

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRONİK AYGITLAR İÇİN N-TİPİ VE
P-TİPİ Sİ YONGALARIN ÜRETİLMESİ
KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMALARI**

Savaş ÖZTÜRK

Kasım, 2017

İZMİR

ELEKTRONİK AYGITLAR İÇİN N-TİPİ VE P-TİPİ Sİ YONGALARIN ÜRETİLMESİ KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMALARI

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Savaş ÖZTÜRK

Kasım, 2017

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Savaş ÖZTÜRK, tarafından PROF. DR. ERDAL ÇELİK yönetiminde hazırlanan “ELEKTRONİK AYGITLAR İÇİN N-TİPİ VE P-TİPİ Sİ YONGALARIN ÜRETİLMESİ KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMALARI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Erdal ÇELİK

Yönetici


Prof. Dr. Uğur ÇAM

Tez İzleme Komitesi Üyesi


Prof. Dr. İbrahim Halil MUTLU

Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Işıl BİRLİK

Tez İzleme Komitesi Üyesi


Doç. Dr. Mücahit SÜTÇÜ

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin belirlendiği andan itibaren bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve katkılarını hiç esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Erdal ÇELİK'e;

Tez çalışmam sırasında değerli görüşleri, yönlendirmeleri ve arkadaşlığı ile her zaman yanımda olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Levent AYDIN hocama, akademik hayatımın başladığı lisans dönemimden itibaren bilgi, tecrübe ve motivasyon anlamında bana çok katkıları bulunan Sayın Prof. Dr. Ahmet TÜRK ve Prof. Dr. Fatih ÜSTEL hocalarıma, uyumlu şekilde yayın çalışmaları yaptığım kıymetli arkadaşım Erhan KAYABAŞI ve hocası Sayın Prof. Dr. Hüseyin KURT'a, doktora tezimin deneysel çalışmalarında karşılaştığım zorlukları aşmamda yaptıkları yardımlardan dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Ayşe SEYHAN ve Doç. Dr. Recep ZAN'a, doktora serüvenim boyunca arkadaşlıkları ve teknik bilgileri ile bana yardımcı olan Serdar YILDIRIM ve Metin YURDDAŞKAL'a ve bütün EMUM ekibine;

Doktora eğitimim için İstanbul'dan İzmir'e gelişime en güzel, en sevgi dolu, en anlamlı katkıyı yapan, işler ters gittiğinde de beni motive eden ve tezimin her aşamasında yanımda olup bana destek olan sevgili eşim Nilay KÜÇÜKDOĞAN ÖZTÜRK'e, hayatımın her döneminde sevgileriyle ve destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve eşimin sevgili ailesine;

Bu tez çalışmasına maddi destek veren TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB), 2013 yılı 2. Dönem, 2211-C kodlu Yurt İçi Öncelikli AlanlaraYönelik Doktora Teşvik Bursu için TÜBİTAK'a ve Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: 2012.KB.FEN.072);

Teşekkür ederim.

Savaş ÖZTÜRK

ELEKTRONİK AYGITLAR İÇİN N-TİPİ VE P-TİPİ Sİ YONGALARIN ÜRETİLMESİ KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMALARI

ÖZ

Bu tez çalışmasında, tek kavşaklı silisyum (Si) tabanlı güneş hücrelerinin üretimi ve karakterizasyon çalışmaları Si hammaddesinden nihai ürün elde edilme aşamasına kadar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kesme, lepleme ve tekstürleme çalışmalarında proses parametrelerinin, sonuçları nasıl etkilediğinin araştırılması amacıyla regresyon analizleri yapılmıştır. Ayrıca, kesme ile lepleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüklerinin ve tekstürleme işleminde ise % R değerinin minimizasyonu için Diferansiyel Gelişim, Nelder-Mead, Rastgele Arama ve Benzetimli Tavlama Algoritmaları ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak, kesme işleminde tel besleme hızı 4 m/s ve kesme hızı 0,5 mm/dk parametreleri ile kesilen waferlarda en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Lepleme işleminde dönme hızı 50 devir/dk ve lepleme süresi 60 dk deneysel seti ile en ideal yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Tekstürleme çalışmalarında ise % 3,5 sodyum hidroksit - % 5 izopropanol çözeltisinde 40 dk süre tekstürlenmiş numunelerde en düşük reflektans değerleri elde edilmiştir. Tekstürleme işlemi sonrası p-n kavşağı oluşturma işleminde % 1 borik asit solüsyonu kullanılmış ve sonra Si yongalara İndiyum Kalay Oksit (İTO) ince filmi plazma destekli kimyasal/fiziksel buhar biriktirme sistemiyle kaplanmıştır. Son aşamada ise Si yongaların her iki yüzeyine akım toplayıcılar perde baskı cihazı ile biriktirilmiştir. Bu işlemler sonrasında güneş hücrelerinin akım-voltaj ölçümleri güneş simülatöründe gerçekleştirilmiş ve bütün güneş hücreleri için açık devre voltajı 494 mV, kısa devre akımı 13,95 mA, doluluk faktörü 80,1 ve verim 8,83 ortalama değerleri elde edilmiştir. Regresyon analizi çalışmalarında en yüksek R^2 değerleri, ikinci dereceden lineer olmayan rasyonel modeller ile kesme ve lepleme çalışmalarında ve üçüncü dereceden lineer olmayan polinom model ile ise tekstürleme işleminde elde edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kurulan bütün lineer ve lineer olmayan regresyon fonksiyonları için en iyi sonuçlara Diferansiyel Gelişim ve Benzetimli Tavlama Algoritmaları ile ulaşılırken Rastgele Arama algoritması ise en kötü sonuçları vermiştir.

Anahtar kelimeler: Silisyum yonga, Czochralski, güneş hücresi, regresyon, optimizasyon



PRODUCTION, CHARACTERIZATION AND APPLICATIONS OF N-TYPE AND P TYPE SI WAFERS FOR ELECTRONIC DEVICES

ABSTRACT

In this thesis study, production and characterization studies of Silicon (Si)-based single junction solar cells were carried out from Si substrate production to the final product. In addition, regression analyzes were performed on cutting, lapping and texturing studies to investigate how process parameters affect the results. Moreover, optimization studies were carried out for the surface roughness minimization in cutting and lapping processes and reflectance value in texturing process by using Differential Evolution, Nelder-Mead, Random Search and Simulated Annealing algorithms. The lowest surface roughness values were obtained using 4 m/s wire speed and 0.5 mm/min cutting speed parameters in cutting process experimentally. In lapping process, the optimum surface roughness values were obtained with the parameter set as 50 RPM rotation speed and 60 min lapping time. In texturing studies, the lowest reflectance value was obtained in samples textured for 40 min in 3.5 % sodium hydroxide - 5 % isopropyl alcohol solution. After the texturing process, p-n junction was formed by using 1 % boric acid solution and then the Si chips were coated with ITO thin film by plasma assisted chemical/physical vapor deposition system. Finally, current collectors were deposited on both sides of the Si chips with a screen printing device. After this process, current-voltage measurements of the solar cells were performed by solar simulator and open-circuit voltage, short-circuit current, fill factor and efficiency were obtained 494 mV, 13.95 mA, 80.1 and 8.83, respectively. In the regression analysis, the highest R^2 values were obtained with the second order nonlinear rational models in the cutting and lapping studies and the third order nonlinear polynomial model in the texturing process. For all linear and nonlinear regression functions prepared in optimization studies, the best results were obtained based on Differential Evolution and Simulated Annealing algorithms while worst results obtained based on Random Search algorithm.

Keywords: Silicon wafer, Czochralski, solar cell, regression, optimization

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - TEORİK ALTYAPI.....	8
2.1 Silisyum.....	8
2.1.1 Silisyumun Kristalografisi	10
2.1.2 Silisyum Kafes Kusurları.....	11
2.1.3 Silisyumun Mekanik Özellikleri	13
2.1.4 Silisyumun Elektriksel Özellikleri.....	15
2.1.4.1 Silisyum İçerisindeki Empürite ve Katkılar	15
2.1.4.2 Si Kristalinin Direnç Özellikleri	19
2.2 Czochralski Silisyum Büyümesi	20
2.2.1 Czochralski Kristal Büyütme Fırınları.....	27
2.2.2.1 Pota.....	27
2.2.2.2 Sıcak Bölge Malzemeleri	28
2.2.2.3 Sıcak Bölge Yapısı	30
2.2.2.4 Gaz Akışı.....	31
2.2.3 Cz Sisteminde Si Kristali Büyütme Süreci Aşamaları.....	33
2.2.3.1 Eritme (Melting).....	34
2.2.3.2 Boyun (Neck) Oluşumu	34
2.2.3.3 Taç (Crown) ve Omuz (Shoulder) Oluşturma.....	36
2.2.3.4 Gövde (Body) Oluşumu	37
2.2.3.5 Kuyruk (Tail veya End Cone) Oluşumu	38

2.2.3.6 Sistemin Kapatılması (Shut-off)	38
2.2.4 Kristal Büyütmede Karşılaşılan Sorunlar	39
2.2.4.1 Çap Kontrolü	39
2.2.4.2 Katkılama	41
2.2.4.3 Sıcak Bölge Ömrü	42
2.2.4.4 Isı Transferi	43
2.2.4.5 Eriyik Konveksiyonu	44
2.2.4.5.1 Potanın Dönüşü.	45
2.2.4.5.2 Kristalin Dönüşü.....	47
2.3 Silisyum Waferların Hazırlanması	49
2.3.1 Si Wafer Üretim Prosesleri	50
2.3.1.1 İngot Şekillendirme	51
2.3.1.2 Dilimleme.....	52
2.3.1.3 Pahlama	56
2.3.1.4 Lepleme.....	57
2.3.1.5 Dağlama (Kimyasal Temizleme)	60
2.3.1.6 Parlatma.....	60
2.3.1.7 Sulu Temizleme	63
2.4 Silisyum Wafer Uygulamaları: Silisyum Tabanlı Güneş Hücrelerinin Üretimi	64
2.4.1 Güneş Enerjisi.....	64
2.4.1.1 Fotovoltaiklerin Önemi	64
2.4.2 FV'lerin Tarihçesi.....	65
2.4.3 FV Fizikinin Temelleri	67
2.4.3.1 Güneş Hücrelerinin Uygulama Temelleri	67
2.4.4 FV'lerde Optik Kayıplar	73
2.4.4.1 Ön Yüzey Yansıması	73
2.4.4.1.1 Silisyumun Sulu Dağlanması	75
2.4.4.2 Parazitik Yansıtma Yüzeyi Kaplamalarındaki Parazitik Absorpsiyon	76
2.4.4.3 Serbest Taşıyıcı Absorpsiyonu	77
2.4.4.4 Arka Yüzey Absorpsiyon.....	77
2.4.4.5 Işığın Bağlanması ve Reflektans Kayıpları.....	78
2.4.5 FV Modül ve Panelleri.....	79

2.5 Regrasyon Analizi ve Optimizasyon	81
2.5.1 Regresyon Analizi.....	81
2.5.1.1 Regresyon Modelleri.....	83
2.5.2 Optimizasyon	89
2.5.2.1 Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution) Algoritması	90
2.5.2.2 Nelder-Mead Algoritması	91
2.5.2.3 Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing) Algoritması.....	91
2.5.2.4 Rastgele Arama (Random Search) Algoritması.....	93
2.5.3 Yüzey Hazırlama İle İlgili Yapılan Modelleme ve Optimizasyonu Çalışmaları.....	93
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	97
3.1 Tek Kristalli Silisyum İngot Büyütülmesi.....	97
3.1.1 Üretim Öncesi Kontrol Aşamaları	100
3.1.2 Deneysel Prosedür	101
3.1.2.1 Si Hammaddelerin Sarj Edilmesi	102
3.1.2.2 Sistemin Temizlenmesi ve Vakuma Alınması	103
3.1.2.3 Sisteme Güç Verilmesi ve Si Eritme İşleminin Başlatılması.....	104
3.1.2.4 Eriyik İçine Si Çekirdeğin Daldırılması.....	105
3.1.2.5 Boyun Kısımının Oluşturulması	106
3.1.2.6 Omuz Kısımının Oluşturma	107
3.1.2.7 Gövde Kısımının Oluşturulması	108
3.1.2.8 Kuyruk Kısımının Oluşturulması	109
3.1.2.9 Sistemin Kapatılması	110
3.2 Si Waferların Hazırlanması	111
3.2.1 Si İngotların Elmas Tel Testere Sistemi ile Wafer Halinde Kesilmesi....	112
3.2.1.1 Deneysel Prosedür.....	113
3.2.2 Si Waferların Leplenmesi	114
3.2.2.1 Deneysel Prosedür.....	116
3.2.3 Si Waferların Parlatma İşlemi.....	116
3.2.3.1 Deneysel Prosedür.....	118
3.3 Si Tabanlı Güneş Hücrelerinin Üretilmesi	118

3.3.1 Deneysel Prosedür	122
3.4 Karakterizasyon Çalışmaları	126
3.4.1 Si İngot Üretimi: Hammadde Karakterizasyonu	126
3.4.2 Kesme İşlemi Sonrası Wafer Karakterizasyonu	129
3.4.3 Lepleme İşlemi Sonrası Wafer Karakterizasyonu	131
3.4.4 Parlatma İşlemi Sonrası Wafer Karakterizasyonu	133
3.4.5 Güneş Hücresi Karakterizasyonu.....	135
BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR	137
4.1 Üretim ve Karakterizasyon Sonuçları	137
4.1.1 Si İngot Büyütme	137
4.1.2 Si İngot Kesme.....	140
4.1.3 Si Wafer Lepleme	144
4.1.4 Si Wafer Parlatma.....	146
4.1.5 Si Tabanlı Güneş Hücresi Üretimi.....	149
4.1.5.1 Si Yongaların Tekstürlenmesi.....	150
4.1.5.2 P-n Kavşak Üretimi.....	154
4.1.5.3 Yansıtma Yüzey Kaplama.....	154
4.1.5.4 Akım Toplayıcıların Oluşturulması	155
4.1.5.5 Güneş Hücresi Ölçümleri.....	156
4.2 Deneysel Verilerin Modellenmesi ve Optimizasyonu.....	157
4.2.1 Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Optimizasyon Çalışmaları	158
4.2.3 Lepleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Optimizasyon Çalışmaları	165
4.2.4 Tekstürleme Parametrelerinin Reflektans Değerine Etkilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Optimizasyon Çalışmaları	170
BÖLÜM BEŞ - GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	173
KAYNAKLAR	182

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Dünya fosil yakıt tüketimi	1
Şekil 1.2 Amerika Birleşik Devletleri 2013 yılı enerji tüketimi grafiği	3
Şekil 2.1 Silisyum birim kafes yapısı.....	10
Şekil 2.2 900 °C’de başlangıç dislokasyon yoğunlukları $10^6/\text{cm}^2$ olan Si tek kristallerin gerçek gerilme-genleme davranışları	15
Şekil 2.3 Oda sıcaklığında Si’nin direnç değerinin dopant yoğunluğu ile değişimi..	19
Şekil 2.4 Cz sistemi temel sıcak bölge yapısı	29
Şekil 2.6 Cz sisteminde inert temizleyici gaz akışının şematik gösterimi	32
Şekil 2.7 Cz yöntemi ile tek kristal Si üretiminin şematik görüntüsü.....	33
Şekil 2.8 Si büyütme prosesinde boyun, taç ve gövdenin oluşmaya başlama evresi.	36
Şekil 2.9 İngot şekillendirme işlemleri	52
Şekil 2.10 Tel kesme işleminin geometrik olarak tanımlanması	54
Şekil 2.11 Elmas tel kesme sisteminin şematik gösterimi	55
Şekil 2.12 Wafer köşelerinin pahlama işleminin şematik gösterimi.....	56
Şekil 2.13 Si wafer lepleme sisteminin şematik gösterimi	58
Şekil 2.14 Si wafer parlatma sisteminin şematik gösterimi	62
Şekil 2.15 Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde kullanılan cihazların sınıflandırılması.	63
Şekil 2.16 Güneş hücresinin şematik görüntüsü	68
Şekil 2.17 Güneş hücresinin I-V (akım-voltaj) karakteristiği.....	69
Şekil 2.18 Güneş hücresinin karanlık ve aydınlık alanlardaki I-V eğrileri.....	71
Şekil 2.19 Piramit dokulu bir yüzeye gelen 600 nm dalga boylu ışığın diyagramı ...	74
Şekil 2.20 Si’nin (100), (110) ve (111) oryantasyonlarında asılı ve alt bağ sayıları .	75
Şekil 2.21 Si’nin absorpsiyon katsayısı	78
Şekil 2.22 Paralel ve seri bağlanma ile FV’lerin akım ve voltajının değişimi.....	81
Şekil 2.23 DE algoritması akış şeması.....	90
Şekil 2.24 NM algoritması akış şeması.....	92
Şekil 2.25 SA algoritmasının akış şeması	94
Şekil 2.26 RS algoritmasının akış şeması	95

Şekil 3.1 Si ingot üretimi sarf maddeleri, a) % 99,999 saflıkta çok kristalin Si, b) Kuvars pota.....	97
Şekil 3.2 PVA TePla-CGS Lab Cz-Si Büyütme Sistemi	98
Şekil 3.3 PVA TePla-CGS Lab Cz sistemi ve ekipmanlarının şematik görüntüsü....	99
Şekil 3.4 Cz sistemi soğutma sistemindeki akış metrelerin temizlenmesi.....	101
Şekil 3.5 Soğutma suyu akış metresinin görüntüsü; a) Temizleme işlemi öncesi, b) Temizleme işlemi sonrası	101
Şekil 3.6 Si ingot büyütme prosesi akış şeması	102
Şekil 3.7 Si şarj işlemi öncesi fırın bölgesi ekipmanının; a) Fırın bölgesi ve pota döndürme ve destek parçası, b) Fırın içi ısıtıcı ekipmanın bağlanması, c) Grafit izolasyon keçesi, d) Grafit pota haznesi, grafit koni ve fırın üstü ekipmanları	103
Şekil 3.8 Kuvars pota içine Si hammaddesinin şarj edilmesi	103
Şekil 3.9 Si ergitme aşamalarının termal kamera görüntüsü.....	105
Şekil 3.10 Si eriyiğine Si çekirdeğin daldırılması işleminin termal kamera görüntüleri; a) Si çekirdek ısıtma işlemi, b) Boyun oluşumun başlangıcı.....	105
Şekil 3.11 Boyun oluşumu kademesinin termal kamera görüntüleri; a) Boyun oluşumun başlangıcı, b) Omuz bölgesinin oluşumu.....	107
Şekil 3.12 Omuz oluşumu kademesinin termal kamera görüntüleri; a) Omuz oluşumun başlangıcı, b) Vücut oluşumunun başlangıcı	107
Şekil 3.13 Omuz oluşumu kademesinin termal kamera görüntüleri; a) Vücut oluşumun başlangıcı, b) Vücut büyütmenin devam ettirilmesi	108
Şekil 3.14 Si ingot üretimi son ürünleri; a) Cz eritme bölgesinin görüntüsü, b) Kilit bölgesinin ve üretilen n-tipi tek kristalin Si ingotun görüntüsü	111
Şekil 3.15 Tek teli kesme sistemi, a) STX 1202 tek telli kesme cihazı, b) Elmas kesme teli, c) Elmas kesme telinin SEM görüntüsü	113
Şekil 3.16 Logitech PM5 lepleme sistemi	115
Şekil 3.17 Logitech PM5 parlatma sistemi	117
Şekil 3.18 Si wafer dilimleme; a) Logitech APD1 elmas diskli kesme cihazı, b) FV üretimi için 105 ± 5 mm çapındaki Si waferların 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarında kesme şablonu	119
Şekil 3.19 Soksalet sistemi.....	120

Şekil 3.20 Spin kaplama cihazı	121
Şekil 3.21 Firstnano Easy Tube 101 CVD cihazı	122
Şekil 3.22 Üç Faktörlü Box-Behnken deneysel dizayn setinin gösterimleri	124
Şekil 3.23 Thermo Scientific-Al K-Alpha XPS cihazı	127
Şekil 3.24 Thermo Scientific-ARL K α XRD cihazı	128
Şekil 3.25 Mitutoyo SJ210 Profilometre cihazı	129
Şekil 3.26 Yüzey pürüzlülükleri R $_a$, R $_q$ ve R $_z$ parametrelerinin şematik görünümü	129
Şekil 3.27 JEOL JSM-6060 taramalı elektron mikroskobu	131
Şekil 3.28 Yüzey pürüzlülükleri R $_a$ ve R $_t$ parametrelerinin şematik görünümü	132
Şekil 3.29 Nanosurf Flex Axiom AFM cihaz	133
Şekil 3.30 Thermoscientific Evolution 600 UV-Vis spektroskopi cihazı.....	134
Şekil 3.31 Atlas Suntest-SO güneş simülatörü sistemi	136
Şekil 4.1 SiP hammaddesinin XPS sonucu	137
Şekil 4.2 Çok kristalin Si XPS analizi sonucu	137
Şekil 4.3 Üretilen tek kristalin Si ingotlar; a) katkısız Si ingot, b-e) n-tipi Si ingot	138
Şekil 4.4 Si ingot üretimi sonrası sıcak bölge ekipmanlarının görüntüleri; a) Isıtıcı elektrot, b) Destek grafit potası, c) Koruyucu huni, d) Deforme olmuş kuvars pota.....	139
Şekil 4.5 3,5 m/s tel besleme hızında farklı kesme hızlarında üretilen Si waferların SEM görüntüleri: a) 0,5 mm/dk (50x), b) 0,5 mm/dk (1000x), c) 0,75 mm/dk (50x), d) 0,75 m/s (1000x), e) 1 mm/dk (50x), f) 1 mm/dk (1000 x)	141
Şekil 4.6 0,75 mm/dk kesme hızında farklı tel besleme hızlarında üretilen Si waferların SEM görüntüleri: a) 2,5 m/s (50x), b) 2,5 m/s, (1000x), c) 3,5 m/s (50x), d) 3,5 m/s (1000x), e) 4,5 m/s (50x), f) 4,5 m/s (1000x)	143
Şekil 4.7 Leplenmiş Si waferların AFM görüntüleri; a) 50 devir/dk-15 dk, b) 50 devir/dk-30 dk, c) 50 devir/dk-60 dk, d) 20 devir/dk-45 dk, e) 50 devir/dk-45 dk, f) 70 devir/dk-45 dk	145
Şekil 4.8 Parlatılmış Si waferların AFM görüntüleri; a) Parlatılmış, b) 2.5dk HF çözeltisinde bekletilmiş, c) 5dk HF çözeltisinde bekletilmiş, d) 10 dk HF çözeltisinde bekletilmiş, e) 20 dk HF çözeltisinde bekletilmiş	147
Şekil 4.9 Parlatılmış ve leplenmiş Si waferların reflektans ölçümü sonuçları.....	147

