

**Geri Kazanılmış Temperli Polikristal Silikon Güneş Paneli
Camının Çimento İçersinde Kum Yerine Agrega Olarak Tekrar
Kullanılması**

Murat Hüseyin ÜNSAL
Yüksek Lisans Tezi
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: DOÇ. DR. Zeki Ünal YÜMÜN
2019

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GERİ KAZANILMIŞ TEMPERLİ POLİKRİSTAL SİLİKON GÜNEŞ PANELİ
CAMININ ÇİMENTO İÇERSİNDE KUM YERİNE AGREGA OLARAK TEKRAR
KULLANILMASI**

Murat Hüseyin ÜNSAL

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. Zeki Ünal YÜMÜN

TEKİRDAĞ-2019

Her hakkı saklıdır

Doç. Dr. Zeki Ünal YÜMÜN danışmanlığında, Murat Hüseyin ÜNSAL tarafından hazırlanan “Geri Kazanılmış Temperli Polikristal Silikon Güneş Paneli Camının Çimento İçersinde Kum Yerine Agregaya Olarak Tekrar Kullanılması” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Üye : Doç. Dr. Zeki Ünal Yümün

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ali Rıza DİNÇER

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKÇI

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Geri Kazanılmış Temperli Polikristal Silikon Güneş Paneli Camının Çimento İçersinde Kum Yerine Agrega Olarak Tekrar Kullanılması

Murat Hüseyin ÜNSAL

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Zeki Ünal YÜMÜN

Fotovoltaik panellerin ülkemizde giderek kullanımını artmaktadır. Kullanım süresi dolan 20-25 yıllık paneller veya hasarlı panellerin geri dönüştürülmeden doğaya bırakılması doğaya, insana zarar vermesinin yanı sıra materyallerin israfına da yol açmaktadır. Bu panellerden kaynaklı cam atıklarının çevreye verdiği kirlilik önemli boyutlara ulaşmaktadır. Bu çalışmada, güncel hayatta en yaygın şekilde kullanılan panel modellerinden biri olan polikristal silikon fotovoltaik panellerin geri dönüşümünün çalışılması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda kullanılan fotovoltaik panelin temperli camları küçük parçalar haline getirildikten sonra, farklı kum oranları ile karışım yapılarak, beton harcı malzemesi olarak kullanılmıştır. Oluşturulan harç numuneleri %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında oluşturulmuş ve çimento yapılarak özel kalıplara dökülmüştür. Çalışma ortamındaki zaman probleminde dolayı yedi günlük piriz süresi beklendikten sonra betonun fiziksel testlerine geçilmiştir. Yeni karışımların yoğunlukları, kullanılan cam partiküllerden dolayı kademeli olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Yedi günlük kür süresinden sonra tüm numunelerin basınç testleri yapılarak kontrol numunesi ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamada %15 oranında temperli fotovoltaik cam içeren numune %3,3 daha fazla bir dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Su emme kapasitesi ölçümlerinde ise 7200 dakikalık süre sonunda %5'lik numunenin en fazla, %20'lik numunenin ise en az su emme kapasitesine sahip olduğu tesbit edilmiştir.

Açık porozite değerleri kontrol numunesinden daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Burada %20 temperli cam içeriği bulunan numunenin en az kılcal poroziteye sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmanın en önemli sonuçlarından biri güneş enerjisi panellerinin temperli camlarının çimento karışımı olarak kullanılmasını öneren çevreci bir proje olmasıdır. Ayrıca çimentoda kullanım oranları arttıkça kılcal su emme oranları azaldığı için temellerde yalıtım bakımından önemli bir inşaat malzemesidir. Ayrıca %15'lik karışım normal kontrol numunesinden daha yüksek dayanıma sahip olması da inşaat açısından önemli bir veri olarak değerlendirilmelidir.

Anahtar kelimeler: Polikristal, fotovoltaik, temperli cam, harç, agrega, geri dönüşüm

2019 , 92 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

Reusing of Recycled Polycrystalline Silicon Solar Module Glass as Replacement Aggregate
in Cement Based System

Murat Hüseyin ÜNSAL

Tekirdag Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Zeki Ünal YÜMÜN

Photovoltaic panels are increasingly used in our country. The use of 20-25 years panels or damaged panels, which have expired, are left to be recycled to the environment, causing harm to nature and human as well as wasting of materials. The pollution of the glass wastes caused by these panels to the environment reaches important dimensions. The aim of this study is to investigate the recycling of polycrystalline silicon photovoltaic panels, one of the most widely used panel models in current life.

In this context, the tempered glass of the photovoltaic panel was turned into small pieces and mixed with different sand ratios and used as a concrete mortar. The formed mortar samples were formed in 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% and cement was poured into special molds. Due to the time problem in my working environment, after seven days of curing time, the physical tests of the concrete were started. It has been observed that the densities of the new mixtures gradually increase due to the glass particles used. After seven days of curing time, pressure tests of all samples were made and compared with the control sample. In this comparison, it was found that the sample containing 15% tempered photovoltaic glass had a strength of 3.3% more. In the water absorption capacity measurements, it was found that 5% of the sample had the highest water absorption capacity and the least 20% sample had the water absorption capacity after 7200 minutes.

Open porosity values were found to be lower than the control sample. It was found that the sample with 20% tempered glass content had least capillary porosity. One of the most important results of this study is that it is an environmentally friendly project that recommends the use of tempered glass of solar panels as a cement mixture. In addition, as the usage rates of cement increases, capillary water absorption rates are decreasing and it is an important construction material in terms of insulation. In addition, the 15% mixture should have a higher resistance than the normal control sample and should be considered as important for construction.

Keywords : Polycrystalline, photovoltaic, tempered glass, mortar, aggregate, recycling

2019 , 92 pages

ÖNSÖZ

2017 yılında başladığım ve bana bir çok değer katan Namık Kemal Üniversitesi'ndeki öğrenimim süresince üzerimde emeği olan saygı değer öğretim görevlilerine ve tüm arkadaşlarıma;

Ayrıca Vilnius Gediminas Teknik Üniversitesi'nde deneysel çalışmalarım esnasında, bana olan büyük yardımlarından ve desteklerinden dolayı Prof. Saulius VASAREVİCIUS'e ve Prof. Gintautas SKRİPKIUNAS'a;

Bu tezin hazırlanması sırasında bana yol gösteren, çalışmalarımda her türlü desteğini her zaman hissettiğim hocam Doç. Dr. Zeki Ünal YÜMÜN'e;

Tüm hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak her zaman destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Temmuz, 2019

Murat Hüseyin ÜNSAL

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
ŞEKİLLER	vi
TABLolar	viii
KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Yenilenebilir Enerji	3
2.2 Güneş Enerjisi	4
2.2.1 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Sistemleri.....	6
2.2.2 Fotovoltaik Güneş Panelleri.....	10
2.3 Güneş Enerjisi Teknolojilerinin Potansiyel Çevre ve İnsan Sağlığına Zararları.....	21
2.4 Güneş Paneli Atık Yönetimi.....	28
2.4.1 Fotovoltaik Panellerde Azaltma Yolu ile Materyal Kazanımı.....	34
2.5 Güneş Panellerinin Geri Dönüşümü.....	35
2.5.1 Kristal Silikon Güneş Panelinin Geri Dönüşümü	35
2.5.2 İnce-film Panellerin Geri Dönüşümü	36
2.6 Beton İçersinde Atık ve Güneş Panel Atığı Geri Dönüşümü.....	39
2.7 Camın Beton İçersinde Geri Dönüşümü.....	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	43
3.1 Materyal.....	43
3.2 Kırılmış Hale Getirilen Polikristal Silikon Panel Temperli Cam Atığının ve Kumun Partikül Boyutunun Belirlenmesi	45
3.3 Gevşek Yığın Kütle Yoğunluğu	46

3.4 Solar Panel Cam Atıklarından Elde Edilecek Harç Karışımı.....	47
3.5 Taze Harç Kıvamının Yayılma Tablasına Göre Belirlenmesi.....	49
3.6 Harç Prizmatik Kalıplarının Hazırlanması	51
3.7 Örneklerin Yoğunluğunun Hesaplanması	53
3.8 Harç Örneklerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Hesaplanması.....	53
3.9 Harç Örneklerinde Suyun Emilimi, Toplam Boşluk, Kılcal Boşluğunun Hesaplanması..	56
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	59
4.1 Eleme sonrası partikül büyüklüğü dağılımının analizi.....	59
4.2 Gevşek Yığın Kütle Yoğunluğu analizi	62
4.3 Taze Harç Numunesi Kıvamının Yayılma Tablasına Göre Sonuçları	63
4.4 Sertleşmiş Harç Örneklerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	64
4.5 Harç Örneklerinde Suyun Emilimi, Toplam Porozite, Açık Porozite Sonuçları.....	69
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
6. KAYNAKÇA.....	74

ŞEKİLLER

Şekil 1: Yenilenebilir enerji üretim kapasitesini gösterir pay	4
Şekil 2: Pironometre	5
Şekil 3: Pyrheliometre	5
Şekil 4: Solar termal enerji çevirici sisteminin diyagramı	6
Şekil 5: Fresnel ve Parabolik aynalar	7
Şekil 6: Merkez alıcı sistem	8
Şekil 7: Güneş Kulesi	9
Şekil 8: Parabolik çanak yoğunlaştırıcısına bir örnek	9
Şekil 9: Elektron deşik çiftinin oluşumu	10
Şekil 10: P/N birleşiminin nasıl çalıştığını gösterir şekil	11
Şekil 11: Valans ve iletim bandı	11
Şekil 12: Yaşam döngüsü	12
Şekil 13: Monokristal Güneş panelinin yapısı	13
Şekil 14: Levhaların üretimi	14
Şekil 15: Dikdörtgen güneş hücrelerinin şematik gösterimi	14
Şekil 16: Şerit silikon levha üretimi	15
Şekil 17: Atomik Yapı (a) kristal silikon (b) hidrojenleştirilmiş amorf silikon	17
Şekil 18: Amorf silikon	17
Şekil 19: CdTe Solar hücresi	18
Şekil 20: CIGS solar Hücresi	19
Şekil 21: CPV güneş hücresi ve panelleri	20
Şekil 22: CSP ve PV'lerin potansiyel etkileri ve çevrenin tepkisi	22
Şekil 23: Yuvalar ve yanmış-çarpmış kuşlar	23
Şekil 24: Farklı sistemlerdeki su tüketimi	23
Şekil 25: Cd yayılma yolları	26
Şekil 26: Diğer PV ve elektrik üreten sistemlerin Cd emisyonu	27
Şekil 27: PV atık yönetimi	28
Şekil 28: Öngörölmüş toplam PV kapasitesi	28
Şekil 29: Güneş paneli problemlerinin yüzdesel oranları	29
Şekil 30: 2030 yılına kadar panel materyallerinin yüzdesel değişimi	31
Şekil 31: Dünya'da ki PV panel üreticileri ve toplam kurulu PV kapasitesi	33
Şekil 32: Japon firmasının kullanmış olduğu Proses	36
Şekil 33: Solda ki CdTe ve Sağda ki CIS için gerçekleşen proses	37

Şekil 34:First Solar geri dönüşüm şeması	38
Şekil 35:Losar Chemie Geri dönüşüm prosesi	39
Şekil 36: Hücresel zarara uğramış Polikristal silikon güneş panelleri	43
Şekil 37: Tipik bir Mikser ve kabı.....	48
Şekil 38: Kullanılan mikser	49
Şekil 39: Kullanılan yayılma tablası.....	50
Şekil 40: Kullanılan Kalıplar	51
Şekil 41: Kalıbın boyutlarını gösterir şekil.....	52
Şekil 42: Sıkıştırma sonrası kalıplar ve polietilen torba.....	52
Şekil 43: Deneyde Kullanılan tartı	53
Şekil 44: Eğilme basınçını gösterir şekil	54
Şekil 45: Eğilme basınç ile kırılan örnekler	54
Şekil 46: VGTU’da bulunan basınç ve eğilme testinin yapıldığı makine	55
Şekil 47: Basınç dayanımını gösteren şekil	56
Şekil 48: Su da bekletilen örnekler.....	57
Şekil 49: Cam Partikül dağılımı	60
Şekil 50: Kum partikül dağılımı	61
Şekil 51: Kum ve Camın ortak karıştırıldığında boyut karışımlarının yüzdesi.....	61
Şekil 52: Numunenin yayılması ve kanama	63
Şekil 53: iyileştirme öncesi yoğunluk	66
Şekil 54: iyileştirme sonrası yoğunluk	66
Şekil 55: Eğilme dayanımı	67
Şekil 56: Basınç Dayanımı	68
Şekil 57: Suyum emilimi	69
Şekil 58: Toplam porozite	70
Şekil 59: Açık porozite	70

TABLolar

Tablo 1: Yenilenebilir enerji çeşitleri	3
Tablo 2: Mono ve Poli kristal silikonun karşılaştırılması	16
Tablo 3: Bazı ince film hücrelerin Verimlilikleri	19
Tablo 4: PV yapılarının karşılaştırılması	20
Tablo 5: PV’de Kullanılan nadir metaller	21
Tablo 6: Solar ve klasik enerji sistemlerinin CO ₂ bakımından kıyaslanması.....	24
Tablo 7: Si üretimi ve işlenmesinde kullanılan bazı zararlı maddeler	27
Tablo 8: 2015-2050 yılları arası öngürülmüş toplam PV kapasitesi	29
Tablo 9: Güneş panellerinin teknolojilerine göre market payları (2014-2030).....	30
Tablo 10: 2015 yılı ile Panel üreten ilk 10 üretici	30
Tablo 11: Panellerin Avrupa’da ki atık kodları	32
Tablo 12: Alternatif Agrega Tipleri.....	40
Tablo 13: Tipik Silikon tabanlı PV modülünün yapısı.....	43
Tablo 14: Kullanılan Çimentonun özellikleri.....	44
Tablo 15: Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	45
Tablo 16: Çimento Karışım oranları kg cinsinden	47
Tablo 17: 1.5L karışım için yapılan hesaplama kg cinsinden	47
Tablo 18: Kullanılan aparatlar	49
Tablo 19: Cam için Elek ile partikül dağılım analizi.....	59
Tablo 20: Kum için Elek ile partikül dağılım analizi	60
Tablo 21: Camın kütle yoğunluğunun hesaplanması	62
Tablo 22: Kumun kütle yoğunluğunun hesaplanması	62
Tablo 23: Yayılma tablasından elde edilen sonuçlar.....	64
Tablo 24: 1 haftalık Kür öncesi numuneleri ağırlıkları	65
Tablo 25: 1 haftalık Kür sonrası numuneleri ağırlıkları	65

KISALTMALAR

GW	: Gigawatt
°K	: Kelvin
°C	: Santigrat
MWe	: Megawatt elektrik
c-Si	: Kristal Silikon
EVA	: Etilen Vinil Asetat
PV	: Fotovoltaik
eV	: Elektron Volt
MWh	: Megawatt Saat
m³	: Metre Küp
kWh	: Kilowatt Saat
g	: Gram
CO₂	: Karbondioksit
Mg	: Miligram
Kg	: Kilogram
cm³	: Santimetre Küp
Mpa	: Mega Pascal (N/mm ²)
CSP	: Concentrated Solar Power

1. GİRİŞ

Fotovoltaik sistemlerin son zamanlarda hızlı bir şekilde verimliliklerinin yükselişi ve ilgi çekici bir hal alması bu sistemlerin üretiminde artışa ve kullanımında da doğru orantılı bir şekilde artmasına sebebiyet vermiştir. Bunun yanında ömürlerinin 20-25 yılı bulması ve güneşden gelen enerjiyi elektrik enerjisine çeviren diğer sistemlere nazaran daha çevresel bir sistem olması avantaj sağlamaktadır.

Bunun yanında üretimin ve kullanımının artması bazı çevresel sorunları da beraberinde getirebilmektedir. İnsan sağlığına, çevreye ve materyal kaybına sebebiyet olabilmektedir. Yaşam ömrünü tamamlamış ve ya bazı nedenlerden hasara uğramış panellerin direkt olarak çevreye bırakılması ve geri dönüşüm uygulanmaması zararlara yola açabilmektedir. Örnek olarak CdTe'ün doğaya bırakılması Cd'dan dolayı ağır metal kirliliğine sebebiyet verebilmektedir ve bunun üzerine çalışmalar yapılmıştır ve ya kristal silikon panellerde kullanılan kurşun buna örnek verilebilmektedir.

Ayrıca, panellerden kaynaklı bir diğer sıkıntı ise kullanılan temperli camlardır. Bu camlar panelin neredeyse büyük çoğunluğunu kapsamaktadır. Bunun yıllar sonra açacağı çevresel kirlilik ise ayrıca düşünülmektedir. Dünya'da panellerin geri dönüşümü için çalışmalar yapılmakta ve gün geçtikçe gelişmektedir.

Dünyanın en eski inşaat malzemelerinden biri betondur. Düşük maliyet, bulunabilirlik, uzun dayanıklılık ve aşırı hava koşullarına karşı dayanımı nedeniyle, dünya çapında aşırı bir şekilde kullanılmaktadır. Çimento atık formları, radyoaktif, tehlikeli ve karışık atıkların bertarafı için dünya çapında kullanılmaktadır. (Fernandez ve ark 2011, Tantawi 2015)

Beton yapı, betonda farklı tipte atıkların kullanılmasına izin verir. Bu nedenlerden dolayı, daha sürdürülebilir materyaller ve işlemler, kısmi bir kum değişimi ve ya çimento değişimi gibi olarak formüle edilmeye çalışılmaktadır. Geri dönüşümlü agregalarla üretilen betona Geri Dönüşümlü Agregası (RAC) adı verilir. (Faella ve ark. 2016, Isler 1984)

Bir diğer geri dönüşüm metodu olan beton ve ya harç içerisinde agrega olarak kullanılması panellerden kaynaklı materyallerin agrega olarak kullanılması materyal kaybını belirli bir ölçüde engellemek için iyi bir örnektir.

Bu çalışmada polikristal silikon panelden elde edilen temperli cam partiküllerinin belirli oranlarda hazırlanan numuneler içersinde kum yerine agrega olarak harda kullanılmıştır. Harç prizmatik bloklar hazırlanarak fiziksel özellikleri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji doğal kaynaklardan elde edilebilen ve kendini sürekli yenileyen bir enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Bu özelliği ile konvansiyonel enerji kaynaklarından farklıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları Tablo 1’de açıkça gösterilmektedir. Ayrıca, Güneş bu enerji kaynaklarının büyük bir bölümünün ana kaynağıdır.

Tablo 1: Yenilenebilir enerji çeşitleri

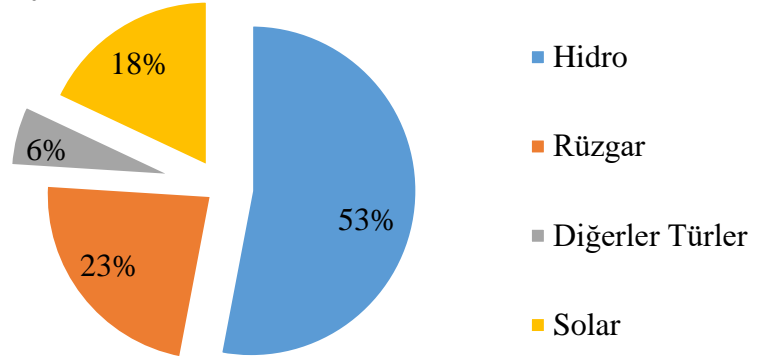
Yenilenebilir enerji çeşitleri	Yenilenebilir enerji kaynakları
Güneş Enerjisi	Güneş
Rüzgar Enerjisi	Rüzgar
Jeotermal Enerjisi	Yer altı suları
Hidrolik enerji	Akarsu ve nehirler
Biyokütle Enerjisi	Biyolojik atıklar
Dalga enerji	Okyanus ve nehirler

Enerji potansiyelinin yüksek olmasına rağmen şuanda bütün enerjiyi toplayacak ve kullanacak teknolojimiz bulunmamaktadır. Fakat, yavaş yavaş hızla gelişen teknoloji ile elde ettiğimiz enerji miktarıda artmaktadır.

2017 Yılında Yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 2,179 GW ulaşmıştır. Bunun payları Şekil 1’de verilmiştir (IRENA 2017). Dünya genelinde yenilenebilir enerjiye olan yatırımlar, 2015 yılı itibarıyla hız kazanmış ve Çin’in bu yatırımlarda birinci sırada olduğu görülmektedir. Çin’den sonra ABD, Japonya, Birleşik Krallık ve Hindistan takip etmektedir. Bu ülkelerde Yenilenebilir enerjiye verilen önem bu tablodan görülebilmektedir (Karagöl ve Kavaz 2017)

Hidro enerji 1,152GW ile ilk sırada yer alırken, Güneş enerjisi 397GW ve 514 GW ile Rüzgar enerjisitakip etmektedir. Diğerleri ise 109GW lık bir enerji üretmektedir. (IRENA 2017)

Yenilenebilir Enerji Payları



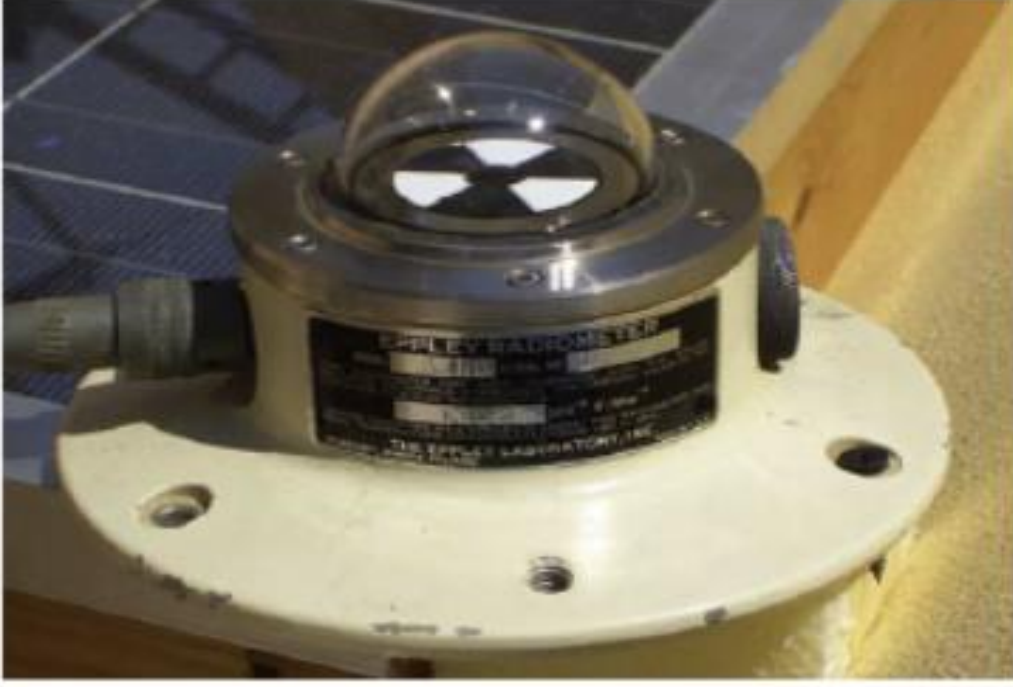
Şekil 1: Yenilenebilir enerji üretim kapasitesini gösterir pay (IRENA 2017)

2.2 Güneş Enerjisi

Solar sistemimizde güneş tam merkezde bulunmaktadır. Diğer gezegenler ve dünya güneşin etrafında yörüngede bulunur. Güneşten gelen solar radyasyon dünyadaki tüm hayatı destekler ve bunu fotosentez, iklim ve hava olayları ile gerçekleştirir. (Kalogirou 2013)

Güneşin %74'ünü hidrojen %25'ini helium ve geri kalanı ise diğer ağır metal elementlerinden oluşur. Güneşin yüzeyinde sıcaklık yaklaşık olarak 5500 °K ve ya 5226 °C'dir. Güneşten gelen bu enerji nükleer füzyondan üretilir ve bu enerjiden farklı şekillerde yararlanmamızı sağlayan uygulamalar bulunmaktadır. (Kalogirou 2013)

Ayrıca, Solar radyasyonu ölçebilen iki tür ekipman vardır. Bunların adları pironometre ve pyrheliometre'dir. Şekil 2 ve 3'de bu cihazlar görülmektedir. Pironometre direkt ve dağılan solar radyasyonu ölçebilirken, pyrheliometre güneşten gelen direkt radyasyon ışınlarını ölçebilmektedir. (Kalogirou 2013)



Şekil 2: Pironometre (Kalogirou 2013)



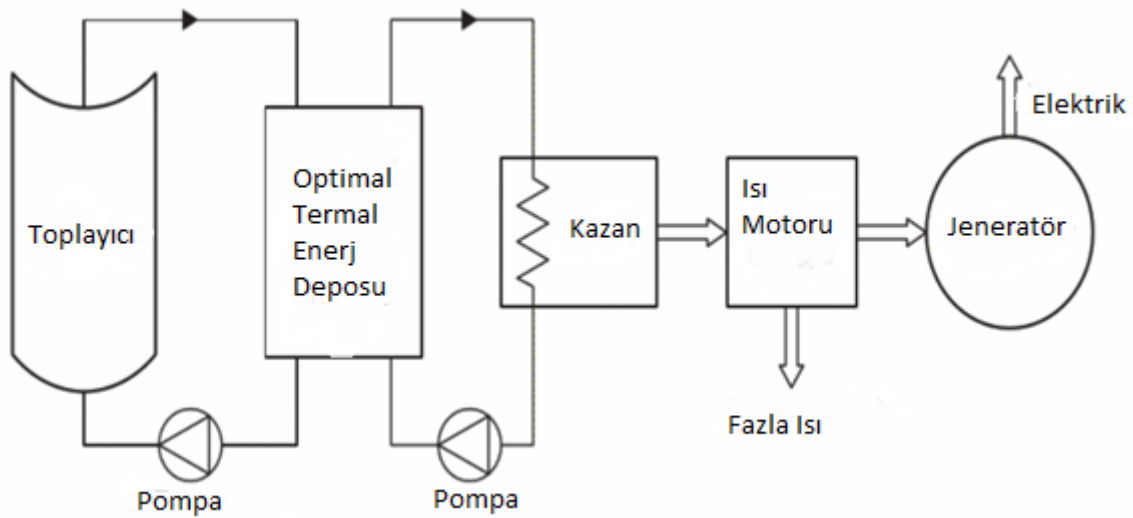
Şekil 3: Pyrheliometre (Kalogirou, 2013)

Güneş enerji tükenmeyen ve dünyamız için önemli bir enerji kaynağıdır. Güneş Enerjisini kullanabilmek için farklı yollar bulunmaktadır. Bu teknolojiler yoğunlaştırılmış güneş enerjisi kısaca CSP ve fotovoltaik panellerdir (PV). (Kabir 2018)

2.2.1 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerji Sistemleri

CSP'ler genel olarak ayna kullanarak güneş ışığını ve güneşten yayılan ışınları (ultraviyole, kızılötesi, x bant radyasyonu) alıcı veya tutucu üzerinde yoğunlaştırır. Bu tutucu gelen enerjiyi tutar ve sıvıya transfer eder. Bu sıvı en son uygulamalarda ve ya elektrik üretmede kullanılmaktadır. PV'lerin aksine CSP'ler ısı üreterek termodinamik döngü ile elektrik üretmektedirler. Dört çeşit CSP modeli vardır. Parabolik, Fresnel, Güneş kulesi ve Güneş Çanaklarıdır.

Bu sistemlerden bazıları ısı tankı da bulundurmaktadırlar. Bu ısı tankının bulunmalarının sebebi ise, akşam ve ya bulutlu günlerde sistemin çalışmasını sağlamak adına. Bu sistemlerdeki en büyük zorluk sıcaklık değerini ayarlayabilmektir. Güneş enerjisini mekanik enerjiye çeviren temel diyagram şekil 4'de gösterilmiştir. (Kalogirou 2014).



Şekil 4: Solar termal enerji çevirici sisteminin diyagramı (Kalogirou 2014).

