üretimini gerçekleştirmektedir (Ramsden, 2009).

Güneş pilleri üç sınıf altında incelenmektedir. İlk sınıfta yer alan güneş pilleri, kristal silikon malzemesi içermektedir. Kristal silikon malzemesi içeren güneş pilleri, kullanım ömrünün uzun olması ve yüksek enerji verimliliği sağlaması sebebiyle tercih edilmektedir. İkinci sınıfta yer alan güneş pilleri, ince film hücreleri olarak tanımlanabilmektedir. İnce film güneş pilleri, absorbe etme özelliği daha yüksek olan silikon ile kaplanmış plastik yüzeylerden oluşturularak daha az kalınlıkta üretilebilmektedir. Üçüncü sınıfta yer alan güneş pilleri ise gelişmiş ince film fotovoltaik olarak adlandırılmaktadır. Düşük üretim maliyetine sahip bu piller, ikinci sınıfta yer alan ince film güneş pillerinin performansını yükseltmeyi hedeflemektedir. Polimer güneş pilleri, boya güneş pilleri ve nanokristal hücreler gelişmiş ince film fotovoltaik pillerin içerisinde yer almaktadır. İçerisinde bulunan silikon nano yapılar sayesinde kızılötesi spektrum kullanarak geceleri elektrik üretilmektedir (Yağlı, 2019).

Fotovoltaikler ısıya duyarlı bir yapıya sahiptir. Hücre sıcaklığı arttıkça verimleri düşmeye başlamakta ve bu durum sıcaklığını daha da arttırmaktadır. Silikon esaslı hücreler ısıya en duyarlı olanlardır. İnce film fotovoltaikler ısıya daha az duyarlı ve düşük bir verimliliğe

sahiptir. Konumlandırıldıkları yön, çevresel koşullara bağlı olarak hücrelerin kirlenmesi ve dolayısıyla güneş ışığına daha az maruz kalmaları, ekstrem sıcaklıklarda düzgün çalışamamaları gibi bu hücrelerin verimliliğini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır (Addington ve Schodek, 2005).



Şekil 20. Çatıya entegre edilen fotovoltaik paneller, The Heliotrop, Rolf Disch (1994) (URL-10)

3.3.4. Yapısal Sistemler

Yapılar, deprem ve rüzgar gibi dışarıdan gelen kuvvetlere maruz kaldıklarında karmaşık olabilecek şekilde hareket etmektedir. Örneğin; bazı elemanlar bükülebilmekte veya kopabilmektedir. Tasarımcılar, bu dinamik yükler altındaki yapıların davranışlarını tahmin edebilmelerini sağlayan bilgisayar tabanlı yapısal analiz simülasyon programları kullanmaktadır. Akıllı malzemeler, dinamik yükler sebebiyle oluşan bu problemleri çözmek için yeni yöntemler sunmakta ve “akıllı yapılar” adı verilen yeni tasarım olanakları getirmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Akıllı yapılar alanında nispeten yeni sayılabilecek gelişmelerden biri “akıllı cepheler” olarak adlandırılan yapı yüzeyleridir. Bu yüzeyler, yapının cephesi boyunca algılama yeteneğine sahiptir. Örneğin; yapıdaki aşınmaları tespit edebilen ve yüzey boyunca dağılmış mikro boyutlara sahip piezoelektrik parçacıkları ile denemeler yürütülmüştür. Akıllı yapılar amaçları gereği dış uyarıyı algılayıp uygun bir yapısal tepki verebilmektedir. Akıllı yapı sistemleri; pasif ve aktif sistemler olarak ayrılmaktadır. Pasif bir sistem istenmeyen bir durumun etkilerini olabilecek en basit tepki araçlarıyla en aza indirmeyi hedeflemektedir. Aktif bir sistem ise istenmeyen bir durumu kontrol etmek için kuvvet uygulamaları ve diğer tekniklerin kullanıldığı anlamına gelmektedir. Mevcut yaklaşımlar tipik olarak; yapı, bir sensör sistemi,

bir alıştırıcı sistem ve bir kontrol sisteminden meydana gelmektedir. Akıllı malzemelerin sürekli bir gelişim içinde olması, yapının ayrılmaz birer parçaları olmalarına izin vermektedir (Yağlı, 2019).

Yapısal sağlık izleme sistemleri (SHM), yapısal sağlığın izlenmesini ve denetlenmesini sağlayan bir teknolojidir. Yapılardaki hasarlar; çeşitli dış ortam kuvvetlerinden (deprem, rüzgar, yüksek sıcaklıklar), kullanıma bağlı oluşabilecek etkilerden, aşırı yüklenmelerden veya titreşimlerden kaynaklanabilmektedir. Yapısal performans, bir malzemenin mekanik özelliğinde zamana veya ortama bağlı değişkenler sebebiyle bozulabilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

Geleneksel yapısal sağlık izleme yöntemleri hasarları tespit etmek için; stres, gerginlik, yer değiştirme, hızlanma ya da diğer ilgili fiziksel reaksiyonların llmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemleri kullanan geleneksel sensörler pasif özellik sergilemekte ve hasarlar ile ilgili doğrudan bilgiler yerine yk ve gerinim gibi ikincil bilgiler vermektedir (Giurgutiu vd., 2000).

Gömülü fiber optik kablolar; kopmaları, keskin bükülmeleri, titreşimleri, deformasyonları ve diğer oluşabilecek hasarları belirlemek için kullanılabilir. Bu yöntem, kablo üzerine iletilen işığın özelliklerinin analizine dayanmaktadır. Temel malzemede hasar sonucu oluşan deformasyonlar, kırıklar ve bükülmeler gibi etkiler, fiber optik kablolar ile iletilen işığın özelliğini değiştirmekte veya etkilemektedir. Farklı bir Şekilde piezoelektrik malzemeler, yapısal özellikleri sayesinde, statik ve dinamik etkileri ölçmek için gerinim göstergeleri olarak kullanılabilir. Bu cihazlar yerleştirildikleri konumlardaki statik gerilmeleri ölçmek için yaygın olarak tercih edilmektedir. Piezoelektrik cihazlar yapıdaki titreşimleri izlemek için de kullanılabilir. Titreşimlerin llmesi, yapıların yapısal sağlığını geniş bir Şekilde değerlendirmek için önemlidir. Bununla beraber piezoelektrik malzemeler akıllı boya teknolojisinde de uygulanmaktadır. Bu boyalar, polimerik bir matris boyunca dağınık halde bulunan piezoelektrik parçacıklar içermektedir. Hasar tespiti ve değerlendirmesi amacıyla tercih edilmektedir (Sobczyk vd., 2021).

Yapılarda titreşim olaylarının kontrolü, akıllı malzemeler alanında yapılmış birçok araştırmanın merkezinde yer almıştır. Yapılardaki titreşim olayları; dış kuvvetlerden (rüzgar, deprem), yapıda taşınan makinelerden, yapının insan yükünden veya diğer etkilerden kaynaklanabilmektedir. Deprem veya rüzgar kaynaklı gerçekleşen titreşimler, ivmelere ve hareketlere sebep olarak yapılarda çökmelere kadar varabilecek hasarlara yol açabilmektedir. Deprem kuvvetlerine maruz kalan yapılarda, yanal hareketlerin yapıya iletilmesini önlemek için kolon veya temellerin altına izolasyon cihazları yerleştirilmektedir.

Kiriş/kolon bağlantıları arasına enerjiyi absorbe eden çeşitli sönümlenme mekanizmaları geliştirilmiştir. Sönümlenme mekanizmaları veya diğer enerji absorbe eden cihazlar olarak kullanılan birçok geleneksel cihaz bulunmaktadır. Bu cihazlar içinde pasif kütle damperleri ve aktif kütle damperleri yer almaktadır (Addington ve Schodek, 2005).

Piezoelektrik teknolojileri arasında piezoelektrik polimerlerin kullanımı ve piezoelektrik sönümlenme kompozit malzemeleriyle ilgili gelişmeler yer almaktadır. Kompozit malzemeler kendiliğinden sönümlenen pasif yüzeyler olarak kullanılmaktadır. Piezoelektrik ubuk benzeri elemanlar viskoelastik bir matris boyunca dağılmaktadır. İletken malzemeler çıktı sinyallerini almak için elektrot görevi görmektedir. Bununla beraber birçok aktif piezoelektrik titreşim kontrol cihazı da bulunmaktadır. Aktif şekilde eşleştirilmiş sensör-aktüatörlü piezoelektrik cihazlar, sağlam bir yapıya sahip ve çoklu frekansa tepki verebilecek şekilde tasarlanabilmektedir (Addington ve Schodek, 2005).

4. AKILLI EV ÖRNEKLERİ

4.1. Örneklerin İncelenmesi

Akıllı malzeme teknolojileri üzerine yürütülen çalışmalar doğrultusunda mimari alanda malzeme çeşitliliği ve uygulama alanları giderek artmaktadır. Yapılarda gömülü olan sensör ve/veya aktüatör şeklindeki uygulamalardan, doğrudan gözlemlenebilen cephe sistemlerine kadar farklı türde kullanımları bulunmaktadır. Akıllı malzemelerin, farklı ölçekteki yapılarda çeşitli işlevlerde uygulanabilmesine rağmen, temel kullanım amacı enerji verimliliği sağlamaktır. Bu bağlamda binalarda kullanıldığında yapıların enerji maliyetlerine önemli ölçüde etki etmekte, ev ölçeğinde kullanıldığında ise kendi kendine yetebilen sistemler ile daha sürdürülebilir yapılar oluşturmaktadır.

Akıllı malzemelerin gerçekleşen başarılı uygulamaları ve günlük kullanımlarının artması, bilgi ve iletişim teknolojileri için yeni bir kavram olan akıllı evlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Akıllı evler; elektronik cihazların ve sistemlerin otomatik olarak kontrol edilmesini sağlayan ortamlar olarak tanımlanmaktadır. Akıllı evlerin içerdiği teknolojilerin kullanıcı odaklı kontrol edilmesini sağlayan ev otomasyon sistemleri, sürdürülebilirlik konseptinin uygulanmasında önemli bir etkiye sahiptir. Akıllı malzemeler, ev otomasyon sistemleri ile kullanıldıklarında enerji verimliliği sağlamakla birlikte kullanıcı konfor ihtiyaçlarını da karşılamaktadır.