Şekil 4.10 Büyütülen tek kristalin Si ingotların XRD analizi sonuçları; a) katkısız, b) n-tipi.....	149
Şekil 4.11 Ağ. % 1 NaOH ile tekstürlenmiş Si yongaların SEM görüntüleri; a) % 8 IPA-40 dk, b) % 5 IPA-60 dk, c) % 2 IPA-40 dk ve d) % 5 IPA-20 dk..	151
Şekil 4.12 Ağ. % 3,5 NaOH ile tekstürlenmiş Si yongaların SEM görüntüleri; a) % 2 IPA-20 dk, b) % 2 IPA-60 dk, c) % 5 IPA-40 dk, d) % 8 IPA-20 dk ve e) % 8 IPA-60 dk	152
Şekil 4.13 Ağ. % 6 NaOH ile tekstürlenmiş Si yongaların SEM görüntüleri; a) % 2 IPA-40 dk, b) % 5 IPA-20 dk, c) % 5 IPA-60 dk ve d) % 8 IPA-40 dk..	153
Şekil 4.14 925°C’de % 1 borik asit/DI su kaynağından bor difüzyon edilmiş Si yonganın SİMS analizi	154
Şekil 4.15 Tekstürlenmiş ve İTO kaplanmış Si yongaların reflektans ölçümü sonuçları.....	155
Şekil 4.16 Üretilen güneş hücreleri; a) 2,5 x 2,5 cm boyutlarında üretilmiş tek kavşaklı güneş hücrelerinin görüntüsü, b) FV üzerindeki akım toplayıcıların optik mikroskop görüntüleri.....	156
Şekil 4.18 Ra sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SONR, b) FOTNR, c) SOTNR, d) SOLNR	163
Şekil 4.19 Rq sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SONR, b) FOTNR, c) SOTNR, d) SOLNR	163
Şekil 4.20 Rz sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SONR, b) FOTNR, c) SOTNR, d) SOLNR	164
Şekil 4.21 Ra sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) LR, b) SON, c) SONR, d) SOLNR.....	169
Şekil 4.22 Rt sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SON, b) SONR, c) SOLNR	169

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Silisyumun temel parametreleri	9
Tablo 2.2 Silisyum içerisindeki tipik empürilerin k_0 katsayıları	18
Tablo 2.3 Wafer hazırlama işlemi için standart bir proses akış listesi.....	50
Tablo 2.4 Tel ve iç çaplı testerele arasındaki temel farklılar.....	53
Tablo 2.5 Lepleme işleminde kullanılan aşındırıcı partiküller	59
Tablo 2.6a İki değişkenli lineer ve lineer olmayan regresyon modelleri.....	88
Tablo 2.6b Üç değişkenli lineer ve lineer olmayan regresyon modelleri	89
Tablo 2.7 Yüzey işleme prosesinin optimizasyonu ile ilgili yapıla çalışmaların özet listesi.....	96
Tablo 3.1 Cz sistemi parametrelerinin eritme prosesi boyunca değişimi	104
Tablo 3.2 Si ingot üretiminde boyun oluşumu parametreleri	106
Tablo 3.3 Si ingot üretiminde omuz oluşumu parametreleri.....	108
Tablo 3.4 Si ingot üretiminde vücut oluşumu parametreleri.....	109
Tablo 3.5 Si ingot üretiminde kuyruk oluşumu parametreleri	110
Tablo 3.6 Wafer kesme parametreleri ve faktör seviyeleri	114
Tablo 3.7 Deneyde kullanılan kesme parametreleri.....	116
Tablo 3.8 Si yongaların tekstürleme işlemlerinde kullanılan Box-Behnken deneysel dizayn seti	123
Tablo 3.9 Üç değişkenli bir sistemin Box-Behnken tasarımında kodlanmış faktör seviyeleri.....	125
Tablo 3.10 Si yongalar üzerinde bor silikat camı oluşturma işlemi proses parametreleri	126
Tablo 4.1 Büyütülen tek kristalin Si ingotların özellikleri.....	139
Tablo 4.2 Kesme parametreleri ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri	140
Tablo 4.3 Lepleme parametreleri ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri	144
Tablo 4.3 Si yongaların tekstürleme parametreleri ve reflektans sonuçları.....	150
Tablo 4.4 Üretilen güneş hücrelerinin güneş simülatörü sonuçları.....	157
Tablo 4.4 R_a için oluşturulan regresyon modelleri ve optimizasyon sonuçları	159
Tablo 4.5 R_q için oluşturulan regresyon modelleri ve optimizasyon sonuçları	161

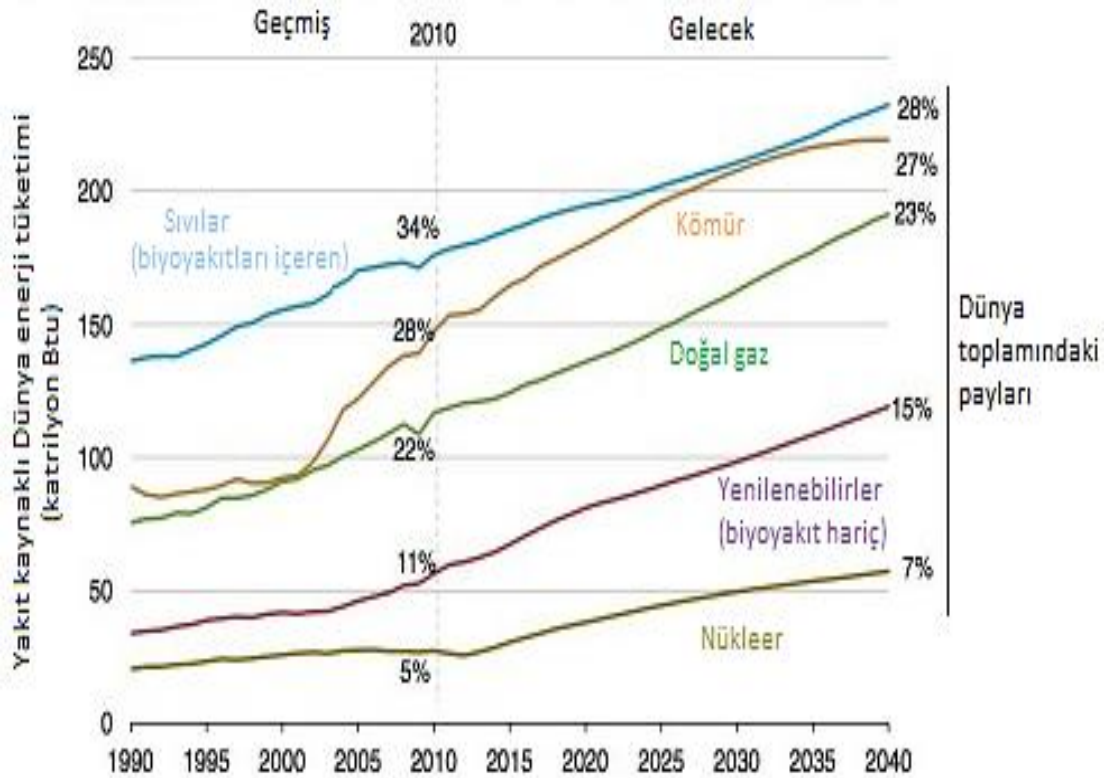
Tablo 4.6 R_z için oluşturulan regresyon modelleri ve optimizasyon sonuçları	162
Tablo 4.7 R_a için lepleme işlemi parametrelerinin regresyon modellerinin oluşturulması ve optimizasyonu	167
Tablo 4.8 R_t için lepleme işlemi parametrelerinin regresyon modellerinin oluşturulması ve optimizasyonu	168
Tablo 4.9 % R değerleri için regresyon modellerinin oluşturulması ve optimizasyon sonuçları.....	171



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Tarihsel olarak kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıt kaynakları, dünya enerji ihtiyaçlarını karşılamada egemen konumda olmuşlardır. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi artmakta olan dünya enerji talebini karşılamak için fosil yakıt kaynaklarının tüketiminin sürekli olarak arttığı görülmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde son 25 yıllık dönemde kömür tüketiminin % 70’in üstünde petrol tüketiminin % 30’unun üstünde ve gaz tüketiminin ise % 80’nin üstünde arttığı görülmektedir. Bununla birlikte bu denge gelecek yıllarda değişebilir çünkü fosil yakıtlar sadece taleple sınırlı değildir aynı zamanda fosil yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan gazların küresel ısınmaya sebep olması çevre üzerinde de çok ciddi zararlı etkilere neden olmaktadır (Ryu, 2015).



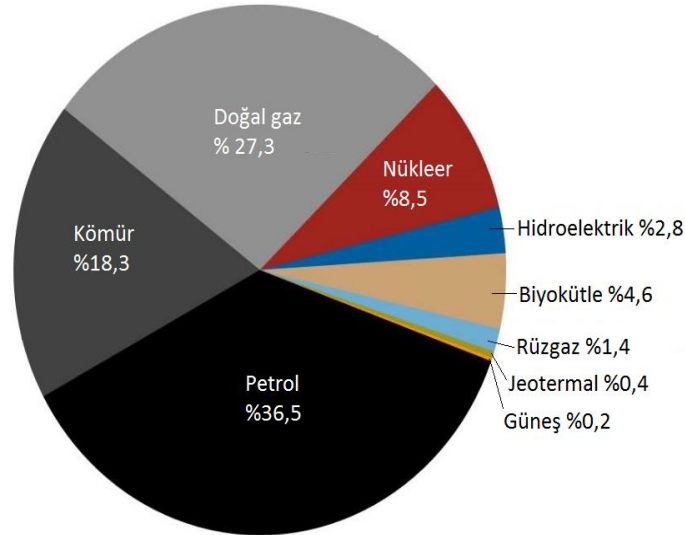
Şekil 1.1 Dünya fosil yakıt tüketimi (Sieminski, 2014)

Nükleer enerji nispeten düşük maliyeti ve temiz elektrik enerjisi üretimi özelliklerinden dolayı fosil yakıtlarının yerini almaktadır. Fakat nükleer enerji radyoaktif atıkların bertarafı ve nükleer santrallerin güvenliği ile ilgili kaygıları da arttırmaktadır. Bu nedenle fosil yakıtlara ve nükleer enerjiye olan bağımlılığı azaltmak amacıyla temiz enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanımının artırılması gerekmektedir (Ryu, 2015).

Fotovoltaikler (FV), sürdürülebilir enerji kaynakları için en umut verici adaydır. Çünkü FV'lerin kullandığı güneş ışınları dünyanın herhangi bir bölgesinde sınırlandırılmamış "sınırsız" miktarlardadır. Ayrıca, FV çevreyi kirletmeyen yani çevre dostu bir enerji kaynağıdır. FV'lerden elde edilen elektrik enerjisinin maliyeti 1988'den günümüze beş kat azalmış olmasına rağmen FV'ler Amerika Birleşik Devletleri'nde tüketilen toplam enerjisinin yalnızca % 0,2'sinden daha azını oluşturmaktadır. Bunun sebebi olarak FV'lerden elde edilen elektriğin maliyeti yaklaşık 0,15 \$/kWsaat iken fosil yakıtlardan ise 0,1 \$/kWsaat'ten çok daha düşük olmasıdır. Bunun sonucu olarak, FV'lerin dünyada kitlesel olarak kabulü için modüllerin maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir (Ryu, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli Türkiye'nin enerji tüketimi incelendiğinde görülmektedir. Avrupa Birliği'nin 2020 yılı için aldığı kararlar değerlendirildiğinde kullanılan enerjinin en az % 30'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması planlanmaktadır. Bu enerji planıyla birlikte Kyoto protokolü karbon ayak izinin azaltılması için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi de zorunlu kılmaktadır. Ancak Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı henüz yeterli seviyelerde değildir. Türkiye'nin 2023 enerji hedefleri arasında; 36000 MW hidroelektrik, 20000 MW rüzgar, 3000 MW'lık güneş, 600 MW'lık jeotermal, 2000 MW biyo-kütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının olması umut vericidir (Çanka Kılıç, 2015). Bu hedefler, güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilen sistemlerin pazar payının ülkemizde giderek artacağını göstermektedir.

FV modül maliyetinin azaltılması kullanılan malzemelerin ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve güneş hücresinin veriminin artırılmasıyla sağlanabilmektedir. Bu anlamda güneş hücrelerinin verimliliğinin artırılması FV sistem maliyetinin azaltılması için en etkili yol olduğu söylenebilmektedir. Çünkü daha yüksek hücre verimliliği yalnızca belirli bir güç üretmek için gerekli olan malzemelerin hücre veya modül sayısını azaltmakla kalmaz aynı zamanda sistem dengesi için gerekli maliyetleri de azaltmaktadır. ABD’de elektriğin teknik ve finansal girdiler ile hesaplanan ortalama perakende satış fiyatı yaklaşık 0,1 \$/kWsaat’tir. Günümüzde ortalama % 15 verimli Si tabanlı FV modüllerinin mevcut maliyeti 0,80 \$/kW saat ile 0,50 \$/kW saat aralığındadır. Hücreden modüle dönüşüm sonuçlarında % 10-15 (mutlak % 2-2,5) oranında verimlilik kaybına yol açtığı için buna karşılık gelen güneş hücresi verimliliği $\geq$ % 21 olması gerekmektedir. Önemli bir nokta da varsayılan toplam sistemin denge maliyeti 2 \$/kWsaat civarındadır (konut tipi ticari FV sistemleri için) ve bu değer mevcut duruma yakındır. Bununla birlikte, eğer sistem denge maliyeti 0,75 \$/kWsaat’e düşerse verimi % 21’den büyük hücrelerin maliyetleri 0,50 \$/kWsaat’in altına düşecek ve böylece enerji maliyeti global hedef olan 0,10\$/kWsaat’e ulaşabilecektir (Pudasaini, 2014).



Şekil 1.2 Amerika Birleşik Devletleri 2013 yılı enerji tüketimi grafiği (Ryu, 2015)

FV güneş hücrelerinin üretim maliyetinin en büyük kısmı Si altlık malzemesinin üretim maliyetidir (yaklaşık % 30). Bu anlamda güneş hücrelerinin üretim maliyetini

düşürmek, başlangıç Si ham maddesi olan çok kristalin (polikristalin) silisyumun tek kristalli olarak üretiminden başlayarak 1 mm'den ince disk şeklinde (wafer) hazırlamanın bütün aşamalarını kapsamaktadır (Yu ve ark., 2012). Büyük boyutlu yüksek kaliteli tek kristalin silisyum malzemesinin üretiminde Czochralski (Cz) kristal büyütme en çok kullanılan teknolojidir. Özellikle küçülen mikro işlemcilerin boyutları ve büyüyen cihaz karmaşıklığı alt katmanda (Si altlık) mikro kusur, katkılama miktarı ve saflık seviyelerinin çok iyi ayarlanmasını gerekmektedir. Altlık düzenliliği ve partiden partiye üretim tutarlılığı yarı iletken imalat sanayisi için gelir artışının önemli faktörleri içerisinde yer almaktadır. Cz prosesi, çalışma koşullarının çok yönlü ihtiyaçlarından dolayı istenilen malzeme kalitesi ve üretim hedeflerini karşılamada son derece sınırlı özelliklere sahiptir. Yarı iletken malzemelerde (özellikle FV'lerde) daha büyük yüzey alanı talebi mevcuttur. Bu amaçla 200-300 mm'den daha büyük çaplarda kusursuz kristal yapıya sahip Si ingotların üretilmesi ihtiyacı oluşmuştur. Ancak büyüyen ingot çaplarıyla birlikte proses sırasında bazı önemli problemler oluşmakta ve dolayısıyla bu problemlere proses aşamasında müdahale edilmesi ihtiyacı oluşmaktadır. En çok karşılaşılan problemler ise sıcak bölgenin ısı kontrolü, Si eriyiğinin konveksiyon davranışının dengelenmesi, yabancı atom (empürite) ve katkılayıcıların (dopant) kontrolsüz dağılması ve çap kontrolü olarak söylenebilmektedir (Duffar, 2010).

Yarı iletken malzemeler için gerekli olan yüzey kalitesi (<10 nm Ra) ve istenilen kalınlıkların azalması ($\geq 100-150$ μ m) Si wafer hazırlama adımlarının daha kontrollü ayrıca daha teknolojik olmasını gerektirmektedir (Doi ve ark., 2011). Günümüzde, Si ingotların wafer halinde kesilmesinde günümüzde en çok kullanılan yöntem aşındırıcı solüsyonlu tel testere sistemleridir. Bu sistemlere alternatif olarak elmas partiküllü tel kesme sistemleri de geliştirilmiştir. Bu iki sistem birbirleriyle kıyaslandığında aşındırıcı solüsyonlu sistemlerin yüksek verimde çok sayıda ingotu aynı anda kesebilme kabiliyetine sahipken elmas telli sistemler ise daha yüksek yüzey hassasiyetinde waferların kesiminde kullanılabilmektedir (Wu, 2016). Bir diğer önemli wafer hazırlama adımı ingottan kesilen waferların yüzeylerinin yüksek kalitede düzleştirilmesi işlemleridir. Bu aşamada Si wafer hazırlamada zımparalama ve lepleme sistemleri kullanılmaktadır. Bu iki sistem birbirleriyle kıyaslandığında

zımparalama sistemi çok hızlı malzeme uzaklaştırma özelliğine sahipken lepleme sistemi daha az hasarlı yüksek yüzey kaliteli Si waferların hazırlanmasında kullanılmaktadır (Doi ve ark., 2011).

Güneş hücresi verimini arttırmak amacıyla Si taban malzemesinin güneş ışınlarını bünyesinde daha fazla absorblaması için bazı yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemlerden en önemlileri Si altlığın anizotropik dağlanması ve yüzeyine yansıtma indisi düşük kaplamaların biriktirilmesidir. Anizotropik dağlama işleminde Si altlığın kristalografik yönelimleri çok önemli etkiye sahiptir ve Si'nin farklı yönlerinin kimyasallarla reaksiyona girme hızlarının farklı olması dolayısıyla piramit benzeri yapıların oluşmasını sağlamaktadır. Böylece, yüzeye gelen fotonlar bu piramit yapılarda farklı açılarda kırılarak daha az yansımaya uğrarlar ve Si bünyesinde daha fazla absorblanırlar (Luque ve Hegedus, 2011).

Mühendislik uygulamalarında üretim süreçlerinin doğru tanımlanması ve modellenmesi üretilen ürünlerin kalitesini artırırken maliyetleri de düşürmektedir. Dolayısıyla, yapay sinir ağları, tepki yüzeyi analizleri ve regresyon analizleri bu amaç için sıklıkla kullanılmaktadır. Regresyon analizleri bu analizler arasında özellikle üretim parametrelerinin üretim çıktısına göre matematiksel modellenmesine fırsat vermesi sebebiyle oldukça dikkat çekicidir. Ayrıca, oluşturulan bu regresyon modellerinin doğruluk katsayıları da (R^2) istatistiksel olarak hesaplanabilmektedir. Matematiksel modelleme ile deneysel sonuçlara göre optimum deneysel parametreler elde edilebilmektedir (Chiang, 2003; Draper ve ark., 1966; Fox, 1997; Kayabasi ve ark., 2017; Kutner ve ark., 2004). Ancak gerçek anlamda deneysel optimizasyon yapılabilmesi için bazı optimizasyon algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla mühendislik uygulamalarında sıklıkla Genetik Algoritma, Arı Kolonisi Algoritması, Karınca Yuvası Algoritması, Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution) Algoritması, Nelder-Mead Algoritması, Rastgele Arama (Random Search) Algoritması ve Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing) Algoritmaları kullanılmaktadır (Karnopp, 1963; Rao ve Rao, 2009; Suresh ve ark., 2002; Zain ve ark., 2011).

Yüksek verimli güneş hücresi üretimi çok kristalin Si hammaddesinin üretiminden başlanılarak yüksek maliyetli birçok üretim adımına sahiptir. Güneş panellerinin maliyetinin azaltılması ve verimin artırılması deneysel çalışmaların optimum deneysel parametreler ile yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Yapılan tez çalışmasında, Cz-Si ingot büyütülmesi, wafer kesme, wafer lepleme ve güneş hücresi üretimi ile ilgili literatür temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Literatürden farklı olarak ise Si wafer kesme, lepleme ve güneş hücresi üretiminde yüzey tekstürleme işlemlerinde deneysel parametrelerin regresyon analizleriyle matematiksel modelleri oluşturulmuştur ve bu modeller kullanılarak optimizasyon algoritmaları ile optimum deneysel hedeflerin elde edilmesi çalışmaları yapılmıştır.