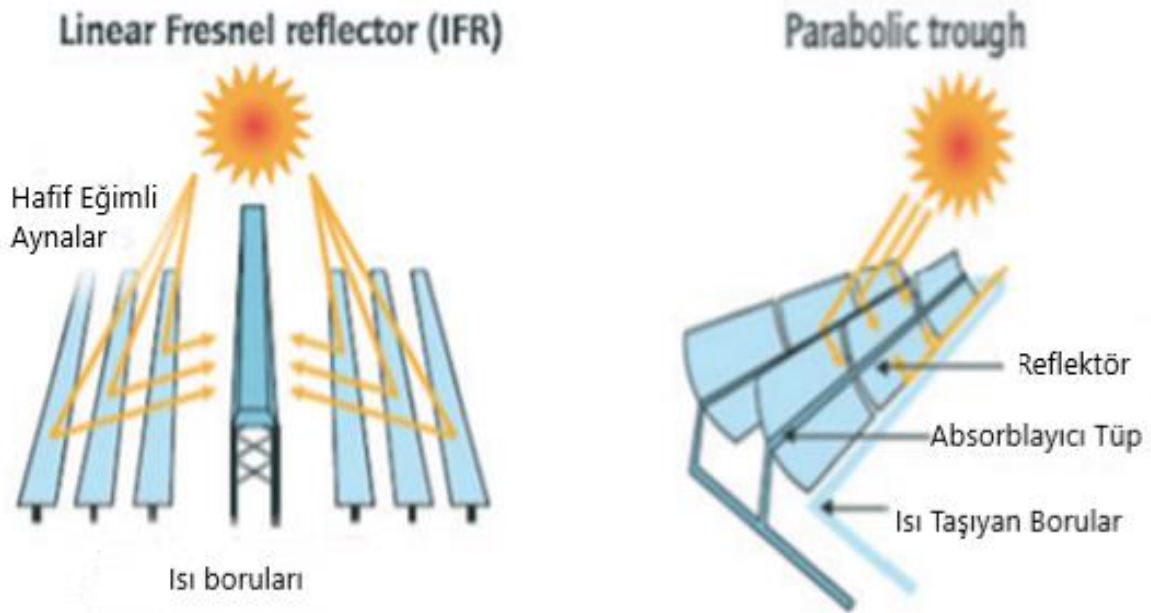
Güneş ışığı direk, direk olmayan ve yayılmış şekilde bulunmaktadır. CSP'ler yalnızca direk güneş ışığını kullandıklarından güneşin yüksek derecede geldiği bölgelerde bulunmaktadır. Bu bölgeler sıralanacak olursa, Orta Doğu, Kuzey Afrika, Güney Afrika, Güneybatı Amerika Birleşik Devletleri, Meksika, Şili, Peru, Avustralya, Hindistan, Batı Çin, Güney Avrupa ve Türkiye'dir. (IRENA 2013)

Parabolik toplayıcılar en gelişmiş CSP sistemleridir ve kurulmuş %90 CSP sistemi paraboliktir. 400 dereceye kadar sistemi ısıtarak elektrik üretebilmektedir. En büyük parabolic sistem Kaliforniya’da kurulmuştur ve toplam kurulu gücü 354MWe’dir. .(Kalogirou 2014)

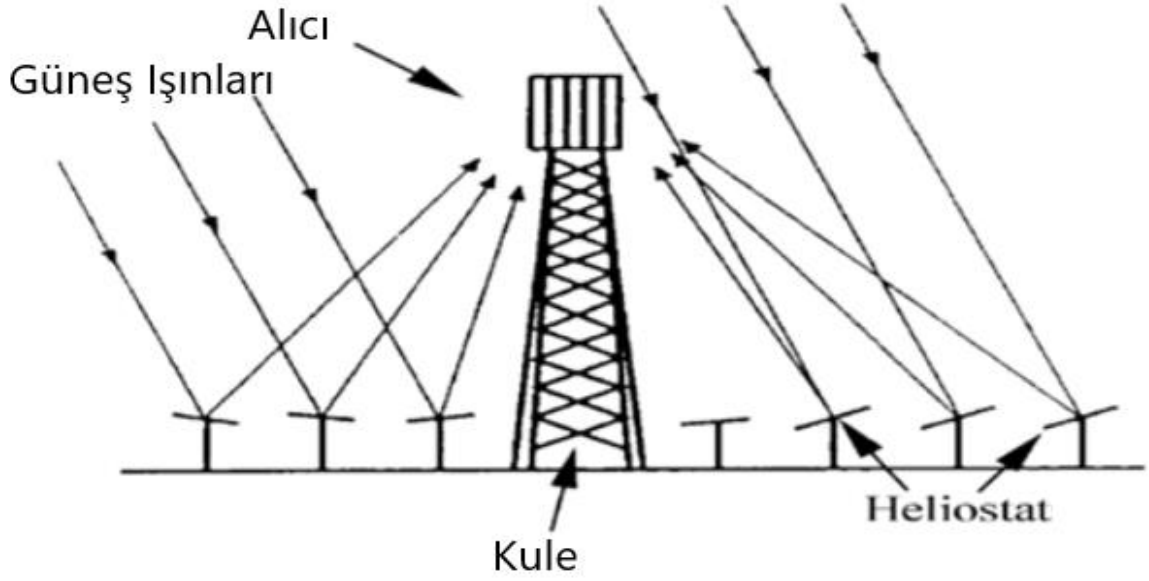
Transfer sıvısı olarak, sistemde sentetik yağlar ve ya erimiş tuz, diğer sıvılar ve gaz kullanılmaktadır. Bu akıcı maddeler aşırı ısınır ve buhar türbinleri döndürür. Böylece elektrik elde edilmektedir. (Anonim 2013).

CSP’ler Kuzey-Güneye yaz aylarında kışa göre daha fazla enerji toplamaktadırlar. Doğu-Batı ise kış aylarında yazaya göre daha fazla enerji toplayabilmektedir. (Kalogirou 2004)

Frenel yansıtıcıları diğer adı ile FR, şekil 5’de gösterilmiştir. Bu reflektörler düz ve ya hafif eğimli olabilmektedirler. Yansıtıcılar güneş ışığını aynaların üstünde bulunan sabit alıcıya yansıtır ve aynalarda bulunan takip sistemi tek bir eksende aynaların güneşi takip etmesini sağlamaktadır. FR’ler parabolik camlı yansıtıcılara göre çok daha ucuzdur ve Fresnel yere daha yakın olduğundan dolayı yapısal ihtiyacı da buna nazaran az olmaktadır. (Kalogirou 2004).



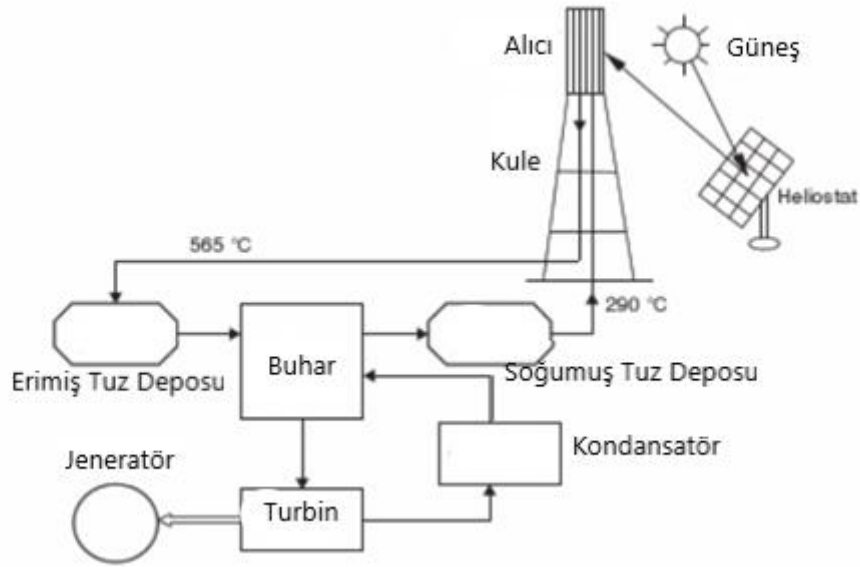
Şekil 5: Fresnel ve Parabolik aynalar (IRENA 2013)



Şekil 6:Merkez alıcı sistem

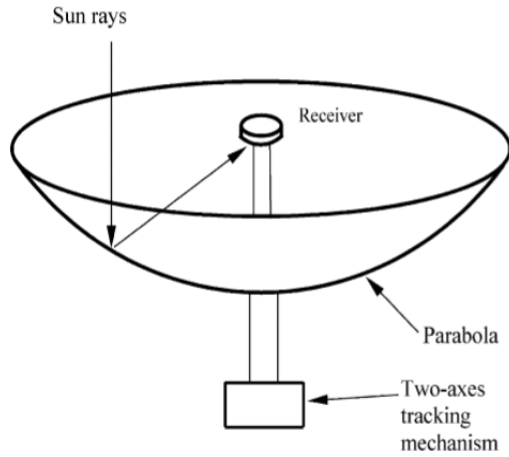
Güneş kuleleri kısaca ST'ler, merkez alıcılar olarakta bilinmektedir. Bu sistemler bir çok güneşi takip eden aynalar kullanırlar ve bunlara heliostat denmektedir. Yansıyan güneş ışınlarını tek bir merkezde toplama prensibine göre çalışırlar. Alıcı tüm güneş ışığını aldıktan sonra ısıyı sıvıya transfer eder bu sıvı daha önce bahsettiğimiz erimiş tuz, sentetik yağ ve ya gazlar olabilmektedir. Şekil 6'da ayrıca merkezi sistem açıkça gösterilmiştir. (Kalogirou 2014)

Güneş kuleleri PT ve FR'den çok daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. ST'ler daha fazlayoğunlaştırmaya sahip olduğundan buna olanak tanımaktadır. Ayrıca ST'lerde su buharı sistemleri kullanılabilir. Su buharlı sistemlerin maksimum sıcaklıkları 250-300 derece, sentetik yağlar 390 derece ve 565 derece erimiş tuzlar için görülmüştür. 800 derece ise gazlar kullanılarak elde edilebilmektedir. En iyi performansı erimiş tuzdan sağlamaktadır. Bu yöntem verimli ve ucuz olarak ısıyı depolamak için kullanılabilir. Gece ve bulutlu havalarda sistemin çalışmasını sağlamaktadır. ST'lerin çalışma şeklini gösteren diyagram şekil 7'de verilmiştir. (IRENA 2013).



Şekil 7: Güneş Kulesi (Kalogirou 2014)

Çanak sistemler çanak şekilli parabolic aynalar kullanmaktadır. Güneş ışınlarını odak noktası bulunan alıcıya yansıtma prensibine dayalı çalışmaktadır. Bu sistemler iki eksenli takip sistemine sahip olduğundan dolayı iyi yoğunlaştırmaya ve sıcaklığa sahiptirler. (Kalogirou 2004)



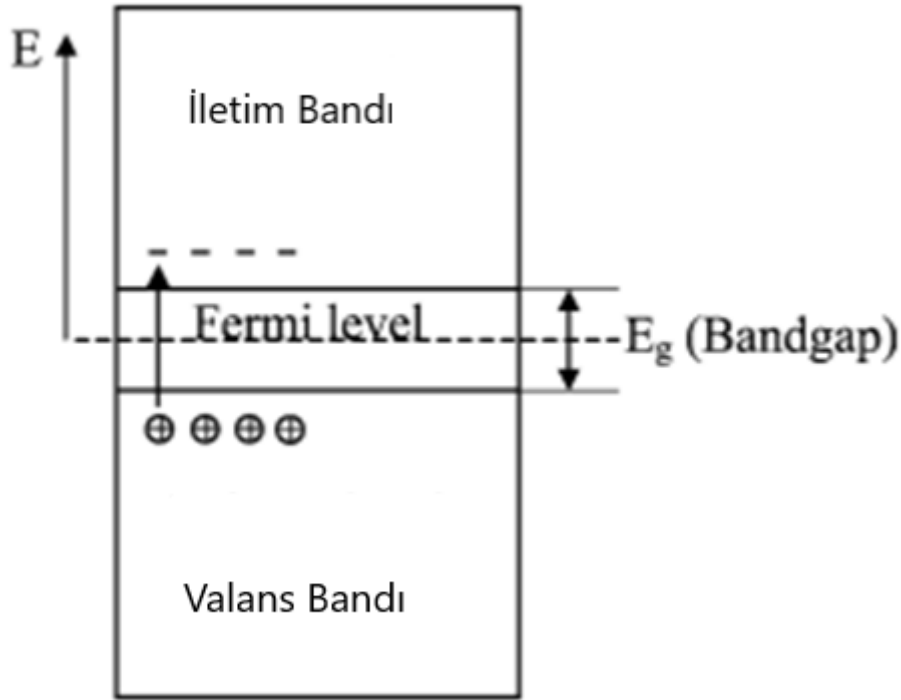
Şekil 8: Parabolik çanak yoğunlaştırıcısına bir örnek. (Kalogirou 2004)

Alıcının tepesinde stirling motoru bulunmaktadır. Bu motor elektrik üretilmesini sağlar. Alıcı özümlediği ısıyı, bir sıvı yardımı ile motora aktarır. Daha sonra ise bu ısı motorda mekanik enerjiye ve sonrasında ise elektrik enerjisi olarak çevirmektedir. (Kalogirou 2014)

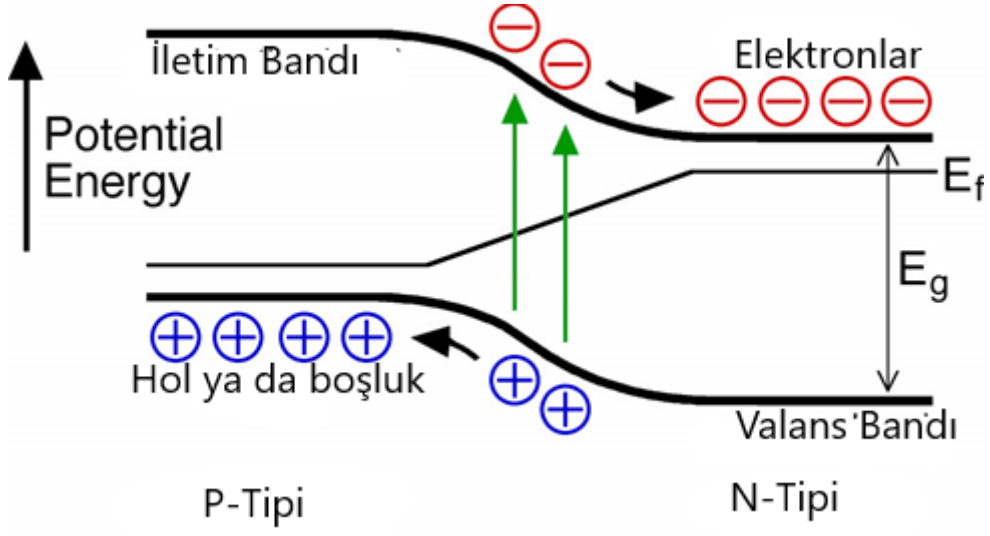
2.2.2 Fotovoltaik Güneş Panelleri

Fotovoltaikler ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu fotovoltaik etkisi olarak adlandırılmaktadır. Fotovoltaik enerji dönüşümünün iki tane önemli adımı vardır. İlk olarak, elektron-hol çifti ışığın emilmesi ile oluşturulur. Daha sonra ise elektron negatif bölüme giderken, hol ise pozitif alana doğru gider. Böylece, elektrik gücü üretilmiş olur. (McEvoy 2012)

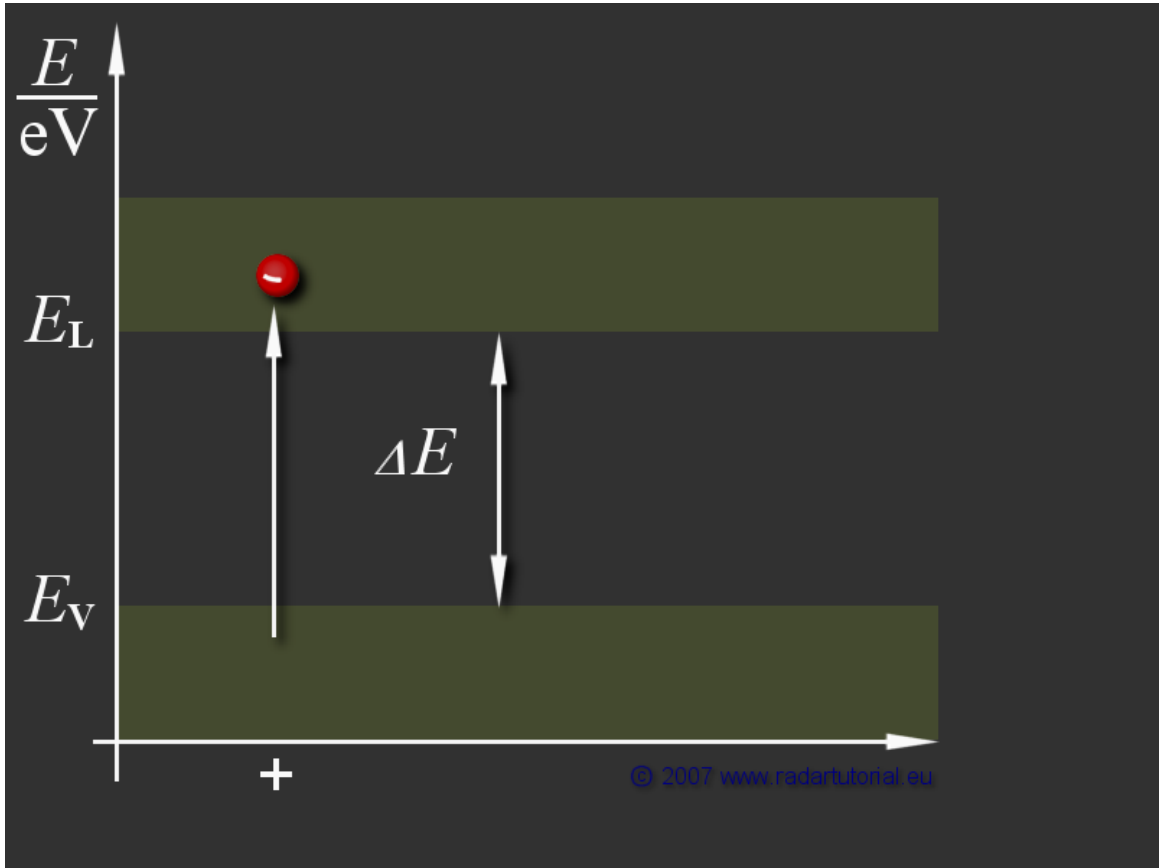
Kısaca, ne zaman bir foton atoma çarpsa bu valans bandında bulunan elektronun zıplamasına ve ya serbest kalması ile iletim bandına geçer ve geri de hol bırakır buna elektron-hol çifti denir. Holların sayısı elektron serbest kalması ile alakalıdır. (Şekil 9 ve 10). (McEvoy 2012)



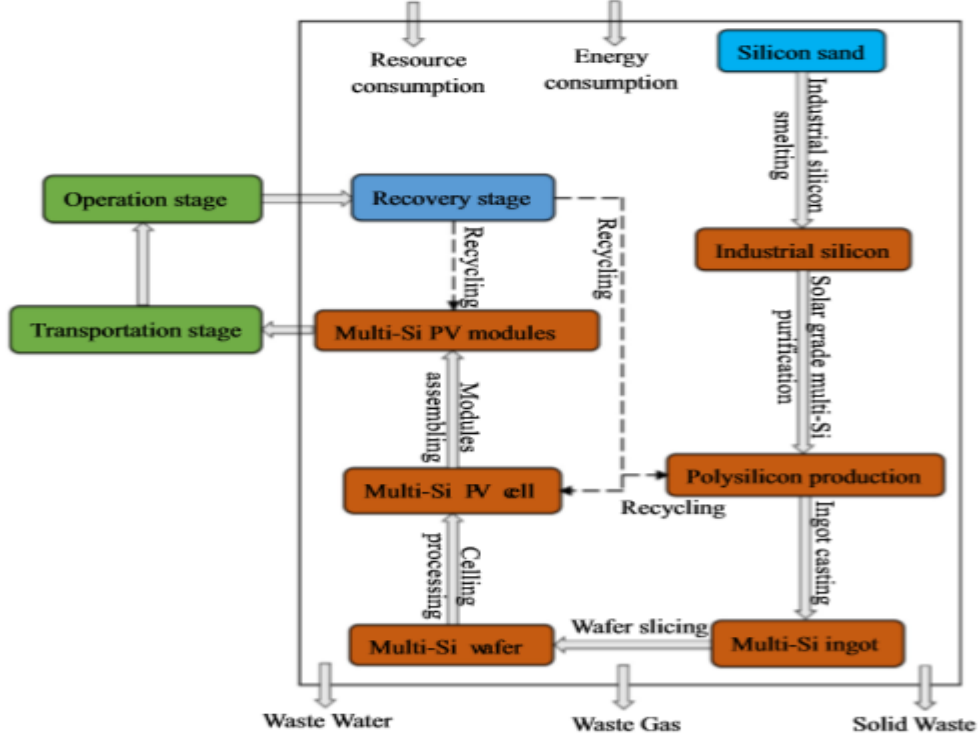
Şekil 9: Elektron deşik çiftinin oluşumu (Radziemska 2003)



Şekil 10: P/N birleşiminin nasıl çalıştığını gösterir şekil. (Lisensky 2015)



Şekil 11: Valans ve iletim bandı (Wolff C 2007)



Şekil 12: Yaşam döngüsü (Huang ve ark. 2017)

Yaşam döngüsünü gösteren şekil 12 silikonun üretimini ve külçe haline gelmesine kadar ki kısmı göstermektedir. (Huang ve ark 2017)

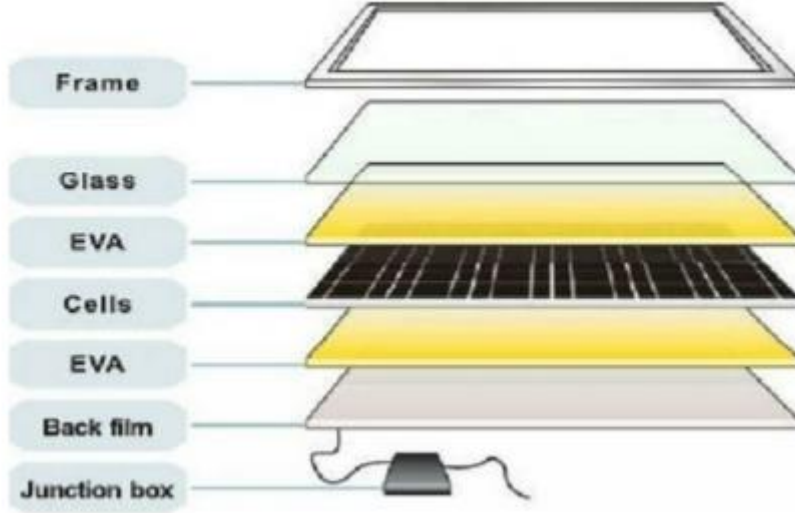
Fotovoltaikler farklı tipte hücrelere ve farklı jenerasyonlara sahiptir. İlk jenerasyon monokristal, multikristal ve şerit silikondan oluşmaktadır. İkincil jenerasyon, amorf silikon (a-Si), kadminyum tellür (CdTe), Bakır indiyum galyum selenit (CIGS), bakır indiyum selenit (CIS). (McEvoy, 2012) Üçüncü jenerasyon ise, yoğunlaştırılmış fotovoltaikler (CPV), boyalı solar hücreler, organik hücreler, PERC ve PERL'dir. (Paiano 2015)

Şuan ki market payının %80-90'ı kristal silikon modülleri kapsamaktadır. (Klugmann-Radziemska 2013)

İlk jenerasyon içerisinde kristal silikon (c-Si), monokristal ve multikristal silikon olarak ikiye ayrılmaktadır. Kristal silikon devre levhalarının kalınlıkları yaklaşık 300 um ve 10x10 cm², 12,5x12,5cm²'dir. (Paiano 2015, TuDelft)

Monokristal silikon en fazla saflığa sahip olan kristaldır ve büyük tek bir saf kristal silikondan meydana gelmektedir. Tek kristal hücre levhaları pahalı olarak bilinmektedir ve içerisine yarı iletkenlik özelliklerini değiştirilmesi için diğer elementlerden az bir miktar

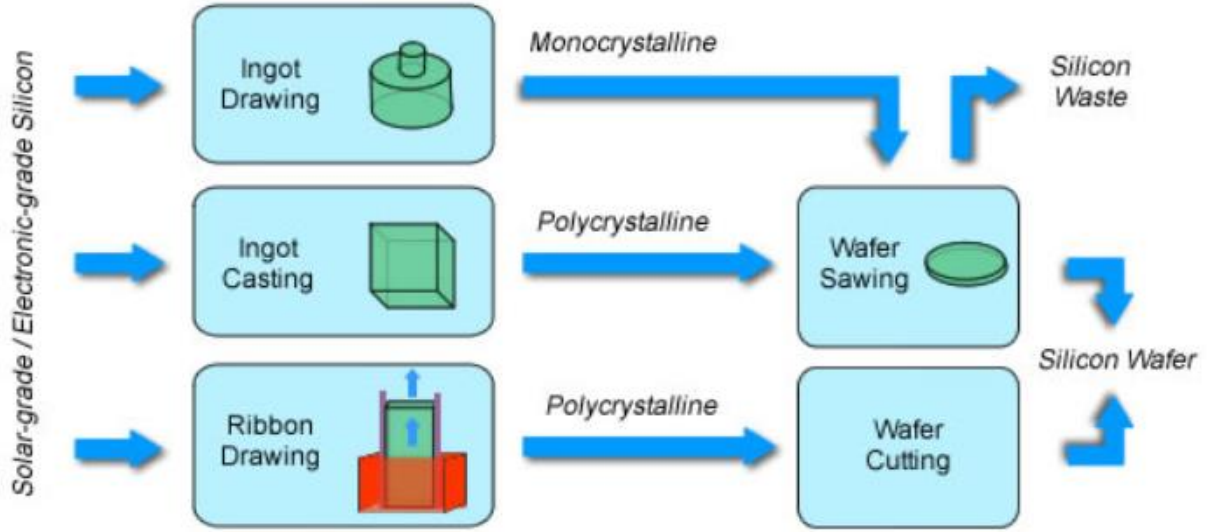
eklemektedir. Bir çok monokristal silikon Czochralski işleminden üretilmektedir. Sonrasında ise silindir olarak bir kaç yüz mikron kalınlığında doğranmaktadır. (Klugmann-Radziemska 2013, Paiano 2015, Bagher ve ark 2015)



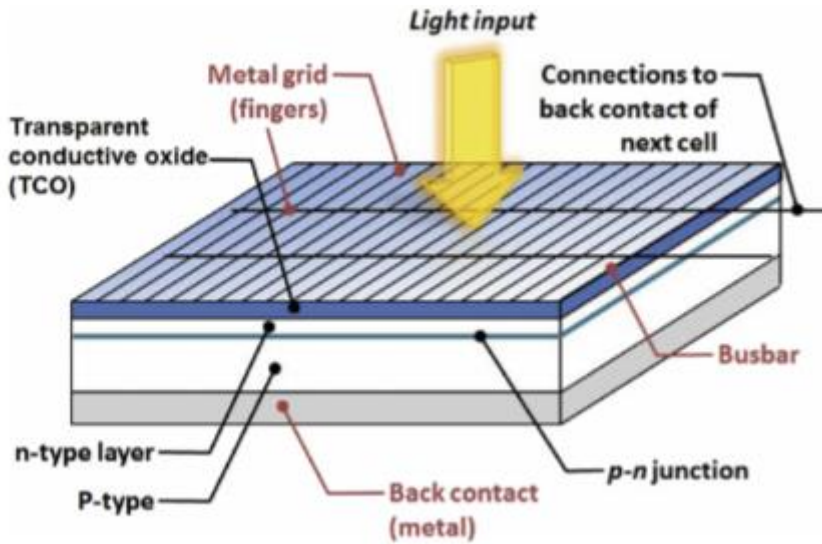
Şekil 13: Monokristal Güneş panelinin yapısı (Bagher et al 2015)