Kullanıcı odaklı değişebilen ve kontrol edilebilir enerji yönetimlerine sahip olan akıllı evler, binalara oranla daha esnek davranabilmektedir. Akıllı evler birbirine entegre edilmiş teknolojik sistemlerin tek bir merkezden kontrol edilmesini sağlarken, binalar içerdiği otomasyon sistemleri ile bireysel tercihler yerine yapıların enerji maliyetlerini düşürmek üzerine odaklanmaktadır. Bu bağlamda sürdürülebilir sistemler oluşturmak için binalar yapı odaklı bir yol izlemekte, akıllı evler ise yapıya ek olarak kullanıcıyı da dikkate almaktadır. Akıllı malzemelerin günlük yaşama etkilerinin ve kullanıcı odaklı sürdürülebilir çözümlerinin anlaşılması amacıyla örnek incelemesi akıllı evler üzerinden yapılmıştır.

Yapılan araştırmada ilk adım olarak akıllı ev tanımına uyan örnekler incelenmiştir. Akıllı ev tanımını karşılayan örneklerin; içerdikleri akıllı malzeme teknolojileri, malzemelerin kullanım yerleri, sensör sistemleri vb. özellikleri detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Benzer özellik gösteren akıllı evlerden malzemenin niteliklerini öne çıkaran örnekler araştırmaya dahil edilmiştir. Akıllı ev örnekleri; genel tasarım özellikleri, ev otomasyon teknolojileri, akıllı malzeme kullanımları ve sürdürülebilirlikleri yönünden ele alınmıştır.

4.1.1. House R 128

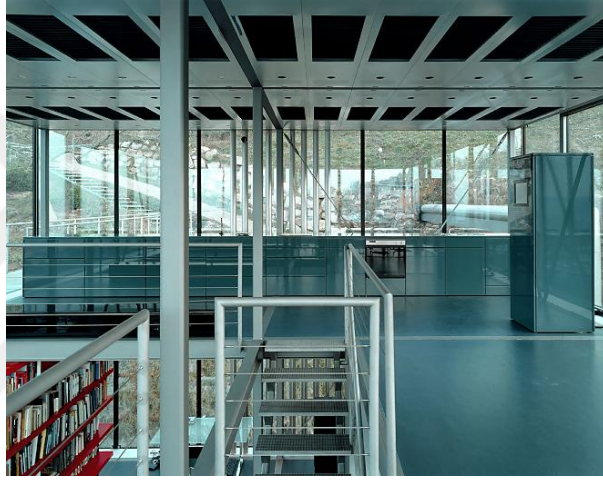
Yapı Adı	House R 128
Yapı Mimarı	Werner Sobek
Yapı Konumu/Yılı	Stuttgart, Almanya/2000
Akıllı Malzemeler	Faz Değişim Malzemesi ve Fotovoltaik Panel
Kullanım Yeri	Cephe ve Çatı

2000 yılında Werner Sobek tarafından inşa edilen House R 128, Almanya'nın Stuttgart şehrinde bulunmaktadır. Emisyon üretmeyen dört katlı çelik iskelete sahip ev tamamen geri dönüştürülebilir olarak üretilmiştir. Sürdürülebilir mimariyi esas alan tasarım, ısıtma enerjisi ihtiyacını kendi kendine karşılayabilmektedir. Prefabrik bir şekilde inşa edilen ev dört günde tamamen monte edilmiştir. Şeffaf ve yüksek performanslı yapıya sahip cephe sistemi kullanıcıya görsel bir süreklilik sağlamaktadır.



Şekil 21. House R 128 cephedeki ısı depolayan camlar (URL-11)

Cephenin tamamı üç katmanlı cam paneller ile çevrelenmiştir. Paneller arasındaki boşluk inert gazla doldurulmuş ve dış yüzeyler yansıtıcı bir katman ile kaplanmıştır. Bu sayede yüksek miktarda ışık geçirgenliği ve düşük ısı kayıpları elde edilmesinin yanı sıra, yüksek yalıtım ve ısı depolama özelliği de sağlanmaktadır. Örneğin; ısı depolama özelliği ile soğuk günlerde dış yüzey buzlanırken, camın iç yüzeyine dokunulduğunda sıcak hissedilmektedir (URL-12). Sıcak günlerde ise camın yalıtım özelliği sayesinde iç mekanın aşırı ısınmasının önüne geçilmektedir. Pencereler; uzaktan kumanda, sesli kontrol veya her katta bulunan dokunmatik ekranlar ile çalıştırılabilmektedir. Ayrıca katların her birinde sensörler sayesinde hareket edebilen kapılar bulunmaktadır.



Şekil 22. House R 128 iç mekan tasarımı (URL-13)

Cephenin dikey formunu takip eden düz çatı boyunca 48 adet fotovoltaik panel yer almaktadır. House R 128, sürdürülebilirlik konsepti ile uyumlu olarak, elektrik enerjisi ihtiyacını fotovoltaik panellerden karşılamaktadır. Çatının alt kısmında bulunan tavan alüminyum panellerden oluşmaktadır. Bu paneller; aydınlatma elemanlarını, akustik yalıtım sağlayan bir yüzeyi ve su dolu bakır borulardan oluşan bir ısıtma/soğutma sistemini içermektedir. Hava akışının kontrolünü sağlayan ve atık hava ısını geri kazandıran mekanik havalandırma sistemi bulunmaktadır. Bu sayede iç ortam sıcaklığı her kat için ayrı şekilde seçilebilmekte ve otomatik olarak kontrol edilebilmektedir (URL-14). Ayarlanan sıcaklık aşıldığında tavanda bulunan ısıtma/soğutma sistemine soğuk su verilmektedir. Böylece enerji kaybının önüne geçilmektedir.

4.1.2. Villa Sophia

Yapı Adı	Villa Sophia
Yapı Mimarı	Coll Coll (Collaborative Collective)
Yapı Konumu/Yılı	Prag, Çekya/2018
Akıllı Malzemeler	RGB LED
Kullanım Yeri	İç ve Dış Aydınlatma

Coll Coll (Collaborative Collective) tarafından 2018 yılında tamamlanan Villa Sophia, Çekya'nın Prag şehrinde bulunmaktadır. Yaşam ve iş konseptini bir arada bulunduran yapı, en güncel yapay zekaya sahip ev örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Kullanıcılarının ihtiyaçları doğrultusunda tasarlanan akıllı ev, sahip olduğu teknolojileri günlük kullanımında göstermektedir.



Şekil 23. Villa Sophia genel görünüm (URL-15)

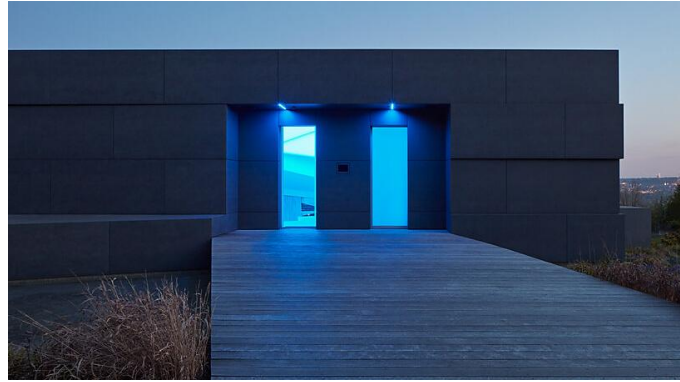
Yapay zeka, ev otomasyon sistemine entegre edilmesi sayesinde, Villa Sophia'nın bütün fonksiyonlarını yönetebilmekte ve kararları önceki deneyimlerine göre verebilmektedir. Kontrolü sağlayan Sysloop otomasyon sistemi, öğrenebilen bir yapay zeka olan Empyreum bilgi teknolojileri ile birlikte çalışmaktadır (URL-16). Yapıda bulunan 3000 farklı sensör sayesinde kullanıcılar ve oluşabilecek riskler sürekli olarak denetlenmektedir. Sensörler ile analiz edilen veriler ileriki senaryolarda kullanılmak üzere saklanmaktadır. Ses, hareket, ışık, termal, nem, konum vb. sensörler sayesinde yapay zeka evi algılayabilmekte ve kullanıcı ile interaktif bir iletişim kurabilmektedir. Bu sensörler ile sorulan sorulara cevap verebilmekte,

müzik çaldığında eşlik edebilmekte, acil durumlarda kapıları otomatik olarak açıp/kapatılabilmekte, hava durumuna göre pencereleri açıp/kapatılabilmekte ve kullanıcıyı yabancıardan ayırt edebilmektedir.



Şekil 24. Villa Sophia iç mekan tasarımı (URL-17)

Villa Sophia'nın kontrolü yapay zekada olmasına rağmen kullanıcının konfor, güvenlik ve ekonomik tercihleri esas alınmaktadır. Ev bu tercihleri içerdiği birçok teknolojik sistem içinde en çok aydınlatma sistemi ile karşılaşmaktadır. İç ve dış mekanda bulunan bütün aydınlatmalar RGB LED sistemi ile sağlanmaktadır. Diğer sistemler gibi aydınlatma sistemi de yapay zeka tarafından kontrol edilmektedir. RGB LED'ler ile kullanıcının ruh haline göre farklı renk tonlarını tercih edebilmektedir (URL-18). Örneğin, uyku saati yaklaştığında sistem otomatik olarak mavi ışığı (melatonin baskılayıcı) azaltabilmekte veya çalan müzikle senkronize olacak şekilde aydınlatmayı ayarlayabilmektedir. Aynı zamanda aydınlatmayı gereksiz durumlarda devre dışı bırakarak enerji maliyetlerinin önüne geçmektedir.



Şekil 25. Villa Sophia RGB LED aydınlatma (URL-19)

4.1.3. Soft House

Yapı Adı	Soft House
Yapı Mimarı	Kennedy & Violich Architecture
Yapı Konumu/Yılı	Hamburg, Almanya/2013
Akıllı Malzemeler	Fotovoltaik Panel ve LED
Kullanım Yeri	Cephe ve Aydınlatma

Kennedy & Violich Architecture tarafından tasarlanan Soft House, Almanya'nın Hamburg şehrinde bulunmaktadır. 2013 yılında tamamlanan yapı; ortam koşullarına tepki veren, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamak için kişiselleştirilen ve ekolojik olarak duyarlı bir tasarıma sahiptir. Dinamik cephe, güneş ışığından çok yönlü ve akıllı bir şekilde faydalanmaktadır. Yapı, ahşap konstrüksiyon ile sürdürülebilir bir tasarım modeli haline gelmektedir. Açık kat planı ile kullanıcıya tercih yapabilmesi için esnek bir kullanım alanı sağlamaktadır (URL-20).