Tez çalışmasının hedefleri;

(i) Türkiye’de ilk kez bu tez çalışması ile tek kristalli katkısız ve n-tipi Si ingotlar üretilecektir. (ii) Türkiye’de ilk kez tek kristalin Si tabanlı güneş hücresini çok kristalin Si hammaddesinden başlayarak tüm altlık üretim aşamalarını içerecek şekilde üretilecektir. (iii) Si ingotun kesilmesi, Si wafer lepleme ve Si yongaların tekstürlenmesi işlemlerinde regresyon analizi ile deneysel veriler matematiksel modellenecektir. Ayrıca bu modeller ile çok sayıda algoritmanın (Diferansiyel Gelişim, Nelder-Mead, Rastgele Arama ve Benzetimli Tavlama Algoritmaları) kullanıldığı optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir.

Tez çalışmasının organizasyonu;

Mevcut tez çalışması toplam beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm Si wafer ve güneş hücresi üretimiyle ilgili genel bilgiler içeren giriş bölümüdür. Bu bölümde ayrıca deneysel çalışmalarda izlenen prosedürler ve yaklaşımlar hakkında kısa bilgiler de verilmiştir. İkinci bölümde tez çalışmasının teorik alt yapısı detaylı bilgiler içerecek şekilde verilmiştir. Bu bölüm özellikle Cz sisteminin çalışma prensipleri, regresyon analizleri ve optimizasyon algoritmaları hakkında detaylı bilgiler içermektedir. Deneysel çalışmaları içeren üçüncü bölümde hammadde, kullanılan cihazlar ve üretim süreçleri sunulmuştur. Dördüncü bölümde deneysel

Çalışmaların, regrasyon analizlerinin ve optimizasyon çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Beşinci bölüm ise genel sonuçları, gelecek planlarını ve önerileri içermektedir.

Tez çalışmasının çıktıları;

Deneysel alışmalar sonucunda; (i) Bir adet katkısız ve dört adet n-tipi tek kristalin Si ingot üretimi gerçekleştirilmiştir. (ii) Üretilen Si ingotlar wafer hazırlama aşamalarından geçerek güneş hücresi üretiminde kullanılacak altlıklar halinde hazırlanmıştır. (iii) Si ingotların elmas telli kesme sistemiyle wafer halinde kesilmesi ve elde edilen waferların leplenmesi çalışmalarında deneysel parametreler ve yüzey pürüzlülük değeri kullanılarak regresyon analizleri yapılarak herbir yüzey pürüzlülüğü değeri için fonksiyonlar oluşturulmuştur. Ayrıca bu fonksiyonlar Diferansiyel Gelişim, Nelder-Mead, Rastgele Arama ve Benzetimli Tavlama Algoritmalarında kullanılarak yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonu için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. (iv) Si wafer kesme ve lepleme işlemlerinde yapılan modelleme ve optimizasyon çalışmalarının benzeri Si altlıkların tekstürlenmesi çalışmasında % Reflektans değeriinin minimizasyonu için gerçekleştirilmiştir. (v) Si tabanlı tek kavşaklı güneş hücreleri üretilmiştir ve performansları güneş simülatörü ile ölçülmüştür.

BÖLÜM İKİ

TEORİK ALTYAPI

2.1 Silisyum

Silisyum (Si) yerkabuğunda birçok bileşik formlarında bulunan bir elementtir. Yarı iletken ve Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) uygulamalarında yaklaşık 250 bin ton/yıl (2013) yüksek saflıkta Si kullanılmaktadır. Günümüzde, kullanılan Si'nin çoğu antimon, arsenik, fosfor gibi elementler katılarak oluşturulan n-tipi veya bor katılarak üretilen p-tipi Si'dir ve katkılama konsantrasyonu 10^{13} - 10^{20} atom/cm³ arasındadır. Teknolojik uygulamalarda katkısız veya çok az katkılı (yüksek dirençli) Si oldukça az miktarlarda kullanılmaktadır (Bye ve Ceccaroli, 2014).

Yarı iletken uygulamalarında kullanılan saflaştırılmış Si malzemesini üretmekte en yaygın kullanılan başlangıç hammaddesi kuvars veya silisyum dioksittir (SiO₂). Yarı iletken dereceli Si üretiminde en yaygın kullanılan saflaştırma yöntemi Siemens yöntemidir. Geleneksel Siemens prosesinde tipik olarak 9N-11N saflıktaki (her milyarda bir (ppb) safsızlık içeren) tek kristalin Si üretilmektedir (Andreaco ve ark., 2014). Modifiye edilmiş Siemens prosesi ise 6N saflıktaki Si üretimi için geliştirilmiş özel bir prosestir ve geleneksel Siemens prosesi ile kıyaslandığında daha az enerji tüketmektedir. Bu prosesle çok az miktarda çözünmüş empürite atomu içeren yüksek saflıkta Si üretilmektedir. Si tek kristaller Czochralski yöntemiyle büyütüldüğünde, eritme işlemi bazı safsızlıklar içeren kuvars pota içerisinde yapıldığı için üretilen kristalin safsızlık seviyesi de artmaktadır. Mühendislik uygulamalarında kirliliklerin yapı içerisine girmesi Si altlığın imalatı sırasında gerçekleşmektedir. Si'de en yaygın karşılaşılan empürite oksijendir. Oksijen Si yapısı içinde iki role sahiptir. Bunların ilki, Si kafesin yüksek sıcaklıklarda güçlendiren yararlı ısı etkisidir. Diğerisi ise yapı içinde kusur yaratması ve verici oluşumuna sebep olan negatif bir etkidir. İkinci en yaygın empürite entegre devre uygulamalarında, Si'nin özelliklerini iyileştirmek amacıyla çok az miktarda kullanılan azottur (Forster ve ark., 2012). Günümüzde düşük maliyetli güneş enerjisi Si tabanlı güneş hücreleri ile üretilmektedir. Bu durum Si'ye talebi arttırmıştır. Artan

talebi karşılamak amacıyla alternatif Si kaynakları kullanılmaya başlanmış ve yeni saflaştırma tekniklerini ortaya çıkarmıştır (Tilli ve Haapalinna, 2009). Ancak güneş hücrelerinde kullanılabilecek Si'nin üretilbildiği bu yöntemler MEMS uygulamaları için yüksek saflıkta yarı iletken Si'yi üretememektedir (Istratov ve ark., 2006; Woditsch ve Koch, 2002).

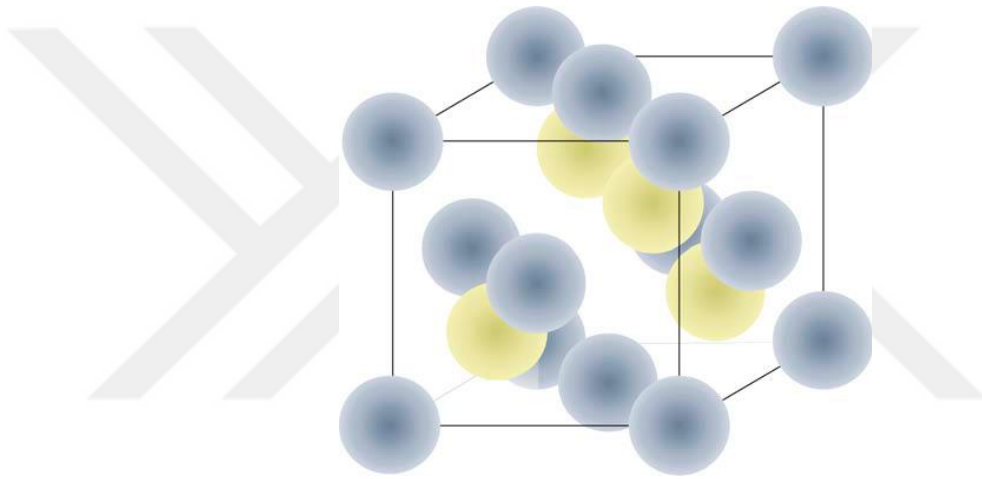
Tablo 2.1 Silisyumun temel parametreleri (Tilli ve ark., 2015)

Atom numarası	14
Atom kütlesi	28,0885 (% 92,23) g/mol
Kristal yapısı	Elmas kübik
Kafes sabiti	0,5431 nm
Si atomları	$5 \cdot 10^{22}$ Atom/cm ³
Erime noktası	1687 °K
Spesifik yoğunluğu	2,329 g/cm ³ (298° K'de)
Spesifik yoğunluğu (sıvı)	2,57 g/cm ³
Termal iletkenliği	149 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Termal genleşme katsayısı	$2,56 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹ K ⁻¹ (298 K'de)
Spesifik ısı kapasitesi	19,79 J·mol ⁻¹ K ⁻¹ , 0,705 J/(g·K)
Young modülü	150 GPa
Sertlik	7 Mohs, 850 Kg/mm ² (Knoop sertliği)
Hacimsel sıkıştırma katsayısı	$1,02 \cdot 10^{-8}$ kPa ⁻¹
Yansıtma indeksi	$\sim 3,54 \Lambda$ 1,1 μ m, RT ve $\sim 3,48 \Lambda$ 2 μ m, RT

Pek çok MEMS uygulaması için Si ideal bir malzemedir. Si normal ortamlarda oldukça inert, kızılötesi ortamda şeffaf, oda sıcaklığında sert ve plastik deformasyona uğramayan kırılma mukavemeti yüksek bir malzemedir (Tilli ve ark., 2015). Si'nin en önemli özelliği, direncinin mikro-ohm santimetre (m Ω ·cm) ile kilo-ohm santimetre (k Ω ·cm) aralığında istenilen seviyelerde katkılama işlemi ile ayarlanabiliyor olmasıdır. Ayrıca, Si yüzeyinde koruyucu bir SiO₂ tabakası büyütülebilmektedir. Si kristali mekanik, kimyasal ve elektriksel olarak anizotropik özelliklere sahiptir. Bu özellikler MEMS bileşen tasarımlarında kullanılmaktadır. Çok büyük boyutlarda tek kristalin Si çeşitli kristal yönlenmelerinde oldukça basit bir şekilde üretilmektedir (Petersen, 1982). Si'nin bazı temel parametre değerleri Tablo 2.1'de listelenmiştir. Bu parametrelerin bazıları sıcaklığa bağlı oldukları gibi katkılama miktarına da bağlıdır (Tilli ve ark., 2015).

2.1.1 Silisyumun Kristalografisi

Si atomların kovalent olarak bağlandığı bir elmas kübik kristal yapısında kristalleşmektedir (Şekil 2.1). Germanyum (Ge) gibi periyodik tabloda dördüncü grupta yer alıp aynı kristal yapıya sahiptir. Birim hücresi 8 atom içermekte ve atomlar yüzey merkezli kübik (YMK) Bravais kafes yapısındadır (Luque ve Hegedus, 2011). Her YMK kafesinde ikinci birim hücre uzunluğunun dörtte biri [111] yönüne doğru yer değiştirmiş iki tane atom (motif) vardır. Oda sıcaklığında birim hücre uzunluğu 0,5431 nanometredir (Tilli ve ark., 2015).



Şekil 2.1 Silisyum birim kafes yapısı (Tilli ve ark., 2015)

Si kafes paketleme yoğunluğu yaklaşık % 34'tür. Bu değer, paketleme yoğunluğu % 74 olan YMK kafesler (bakır vb.) ve paketleme yoğunluğu % 68 olan hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki (saf demir vb.) ile kıyaslandığında Si'nin paketleme yoğunluğu oldukça düşüktür. Elmas kübik kafes içindeki en büyük boşluklar ev sahibi atomun % 41'lik alanını işgal eden oktahedral boşluklardır. Kafesin oktahedral boşluklarında çözünen atomlar arayer atomları olarak isimlendirilmekte ve onların çözünürlüklerine arayer çözünürlüğü denilmektedir. Si içindeki en genel arayer çözünen atom oksijendir. Kristal büyütülmesi sırasında arayer haldeki oksijen maksimum denge içeriği yaklaşık 20 ppm olabilmekte ve bu değer Si içerisinde 10^{18} atom/cm³'e karşılık gelmektedir. Karbon Si içinde çok karşılaşılan ikinci arayer safsızlıktır. Genel uygulamalarda yarı iletken sınıfı malzemeler içerisinde 0,3 ppm konsantrasyonda bulunmaktadır. Bor, antimon, arsenik ve fosfor gibi katkı maddesi

atomları yüksek katkılama seviyeleri haricinde ($>10^{18}$ atom/cm³ Si) ikame kafes bölgelerinde (yeralan bölge) katkılama elementi olarak kullanılmaktadır. Maksimum ikame çözünürlüğü atom büyüklüğüne ve diğer faktörlere bağlı ve tipik olarak Si içerisinde 10^{21} atom/cm³'tür (Hull, 1999; Luque ve Hegedus, 2011; Martin ve ark., 1998). Si bazlı MEMS teknolojilerinde yaygın olarak [100] yönünde yönlendirilmiş Si waferlar kullanılmaktadır. Yani Si waferın yüzeyi (100) kristalografik yüzeyidir. Daha az sıklıkta ise [111] veya [110] yönlerinde yönlendirilmiş waferlar kullanılmaktadır (Tilli ve ark., 2015).

2.1.2 Silisyum Kafes Kusurları

Tek kristalin Si avogadro sabitini tanımlamak için standart olarak kullanılabilecek derecede neredeyse mükemmel olmasına rağmen Yüzen Bölge (Float Zone (Fz)) ya da Cz-Si kristalleri büyütme metodu ile ilişkili olarak bazı kusurlar içermektedir (Tilli ve ark., 2015). Ayrıca Si waferların işlenmesi sırasında kasıtlı ya da kasıtsız olarak kusurlar da oluşmaktadır. Bu kusurlar; nokta kusurları (veya aglomeraları), doğrusal kusurlar, düzlemsel kusurlar veya hacimsel kusurları olarak sınıflandırılabilir (Luque ve Hegedus, 2011).

Si kristalleri (ingot) silisyum eriyiği içerisinde büyütülerek üretilmektedir. Nokta kusurlarının (boşluklar ve kendi kendine arayerler) düşük difüzyonundan dolayı, katılma noktasındaki soğutma fazının denge konsantrasyonunda termodinamik olarak oluşan kusurların çoğu sistem içerisinde hapsedilmektedir. Katılma ara yüzeyine yakın sıcaklık gradyanına ve yüksek sıcaklıkta geçen zamana bağlı olarak nokta kusurları da oluşabilmektedir (Ekhult ve Carlberg, 1986; Hoshi ve ark., 1980; Tilli ve ark., 2015; Zulehner, 1983). Cz sisteminde büyütülen kristaller oksijen ve karbon gibi yabancı atomları içermektedirler. Başlangıçta, bu kirlilikler donma sıcaklığındaki kristalin içerisinde birkaç atomlu nokta kusurlarıyken normal cihaz işlem sıcaklıklarında aşırı doymuş hale gelirler ve bunun sonucunda hacim, kesme, ikincil doğrusal (lineer) veya düzlemsel kusurları üretirler. Ayrıca büyüyen bir oksit çökeltisi etrafında dislokasyon düğümü veya bir dizilim hatası (stacking fault) oluşabilmektedir (Falster ve Voronkov, 2000; Falster ve ark., 2000). Oksijen,

elektiriksel veya optik olarak aktif kusurlar oluşturabilmekte ve bu kusurlar yalnızca cihaz üretimi aşamasında değil aynı zamanda kristal büyütme aşamasında da oluşabilmektedir. Lineer kusurlar dislokasyon olarak isimlendirilmektedir. Cz veya Fz yöntemleriyle büyütölen tek kristalin Si içerisinde (veya bu kristallerden kesilmiş waferlardan) dislokasyon yoğunluğu pratikte sıfırdır. Si waferın yüksek sıcaklıklarda proses edilmesi sırasında uygulanan stres, dislokasyonlar üretebilmektedir. Bu streslerin kaynağı ısııl işlem aşamalarındaki sıcaklık geçişi sırasındaki termal gradyan değişimi veya yüksek sıcaklıklarda aşırı katkılanmış bölgelerin sebep olduğu uyumsuzluklar olabilir. Kristal kafes boyunca dislokasyon hareketi kalıcı deformasyonlara sebep olmaktadır. Si içerisindeki dislokasyonlar (111) düzlemleri boyunca [110] yönünde hareket ederler. Bu deformasyon bir kayma çizgisi gibi görölebilir (Tilli ve ark., 2015).

Genellikle, Si waferlardaki dislokasyonlar cihaz performansı üzerinde cihazın çalışmamasına bile sebep olabilecek olumsuz etkilere sahip olabilirler. Dislokasyonlar empürileri kendilerine çekmektedirler ve bunun sonucunda dislokasyon hareketleri çökelti kolonilerinin (yığılmasının) oluşmasıyla sonuçlanabilmektedir. Ayrıca, dislokasyonlar uyumsuz dislokasyonlar olarak isimlendirilirler ve farklı kafes sabitlerine sahip iki Si kafes parçasını birbirleriyle eşleştirebilir (Borghesi ve ark., 1995). Bu durum altlık üzerinde epitaksiyel katman büyütöldüğünde ve bunların katkılama miktarları farklı olduğunda ortaya çıkmaktadır. Si'nin dağlandığı MEMS uygulamalarında genellikle dislokasyon içeren alanlar dislokasyon çekirdeği etrafındaki gerilim alanından dolayı homojen olmayan şekilde dağlanmaktadır. Dislokasyon varlığının bir sonucu yüksek sıcaklıklarda akma dayanımının azalmasıdır. Dislokasyonsuz Si'nin akma dayanımı plastik deformasyonun meydana gelebileceği sıcaklıklardaki dislokasyona sahip Si'den daha yüksektir. Bu durum yapıda bir kez kayma oluştuğunda Si waferın termal işlemlerde kaymaya daha yakın olduğu anlamına gelmektedir. Fakat dislokasyonlar empürite atomlarının dislokasyon çekirdeğine difüze olmasıyla kilitlenebilir ve bu durum ilave kaymaya karşı direnci arttırır. Düzlemsel kusurlar dizilim kusurları olarak isimlendirilir. Si içerisindeki dizilimde kusurlar (111) atomik düzlemindedir ve onların çevreleri kısmi dislokasyonlar ile çevrilidir. Bir Si kafesi

fazla atomik düzlem içerebilir ve bu durum dışsal düzlem olarak isimlendirilen bir dizilim kusurudur. Eğer bir atomik düzlem eksikse bu düzlemsel hataya içsel dizilim kusuru denir. Dışsal dizilim hataları aşırı Si arayerleri tarafından oluşturulurlar ve dışsal dizilim kusuruna tipik örnekleri oksitlenmeye bağlı dizilim kusurları veya büyüyen oksit çökeltileridir (Bergholz ve Gilles, 2000; Sinno ve ark., 2000). Si wafer içerisindeki en büyük dizilim hatası boyutu 100 μm 'nin üzerine çıkabilmesine rağmen genellikle 100 μm 'den daha azdır. Si içerisindeki hacimsel kusurlar çökeltilerdir. Kafes dizilmesi sırasında uyumsuzluk olduğunda tutarlı veya kafes hizalamasındaki uyumsuzluklarda tutarsız olabilirler. Küçük çökelti tutarlıdır ve büyüdüklerinde ilk önce yarı tutarlı ve daha sonra birbirleriyle tutarsız hale gelirler. Çökelti normalde silikatlar veya silisyum dioksitler gibi silisyum bileşikleridir (Tilli ve ark., 2015).

Cz sisteminde büyütölmüş silisyum kristalleri eğer düşük oksijen içrikli bir kuvars pota kullanılmadan üretildi ise wafer işleme sıcaklıklarından aşırı doyun hale gelmiş çözönmüş oksijen içirirler. Genişletilmiş termal prosesler oksijen çökeltilerini büyötmektedir. Ayrıca, küçük parçacıklarının üzerinde büyük parçacıklar çökelse bu çökeltilerin yeniden dağıtılmasına sebep olmaktadır. Bu fenomenaya “Ostwald Olgunlaşma Prosesi” denmektedir. Belirli bir sıcaklıkta kritik bir çökelti boyutu vardır. Bu sıcaklıkta yeterli doyunluk olmaması durumunda büyük çökelti daha da büyömekte ve küçük çökelti yok olmaktadır. Çökelti çekirdeklenme prosesi özellikle kristalin büyöülmesi termal sürecine bağlıdır. Bu nedenle farklı kaynaklardan elde edilen Si waferlar farklı özellikler gösterebilmektedir. Si içinde boşluklar birleşerek hacimsel kusur olarak bilinen boşluk kümesini oluştururlar. Bu kusurun boyutu ve yoğunluğu kristal büyötleme prosesine bağlı olarak onlarca nanometre ile 200 nm arasında değişmektedir (Tilli ve ark., 2015).