EVA'nın açılımı Ethylene Vinyl Acetate'dir ve Güneş panellerinin %80'nin da bulunmaktadır. Güneş pillerindeki yoğun kullanımları nedeniyle çok dikkat çekmiştir. EVA, Yapısal destek sunması, 20-30 yıllık ömrünün olması, iyi ışık geçirgenliği ve esnekliği, düşük işlem sıcaklığı, mükemmel erime akışkanlığı ve yapışkanlık özelliği gibi birçok avantaja sahiptir. Ek olarak, fiyatı düşüktür ve bu da güneş pili kapsülleme malzemesi olarak çok uygun olmasını sağlamaktadır. Ancak, EVA ile ilgili bazı problemler de vardır. Nem, ısı ve ultraviyole ile eskime hızı artmaktadır. Ayrıca, sararmasından dolayı güneş pilinin enerji dönüşüm verimliliğini azaltmaktadır. (Wang ve ark. 2011, Candida ve ark. 2017)

Polikristal ve ya multikristal (multi-Si) bir çok küçük kristal parçalarından toplanmaktadır ve monokristal gibi yüksek saflığa sahip değildir. Polikristal, kimyasal arıtma yani Siemens prosesi ile üretilmektedir. Küp şeklinde ki külçeler erimiş poli silikondan oluşmaktadır. Daha sonrasında ise monokristalde ki levhaların kesimine benzer şekilde kesilmektedir. (Şekil 13). Poli ve multi kristal silikonlar eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Fakat, multikristal 1mm boyutundan büyük kristalleri ima etmektedir. Multikristal güneş hücreleri markette bulunan en yaygın hücrelerdir. 1 megawatt güneş gücü elde edebilmek için 5 ton polisilikona ihtiyaç duyulmaktadır. . (Paiano 2015, Bagher ve ark. 2015)



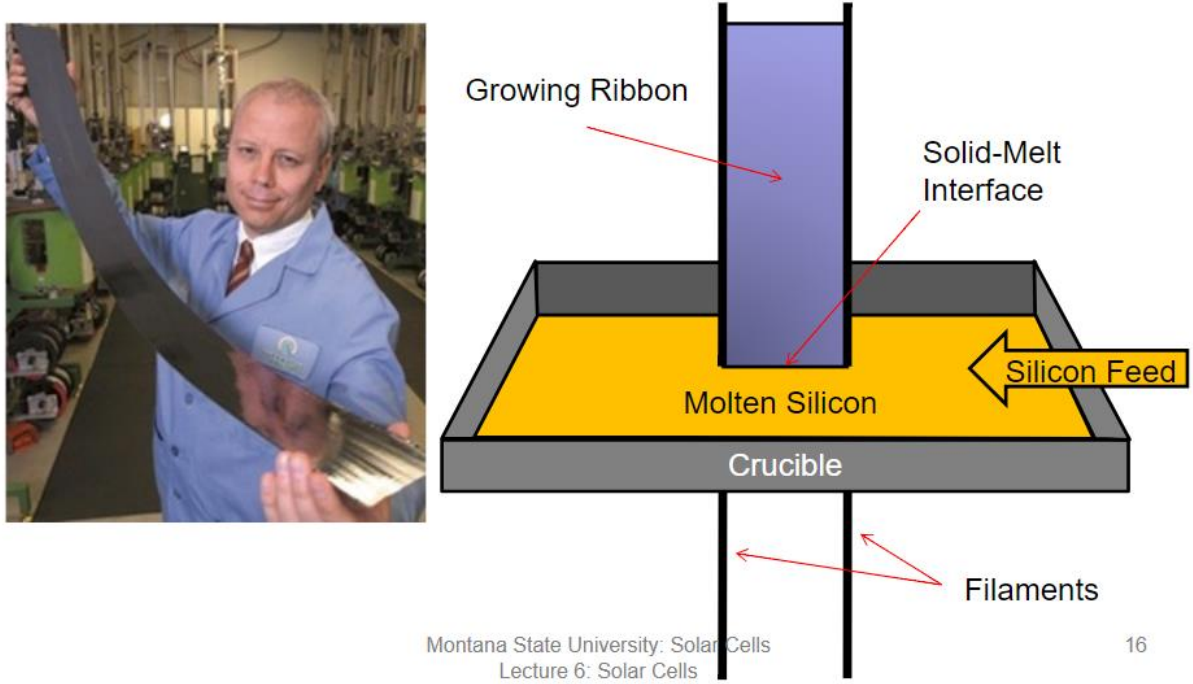
Şekil 14: Levhaların üretimi (Anonim, 2016)



Şekil 15: Dikdörtgen güneş hücrelerinin şematik gösterimi (Gupta et al 2016)

Saf silikon içerisinde n ve p bölümlerini oluşturabilmek için fosfor ve boron dopantları kullanılmaktadır. Fosfor, n dopantı olarak anılır ve levhaya negatif karakteristik katar. Boron, p dopantı olarak bilinir ve levhaya pozitif karakteristik katar. Bu dopantlar silikonun yapısına benzemektedir. Fosfor dış yörüngesinde bir adet fazla elektronu bulunur ve boronun ise bir adet daha az vardır. Bu dopantlardan dolayı, ışık hücrede ki elektronlara çarptığında elektrik alanı oluşmasına sebebiyet vermektedir. (Sa'atlu 2014)

Silikon şerit levhaların üretim prosesinde yüksek sıcaklığa dayanıklı kablolar erimiş silikonun içine yerleştirilir. Erimiş silikon yatay olarak kablolar ile büyütülür. Böylece, şerit şeklinde multikristal silikon elde edilmektedir. Bu method ile diğer methodlara göre daha az miktarda silikon harcanmaktadır. (Şekil 16) (Kaiser 2016)



Şekil 16: Şerit silikon levha üretimi (Kaiser, 2016)

Ayrıca, silikonun ışık yansıtması daha fazladır. (AR) Anti-reflektif yani geri yansıtma tabaka ve ya pasivasyon bu tabakaya uygulanmaktadır. Farklı üreticilerden kaynaklı farklı türde AR'ler bulunmaktadır. Bir sonra ki aşama ise, iki adet Al ve Ag elektrotun hem arka hem de ön kısmına uygulanmasıdır. Daha çok önde ki elektrotlar gümüş ve arkası için ise alüminyum kullanılmaktadır. (Klugmann-Radziemska ve ark 2010)


Bu AR kaplamalar, polikristal levhalara mavi rengini vermektedir ve bazı kaplamalar titanyum dioksit (TiO_2), Silikon dioksit (SiO_2), Hidrojenleştirilmiş silikon nitrid ($SiN_x:H$), alüminyum oksit (Al_2O_3), ITO (indiyum kalay oksit) (In_2O_3), Silikon monoksit (SiO), Çinko oksit (ZnO). (Iyengar 2010)

AR kaplamalar levhalar birincil ve ikincil tabaka olarak kullanılabilir. Tek bir ince film kalınlığı 100 nm olmakla birlikte iki adet tabakanın yani silikon dioksit ve titanyum dioksit hücrenin verimliliğini %3-4 arttırabilmektedir. Üçlü katman kaplaması ile %39-40 oranında bir

iyileştirme söz konusu olmaktadır. Hücrenin geri yansıtması %3,2 oranında AR kaplama ile azalmaktadır. Bu yüzden, birden fazla kaplama solar spektrumunda yüksek verim sağlayabilmektedir. (Kumar 2016)

SiNx:H kaplaması plazma ile geliştirilmiş kimyasal buhar biriktirme tekniği kullanıldığından popüler ve en etkilisidir. Fakat pahalı ve en fazla materyal tüketen metottur.

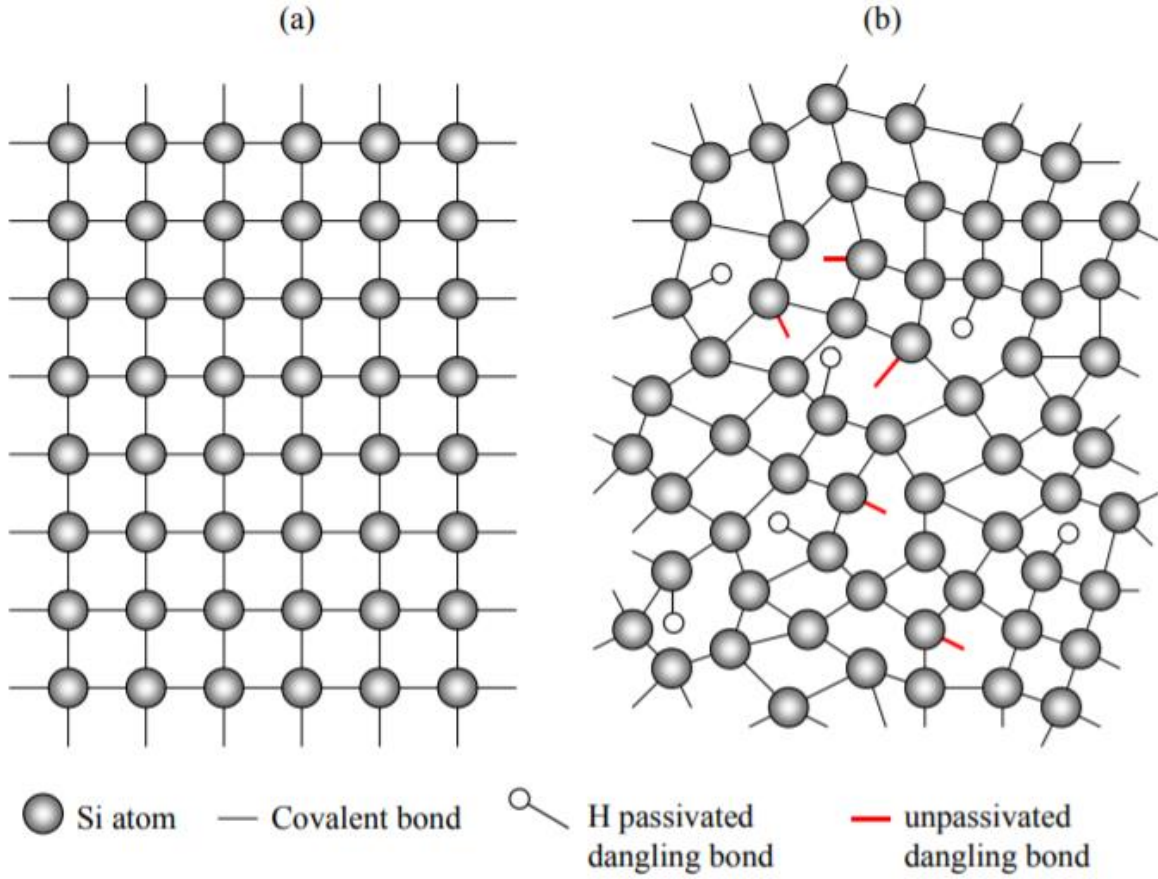
Tablo 2: Mono ve Poli kristal silikonun karşılaştırılması (Anonim, 2016)

	Monokristal	Polikristal
Tip		
Verimlilik	En fazla %19	En fazla %16
Lab. Verimliliği	%25	%20.4
Yaşam ömrü	25-30 Yıl	20-25 Yıl
Renk	Kristal ve ya koyu mavi	Kristal mavş
Form	Kenarları yuvarlanmış kare ve ya dikdörtgen	Dikdörtgen ve kare

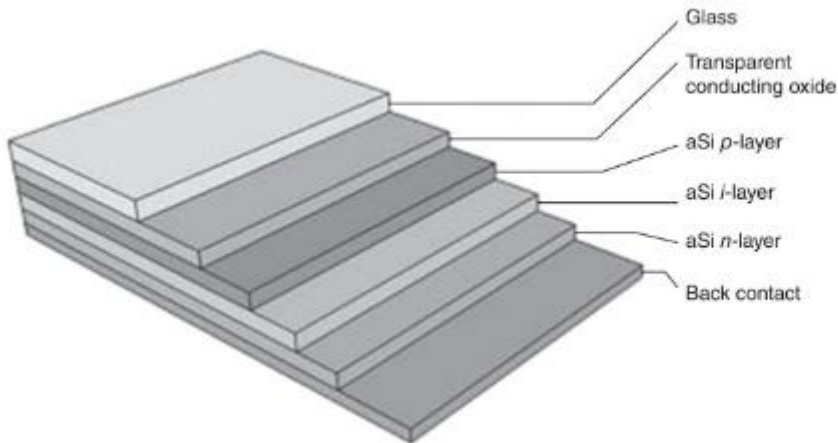
İnce film teknolojileri 1-10 um aktif materyal ile güneş spektrumunu daha verimli absorblar. İnce film teknolojisinin bir diper anlamı, ilk jenerasyon silikon hücrelerinden daha az materyal kullanarak yapılmasıdır. Bu teknoloji daha ekonomiktir ve dört adet tipi bulunmaktadır. (Paiano 2015)

Amorf silikon (a-Si) kristal olmayan bir yapıya sahiptir. Prosesde aha az silikon kullanılır. (Paiano, 2015) a-Si bu teknolojiler içersinde ki en gelişmiş türdür ve silikon materyal tabakasında buhar birikimi metoduyla (1 mikrometre kalınlığında) cam ve ya paslanmaz çelik parçası üzerine yapılır. (Bagher 2015) a-Si:H, PV olarak iki tür tabaka bulunmaktadır. Tekli ve çoklu (n-i-p) tabakalardır. Bu tabakalar çok incedir (20nm). a-Si düzensiz yapısından dolayı asılı kalan bağları bulunur ve bu atomlar problemere yola açabilmektedir. Bu materyal hidrojenleştirildikten sonra bu bağlar azalır. (şekil 17) Ancak, Bu materyalin bozulmasını

hızlandırır. Asıl tampon tabakası amorf hücrenin daha iyi performans göstermesine yardımcı olmaktadır. Çoklu tabaka sistemi ile verimlilikte gelişmeler gerçekleştirilebilmiştir. Ayrıca, a-Si toksik metal bulundurmadığından çevre dostu bir teknolojidir. (Ahmad, 2017)



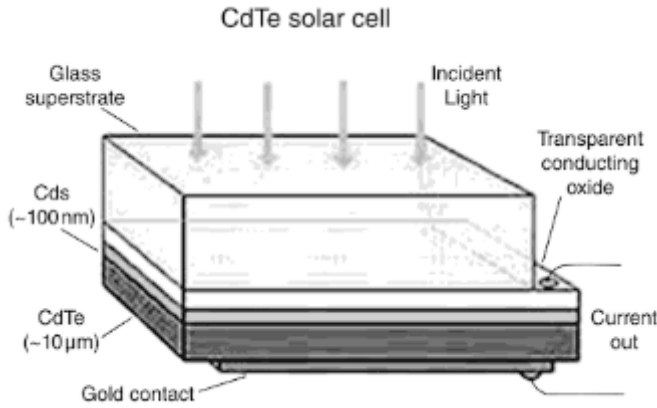
Şekil 17: Atomik Yapı (a) kristal silikon (b) hidrojenleştirilmiş amorf silikon (TuDelft 2017)



Şekil 18: Amorf silikon (Ahmad 2017)

TCO'nun anlamı şeffaf iletken oksittir. İnce film hücrelerde elektrot olarak kullanılan kontakt metallere yerine ve arka kısımda reflektör olarak kullanılmaktadır. Böylece metal elektrotlara gerek kalmadan elektronları transfer edebilmektedir. Bir kaç tane TCO vardır. İndiyum çinko oksit (IZO), Hidrojenleştirilmiş indiyum oksit (IO:H), zirkonyum takviyeli indiyum oksit (In₂O₃:Zr), Çinko kalay oksit (ZTO) bunlardan bazılarıdır. Amorf silikon hücrelerine gelen ışık tek seferde geçmez bu yüzden nano tekstür (yüzeyin pürüzlüğü) uygulanarak ışığın birden fazla yayılması sağlanır ve geçişi sağlanır. Bu arka yüzey içinde reflektör olarak optik özellikleri iyileştirmek ve difüzyon oluşturmak için uygulanabilmektedir. (Müller 2004)

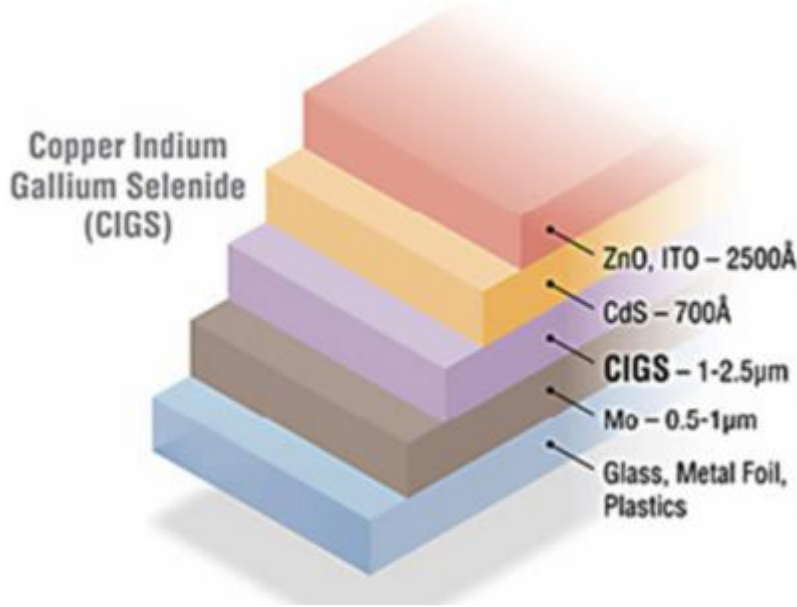
Kadmiyum Tellür (CdTe) başka bir ince film teknolojisidir. Performansı maksimum verimliliğine yakındır. Özellikle sıcak ve kuru havalarda verimliliği yükselir. Ucuz fakat ilk jeenerasyon gibi kullanışlı değildir. Görünür güneş spektrumunda yüksek optik absorpsiyonuna sahiptir. Band aralığı 1.45 eV'tur. Bu güneş hücreleri için neredeyse optimum değerdir (1.5 – 1.6 eV). Dört adet tabaka ve TCO bulunmaktadır. (Şekil 19) TCO'dan sonra kadmiyum sulfid (CdS) ve sonrasında ise CdTe kapalı alan süblimasyonu (CSS) tekniği ile yerleştirilir ve son tabaka ise arka kontaktdır ve altından yapılmaktadır. (Ahmad 2017)



Şekil 19: CdTe Solar hücresi (Ahmad 2017)

Bakır indiyum galyum selenit (CIGS) çok yüksek optik absorpsiyon katsayılarına sahiptir. CIGS'in band aralığı 1.04 eV'dur. Emilmenin gerçekleştiği tabakada band aralığı 1.01 ile 1.68 eV arasında değişmektedir. Verimliliği %20'dir. Birden fazla malzemenin üzerine yapılabilir ve esnek olarak kullanılabilir. MO (molibden) arka kontakt olarak

kullanılmakta ve ışığı geri emici tabakaya yansıtılmaktadır. Şekil 20’de görüldüğü gibi ZnO, TCO olarak kullanılabilir. (Ahmad 2017)



Şekil 20: CIGS solar Hücresi (Baghar 2015)

İnce Film hücreler Global PV satışlarının %10-15’ini kapsamaktadır. (Klugmann-Radziemska 2013)

Tablo 3: Bazı ince film hücrelerin Verimlilikleri (Chopra, 2004)

Solar Hücre Tipi	Verimlilik (%)
GaAs	23.3
a-Si	12.7
CdTe	16.5
GaAs/CIS	25.8
CIGS	13.4
GaInP/GaAs/Ge	31
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	13.5

Tablo 4: PV yapılarının karşılaştırılması (Monier ve Hestin, 2011)

Materyal	Kristal silikon Modülü	İnce-Film Modülü		
		a-Si	CdTe	CIS/CIGS
cam	%74	%86	%95	%84
Aliminyum	%10	<1%	<1%	12%
Diğer parçalar	%16	%14	%4	%4
Diğer önemli materyaller	EVA, Tedlar, Arka kaplama filmi, silikon, Yapıştırıcı	Polyol, MDI	EVA	EVA
Nadir materyal	Gümüş	Indium, Germanium	Tellür	Indium, Gallium
Cd ve Pb'nin varlığı	Pb		Cd	Cd

Yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemler (CPV) lens ve ya ayna kullanarak güneş ışığını güneş hücresinin üzerine yoğunlaştırır. Bu hücreler diğer bahsettiğimiz genel hücrelerinden daha pahalıdır. CPV'ler güneşten en iyi verimi alabilmek için takip sistemi ile donatılmışlardır.



Şekil 21:CPV güneş hücresi ve panelleri

Boyaya duyarlı güneş hücreleri 3. Jenerasyon güneş hücreleridir. Yapay fotosentez kullanarak yapay ve doğal ışığı enerjiye çevirebilmektedir. (Bahger, 2015)

Organik hücreler organik polimerler veya organik moleküller gibi biyobozunur malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Hibrit hücreler şimdiki teknoloji ve organik ve ya inorganik yarı iletkenlerin kullanılarak yapılmaktadır.(Paiano, 2015)

Pasifleştirilmiş emitör ve arka hücre (PERC) ve bölgesel olarak dağılmış pasifleştirilmiş emici ve arka hücre(PERL) ileri düzey teknoloji gerektiren güneş hücreleridir. Bu hücreler çok yüksek verimlilik gösterir fakat yüksek maliyetlerinden dolayı ticari olarak kullanılamamaktadır. (Paiano, 2015)

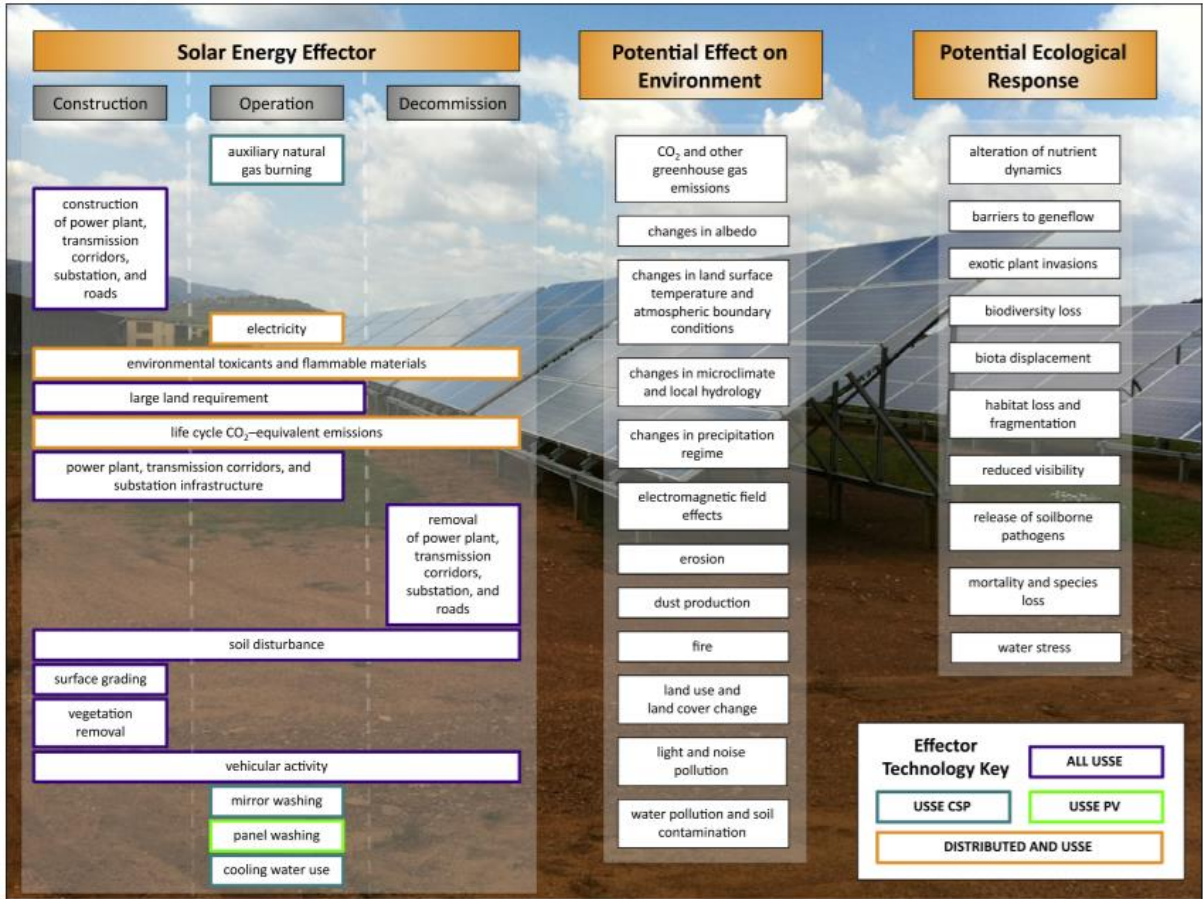
Multi-tabakalı ve ya tandem adı verilen sistemlerde her zaman üst kısmını belli spektrumu geçirmek zorundadır ve bu altta bulunan hücrelerin aktifleşmesini sağlamaktadır. Spektrum hassasiyeti ile verimlilik maksimuma çıkartılmış olur. c-Si'nun düşük maliyetinden dolayı yüksek verimlilikli tandem hücreler yapılabilmektedir. Periyodik tablonun III-V'nde bulunan alaşımlar, kalkojenidler ve perovskitler'in takip cihazı kullanılmadan bile çok iyi çalışması beklenmektedir. (Johnson 2014)

Tablo 5: PV'de Kullanılan nadir metaller

Nadir Metaller	PV'lerin tipi
Te	CdTe modules
In	a-Si, CIS, CIGS modules
Ga	CIGS, CPV modules
Ge	a-Si, CPV
Ag	c-Si modules

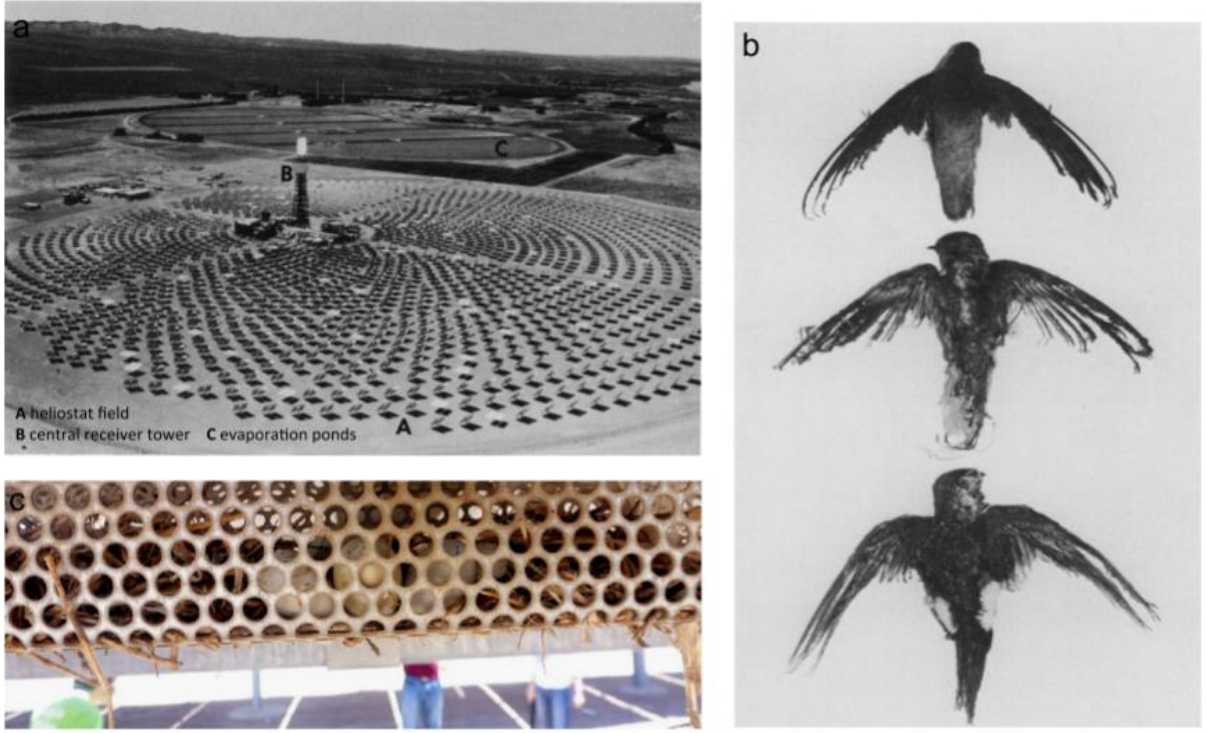
2.3 Güneş Enerjisi Teknolojilerinin Potansiyel Çevre ve İnsan Sağlığına Zararları