Şekil 26. Soft House genel görünüm (URL-21)

Soft House'un güneş ışığına duyarlı cephesi, iki eksenli bir yapıya sahip fiber takviyeli kompozit levhalardan oluşmaktadır. Membran tekstil şeritler ile üretilmiş hareketli cephe sistemi, güneş açısını takip etmek için bükülen fotovoltaik paneller ile enerji üretmektedir. Şeritler aynı zamanda; mahremiyet yaratmak, görselliği arttırmak veya güneş ışığının iç mekana geçişini kontrol etmek için hareket edebilmektedir. Enerji üreten cephe, konumunu değiştirdikçe farklı gölge desenleri yaratmaktadır. Cephenin otomatik hareketi; termal ve ışık

sensörleri ile yapının yönetim sistemi aracılığıyla mevsimsel veya günlük olarak yapılmaktadır. Soft House'un yönetim sistemi enerji üretimini ve depolanmasını yöneterek enerji tüketimini izlemektedir (URL-22).



Şekil 27. Soft House hareketli fotovoltaik paneller (URL-23)

Dört konuttan oluşan yapının her biriminde LED aydınlatmalı ve hareketli perdeler bulunmaktadır. Bu sistem; rüzgar ve iklim koşullarını gerçek zamanlı olarak canlandırabilmekte, aynı zamanda kullanıcıya iç mekan planlamasını esnek bir şekilde kullanma imkanı sunmaktadır. Bir kontrol cihazı kullanıcılara programlanabilen LED akıllı aydınlatmaların kontrolünü sağlamaktadır. Cephe tarafından üretilen elektrik, LED'lere ve hareketli perde sistemine enerji sağlamakla birlikte yapının CO2 emisyonunu düşük seviyelere indirmektedir (URL-24).



Şekil 28. Soft House LED aydınlatmalı otomatik perde (URL-25)

4.1.4. Cellophane House

Yapı Adı	Cellophane House
Yapı Mimarı	Kieran Timberlake
Yapı Konumu/Yılı	New York, Amerika/2008
Akıllı Malzemeler	Fotovoltaik Panel ve LED
Kullanım Yeri	Cephe, Döşeme ve Merdiven

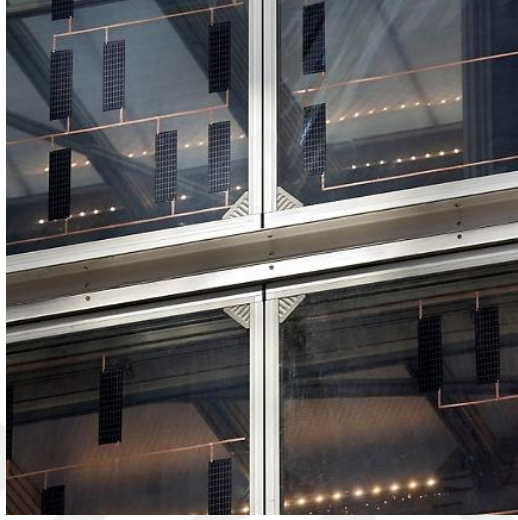
2008 yılında Amerika'nın New York şehrinde inşa edilen Cellophane House, prefabrik mimarinin güncel durumunu ve gelecekteki potansiyelini deneyimlemek için Kieran Timberlake tarafından tasarlanmıştır. Mimar, evlerin bağımsız bir nesne olmadığını ve bir sistem olarak düşünölmeleri gerektiğini vurgulamaktadır. Beş katlı yapının tamamı inşaat alanının dışında üretilmiş ve montajı on altı günde tamamlanmıştır. Ev, özelleştirilebilmekte ve küçük değişiklikler ile farklı ortamlar ve iklim koşullarına uyum sağlayacak şekilde düzenlenebilmektedir (URL-26).



Şekil 29. Cellophane House genel görünüm (URL-27)

Cellophane House alüminyum ströktürü ile hafif ve geri dönüştürülebilir bir yapıya sahiptir. Evin cephesinde bulunan fotovoltaik paneller güneş enerjisini toplamakta, dolayısıyla ısıtma ve soğutma için gerekli olan enerji en aza indirmektedir. Aynı zamanda cephe, ultraviyole film

ile ısıyı yansıtmakta ve ışığın girmesine izin vermektedir. Batı cephesine yerleştirilen termal sensör ile yüzey sıcaklıkları analiz edilerek yapının optimum performans göstermesi için kullanılmaktadır. Havalandırma iç mekanı yaz aylarında serin, kış aylarında ise sıcak tutmaktadır (URL-28).



Şekil 30. Cellophane House cephede fotovoltaik panel detayı (URL-29)

Tasarımın aydınlatması evi yaşam alanları ve merdiven boşluğu olmak üzere ikiye ayırmaktadır. LED'ler kullanılarak oluşturulan aydınlatma sistemi modülerlik, verimlilik ve geri dönüştürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda tercih edilmiştir. Doğrusal ışık yayan LED dizileri tavanda, döşemede ve merdivenlerde tasarımın çizgilerini takip etmektedir. Cellophane House yeni teknolojilerin ve malzemelerin entegrasyonunu ele almaktadır (URL-30).



Şekil 31. Cellophane House LED uygulaması (URL-31)

4.1.5. IVRV House

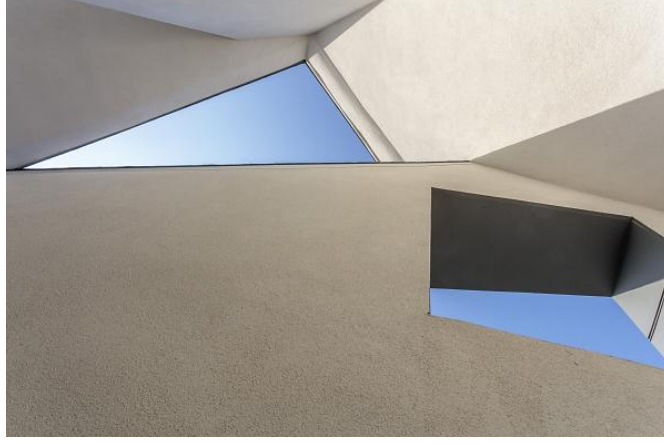
Yapı Adı	IVRV House
Yapı Mimarı	Darin Johnstone Architects
Yapı Konumu/Yılı	Los Angeles, Amerika/2016
Akıllı Malzemeler	TiO2 ve Fotovoltaik Panel
Kullanım Yeri	Cephe ve Çatı

Amerika'nın Los Angeles şehrinde 2016 yılında inşa edilen IVRV House, Darin Johnstone Architects önderliğindeki Southern California Institute of Architecture öğrencileri ve Habitat for Humanity kuruluşunun iş birliği ile tamamlanmıştır. Suç oranının yüksek olduğu bir bölgede kullanıcıların kendilerini güvenli hissetmelerini sağlamak için tasarlanmıştır. Yapının cephesinde ve çatısında bulunan geniş açıklıklar zemin kattaki giriş avlusuna doğal ışığın iletilmesini sağlamaktadır (URL-32).



Şekil 32. IVRV House genel görünüm (URL-33)

IVRV House düşük maliyetler ile inşa edilmesinin yanı sıra, sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Geniş pencereler parlamayı ve güneş ısı kazanımını en aza indirmek için eğimli tasarlanmıştır. İç mekanda kompakt bir düzene sahip olan ev; birinci katta mutfak ve oturma odası, ikinci katta ise yatak odalarını içermektedir. Güvenlik unsurları ele alınarak tasarlanan yapıda harekete duyarlı hırsız koruma sistemi ev otomasyon sistemi ile birlikte çalışmaktadır.



Şekil 33. IVRV House tasarımdaki boşluklar (URL-34)

Doğu ve batı cephelerine yerleştirilen kafes sistemi, ince film fotovoltaikleri tutmak için tasarlanmış siyah metal panellerden oluşmaktadır. Ancak inşaat sürecinde tasarım değiştirilerek, ince film fotovoltaikler yerine, çatıya fotovoltaik paneller yerleştirilmiştir. Kafes sisteminin iç katmanı, otoyoldan gelebilecek toz ve kire karşı, kendini ve havayı temizleyen titanyum dioksit malzemeyle kaplanmış vinil şeritlerden oluşmaktadır (URL-35).



Şekil 34. IVRV House TiO₂ ile kaplanmış şeritler (URL-36)

4.1.6. The W.I.N.D. House

Yapı Adı	The W.I.N.D. House
Yapı Mimarı	UNStudio-Ben Van Berkel
Yapı Konumu/Yılı	Kuzey Hollanda/2014
Akıllı Malzemeler	Fotovoltaik Panel ve LED
Kullanım Yeri	Teras, İç ve Dış Aydınlatma

UNStudio'nun baş mimarı Ben Van Berkel tarafından tasarlanan ve 2014 yılında tamamlanan The W.I.N.D. House, Hollanda'nın kuzeyinde bulunmaktadır. Esnek fonksiyonları, farklı iklimlere adapte olabilmesi ve akıllı ev otomasyon sistemiyle sürdürülebilir bir konsepti yansıtmaktadır. Planı incelendiğinde merkezde birleşen ve 4 bölüme ayrılan bir yel değirmeni benzetmektedir. Merkezi bir merdiven sisteminin etrafında şekillenen esnek tasarımı tüm evin birbiriyle bağlantılı olmasını sağlamaktadır.



Şekil 35. The W.I.N.D. House genel görünüm (URL-37)

Yapının ön ve arka cephesinde bulunan pencereler ile iç ve dış mekanlar arasında bir ilişki kurulmuştur. Mahremiyet gerektiren yatak odaları ve çalışma odaları ormanlık alana bakarken, mutfak ve salon gibi yaşam alanları ön kısımdaki araziye gözlemlemektedir. Salonda bulunan ana kontrol ekranından evin otomasyon sistemi takip edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, odalarda bulunan küçük ekranlardan da her oda için birbirinden bağımsız olarak konfor unsurları sağlanabilmektedir. Termal ve ışık sensörleri ile konfor unsurları düzenli olarak takip

edilmektedir. LED aydınlatmalar, iç ve dış mekanda konfor unsurlarını karşılamaktadır. Mutfak bölümünde bulunan Elektrokern Solutions ev otomasyon sistemi ile evin içindeki elektrikli aletlerin hepsi birbirine bağlanabilmekte veya bağımsız olarak çalıştırılabilmektedir (URL-38).