2.1.3 Silisyumun Mekanik Özellikleri

Silisyum sert ve gevrek bir malzemedir. Tek kristalin Si oda sıcaklığında ve gerilim altında belirgin bir plastik deformasyon gözökmeksizin kırılma gerilimi

oluşuncaya kadar elastik şekilde uzamaktadır. Bu nedenle, stres altındaki Si waferin yüzeyindeki veya çevresindeki kusurlar (çizikler, oyuklar, mekanik hasar vb.) çentik etkisine neden olup erken çatlamaya sebep olmaktadır. Parlatılmamış Si waferlar parlatılmışlar ile kıyaslandığında kırılmaya daha yatkındırlar. İdeal güçlü waferlar çift tarafı parlatılmış ve kenar pahlaması yapılmış olanlardır. Bu özellikleri araştırmak amacıyla Samuel ve Robert, çentik açılmış çubuk şeklindeki tek kristalin Si örnekleri dört nokta eğme testlerine sokmuşlar ve 545 °C sıcaklıkta ortam basıncında bu numunelerin gevrek-sünek geçiş sıcaklıklarını hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre oda sıcaklığında tek kristalin Si'nin kırılma tokluğunu 270 MPa olarak bulmuşlardır (Samuels ve Roberts, 1989). Rabier ve Dement 1,5 GPa basınç altında Si'nin gevrek-sünek dönüşüm sıcaklığını 275 °C'ye düştüğünü belirtmişlerdir (Rabier ve Dement, 2000). Vedde ve Gravesen çift halka eğme testi ile parlatılmış Cz waferların 1,18 GPa ve Fz waferların ise 1,01-1,12 GPa kırılma mukavemeti (% 50 olabilirlik seviyesi) değerlerini sahip olduklarını göstermişlerdir. Ayrıca, kesilmeden sonra herhangi bir işlem yapılmayan waferlar için 180-220 MPa ve leplenmiş Si waferlar için 270-330 MPa değerleri elde etmişlerdir (Vedde ve Gravesen, 1996). Bununla birlikte, bu değerler sadece birer göstergedir çünkü gerçek uygulama test koşullarında başlangıç malzemesinin kalitesi (wafer üretim prosesleri ve sonraki yüzey işlemleri) kırılma eğilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Si yüksek sıcaklıklarda plastik deformasyon göstermeye başlamaktadır. Üst akma noktasına ulaşıldığında dislokasyonlar üç hareket göstermektedirler. Bunlar, (i) üremeye başlarlar, (ii) birbirleriyle çarpışırlar ve (iii) kayma düzlemlerinde hareket ederler. Bu şekilde gerilim daha düşük akma noktalarına iner ve plastik deformasyon artarak devam eder. Dislokasyon yoğunluğu arttıkça ilk olarak dislokasyonlar birbirlerine temas ederler daha sonra birbirlerinin kayma hareketlerini engellerler ve bu şekilde kafes güçlenir. Sonuç olarak, kırılma gerçekleşene kadar yukarı doğru ilerleyen deformasyon artar (Sumino ve ark., 1980; Tilli ve ark., 2015).

Pratik uygulamalarda oksijen içeren Cz-Si oksijen içermeyen Fz-Si karşılaştırıldığında kaymaya karşı daha yüksek toleransa sahip olduğu söylenebilir. Bu durum, oksijen içeren Cz'nin içerisindeki deformasyon durduğunda oksijenin difüzyonuyla dislokasyonların hızlı bir şekilde kilitlenmesinden kaynaklanmaktadır.



Silisyum 1,12 eV'lık bir bant aralığına sahip, periyodik tabloda IV. grupta yer alan bir yarı iletkenidir. Saf Si oda sıcaklığında neredeyse yalıtkandır. Grup III veya V elementleriyle katkılama yapıldığında Si'nin direnci geniş bir aralıkta değiştirilebilir (Luque ve Hegedus, 2011).

Yarı iletkenler yalıtkan malzemeler ile iletken malzemeler arasında elektrik iletkenliğine sahip katı malzemelerdir. Bir malzemenin iletken, yarı iletken veya yalıtkan olarak davranmasına neden olan fiziksel neden malzeme içerisinde serbest akım taşıyıcılarının varlığıdır (Anttila ve ark., 1985). Yarı iletkenler, valans bandıyla

iletim bandı arasındaki dar bant genişliği ile karakterize edilirler. Saf yarı iletkenler oda sıcaklığında yalıtkan gibi davranmaktadırlar fakat sıcaklığın artmasıyla bu davranışları yapı içerisindeki az miktardaki empürite atomu yardımıyla ciddi değişimlere uğramaktadır. Yarı iletkenlerin (özellikle Si) elektriksel iletkenlik davranışları çok küçük miktarlarda elektriksel aktif empüritelerin yapı içerisine katkılanması ile tamamen değişebilmektedir. Bu durum elektriksel olarak aktif yabancı maddelerin (dopantlar) kolayca değerlik elektronlarını Si'ye verdiğini veya boşluklar oluşturarak Si'nin elektronunu aldığı şeklinde açıklanabilmektedir. Ayrıca bu elektronların ya da boşlukların herhangi bir bireysel atoma bağlanmadığı ve yapı içerisinde uygulanacak elektrik alan ile kolayca hareket ettiğini de belirtmek gerekmektedir (Glunz ve ark., 2001; Shimura, 2012; Sze, 1981; Tilli ve ark., 2015).

Cz-Si kristalleri waferların ve kristallerin kalitelerini ayarlamak için kontrollü miktarlarda empürite atomları içermektedir. Fakat bazı empüriteler belirli bir konsantrasyon miktarından daha fazla yapı içerisinde bulunuyorsa Si kristal yapısına zarar vermektedir. Alıcı (aseptör) veya verici (donör) empürite atomları ve oksijen kullanılacağı yere göre uygun miktarlarda Si kristali için faydalı elementlerdir (Sumino ve Yonenaga, 1994; Taishi ve ark., 2002). Alıcı ve verici katkı maddeleri genellikle periyodik cetvelinin III. ve V. grup elementleridir. Alıcı olarak en çok kullanılan element bordur (p-tipi kristaller için) ve verici olarak en çok kullanılanlar elementler ise fosfor, antimon ve arseniktir (n-tipi kristaller için). Genellikle dopantlar Si kristalinin büyütülmesi sırasında başlangıç malzemelerine eklenmekte ve bununla birlikte katı miktarını değiştirmek ya da aygıt üretimi aşamasında bir p-n kavşağı oluşturmak için katkı maddeleri yapıya arzulan miktarlarda ilave edilebilmektedir (Myers ve ark., 2000; Phang ve Macdonald, 2011). Yarı iletkenlerde elektriksel özelliklerin modifikasyonu, cihaz üretimi sırasında uygulanabilecek bazı uygulamalarla gerçekleştirilebilir. Bu süreçte hem geleneksel (katkı maddelerinin derin difüzyonu) hem de geliştirilmiş ileri teknikler (iyon emdirme vb.) kullanılmaktadır (Tilli ve ark., 2015).

Dopantlar Si kristali içinde ikame niteliğindeki yabancı atomlardır (kafesteki Si atomlarının yerini alırlar) ve her alıcı veya verici atomu başına silisyum bir boşluk

veya elektronunu iletim bandına bağışlar (Shimura, 2012; Sze ve Ng, 2006). Alıcılar ve vericiler yük taşıyıcı konsantrasyonunu ve kristalin yük taşıyıcı tipini kontrol etmek için kullanılırlar. Bu parametreler aslında wafer üzerinde kurulan yarıiletken cihazların çalışması göz önüne alındığında çok önemlidir (Sze ve Ng, 2006). Katkılama işleminde bor yerine III. gruptan bazı elementlerde kullanılabilir. Fakat bu durumun bazı sınırlamaları mevcuttur ve uygulaması yaygın değildir (Glunz ve ark., 2001). Fosfor, antimon ve arsenik vericileri farklı özelliklere sahip oldukları için birbirlerinin yerlerine geçemezler. Örneğin, farklı dopant elementleri elde edilebilecek en düşük direnç değerleri için farklı limit değerlerine sahiptirler. Ayrıca öz direncin kristal yapısı içerisindeki eksenel değişimi kullanılan dopanta bağlıdır (Sze ve Ng, 2006). Bazı dopantlar için kristal büyütme veya daha sonraki proseslerde bazı güvenlik kısıtlamaları mevcuttur ve kullanımında bazı önlemler gerekmektedir. Bor ve fosfor hafif katkılı (10^{16} atom cm^{-3} Si) kristallerde tipik olarak kullanılırken bor, fosfor, arsenik ve antimon aşırı katkılanma ($>10^{18}$ atom cm^{-3} Si) durumlarında kullanılabilir (Luque ve Hegedus, 2011; Tilli ve ark., 2015).

Kuvars potadan kaynaklanan oksijen kirliliği hemen hemen hiç oksijen içermeyen Fz-Si'nin aksine Cz-Si en karakteristik empüritelerindendir. Kristal büyütme sürecinde ana kalite faktörlerinden birisi oksijen konsantrasyonunun kontrolüdür. Azot, oksijen çökeltisini veya boşluktan kaynaklanan kusurların boyutlarını azaltmak için ve/veya kristalin mukavemetini arttırmak için kasıtlı olarak yaklaşık 10^{15}cm^{-3} konsantrasyonlarda yapı içerisine katılabilmekte ve genellikle büyük çaplı waferların ticari uygulamalarında kullanılmaktadır (Lin, 1994; Machida ve ark., 2000). Diğer alıcı veya verici dopantları direncin ve muhtemel tahmin edilemeyen kusurların engellenmesi amacıyla bir arada kullanılmamaktadır. Fakat bazı istenmeyen dopantlar bazı potansiyel kaynaklardan kristal yapı içerisine karışabilmekte ve bu karışma tam anlamıyla önlenememektedir. Örneğin, az miktarda alüminyum ve bor katkısı bu elementleri bünyesinde içeren doğal kuvarstan yapılmış potadan eriyik içerisine geçebilmektedir. Cz-Si kristallerinde zararlı empüriteler arasında karbon, demir, bakır, nikel gibi geçiş metalleri safsızlıkları ve sodyum gibi toprak alkalileri bulunabilir. Karbon Si içindeki elektriksel olarak pasifken geçiş metali safsızlıkları

iletim ve balans bantları arasında derin kirlilik seviyeleri oluşturabilirler (Davis ve ark., 1980; Harada ve ark., 1995; Tilli ve ark., 2015).

Tablo 2.2 Silisyum içerisindeki tipik empüritelerin k_0 katsayıları (Tilli ve ark., 2015)

Element	K_0
O	≈ 1
B	0,8
P	0,35
As	0,3
C	0,07
Sb	0,023
Ga	8×10^{-3}
Al	2×10^{-3}
Na	$1,7 \times 10^{-3}$
N	7×10^{-4}
Cu	4×10^{-4}
Ni	$\approx 1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$
Fe	8×10^{-6}

Karbon ve metal empüritelerinin konsantrasyonları kristal gövdesi boyunca değişiklik gösterebilmektedir. Bunun sonucu olarak kristalin farklı bölümlerinden üretilen waferlarda farklı davranışlar gözlemlenebilmektedir. Normal donma eşitliği detaylı bir şekilde incelendiğinde eksenel konsantrasyon profili hakkında bilgiler elde edilebilmektedir. Eşitlik 2.1 eriyik içerisinde katılan kütlenin bir fonksiyonu olarak empürite konsantrasyon varyasyonlarını vermektedir (Tilli ve ark., 2015).

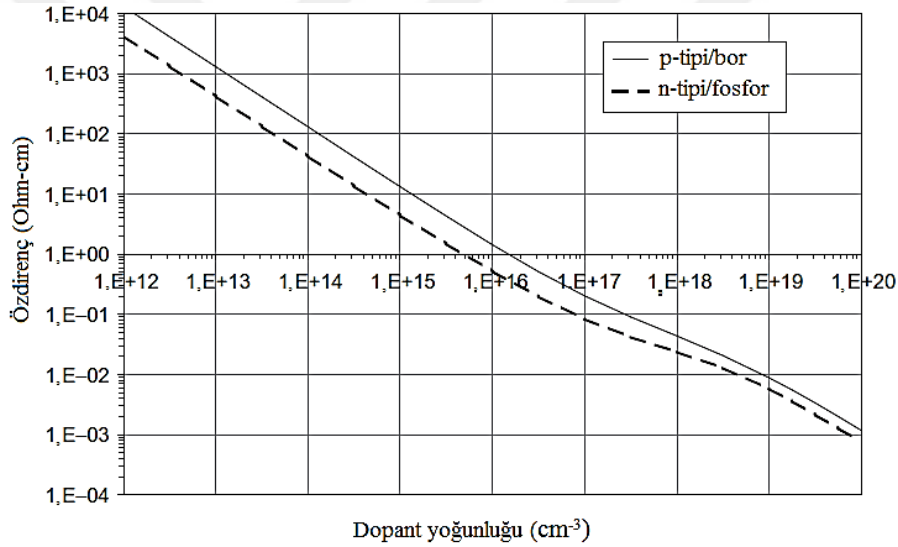
$$c_s(g) = k_0 c_0 (1 - g)^{k_0 - 1} \quad (2.1)$$

Burada c_0 eriyikteki başlangıç konsantrasyonudur ve k_0 eşitlikte segregasyon katsayısı dağılımıdır (Si içerisindeki her katkı maddesi için farklı değere sahiptir) (Kobayashi, 1999). Genellikle g değeri başlangıçtaki bünye içerisinde yaklaşık olarak 0,9 değerinde ve kesin değerler proses detaylarına bağlıdır. Tablo 2.2’de Si’deki en çok rastlanan empüritelerin dağılım katsayıları k_0 değerleri verilmiştir. Oksijen bütün elementler arasında en yüksek k_0 değerine sahiptir ve ≈ 1 diğer

dopantlar ve özellikle geçiş metalleri düşük k_0 değerlerine sahiptirler (Tilli ve ark., 2015).

2.1.4.2 Si Kristalinin Direnç Özellikleri

Kristallerin öz dirençleri (ρ) ve iletkenlik tipi (n veya p tipi) Si eritilmeden önce veya sonra belirli miktarlarda akseptör veya verici empüritelere eklenmesiyle elde edilmektedir. Esasen dopant veya yük taşıyıcı konsantrasyonu yerine kolay ve tam olarak ölçülebilmesi dolayısıyla direnç değeri waferların tanımlanmasında kullanılmaktadır. Waferların direnci ve taşıyıcı konsantrasyonları aşağıdaki denklemlere bağlıdır (Sze ve Ng, 2006):



Şekil 2.3 Oda sıcaklığında Si'nin direnç değerinin dopant yoğunluğu ile değişimi (Committee, 1999; Tilli ve Haapalinna, 2009)

$$\rho = (q \mu_p p)^{-1} \quad (2.2a)$$

$$\rho = (q \mu_n n)^{-1} \quad (2.2b)$$

Burada q elektronun yük değeridir ($1,602 \times 10^{-19}$ C). μ_p , μ_n boşlukların veya elektronların mobilitesidir. p valans bandı içerisindeki boşlukların yoğunluğu ve n ise iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu ifade etmektedir. Denklem 2.2a ve 2.2b'nin mobilite değerleri sabit değildir ve dopant yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

Dopant elementleri için taşıyıcı konsantrasyonu, genel olarak dopant yoğunluğuna yaklaşık eşit kabul edilir. Hafif doplanmış bölgelerde taşıyıcı konsantrasyonu $<10^{16}$ cm^{-3} değerlerine sahiptir. Bor katkılanmış p-tipi Si'ler yaklaşık olarak $1,3 \times 10^{16}/N_A$ cm^{-3} ve fosfor katkılı n-tipi Si'ler yaklaşık olarak $4,5 \times 10^{15}/N_D$ cm^{-3} öz direnç değerleri sahiptirler (Committee, 1999). Burada N_A veya N_D alıcı veya verici konsantrasyonlarıdır. Şekil 2.3'de bor ve fosfor katkıları için dopant yoğunluğu-öz direnç grafiği verilmiştir. Bu grafik antimon ve arsenik içinde nispeten doğru sonuçlar vermektedir.

2.2 Czochralski Silisyum Büyümesi

Cz tek kristal büyütmesi ilk olarak Polonyalı bilim adamı Jan Czochralski'nin metal filamentlerin büyütülmesi çalışmaları ile bilinmektedir. Bu mevcut metodun temelleri tek kristal yarı iletken malzemelerin çok kristalin malzemelere kıyasla belirgin bir avantajlarının olup olmadığının bilinmediği Tiel ve Little'in çalışmalarını gerçekleştirdiği zamana kadar dayanmaktadır. Tiel ve Little tarafından gerçekleştirilen yöntemdeki farklılıklar Jan Czochralski'nin özgün yöntemi ile karşılaştırıldığında aralarındaki o kadar büyük farklılıklar vardır ki bu yöntem aslında Tiel ve Little olarak bile adlandırılması muhtemeldir (Tilli ve Haapalinna, 2009). Cz ile üretilen tek kristallerin endüstride büyük oranlarda kullanılmasının sebebi kullanılabilir entegre devre üretimi için yüksek kalitede, teknik uygulamalar için yüksek dirençli ve büyük boyutlarda (>300 mm) Si kristallerin büyütülmesine izin veriyor olmasıdır. Ancak çok yüksek dirençli ($>2-3$ k Ωcm) ve yüksek saflıkta Si bugün hala Fz sisteminde en fazla 200 mm çapında büyütülebilmektedir (Tilli ve ark., 2015).

1950'lilerin sonlarında Dash dislokasyonları hareketini engellemek için Si kristali büyütme metoduna ilave bir boyun oluşturma adımı eklemiştir. Bu gelişme hem Cz hem de Fz kristalleri için kullanılmaktadır (Dash, 1959). Cz büyütme yöntemi tek kristal Si'nin büyük bir çoğunluğunu üreten, bugüne kadar değişmeden kalmış ve ortaya çıkmasından yaklaşık 50 yıl sonra bile halen kullanılan bir metottur. Dash'in yaptığı yeniliklerden sonra Cz üretiminde maksimum kristal ağırlığı birkaç yüz

kilogramlara kadar çıkartılmış ve erime davranışının daha iyi kontrol edebilmek için manyetik alanların uygulanması gibi evrimsel gelişmeler yapılmıştır (Tilli ve ark., 2015).

Kristal büyütme veya katılaşma prosesi bir çekme sistemindeki ısı transferi şeklinde de tarif edilebilmektedir. Isı ısıtıcı parçadan eriyiğe doğru aktarılmakta ve daha sonra iletim ve konveksiyon ile eriyik yüzeyine ulaşmaktadır. Isının bir kısmı yüksek sıcaklığa ve eriyiğin geniş yüzeyine bağlı olarak eriyik yüzeyinde ışıınım ile kaybolmaktadır. Bununla birlikte eriyiğin yayınlırlığı oldukça düşük ve değır aralığı 0,05-0,3 arasındadır (Langlois ve Kim, 1986; Lemons ve Bösch, 1982; Rea, 1981). Isının geri kalan kısmı kristalin gövdesinden iletilerek ışıınım ve gaz konveksiyonu ile yüzeyden uzaklaşmaktadır. Kristal/eriyik ara yüzeyinde bir ısı transfer dengesi oluştuğunda (kristalden kaybedilen ısının eriyikten kazanılan ısı ve erime ısısı toplamına eşit olması durumu) kararlı hal büyümesi gerçekleşir (Eşitlik 2.3) (Rea, 1981).

$$k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_{z=0} = k_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial z} \right)_{z=0} + v \rho H \quad (2.3)$$

Burada, z eriyik yüzeyinden olan uzaklık (mm), T_s katı sıcaklığı, T_l sıvı sıcaklığı, k_s kristalin termal iletkenliği, k_l sıvının termal iletkenliği, v çekme hızı, ρ yoğunluk ve H erime gizli ısıdır.

Si'nin düşük bir Prandtl sayısına (akışkandaki ısı yayılımına momentum difüzyon oranını temsil eden boyutsuz bir parametre) sahip olduğu durum yüksek termal iletkenlik ve düşük viskozite ile karakterize edilmekte ve bu durumda çoğunlukla eriyikteki ısı transferinde iletim baskındır (Kobayashi, 1978). Bununla birlikte, doğrudan ısı transferi ve eriyikteki termal gradyanların modifikasyonu sayesinde eriyikteki hidrodinamik akış ısı transferine önemli bir katkıda bulunmaktadır. Eriyikteki akış modellerini en etkili şekilde değiştirebilen iki parametresi kristal ve pota dönüşleridir. Dönen kristalin altındaki oluşturulan Taylor-Proudman hücresi olarak isimlendirilen izole edilmiş bölge termal konveksiyon ile yönlendirilen eriyik akışını eriyikten geri kalan kısımdan bir kesme tabakası etkili bir şekilde

ayırmaktadır. Öte yandan bu hücre eriyiği dikey eksen etrafında bir katı gövde içinde döndürmeye zorlamaktadır. Dönen eriyik içindeki konveksiyon akışının yanal bileşeni Taylor-Proudman teoremine göre etkili bir şekilde bastırılmaktadır (Carruthers ve Nassau, 1968). Bu nedenle, birleştirilmiş kristal/pota dönüşleri kristali eriyikten ayrılan kristal/eriyik ara yüzeyinin altında iyi tanımlanmış bir sınır tabakası oluşturmaktadır. Sıvıdaki termal gradyan, bu sınır tabakası üzerindeki eğim açısından (δt) tanımlanabilir (Eşitlik 2.4) (Brice, 1968):

$$\left(\frac{\partial T_l}{\partial z}\right)_{z=0} = \frac{(T_{bl}-T_m)}{\delta t} \quad (2.4)$$

Burada T_b sıvı kütlesinin sıcaklığı ve T_m ise erime noktası sıcaklığıdır. Ayrıca eriyik boyutu arttıkça sıvı akış hareketinin daha çalkantılı hale geldiğini belirtmek gerekmektedir.