Yüksek miktarda enerji üreten güneş sistemlerinin (USSE) biyolojik çeşitliliğe, Su kullanımına ve tüketimine, toprağa, insan sağlığına, toprak kullanımına, toprak üstü değişimlere yeryüzü ve atmosfer etkileşiminin değişmesine, iklim değişiminde ki farklılaşmalar gibi çevreye etkileri bulunmaktadır. (Şekil 22)(Hernandez, 2014)



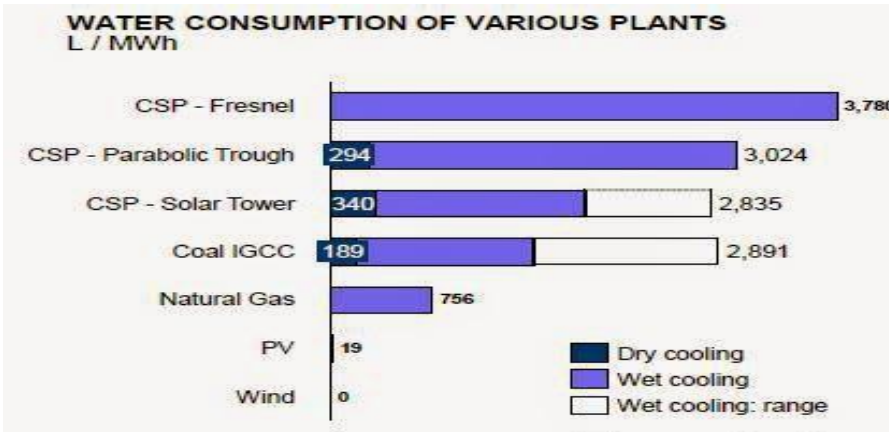
Şekil 22: CSP ve PV'lerin potansiyel etkileri ve çevrenin tepkisi (Hernandez, 2014)

Yapılan çalışmalarda 40 hafta içerisinde 70 adet kuşun ölümü belgelendirilmiştir. Bu ölümlerin sebepleri heliostatların dönmesinden kaynaklı çarpmalardır. Diğer sebeplerden biri ise kuşların PV'lerin arka kısımlarına yuva kurması olarak belirlenmiştir. Bu şekil 23'de görülebilmektedir. (Hernandez, 2014)



Şekil 23: Yuvalar ve yanmış-çarpmış kuşlar (Hernandez, 2014)

Su kullanımı paneller için daha çok toz oluşumunda kullanılmaktadır. Panel ve ya aynaların yıkanması toz temizlenmesi için en basit yöntemdir. CSP sistemlerinde hangi sistemin kullanılmasına bağlı olarak su alımında değişimler olabilmektedir. Çünkü, CSP'ler kömür ve doğal gazdan daha çok fazla su (ortalama 3,07m³ / MWh) tüketebilmektedirler. (Şekil 24) Kuru soğutma sistemi su tüketiminde %90-95 lik bir azalma sağlayabilmektedir. Fakat, bunun yanında ıslak soğutma daha avantajlı bir soğutmadır. (Hernandez, 2014)



Şekil 24: Farklı sistemlerdeki su tüketimi. (Anonim, 2015)

USSE'lerin yapımında inşaat aşaması olduğundan dolayı toprak üzerinde değişimler yapılması gereklidir. Bu değişimler bitki örtüsünü kaldırma, arazi düzleştirme ve yol yapımı gibidir. Bu değişimler toprakta nitojen veorganik karbonun kaybolmasına sebebiyet vermektedir. Kaynakların az olmasından dolayı toprak kaybı ile birlikte biyolojik çeşitlilikte azalmaya ve bitki örtüsünün iyileşmesinin zorlaşmasına yol açmaktadır. Ayrıca, bitki örtüsünde ki kaybın artması toz artış sebeplerindedir. Yakın yüzey atmosferindeki asılı tozlar panel yüzeyine ulaşan güneş radyasyonu toplamını azaltır. (Hernandez 2014) Bazı bölgelerde, paneller tarafından sunulan gölge, ekolojik olarak hassas değilse, mikro iklim üzerinde faydalı etki oluşturabilmektedir. (Tsoutsos 2005)

Tablo 6: Solar ve klasik enerji sistemlerinin CO₂ bakımından kıyaslanması (Hernandez, 2014)

Klasik sistemler	g-CO₂/kWh	Yenilenebilir sistemler	g-CO₂/kWh
Kömür	975	Parabolik Toplayıcı	26
Gaz	608	Güç Kulesi	38
Petrol	742	c-Si	45
Nükleer	24	TF a-Si	21
		TF CdTe	14
		CIGS	27

Multi ve mono kristal panellerin 2004-2005 yıllarında üretiminde kaynaklı sera gazı emisyonları 37 ve 45 g CO₂- eq./kWh olarak hesaplanmıştır. 2009 yılında ise bunun 30 g'a kadar düştüğü bulunmuştur. (Fthenakis ve Alsema 2004, de Wild-Scholten 2009)

Kömür, gaz ve ya petrolden kaynaklı CO₂'in yenilebilir enerjiden kaynaklı CO₂'den daha fazla olduğu açıkça sera gazı emisyonlarının 2-6 tablosunda görülmektedir.

Atık PV'ler gerektiği gibi uzaklaştırılmaz ise insan ve çevre üzerinde bir çok negatif etkiye sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca kaynak ve materyal kaybında yol açmaktadır. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- a) Kurşun Sızması
- b) Kadmiyum Sızması

c) Kaynak ve nadir metallere kaybı (cam, alüminyum, gümüş vb.)

Kristal silikon solar hücrelerde kurşun bulunmaktadır. Kurşun ağır metal olduğundan dolayı insan ve doğaya zararları büyüktür. Ayrıca, tehlikeli maddeler proses ve üretimden kaynaklı bulunabilmektedir. (Sundaram, 2016). Vücuda girdiğinde kemiklerde birikmeye, sinir sisteminde hasara, böbrek bozukluklarına, immün sistemine, kardiyovasküler sistemde etkileri bulunmaktadır. Çevrede bitki örtüsünün kaybına, hayvanlarda ve bitkilerde büyüme ve üremede düşümlere sebebiyet vermektedir. (Monier, 2011)

Kristal silikon modüllerde lehim maddesi bakır parçaları birbirine bağlamak için kullanılmaktadır. Bu da kurşunun %36 oranında buradan gelmesini sağlamaktadır. Dahası, ön ve arkada kullanılan yapıştırıcılarda kurşun ve kadmiyum izlerine rastlanabilmektedir. (Werner, 2011)

Panellerin düşük pH maruz kalmaları ile %13 den %90'a kadar sızma gerçekleşebilmektedir. Yaklaşık olarak 12.6g kurşun ortalama bir c-Si panelde bulunmaktadır. Potansiyel sızma aralığı ise 1.64g ile 11.4g arasındadır. Her 1 ton panelden ise 75 g ile 518 gr kurşun sızma gerçekleştirebilir. Ph 6-7 aralığında %13 sızma yaparken pH 3-4 aralığında %90 sızma gerçekleşmektedir. (Monier ve Hestin, 2011)

c-Si'dan kaynaklı kurşun sızması normal şartlarda Cd'dan daha toksittir ve bu yüzden kristal silikonun geri dönüşümüne ayrıca önem verilmektedir.

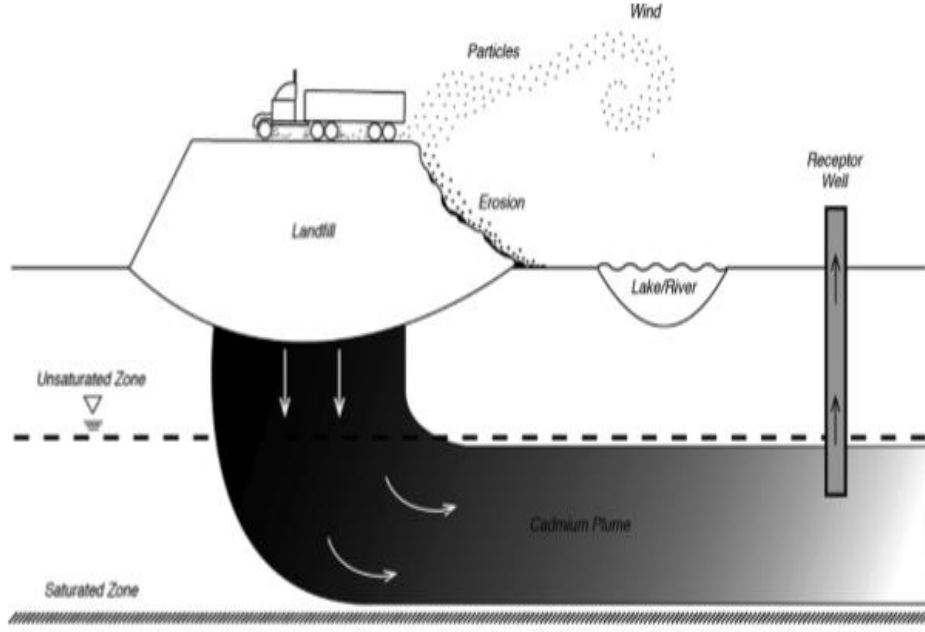
Kadmiyum element olarak stabil CdTe'den daha toksiktir. CdTe elektrik üretimi sırasında herhangi bir gaz üretmez. Çünkü, güneşten gelen enerji CdTe ve ya CIS'de kimyasal bağları koparmaya yetmez. (Rix, 2015)

CdS bir diğer toksik kimyasal maddedir. Termodinamik olarak oksijenli koşullarda dengesizdir ve bu koşullar oksit formuna dönüştürmektedir. Dönüşen ürünler suda daha kolay çözülebilmektedir. (ECHA, 2013)

Kadmiyum insan sağlığına Organizmalarda birikerek problemlere yol açabilmektedir. Biyolojik yarılanma ömürleri 30 yıldır. İşçiler iş ortamında buna maruz kalabilmektedirler. Cd akciğer hastalıkları, osteoporoz, böbrek problemleri, hipertansiyon, ve sinirsel etkileri dozuna bağlı olarak görülebilmektedir. Her bir 12 kg varsayıldığında panelden kg başına 0,383 mg Cd konsantrasyonu olduğu varsayılmaktadır. Bunun içinde Cd içeriği 4,6g'dır. (Crys ve ark, 2014)

Cd sızma riski daha çok CIS ve CdTe panellerinden gelmektedir. CdTe'den sızma hacmi panelin kendi pH'ında kalırsa %7 fakat asitlik seviyesinin artması ile bu %29'dan %40'a

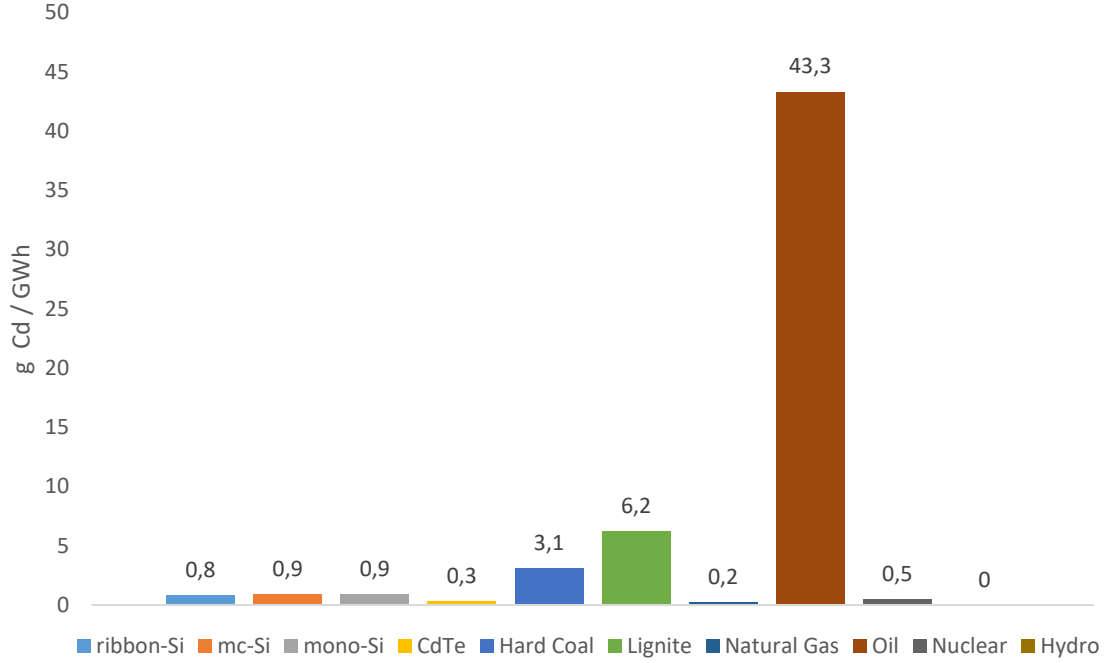
kadar olabilmektedir. (Monier ve Hestin 2011) Cd yer altı suları ile ve ya hava yolu ile yayılabilmektedir. (Şekil 25) (Crys ve ark. 2014)



Şekil 25: Cd yayılma yolları (Crys ve ark. 2014)

2015 yılında, Avrupa Kimya ajansı CdTe'ü sulak ortamlar için çok uzun süreli etkilere sebep veren ve solunduğunda zararlı olarak sınıflandırmıştır. (Rix 2015) Ortamın pH düştükçe sızma miktarıda artmaktadır. Bu Cd için pH 6-7 aralığında %29, 3-4 aralığında ise %40'dır. (Monier ve Hestin 2011)

Şekil 26 göstermektedir ki, petrol ve kömür kullanımı sonucu oluşan Cd, panellere kıyasla çok daha fazladır.



Şekil 26: Diğer PV ve elektrik üreten sistemlerin Cd emisyonu (Rix 2015)

Galyum Arsenit (GaAs) bir diğer toksik ve kanserojen birleşimdir. Birden fazla organa zarar vermektedir. Bunlar, akciğer, testisler, beyin, immün sistemi gibi. Yarı iletken sanayisinde çalışan işçiler buna maruz kalabilmektedir. (Flora and Dwivedi, 2012)

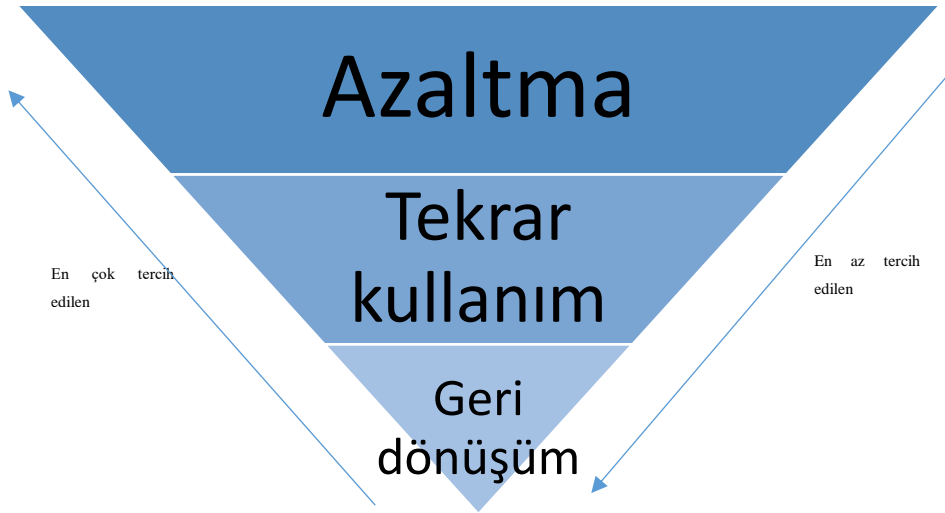
Tablo 7: Si üretimi ve işlenmesinde kullanılan bazı zararlı maddeler (Sundaram, 2016)

Zararlı maddeler	Kullanıldığı yer	Sağlık problemleri
Metallurgical grade silica/ silica dust	Maden	Silikosis, Önemli ciğer problemleri
Kurşun	Lehimleme	CNS, GI, Kan, Böbrek
Nitrik Asit	Wafer temizleme	Tahriş
Sodium hydroxide	Wafer temizleme	Tahriş
Sodium hydroxide/ potassium hydroxide	Kesmeden oluşan zararın düzeltilmesi	Gözler, ciğerler ve deri zararı
Silicon tetrafluoride	a-Si Yerleştirme	Yakıcı , tahriş edici gözler için, ciğer, ve deri
Sulfur hexafluoride	Reaktör temizlenmesi	Sera gazı

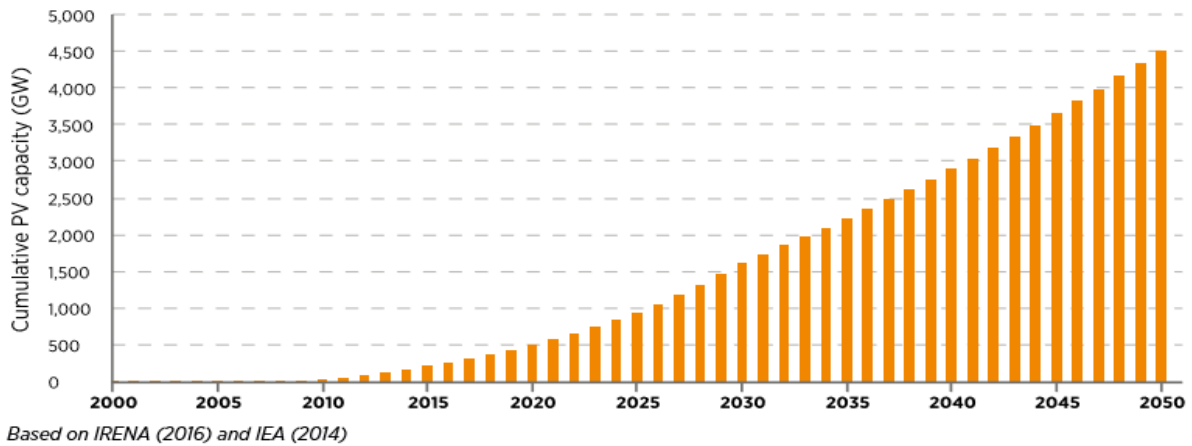
2.4 Güneş Paneli Atık Yönetimi

2000'li yılların başından beri PV endüstrisi büyümektedir. 2015 yılı sonunda 222 GW PV kapasitesine ulaşılmıştır. 2050 yılında ise bu değerin 4,500 GW olacağı öngörülmektedir. 2016 yılı beraber PV atıkları 43,500 ila 250,000 metrik tona ulaşmıştır. 2050 yılı itibari ile 60 - 78 milyon ton atığın oluşacağı ayrıca öngörülmektedir. (Şekil 2-28 ve Tablo 2-8) (Weckend ve ark, 2016)

PV atıklarının yönetimi arasında materyal kullanımında azaltma, tekrar kullanma ve geri kazanım gibi seçenekler ön plana çıkmaktadır. (Şekil 27)



Şekil 27: PV atık yönetimi (Weckend ve ark, 2016)

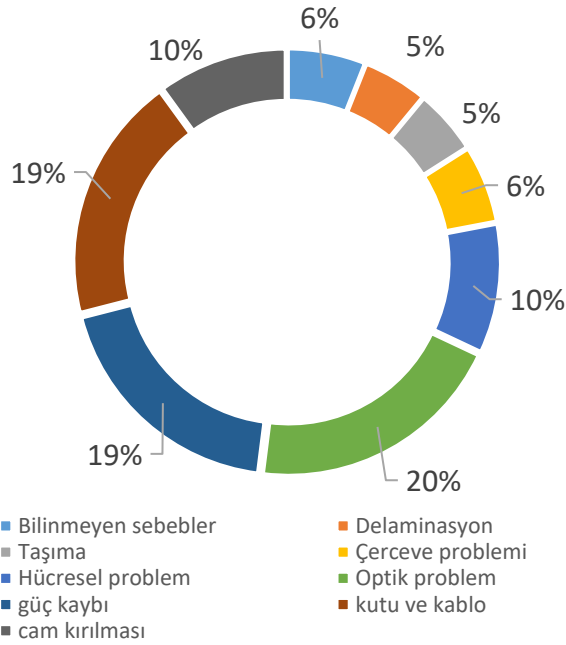


Şekil 28: Öngörülmuş toplam PV kapasitesi

Tablo 8: 2015-2050 yılları arası öngürülmüş toplam PV kapasitesi

Yıl	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Toplam Kurulu PV kapasitesi (GW)	222	511	954	1632	2225	2895	3654	4512

Güneş panellerinin atık olması bilinmeyen sebeblere, optik bozulmalara, taşıma sırasında oluşan problemlere, çerçeveden kaynaklı prblemere, cam kırılmalarına, güç kayıpları sebepleri ile ortaya çıkabilmektedir. (Şekil 29) (Weckend ve ark. 2016)



Şekil 29: Güneş paneli problemlerinin yüzdesel oranları(Weckend ve ark. 2016)

Türkiye'nin 2050 yılına kadar toplamda 400.000 ton PV atığı oluşacağı ve Almanya'nın ise 4.300.000 ton olacağı yapılan modellemede öngörülmüştür. (Weckend ve ark, 2016)

Sınıflarına ve tiplerine göre bakıldığında güneş panellerinin market payları aşağıda ki tablo 9'da açıkça gösterilmektedir.

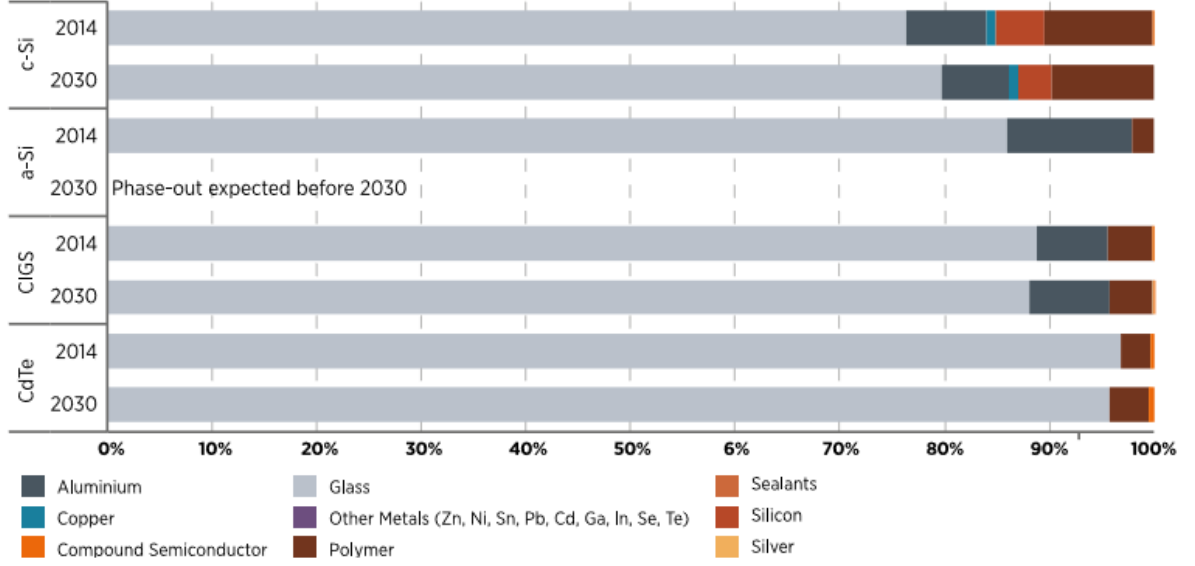
Tablo 9: Güneş panellerinin teknolojilerine göre market payları (2014-2030) (Weckend ve ark. 2016)

Teknoloji		2014	2020	2030
Silikon tabanlı c-Si	Monokristal	92%	73.3%	44.8%
	Poli ve ya multikristal			
	Ribbon			
	a-Si (amorf)			
İnce Film	CIGS	2%	5.2%	6.4%
	CdTe	5%	5.2%	4.7%
Diğerleri (3.Nesil)	CPV	1%	1.2%	0.6%
	Organik/boyalı		5.8%	8.7%
	Kristal Si (gelişmiş)		8.7%	25.6%
	CIGS alternatifleri, Ağır metal, Multi- junction(tandem)		0.6%	9.3%

Tablo 10: 2015 yılı ile Panel üreten ilk 10 üretici (Weckend ve ark. 2016)

	İnce-Film	Silikon Tabanlı	Yıllık Üretim kapasitesi (MW)
Trina Solar		x	≤5500
Canadian Solar		x	≤4500
Jinko Solar		x	≤4500
JA Solar		x	≤3500
Hanwha Q CELLS		x	≤3000
First Solar	x		≤3000
Yingli		x	≤2500
GCL System		x	≤2000
Suntech Power		x	≤2000

Renesolar		x	≤ 1500
10 adet PV üreticisinin toplamı			≥ 32000



Şekil 30: 2030 yılına kadar panel materyallerinin yüzdesel değişimi (Weckend ve ark. 2016)

Panel üzerine araştırmalar sonucunda materyal kullanımının azalması ve panel verimliliklerinde artış potansiyel zararlı maddelerin kullanımında paralel olarak azaltılabilecektir. Buna bağlı olarak şekil 30 yüzdesel değişimleri göstermektedir.