Güneşten gelen enerji evin teras kısmında bulunan fotovoltaik paneller ile kazanılmakta ve evin enerji ihtiyacı buradan karşılanmaktadır. Fotovoltaik panellerden kazanılan enerji ana kontrol ekranından gözlemlenebilmektedir (URL-39). Isı geri kazanımlı mekanik havalandırma sistemi enerji kaybını azaltarak tasarımın sürdürülebilirlik konseptiyle bağdaşmaktadır. Ön ve arka cephelerinde bulunan renkli camlar ile ısı kazanımı azaltılmıştır. Kullanıcı, evde olmadığı durumlarda, hareket sensörleri ile evin güvenlik durumuyla ilgili bilgilere uzaktan erişebilmektedir.



Şekil 36. The W.I.N.D. House renkli cam kullanımı (URL-40)

4.1.7. Edgeland House

Yapı Adı	Edgeland House
Yapı Mimarı	Bercy Chen Studio
Yapı Konumu/Yılı	Austin, Amerika/2012
Akıllı Malzemeler	Faz Değişim Malzemesi
Kullanım Yeri	Mekanik Sistem

2012 yılında Amerika'nın Austin şehrinde tamamlanan Edgeland House, Bercy Chen Studio tarafından tasarlanmıştır. Yer altına yarı gömülü olan yapı, bölgenin sert iklimine karşı termal konforu sağlamak için yeşil çatısını kullanmaktadır. Dolayısıyla yaz aylarında daha serin ve kış aylarında daha sıcak bir iç ortama sahip olmaktadır. İki ayrı yapıdan oluşan tasarım mekanik bir bütünlük içinde olmasına rağmen mekansal bir bağlantı bulundurmamaktadır.



Şekil 37. Edgeland House genel görünüm (URL-41)

Edgeland House sürdürülebilir teknolojileri içeren mekanik bir sisteme sahiptir. Yapıda bulunan hidronik HVAC sistemi, diğer sistemler ile entegre bir şekilde çalıştığında, maksimum enerji verimliliği sağlamaktadır (URL-42). Hidronik sistem, iç ortam sıcaklığını optimum düzeyde tutmak için bir pompa tarafından kanallar aracılığıyla iletilen basınçlandırılmış su kullanmaktadır. Termal sensörler ile iç ortam sıcaklığı kullanıcı tercihleri doğrultusunda ayarlanmaktadır. Tasarımdaki akıllı havuz da hidronik sistem ile ısıtılmaktadır. Bununla

birlikte, faz değişimli termal ısı depolama özelliği ile gizli enerji depolanmakta ve sistemdeki enerjinin düzgün bir şekilde iletilmesinde önemli rol oynamaktadır.



Şekil 38. Edgeland House iç mekan tasarımı (URL-43)

Yapı, yer altına yarı gömülü tasarımı sayesinde jeotermal enerjiyi kullanarak sahip olduğu termal enerjiyi koruyabilmektedir. Açıkta kalan ayırık cephesi ise çift katmanlı, renkli ve vakumlu cam paneller ile termal yalıtım sağlamaktadır (URL-44). Bütün sistemlerin birbirini desteklemesi sayesinde doğa ile uyumlu, düşük CO2 emisyonuna sahip ve ileri teknoloji ürünü olma özelliği gösteren Edgeland House, sürdürülebilir mimari için yeni standartlar belirlemektedir.



Şekil 39. Edgeland House renkli ve vakumlu cam paneller (URL-45)

4.1.8. The Jungle House

Yapı Adı	The Jungle House
Yapı Mimarı	CplusC Architectural Workshop
Yapı Konumu/Yılı	Sidney Avusturalya/2019
Akıllı Malzemeler	Fotovoltaik Panel
Kullanım Yeri	Cephe

CplusC Architectural Workshop tarafından tasarlanan The Jungle House, Avusturalya'nın Sidney şehrinde 2019 yılında tamamlanmıştır. Tamamen sürdürülebilir mimari niteliklerini yansıtmakta olan yapı, dış mekanın özelliklerini iç mekana taşımaktadır. Cephesindeki rastgele bir düzende bulunan ve bitkiler ile kaplanmış pencereler, soğutma görevi görerek, sıcak iklim koşullarına karşı pasif termal düzenleme sağlamaktadır. Çatı bahçesi de benzer bir görev görürken, aynı zamanda kullanıcılara meyve ve sebze ekimini sağlayan toprak bölümlere sahiptir (URL-46).



Şekil 40. The Jungle House genel görünüm (URL-47)

The Jungle House biriken yağmur suyunu yer altında bulunan 5000 litrelik bir depolama tankına aktarmakta ve filtreleyerek çatıda bulunan meyve ve sebzeler gibi çeşitli bitkilerin sulanması için kullanmaktadır. Aynı zamanda tasarımda bulunan gerçek balık havuzuna taze

su sağlamak ve bakteri açısından zengin suyu evin çeşitli fonksiyonlarında kullanmaktadır. Cephesinde bulunan fotovoltaik paneller, evin enerji ihtiyacını karşılamakta ve geri dönüştürülen suyun ısıtılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla yapı, kendi içinde geri dönüştürülebilir bir sistem oluşturmakta ve CO2 emisyonunu en aza indirmektedir (URL-48).



Şekil 41. The Jungle House çatı bahçesi (URL-49)

Ev otomasyon teknolojileri ile sürdürülebilir mimariyi birleştiren tasarımda kullanıcı evin enerji yönetimi ile ilgili fonksiyonlarını takip edebilmektedir. Kontrol ekranı ile panjurları uzaktan açıp kapatabilmekte veya evin fotovoltaik panellerden elde ettiği enerjiyi ve depolama tankındaki suyun miktarını gözlemleyebilmektedir. Yapı; nem ve termal sensörler ile hava koşullarını takip etmekte ve kullanıcıyı bilgilendirerek karşılaşılabilecek beklenmedik durumlar için uymaktadır (URL-50).



Şekil 42. The Jungle House cephede fotovoltaik panel kullanımı (URL-51)

4.1.9. DFAB House

Yapı Adı	DFAB House
Yapı Mimarı	NCCR Digital Fabrication
Yapı Konumu/Yılı	Dübendorf, İsviçre/2018
Akıllı Malzemeler	Fotovoltaik Panel ve LED
Kullanım Yeri	Çatı ve iç mekan aydınlatma

2018 yılında İsviçre'nin Dübendorf şehrinde inşaatı tamamlanan DFAB House, NCCR (National Centre of Competence in Research) Digital Fabrication topluluğu tarafından tasarlanmıştır. Ev, NEST araştırma binasının üçüncü katında bulmakta ve akademisyenleri ağırlamak için kullanılmaktadır. Zemin katı ortak kullanım ve sergi alanı olarak, üst katlar ise yatak odaları olarak işlev görmektedir. Dijital olarak tasarlanmış ve ağırlıklı olarak robotlar tarafından inşa edilmiş dünyadaki ilk ev olma özelliğine sahiptir. İnşaat süreci; kalıpsız beton dökümü, 3D baskılı tavan döşemeleri ve robotik olarak üretilmiş ahşap yapı gibi farklı yöntemler ve teknolojiler kullanılarak tamamlanmıştır (URL-52).



Şekil 43. DFAB House genel görünüm (URL-53)

Tasarımın ikinci ve üçüncü katlarının cephesinde aerojel granüller ve hafif membran kullanılmıştır. Yarı saydam bir özelliğe sahip olan cephesi sayesinde iç mekanda optimum ışık konforu sağlanmaktadır. Enerji ihtiyacını çatısında bulunan fotovoltaik panellerden sağlayan DFAB House, ihtiyacının 1,5 katı kadar enerji üretebilmekte ve fazla enerjiyi sonraki kullanımlar için depolayabilmektedir (URL-54). Tasarımda bulunan LED aydınlatmalar enerji tasarrufuna katkıda bulunmaktadır.



Şekil 44. DFAB House LED aydınlatma (URL-55)

DFAB House'da tüm enerji tüketimi 3Eflow adında öğrenen bir otomasyon sistemi tarafından kontrol edilmektedir. Atık suyun tamamı yeniden kullanılabilir ve buradan gelen ısı geri kazandırılmaktadır. Dolayısıyla %40'a kadar enerji ve su tasarrufu sağlanmaktadır (URL-56). Ses sensörleri ile kullanıcının komutları doğrultusunda panjurlar açılabilir ve ağ bağlantılı akıllı ev aletleri çalıştırılmaktadır. Bunun yanı sıra, hareket sensörleri içeren çok aşamalı bir hırsız koruma sistemi bulunmaktadır.

4.2. Örneklerin Değerlendirilmesi

İncelenen Örnek	Akıllı Malzeme/İşlevi	Kullanım Yeri	Sensör Çeşidi
House R 128	Faz değişim malzemesi/ Isıl konfor	Cephe	Hareket ve ses sensörü (Piezoelektrik)
	Fotovoltaik panel (Fotoelektrik)/Enerji üretimi	Çatı	
Villa Sophia	RGB LED (Elektrolüminesans)/ İç mekan konforu ve enerji tasarrufu	İç ve dış aydınlatma	Termal, ışık, ses, konum, nem ve hareket sensörü (Elektroaktif, fotoelektrik, manyetostriktif, fotoadezyon termoelektrik ve piezoelektrik)
Soft House	Fotovoltaik panel (Fotoelektrik)/Enerji üretimi	Cephe	Termal, ışık ve hareket sensörü (Termoelektrik, elektroaktif, fotoelektrik ve piezoelektrik)
	LED (Elektrolüminesans)/ Görsel algı	Perde	
Cellophane House	Fotovoltaik panel (Fotoelektrik)/Enerji üretimi	Cephe	Termal sensör (Elektroaktif ve piezoelektrik)
	LED (Elektrolüminesans)/ Görsel algı ve enerji tasarrufu	Cephe, döşeme ve merdiven	
IVRV House	TiO ₂ (Fotoadezyon)/Kendini ve havayı temizleme	Cephe	Hareket sensörü (Piezoelektrik)
	Fotovoltaik panel (Fotoelektrik)/Enerji üretimi	Çatı	
The W.I.N.D. House	Fotovoltaik panel (Fotoelektrik)/Enerji üretimi	Teras	Termal, ışık ve hareket sensörü (Termoelektrik, elektroaktif, piezoelektrik ve fotoelektrik)
	LED (Elektrolüminesans)/ İç mekan konforu ve enerji tasarrufu	İç ve dış aydınlatma	
Edgeland House	Faz değişim malzemesi/ Isıl konfor	Mekanik Sistem	Termal sensör (Elektroaktif ve piezoelektrik)
The Jungle House	Fotovoltaik panel (Fotoelektrik)/Enerji üretimi	Cephe	Termal ve nem sensörü (Fotoadezyon, elektroaktif ve termoelektrik)
DFAB House	Fotovoltaik panel (Fotoelektrik)/Enerji üretimi	Çatı	Ses sensörü (Piezoelektrik)
	LED (Elektrolüminesans)/ Görsel algı ve enerji tasarrufu	İç aydınlatma	