Isı transfer denkleminin erime bileşeninin gizli ısısı kristal çekme hızı tarafından kontrol edilmektedir. Eriyikten kristale sabit bir miktarda ısı iletildiği durumda, kristal çekme hızındaki herhangi bir artış veya azalış kristal yüzeyinden ısı kaybı (veya ısı kazanma) hızını etkilemektedir. Silindirik bir kristalin termal profili Laplas denklemi (Eşitlik 2.5) ile tanımlanabilir (Carslaw, 1921):

$$\left(k_s \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) - v \rho c \frac{\partial}{\partial z} - \rho c \frac{\partial}{\partial t}\right) T_s(r, z, t) = 0 \quad (2.5)$$

Burada, c özgül ısıdır. Durağan haldeki büyüme sırasında, belirli bir andaki termal durum zamana bağlıdır. Radyal bileşen eşitliği sadeleştirmek için ihmal edilirse Eşitlik 2.6 elde edilir.

$$\left(k_s \frac{\partial^2}{\partial z^2} - v \rho c \frac{\partial}{\partial z}\right) T_s(z) = 0 \quad (2.6)$$

Bununla birlikte, ısı dengesi denklemi kristal yüzeyden kaynaklı ısı kaybını gösteren terimler olmadan tamamlanamamaktadır. Kristal yüzeyden gelen ısı kaybı

termal radyasyon ve gaz konveksiyonunu belirtmektedir (Van der Hart ve Uelhoff, 1981).

$$\left(k_s \frac{\partial^2}{\partial z^2} - v \rho c \frac{\partial}{\partial z}\right) T_s(z) = \dot{Q}_r + \dot{Q}_c \quad (2.7)$$

$$\dot{Q}_r = 2 \pi r_s l h_r (T_s(z) - T_o(z)) \quad (2.8)$$

$$\dot{Q}_r = 2 \pi r_s l \epsilon_s \sigma_s (T_s(z)^4 - T_o(z)^4),$$

$$\dot{Q}_c = 2 \pi r_s l h_c (T_s(z) - T_o(z)) \quad (2.9)$$

$$V = \pi r^2 l \quad (2.10)$$

Burada, h_r ışıınım transfer katsayısı, h_c taşınım transfer katsayısı, σ_s Stefan-Boltzman katsayısı ve ϵ_s kristal yayınıını göstermektedir. Eğer fırın sıcaklığı T_o sabit kabul edilirse Eşitlik 2.7’de analitik olarak elde edilebilir (Eşitlik 2.9) (Van der Hart ve Uelhoff, 1981).

$$T_s(z) = A \exp(p_1 z) + B \exp(p_2 z) + T_o \quad (2.11)$$

$$p_{1,2} = \left(\frac{v \rho c}{2k_s} \pm \left(\frac{v \rho c}{2k_s} \right)^2 + 2 \frac{(h_r + h_c)}{k_s r_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Uygun sınır koşulları Eşitlik 2.13 ve 2.14’deki gibi verilebilir.

$$(T_s(z))_{z=0} = T_m \quad (2.13)$$

$$(T_s(z))_{z=l} = T_c \quad (2.14)$$

Burada T_c çekirdeğin sıcaklığıdır.

Cz kristal büyütme prosesi eriyiğin aşırı soğutmasıyla katılaşılan bölgeye yakın bir bölgede dengeli şekilde gerçekleşir. Kristal büyümenin itici gücü sıcaklık, entalpi ve entropi değişimleriyle tanımlanan Gibbs serbest enerjisiyle ilişkilidir. Literatürde, eriyikten kristal büyütme ile ilgili pek çok simülasyon ve modelleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmaların öncesinde ise kristallerin dendritik büyümesini kapsayan çalışmalar yapılmıştır (Roosen, 1993; Sethian ve Straint, 1992). Simülasyon

çalışmaları ilk olarak iletme dayalı sınırlayıcı problemlerin simülasyonları çalışmaları ile Crank tarafından yapılmış ve bu alandaki büyük ilerleme ise Mullins ve Sekerka düz ve dairesel arayüzeylere dayalı kapılar etkiyi hesaplamalara katmasıyla sağlanmıştır (Mullins ve Sekerka, 1963). Srivastava ve ark. arayüzey konumunun doğruluğunun çevreleyici yüzeyler arasındaki radyasyon alış verişine bağımlı olduğunu göstererek önemli bir katkı yapmışlardır. Menüsküs şeklinin çekme hızı ve arayüzey şekli üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve ayrıca yakınsama verimiyle tamamen iletim kontrollü bir prosesinin sağlandığını gösterilmiştir (Srivastava ve ark., 1985). Fakat bu çalışmalarda eriyik konveksiyonu göz ardı edilmiştir. Bu çalışmalardan sonra önemli gelişmeler; Kinney ve ark. türbülanslı eriyik akış modellemesi gerekliliğini için entegre hidrodinamik termal-kapiler modelinin geliştirilmesi (Kinney, 1992) ve Çang ve Prasad tarafından hareketli ve serbest sınırları olan çok fazlı taşıma süreçleri için çalkantılı eriyik akış modellemesinin yapılmasıdır (Zhang ve Prasad, 1995). Kinney'in çalışmaları serbest yüzeyler, iletimi, konveksiyon, fırın ışıınımı ve termal gerilmeler dikkate almıştır ancak ayrıntılı menüsküs/arayüzey dinamiklerini hesaplamamıştır. Young-Laplace denkleminin (Hurle, 1983) tek değerli çözümü ile çözülen menüsküs şekli, kristalin denge-ıslanma açısı 11° 'yi aşan bir açıyla içe doğru büyüdüğünde, iki değerli yarıçapı hesaba katmamaktadır (Srivastava ve ark., 1985). Aslında, bu durum Prasad ve ark. tarafından gösterilmiş ve menüsküsün açısını 45° açı ile sabitleyerek dinamik Cz büyümesi için çekme oranını veya pota duvar sıcaklığını manipüle etmeye dayanan bir çap kontrol şemasını modellerinde göstermişlerdir (Prasad ve Larson Jr, 1998).

Düz eriyik serbest yüzeyi hesabı kapiler etkinin ihmal edilmesiyle eriyik hacmini ve menüsküsü yükselten bir sadeleştirmedir. Fakat menüsküsün şekli kristal çapını ve katılama sürecini etkilediğinden kapiler etkiye dikkat edilmelidir. Çünkü çap arttıkça menüsküsün şekli daha içbükey hale gelmektedir. Herhangi bir içbükey yüzey, aynı malzemenin düz bir yüzeyinden daha yüksek salınıma sahiptir. Menüsküsün şekli bu bölgedeki radyasyon ısı kaybını etkilemekte ve eriyikten arayüzeye gelen ısı akışını değiştirmektedir (Javidi, 2006).

Termal olarak dengeli bir proses varsayılırsa, kristal kenarında düz eriyik yüzeyinden arayüzey yüksekliğinde bir artış (veya azalma), silikon/eriyik/gaz/temas (menüsküs noktası) noktasında bir azalma (veya artış) ile sonuçlanmakta ve bu durum çapın azalmasına sebep olmaktadır. Surek, Cz kristal şeklinin menüsküs açısındaki bu tür bozulmalara göre kararsız olduğu sonucuna varmıştır (Surek, 1976). Cz büyümesi sırasında arayüzey şekli kapalı halka çapı kontrolü nedeniyle dar bir alanda şeklini korumaktadır. Bununla birlikte belirli koşullar altında büyüyen arayüzeyde bir safsızlık konsantrasyonu oluştuğunda arakesitin dengesizliği veya bozulması oluşabilmektedir. Bu durum ağır katkılı bir eriyik için dağılım sabiti 1'den daha düşük bir element ile gerçekleşmektedir. Difüzyon hızlı çekme hızlarına bağlı olarak yavaşsa, büyüyen arayüzeydeki saf olmayan konsantrasyonun birikimi, eriyiğin hacmi ve eriyik erime noktası ara yüzeyin önünde azalmaktadır. Eriyik aşırı soğutulur ve saf olmayan doymuşluk yüzünden kristalizasyon önlenirse "Yapısal Aşırı Soğutma" oluşmaktadır (Rutter ve Chalmers, 1953). Büyük sıcaklık gradyanları oluşturmak bu sorunu azaltabilmektedir. Yetiştirilen kristallerin uzunlamasına kesilmiş bölümlerinin kimyasal aşındırma işlemi, büyümüş kristal için arayüzey şekli geçmişini ortaya çıkarmaktadır.

Ara yüzdeki Yapısal Aşırı Soğutma kriterleri başlangıçta Eşitlik 2.15 ile tanımlanmıştır (Rutter ve Chalmers, 1953):

$$\frac{G_m}{V_p} \geq \frac{-m(1-\mathcal{X})C_0}{\mathcal{X}^D} \quad (2.15)$$

Burada G_m ara yüzey önündeki sıcaklık gradyanı, V_p çekme hızı (m/s), m sıvı eğrisi eğimi, C_0 eriyik kütle konsantrasyonu, $\mathcal{X}$ çözünen dağılım katsayısı ve D eriyik kütle difüzyon miktarıdır.

Yukarıdaki denklem ilk olarak çözünen madde konsantrasyonu için erime sıcaklığı profili ve ara yüzdeki denge konsantrasyon-sıcaklık profili aşağıdaki gibi belirterek elde edilir:

$$T_m = G_m X + T_f + m \left[\frac{C_0}{X} \right] \quad (2.16)$$

Burada T_f erime sıcaklığıdır.

Verilen bir konsantrasyon gradyanı için eriyik denge sıcaklığı:

$$T_e = T_f + m C_m \quad (2.17)$$

$$C_m = C_0 \left[1 - \frac{1-X}{X} \exp - \frac{X}{D/V_p} \right] \quad (2.18)$$

Burada x eriyik içinde ara yüzeye dikey mesafe ve D/V_p ise difüzyon derinliğidir.

Kararsızlık eşitsizliği Eşitlik 2.16 ile 2.18'nin eğimlerinin eşitlenmesiyle elde edilmektedir. Hareketli/büyüyen bir arayüz için konveksiyonun bir fonksiyonu olarak morfolojik istikrarsızlıkların incelenmesine dayandırarak Coriell ve ark. konveksiyon gibi faktörleri hariç tutması nedeniyle deneylerle bir uyumsuzluk olduğu belirtilmiştir (Coriell ve Sekerka, 1981). Tam konveksiyon-dayanma noktası ilişkisinde bir eksiklik olduğu halde Mullins ve Sekerka yüzey gerilimi etkilerini ekleyerek istikrarsızlık eşitsizliğini geliştirmiş ve Eşitlik 2.15 ile aşırı büyüklüğü açıklayan, pertürbasyonların sönümlenmesine neden olan kapiler etkinin stabilizesinin arttığını göstermişlerdir (Mullins ve Sekerka, 1963). Böylece, değiştirilmiş kararsızlık kriterleri şu şekilde verilmektedir:

$$\frac{G_m}{V_m} + \frac{h_{fg}}{2 \Gamma_m} \geq \left[\frac{\Gamma_m + \Gamma_s}{2 \Gamma_m} \right] \frac{-m(1-X)C_0}{X^D} E(A, X) \quad (2.19)$$

$$A = \frac{X^2}{1-X} \left(\frac{\gamma V_p T_f}{-m C_0 h_{fg}} \right) \quad (2.20)$$

Burada h_{fg} birim hacim başına füzyon ısısı, Γ_s ve Γ_m katı ve eriyik için termal iletkenlik, $E(A, X)$ satabilite fonksiyonu ve γ eriyik ara yüzey gerilimidir.

Kristal çapının bir fonksiyonu olarak maksimum katılaşma hızı aşağıda verilmiştir:

$$V_{mak} = \left(\frac{\frac{1}{h_{fg}} \sigma \epsilon \mathcal{X} T_f^5}{r_x} \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

Burada V_{mak} maksimum kristalleşme hızı ve r_x kristal çapıdır.

2.2.1 Czochralski Kristal Büyütme Fırınları

Cz fırınları, pota kaldırma ve döndürme sistemi, sıcak bölgeyi de içerisine alan büyütme odası, büyütülmüş kristal için vakum kilitleme odası, kristali döndüren ve yukarı çeken ekipmanları içeren teknolojik bir vakum fırınıdır (Şekil 2.4). Modern Cz sistemleri, 500 kg'a yakın şarj boyutlarıyla 450 mm çapa kadar kristallerin büyümesine fırsat vermektedir. Ancak, MEMS uygulamalarında maksimum kristal boyutu 200 mm ve şarj miktarı da 100 kg civarındadır (Tilli ve ark., 2015; Zulehner ve Huber, 1982).

2.2.2.1 Pota

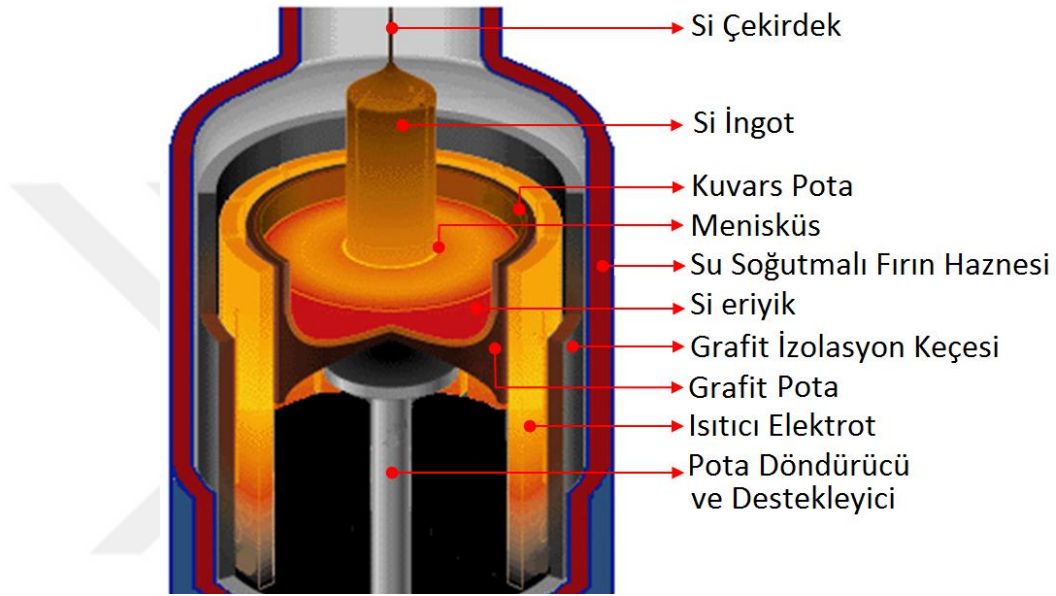
Cz-Si büyütmesinin en önemli aşaması tek kristalli yarı iletkenin refrakter bir pota içerisinde bulunan eriyik içerisinden çekilmesi aşamasıdır. Pota içerisindeki bu eriyik 1400 °C'de neredeyse saf elementel Si'den oluşmaktadır. Ayrıca eriyik büyütülen kristal ile aynı elementten oluşmakta ve bu işlemde herhangi bir çözücü kullanılmamaktadır. Kristal çekme işleminde kristal ve pota beraber döndürülmekte ve istenilen çapta bir silindirik gövde elde edilmesi için kristal eriyik içerisinden yavaş çekilmektedir (Tilli ve ark., 2015). Erimiş Si bilinen bütün malzemelerle reaksiyon vermekte, yani periyodik cetveldeki elementlerin büyük çoğunluğu çok az miktarlarda olsa dahi Si malzemesinin kalitesine olumsuz etkilerde bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı çok az sayıda malzeme pota uygulamaları için kullanılabilir (Zulehner ve Huber, 1982). Hemen hemen bütün metaller sadece atomik olarak trilyonda bir (ppt) seviyelerinin altında bulunmaları gerektiği için kristal yapı içerisine dahil edilmemektedir. Yüksek kalitede kristallerin üretilmesi için mevcut tek pota malzemesi amorf haldeki silisyum dioksittir (kuvars). Grup III ve V elementleri elektriksel olarak aktif katkı elementleridir ve

milyonda bir (ppba) seviyelerinde katkılanması kabul edilebilmektedir. Seramik malzemelerde yukarıda belirtilen unsurlardan birini içerdikleri ya da konsantrasyonları düşük tutulması gereken elementleri içerdikleri için pota uygulamalarında kullanılamazlar (Tilli ve ark., 2015). Azot (silisyum nitrür potadan gelen) kristal yapı içerisinde oldukça düşük miktarda çözünmekte ve büyüyen kristal yapısı içine azotu kabul etmemekte olup aynı durum karbon içinde geçerlidir. Eriyik içerisindeki bu elementlerin konsantrasyonları eriyiğin çözebileceği miktarlardan uzak olduğunda küçük partiküller halinde çekirdeklenebilirler ve bu durum büyüyen tek kristal yapısının bozulmasına sebep olmaktadır. Oksijenle olan durum yukarıdaki diğer elementlerle olan durumdan farklıdır. Oksijen eriyik içinde oldukça büyük konsantrasyonlarda (10 ppm) olabilir. Si waferın pek çok uygulamasında oksijenin oldukça faydalı etkileri sahiptir ve bu nedenle tercih edilen bir elementtir (Zulehner, 1983). Buna ilave olarak, oksijen kristal tarafından reddedilme eğilimde değildir, yani segregasyon katsayısı birine yakındır (donma ara yüzeyinin yakınlarında oksit partiküllerinin olması riski yoktur). Ayrıca, Si yüksek sıcaklıklarda ve düşük oksijen ortamında SiO_2 'den daha çok SiO (silisyum monoksit) oluşturmaya yatkındır. Bu yatkınlık dolayısıyla buhar basıncı 12 mbar olan SiO Si'nin erime sıcaklığında kolay bir şekilde buharlaşabilmektedir. Pratik uygulamalarda oldukça reaktif Si eriyiği tarafından kuvars potadan çözünen oksijenin büyük bir miktarı (% 98-99) büyütme atmosferinde buharlaştırılıp inert gaz atmosferinde sistemden uzaklaştırılır. Reaktif SiO inert gaz ile sistemden uzaklaştırılmaması durumunda potanın ve eriyiğin etrafındaki sıcak yüzeylerde istenmeyen reaksiyonlara sebep olan en temel faktördür (Zulehner, 1994).

2.2.2.2 Sıcak Bölge Malzemeleri

Cz tekniği ile Si kristalin büyütülmesi proseslerinde sıcak bölge malzemesi olarak kullanılan temel yapı malzemesi yüksek saflıktaki grafitir. Sıcak bölge terimi, yarı iletken eriyiğin ve büyüyen kristalin etrafında sıcaklık dağılımını sağlamak için gerekli olan yapısal ve izolasyon parçalarını tanımlamak için kullanılmaktadır (Tilli ve ark., 2015). Grafit büyük bloklar halinde bulunabilmesi, kolay işlenebilmesi ve bunların yanı sıra yüksek sıcaklık karakteristiğinden dolayı tercih edilmektedir.

Elmas ve ya grafit formdaki karbon hemen hemen bütün elementlerden ve ya bileşiklerden daha yüksek erime noktasına sahiptir. Grafit özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında dayanıklı ve elektrik iletkenliğine sahip olması ısıtıcı malzeme olarak da kullanılabilmesini sağlamaktadır (Klett, 1975). Ayrıca, termal iletkenlik özelliği de ısının (veya ısıtıcıların) potaya veya sıcak bölge içerisindeki başka bir bölgeye taşınması gerektiğinde istenilen bir özelliğidir.



Şekil 2.4 Cz sistemi temel sıcak bölge yapısı (Tilli ve ark., 2015)

En yaygın kullanılan izolasyon malzemesi farklı formlarda da kullanılabilen grafit keçelerdir. Grafit keçeler termal radyasyonu kısa mesafelerde birçok kez bloke ederek yalıtım yapan ince liflerden üretilmektedir (Francis, 1971; Yoshimura, 1991). Yumuşak keçeler nispeten ince tabakalar halinde dokunurlar ve daha sonra istenilen şekillerde kesilebilmektedir. Ayrıca makul sıklıklarda istenilen yarıçaplara göre bükülerek kullanılabilirler. Sert keçelerde benzer şekilde fiber malzemelerden üretilmektedir. Ancak ayrı liflerin daha sağlam ve kendiliğinden destekli bir bünyeye bağlanabilmesi için karbon içerikli bir bağlayıcı ile kullanılmaktadırlar. Ayrıca bağlayıcı yerine kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile hazırlanan karbonun kullanılması ile malzemenin mekanik performansı arttırılabilmektedir. Genellikle grafitleştirilmiş lifler keçe malzemesi olarak tercih edilmektedir. Çünkü grafitleştirme işlemi liflerin yüzey alanlarını azaltmaktadır. Böylece yüksek yüzey

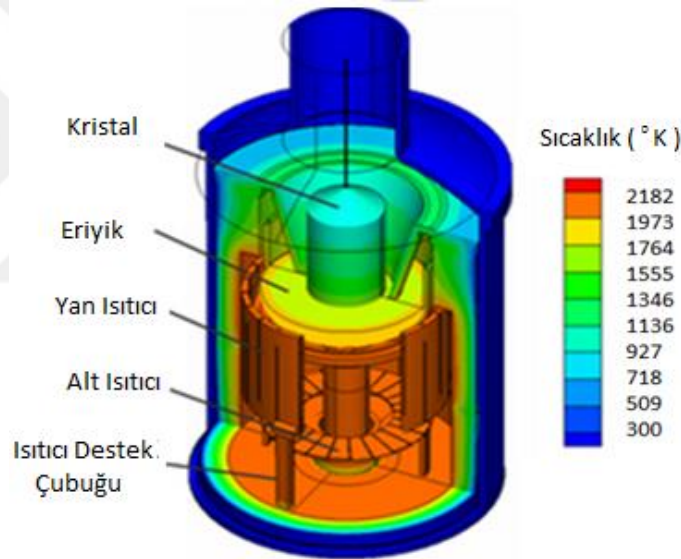
alanına sahip malzemelerden kaynaklı gazın atımı büyük ölçüde azaltıldığı için kristal büyütmede vakum işlemi için harcanan zaman da azaltılmış olmaktadır. Fırın içindeki orta öneme sahip grafit parçalar ince karbon partiküllerinin karbon içermeyen bir bağlayıcı ile karıştırılmasından sonra ekstrüzyon ya da izostatik pres ile şekillendirilmesiyle üretilirler. Yüksek kaliteli grafit parçalar ise genellikle izostatik presle üretilirler. Her iki yöntemle kalıplanmış bloklar öncelikle karbonlaştırılırlar ve yaklaşık 3000 °C sıcaklıklarda grafitleştirilir. Üretilen bu bloklardan işlenen parçalar yarı iletken sanayinin gereksinimlerine uygun olarak metal kirliliğini gidermek için yüksek sıcaklıklarda, halojen içerikli atmosferlerde saflaştırılmaktadır (Tilli ve ark., 2015).