Bugün kullanılan c-Si paneller %76 cam, %10 polimer, %8 aliminyum, 5% silikon, %1 bakır ve 0.1%'den az gümüş ve diğer materyalleri bulundurmaktadır. (Wambach ve Schlenker 2006, Weckend ve ark. 2016) Amorf silikon market payının çoğunu kaybetmiş ve önemli miktarda değerli ve ya zararlı maddeler bulundurmadığından özel bir işlem uygulanmasına gelecekte gerek duyulmaktadır. (Weckend ve ark. 2016)

CIGS paneller %89 cam, %7 aliminyum, %4 polimer, metal olarak %10 bakır, %28 indiyum, %10 galyum ve %52 selenydan oluşmaktadır. (NREL 2011, Bekkelund 2013, Pearce 2014)

2015 yılı itibari ile dünya genelinde kullanılan panellerin üçte ikisi kristal silikondur. %90'dan fazlası cam, polimer ve aliminyum olan kristal silikon paneller zararsız olarak

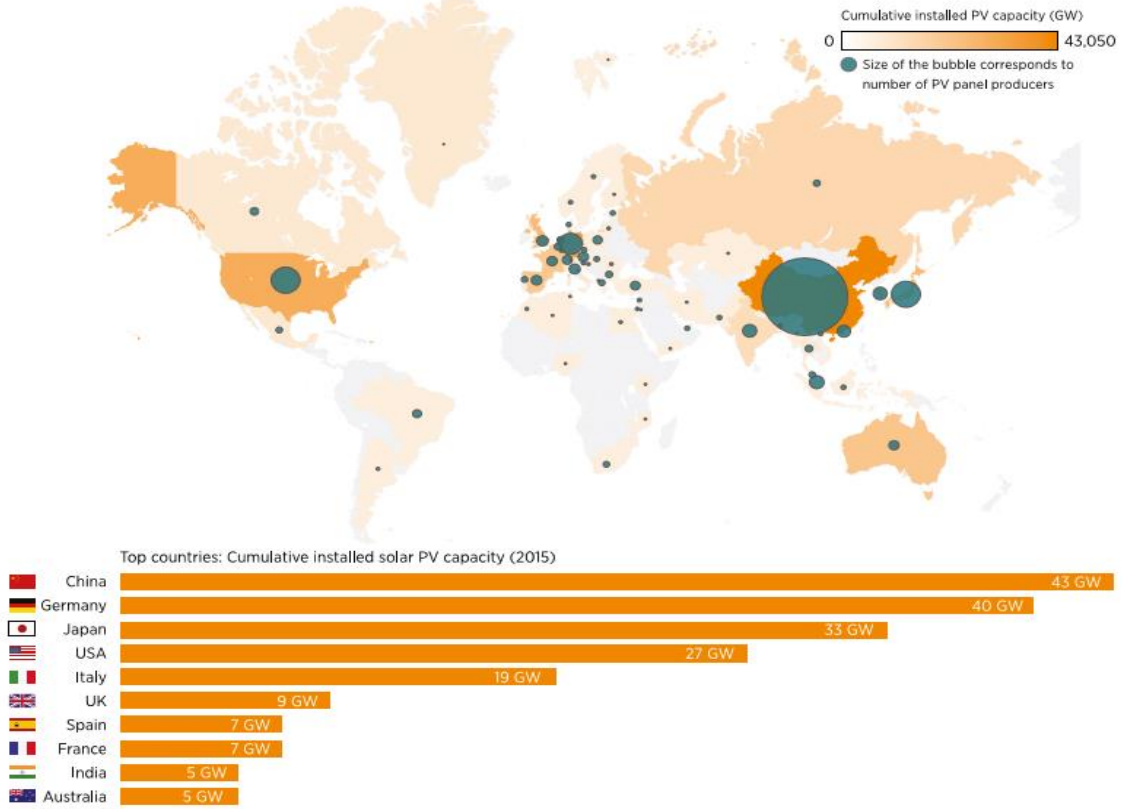
sınıflandırılmıştır. Ancak, kristal silikon panelin bir parçası olan ve geri dönüşümünde bazı zorluklar sebep olan gümüş, kurşun ve kalay toplam ağırlığın %4'ünü oluşturmaktadır. İnce film teknolojisi ise %98 cam, polimer ve aliminyumdan oluşmaktadır ama ayrıca belirli oranda içersinde bakır ve çinko barındırmaktadır ve bunlar çevresel olarak tehlikeli atıklardır. İçersinde yarı iletken ve ya tehlikeli materyal olarak indiyum, galyum, selenyum, kadmiyum tellür ve kurşun bulunmaktadır. Zararlı materyaller daha farklı geri dönüşüm metotları gerektirmektedir. (Weckend ve ark 2016)

Panellerin Avrupa'da düştüğü atık kodları aşağıdaki tablo 11'de gösterilmektedir.

Tablo 11: Panellerin Avrupa'da ki atık kodları

Tip	Atık Kodu	Anlamı
Tüm Tipler	160214	Endüstriyel atıkların elektrik ve elektronik parçaları
	160213*	Tehlikeli atık barındıran parça
	200136	Evsel atık, kullanılmış elektrik ve elektronik atık
	200135*	Tehlikeli madde barındıran Hurda elektrik ve elektronik parçalar
Özel durumlarda: Amorf silikon paneller	170202	inşaat ve yıkım atıkları - camlar

* zararlı atıkları göstermektedir.



Şekil 31: Dünya’da ki PV panel üreticileri ve toplam kurulu PV kapasitesi(Weckend ve ark 2016)

Farklı tiplerde atık yönetimini kontrol etmek için yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlar gönüllülük, kamusal ve özel yaklaşım, Düzenleyici yaklaşım olmak üzere üçe ayrılmıştır.

Gönüllü yaklaşımda, üreticiler gönüllü olarak panelleri geri alarak gerekli geri dönüşümü istek üzerine yapabilmektedirler. Burada direk ve direk olmayan şekilde kendi içersinde ayrılmaktadır. Direk yönetimde üretici kendi panelleri için kendi geri dönüşüm sistemini kullanmaktadır. Direk olmayanda ise anlaşmaya dayalı şekilde farklı geri dönüşüm yöntemleri kullanılabilir. Bu sisteme diğer üreticiler de dahil olabilmektedir.

Kamusal ve özel yaklaşım, PV CYCYCLE gibi getir ve ya yerinden alma gibi seçenekleri sunarak panellerin üreticilere ve geri dönüşüme katkı sağlanması amaçlanmıştır. PV CYCLE Avrupa’da hizmet vermektedir.

Düzenleyici yaklaşımda ise Avrupa’da daha çok devletin geliştirdiği düzenleyici politikalarına göre pv panellerinin yaşam döngüsü yönetimi kontrol edilmektedir.

WEEE(Waste Electrical & Electronic Equipment) denilen Atık Elektrikli ve Elektronik Aletler yönetmelikleri buna bir örnektir.

2.4.1 Fotovoltaik Panellerde Azaltma Yolu ile Materyal Kazanımı

CdTe, c-Si, ve ya CIGS panellerin kullanığı materyaller daha önce de belirtildiği gibi değişiklik gösterebilmektedir.

İndiyum, Yeni şeffaf iletken oksit tabakası, daha bol ve dolayısıyla flor katkılı kalay oksit gibi daha ucuz bileşikler önde ki indiyum kalay oksit yerine kullanılabilir. Bu ince film teknolojisinde kullanılan indiyum kalay oksitin kullanılmasını azaltabilecektir. (Calnan 2014)

Cam, cam bileşimi, kalınlığı, yansıma önleyici tabaka, ve yüzeysel yapısı ön camın geçirgenliğini 2024 yılı itibari ile %2 artacağı öngörülmektedir. İnce-film teknolojilerinde 2 mm camların kullanılması ayrıca cam kullanılmasında azaltma sağlayabilecektir. (Weckend ve ark 2016)

Polimerler, enkapsüent ve arka tabaka koruyucu geri dönüşmemektedir. Markette ki baskın bu materyaller duroplastikten üretilmekte ve ayrışmadan çözülmemekte ve ya erimemektedir. Araştırmalar özellikle arka tabaka koruyucuları kullanımının azaltılması için yapılmaktadır. (Weckend ve ark 2016)

Silikon, ince hücreler silikon kullanımını azaltmaktadır. Tüm hücrelerin teması panelin arkasına taşınması silikon kullanımını yarı yarıya azaltılabileceğini ve enerji tüketimini %30 düşerebilmektedir. (Weckend ve ark 2016)

Gümüş, üretilen c-Si güneş hücrelerinin %95'i hücrelerin ön kısmında %8'i gibi bir değere denk gelen temas noktaları film baskısı ile üretilmektedir. Film baskısı ve ya püskürtme teknoloji ile azalma olacağı öngülmüştür. (Weckend ve ark 2016) Gümüş panel üretiminde en pahalı malzemeler biridir sonrasında ise bakır, silikon, aliminyum ve cam gelmektedir ve PV endüstrisi %3.5 ile %15 oranında dünya'da ki gümüş üretimini kapsamaktadır. (Berry 2014, Marini ve ark. 2014)

2.5 Güneş Panellerinin Geri Dönüşümü

2.5.1 Kristal Silikon Güneş Panelinin Geri Dönüşümü

Deneysel olarak konveyör bantlı fırında piroliz ve akışkan yataklı bir reaktörde piroliz proses teknolojisi ile camda %100 ve silikonda %80'lik bir geri kazanma elde edilmiştir. (Frisson ve ark. 2000)

Trikloroethilen kullanarak 80 °C 10 gün beklettikten sonra EVA'nın hücreye basıncını engellemek için mekanik basınç uygulanmış ve %100 silikonun geri kazanımı sağlanmıştır. (Doi ve ark. 2001)

Panellerde kullanılan PET tabanlı arka tabaka 1'den 2 saate kadar 80 °C'de ve PVF tabanlı arka tabakalar ise 5 saatten 8 saate kadar 80 °C'de ayrıştırılabilmektedir. Bazı durumlarda birden fazla tabakanın kullanılması ile EVA katmanından, PET veya PVF katmanlarının arka tabakasından ayırabilmektedir. (Glatthaar ve ark 2017)

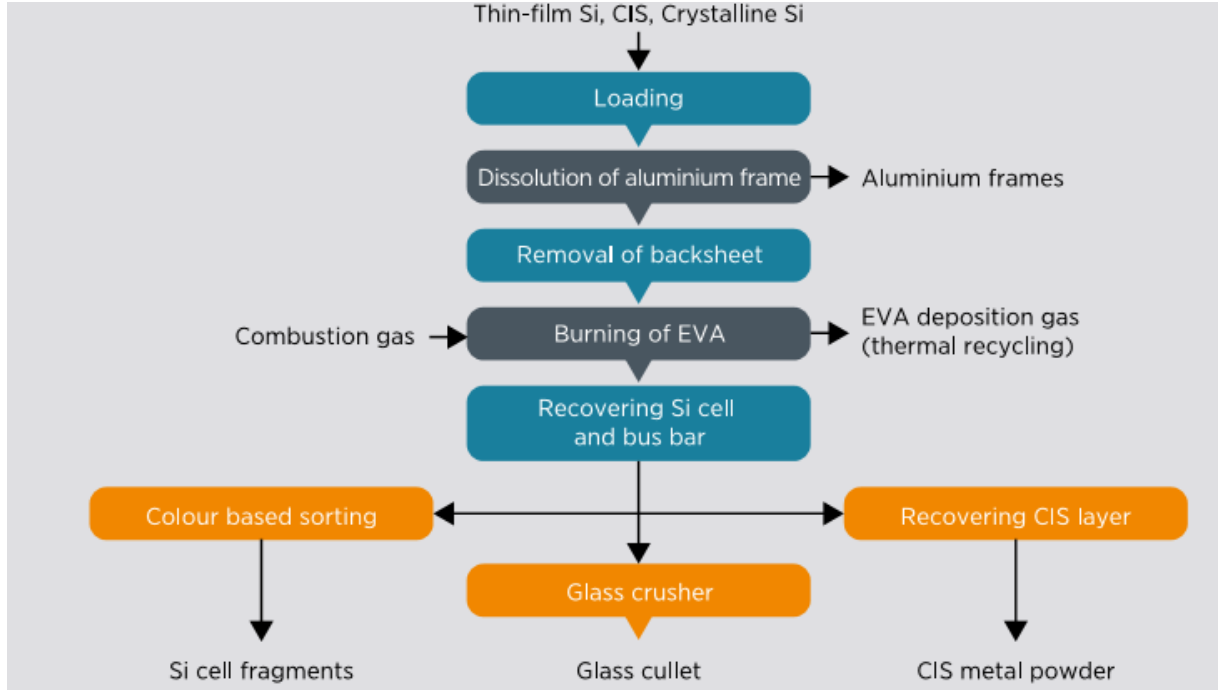
Wang ve ark. 2011 yılında yaptıkları çalışmada, kimyasal ve termal proses kullanarak geri dönüşümü araştırmış ve Camın tekrar direk olarak kullanılabilceğini, silikonun %62, bakırın ise %85 oranında geri kazanılabileceği bulunmuştur. Bu çalışmada iki farklı sıcaklıkta yakma kullanılmıştır. 330 °C'de 30 dakika ve 400 °C'de 120 dakika olmak üzere. Kimyasal olarak HCl/H₂O₂/H₂O, hidroflorik asit ve NaOH kullanılmıştır.

H₂SO₄, HCl, HNO₃ ve NaOH genel olarak Si, Ag ve Al asidik ortamda geri kazanılmasını sağlayan kimyasal birleşimlerdir. H₂SO₄ Al için kullanılmakta ve 4 saat 90 oC gerekmektedir. HNO₃ Ag için kullanılmakta ve 2 saat süre ile piroliz uygulanarak Ag ve Al geri kazanılabilmektedir. NaOH Ag için iyi bir çözücü olmasada Al tamamen çözebilmektedir. HCl ise Ag için çok verimli bir çözücüdür. Fakat sonrası AgCl birleşimi olduğundan kullanılmaması önerilmektedir. (Danila 2015)

Granata ve ark. 2014 yılında yaptıkları çalışmada, polikristal ve amorf silikon panelleri parçalanarak kütsel olarak geri kazanımını araştırmış ve %85 civarında bir kazanım olduğu görülmüştür. Ayrıca bunu CdTe içinde kullanılmıştır.

Ticari olarak kullanılan bir diğer geri dönüşüm metodu da Deutsche Solar ait olan prosesdir. Bu prosesde plastik parçalar 600 °C yakılarak silikon açığa çıkartılır ve asit yardımı

ile silikon levhası geri kazanılmaktadır. Silikon %98 ve Cam %100 olarak bu proses ile geri kazanılabilmektedir. (Larsen 2009)



Şekil 32: Japon firmasının kullanmış olduğu Proses. (Weckend ve ark. 2016)

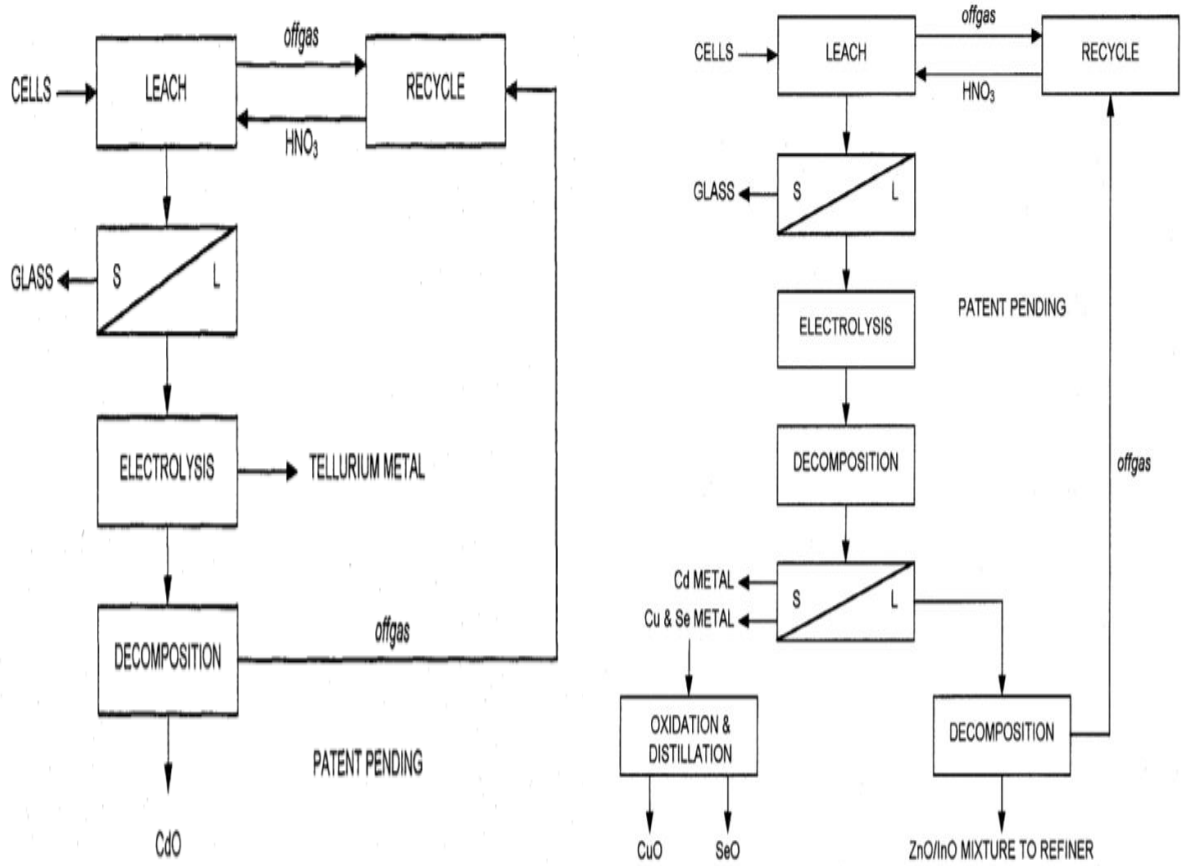
Şekil 32’de ki proses FAIS tarafından japonların geliştirmiş olduğu bir pilot tesis prosesidir. Pilot tesis ayrıca polimerlerin konveyör fırınında pirolizine dayanır. Bir ana fark, yarı iletken malzeme geri kazanımından önce gelen termal adım ile çerçevelerin ve arka tabaka folyonun çıkarılmasıdır. (Weckend ve ark. 2016)

2.5.2 İnce-film Panellerin Geri Dönüşümü

CdTe ve CIS paneller için pilot ölçekli yapılmış olan bir diğer çalışma ise, 500 °C’de termal sökülmeden sonra parçalarak boyutu küçültülür ve tozuz vakumlama ile birlikte yüzdürme işlemi uygulanmaktadır. Bu metot ile %98 Cd, %98 Te geri dönüştürülmüştür. (Dominguez ve Geyer 2017)

Şekil 33’de CdTe hücreleri için liksivant bazlı nitrik asit kullanılmıştır ve parçalanma gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında liksivant Te’yi çöktirmek için elektrolize edilir ve Cd elde etmek için ayrıştırılır. CIS’den Cu, Se, In ve Zn elde etmek için ayrışma ve oksidasyon

gerçekleştirmektedir. %95-98 Te ve %4 Cd geri dönüşümü ve CIS panelleri için ise %16-20 Cd, %94-99 Cu ve %88-90 Se geri kazanımı gerçekleştirilmektedir. (Goozner ve ark. 1997)



Şekil 33: Solda ki CdTe ve Sağda ki CIS için gerçekleşen proses. (Goozner ve ark. 1997)

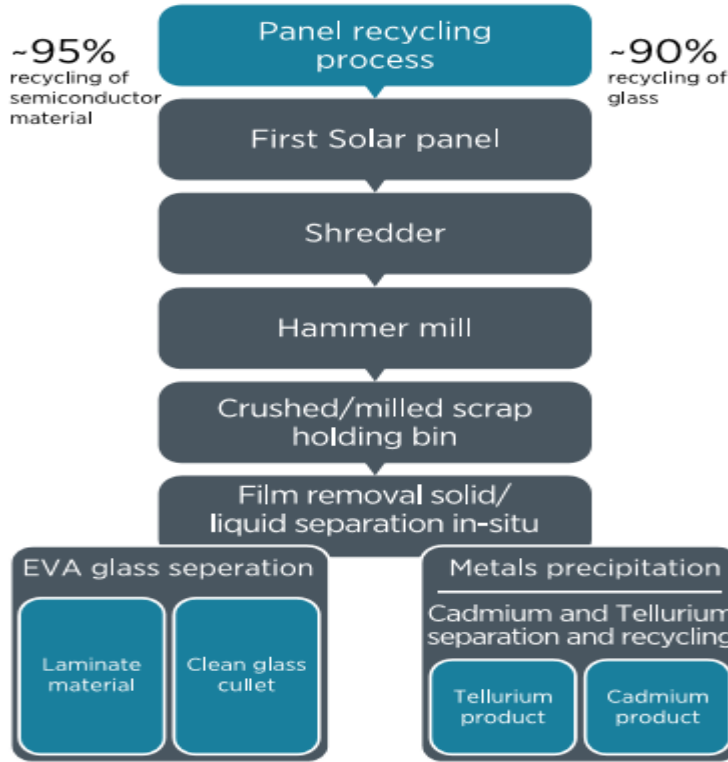
ANTEC solar'a ait patentli geri dönüşüm metodunda mekanik parçalama, 300 °C'de piroliz işlemi ve 400 °C'de iyonların bombardımanı sonucu materyalin kaldırılması ve çöktme işlemleri gerçekleştirilmektedir. (Dominguez ve Geyer 2017)

CIGS panel için, parçalama, asit ile materyal kaldırılması, yüzeyin kaldırılması ve filtrasyon, çöktme ve iki fazlı sıyırma ile birlikte elektrodpozisyon kullanılmaktadır. Bunun sonucunda ise cam, EVA, Se, In ve Ga geri kazanılmaktadır. (Dominguez ve Geyer 2017)

CdTe panellerde, parçalama, asit ile materyal kaldırımı, ayırma, çöktme, durultma, filtrasyon ve elektrokazanım kullanılarak cam, EVA ve Te geri kazanılabilmektedir. (Dominguez ve Geyer 2017)

2011 yılında yine Loser Chemie GmbH'ye ait olan patentli CdTe paneller için yapılmış prosede Hidrojen peroksit çökeltisi altında seyreltik hidroklorik asit işleme kullanılmış ve %92 Te ve %6 Mo geri kazanılmıştır. (Palitzsch ve Loser 2011)

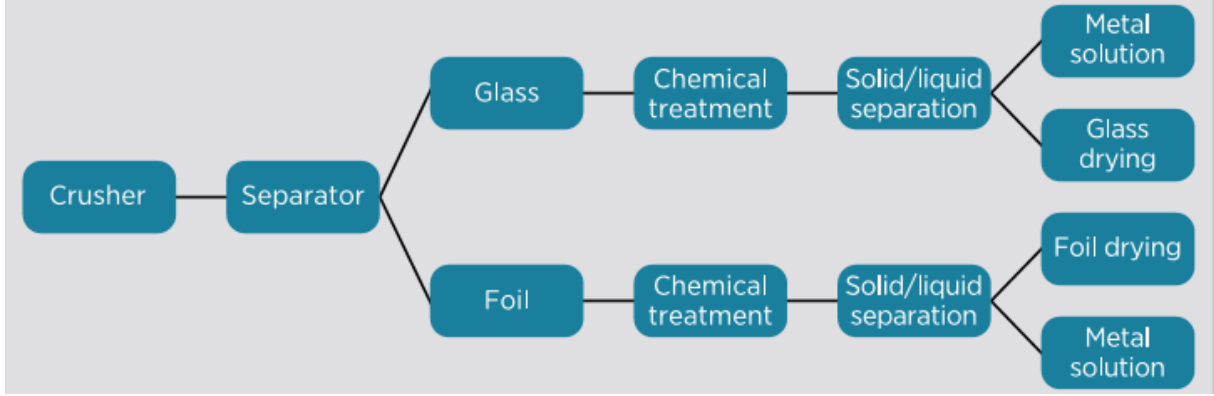
First Solar solar panel üretici CdTe paneller üretmektedir ve ayrıca kendisine ait geri dönüşüm prosesleride bulunmaktadır. Bu sistemde parçalayıcı, kırıcı, tutucu dışında liksivant tabanlı nitrik asit ve hidrojen peroksit oksidant olarak kullanılır. Yarı iletkenler sıvı hale geçer, cam ve kaplama materyalleri katı halde kalır. Sıvı-katı ayırıcı burada kullanılmaktadır. Sıvı materyal çökeltme unitesine gönderilir pH arttırılır ve sodyum hidroksit kullanılır. Sıvısızlaştırma yapılarak yeni panellerde kullanılacak hale getirilmektedir. Birincil materyaller Te ve Cd'dur. %90 cam, %95 yarıiletken materyaller geri kazanılmaktadır. Panelin tamamı ele alındığında ise %90'ı geri kazanılmaktadır. Şekil 34 bu aşamaları göstermektedir. (Monier ve Hestin 2011, Rix ve ark 2015)



Şekil 34:First Solar geri dönüşüm şeması (Weckend ve ark. 2016)

Şekil 35'de gösterilen şema Palitzsch ve Loser tarafından 2014 yılında ki Loser Chemie GmbH'ye ait patentli bir prosedir. Bu prosede parçalama işleminden sonra yarı iletken

metalleri ve ya güneş hücrelerinde kullanılan gümüşü, kimyasal işlem kullanarak proses yapılmaktadır. (Weckend ve ark. 2016)



Şekil 35: Loser Chemie Geri dönüşüm prosesi (Weckend ve ark. 2016)

2.6 Beton İçersinde Atık ve Güneş Panel Atığı Geri Dönüşümü

Dünyanın en eski inşaat malzemelerinden biri betondur. Düşük maliyet, bulunabilirlik, uzun dayanıklılık ve aşırı hava koşullarına karşı durma nedeniyle, dünya genelinde istisnai bir şekilde kullanılmaktadır. (Tantawi 2015) Böylece hızla büyüyen beton kullanımı, doğal kaynaklara olan talebin artmasını sağlarken aynı zamanda kaynakların tükenmesine de yol açmaktadır. Bu nedenle, inşaat endüstrisinin sürdürülebilirliği için, farklı yükleme koşulları altında beton yapıların davranışlarının artırılması ile birlikte bu tür kaynakların eksikliğini telafi edebilecek, yeni, geleneksel olmayan, uygun maliyetli malzemelerin kullanılması gerekmektedir. (Siddique ve ark. 2018)

Çimento matrislerinde atık immobilizasyonu tehlikeli atık arıtma için yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Immobilizasyon, atığın katı bir beton matrisi içinde kapsüllenmesinden ibarettir. Beton yüksek yapısal bütünlüğe sahip olduğundan, atık bileşenlerin sızıntı riskini en aza indirmektedir. Farklı endüstriyel kaynaklardan gelen atıklar betonda immobilize edilebilir: kimyasallar, metaller, tekstil, ahşap parçacıkları ve ya petrol rafine endüstrisindeki atıklar. Sıvılar, atık çamur, bulamaç veya kirli toprak atıkları da betonda immobilize edilebilmektedir. (Danila 2015) Çimento atık formları, radyoaktif, tehlikeli ve karışık atıkların bertarafı için dünya çapında kullanılmaktadır. (Fernandez ve ark 2011)

Beton yapısı, betonda farklı tipte atıkların kullanılmasına izin verir. (İsler 1984) Bu nedenlerden dolayı, daha sürdürülebilir materyaller ve işlemler, kısmi bir kum için cam, silikon ve ya diğer panel tür hücrelerinin değişimi olarak formüle edilmeye çalışılmaktadır. Geri dönüşümlü agregalarla üretilen beton, Geri Dönüşümlü Agreg Beton (RAC) olarak adlandırılmaktadır. (Faella ve ark. 2016)

İnşaat ürünlerinde ikincil ve alternatif agreg kullanımı sürdürülebilir inşaatlara katkıda bulunduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Doğal agregaların bir kısmını değiştirerek, hem taş ocağı hem de atık bertaraf sistemlerine duyulan ihtiyaç, çevresel ve sosyal etkilerin azaltılmış faydaları ile azaltılmaktadır. (Kuruppu ve Chandratilake 2012)

Tablo 12: Alternatif Agreg Tipleri (Kuruppu ve Chandratilake 2012)

Üretilmiş Agregalar	Köpüklü Yüksek Fırın Cürufu (BFS), uçucu kül, üretilen kum, polistiren, genişletilmiş kil, şeyl ve vakanik kül
Geri dönüştürülebilir agregalar	Geri dönüşümlü beton agreg, geri kazanılmış beton ve duvar, geri kazanılmış agreg, geri kazanılmış asfalt kaplama, geri kazanılmış asfalt agreg, cam kırıntıları, hurda lastikleri.
Ürününe göre tekrar kullanılabilir agreg	Hava soğutmalı (BFS), granül BFS, elektrik ark ocağı cürufu, çelik ocağı cürufu, uçucu küller, ocağın alt külü, yakma kabının alt külü, organik maddeler.