Tablo 17. İncelenen örneklerin analizi

Akıllı malzemeler üzerinden incelenen akıllı ev örneklerinin temel özellikleri, oluşturulan künyelerde açıklanmıştır. Örnekler, yapılan araştırmada elde edilen veriler doğrultusunda tablo ile analiz edilmiştir. Oluşturulan tablo, incelenen akıllı ev örneklerinde yer alan akıllı malzemeler hakkında bilgi vermektedir (Tablo 17). Tez çalışması kapsamında ele alınan akıllı malzemeler ile ilgili veriler; akıllı malzeme ve işlevi, kullanım yeri ve sensör çeşidi başlıkları altında ele alınmıştır. İkinci bölümde açıklanan akıllı malzemelerin tamamı ile ilgili uygulanmış akıllı ev örneği bulunmadığından, araştırmanın amacı kapsamında uygunluk gösteren örnekler incelenmiştir. İncelenen akıllı ev örneklerinde akıllı malzemeler; malzemenin gözlemlenebildiği ve sensör biçiminde kullanıldığı uygulamalar olarak iki farklı şekilde ele alınmıştır.

Akıllı malzemelerin yapılarda öncelikli kullanım amacının sürdürülebilirlik olduğu düşünüldüğünde, kendi enerjisini üreten yapılar oluşturmak için kullanılan ve çoğu örnekte karşılaşılan fotovoltaik panellerin (fotoelektrik) en yaygın olarak uygulanan akıllı malzeme teknolojisi olduğu saptanmaktadır. Uygulandığı örnekler arasında farklı kullanım yöntemlerine rastlanmaktadır. Güneş ışığının gün içinde farklı açılarla geldiği düşünüldüğünde, Soft House örneğindeki gibi güneşi takip eden hareketli sistemlerin daha verimli olduğu görülmektedir. Günlük yaşamda sıklıkla karşılaşılan ve enerji tasarrufu sağlayan LED (elektrolüminesans) teknolojisinin de yaygın olarak kullanıldığı anlaşılmakta, ancak tasarımın önemli bir unsuru olmadığı durumlarda bu teknolojiden bahsedilmediği düşünülmektedir. Villa Sophia'daki gibi konfor unsuru veya Cellophane House'daki gibi görsel olarak uygulanabilen LED'ler, işlev ve tasarım olarak esnek seçenekler sunmaktadır.

Isı depolama özelliği ile ısı konforun karşılanmasında önemli bir etkiye sahip olan faz değişim malzemelerinin uygulandığı örneklerde farklı kullanım şekillerine rastlanmaktadır. House R 128'de cephede cam panellerin içinde ve Edgeland House örneğindeki gibi mekanik sistem içinde kullanılmaktadır. Ortamların ısıtılması ve soğutulmasında önemli rol oynayan bu akıllı malzemenin nispeten düşük kullanıma sahip olmasının belli sebepleri olabileceği düşünülmektedir. Akıllı evlerde kullanılan HVAC sistemlerinin ve yüksek yalıtımlı cephelerin ısı konfor şartlarını yeterli ölçüde karşılaması buna örnek olarak gösterilebilmektedir. Benzer şekilde, titanyum dioksitin (fotoadezyon) yapılara sunduğu "kendini ve havayı temizleme" özelliği düşünüldüğünde, akıllı evlerdeki uygulamalarının yetersiz olduğu görülmektedir. Burada üzerinde durulması gereken temel unsur evlerin boyutlarıdır. Evlerin binalara oranla çok daha küçük yapılar olması ve genelde daha kolay temizlenebilmesi sebebiyle titanyum dioksit kullanımına ihtiyaç duyulmadığı çıkarımı yapılmaktadır.

Akıllı malzemelerin örnek uygulamaları incelendiğinde işlevlerinin ve kullanım yöntemlerinin farklılık gösterebildiği görülmektedir. Örneğin; LED'ler bazı uygulamalarda ana aydınlatma elemanı veya tasarım unsuru olarak kullanılırken, iç mekan konforu veya enerji tasarrufu işlevlerine sahip olabilmektedir. Sensörlerde ise bu özelliğe rastlanmamaktadır. Her sensör çeşidi kendi işlevini yerine getirmesine rağmen farklı kullanım yöntemlerini yapısında buldurmamaktadır. Örneğin, bir termal sensör sadece ortam sıcaklığındaki değişikliği algılamaktadır. Burada esas olan, sensörlerin verimli çalışabilmeleri için otomasyon sisteminin organizasyonuna ihtiyaç duymalarıdır. Ancak akıllı malzemelerin LED, fotovoltaik panel veya titanyum dioksit gibi uygulamalarında bir otomasyon sisteminin gerekliliği aranmamaktadır.

Akıllı evlerin temel konseptinin kullanıcı konforu, kullanıcı güvenliği ve sürdürülebilirlik olduğu yapılan tanımlarda belirtilmiştir. Bu unsurların karşılanmasında akıllı malzeme teknolojisinin yanı sıra, ev otomasyon sisteminin gelişmişlik seviyesinin de önemli olduğu anlaşılmaktadır. Villa Sophia örneğinde görüldüğü üzere yapay zekaya sahip ev otomasyon sistemlerinde belirtilen unsurlar daha verimli bir şekilde karşılanmaktadır. Dolayısıyla akıllı malzeme uygulamalarının, sensörlerin ve otomasyon sisteminin birbiri ile entegre olarak çalışması beklenmektedir. Sensörler, otomasyon sistemlerinin ortam koşullarını ve yapıda oluşan değişiklikleri algılamasını sağlamaktadır.

Elde edilen bulgular incelendiğinde, örneklerde kullanılan akıllı malzeme çeşitliliğinin sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. Akıllı malzeme teknolojisinin henüz tamamlanmamış bir teknoloji olması bu durumu açıklamaktadır. Ek olarak, akıllı malzeme uygulamalarının akıllı evleri daha sürdürülebilir yapılar haline getirdiği anlaşılmaktadır. En belirgin etkilerinin enerji yönetimine sağladıkları katkılar olduğu, bunun yanı sıra tasarım unsuru olarak da kullanıldıkları görülmektedir. Sensör uygulamaları ve otomasyon sistemlerinin ise evlerin akıllılığı ile doğru orantılı olduğu saptanmaktadır. Sensör sayısı ve çeşitliliği, otomasyon sisteminin gelişmişlik düzeyi ve birbirlerine entegre olmaları yapıların kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayabilme düzeyini belirlemektedir.

5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Malzeme bilimi, mimarlık ile doğrudan ilişkili olarak mimarların tasarımlarında belirleyici unsur konumunda bulunmaktadır. Uzun dönemler boyunca mimarlar, taş ve ahşap gibi geleneksel malzemelerin sınırlamaları doğrultusunda tasarımlarını hayata geçirmiştir. Sanayi devrimi ile birlikte, diğer pek çok sektör gibi, malzeme teknolojisinde yaşanan gelişmeler geleneksel malzemelerin oluşturduğu sınırları nispeten ortadan kaldırmıştır. Teknolojinin getirdiği yenilikler, dinamik mimarinin temellerini oluşturarak yapılarda malzemelerin işlevini arttırmaktadır.

Teknolojik gelişmelerin sonucunda ortaya çıkan akıllı malzemeler, geleneksel malzemelerden farklı olarak ortam koşullarındaki bir etkiye direnç göstermek yerine, bu etkiye uyum sağlayabilmektedir. Bu özellikleri ile bilim insanları, tasarımcılar ve mimarlar tarafından büyük ilgi görmektedir. Mimari alanda malzeme odaklı gözlemlenebilen uygulamalarının yanı sıra, gömülü şekilde sensör ve/veya aktüatör olarak da kullanılabilen akıllı malzemeler, henüz geliştirilme aşamasında olmasına rağmen yüksek bir potansiyel sunmaktadır. Akıllı malzeme teknolojileri geliştikçe sistemleri oluşturarak yapılara entegre edilmektedir. Bu sistemler, kullanıcılara daha uyarlanabilir performans sağlamak için yapıların içine gömülmektedir.

Akıllı malzemeler, çevresel uyarılara duyarlı malzemeler olup sistem düzeyinde kullanıldıklarında akıllı ortamları oluşturmaktadır. Akıllı malzeme sistemlerinin artan kullanımı ile ortamın akıllanması arasında doğrudan bir ilişki kurulabilmektedir. Akıllı malzemelerin özellikleri incelendiğinde, tek bir uyarana tepki verebilmeleri sebebiyle, ortamlarda birden fazla akıllı malzeme sisteminin kullanılması daha yüksek düzeyde bir akıllılık seviyesi sunmaktadır. Örneğin; bir sensör kullanımı tek bir uyarana algılarken, çoklu sensör kullanımı ortamda oluşan birçok değişkenin algılanmasını sağlamaktadır.

Akıllı ortamların çoğu farklı türlerde sensör-aktüatör sistemlerine dayanan algılama, izleme ve kontrol eylemlerini içermektedir. Bu sayede yapı çevresel koşulları izleyebilmekte ve tepki verebilmektedir. Akıllı malzemelerin bu tür işlevleri ortam düzeyinde yerine getirebilmesi, mimari uygulamalarda potansiyellerini yükseltmektedir. Malzeme ve teknoloji odaklı gelişim gösteren mimarlık, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamak için de ilerleme göstermektedir. Bu bağlamda akıllı malzeme sistemlerinin ortam düzeyinde otomasyon teknolojilerine entegre edilmesiyle birlikte, akıllı ev kavramı ortaya çıkmıştır.