Sıcak bölge parçalarını oluşturmak için birçok farklı malzeme kullanılmaktadır. Karbon fiber takviyeli grafit, mekanik olarak daha güçlüdür ancak üretimi grafitten daha pahalı ve tasarımı için sınırlamalar içermektedir. Silisyum karbür (SiC) birçok açıdan grafitten daha iyi performans gösteren bir malzemedir. Fakat oldukça yüksek maliyete sahip ve büyük boyutlarda bileşenlerin kullanılabilirliği zayıftır. Bununla birlikte SiC, SiO'ya maruz kalan parçaların ömrünü uzatmak veya grafitten gelen kirleticileri azaltmak için kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile bu parçaların yüzeyine kaplanabilmektedir. Molibden veya seramik malzemeler gibi yüksek sıcaklık refrakterleri eriyiğe bulaşma riski olmayan yerlerde kullanılabilir. Molibden orta dereceli maliyeti olan ve aynı zamanda Si kristali içerisinde düşük difüzyona sahip olması nedeniyle kullanılabilir (Davis ve ark., 1980; Tilli ve ark., 2015).

2.2.2.3 Sıcak Bölge Yapısı

Geleneksel bir Cz sıcak bölgelesi kuvars potanın etrafındaki elektro manyetik enerjiyi ısı enerjisine çeviren bir grafit saseptör, silindirik bir ısıtıcı ve ısıtıcının etrafında ve altında ısı kalkanını içermektedir (Şekil 2.5). Saseptör ısının kuvars potanın etrafında oldukça düzgün bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık kuvars potanın yumuşamasına sebep olduğundan uygun bir mekanik desteğe ihtiyaç duyulmaktadır. Isıtıcı genellikle alt köşelerinden birine iki

veya dört elektrotun bağlandığı ve tipik olarak grafitten yapılmış bir çeşit destekleyici eleman ile (ısıtıcı destek çubuğu) sisteme bağlanmaktadır. Elektrotlar en az 10-100 kW/saat arasında sistem için gerekli gücü iletmektedirler. Cz kristal büyütülmesinde kullanılan düşük basınç ve yüksek sıcaklıktaki atıl gazın zayıf elektrik yalıtım özelliklerinden dolayı ısıtıcılar düşük voltaj ve yüksek amper koşullarında çalıştırılırlar. Bir ısıtıcı Si'nin erime sıcaklık noktasında hiçbir yalıtım olmadan yaklaşık olarak 400 kW/m² ısı yaymaktadır. Isıtıcının etrafındaki ısı kalkını güç tüketimini büyük oranda azaltmakta ve oluşan bu ısının daha homojen olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Ayrıca potanın altındaki ısıtıcı, kuvars potanın kırılması durumunda eriyiğin dökülmesini ve hasarı muhafaza etme konusunda sisteme yardımcı olmaktadır (Shiraishi ve ark., 2001; Tilli ve ark., 2015).

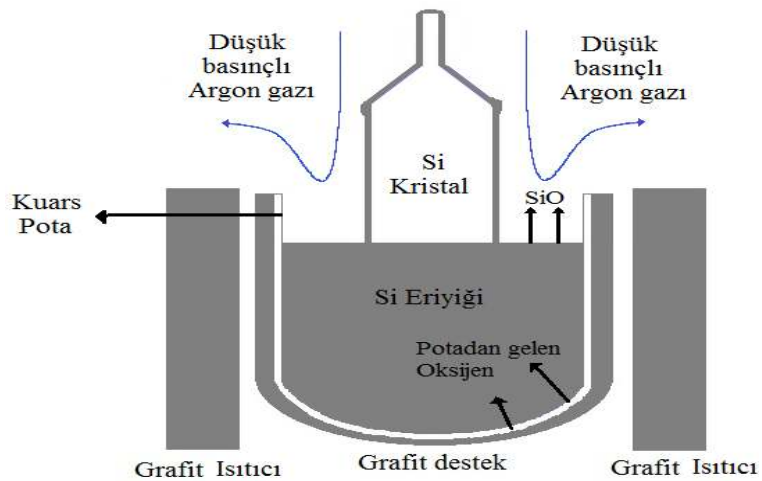


Şekil 2.5 Cz-Si büyütmesine ait ısı transferi modeli (Shiraishi ve ark., 2001)

2.2.2.4 Gaz Akışı

Cz-Si'nin büyütülmesi prosesi sürekli bir inert gaz akımı altında gerçekleştirilmektedir. Gaz akış modelinin şematik bir resmi Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Yüksek sıcaklık ve Si'nin erime reaktivitesi göz önüne alındığında bu işlemde sadece asal gazlar kullanılabilir (Anttila ve ark., 1985; Zulehner, 1983). Argon diğer asal gazlar ile maliyet açısından kıyaslandığında daha düşük maliyete sahip olduğu için tercih edilmektedir. Ayrıca, argon ile helyum karşılaştırıldığında

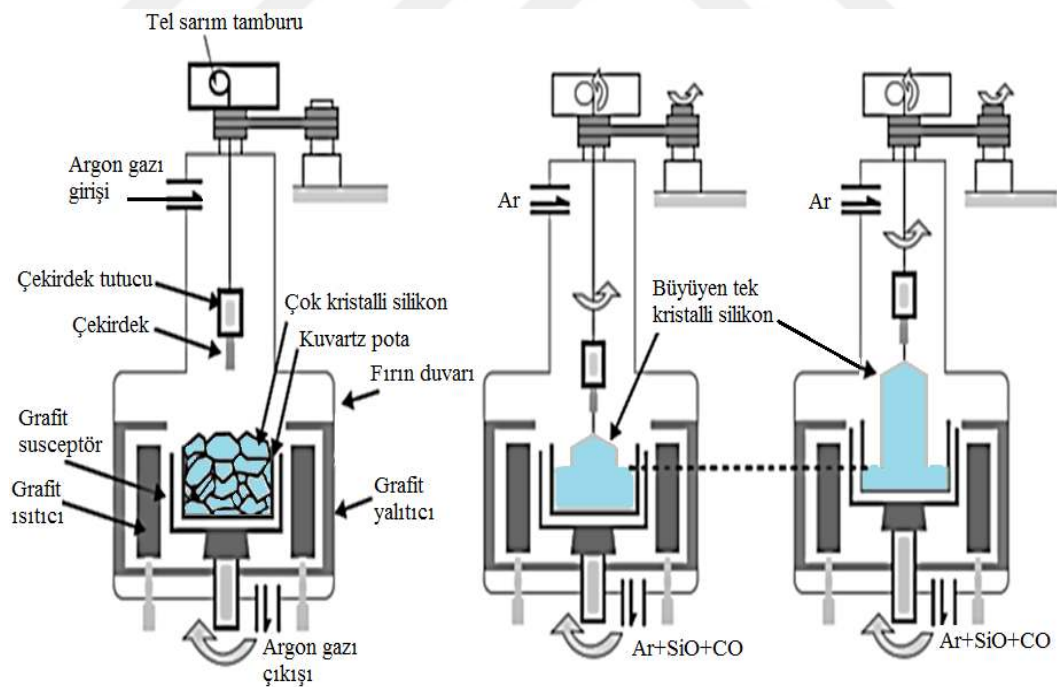
argon daha düşük termal iletkenliğe sahiptir. Argonun bu özelliği su ile soğutulan vakum bölgesinin duvarlarından eriyiğin etrafındaki sıcak alanları izole edilmesi işlemini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, helyum gazı elektrik kesintilerinde sistemi daha hızlı soğutmak amacıyla tercih edilebilir (Hobgood ve ark., 1987). Cz sisteminde tipik gaz basıncı 15-50 mbar aralığında ve dakikada standart litre (slpm) olarak gösterilmektedir. İndirgenmiş basınç kullanımı karşılaştırıldığında gaz tüketimini azaltmak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek basınç ise gaz sıcaklık farklarından aşırı derecede etkilenmeyecek bir akış modelini korumak ve istenmeyen ısı konveksiyonunu önlemek için kullanılmaktadır. Ayrıca, eriyikten buharlaşan oksijeni ihtiva eden gazın kontrollü bir şekilde sistemden uzaklaştırılması için yeterli hacimsel akışa ve gaz hızına ihtiyaç duyulmaktadır. Azaltılmış basıncın alt sınırı Si eriyik ile dengede olan SiO buhar basıncına (12 mbar) yakındır. Basınç çok fazla düşürülürse SiO'nin uzaklaşmasını önlemek için Si eriyik kaynamaya başlamaktadır. Geleneksel bir sıcak bölgede eriyiğin üzerinde konumlandırılmış su soğutmalı oda duvarları tarafından sınırlandırılmış geniş bir alan vardır. Bu geniş alan alttan gaz ısıtmalı olduğu için kontrolsüz konveksiyonun gerçekleşmesine neden olmaktadır. Eriyikten gelen SiO bu konveksiyon hareketi ile hareket ederek serin bir yüzey üzerinde yoğunlaşmaktadır. Erime bölgesinin üstünde yeterince soğuk olmayan fakat SiO'nun çökmesine fırsat verecek başka yüzeylerde vardır (Tilli ve ark., 2015).



Şekil 2.6 Cz sisteminde inert temizleyici gaz akışının şematik gösterimi (Tilli ve ark., 2015)

2.2.3 Cz Sisteminde Si Kristali Büyütme Süreci Aşamaları

Kristal büyütme çalışmasının ilk adımı Si hammaddenin kuvars potanın içine yüklenmesidir. Si hammaddesi temiz, iki defa poşetlenmiş ve yaklaşık 5kg'lık torbalarda depolanmaktadır. Ancak daha büyük miktarlarda kullanılabilir. Çift poşetleme işlemi hammaddeyi şarj alanına getirmeden önce dış torbayı çıkarmayı mümkün kıldığı için potaya taşınabilecek kirlilikleri azaltmaktadır. Hammadde zamandan tasarruf etmek için kristal büyütme bölgesinde pota içerisine doldurulabilir veya kirleticilerden kaçınmak için ayrı temiz bir alanda şarj işlemi gerçekleştirilebilir. Laboratuvar tipi uygulamalarda potanın elle tutulup taşınması yapılabilirken daha büyük yüklemelerde (>100kg) pota elle tutulmamakta ve bu nedenle yükleme işlemi eritme bölgesinde yapılabilir (Tilli ve ark., 2015). Şematik olarak bir Cz yöntemi ile tek kristal Si üretiminin şematik bir gösterimi Şekil 2.7'de verilmiştir. Farklı büyüklüklerde Si hammaddeleri kuvars pota içerisine yüklenmektedir.



Şekil 2.7 Cz yöntemi ile tek kristal Si üretiminin şematik görüntüsü (Doi ve ark., 2011)

Büyük parçalar yeterince özen gösterilmeden pota içine şarj edildiğinde genişleyen yük potada çentik oluşumuna veya kırılmaya sebep olabilmektedir.

Normal yükleme koşullarında erime işlemi sonrasında eriyik potanın yaklaşık olarak 3/2'sini doldurmaktadır. Potada oluşacak bir çatlak ciddi bir problem olup, sonuçlarının sıcak bölge tasarımında ve süreç hususlarında dikkate alınması gerekmektedir. Si eriyik çok akışkan bir yapıya sahiptir ve çeşitli yüzeyleri kolaylıkla ıslatabilmektedir. Sıcak bölge ve Si eriyik çevreleyici gazdaki oksitleyici bileşenlere karşı oldukça duyarlı olup, büyütme işlemi inert gaz ortamında azaltılmış basınçlarda gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple büyütme odası yüksek miktarda vakuma alınabilir olmalı ve sıcaklık uygulamasından önce tamamen boşaltılıp temizlenmelidir (Tilli ve ark., 2015).

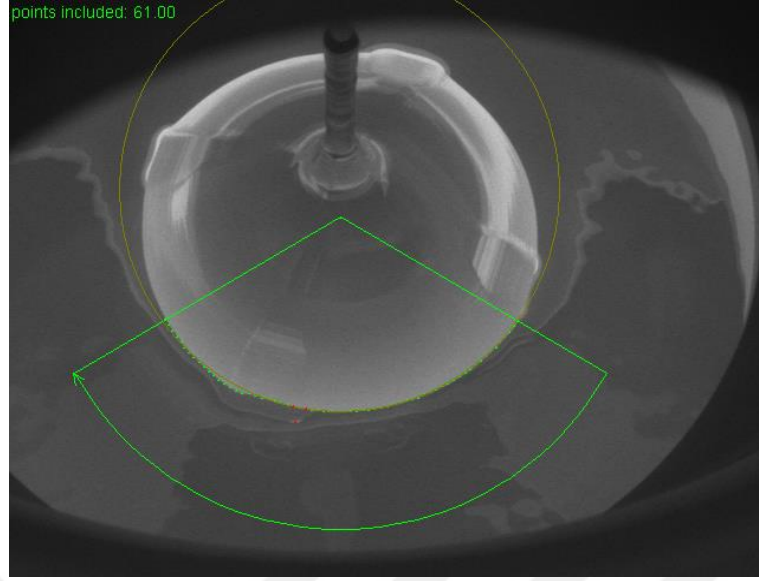
2.2.3.1 Eritme (Melting)

Eritme aşaması ilk olarak ısıtma bölgesinin 1500 °C'ye ısıtılmasını ve pota içerisindeki bütün malzemenin bu sıcaklıkta tamamen eriyeceği sürelerde tutulmasını içermektedir (Ekhult ve Carlberg, 1986; Zulehner, 1983). Kuvars pota ısınma toleransı geniş olmadığı için bu sıcaklıklarda oldukça yumuşamakta ve bu yüzden potanın duvarlarının sarmaya karşı korunması için aşırı ısıtmadan kaçınılmalıdır. Ayrıca, potanın en sıcak bölgesi genellikle en düşük köşe alanı olup (dip bölgesi), bu alan eriyik ile temas ettiği anda aşınmaya başlamaktadır. Aşırı sıcaklık bu aşınmayı arttırmaktadır. Pota çok aşınmadan önce dislokasyonsuz bir kristal yapı oluşturmak için gerekli zaman da azaltmış olacaktır. Kuvars pota, şarj edilen bütün Si parçacıkları eridikten sonra eritme sırasında olduğundan daha yüksek bir başlangıç konumuna kaldırılmaktadır. Bu işlem sonrasında sıcaklık sabitlenmekte ve Si çekirdeği eriyik içerisine daldırmaya hazırlanmaktadır. Çekirdeğin eriyik içerisine daldırılacağı yerde sıcaklığın dengelenmesi işlemi iki renkli pirometre ile kontrol edilmektedir (Tilli ve ark., 2015).

2.2.3.2 Boyun (Neck) Oluşumu

Eriyik sıcaklığın dengelendikten sonra Si çekirdeği eriyik içerisine daldırılmakta ve uygun sıcaklıkta eriyip bir menüsküs halkası (çekirdek ile eriyik arayüzeyi) oluşturmaktadır. Çekirdek yukarı doğru yavaşça çekilirken menüsküs bölgesinde

çekirdeğin orijinal kristal yapısında yeni bir malzeme kristallenmeye başlamaktadır (Dash, 1959). Çekirdek genellikle bu bölgede eriyik ile temastan kaynaklanan sıcaklık değişimi sonucunda dislokasyonludur. Dislokasyonsuz yapıların olması ya da olmaması düşünülmeden boyun oluşturma adımı normal bir şekilde devam ettirilmekte ve bunun sonucu olarak aynı çekirdek tekrar tekrar kullanılabilir (Şekil 2.8). Boyun oluşturma aşaması ile alakalı temel fikir, dislokasyonların Si içerisinde sınırlı hareket kabiliyetine sahip olduğu temel bilgisinden yola çıkılarak eğer kristal hızlı bir şekilde büyütülürse dislokasyonlar boyun köşelerinden dışarı doğru büyüyecek ve o bölgelerde kilitlenerek malzemeden uzaklaştırılmış olacaktır. Si içerisindeki dislokasyonlar $[110]$ doğrultusunda tercih edilen bir yöne sahiptirler. Bu kristal oryantasyonunda dislokasyonlar kalmak için herhangi bir zorlukla karşılaşmamaktadır. Ancak büyüme eksenini $[110]$ yönünden saparsa dislokasyonların temizlenmesi işlemi kolay bir şekilde olmaktadır. Bu nedenle diğer yaygın kristal oryantasyonları olan (100) ve (111) düzlemleri dislokasyonsuz büyütme işlemi daha kolay iken (110) düzlemi dislokasyonsuz malzemelerin büyütülmesi daha zorlayıcıdır. Dislokasyon tırmanma hareketi kaymadan daha yavaş bir prosestir. Kayma, sıklıkla Si waferın hazırlanması esnasında veya kristal yapıda dislokasyon mevcut ise oluşmaktadır (De Kock, 1970; Tempelhoff ve ark., 1979). Ayrıca kayma durumu ingot üretiminde eriyikten ingotun ayrıldığı kuyruk aşamasında da oluşmaktadır. Yüksek çekme hızları Si boşluklarının eriyik ara yüzeyine doğru tırmanmasını yavaşlatarak desteklemektedir. Boyun oluşumunda çekme hızı genellikle 3 mm/dk olarak uygulanmaktadır. Günümüzde MEMS uygulamalarında $[110]$ yönünde büyütülen boyunlar için üretilen kristaller oldukça hafiftir. Bununla birlikte, entegre devre uygulamalarında kullanılan kristaller standart boyunların taşıyabileceği ağırlıkların çok üzerinde ağırlıklarda olabilmektedir. Cz-Si kristallerinde dislokasyon yoğunluğu hakkında oldukça fazla kafa karışıklıkları mevcuttur. Bu proses tanımlandığı zamanlarda dislokasyon sıfırdan fazla (<100 adet/cm²) olmasına izin verilmekteyken günümüzde sıfır dislokasyon içeren büyük kristalleri büyütme az dislokasyon içeren küçük kristalleri büyütme daha kolaydır. Boyun oluşumu malzemeden tüm lineer dislokasyonları elimine etmede en etkili yöntemdir (Tilli ve ark., 2015).



Şekil 2.8 Si büyütme prosesinde boyun, taç ve gövdenin oluşmaya başlaması (Kişisel arşiv, 2017)

Çoğu zaman dislokasyonsuz yapı oluşturmak için boyun gerekli olan büyüme miktarından daha fazla büyütülmektedir. Bu durum, boynun sonundaki malzemenin kalitesinin korunmasına yardımcı olmaktadır. Ancak, bunu yapmanın birincil sebebi sistemin yavaş termal tepkisi ile ilişkilidir. Bu durumda aslında bir sonraki adımda oluşacak sıcaklığın erime sıcaklığına 1 °C kadar yakın olması istenmektedir. İnce boyun, bir pirometreden daha iyi ve aynı zamanda tekrar üretilebilecek bir sıcaklık sensörü gibi davranmaktadır. Boyun çapı ve büyüme hızı yeterli bir sürede istenilen miktara ulaşırsa sıcaklık doğru ayarlanmış denilmektedir (Tilli ve ark., 2015).

2.2.3.3 Taç (Crown) ve Omuz (Shoulder) Oluşturma

Si ingot üretiminde boyun kısmı uygun sıcaklıklarda istenilen boylara ulaştığında taç kısmı oluşumu başlamaktadır. Bu aşamada, çekme hızı ve sıcaklık boyun oluşumundaki değerlerden daha düşük değerlere azaltılmaktadır. Ayrıca kristal ve pota rotasyon hızları da değiştirilmekte ve bu adımda eriyik seviyesi kademeli olarak ayarlanabilmektedir. İngot üretiminde bu kısmın üretilmesinin asıl amacı ingotun uygun bir hızda istenilen çapta elde edilmesini sağlamaktır. Eğer bu işlem düşük hızlarda gerçekleştirilirse proses süresi gereksiz uzamakta ve Si eriyiği ekstra ısınarak yapı kayıplarının olabilirliği artırmaktadır. Öte yandan büyütme yüksek hızlarda olduğunda aşırı soğumuş Si eriyik bazı kristal yönlerinde kontrol

edilemeyen büyüme oranlarında büyümekte ve bu durum da yapısal kayıplarına neden olmaktadır (Tilli ve ark., 2015).