Portland çimentosu beton yapımında yaygın olarak kullanılmakta ve atık stabilizasyonu için çok iyi bir bağlayıcı olmaktadır. Beton üretiminde bir çok farklı atık türü kullanılmış ve spesifik atık arıtma için etkin yöntem olarak patenti alınmıştır. İkinci nesil ince film güneş modülleri, çimento matrisleri kullanılarak betona sabitlenebilir. Metaller, çimento yüksek pH'a sahip olduklarından ve çözünmez formlarında tutabildiklerinden etkili bir şekilde immobilize edilebilirler. Betona sızan metaller ile güneş modüllerinin atıkları en aza indirgenebilmektedir. İmmobilizasyon teknolojisi inorganik atıklara daha fazla uygulanır ve organiklerle daha az

faydalı olmaktadır. Organik atıklar, sertleşme ve sertleşme işlemlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. (Danila 2015)

Kadmiyum ve ya bileşiklerini içeren tehlikeli atıklarda, çimento bu ağır metali emebileceğinden beton matrislerinde etkin bir şekilde hareketsiz hale getirilebilmektedir. Cd ve bileşiklerinin mekanik beton özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi yoktur. Bununla birlikte, çimento içersinde bozulma oluşabilir, ancak betonda Cd'un iyi bir şekilde immobilizasyonunu engellemez. (Diez ve ark. 1997)

Silikon panellerin beton içersinde geri dönüşümü hala araştırılmakta olan bir konudur. Fernandez ve arkadaşlarının 2011'de yaptığı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, Silikon hücreler kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan atıklar, yapısını oluşturmada sorunlara neden olabileceğini, ve bunu önlemek için ise çinko kalsiyum silikatların hidrasyonu üzerindeki etkisiyle önemli ölçüde geciktirileceğinden bahsetmiştir. Küçük parçalar haline gelen güneş hücre atıkları güneş modüllerinden beton konstrüksiyona kullanılabilmesi, PV modüllerinden atıkların bertaraf edilmesinin azaltılmasına yardımcı olabileceğini söylemiştir. Küçük parçalar halinde ki silikon güneş hücrelerinin beton karışımına ek olarak kullanılması, betondaki negatif dönüşüm sürecini ortadan kaldırabilmektedir. Bu atıkları beton içinde geri dönüştürmek ve özelliklerini geliştirmek amacıyla kristalimsi güneş hücreleri beton karışımında katkı maddesi olarak kullanarak deneysel bir çalışma yürütmüştür. Oluşan beton örneklerinin %24 normal örnekten daha düşük kuvvette olduğu ve hafif ses geçirmezlik malzemeleri olarak kullanılabileceğini vurgulamıştır. (Fernandez ve ark. 2011)

Fernandez-Carrasco ve arkadaşlarının 2009 yılında yaptığı bir diğer çalışmada ise silikon güneş hücreleri beton içersinde kullanılmıştır ve güneş hücresi kullanılmayan örneğe göre basınç dayanımında %31'lik bir azalma olduğu görülmüştür. (Fernandez-Carrasco ve ark. 2009)

2.7 Camın Beton İçersinde Geri Dönüşümü

Ana kimyasal bileşimlere dayanarak, camlar sodalı kireç camı, alkali silikatlar, vitröz silika, borosilikat cam, kurşun cam, baryum cam ve alüminosilikat cam olarak sınıflandırılabilir. Yaygın olarak kullanılan şişeler, Cam tabakası ve pencere camı üretiminde kullanılan soda kireç camı, toplam atık camın ağırlıkça % 80'ini oluşturmaktadır. (Gerges ve ark. 2018)

Her yıl milyonlarca ton atık cam üretilmektedir. Katı atık yönetimi en büyük çevresel sorunlardan biridir. Ayrıca, doğal kaynakların tükenmesini telafi edebilecek alternatif malzemeler keşfetmeye ihtiyaç vardır.(Siddique ve ark. 2018)

Günümüzde, atılan atık cam, tüm dünyadaki kara topraklarında önemli bir sorun haline gelmiştir. Solar modül cam geri dönüşümü için prosesler vardır. Maalesef, toplanan camın önemli bir kısmı, esas olarak toplama noktalarından yeniden yapılanma tesislerine kadar aşırı nakliye maliyetleri nedeniyle, yeni camlara geri dönüştürülmemektedir. (Corinaldesi ve ark 2016)

Atık cam dünya çapında büyüyen bir sorun olmaktadır. Geri dönüşüm için ideal özelliklerine rağmen, depolama için uygun değildir. Atık camların geri dönüşümü, yalnızca dünyanın doğal kaynaklarını korumaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda depolama alanlarına olan talebi azaltırken, aynı zamanda enerji ve para tasarrufu sağlar. Cam, puzolanik / çimento esaslı bir malzeme olarak kullanılabilir.(Siddique ve ark. 2018)

Kısmen cam parçacıkları ile değiştirilmiş kumlu beton, sıkıştırma ve eğilme dayanımları ve elastik modül gibi yeterli mühendislik özelliklerini göstermiştir. Betonda cam kumu kullanmanın bir diğer faydası ise puzolanik aktivitesidir. İnce cam parçacıkları puzolanik aktivite gösterir, çünkü cam amorf silikadan yapılıdır. Alkali saldırı altında, silika ağlarının imhası, Portlandite'den kalsiyum ile birleşen ve beton özelliklerini artırabilen ikincil C-S-H oluşturan silika salmaktadır. Cam parçacıklar yeterince iyi olursa puzolanik aktif olabilmektedirler. Ayrıca, yeşil camın en çok puzolanik malzeme iken, ardından berrak ve kahverengi cam gelmektedir. (Gerges ve ark. 2018)

Atık camın beton için agrega olarak kullanılması, on yıllar önce denenmiştir. Bu erken çabalar, döneminde iyi anlaşılmayan alkali-silika reaksiyonu (ASR) problemi ile engellenmiştir. ASR betonun çatlamasından anlaşılabilir. Ayrıca cam agreganın betonun mekanik özelliklerini etkilemesi de beklenmiştir. Örneğin, beton dayanımının tipik olarak çimento matrisi ile agrega arasındaki bağ dayanımı tarafından kontrol edildiği bilinmektedir. Nispeten pürüzlü yüzeyleri olan doğal agrega, nispeten pürüzsüz yüzeyleri olan kırılmış cam parçacıkları ile değiştirilirse, mukavemette bir düşüş ve yumuşaklığını kaybetme beklenmektedir. (Meyer ve ark. 2001)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Hücresel zarar görmüş 4 adet polikristal silikon panel bir türk firması olan Teknik Solar üreticisinden ücretli bir şekilde temin edilmiş ve tez içersinde kullanılmıştır.



Şekil 36: Hücresel zarara uğramış Polikristal silikon güneş panelleri

Kullanılan Polikristal silikon güneş panelinin tezde de bahsedildiği gibi temperli cam, EVA, hücre, EVA ve arka koruyucu olmak üzere tabakalardan oluşmaktadır. Ayrıca kablo ve plastik elektrik kutusunda bulunmaktadır. EVA'lar ve arka koruyucular 150 °C'de 12 dakika ısıtılarak hücrelere koruma sağlanmaktadır. Polikristal silikon güneş paneli birleşimi yüzdesel olarak aşağıda ki tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 13: Tipik Silikon tabanlı PV modülünün yapısı (Dias ve ark. 2018)

Materyal	İçerik %	Amacı
Silikon	2-3	Fotovoltaik efekt
Cam	69-75	Modül Koruma
Polimerler(EVA, Tedlar)	7	Modül Koruma
Bakır	0.6-1	Akım iletkeni
Gümüş	0.006-0.06	Akım iletkeni

Aliminyum	10-20	Modül çerçeve
Boron	<0.1	P-doping
Fosfor	<0.1	n-doping
Kalaydioksit	<0.1	Yansıtma kaplama
Kurşun	<0.1	Bakır kaplama
Kalay	<0.1	Bakır kaplama

Panel üzerinde ki Temperli cam elde edebilmek için bir kaç yol bulunmaktadır. Bunlardan bazıları parçalama ve kırma, yüksek derece yakma ve ya Asitle çözmedir. Ancak, bu çalışmada parçalama yöntemi kullanılmıştır. Parçalama ve kırma işlemine geçilmeden önce panel üzerinde ki Aliminyum çerçeve, elektrik kutusu ve kablosu kaldırılmış ve gerektiği gibi geri dönüşüme gönderilmiştir. Parçalama ve kırma ile cam fiziksel olarak panelden ayrılmış ve gerektiği gibi atık haline getirilmiştir. Bu çalışma yurt dışında gerçekleştirildiğinden türk standartları kullanılmamıştır.

Temperli camın Yoğunluğu 2500 kg/m³ olarak bilinmektedir(Anonim) ve hesaplamalarda bu şekilde kullanılmıştır. 0/4 mm'lik kum partikülleri EN 12620 Avrupa Standardı şartlarına uygun ince bir agrega olarak uygulanmıştır.

Tablo 14: Kullanılan Çimentonun özellikleri

İçerik	Değer [%]
Tricalcium silicate (C ₃ S)	57.9
Dicalcium silicate (C ₂ S)	15.6
Tricalcium aluminate (C ₃ A)	7.5
Tetracalciumaluminoferrite (C ₄ AF)	11.9
Al ₂ O ₃	5.23
Fe ₂ O ₃	3.44
SiO ₂	20.63
CaO	63.56
MgO	3.13
SO ₃	0.78
K ₂ O	1.15
Na ₂ O	0.10
Cl ⁻	0.007
CaO _{free}	1.4

Mineral katkı maddesi içermeyen Portland çimentosu, EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R kalite kontrolüne göre yapılmıştır. Çimentonun mineral ve kimyasal bileşimi Tablo 15'de sunulmaktadır.

Tablo 15: Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Değer
2 günlük basınç kuvveti,[MPa]	28±2
28 günlük basınç kuvveti, [MPa]	55±3
Başlangıç ayar süresi, [min]	180
Bitiş ayar süresi, [min]	225
Hacim sabitliği, [mm]	1.0
Su tüketimi, [%]	26.6
90µm elek üzerinde kalıntı, [%]	1.5
Özel yüzey, [cm ² /g]	4000

3.2 Kırılmış Hale Getirilen Polikristal Silikon Panel Temperli Cam Atığının ve Kumun Partikül Boyutunun Belirlenmesi

Polikristal silikon panel cam atığı ve tortusu kum yerine kullanılacağından bu test önem arz etmektedir. Partiküller 4 mm'den daha düşük olması ince taneli kum yerine kullanılacağı anlamına gelmektedir. EN 933-1 standart testi kullanılmıştır. Ayrıca, güneş modülü parçacıklarının boyutunun belirlenmesi için sarsma ile eleme yöntemi uygulanmıştır.

Tartılan örnekler en üstteki en büyük gözeneğe sahip olan eleğe dökülür, her bir elek diğerinden daha düşük gözeneklere sahiptir. En dipte ise en küçük taneleri tutan kap

bulunmaktadır. Eleme kapları olarak 8 mm, 5,6 mm, 4 mm, 2mm, 0.5 mm, 0.125mm'dir. Dikey olarak bulunan elekler mekanik olarak sarsılır. Her bir elekte kalan cam parçaları tartılır ve kaydedilir. Her bir elekte ki ağırlık toplam ağırlığa bölünür ve yüzdesi alınır.

Denklem aşağıda görülmektedir.

$$\% R = \frac{W_{\text{sieve}}}{W_{\text{Total}}} \times 100 \% \quad 1$$

Bu denklemde R kalan, W_{sieve} elekte kalan ağırlığı ölçülmüş agrega ve W_{total} ise toplam agrega ağırlığıdır. Diğer adımda ise her elekte kalan agrega toplamının yüzdesi bulunmuştur.

$$\% \text{Cumulative Passing} = 100\% - \% \text{Cumulative Retained} \quad 2$$

Kümülatif geçen, Cumulative retained ise yüzedesel kümülatif kalandır. Her elekte toplam kalanı bilmek R'yi hem kum hem de cam için hesaplamamıza yardımcı olacaktır.

$$M_s = (R_{\text{pan}} + R_{0.125} + R_{0.5} + R_1 + R_2 + R_4 + R_{5.6} + R_8) / 100 \quad 3$$

M_s incelik modülü yani tane boyutudur. Hangi Elek aralığında parça büyüklüğünün kaldığını gösterecektir. R_{pan} + R_{0.125} + R_{0.5} + R₁ + R₂ + R₄ + R_{5.6} + R₈ ise elekte toplam kalan agregadır.

3.3 Gevşek Yığın Kütle Yoğunluğu

Cam ve kumun kütle yoğunluğunu belirleyebilmek için 1 litre hacimli temiz bir kaba 5 cm yükseklikten kabın içersine boşaltılmıştır. Tepede kalan fazla kısım ise cetvel yardımıyla düz hale getirilmiş ve tartılmıştır.

$$P_{s, \text{avg.}} = \frac{m_1 - m}{V}, \text{ g/cm}^3 \quad 4$$

M konteynır ağırlığı ve g cinsindedir. M₁ ise kabın cam ve ya kum ile birlikte ki ağırlığıdır. V kabın hacmi, cm³ cinsinden ve P_{s, avg.} ise kütle yoğunluğunu göstermektedir.

3.4 Solar Panel Cam Atıklarından Elde Edilecek Harç Karışımı

EN 196-1:2016 standart testine göre örnekler 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında olmak zorundadır. Harç yapabilmek için belirli elementlere ihtiyaç vardır. Bunlar, kum, su, portland çimentosu ve elimizde ki güneş paneli temperli cam atıklarıdır. Bu çalışmada çakıl kullanılmamıştır.

Tablo 16: Çimento Karışım oranları kg cinsinden

Cam Oranı	Harç Bileşimi					S/Ç
	Çimento İçeriği kg/m ³	Kum İçeriği kg/m ³	Atık Modül İçeriği kg/m ³	Su içeriği kg/m ³	Akışkanlaştırıcı İçeriği kg/m ³	
%0	350	1760	0	226.66	3.5	0.647
%5	350	1672	88	226.66	3.5	0.647
%10	350	1584	176	226.66	3.5	0.647
%15	350	1496	264	226.66	3.5	0.647
%20	350	1408	352	226.66	3.5	0.647
%25	350	1320	440	226.66	3.5	0.647

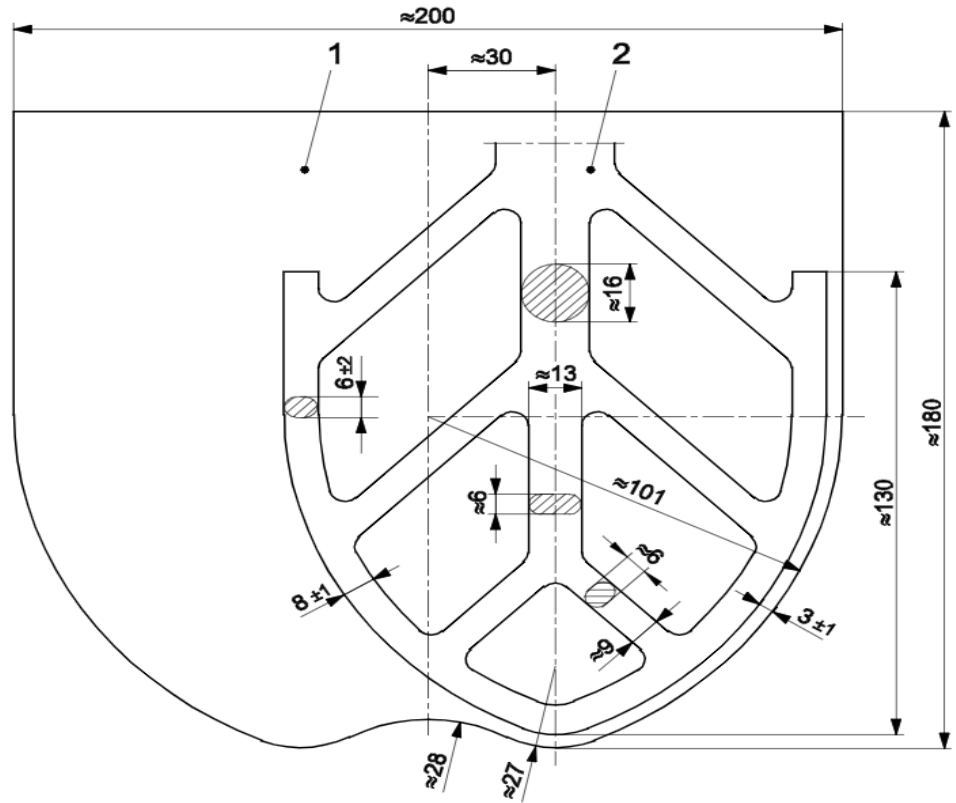
Tablo 17: 1.5L karışım için yapılan hesaplama kg cinsinden

Cam Oranı	Harç Bileşimi					S/Ç
	Çimento İçeriği kg/m ³	Kum İçeriği kg/m ³	Atık Modül İçeriği kg/m ³	Su içeriği kg/m ³	Akışkanlaştırıcı İçeriği kg/m ³	
%0	0.525	2.64	0	0.340	0.0052	0.647
%5	0.525	2.505	0.135	0.340	0.0052	0.647
%10	0.525	2.376	0.264	0.340	0.0052	0.647
%15	0.525	2.244	0.396	0.340	0.0052	0.647
%20	0.525	2.112	0.528	0.340	0.0052	0.647
%25	0.525	1.98	0.660	0.340	0.0052	0.647

Tablo 16 ve 17'ya göre 6 adet belirli yüzdeler için prizmalar üretilmiştir. Bunların bir tanesinin toplam hacmi 256 cm^3 'dür ve 6 adet bulunduğundan dolayı yaklaşık 1.5l denk gelmektedir. Bu yüzden 1.5l hesaplanarak kullanılmıştır.

Numuneler %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 kum yerine cam kullanılarak hazırlanmıştır. %0 ise kontrol amaçlıdır.

Harç hazırlanmadan önce, ilk olarak mikser harç karışımı olan su, çimento ve kum ile karıştırılır daha sonrasında cam eklenir. 1 dakika su eklmeden önce ve 2 dakika su eklendikten sonra karıştırılır yani karışım 3 dakika boyunca karıştırılır. (Özer 2012)



Key

- 1 bowl
- 2 blade

Şekil 37: Tipik bir Mikser ve kabı



Şekil 38: Kullanılan mikser

3.5 Taze Harç Kıvamının Yayılma Tablasına Göre Belirlenmesi

EN 1015-3 standart metoduna uygun şekilde yapılmıştır. Taze harçın tutarlılığı, taze harçın akışkanlığı ve / veya ıslaklığının ve belirli bir stres altındayken taze harçın deforme olabilirliliğinin bir ölçüsüdür. Minimum 1.5l harçlar için kullanılmaktadır.

Tablo 18: Kullanılan aparatlar

Yayılma Tablası
Kesik konik kalıp
Demir cubuk
Kumpas- cetvel
Mala
Palet bıçağı

Hazırlanan harç karışımı konik kalıbın içersine 2 tabaka olarak konur ve her bir tabaka 15 defa demir çucuk ile kısa vuruşlar yapılır. Bu Tabakaların uniform olarak yayılmasını sağlar.

Palet bacağı ile üstte ki fazla olan harç karışımı alınır ve yavaşca alttaki kesik konik kaldırılır. Daha sonrasında ise yayılma tablasının altına oluşturulan darbelerle yayılması gözlemlenir. Bu darbeler 15 defa arka arkaya tekrarlanmak zorundadır.

Burada yayılma değeri cetvel yardımı yan ve üstten 2 defa ölçülerek bulunur ve ortalama çap alınır ardından ise kaydedilir. Ayrıca Sapma değeri %10'dan büyük olmamalıdır.



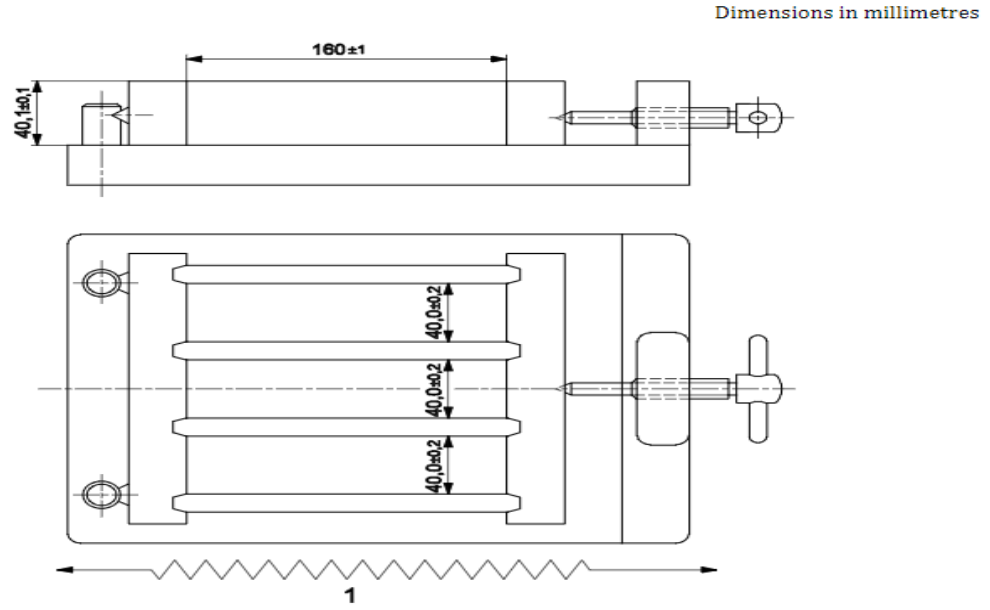
Şekil 39: Kullanılan yayılma tablası

3.6 Harç Prizmatik Kalıplarının Hazırlanması

EN 1015-11 standart testi kullanılmıştır. Kalıplar 3 adet yatay bölmeye sahiptir. 3 adet prizmatik 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında bulunmaktadır ve hacmi 256 cm³'dür. İlk olarak, kalıpların içi iyice temizlenir ve özel yağı sürülür. Böylece harç karışımını koymaya hazır hale gelmiş olmaktadır. Daha sonra harç karışımı koyularak, sıkıştırma işlemi için kalıplar titreşim tablasına yerleştirilir ve harçtan hava kabarcıkları çıkana kadar çalkalanır.



Şekil 40: Kullanılan Kalıplar



Key
1 striking off direction with sawing motion

Şekil 41: Kalıbın boyutlarını gösterir şekil

İşlemi bitmiş harç prizmatik kalıplar EN 1015-11'e göre polietilen torbalarla kapatılır ve 1 gün bekletilir ve kalıplarından sonrasında çıkartılmaktadır.



Şekil 42: Sıkıştırma sonrası kalıplar ve polietilen torba

3.7 Örneklerin Yoğunluğunun Hesaplanması

Kalıplardan çıkarıldıktan sonra 7 gün boyunca su da şartleşen örnekler EN 196-1 standart testine göre yapılmıştır.

Her bir örneğin hacminin hesaplanması için boyutları hesaplanmış ve hacmi bulunmuştur. Daha sonrasında ağırlığı tartılarak kaydedilmiştir.

$$D = \frac{m}{V}, \frac{kg}{m^3} \quad 5$$

Burada m harcın ağırlığı (kg) ve V ise harcın hacmidir (m³).



Şekil 43: Deneyde Kullanılan tartı

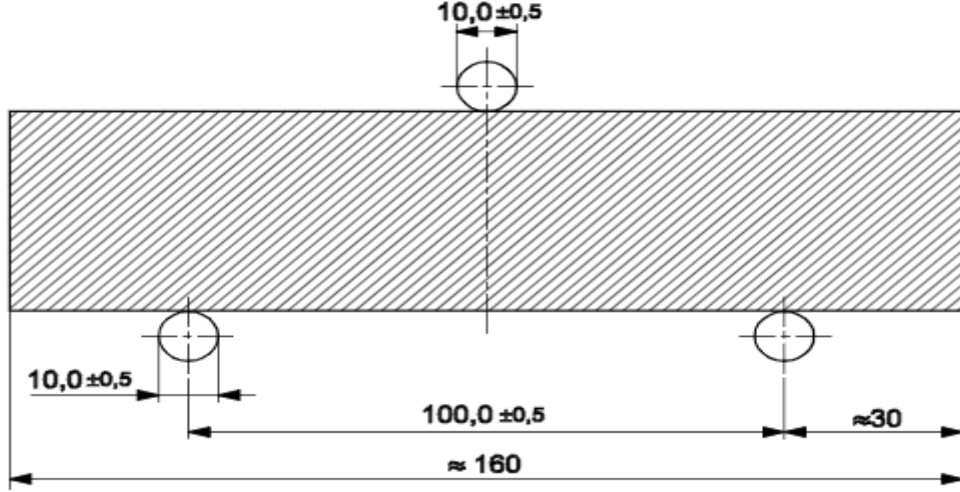
3.8 Harç Örneklerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Hesaplanması

EN 1015-11 standart testi kullanılmıştır. Eğilme direnci aşağıda ki formülde verilmiştir.

$$f = 1.5 \frac{Fl}{bd^2}$$

6

Burada F Maksimum yük Newton cinsinden, l basınç uygulayan cismin uzunluğu (mm), b örneğin genişliği (mm) ve d ise örneğin derinliğini (mm) göstermektedir.



Şekil 44: Eğilme basınçını gösterir şekil

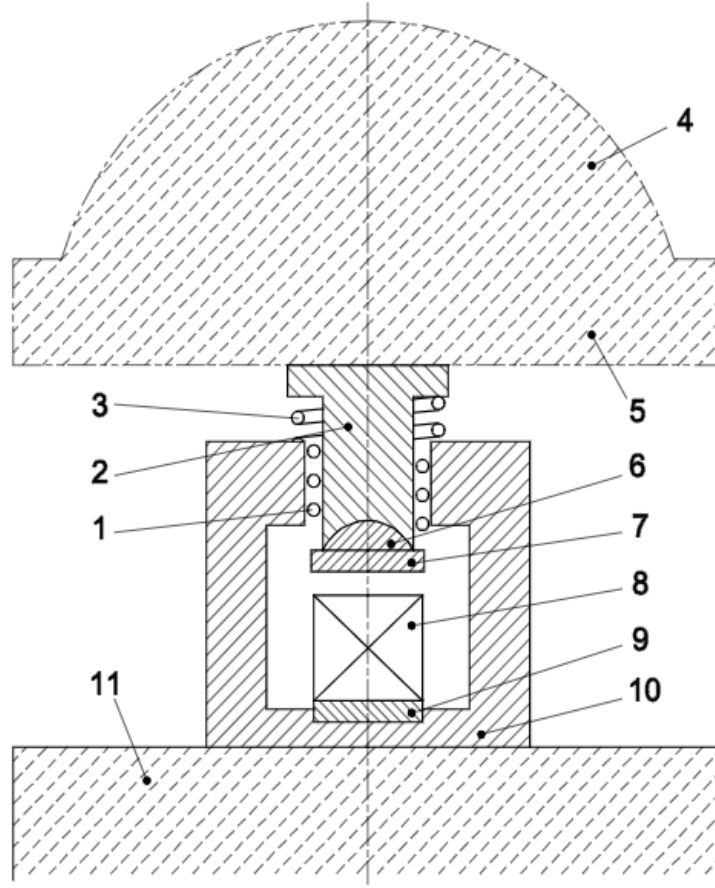


Şekil 45: Eğilme basınç ile kırılan örnekler

Basınç dayanım mukavemetinin hesaplanması, numunenin maksimum yükünün kesit alanı ile bölünmesi ile bulunmaktadır.



Şekil 46: VGTU’da bulunan basınç ve eğilme testinin yapıldığı makine



Şekil 47: Basınç dayanımını gösteren şekil

Bu testler için numunlerin yarısı kullanılmıştır.

3.9 Harç Örneklerinde Suyun Emilimi, Toplam Boşluk, Kılcal Boşluğunun Hesaplanması

Harcın su emilimi GOST 12730.3-78 Rus standart metodu ile belirlenmiştir. Beton parçalar iki parçaya bölünür ve 24 saat boyunca fırında kurutulur. Sonra tartılır. Betonun ilk su emme özelliği, beton kütleindeki artışın ölçülmesine göre test edilir. Harç suya maruz kaldığında zamanın bir fonksiyonu olarak suyun emilimi ile sonuçlanmaktadır.

Daha sonra ise, örnekler suya yerleştirilmiş ve 15, 30, 60, 120, 240 ve 7200 dakikalarında tartılarak veriler kaydedilmiştir.

$$W = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \cdot 100, \%$$

7

W_1 , kuru harç numunenin kütlesidir (kg), W_2 , belirli bir süre suda bekletildikten sonra ıslak harç numunesinin kütlesidir (kg).