Akıllı evler, teknolojik sistemler ile kullanıcıların konfor ve güvenlik unsurlarını enerji yönetimini gözeterek sağlamaktadır. Bu evler, akıllı malzemeler gibi tek bir uyarana tepki

vermek yerine, içerdikleri otomasyon sistemi ve teknolojiler ile çeşitli uyarılara aynı anda tepki verebilmektedir. Akıllı malzeme sistemlerinin akıllı ev otomasyon sistemlerine sensörler ve aktüatörler olarak entegre edilmesi ile yapı, çevreyi algılayabilmekte ve tepki verebilmektedir. Bununla beraber; uzaktan kontrol edilebilme, kullanıcı ile interaktif bir iletişim kurabilmekte ve önceden programlanmış şekilde kendi kendine tercihlerde bulunabilmektedir.

Kullanıcı ihtiyaçları ve sürdürülebilirlik, akıllı evlerdeki iki ana unsur olarak öne çıkmaktadır. Otomasyon sistemleri yapının organizasyonunu sağlayarak kullanıcı ihtiyaçlarını karşılarken, sürdürülebilirlik ilkelerini göz önünde bulundurmaktadır. Otomasyon sistemleri, akıllı evlerin kullanıcı tarafından kontrolünü sağlamakla birlikte arka planda otomatik olarak gerçekleştirdikleri fonksiyonlar ile yapıyı sürekli olarak denetlemektedir. Gizli olarak yürütülen bu fonksiyonlar sensörler aracılığıyla gerçekleşmektedir. Sensörler, yapıda oluşan değişiklikleri algılamakta ve bir çıkış sinyali oluşturarak otomasyon sistemine iletmektedir. Otomasyon sistemi, sensörden gelen çıktı sinyalini analiz ederek kullanıcı tercihleri doğrultusunda optimum konfor unsurlarının karşılanması için kullanılmaktadır. Örneğin; kullanıcı bir ortamdaki nem, ışık ve sıcaklık gibi unsurları otomasyon sistemine iletmede, otomasyon sistemi iletilen verilerin karşılanmasını sağlamak için sensörler ile ortamı sürekli olarak denetlemekte ve herhangi bir değişiklik olması durumunda müdahale etmektedir.

Akıllı malzemelerin yapılarda sensör ve/veya aktüatör haricinde malzeme düzeyinde gözlemlenebilir olan uygulamaları, enerji yönetimine doğrudan etki etmektedir. Özellikle enerji, cephe ve aydınlatma sistemlerinde kullanımları, akıllı evlerdeki enerji maliyetlerini ve CO2 emisyonunu ciddi oranda düşürmektedir. Sensörlerden farklı olarak uygulanan akıllı malzemeler, bir otomasyon sisteminin kontrolüne ihtiyaç duymamaktadır. Sensörlerdeki akıllı malzemeler uyarın etkisiyle bir çıkış sinyali üreterek otomasyon sistemine veri göndermektedir. Akıllı malzemelerin yapılarda olan uygulamaları ise kendi içlerinde bir dönüşüm geçirmektedir. Örneğin, akıllı camlarda uyarın etkisiyle yaşanan değişimler otomasyon sisteminden bağımsız gerçekleşmektedir. Benzer şekilde, fotovoltaik panellerde yaşanan enerji dönüşümünde bir otomasyon sisteminin kontrolüne ihtiyaç duyulmamakta, ancak birbirine entegre edilme seçeneği bulunmaktadır.

Çalışmada tanımları yapılan akıllı malzeme teknolojisinin; güncel gelişmişlik seviyesinin, uygulama çeşitlerinin ve ileriki süreçte potansiyel kullanımlarının daha verimli anlaşılması amacıyla akıllı ev örnekleri üzerinden incelemesi yapılmıştır. Araştırılan örneklerde akıllı malzeme uygulamalarının yapılara kazandırdığı enerji verimliliğine rağmen kullanılan akıllı

malzeme çeşitliliğinin düşük olduğu görülmektedir. Akıllı malzeme teknolojisi henüz gelişim aşamasında olmakla birlikte, mimari alanda potansiyeli araştırılmaktadır. Örneğin, termobimetallerin cephelerde gölgeleme elemanı olarak kullanımına yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu bağlamda, sınıflandırması yapılan ve tanımlanan akıllı malzemelerin tamamına yönelik uygulama örneği bulunmamaktadır.

Örneklerden elde edilen verilerde, enerji üreterek akıllı evlerin kendi kendine yetebilen sistemlere dönüşmesini sağlayan fotovoltaik panellerin en yaygın kullanıma sahip akıllı malzeme olduğu görülmektedir. Enerji verimliliği sağlayan LED aydınlatmaların da nispeten yüksek kullanıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla akıllı evlerde kullanılan akıllı malzeme uygulamalarının öncelikli tercih edilme sebebinin enerji tasarrufu sağlamak olduğu çıkarımı yapılmaktadır. Ancak enerji verimliliği sağlamasına rağmen akıllı cam teknolojisi ile ilgili bir örneğe rastlanmamaktadır. Maliyetli bir sistem olabilmesi ve çoğu durumda akıllı evlerin tasarımına uygun olmamasından dolayı tercih edilmediği düşünülmektedir.

İncelenen örneklerde, akıllı malzemelerin akıllı evlerde tasarıma yeterli ölçüde dahil edilmediği görülmektedir. Örneğin; fotovoltaik paneller yapılar doğrudan eklenmekte, ancak özel geliştirilmiş bir tasarım unsuru içermemektedir. Buradaki temel sebebin akıllı malzemelerin üretim maliyetleri olduğu görülmektedir. İleriki süreçte gelişen teknolojiyle birlikte kullanıcı tarafından oluşacak talep doğrultusunda üretim maliyetlerinin azalacağı ve mimari alanda yeni tasarımların ortaya çıkacağı ön görülmektedir.

Akıllı malzeme teknolojisinin ortamlara getirdiği yenilikler, geleceğin mimarisini şekillendirmekte ve yapı algısını değiştirmektedir. Bu malzemelerin sunduğu faydalardan en önemlisi ortamların enerji yönetimine katkılarıdır. Örneğin; LED bir aydınlatma elemanı, akkor ampullere göre çok daha uzun ömürlü olabilmekte ve çok daha düşük enerji harcamaktadır. Benzer bir şekilde, yapıların enerji korunumunda en önemli etkiye sahip olan cephelerde akıllı cam kullanımı ile gereksiz enerji kaybının önüne geçilebilmektedir. Akıllı malzemelerin bu özellikleri, geleneksel mimarideki öne çıkan problemlerden biri olan, yapıların enerji yönetimi bakımından oldukça önemlidir.

Isı kazanımı veya kaybının en çok yaşandığı alan cephelerdir. Akıllı malzemeler bu bağlamda oldukça önemli etkiler gösterebilmektedir. Örneğin; ısı kazanımını azaltmak için cephelerde akıllı cam (fotokromik, termokromik, elektrokromik) kullanımı, iç mekandaki sıcaklığı optimum seviyelere yaklaştıracığından, HVAC sistemlerinin daha az çalışmasını sağlayarak enerji tasarrufu ihtiyacını karşılamaktadır. Buna ek olarak cephe yüzeylerinde titanyum

dioksit kullanımı, yüksek yapılarda temizlik masraflarını önemli ölçüde düşürebilmekte ve doğal ışığın iç mekana daha çok iletilmesini sağlamaktadır.

Her akıllı malzeme farklı uyaranlara farklı şekillerde tepki verebileceğinden, malzeme seçiminde doğru tercihler yapılması önem kazanmaktadır. Bir malzemenin bir yapı uygulamasında tercih edilmesindeki en önemli unsur bulunduğu iklim koşullarıdır. Örneğin, doğal enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinin bolca bulunduğu iklimlerde fotovoltaik panellerin kullanımı önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayabilmektedir. Ancak soğuk iklimlere sahip bölgelerde, hava genelde kapalı olacağından, bu panellerin kullanımı önerilmemektedir. Mimari tasarımların ortama adapte olması gerektiği gibi, malzemelerin de ortama uyum sağlayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir.

Mimaride kullanılan malzemeler çeşitli kriterlere göre seçilmektedir. Tercihler genelde performans ve maliyet üzerinden olmasının yanı sıra, enerji yönetimi ve görsellik üzerinden de yapıldığı görülmektedir. Dolayısıyla akıllı malzemelerin bazı dezavantajları olabilmektedir. Halen geliştirme aşamasında olan çoğu akıllı malzeme henüz kendine bir uygulama alanı bulamamakta, uygulama alanı bulan akıllı malzemeler ise oldukça maliyetli olabilmektedir. Bunun sebebi, üretimleri için gereken gelişmiş teknolojiler olarak gösterilmektedir. Sağladıkları enerji yönetimi ve performans avantajları düşünüldüğünde bu maliyet göze alınabilmekte, ancak her zaman için mantıklı bir tercih olmayabilir. Örneğin; elektrooptik camlar iç mekanlarda veya cephelerde mahremiyet sağlamak için kullanılmakta, ayrıca elektrik ile uyarıldıkları için kullanıcı tarafından kontrol edilebilmektedir. Ancak bu camlar, şeffaf durumda kalmak için sürekli bir elektrik enerjisine ihtiyaç duyduğundan, performansına kıyasla enerji yönetimi konusunda yetersiz kalmaktadır.

Akıllı malzemelerin mimari uygulamalara dahil edilmelerindeki en büyük engel, az miktarda malzeme ve sistemin tek bir çevresel etki altında tepki verebilmesidir. Örneğin; bir yapı cephesinde ısı iletimini azaltmak için termokromik bir malzeme kullanımı, doğal ışığın içeri girmesini olumsuz etkilemektedir. Aynı zamanda yapıda bulunan sistemlerin çoğu birbirine entegre olduğundan, diğer sistemleri etkilemeden performans göstermeleri pek mümkün değildir.

Günümüzde olumsuz yönlerinin bulunmasına rağmen akıllı malzemelerin tamamlanmış bir teknoloji olmadığı unutulmamalıdır. Teknolojinin sürekli gelişim gösterdiği ve yeni yöntemlerin ortaya çıkacağı düşünüldüğünde, günümüzde karşılaşılan problemlerin önümüzdeki süreçte çözülebileceği ön görülmektedir. Örneğin; akıllı malzemelerin birbirleri ile entegre olarak çalıştığı sistemler geliştirilmesi, çoğu uygulamada tercih edilmelerini

olumlu yönde etkileyebilir. Ek olarak; elektrooptik cam örneğindeki gibi durumlarda, cam sistemlerinin fotovoltaik sistemlere entegre edilmesiyle gereksiz enerji harcamaların önüne geçilebilir. Bunu sadece fazla enerji depolandığında şeffaf olacağı şekilde ayarlanabilmesi durumunda gerçekleştirebilir.