Taç kısmı çapının genişlemesi ile eriyik soğutucu gibi davranmakta ve bunun sonucu olarak ısıtıcının güç/sıcaklık oranı sürekli azalmaktadır. Boyun aşamasının sonu ile gövde kısmının çapı arasındaki sıcaklık farklılığı onlarca santigrat derecedir. Bu sıcaklık farklılığı taç kısmının oluşumunda ihtiyaç duyulan itici güçtür. Eriyik yüzeyinde çapın artması gözlemlenebilir fakat yüzeyin altında fark edilemeyen bazı durumlarda gerçekleşmektedir (Tilli ve ark., 2015). Katılaşılan ara yüzeyler eriyiğe doğru genellikle konveks haline gelirler ve bu şekil taç oluşturmanın başarısını gösterir ve sonraki proses adımları için bu durum önemli bir etkiye sahiptir (Dhanaraj ve ark., 2010). Fakat taç oluşumunun son bölümlerine doğru önemli değişimler olmakta ve gövde kısmının başlangıcında konkav şekle dönüşmektedir. Öte yandan çap büyüme hızı az ve çekme hızı nispeten yüksek olursa tacın şekli daha konik olmakta ve katılaşılan ara yüz gövdeye doğru daha küçük bir değişim göstermektedir. Bu durum gövde oluşumuna geçiş yapmayı kolaylaştırmaktadır. Ancak bu durum daha çok zaman harcanmasına ve daha zayıf Si malzemesinin üretilmesine sebep olmaktadır (Tilli ve ark., 2015).

2.2.3.4 Gövde (Body) Oluşumu

Si ingot üretiminde gövde kısmı gerçek waferların üretilbileceği kristalin silindirik kısımdır. Bu bölüm ile taç kısmı arasında geçiş veya omuz olarak isimlendirilen geçici bir kademe bulunmaktadır. Gövde için istenilen çapa ulaşılmadan önce omuz oluşumu başlar ve bu aşamada çap önemli derecede yükselir (Ekhult ve Carlberg, 1986; Zulehner, 1994). Ancak çaptaki bu büyüme kısa mesafede kesilmekte ve gövde için belirlenen çapta büyüme oluşmaya devam etmektedir. Bu noktada çekme hızı gövdenin başlangıcına göre ayarlanmak için tekrar azaltılmaktadır. Bu geçiş aşamasında çekme hızı çok uzun süre yüksek tutulursa kristalin çapı tekrar azalmaya başlayacaktır. Omuzun tamamlanmasından sonra gövde kısmı oluşmaya başlamaktadır. Bu aşamada genellikle daha fazla sıcaklık düşüşüne ihtiyaç duyulmakta, fakat sıcaklık değişiklikleri yavaş

yapılmalıdır. Çoğunlukla doğru şekilde ayarlanması gereken bir PLD kontrol döngüsü kullanılarak anlık çekme hızı ile ısıtıcının gücü ayarlanıp ortalama çekme hızı korunmaktadır. Gaz akışı, basınç, pota ve kristalin dönüş hızları gövde uzunluğu boyunca kontrol edilebilir parametreler arasındadır. Ayrıca manyetik alan şekli ve kuvveti, eriyik seviyeleri de kontrol edilebilir parametreler içerisine ilave edilebilir (Tilli ve ark., 2015).

2.2.3.5 Kuyruk (Tail veya End Cone) Oluşumu

Bu bölüm, gövde kısmının bittiği bölgede ve genellikle başlangıç yükleme miktarının % 10'nunu oluşturan Si ingotun en son kısmıdır. Gövdenin oluşumundan sonra geri kalan eriyik miktarının çoğu kuyruk olarak isimlendirilen bu kısmı oluşturmada kullanılmaktadır. Kristalin bu bölümünün oluşumunun iki amacı vardır; birincisi kristal eriyikten koptuğunda kayma dislokasyonlarını oluşturan termal şoktan dolayı vücut kısmının korumasıdır. Bu kayma, eğer büyüme tam çapta kesintiye uğrarsa daha kısa bir mesafe ilerleyecektir. İkinci amacı ise, gövdenin diğer bölümlerine nazaran son kısımlarında daha homojen termal davranışa ulaşılacak istenmesidir (Tilli ve Haapalinna, 2009; Zulehner, 1994).

2.2.3.6 Sistemin Kapatılması (Shut-off)

Cz kristali üretiminde kuyruk kısmı tamamlandıktan sonra ısıtıcıların enerjileri kesilmekte ve kristal kilitleme bölmesine çekilmektedir. Ancak güç kademeli bir şekilde azaltılırken kristal bünyede hızlı ısı değişiminden kaynaklanan problemlerin önüne geçmek için kristal kilit odasına alınmadan önce bir süre sıcak bölgeye belli bir mesafede bekletilmektedir. Sistem yeteri kadar soğutulduktan sonra kristal kilit odasına alınmakta ve sıcak bölge ile kilit odası arasındaki valf kapatılmaktadır. Bu işlem normalde sıcak bölgenin temizlik ve şarj için açılacak kadar soğuk olduğu ve yeni bir kristalin büyütülmesinden önce gerçekleştirilmektedir. Sıcak bölgenin hızlı soğutulması amacıyla çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Örneğin pota bölgesinin aşağı yukarı hareket ettirilmesi, sistemin yüksek hacimli gaz akışıyla temizlenmesi veya sistemin içerisine helyum gazı verilmesiyle soğutma işlemleri

hızlandırılabilir (Tilli ve Haapalinna, 2009). Cz sisteminin temizlenmesi işlemleri, içinde bir miktar eriyik kalmış kullanılan potanın (pota hurdası) fırın içinden çıkartılmasını, fırının iç yüzeylerinde oluşmuş SiO tozunun temizlenmesini, aşınmış parçalar var ise yenileriyle değiştirilmesini ve sıcak bölge parçalarının genel konumunun kontrol edilmesini içermektedir (Tilli ve Haapalinna, 2009).

2.2.4 Kristal Büyütmede Karşılaşılan Sorunlar

2.2.4.1 Çap Kontrolü

Cz sisteminde kristalin büyütülme hızı ile katılacak arayüzeylerin her iki bölgesi arasında dengeli bir ilişki vardır. Büyüyen kristal esas olarak ışıma yoluyla ve bir miktarda arındırıcı gaz ile soğutulmaya ihtiyaç duymaktadır. Katılacak ara yüzeyin yakınında ısı akışı yoğunluğu ara yüzeyin her iki tarafındaki termal değişim sürelerinin büyüklüğüne eşit olacak şekilde değişebilmektedir. Fakat katılacak prosesinde belirli bir hızda serbest kalan ısı kristalleşme süresindeki gizli ısının hızına eşittir. Denge durumunda, kristalin dış çekme hızı katılacak hızına eşit ve kristal köşelerindeki termal akı yoğunluğu kristalleşme işlemindeki eriyik bölgesinden salınan ısıdan daha fazladır. Kristal çapını koruyarak ortalama bir zamanda büyüme eğilimindedir. Eriyik içinde zamana bağlı işlemler eriyik köşelerinde sıcaklık gradyanlarının değişmesine sebep olmaktadır. Bu durum kristalin çizgilerini oluşturmaktadır ancak ortalama bir zaman sağlandığında çap kontrolünü dengelemek de kolaylaşmaktadır (Tilli ve ark., 2015).

Bütün büyütme prosesi boyunca kristal çapı optik olarak kontrol edilmektedir. Si'nin erime noktası optik ölçümler için yeterli miktarda yoğunluğa sahip ve pratikte mevcut ışığın ve kızılötesi radyasyonun büyük bir kısmı filtrelenebilir. Kristalin etrafındaki küçük bir noktaya (spot noktası) odaklanmış pirometre yardımıyla kristal bünyesinde oluşan ve menüsküs olarak bilinen parlak halkanın gözlemlenmesini içeren bir geleneksel yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemde, kristal çapının artması sinyalde genişlemeye sebep olmaktadır. Daha modern ölçümlerde ise menüsküsteki iki noktanın konumlarının ölçülmesi ile elde edilen kort uzunluğu (iki nokta

arasındaki mesafe) veya menüsküsün çapını elde etmek için birkaç farklı nokta belirlenerek kristalin çapı hesaplanmaktadır. Menüsküsün parlaklığı bir bölgedeki erimiş yüzeyden yansıyan ışıktan kaynaklanmaktadır. Eriyik ile kristal arasındaki sınırı ayırt etmek oldukça zor olduğundan kristalin çapı kristal köşelerin birkaç milimetre dışındaki uygun bir bölgeden ölçülerek hesaplanmaktadır (Tilli ve Haapalinna, 2009).

Elementel Si'nin fiziksel özellikleri ıslatma açısının ne olduğunun bilinmesi ile tanımlanabilir. Cz sisteminde, dikey yönde büyüyen Si kristali ve eriyik arasındaki açı (11°) Si'nin ıslatma açısıdır. Kristalin köşeleri dikey olduğunda kristalle büyük bir uyuma sahip olan eriyikte dikey olarak yukarı doğru yönlenmektedir. Katılaştıran ara yüzlerin kenarları erime seviyesinden yaklaşık 7 mm yukarıda bulunmaktadır. Ayrıca eriyiğin yüzey gerilimi ve yer çekimi arasındaki denge kristale yakın ara yüzeylerin (menüsküsün) şekli ile belirlenmektedir (Tilli ve Haapalinna, 2009).

Kristal çapının ayarlanması gerektiğinde en yaygın kullanılan yöntem çekme hızının değiştirilmesidir. Çekme hızının artırılması değişimi termal denge tarafından kontrol edilen kristalleşme hızını doğrudan değiştirmemektedir. Kristal-eriyik sisteminin yeni durumlara adapte olması üç alternatif işlem ile gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar; (i) kristalin ara yüzey sınırlarındaki ısı transferinin artırılması, (ii) eriyikteki ısı transferinin azaltılması ve (iii) gizli ısı üretimi orijinal değerlerine geri getirilmesidir (Dornberger ve von Ammon, 1996). Ortalama çekme hızı uygun bir çap kontrolü yapıldıktan sonra yapılandırılmalıdır. Hedeflenen hız kristal çapına, sıcak bölge tasarımına ve kalite hedefine bağlı olarak yaklaşık 1 mm/dk'dır. Bazı kristaller büyüme hızı ve termal gradyanlar arasındaki dengeyi sağlamak için çok düşük hızlarda büyütülmektedir. Bu denge çok küçük boşluklardan kaynaklı kusurlar üzerinde oldukça etkilidir. Kristal soğuk bir eriyikten daha hızlı büyütülebilir. Bu durumda soğumuş eriyik katılaşma ara yüzeyine daha az ısı iletir. Böylece kristalleşme prosesiyle daha fazla ısı üretilebilir. Erime sıcaklığındaki değişim ortalama büyüme hızına etki etmektedir. Kristal bölgesindeki termal ışıyım halojen veya kızılötesi lambalar kullanılarak ilave bir ısıtma ile değiştirilebilmektedir (Ekhult ve Carlberg, 1989). Eriyik bölgesinde pota duvarından

katılaşan ara y zeeye doğru ısı taşınıımı pota dönüş hızında veya manyetik alanda k     değişiklikler yapılmasıyla değiştirilebilmektedir. Bu değerleri değiştirmek ısıtıcı gücünü veya sıcaklığını değiştirmekten daha hızlı kontrol edilebilmektedir. Fakat bu kontrol parametreleri belirli bir ortalama değerlere yakın tutulması gerektiği için daha karmaşık yapılarıdır (Tilli ve Haapalinna, 2009).

2.2.4.2 Katkılama

Yarı iletken MEMS uygulamalarında kullanılan malzemelerin çoğu bor veya fosforla katkılanmaktadır. Bu katkılama 10^{15} - 10^{16} dopant atomu/cm³ içermekte ve bu miktarlar onlarca kilogram içerisinde miligram mertebesinde katkılama ile elde edilmektedir. Bu denli k     miktarlarda katkı malzemelerini Si bünyesine ilave etmek oldukça zordur. Bu nedenle, katkı maddeleri daha b     Si yapıları içerisinde seyreltilerek yapının içerisine katılırlar. Uygun miktarlardaki katkı elementleri Si ile birlikte bir alaşım oluşturmak için ergitilmektedir. Bu aşamada dopant konsantrasyonu % 0,01-0,1 aralığındadır. Eğer bu alaşımlar hassas hazırlanırsa ürünlerin konsantrasyonu da düzenli olmaktadır (Ludge ve Riemann, 1998; Woditsch ve Koch, 2002).  ngot üretiminde istenilen dopant konsantrasyonu buharlaşma riski olmadan hazırlanan bu alaşımların uygun miktarlarının hammadde şarjı ile birlikte sisteme yüklenmesi ile sağlanmaktadır. Düşük dirençli kristaller genellikle elementel katkı maddeleri kullanılarak katkılanırlar (Kobayashi, 1999; Zulehner, 1983). Bor uçucu bir element değildir. Bu sayede Si parçaları pota içerisine yüklenmesi sırasında şarjla beraber potaya ilave edilebilmektedir. Fakat yaygın n-tipi katkılar (antimon, arsenik ve fosfor) ise oldukça uçucudur ve onlar eriyiğin içerisine şarj eridikten sonra ancak y klenebilmektedirler. Antimon granül formunda olmasından dolayı eriyik içerisine dökmek nispeten daha kolaydır ve eriyiğin içerisine çeşitli kanallardan kolay bir şekilde taşınabilmektedir. Ayrıca, antimonun yoğunluğu yüksek olmasından dolayı eriyiğin tabanında kalmakta ve bu sayede çok az buharlaşmaktadır. Arsenik ve fosfor ise yoğunlukları daha düşük olduğu için eriyiğin üzerinde kalmakta ve buharlaşma eğilimindedirler. Bu sebeplerden dolayı temizleyici gaz akışı ile önemli bir miktarları kaybolmaktadır. Bu katkılarının kullanımı daha fazla katkılama yapılmasını gerektirdiğinden maliyeti arttırmaktadır. Çok fazla buharlaşma

yaşanacağı için sistemde çok daha fazla kirlilik oluşması sonucu eriyiğin kalitesi düşecektir. Buna ilave olarak vakum hatlarında ve diğer soğuk yüzeylerde bu ekstra buharlaşan katkı maddelerinden kaynaklanan kirliliklerin temizlenmesi ilave tehlikeler doğuracaktır. Buharlaşan n-tipi katkıları normalde büyüyen kristal içerisindeki oksijen konsantrasyonunu azaltmaktadır. Katkı maddesinin uçucu oksitleri temizleyici gazla taşınabilmekte ve bu durum oksijenin azaltılmasına katkı da bulunmaktadır. Oksijenin hızlı buharlaşma hızı potanın aşınma hızının artmasına neden olmakta ve bu durumda dolaylı olarak potanın yaşam ömrünü azaltmamaktadır (Tilli ve Haapalinna, 2009).

2.2.4.3 Sıcak Bölge Ömrü

Sıcak bölge elemanları kısmen yüksek sıcaklıktan kısmen de SiO'nin aşındırıcı etkisinden dolayı sınırlı bir ömre sahiptirler. Isıtıcılar ve saseptörler tipik olarak en hızlı zarar gören sıcak bölge elemanlarıdır. Isıtıcılar yüksek sıcaklıklarda çalıştıklarından dolayı sıcak bölgedeki diğer parçalara göre fazla hassas yapıdadır. Bu sebeple SiO ile reaksiyona en fazla bu parçalar maruz kalmaktadır. Ayrıca, çubuklu çit yapısına sahip olan ısıtıcı çubuklar gazın birkaç farklı yönden gelmesine izin vermektedir. Buna karşın grafitten yapılmış silindirik ısı kalkanı gazın sadece iç bölümden etkimesine izin vermektedir. Ayrıca ısıtıcıların direnç dağılımları büyük bir öneme sahiptir. Erozyon normalde düzenli değil ve ısıtıcıların güç dağılımları ısıtıcıların kullanım ömrüne göre değişir bu durum kalite ve verim problemlerine neden olmaktadır (Tilli ve Haapalinna, 2009).

Geleneksel bir sıcak bölge tasarımında temizleyici gaz potadan emilmiş oksitleyici SiO içermektedir. Bir ısıtıcının ömrü sadece 20 kristal üretimi kadar olabilmektedir. Fakat daha özel dizaynlarla yüzlerce kristal ya da daha fazlası da üretilabilmektedir. Saseptör fırının en sıcak kısmında bulunmaktadır. Saseptörün sıcaklığı ısıtıcının sıcaklığı kadar sıcak olmasa da mekanik olarak daha gerilmiş durumdadır. Sıcaklık düştüğü zaman saseptör malzeme küçülmeye başlar ve saseptördeki temel gerilim çevrimin sonundaki soğutma aşamasında yaşanmaktadır. Bununla birlikte kuvars potanın termal genleşme katsayısı oldukça küçük ve saseptör

malzemesinin yaklaşık onda biri kadardır. Sıcaklık Si'nin erime noktasına yaklaştığında pota saseptörün şekline uyum sağlayacak kadar yumuşamaktadır. Soğumanın başlangıcında pota tekrar sertleşmekte ancak saseptör birkaç milimetre daha küçülme eğilimi göstermektedir. Bu döngü saseptörü muazzam bir mekanik gerilime maruz bırakmaktadır. Bu sorunu azaltmak için saseptör normal olarak birkaç parçaya (genellikle 3) kesilmektedir (Tilli ve ark., 2015). Yüksek sıcaklıklarda kuvars pota ve grafit saseptör arasındaki yakın temas onları buharlaşarak karbon ve SiO oluşturan reaksiyonlara sokmaktadır. Bu reaksiyonlar gazlar için kolay kaçış yollarının bulunduğu ve sıcaklığın en yüksek olduğu yerlerde malzemeyi aşındırmaktadır. Tipik olarak aşınma tutucu bölümlerin birbirlerine göre hareket etmesine izin veren kesimlerinde en hızlıdır. Ayrıca bu işlemler sonucunda ortaya çıkan karbon monoksit karbon kirliliği riskini önemli miktarda arttırmaktadır (Tilli ve ark., 2015).

2.2.4.4 Isı Transferi

Si kristali büyütülmesi işleminde çalışan üç önemli ısı transferi modu vardır. Bunlar iletim, konveksiyon ve radyasyondur (Zulehner, 1983). Radyasyon fiziksel boşluklarla birbirinden ayrılmış yüzeyler arasında büyük bir öneme sahiptir. Kullanılan çoğu malzeme ısıyı çok verimli biçimde absorbe etmekte ve böylece yansıyan radyasyonla taşınan ısı daha az öneme sahip olmaktadır. Termal radyasyonun önemi sıcaklığa olan güçlü bağlılığından dolayı artmaktadır. Bu durum ışıma gücü yoğunluğunun sıcaklığın dördüncü gücü ile orantılı olduğunu söyleyen Stefan-Boltzman yasası ile açıklanmaktadır. İletim, bir malzeme (katı ya da sıvı) boyunca normal ısı transfer modudur. Yapısal grafit malzemeleri yüksek sıcaklıklarda mükemmel ısı ileticileridir. Öte yandan yalıtkanlar iletimi azaltacak şekilde dizayn edilmektedir. Örneğin, grafit fiberler arasında sınırlı temas olduğu için iletim sadece lifler boyunca gerçekleşmektedir. Isının yalıtım tabakası kalınlığı boyunca iletilmesi bu sebepten ötürü zor olmaktadır. Aynı zamanda fiber yapılar kısa mesafelerde radyasyonu aralıksız olarak engellemektedir. Yalıtım malzemeleri inert gazın bütün yapı boyunca akmasını engellemekte ve konvektif ısı transferini oldukça yavaşlatmaktadır (Tilli ve Haapalinna, 2009).

Eritme bölgesindeki bileşenlerin ısı transferi üzerine farklı etkileri vardır. Örneğin kuvars pota oldukça düşük termal iletkenliğe sahiptir ve ışıyım yoluyla ısıyı transfer etmektedir. Potalar yüksek saflıkta kuvars kumunun eritilmesiyle (elektrik ark yardımıyla) üretilmektedirler. Fakat kuvars potaların dış kenarları yüksek miktarda minik kabarcıklar içermekte ve bu kabarcıklı yapı radyasyonu daha az etkili hale getirmektedir. Öte yandan potanın iç kısmının kabarcıksız olduğu için radyasyon buradan kolay bir şekilde geçebilir. Bazen potanın kabarcıklı yapısının sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bile söylenebilmektedir. Çünkü potanın duvarı termal radyasyon için neredeyse optik bir yansıtıcı gibi davranmaktadır. Eriyik içindeki ısı konveksiyon ve iletim ile taşınmaktadır. Metalik yapıdaki eriyiğin termal iletkenliği grafit ile neredeyse eşit ve termal iletkenliği genel ısı transferine katkıda bulunan önemli bir unsur olarak düşünülmektedir. Fakat basit analizler konveksiyonun baskın bir rol oynadığını göstermektedir. Si kristalinin ısı iletimine katkıda bulunan iki bileşeni bulunmaktadır. Kristalin büyüme hızı 1 mm/dk aralığında olduğu için biraz şaşırtıcı gelmektedir. Yükselen kuvvetlerle yönlendirilen eriyik akışı tipik çekme hızından iki-üç katı daha büyüktür (Hoshi ve ark., 1980; Tilli ve ark., 2015).

Cz-Si işleminde fırın basıncının düşük olması ve argonun düşük termal iletken olmasına rağmen gazın varlığı yalıtım için kullanılan fiberli malzemelerin yalıtım özelliklerinde negatif bir etki oluşturmaktadır. Gaz akışı ile ısı kaybının bir başka modu ise gelen gazın kendisini ısıtması gerekliliğidir. Gaz sıcak bölgeden geçerken sıcaklığı 1000 °C'nin üzerine yükselmektedir. Pek çok durumda giren gazın iletim konveksiyonu ve ısıtılması için kullanılan enerji miktarı yaklaşık 5 kW civarındadır. Bu değer sıcak bölgenin tükettiği enerjiyle (40-100 kW) kıyaslandığında oldukça düşük bir değerdir. Ayrıca soğutma işleminde gazın aldığı ısı göz ardı edilmemelidir (Tilli ve Haapalinna, 2009).