Şekil 48: Su da bekletilen örnekler

Daha sonrasında ise ağırlıkları suyun içersinde tek tek ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu bizim toplam açıklığı bulmamıza yardımcı olacaktır. Ayrıca GOST 12730.4-78. Rus standart testi kullanılmıştır.

$$Pt = \frac{\rho_m - \rho_0}{\rho_0} * 100 \%$$

8

Burada, ρ_m bir örnek bloğunun ortalama yoğunluğudur. ρ_0 ise kuru cimentonun yoğunluğudur. P_t ise toplam boşluğu temsil eder.

$$P_0 = \frac{W_m \cdot \rho_m}{\rho_w}$$

9

W_m , Harç bloğun kütleli olarak emdiği sudur. P_m , bir örnek bloğunun ortalama yoğunluğudur. P_w ise suyun yoğunluğudur. P_o ise kılcal gözenegi temsil etmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

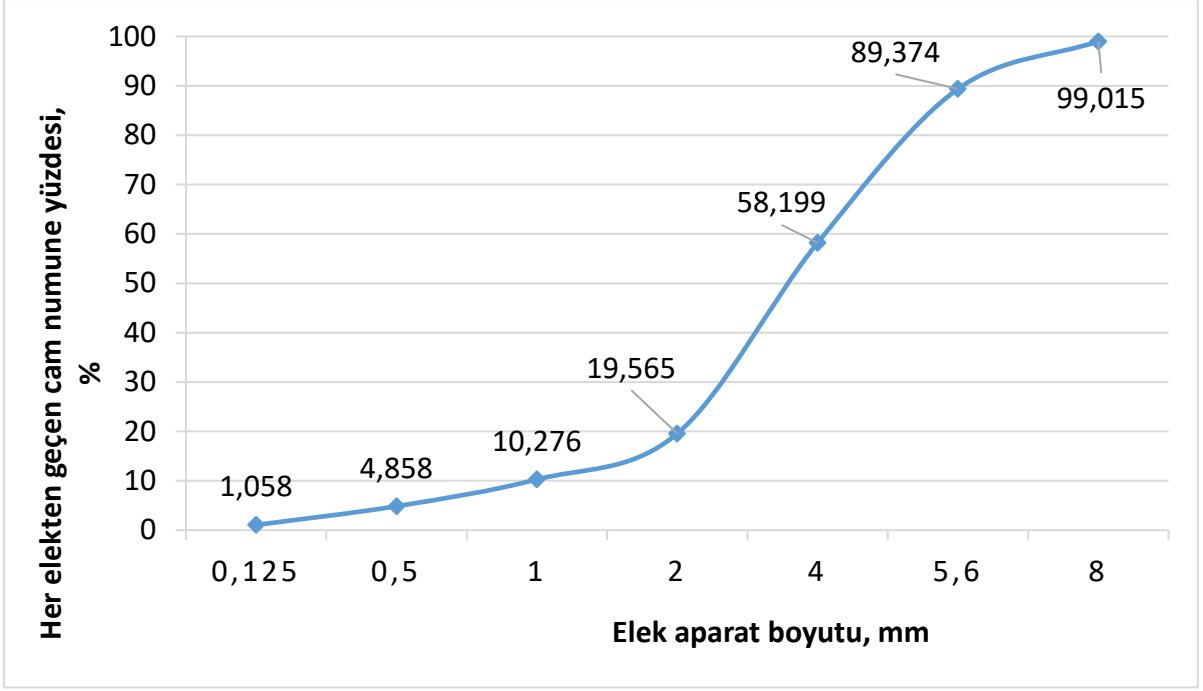
4.1 Eleme sonrası partikül büyüklüğü dağılımının analizi

En önemli deney parametrelerinden biri elekte ki partikül büyüklüğü dağılımının analizidir. Deneyde cam parçaları kum yerine kullanılacağından dolayı parça boyutları 4 mm'den küçük olması beklenmiştir. Tablo 19'da verilen verilerde elek boyutu, kalan ağırlık, her elekte kalan kütlenin yüzdesi ve Her elekten geçen Örneklerin Kümülatif Yüzdesi görülebilmektedir. Bu methodda kullanılan elek boyutları 8, 5.6, 4, 2, 1, 0.5 ve 0.125 mm'dir.

Tablo 19: Cam için Elek ile partikül dağılım analizi

Elek Boyutu, mm	Kalan ağırlık, g	Her elekte kalan kütlenin yüzdesel oranı, %	Her elekten geçen Örneklerin Kümülatif Yüzdesi, %
8	28	0,98	99,015
5.6	274	9,64	89,374
4	886	31,18	58,199
2	1098	38,63	19,565
1	264	9,29	10,276
0.5	154	5,42	4,858
0.125	108	3,8	1,058
Tepsi	30	1,06	0,003

Bu sonuçlar ile tane boyutları hakkında genel bir bilgi edinmemize yardımcı olmuştur. İncelik modülü, elek üstünde kalan her bir elek yüzdesinin toplamının 100'e bölünmesi ile bulunmaktadır. Burada camın incelik modülü 4,17 ve kumun ise 1,85 olarak bulunmuştur.



Şekil 49: Cam Partikül dağılımı

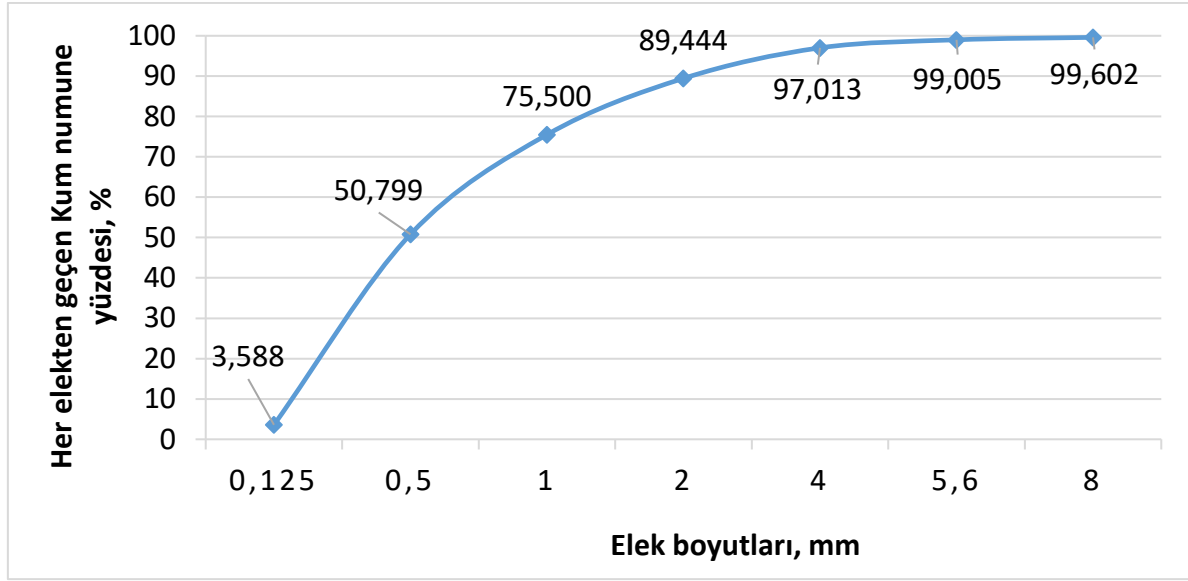
Şekil 49, 5,6 mm ile 4 mm ve 4 mm ile 2 mm arasında en büyük parçacık yüzdesini göstermektedir.

Kum partikülleri için yapılmış tablo 20 aşağıda görülebilmektedir.

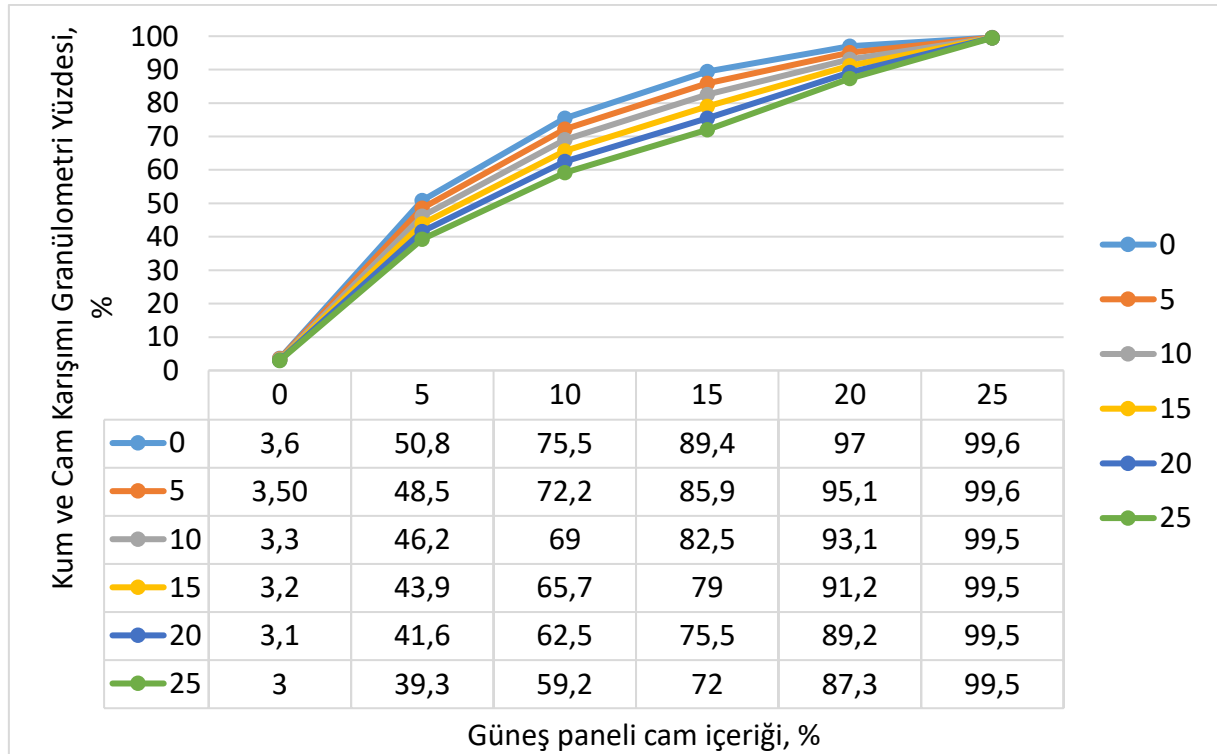
Tablo 20: Kum için Elek ile partikül dağılım analizi

Elek Boyutu, mm	Kalan ağırlık, g	Her elekte kalan kütlelerin yüzdesel oranı, %	Her elekten geçen Örneklerin Kümülatif Yüzdesi, %
8	4	0,398	99,602
5.6	6	0,597	99,005
4	20	1,992	97,013
2	76	7,569	89,444
1	140	13,944	75,5
0.5	248	24,701	50,799
0.125	474	47,211	3,588
Tepsi	34	3,38	0,208

Şekil 50’de verilen grafikte gösterilen kum tane dağılımına göre 0.125 mm ve 0.5 mm arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 50: Kum partikül dağılımı



Şekil 51: Kum ve Camın ortak karıştırıldığında boyut karışımlarının yüzdesi

Verilen Şekil 51’den de anlaşılacağı üzere kum ve cam partiküllerinin belli yüzdelerde değiştirildikten sonra ki ortalama partikül miktarları verilmiştir.

4.2 Gevşek Yığın Kütle Yoğunluğu analizi

Kütle yoğunluğunun belirlenmesi, kuru kumun standart hacimde üç kez tartılmasıyla başlar. Bu yöntemle, Cam ve kum kütle yoğunluğu hesaplanmıştır.

Tablo 21: Camın kütle yoğunluğunun hesaplanması

Camın Kütle yoğunluğu için adımlar	Notlar	Örnekler		
		1	2	3
Konteynırın kütlesi	m, g	0,20	0,20	0,20
Konteynırın cam ile kütlesi	m 1, g	1530	1504	1502
Konteynırın hacmi	V, cm ³	11	11	11
Camın kütle yoğunluğu	$\rho_{g.bulk} = \frac{m_1 - m}{v}, g/cm^3$	1,330	1,304	1,302
Ortalama	ρ glass average, g/cm ³	1,312		

Tablo 22: Kumun kütle yoğunluğunun hesaplanması

Camın Kütle yoğunluğu için adımlar	Notlar	Samples		
		1	2	3
Konteynırın kütlesi	m, g	0,20	0,20	0,20
Konteynırın kum ile kütlesi	m 1, g	1638	1630	1638
Konteynırın hacmi	V, cm ³	11	11	11
Kumun kütle yoğunluğu	$\rho_{g.bulk} = \frac{m_1 - m}{v}, g/cm^3$	1,438	1,430	1,438
Ortalama	ρ sand average, g/cm ³	1,435		

Tablo 21 ve 22’de verilen sonuçlara göre, ortalama kütleye yoğunluğu camın 1.312 g / cm³ ve kum kütleye yoğunluğunun 1.435 g / cm³ olduğu görülmektedir.

4.3 Taze Harç Numunesi Kıvamının Yayılma Tablasına Göre Sonuçları

Bu testin sonuçları EN 1015-3 standart testine uygun olarak hesaplanmıştır. Burada her iki taraftan ölçülen numunelerin değerleri alınarak standart sapmaları hesaplanmıştır. Standart sapmalar %10 dan az olmak zorunda iken fazla çıktığında ise testin tekrarlanması gerekmektedir. Böylece harçın kıvamı hakkında bilgi sahibi olunmaktadır.



Şekil 52: Numunenin yayılması ve kanama

Su kasma karışım suyunun bir kısmının harçın bazı bölgelerinde lokal olarak birikmesi olayıdır. Şekil 52’de görüldüğü üzere örneklerde kanama oluşumu gözlemlenmiştir. Bu olay ise harç prizmatik numunelerinin dayanımını düşürecektir.

Tablo 23: Yayılma tablasından elde edilen sonuçlar

EN 1015-3 Taze harç kıvamının belirlenmesi				
Cam İçeriği (%)	Ölçümler (mm)		%10 standart sapma sınırı	Ortalama Sonuçlar (mm)
	a	b		
%0	140	140	0	140
%5	140	150	4,9	145
%10	130	130	0	130
%15	125	125	0	125
%20	120	125	2,9	122,5
%25	135	135	0	135

Tablo 23’de ki sonuçlara göre yayılmalar %10 standart sapmadan az gerçekleşmiştir. Yapılan testin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

4.4 Sertleşmiş Harç Örneklerinden Elde Edilen Sonuçlar

Harç prizmatik numunelerin yoğunluğu 7 gün suda iyileştirmeden sonra ve bunun öncesinde hesaplanmıştır ve İyileştirme ile beraber, harç numunenin yoğunluğu ve basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

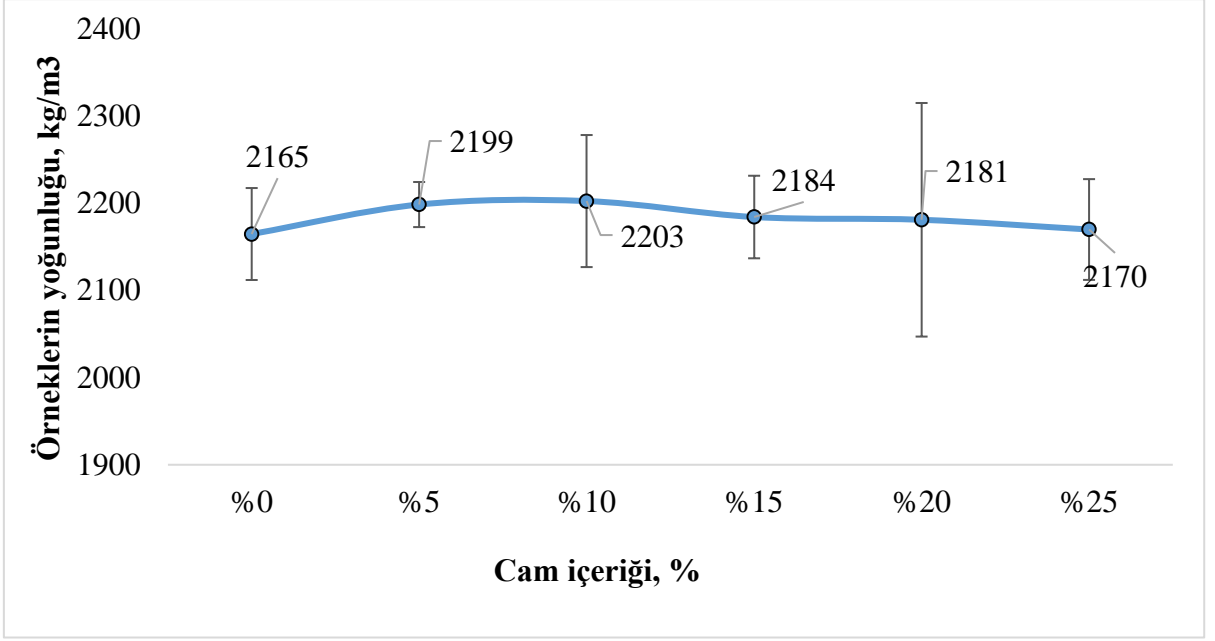
Yapısal uygulamalar için betonun normal yoğunluğu 2,200 ila 2,600 kg / m³ arasında değişmektedir. (İffat 2015) Normal ağırlıklı beton yoğunluğu olarak belirtilen ve aralığın altındaki aralığa hafif beton denmektedir (Raheem 2013) ve basınç dayanımı 15 MPa'ya eşit veya daha fazla olmalıdır. (Rumsys ve ark 2017). Hafif betonların elde edilmesi için kullanılan malzeme ve yönteme bağlı olarak, hafif beton yoğunluğu 300-1850 kg/m³ arasında değişmekte ve bu yoğunluk değerlerine karşılık gelen dayanım değerleri ise, genellikle 0,3-70 MPa ve bazen de 90 MPa değerlerine ulaşabilmektedir. (Uğur 2003)

Tablo 24: 1 haftalık Kür öncesi numuneleri ağırlıkları

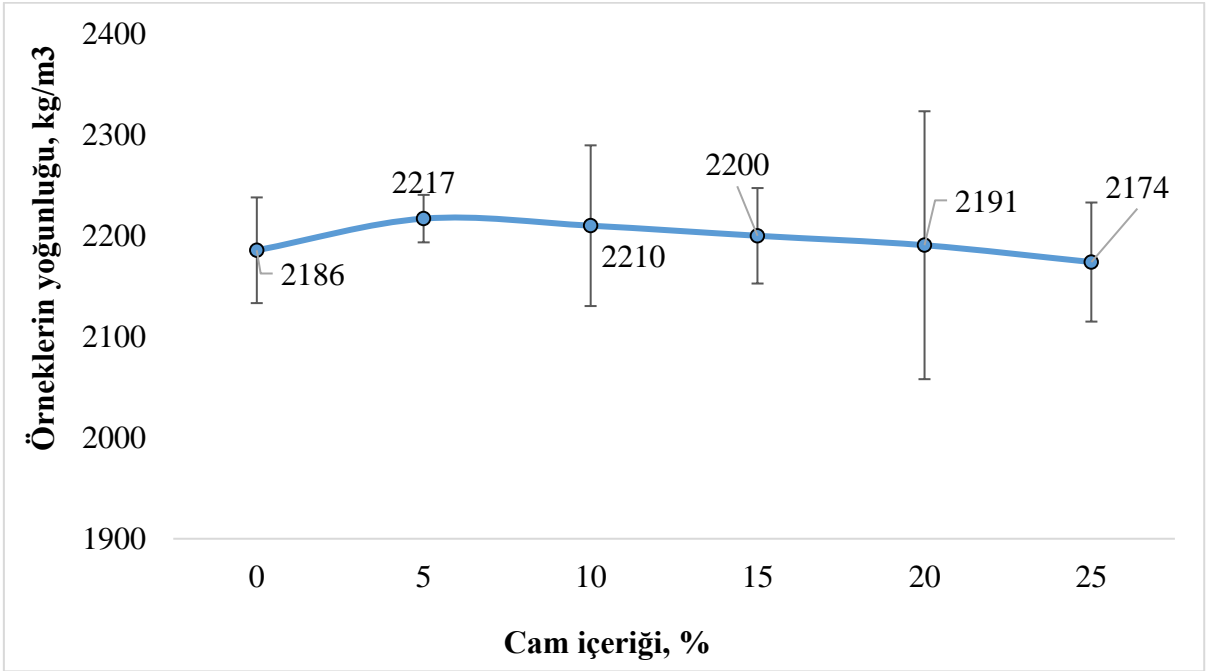
1 haftalık Kür öncesi numuneleri ağırlıkları, gram						
	Kontrol N.	%5	%10	%15	%20	%25
	554	566	578	566	598	570
	562	570	590	570	590	568
	558	558	574	558	580	566
	558	570	540	564	530	540
	566	560	550	562	522	554
	528	554	552	536	531	536
Ortalama Değer	554(±13,53)	563(±6.66)	564(±19.43)	559(±12.11)	559(±34.40)	556(±14.83)

Tablo 25: 1 haftalık Kür sonrası numuneleri ağırlıkları

1 haftalık Kür sonrası numuneleri ağırlıkları, gram						
	Kontrol N.	%5	%10	%15	%20	%25
	560	570	582	570	600	572
	568	574	592	574	592	568
	562	562	576	562	582	568
	562	574	544	568	534	542
	572	566	544	566	524	554
	534	560	557	540	534	536
Ortalama Değer	560(±13.35)	568(±5.99)	566(±20.40)	563(±12.11)	561(±33.91)	557(±15,11)



Şekil 53: iyileştirme öncesi yoğunluk

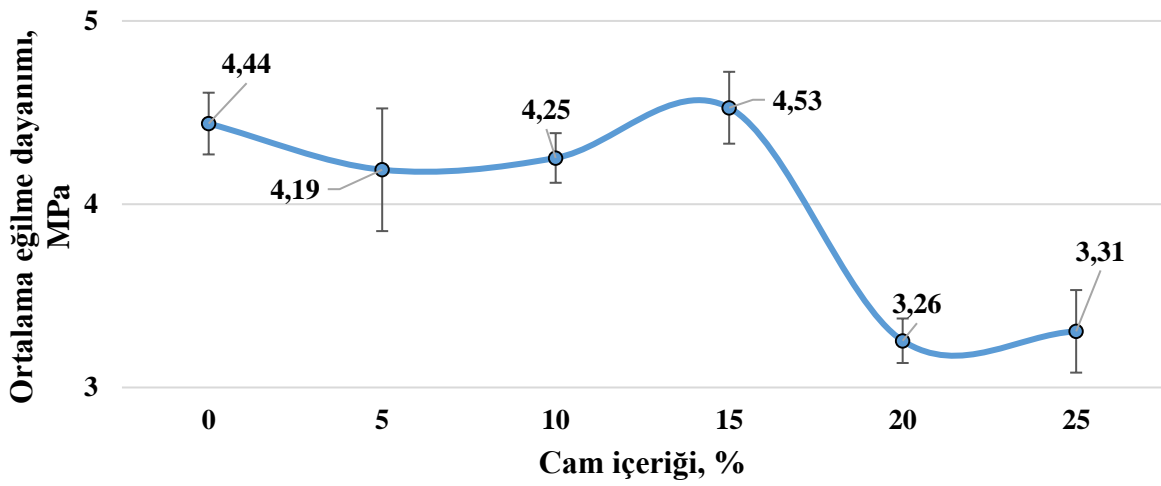


Şekil 54: iyileştirme sonrası yoğunluk

Şekil 53 ve 54’de ki yoğunluk sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre elde edilen betonlar hafif sınıfta sınıflandırılabilir. %5 cam içeriğinden sonra yoğunluklarda azalma

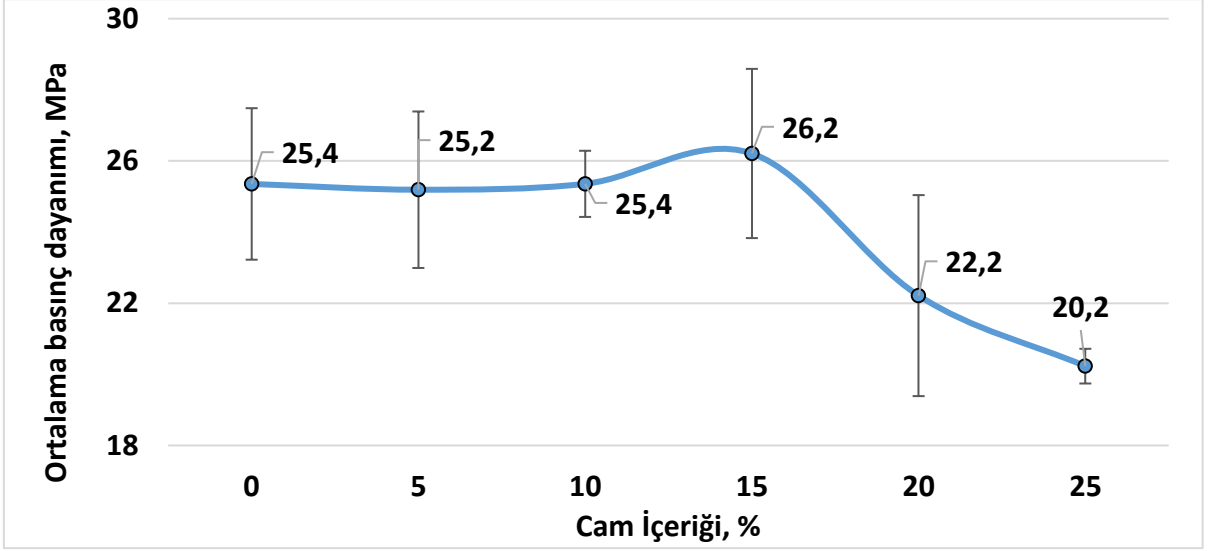
gözlemlenmiştir. Atık miktarının% 5'in üzerine çıkarılması, harç parçaları arasında ki yapışmanın azalması nedeniyle beton yoğunluğunun azalmasına sebebiyet verebilmektedir. (Danila, 2015) Harcın içinde bulunan güneş modülü atıklarının daha fazla artmasının, beton yoğunluğunun daha da artmasına etkisi olmadığı sonucuna varılabilir.

Solar modül cam atık parçalarının artmasıyla birlikte taze harç yoğunluğunun da biraz arttığı gözlenmektedir. Kumun yoğunluğu (1600 - 1900 kg / m³), güneş modülünün ana bileşeni olan 2500 - 2600 kg / m³ olan cam yoğunluğundan daha düşüktür ve bu durum yoğunluğun hafifçe artmasına neden olabilmektedir. (Danila, 2015)



Şekil 55: Eğilme dayanımı

Numunelerin ortalama Eğilme dayanımı şekil 55’de verilmiştir. Ayrıca bükülme dayanımı olarak da adlandırılmaktadır. En yüksek eğilme dayanımı, kum yerine, % 15 solar modül cam atık değişimi olan örnekte gözlemlenmiştir. Bu değer 4.53 Mpa ve kontrol örneğinden % 1.93 daha sağlam olduğunu göstermektedir. %5, %10, %20 ve %25 güneş paneli temperli cam değişimi olan numunelerde sırası ile %5.7, %4.2, %26.7 ve %25.6’lık bir basınç dayanımı azalması görülmüştür.



Şekil 56: Basınç Dayanımı

Numunelerin ortalama basınç dayanımı Şekil 56’de verilmiştir. % 15’e kadar basınç dayanımında fazla bir değişme olmamış iken, %15’de daha fazla artış olmuş ve % 15’den sonra ise hızlı bir şekilde azalmıştır. En yüksek basınç dayanımı % 15 güneş paneli cam atığı ile değiştirilmiş olan numunede bulunmaktadır. Bu basınç dayanımı 26.2 Mpa’dır ve kontrol örneğinden % 3.14 daha kuvvetlidir. %5, %20 ve %25 temperli cam içeriği bulunan numuneler kontrol numunesi ile kıyaslandığında sırası ile %0.78, % 12.6 ve %20.48 dayanımları azalmıştır.