Akıllı evlerdeki temel unsurların kullanıcı konforu ve sürdürülebilir çözümler olduğu düşünüldüğünde; birçok akıllı malzemenin yüksek potansiyeli bulunmakta, ancak henüz kullanımları ile ilgili gerçekleştirilmiş bir uygulamaya rastlanmamaktadır. Termobimetaller ve şekil hafızalı alaşımlarla ilgili yürütülen araştırmalarda, bu malzemelerin cephelerde kullanımlarında yapıların ısı kazanımını önemli ölçüde düşürebileceği ön görülmektedir. Harici bir elektrik enerjisine ihtiyaç duymadan çalışabilmeleri, mimari alanda potansiyellerini oldukça yükseltmektedir. Cephede görsel unsur olarak kullanılabilmesi sayesinde tasarımda tercih edilme ihtimalleri artmaktadır. Ancak bu malzemeler ortamdaki ısı ile genişerek şekillerini değiştirdikleri için tepkileri kullanıcı tarafından kontrol edilememektedir. Yapılarda gölgeleme elemanı olarak kullanıldıklarında iç mekandaki ışık kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. HVAC sistemleri ile uyumlu bir şekilde çalışmadıklarından, iç ortam sıcaklığında ani değişiklikler oluşabilmektedir. Bu bağlamda; şekil değiştiren malzemelerin, HVAC ve otomasyon sistemleriyle entegre çalışabilmesi üzerine çalışmalar yürütülmesinin daha verimli olacağı düşünülmektedir. Cephe sistemlerine dahil edilecek bir termal sensör ile şekil hafızalı alaşımların tepki verdiği sıcaklıklarda HVAC sistemleri otomatik olarak devre dışı bırakılabilir.

Akıllı malzemelerin mimariye getirdiği tasarımsal yenilikler ve performans avantajları düşünüldüğünde, giderek artan bir kullanım alanına sahip olacağı ön görülmektedir. Mimarlar için önemli olabilecek faktörden biri, akıllı malzemeleri tasarımın her aşamasında fonksiyonel bir unsur olarak görmeleri gerektiğidir. Geleneksel yapı malzemelerinin yerine kullanımları her koşulda mümkün gözükmesinde de çoğu durumda birbirlerine entegre bir şekilde kullanım olanakları bulunmaktadır. Bu malzemelerin, ekolojik anlamda çoğu mimari problemi çözerek yapıları daha sürdürülebilir ve çevre ile adapte olacak şekilde geliştireceği düşünülmektedir.

Tez çalışması kapsamında yapılan araştırmalarda akıllı malzemelerin güncel ve gelecekteki potansiyel uygulamaları akıllı ev örnekleri üzerinden incelenmiştir. Elde edilen bulgularda; akıllı malzemelerin yapılara sürdürülebilir çözümler ile tasarımsal yenilikler sunduğu ve gelecekteki kullanım potansiyellerinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ancak yapılan örnek incelemesinde, akıllı evlerde yeterli sayıda ve çeşitlilikte akıllı malzeme uygulamasına rastlanmamaktadır. Mimari alanda nispeten yeni bir teknoloji olarak görülmesi ve henüz

araştırma aşamasında olan birçok bölümünün bulunması bu duruma sebep olarak sunulmaktadır. Araştırmada, akıllı evlerde uygulanmış rneği bulunmadığı için incelemesi yapılamayan akıllı malzemeler olduğu görülmektedir. Gelişen teknolojiyle beraber akıllı malzeme teknolojisinin akıllı evlerdeki uygulamalarının artacağı düşünüldüğünde, ileriki süreçte bu eksikliğin giderileceği n görülmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmanın, tez konusuyla benzerlik gösterecek çalışmalara örnek olması beklenmektedir.



KAYNAKLAR

Abdullah, Y., Al-Alwan, H. 2019. Smart Material Systems and Adaptiveness in Architecture, Ain Shams Engineering Journal 10.

Acharya, A., Gokhale, V. A. 2015. Titanium: A New Generation Material for Architectural Applications, Journal of Engineering Research and Applications, Vol: 5, pp.22-29.

Addington, M., Schodeck, D. 2005. Smart Materials and New Technologies for Architecture and Design Professions, New York: Elsevier Press.

Akgün, S. 2020. İç Mekan ve Mobilya Tasarımı Kapsamında Akıllı Malzemelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Akın, T. 2009. Communication of Smart Materials: Bridging The Gap Between Material Innovation and Product Design, MTT Thesis, Ankara: Middle East Technical University.

Al-Baldawi, M. T. 2015. Application of Smart Materials in the Interior Design of Smart Houses, College of Architecture and Design, Al-Ahliyya Amman University, Civil and Environmental Research, Vol: 7, pp.1-15.

Aldrich, F. 2003. "Smart Homes. Past, Present and Future", in: Richard Harper (ed.), Inside The Smart Home, London: Springer, pp.17-39.

Anderson, G. L., Crowson, A., Chandra, J. 1992. Introduction to Smart Structures, Intelligent Structural Systems, Boston: Dordrecht Press.

Andrade, T., Beirão J. N., Arruda J. V. and Eysen, C. 2021. Toward Adaptable and Responsive Facades: Using Strategies for Transforming of The Material and Bio-based Materials in Favor of Sustainability, Centro de Estudios en Diseño y Comunicación, Vol: 149, pp.37-59.

Ayvaz, Ö. Y. 2019. Akıllı Malzemelerin Mimarlıkta Kullanım Olanakları, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Barlow, J., Gann, D. 1998. A Changing Sense of Place, Are Integrated IT Systems Changing The Home? Electronic Working Paper Series, Science Policy Research Unit (SPRU): University of Sussex.

Barlow, J., Venables, T. 2003. "Smart Home, Dumb Suppliers? The Future of Smart Homes Markets", in: Richard Harper (ed.), Inside The Smart Home, London: Springer, pp.247-262.

Bayraktar, M., Yılmaz Z. 2007. Bina Enerji Tasarrufunda Pasif Akıllılığın Önemi, 8. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, s.115-128.

Blasse, G., Grubmaier, B. C. 2012. Luminescent Materials, Springer Science & Business Media.

Bedeloğlu, A. 2011. Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Tekstil Malzemelerindeki Uygulamaları, TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası, Tekstil ve Mühendis, Sayı: 83, s.27-37.

Behl, M., Langer, R. and Lendlein, A. 2008. Intelligent Materials: Shape-Memory Polymers. M. Shahinpoor, & H.-J. Schneider, pp.301-316.

Bilgin, S. 2014. Yapılarda Kullanılan Nano Ürünlerin Yapı Biyolojisi Açısından İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Casini, M. 2016. Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology to Improve Energy-Efficiency and Environmental Performance, Cambridge: Elsevier Press.

Ciabattoni, L., Freddi, A., Ippoliti, G., Marcantonio, M., Marchei, D., Monteriu A. and Pirro, M. 2013. A Smart Lighting System for Industrial and Domestic Use, Vicenza: In Proceedings of The IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), pp.126–131.

Çakmaklı, B., Ateş Can, S. ve Muraçal, E. 2015. Deprem ve Mimarlıkta Kullanılan Polimer Malzemeler, Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu.

Dam, V., Daniel, S. 2015. Remote Control of Smart Glass an Evaluation of Possible Remote Protocols, Gothenburg: Chalmers University of Technology, Degree Project Report in Computer Engineering.

Demianchuck, R. 2019. Smart House Systems, Kokkola: Centria University of Applied Sciences.

Döşemeciler, A. 2012. Cam ve Aydınlatma Sistemlerinde Akıllı Malzemeler, Ege Mimarlık Dergisi, Sayı: 82, s.14-17.

Erkol, E., Sayın, S. 2021. Akıllı Cam Cephe Sistemleri ve Teknolojileri, Online Journal of Art and Design Dergisi, Sayı: 1, s.1-21.

Ersoy, H. Y. 2001. Kompozit Malzeme, İstanbul: Literatür Yayınları.

Ferrara, M., Bengisu, M. 2014. Materials That Change Color; Smart Materials, Intelligent Design. Milano: Springer Science+Business Media.

Gezer, H., Aksu G. A. 2021. Yeni Nesil Malzemelerin Kent Ekosistemi Kapsamında Değerlendirilmesi, İstanbul: Published by Livre de Lyon Yayınları, s.147-180.

Giurgiutiu, V., Redmond, J., Roach, D. and Rackow, K. 2000. Active Sensors for Health Monitoring of Ageing Aerospace Structure, Proceedings of The SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems, pp.294-305.

Güğü G. N. 2008. Akıllı Ev Sistemleri ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Günay, D. 2001. Mühendislik, Teknoloji ve Tarih, Mimar ve Mühendis Dergisi, Sayı: 30, s.6-14.

Harper, R. 2003. Inside The Smart Home, Bristol: Springer Press.

Harrison, J. S., Ounaies, Z. 2001. Piezoelectric Polymers, NASA ICASE Report Vol: 43, pp.59-75.

Innocenti L. 2017. The Smart Home as A Place of Control and Security, An Analysis of The Domestication of Smart Technologies for The Making of A Home.

Kafy, A., Akther, A., Shishir, I. R., Kim, H. C., Yun, Y. and Kim, J. 2016. Cellulose Nanocrystal/Graphene Oxide Composite Film as Humidity Sensor, Sensors and Actuator, pp.221-226.

Karana, E., Kandachar P. 2006. "Smart Surroundings": A New Era for Communication and Information Technologies, pp.35-44.

Kızıltoprak, S. 2019. Akıllı Yapı Kabuğunda Cephe Bileşeni Olarak Kullanılan Akıllı Camların Seçimi İçin Sistem Önerisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kitchin, R., Dodge, M. 2011. Code/Space: Software and Everyday Life, Software Studies, Cambridge: MIT Press.

Lane, R., Craig, B. 2003. Materials That Sense and Respond: an Introduction to Smart Materials, The AMPTIAC Quarterly, Volume 7, pp. 9-14.

Lee, J. H., Ostwald M. J., Kim M. J. 2021. Characterizing Smart Environments as Interactive and Collective Platforms: A Review of The Key Behaviors of Responsive Architecture, Sensors, pp.1-24.

Lelieveld, C. 2013. Smart Materials for The Realization of An Adaptive Building Component, Ph.D Thesis, Netherlands: Delfy University of Technology.

Leydecker, S. 2008. "Nano Materials in Architecture, Interiorarchitecture and Design", Berlin: Birkhauser Press.

Li, M., Gu, W., Chen, W., He, W., Yu, W. and Zhang, Y. 2018. Smart Home: Architecture, Technologies and Systems, 8. International Congress of Information and Communication Technolog, pp.393-400.

Lütolf, R. 1992. Smart Home Concept and The Integration of Energy Meters Into A Home Based System, Switzerland: Landis & Gyr Energy Management Corp, pp.52-61.

Markopoulou, A. 2015. Design Behaviors, Programming The Material World for Responsive Architecture, PhD Dissertation, Barcelona: Universidad Politécnic de Catalunya (UPC).

Matin, N. H., Eydgahi A. 2019. Technologies Used in Responsive Facade Systems: A Comparative Study, Intelligent Buildings International, pp.1-20.

Modin, H. 2014. Adaptive Building Envelopes, Master of Science Thesis, Göteborg: Chalmers University of Technology.

Mohamed, A. S. Y. 2017. Smart Materials Innovative Technologies in Architecture; Towards Innovative Design Paradigm, Energy Procedia, Vol: 115, pp.139-154.

Mullassery, D. J. 2015. Sensors And Analytics for Smart Buildings, University of British Columbia, Vancouver, pp.1-23.

Negroponte, N. 1970. "The Architecture Machine", Cambridge: M.I.T. Press.

Oltean, M. 2006. Switchable Glass: A Possible Medium for Evolvable Hardware, NASA/ESA Conference, Washington DC, pp.81-87.

Orhon, A. V. 2006. Modern Yapı Malzemeleri, Yapı Dergisi, Sayı: 300, s.104-109.

Orhon, A. V. 2012. Akıllı Malzemelerin Mimarlıkta Kullanımı, İzmir Mimarlar Odası, Ege Mimarlık Dergisi, Sayı: 82, s.18-21.

Orhon, A. V. 2013. Akıllı Yapı Kabukları, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bina Fiziği Sempozyumu, İzmir, s.1481-1487.

Orhon, A. V. 2013. Sürdürülebilir Mimaride Akıllı Malzeme Kullanımı, 8. Uluslararası Sinan Sempozyumu, Edirne, s.297-304.

Orhon, A. V. 2014. Kendini Temizleyen Cephe Sistemleri, 7. Ulusal Çatı ve Cephe Sempozyumu, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, s.139-147.

Pahlavan, M. 2011. Adaptable Façade with Electrochromic Material, Master Graduation Report, Building Technology Department.

Pehlivan, E. 2007. Saf ve Katkılı Niobyum Pentoksit İnce Filmlerin Optik, Yapısal, Elektriksel ve Elektrokromik Özellikleri, Doktora Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ramsden, J. J. 2009. Applied Nanotechnology, Buckingham: William Andrew Applied Science Publishers.

Ritter, A. 2007. Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design, Berlin: Birkhause Press.

Simon, N., Kavitha, R. 2017. A Study on Smart Home Network Architecture and Technologies, International Journal of Advanced Research in Computer Science, No: 3, pp.74-78.

Sobczyk, M., Wiesenhütter, S., Noennig J. R. and Wallmersperger T. 2021. Smart Materials in Architecture for Actuator and Sensor Applications: A Review, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, pp.1-21.

Soliman, O. A. E., Aggour, M. M. H. 2010. Smart Materials – Toward A New Architecture, Conference of Smart Materials, pp.542-554.

Spencer, J. B. F., Nagarajaiah, S. 2003. State of the Art of Structural Control, Journal of Structural Engineering, pp.845-856.

Stefanov D., Bien, Z., Bang, W. C. 2004. The Smart Homes for Older Persons and With Physical Disabilities: Structure, Technology Arrangements and Perspectives, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, pp.228-250.

Temel, S. 2021. Malzeme Bilimindeki Gelişmelerin Mimarlık Disiplini Üzerine Etkileri: Akıllı Malzemeler, Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tetik, B. 2014. Energy Performance of Smart Buildings: Simulating The Impact of Active Systems and Passive Strategies, MTT Thesis, Ankara: Middle East Technical University.

Tokuç, A., Köktürk, G. 2015. The Science and Art of Architectural Lighting Using Smart Materials, 46. International Hvac & R Congress and Exhibition, Belgrade.

Tomaş, M. 2019. Konutta Yenilikçi Tasarım: Akıllı Evler Üzerine Bir Değerlendirme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ümütlü, Ş. B. 2020. Kentsel Donatı Bağlamında Akıllı Malzeme ve Sistemler; Tasarımcı ve Kullanıcı Deneyim Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü.

Yağlı, S. 2019. Teknolojik Gelişmelerin Etkisi ile Yüzeylerde Malzeme Kullanımı: Akıllı Malzemeler, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü.

Zupan, R., Clifford, D., Beblo, R. and Brigham, J. 2020. Design, Prototyping and Evaluation of Aconcept for a Shape-Changing Smart Material Building Surface Tile, Smart Materials and Structures.

İnternet Kaynakları

URL-1, <https://www.dosu-arch.com/invert>

URL-2, <http://www.liftarchitects.com/air-flower>

URL-3, <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1086/717404>

URL-4, <https://www.digimax.it/en/blog/silicone-neon-strip-by-colors-the-new-generation-of-led-n323>

URL-5, <https://www.domusweb.it/en/design/2006/03/01/young-brit-design-in-holland.html>

URL-6, <https://www.eenewseurope.com/en/worlds-largest-screen-printed-dye-solar-cell-module-aimed-building-facades/>

URL-7, <http://www.buildingviews.net/essay-author/pedro-borges-araujo/>

URL-8, <https://mattarchitecture.com/Number-23-London-W12>

URL-9, <https://www.archdaily.com/10512/hm-store-in-barcelona-estudio-mariscal>

URL-10, <https://www.archilovers.com/projects/44203/heliotrop.html>

URL-11, <https://www.wernersobek.com/projects/r128/>

URL-12, <https://igsmag.com/features/projects/house-r128-stuttgart-fully-glazed-and-fully-recyclable/>

URL-13, <https://rolandhalbe.eu/portfolio/house-r128-by-werner-sobek/>

URL-14, <https://pdfslide.net/documents/werner-sobek-r128-r129.html>

URL-15, <https://www.architonic.com/en/project/coll-coll-villa-sophia/20158765>

URL-16, https://collcoll.cc/CC_TRO

URL-17, <https://interiordesign.net/projects/coll-coll-designs-villa-sophia-in-prague-as-a-smart-home/>

URL-18, <https://www.designboom.com/architecture/coll-coll-villa-sophia-prague-04-13-2021/>

URL-19, <https://www.designboom.com/architecture/coll-coll-villa-sophia-prague-04-13-2021/>

URL-20, <https://www.architectmagazine.com/project-gallery/soft-house>

URL-21, <https://www.designboom.com/architecture/kva-matx-sustainable-soft-house-in-hamburg/>

URL-22, <https://energy.mit.edu/news/building-facades-that-move-textiles-that-illuminate/>

URL-23, <https://www.internationale-bauausstellung-hamburg.de/en/projects/the-building-exhibition-within-the-building-exhibition/smart-material-houses/soft-house/projekt/soft-house.html>

URL-24, <https://www.daamprojects.com/iba-soft-house>

URL-25, <https://www.architectmagazine.com/project-gallery/soft-house>

URL-26, <https://inhabitat.com/kieran-timberlake-cellophane-house/>

URL-27, <https://www.architonic.com/es/project/kierantimberlake-cellophane-house/5100378>

URL-28, <https://www.dailyicon.net/2011/06/books-cellophane-house%E2%84%A2-by-kierantimberlake/>

URL-29, <https://www.architonic.com/es/project/kierantimberlake-cellophane-house/5100378>

URL-30, https://www.architectmagazine.com/technology/lighting/cellophane-house-new-york_o

URL-31, <https://kierantimberlake.com/page/cellophane-house>

URL-32, <https://www.archdaily.com/874907/ivrv-sci-arc-plus-darin-johnstone-architects>

URL-33, <https://archello.com/project/ivrv-house>

URL-34, <https://inhabitat.com/habitat-la-and-sci-arc-students-complete-an-affordable-eco-friendly-home-for-a-u-s-veteran/ivrv-house-by-sci-arc-and-habitat-la-4/>

URL-35, <https://www.dezeen.com/2016/06/22/sci-arc-students-habitat-for-humanity-residential-architecture-low-income-los-angeles-neighbourhood-california-usa/>

URL-36, <https://www.residentialdesignmagazine.com/2020-rdaa-residential-special-constraints-ivrv-house-sci-arc/>

URL-37, <https://archello.com/project/the-wind-house>

URL-38, <https://www.unstudio.com/en/page/11968/the-w.i.n.d.-house>

URL-39, <https://www.trendhunter.com/trends/the-wind-house>

URL-40, <https://www.archdaily.com/595850/the-w-i-n-d-house-unstudio>

URL-41, <https://austin.curbed.com/2020/4/22/21231098/apple-tv-series-home-earth-day-austin>

URL-42, <https://archello.com/project/edgeland-house>

URL-43, <https://www.designboom.com/architecture/edgeland-house-by-bercy-chen-studio/>

URL-44, <https://www.archdaily.com/331677/edgeland-house-bercy-chen-studio>

URL-45, <https://www.archdaily.com/331677/edgeland-house-bercy-chen-studio>

URL-46, <https://www.archdaily.com/951260/welcome-to-the-jungle-house-cplusc-architectural-workshop>

URL-47, <https://cplusc.com.au/project/welcome-to-the-jungle-house/>

URL-48, <https://www.designboom.com/architecture/cplusc-welcome-to-the-jungle-house-darlington-australia-27-06-2019/>

URL-49, <https://www.archdaily.com/951260/welcome-to-the-jungle-house-cplusc-architectural-workshop>

URL-50, <https://www.dezeen.com/2020/09/10/welcome-to-the-jungle-house-cplusc-architectural-workshop-sustainable-architecture/>

URL-51, <https://www.archilovers.com/projects/251907/welcome-to-the-jungle-house.html>

URL-52, <https://dornob.com/dfab-house-the-prefab-home-designed-and-built-by-robots/>

URL-53, <https://www.archdaily.com/942221/dfab-house-eth-zurich-plus-nccr-digital-fabrication>

URL-54, <https://urbannext.net/dfab-house/>

URL-55, <https://dfabhouse.ch/dfab-house/>

URL-56, <https://www.empa.ch/web/nest/digital-fabrication>