Basınç dayanımı camın büyük partiküllerden oluşmasından ve yüzeyinde ki pürüzlülüğün az olmasından dolayı daha zayıf bir bağlanma gerçekleştirmektedir. Halbuki, yüzeyde ki pürüzlülük daha kuvvetli bağ oluşturacağından daha fazla dayanım elde edilmesi mümkün olabilmektedir. (Gerges ve ark. 2018)

Harcın basınç dayanımını etkileyen bir kaç faktör bulunmaktadır. Bunlar, Çimento ile ilgili, su miktarı ve harcın kompasitesi ile alakalı olabilmektedir. (Türkel 2002)

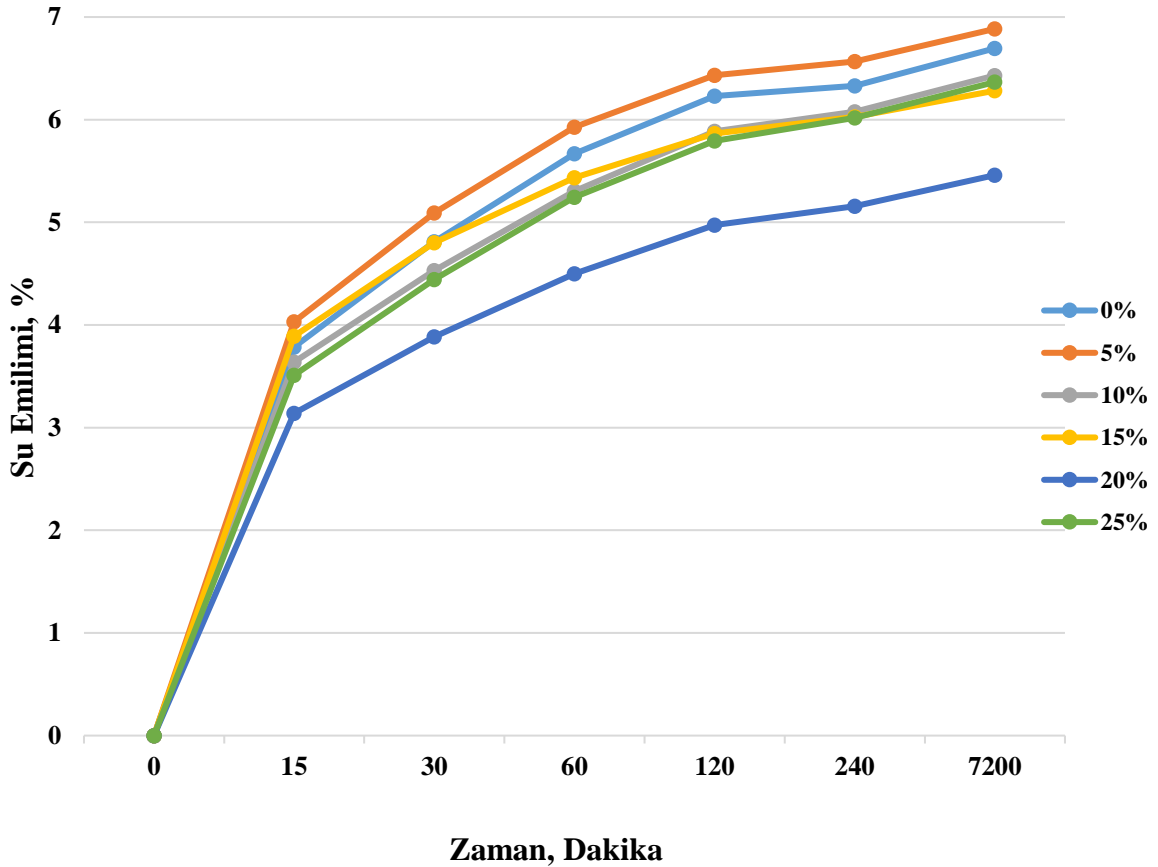
Basınç ve eğilme testlerinde belli bir yüzdeden sonra olan düşüşün açıklaması şu şekilde yapılabilir. Belirli bir orandan fazla cam atığının ortamda olması bağlanmada problemler yaratacağından basınç ve eğilme dayanımını düşürebilmektedir.

Ayrıca, Nadeem ve Pofale’nin 2012’de ve Danila’nın 2015’de yapmış olduğu çalışmalarda belli bir yüzdeden sonra basınç testlerinde azalma olduğu görülmüştür.

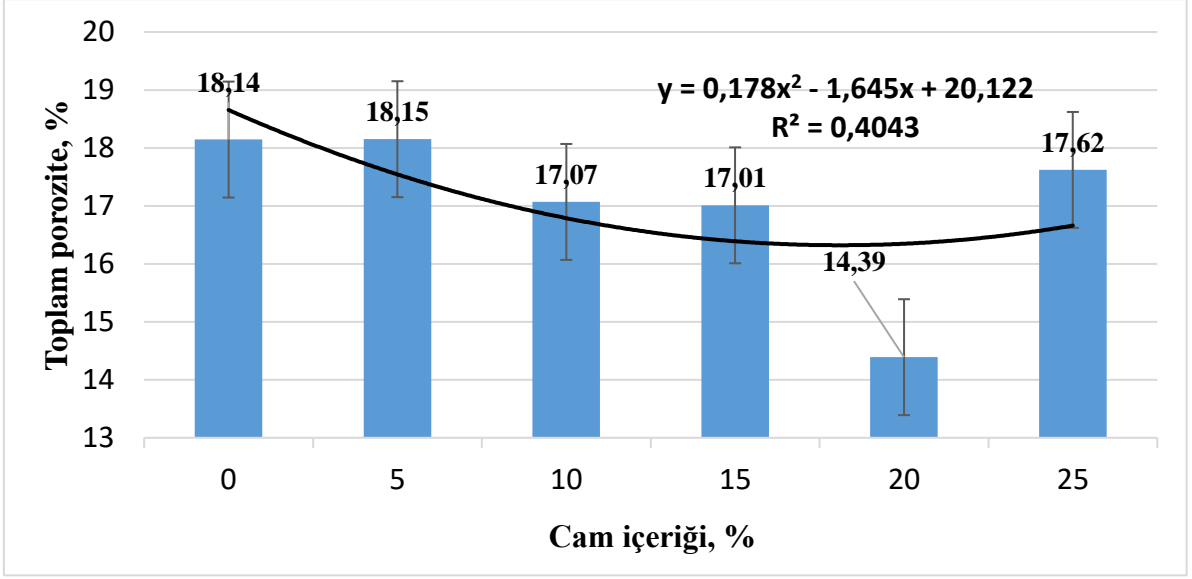
4.5 Harç Örneklerinde Suyun Emilimi, Toplam Porozite, Açık Porozite Sonuçları

Su emilimi ve Porozite önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Sertleşmiş numunenin dayanıklılığı bu konuların örneklerinden biridir. Su emiliminde azalma, porozite uzun süreli performansı ve kullanım ömrünü arttırır. (Danila 2015)

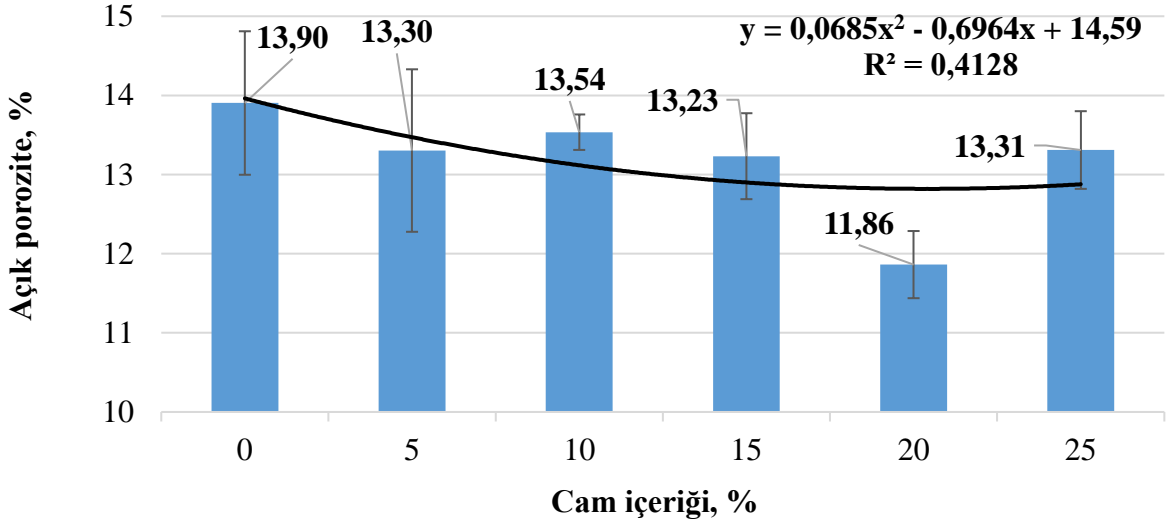
Suyun emilimi testinin sonuçları şekil 57’de görülmektedir. 7200 dakikalık daldırma işleminden sonra, % 5’lik numunenin ve kontrol örneğinin su emme farkı % 2.9 olmuştur. % 10, % 15 ve %25 örneklerde su emilimi nispeten birbirine yakındır. % 20 cam içerikli harç numunesinin 7200 dakika sonucunda % 18.44 kontrol numunesinden daha az su emmiştir. Ayrıca, kontrol numunesi su emilimi sırasıyla % 10,% 15 ve % 25 ile karşılaştırıldığında % 3.96, %6.15 ve % 4.90’dan daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 57: Suyum emilimi



Şekil 58: Toplam porozite



Şekil 59: Açık porozite

Toplam porozite bir cismin içerisinde bulunan açık, kılçak ve kapalı boşluklar olarak tanımlanabilmektedir. Boşluk hacminin bütün hacime oranında denmektedir. Kontrol numunesinin Toplam porozitesi %18,14 olan %5 lik cam içeriği bulunan numunenin de yine %18,15 olduğu ve birbirlerine çok yakın ve kontrol numunesinden fazla olduğu görülmektedir. İçeriği %10, %15 ve %25 olan temperli cam numunelerinin toplam poroziteleri sırası ile %17,07, %17,01 ve %17,62 olduğu ve kontrol numunesinden daha az bir toplam porositeye sahiptirler. %20 cam numunesi bulunan örnekte ise toplam porozitenin %14,39 olduğu ve en düşük değere sahip olduğu açıkça görülmüştür.

Açık porozite, Şekil 59'de görülmektedir. En düşük gözeneklilik, % 20 cam içerikli harç örneğinde, en yüksek gözeneklilik ise cam içeriği olmayan kontrol örneğine aittir. % 20 temperli cam bulunan içerik numunesi, içerik karışımı ve gözeneklerin düşürülmesine neden olan çok ince atık parçacıkları nedeniyle en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca % 5, % 10, % 15 ve %25 gibi diğer numunelerde kontrol numunesine göre daha düşük açık porozite göstermiştir.

Bu porozitede ki değişimler, farklı harç karışımlarında küçük parçacıkların (<0.5 mm) tek tip dağılımına atfedilebilir. (Danila 2015) İnce cam atık parçacıkları gözenekleri doldurmuş, su emilimini ve gözenekliliğini azaltmıştır. Her örnek içeriği karışımı farklı parçacık boyutlarından dolayı farklı olabilir. Bu nedenle su emme ve porozite değerleri değişebilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fotovoltaik panellerin hızlı geliştiği ve miktarının gün geçtikçe artmasından dolayı oluşan cam atıklar çevre problemi oluşturmaktadır. Bu problemleri çözüme odaklı olarak fotovoltaik panellerin temperli camlarının çimento katkı maddesi olabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda kırılarak agrega haline getirilen temperli camlar, çimento ve kum ile beraber altı farklı oranlarda karıştırılarak çimento harcı oluşturulmuştur. Meydana getirilen standart numuneler 7 günlük kür süresinden sonra fiziksel testlere tabi tutulmuştur.

Bu çalışmaların sonuçları aşağıda sıralanmıştır;

- Kum ve cam tane boyutlarına bakıldığında, cam parçacıklarının daha çok 2 ile 5.6 mm arasında ki boyutlara sahip olduğu ve kum parçacıklarının ise 0.125 ile 0.5 mm arasında ki boyutlara sahip olduğu testte görülmüştür.
- Kullanılan altı adet numuneden biri olan kontrol numunesi diğer %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında cam içeren numunelerle kıyaslandığında yoğunluğu daha düşük olduğu görülmüştür ve diğer numunelerin yoğunluklarında artış gözlemlenmiştir.
- Her bir numunenin tabla yayılma testinde kanama görülmüş ve standart sapma değerleri belirlenen değer içersinde bulunmuştur.
- Kum yerine cam kullanılan numunelerde eğilme dayanımlarına bakıldığında, %15 olan cam içeriği bulunan numune kontrol örneğinden % 1.93 daha sağlam olduğu görülmüştür. Diğer numuneler kontrol numunesinden daha düşük bir dayanıma sahip olduğu söylenebilmektedir.
- Basınç dayanımında ise, %15 oranında cam bulunan numuneye kadar fazla bir değişimin olmadığı fakat %15’de en yüksek değere ulaştığı ve sonrasında ise basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. %15 cam örneği bulunan numune kontrol numunesine kıyasla % 3.14 daha fazla basınça dayanmıştır.
- 7200 dakikalık suyun emilimi testinde en fazla su emilimi %5 ve en az su emilimi ise %20 cam içeriği bulunan numunelerde gerçekleşmiştir.
- Numunelerin toplam porozitesi ele alındığında, %5 cam içeriği bulunan numune ve kontrol numunesi en fazla toplam poroziteye sahip iken en düşük poroziteye %20 cam içeriği bulunan numune sahiptir. Açık porozite de ise kontrol numunesi en fazla ve yine %20 cam içeriği bulunan numune en düşük açık poroziteye sahip numuneler olarak gözlemlenmiştir.

- Her bir numunede kullanılan cam parçacık boyutları değişiklik göstermekte ve her bir örnekte aynı cam boyutları çimento karışımında kullanılmadığı unutulmamalıdır.
- Basınç dayanımında ki farklı parçacık boyutları ve camın yüzeyinde ki pürüzsüzlük basınç dayanımını düşürmüştür. Daha düşük tane boyutlu cam parçaları ile testler daha kontrollü bir şekilde yapılarak farklı değerlerin elde edilmesi mümkündür.
- Numunelerin suda iyileştirme süresi 7 gün yapılmıştır ve bu süre 28 güne arttırılarak, numunelerin fiziksel değerlerinde ki artış daha iyi gözlemlenebilir.
- Polikristal silikon panelin tamamı ve ya bir çoğu çimento ile birlikte agrega olarak kullanılarak bu panelden kaynaklı kurşun sızması için bir araştırma konusu oluşturulabilir.
- Bu yöntem ile oluşan fotovoltaik panel atıkları agrega olarak geri dönüştürülerek kullanılması için daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKÇA

- Ahmad M, (2017). Operation and Control of Renewable Energy Systems. John Wiley & Sons, 384s. USA.
- Anonim (2009). Solar Photovoltaics Report. Published by ABS Energy Research. Issue 6, p1-217. UK
- Anonim, (2016). Comparison Solar Cell Types.
<https://www.hessolar.com/blog/2016/september/comparing-solar-cell-types/>
Erişim Tarihi: 11.07.2018
- Anonim, (2018). Current Statues Concentrated Solar Power Globally.
<http://helioscsp.com/current-status-of-concentrated-solar-power-csp-globally/>
Erişim Tarihi: 09.08.2018
- Anonim, <https://uk.saint-gobain-building-glass.com/en-gb/architects/physical-properties>
Erişim Tarihi: 10.04.2019
- Anonim, Solar Glass and Mirrors,
http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/solar_glass.php Erişim Tarihi: 17.07.2018
- Bagher, A, Vahid, M, Mohsen, M, (2015). Types of Solar Cells and Application. American Journal of Optics and Photonics. Vol. 3, No. 5, pp. 94-113.
- Bagnal D, Boreland M, (2008). Photovoltaic technologies. Elsevier, Energy Policy 36:4390–4396. UK
- Bekkelund K, (2013), A Comparative Life Cycle Assessment of PV Solar Systems, Master of Energy and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering. Norway
- Belghachi A, Limam N, (2017). Effect of The Absorber Layer Band-gap on CIGS Solar Cell. Chinese Journal of Physics 55:1127– 1134
- Berry C, (2014), Case Study of a Growth Driver – Silver Use in Solar, https://www.pv-tech.org/guestblog/case_study_of_a_growth_driver_silver_use_in_solar?/guest_blog/case_study_of_a_growth_driver_silver_use_in_solar (11.01.2019).
- Calnan S, (2014), Application of Oxide Coatings in Photovoltaic Devices and Coatings, Vol. 4, pp. 162-202.
- Corinaldesi V, Nardinocchi A, Donnini J, (2016). Reuse of recycled glass in mortar manufacturing. European Journal of Environmental and Civil Engineering. Vol. 20, No. S1, Sayfa140–151.

- Crys W, Avens H, Capshaw Z, Kingsbury R, Sahmet J, Tvermos B, (2014). Landfill Waste and Recycling: Use of Screening-level Risk Assessment Tool for End Of Life Cadmium Telluride Thin Film Photovoltaic Panels. *Energy Policy* 68:524-533. USA.
- Danila V, (2015). Evaluation of Possibilities of Using CIGS Solar Modules Waste in Concrete Constructions. Vilnius Gediminas Technical University.
- de Wild-Scholten M.J, (2009). Renewable and Sustainable. Presentation at the Crystal Clear Final Event,: Munich.
- Dias P, Schmidt L, Gomes L, Bettanin A, Veit H, Bernardes A, (2018). Recycling Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by Electrostatic Separation. *Journal of Sustainable Metallurgy*.
- Diez, M. J, Madrid, J, Macias, A, (1997). Characterization of Cement-Stabilized Cd Wastes. *Cement and Concrete Research*, 27 (3): 337-343.
- Doi T, Tsuda I, Unagida H, Murata A, Sakuta K, Kurakowa K, (2001). Experimental Study on PV Module Recycling with Organic Solvent Method,”*Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 67, No. 1–4, pp. 397–403.
- Dominguez A, ve Geyer R, (2017). Photovoltaic waste assessment in Mexico. *Resources, Conservation & Recycling*. 127: 29–41. USA
- ECHA, 2013. Cadmium Suplhide. <https://echa.europa.eu/documents/10162/2aceee75-6b50-416c-aa30-d3131c5eeee3> (17.08.2018)
- Faella C, Lima C, Martinalli E, Pepe M, Realfonzo R, (2016). Mechical and Durability Performance of Sustainable Structural Concretes: An Experimental Stduy. *Cement and Concrete Composites* 71: 85-96. Italy.
- Fernandez L, Ferrer R, Aponte D, Fernandez P, (2011). Recycling silicon solar cell waste in cement-based systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95, 1701–1706. Spain.
- Fernández-Carrasco L, Ferrer R, Aponte D.F, and Martínez-Ramírez S, (2009). Stabilization Of Photovoltaic Panels Cell Wastes In Building Material Matrices. 1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco- Energy Madrid
- Flora S, and Dwivedi N, (2012). A Toxicochemical Review of Gallium Arsenide. *Defence Science Journal*, Vol. 62, No. 2, pp. 95-104
- Frisson L, Lieten K, Bruton T, Declercq K, Szlufcik J, Moor H, Goris M, Benali A, Aceves O, (2000). Recent Improvements in Industrial PV Module Recycling. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Glasgow.

- Fthenakis V, and Alsema E, (2006). Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004-early 2005 Status. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 14(3): p. 275-280.
- Gayal K, and Ravihansa C, (2012). Use Of Recycle Glass As A Coarse Aggregate In Concrete World Construction Conference – Global Challenges in Construction Industry
- Gerges N, Issa C, Fawaz S, Jabbour J, Jreige J, Yacoub A, (2018). Recycled Glass Concrete: Coarse and Fine Aggregates. *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science* Vol. 3, No. 1.
- Goozner R, Drinkard W, Long M, (1997). A Process to Recycle Thin Film PV Materials. *IEEE*. 1161-1163. USA
- GOST 12730.3-78. Concretes. Methods of Determination of Water Absorption
- GOST 12730.4-78. Concretes. Methods of Determination of Porosity Parameters
- Granata G, Pagnanelli F, Moscardini E, Havlik T, Toro L, (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 123, 239–248.
- Hernandez R, Easter B, Murphy-Mariscal L, Maestre T, Tavassoli M, Allen F, Ravi S. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766-779.
- Iffat S, (2015). Relation Between Density and Compressive Strength of Hardened Concrete. *Concrete Research Letters*. Vol. 6(4) 182-189.
- IRENA (2013). Concentrating Solar Power Technology Brief. IEA-ETSAP and IRENA, s32, Paris
- IRENA, (2017). Renewable energy sources. <https://www.irena.org/> Erişim Tarihi: 26.09.2018
- Iyengar V, Nayak B, Gupta M, (2010). Silicon PV devices based on a single step for doping, anti-reflection and surface passivation. Elsevier, *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 94:2205–2211.
- J. Glatthaar E, Kamdje J, B. Barnickel M, Dax V, Schaub H. G, Stevens B, Jehle U, Ricklefs E. A, Stadlbauer H, Weigand, (2017). Development of a modular cradle to cradle process-chain for c-Si-PV panel recycling, 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Germany
- Johnson D, (2014), Graphene and Perovskite are a Winning Combination for Photovoltaics, <https://spectrum.ieee.org/nanoclast/green-tech/solar/graphene-and-perovskite-lead-to-inexpensive-and-highly-efficient-solar-cells> (13.11.2018).
- Kabir, E, Kumar, S, Kumar, P, Adelodun, A. A, ve Kim, K. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900.

- Kaiser T, (2016). Solar cells. Lecture 6:Solar cells slide at montana state university. 49 slide. <http://slideplayer.com/slide/6348822/> (15.06.2018)
- Kalogirou, S (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science 30:231–295 Cyprus.
- Kalogirou, S. A. (2014;2013). Solar energy engineering: Processes and systems (Second ed.). US: Academic Press.
- Klugmann-Radziemska, E, (2013). Current Trends in Recycling of photovoltaic solar cell and module waste. Chem Didact Ecol Metrol.17(1-2): 89-95. Poland.
- Klugmann-Radziemska, E, Ostrowski, P, Drabczyk, K., Panek, P, Szkodo, M, (2010). Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods. Elsevier, Solar Energy Materials & Solar Cells 94: 2275–2282
- Kumar V, Diksit S, (2016). Anti-Reflection coatings for highly efficient solar cells. Department of Applied Physics Guru Jambhes war University of Scienc & Technology. https://www.researchgate.net/publication/310611446_Anti-Reflection_coatings_for_highly_efficient_solar_cells (20.07.2018)
- Larsen, K. (2009). End-of-life PV: then what?. Renewable Energy Focus, 10(4), 48-53.
- Loser U ve Palitzsch W, (2011). Economic PV waste recycling solutions - results from R&D and practice. IEEE. 628-631
- LST EN 1015-11. Methods of Test For Mortar For Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar.
- LST EN 1015-3. Methods of Test for Mortar Masonry – Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)
- LST EN 196-1. Methods of Testing Cement – Part 1: Determination of Strength
- LST EN 933-1. Tests for geometrical properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method.
- Marini C, Blanc I, Sinha P, Wade A, (2014), A Prospective Mapping Of Environmental Impacts Of Large Scale Photovoltaic Ground Mounted Systems, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam.
- Masis M, Wyser A, Rucavado E, Jeangros Q, Landucci F, Monnard R, Charitat G, (2017). Transparent Conductive Oxides (TCOs). Photovoltaics and thin film electronics laboratory PV-LAB <https://pvlab.epfl.ch/tco> (18.08.2018)
- McEvoy, A, Markvart, T, Castaner, L, (2012). Solar Cells Materials, Manufacture and operation. Academic press is an imprint of Elsevier. UK

- Meyer C, Egosi N, Andela C, (2001). Concrete With Waste Glass As Aggragetes. CONCRETE WITH WASTE GLASS AS AGGREGATE International Symposium Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee.
- Monier V, Hestin M, (2011). Study on Photovoltaic Ppanels Supplementing the Impact Assessment For a Recast of the Weee Directive. Bio Intelligence Service Final report. 86p. Paris
- Müller J, Rech B, Springer J, Vanecek M, (2004). TCO and Light Trapping in Silicon Thin Film Solar Cells. Solar Energy 77:917–930. Germany
- Nadeem M ve Pofale A (2012). Replacement Of Natural Fine Aggregate With Granular Slag - A Waste Industrial By-Product In Cement Mortar Applications As An Alternative Construction Materials. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Vol. 2, Issue 5, September, Sayfa1258-1264.
- National Renewable Energy Laboratory (2011), Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R&D, National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov/pv/thinfilm.html (12.12.2018).
- Oliveira M, Cardozo A, Viana M, Lins V, (2017). The Causes and Effects of Degradation of Encapsulant Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (EVA) in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Brazil.
- Paiano, A, (2015). Photovoltaic waste assesment in italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 41: 99-112. Italy
- Pearce J, ve McDonald N, (2014), Producer Responsibility and Recycling Solar Photovoltaic Modules, www.appropedia.org/Producer_responsibility_and_recycling_solar_photovoltaic_modules (18.11.2018).
- Raheem A, Soyngbe A, Emenike A, (2013). Effect of Curing Methods on Density and Compressive Strength of Concrete. International Journal of Applied Science and Technology. Vol. 3 No. 4; 55-64.
- Rix A, Steyl J, Rudman M, Terblanche U, Niekerk J, (2015). First Solars CDTE Module Technology-performances ILife Cycle, Heath and Safety Impact Assessment. Centre for renewable and sustainable energy studies. 30s
- Rumsys D, Bacinskas D, Spudulis E, Meskenas A, (2017). Comparison of material properties of lightweight concrete with recycled polyethylene and expanded clay aggregates. Procedia Engineering 172: 937 – 944.
- Sa'atlu, B, (2014). Innovative Solar Panels with 60% Efficiency. Horizon Research Publishing, Energy and Environmental Engineering 2(4): 98-102

- Siddique I, Rauf M, Khayam S, Shams M, Faisal H, (2018). Effect of tempered glass fines in concrete at elevated temperature. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 414.
- Sundaram S, Benson D, Mallick T, (2016). Chapter 3 - Potential Environmental Impacts From Solar Energy Technologies. Potential Environmental Impacts and Implications for Governance. Pages 23-45.
- Tantawi H, (2015). Introduction to Concrete Technology. Department of Civil Engineering, Fahad Bin Sultan University. Arabistan.
- Tsoutsos T, Frantzeskaki N, Gekas V, (2005). Environmental Impacts From The Solar Energy Technologies. Energy Policy 33:289–296
- Tudelft, Chapter 3. Semiconductor Material For Solar Cells. https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Solar-Cells-R3-CH3_Solar_cell_materials.pdf (07.08.2018)
- Türkel E, (2002). Betonda Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek lisans Tezi.
- Uğur İ, (2003). Kırmataş Agregalı Hafif Betonların Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi Üzerine Bir Analiz. III Ulusal Kırmataş Sempozyumu. Isparta.
- Wambach K, ve Schlenker S, (2006), The Second Life Of A 300 kW PV Generator Manufactured With Recycled Wafers From The Oldest German PV Power Plant, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden
- Wang T, Hsiao J, Du C, (2011). Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module, IEEE. Taiwan.
- Weckend S, Wade A, Heath G, (2016). End of Life Management – Solar Photovoltaic Panels. IRENA ve IEA-PVPS. S 1-94. Germany.
- Werner J, Zapf-Gottwick R, Koch, M, Fischer K, (2011). Toxic Substances In PV Modules The 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference November 28th - December 2nd, 2011, Fukuoka, Japan
- Wirth, H, Weiss, K, ve Wiesmeier, C. (2016). Photovoltaic modules: Technology and reliability. Berlin/Boston: Walter De Gruyter.
- Wolff C, Yarı İletkenler. <http://www.radartutorial.eu/21.semiconductors/hl04.tr.html>
Erişim Tarihi: 13.06.2018

ÖZGEÇMİŞ

Murat Hüseyin ÜNSAL 1991 yılında İstanbul'da doğdu. 2009-2013 yılları arasında Bartın Üniversitesinde çevre mühendisliği bölümünden birinci olarak mezun oldu. 2017 yılında Namık Kemal Üniversitesi Çevre Mühendisliği Yüksek lisansına başladı. Bu süre zarfında belirli işlerde kısa süreli olarak çalıştı. Şuan Litvanya'da gönüllü olarak çalışmakta.