2.2.4.5 Eriyik Konveksiyonu

Günümüzde büyütülen en büyük Cz kristali birkaç yüz kilo ağırlığındadır. Bu üretimlerde potaların büyüklüğü neredeyse küçük bir küvet kadardır. Katılama ara

yüzeyi eriyiğin üst yüzünde bulunur ve bu yüzden bu alanlar eriyiğin iç kısmına göre daha soğuktur. Eriyik sıcaklığın artması ile birlikte genişler ve potanın alt bölgesindeki ısınmış eriyiğin yoğunluğu azaldığı için yüzeye doğru yükselmeye başlar. Erimiş Si'nin viskozitesi suyun viskozitesinden biraz daha düşüktür. Bu durumda büyük hacimlerdeki eriyik davranışını kontrol etmek oldukça zordur. Eriyiğin bu hareketleri çalkalanmaya sebep olmaktadır (Braunsfurth ve ark., 1997). Eriyiği dengede tutmak için iki önemli yaklaşım vardır. Bunlar uygun sıcaklık dağılımını oluşturmak ve pota dönüşü ile manyetik alanları hassas bir şekilde ayarlamaktır. Manyetik alanlar özellikle çok fazla eriyiğin olduğu ve yüksek miktarlarda kristallerin üretildiği sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu gibi uygulamalarda sadece pota dönüş hızının değiştirilmesi eriyiğin stabilizasyonu için yetersiz kalmaktadır. MEMS kristalleri için kullanılan daha az miktarlardaki eriyiklerde diğer parametreleri değiştirmeden sadece manyetik alanların ayarlanmasıyla istenilen konveksiyon özellikleri elde edilebilmektedir (Tilli ve ark., 2015).

2.2.4.5.1 Potanın Dönüşü. Tipik bir Cz kristal büyütme sürecinde Si eriyik genel olarak potayla birlikte dönmektedir. Si eriyiğin düşük viskozitesi nedeniyle potanın dönme hızını eriyiğin dönme hızına göre ayarlamak oldukça zaman almaktadır. Normalde kristalin alt kısmı eriyik dönme yönüne göre zıt yönde dönmekte ve bu yüzden kristal büyütülmesi aşamasında eriyiğin dönme hızı yavaşlamaktadır. Fakat bu genel kuralın bazı istisnaları vardır. Örneğin manyetik kuvvetler kullanılarak eriyiğin potadan daha yavaş veya daha hızlı dönmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca pota dönüş hızı zaman ilerledikçe daha da artacak şekilde değiştirilebilir. Eğer eriyiğe enine manyetik alan uygulanırsa eriyiğin potanın döndüğü hızdan daha farklı bir hızda döneceği bilinmektedir. Bu durum enine statik manyetik alanın elektriksel iletken Si sıvısının dönen gövdesi üzerine şiddetli bir yavaşlatma kuvveti uygulamasından kaynaklanmakta ve manyetik alan çok kuvvetli olursa eriyik pota dönüş hızından bağımsız olarak neredeyse dönmemektedir (Tilli ve ark., 2015).

Eriyiğin içerisindeki en sıcak bölgesi potanın yarıçapının yakınındadır. Eriyik bu noktadan yukarı yani soğutucu kristale doğru hareket etmek istemektedir. En soğuk

nokta sıcaklığı erime noktasına çok yakın olan kristalin eriyiğe temas ettiği noktadır. Burada eriyik aşağıya doğru hareket eder ve eriyiğin bu dönüşü potanın köşe kısmına yakın bir bölgede dönerek tamamlanır. Ancak bu durum esasen anlatıldığı kadar basit değildir. İlk olarak Si'nin viskozitesi o kadar düşüktür ki yukarı doğru akan akışkanın pota duvarından içeriye doğru akması bu sebeple engellenir. Bu durum serbest konveksiyon etkisi olarak da isimlendirilmektedir. İkinci olarak pota çevresi boyunca oluşan oldukça geniş hız bileşeni (azimutal hız) kristale doğru gitmeye çalışan eriyik için ciddi bir zorluk oluşturmaktadır. Eriyik radyal olarak içe doğru hareket ederek doğrusal hızını korumaktadır. Bununla birlikte pota merkez çizgisinden uzaklaştıkça açisal hız artmaktadır. Bu olgu kristal çevresinde merkezkaç kuvveti üzerine büyük bir etkiye sahipken potanın içerisinde geri kalan eriyik hiç etkilenmeden potayla birlikte hareket etmektedir. Örneğin pota 10 devir/dk hızda döndüğünü ve 200 mm yarıçaplı bir akışkan hacminin olduğunu varsayarsak bu sıvının 180 mm'lik çaplı kısmı iç kısma doğru hareket etmeye çalışırsa dönme hızı 11 devir/dk'ya artmaktadır. Bu 11 devir/dk hızda dönen sıvı hacmi 10 devir/dk hızda dönen sıvıya göre yaklaşık olarak 100 N/m^3 daha büyük merkezkaç kuvvetine maruz kalmaktadır. Merkezkaç kuvvetindeki bu değişim kristal büyütmede oldukça önemlidir. Yerçekiminin kendisi serbest bir konveksiyona sebep olmaz fakat sıvı yoğunluğu içerisindeki farklılıklarla birlikte yer çekimi önemli farklılıklar yaratmaktadır (Tilli ve Haapalinna, 2009).

Yüksek kristal dönme hızlarında eriyik akış modeli dikey yönde uzanan girdaplar oluşturmaya eğilimlidir. Dönme hızı artarsa bu eğilim daha da artmaktadır. Diğer yandan dar girdaplar ısınıyı yukarı doğru yönlendirilen akış bölgeleriyle aşağı inen soğuk bölgeler arasında daha kolay bir şekilde değiştirebilir. Bu ısı değişimi girdapların komşu parçaları arasında ısı azalması gerçekleşmekte ve bu durum ısı transferinde konveksiyonun rolünü azaltmaktadır. Prensipite potayı çok hızlı bir şekilde döndürmek mümkündür. Çünkü dönüş tek başına iletken ısı transferinin girdapların yukarı-aşağı yönlendirilmiş kısımlarındaki sıcaklık farklılıklarını etkin bir şekilde ortadan kaldıracak küçük yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda sıcaklığın dengelenmesi serbest konveksiyon için itici gücün elimine

olmasını ve serbest konveksiyon ısı transferinde hiçbir rolü olmamasını sağlamaktadır (Anttila, 2006).

2.2.4.5.2 Kristalin Dönüşü. Cz sisteminde kristal büyütülürken sürekli döndürülmenin sebebi kristalin şeklinin yuvarlak tutulmak istenmesidir. Bununla birlikte kristal dönüşü kristalin altındaki eriyiğin akış hareketi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kristalin altındaki akışı ifade eden klasik yaklaşım, durgun akışkanın üstünde dönen disk benzeri bir yaklaşımdır. Bu durum oldukça fazla araştırılmış ve akışkanların üç boyutlu akışının analitik olarak çözülebileceği durumlar ile tarif etmektedir. Ortaya çıkan akış modeli kristalin merkez çizgisine uzaklığından bağımsız olarak yukarı doğru yönlendirilmiş bir bileşen içermektedir. Ayrıca, dışarıya yönlendirilmiş ve katılaştıran ara yüzeyde değeri sıfır olan radyal bir bileşen daha vardır. 1 mm'den daha ince kalınlıktaki ince bir tabakada akış spiral bir şekilde dışa doğru radyal olarak yönlendirilir. Eğer kristal dönüş hızı artarsa akış hızı lineer olarak artarken kalınlık dönme hızının kareköküne orantılı olacak şekilde azalmaktadır. Bu durum dışarıya doğru yönlendirilen kütle akışında bir artışa ve bunun da dönüş hızının kareköküne orantılı olmasına neden olur. Akışkan içindeki itici güç kristalin neden olduğu dönme hareketidir. Kristalin altındaki kristal-eriyik ara yüzeyi en yüksek merkezkaç kuvvetine maruz kalmaktadır. Bununla birlikte ara yüzeye en yakın bölgedeki eriyik hemen üstündeki katı yüzeyin hızını yavaşlatmasından dolayı rahat bir şekilde dışa doğru hareket edemez. Eriyiği ilk etapta döndüren viskoz kuvvetler eriyiğin kristale göre hareket etmesini engellemektedir. Ara yüzeyden uzak bölgelerde dönme hızı aslında sıfırdır. Bu sebeple bu bölgelerde merkezkaç kuvveti ve radyal hızlar oluşmaktadır. Si'nin erime viskozitesi o kadar düşüktür ki kristalin altında sadece ince bir tabaka kristalle birlikte hareket edebilmekte ve maksimum radyal hızın bulunabileceği kısım bu tabakadır (Tilli ve ark., 2015).

Katkı maddelerinin ve oksijenin kristal bünyesinde düzgün bir şekilde dağılmasında dışa yönlendirilmiş akış oldukça önemlidir. Tipik olarak aşırı yüksek radyal katkı maddelerinin veya oksijen gradyanlarının en kolay çözündürme işlemi kristal dönüş hızını arttırılmasıdır. Kristalin altındaki soğumuş eriyik menüsküs

dışındaki termal eğimleri azaltma eğilimindedir. Gövdenin silindirik şeklindeki herhangi bir bozulma kristalin dışındaki sıcaklığın kademeli olarak artırılması durumunda önemli bir probleme dönüşmeden düzeltilme ihtimaline sahiptir. Rastgele dalgalanmaların sonucu olarak ve büyüyen tek kristalin anizotropisi nedeniyle daima böyle yüzey bozuklukları ile karşılaşmaktadır (Davis ve ark., 1980; Ekhult ve Carlberg, 1986; Zulehner, 1994). En belirgin anizotropik durum (100) düzlemine sahip malzemede kristal boyunca 90°'lik aralıklarla 4 dikey büyüme düğümünün varlığıdır. Bu düğümlere menüsküste kristalin diğer kısımlarına kıyasla biraz daha uzun büyümeye çalışan sıkı paket (111) düzleminin oluşumuna neden olmaktadır. Eğer termal gradyanlar çok küçük oluşmuş ise bu durum menüsküs üzerinde kontrolsüz büyümeye ve tek kristalli yapının bozulmasına sebep olmaktadır. Eğer pota ve kristalin dönüş hızları oldukça yüksek olursa, üç boyutlu akış modeli kristalin çevresine yakın olarak gelişecek ve bu durum dört katmalı simetride nispeten dar büyüme yumrularının (düğüm) genişlemesine ve düzleşmesine neden olmaktadır. Kristal dönüşüne göre düzenlenmiş disk benzeri akış modeli çok sınırlı bir gerçekliktir. Eğer eriyik ve kristali sadece döndürülürse kristalin hemen altındaki eriyik geri kalan eriyikten daha yavaş dönecek ve bu dönüş hızları yine basit bir akış modeli oluşturacak ve akış yönü tersine çevrilecektir. Bu tür bir konfigürasyon kristalin radyal boyutu üzerinde oldukça çok oksijen gradyanı oluşturacaktır. Ayrıca aynı işlem antimon gibi buharlaşan katkı maddelerinin kullanıldığı durumlarda oksijen gradyanı yerine yüksek dopant gradyanı şeklinde olacaktır (Tilli ve Haapalinna, 2009).

Zıt yönde döndürme hem pota hem de kristalin beraber döndürüldüğü endüstriyel bir standarttır. Bu işlemlerde eriyik akış için analitik bir çözüm oluşturmak hiç kolay değildir (serbest konveksiyon gibi diğer akış bileşenlerinin düşünülmemesi durumunda). Normal üretimlerde kristal potadan daha hızlı döndürülmekte fakat eriyiğin büyük bir kısmı yüzey alanının çoğu potayla temas halinde olduğundan potayla aynı doğrultuda dönmektedir. Eriyik kristalin hemen altında katılma ara yüzeyindeki eriyik kristalle birlikte dönmektedir. Fakat bu bölgenin birkaç milimetre aşağında ise eriyiğin dönüşü üst tarafın tam tersi yöndedir. Bu iki katman arasında çok ince bir katman vardır. Bu katmanın dönüşü neredeyse sıfıra yakındır. Bu

katmanın üstündeki ve altındaki bölgelerdeki eriyik merkezkaç kuvveti etkisiyle dışa doğru akma eğilimindeyken bu iki katman arasında kalan katman içe doğru akma eğilimindedir. Bu akış büyüyen kristaldeki oksijenin kontrolü ve düzgün bir şekilde dağıtılmasında son derece önemlidir. Bu akış katmanı ile potanın altındaki oksijen yukarıya taşımaktadır. Bununla birlikte üç boyutlu türbülans etkisi akış paternlerini daha fazla zorlaştırmaktadır (Anttila, 2006; Tilli ve Haapalinna, 2009).

2.3 Silisyum Waferların Hazırlanması

Entegre devreler ve ayrık katı hal aygıtlar çok kademeli işlemler basamağı kullanılarak tek kristalin Si malzemeden yapılmış waferlar üzerinde üretilmektedir. Üretilen bu cihazlarda yüksek verim ve iyi cihaz performansı elde edilebilmesi için başlangıç waferların tekrarlanabilir yüksek kalitede olması gerekmektedir. Çünkü yüksek çözünürlüklü desenler wafer yüzeyine optik olarak oluşturulurken ön yüzey hem makro hem de mikro ölçekte düz olmalıdır. Ayrıca wafer yüzeyinin elektriksel ve kimyasal özellikleri de iyi kontrol edilmelidir (McEvoy ve ark., 2003).

Wafer hazırlama işlemi büyütülmüş kristal ingottan elektronik cihazlarda kullanılmaya hazır waferlara dönüştürülmesidir. Bu uygulamalar için her waferın en az bir yüzeyi temiz, düz ve hasarsız olması gerekir. Prensip olarak ideal bir wafer bir ingottan ince dilimler halinde kesilen dilimin en az bir tarafındaki tüm testere izlerinin kaldırılmasını ve yüzeyin pürüzsüz ve parlak görüne kadar parlatılması ile hazırlanabilmektedir. Bazı çok hassas olmayan uygulamalar için böyle hazırlanmamış bir wafer yeterli kalitede olabilmektedir. Fakat günümüzün cihaz ve devre tasarımları genellikle daha karmaşıktır. Devre patern geometrileri küçülüp wafer boyutları daha da büyüdükçe wafer hazırlama beklentileri daha zorlayıcı hale gelmektedir. Bu nedenle, Si wafer hazırlama büyütülen ingot ile başlayan ve parlatılmış wafer ile biten üretim hattına sahip bir dizi kademeyi kapsamaktadır (Reinhardt ve Kern, 2008).

2.3.1 Si Wafer Üretim Prosesleri

Tablo 2.3’de wafer hazırlama işlemi için standart bir proses akış listesi verilmiştir. İngot şekillendirme, wafer şekillendirme ve parlatma ana kategorilerinin her biri wafer uygulamasına bağlı olarak bir dizi işlem adımını temsil etmektedir. En sağdaki sütunda wafer hazırlama işlemleri ilerledikçe gerçekleştirilebilecek bazı tipik proses içi kontrol ölçümleri verilmiştir.

Tablo 2.3 Wafer hazırlama işlemi için standart bir proses akış listesi (O'Mara ve ark., 2007)

Kategori	Proses adımları	Ölçüm ve karakterizasyon
İngot şekillendirme	(1) Kırpma (2) İngot taşlama (3) Düz taşlama (4) Dağlama	Oksijen ve karbon miktarı Direnç Çap ve yüzey pürüzlülüğü
Wafer şekillendirme	(1) Wafer kesme (2) Isıl işlem (3) Köşe düzeltme (pahlama) (4) Lepleme (veya zımparalama) (5) Wafer dağlama	Oryantasyon Kalınlık Düzlük ve yüzey pürüzlülüğü Hasar Direnç
Wafer sonlandırma	(1) Parlatma (2) Temizleme (3) İşaretleme	Görsel kontrol Kalınlık ve düzlük Yüzey pürüzlülüğü

Tablo 2.3’de verilen işlem adımlarının her birinin uygulama amaçları kısaca açıklanırsa:

İngot şekillendirme: (1) Kristal kırpma, Si ingotun taç ve kuyruk kısımları bir testere ile kesilerek vücut kısmından ayrılmasıdır. (2) İngot taşlama, ingotun çapı genellikle bir elmas taşlama diski ile belirtilen değere ve toleransa indirilmesidir. (3) Düz taşlama, düz alanlar daha sonra wafer türünün ve yönünün tanımlanması işlemi için ingot boyunca uzunlamasına taşlanması işlemidir. (4) İngot dağlama, ingot taşlama işlemi sonrasında oluşan pürüzlü yüzeyi ortadan kaldırmak için bir dağlayıcı banyoya daldırılmasıdır (O'Mara ve ark., 2007).

Wafer şekillendirme: (1) Wafer kesme, Si ingotun bir testere kullanılarak ince tabakalara halinde kesilmesidir. (2) Isıl işlem, kristal veya kesilmiş waferların oksijen vericilerinin yok edilmesi ve direnç normallizasyonu için gerçekleştirilen bir

ısıtıl işlem uygulamasıdır. (3) Köşe düzeltme (pahlama), kesilmiş waferların köşeleri istenen kenar konturu elde etmek için bir elmas zımpara ile taşlanması işlemidir. (4) Wafer lepleme (veya zımparalama), waferın kalınlığı ve düzgünlüğünün sağlanabilmesi için yassı bir lepleme plakası üzerinde aşındırıcı bir solüsyonla kullanılarak waferların yüzeylerinin aşındırılması işlemidir. Lepleme işlemi tek veya çift taraflı olarak uygulanabilmektedir. (5) Wafer dağlama, waferın kesme, lepleme ve kenar pahlama işlemlerinden kaynaklanan hasarlı yüzey tabakalarının kimyasal maddeler ile uzaklaştırması işlemidir (O'Mara ve ark., 2007).

Wafer sonlandırma: (1) Parlatma, kesilmiş veya leplenmiş Si waferların mat yüzeylerinin hasarsız ve ayna gibi parlak bir yüzeye dönüştürülmesi işlemidir. Parlatma işlemi tek veya çift taraflı olarak uygulanabilmektedir. (2) Temizleme, organik ve inorganik formdaki kirleticilerin bir dizi kimyasal ve mekanik temizleme işlemi ile wafer yüzeyinden uzaklaştırılması işlemidir. (3) İşaretleme–waferların tanımlanabilmesi ve izlenebilmesi amacıyla işaretlenmesi işlemidir (O'Mara ve ark., 2007).

Wafer hazırlamada "standart" bir üretim basamağı sıralamasının bulunmadığına dikkat edilmelidir. Wafer hazırlama ve kontrol adımları kullanım yerlerine göre spesifik prosedürlere ve kalite kontrole bağlı olarak üretilmektedir. Örneğin, bazı wafer hazırlama işlemlerinde parlatma işlemi sadece kesilmiş ve dağlanmış waferlara başka hiçbir işlem yapılmadan doğrudan gerçekleştirilmektedir. Diğer bazı uygulamalarda ise lepleme doğrudan kesilen Si waferı uygulanmaktadır (Bates, 2000; Reinhardt ve Kern, 2008).

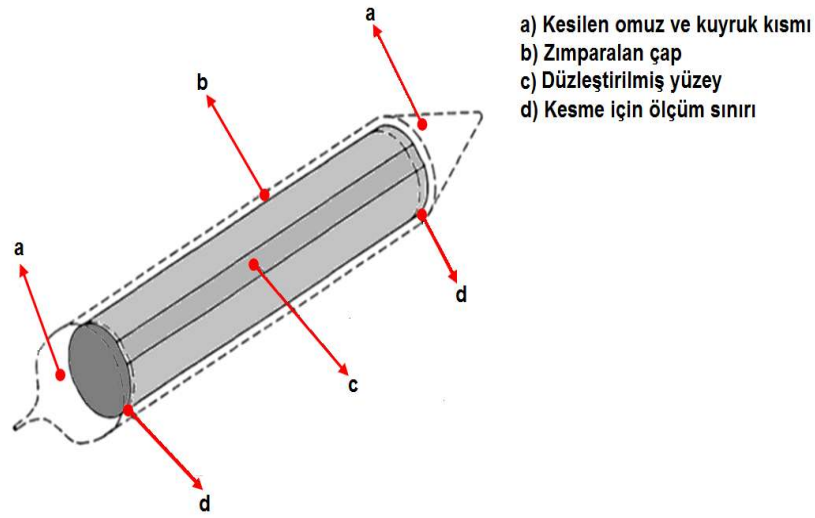
2.3.1.1 İngot Şekillendirme

Büyütülen Si ingotlar konik biçimli uçlara (omuz ve kuyruk kısmı) sahiptir. Wafer kesme işlemi öncesinde ingotta büyütülen kristal oryantasyonuna uygun vücut bölümü omuz ve kuyruk kısmından testere sistemiyle kesilerek uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca belirlenen bir ingot çapının homojen olarak elde edilmesi için ingotun yan yüzeyleri taşlama işlemine sokulmaktadır. Büyütülen ingotta dopant tipi ve kristal

yönünü belli etmek için bir yan yüzey düzleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Son olarak ise dilimlenmeden önce ingot yüzey işleme kusurlarının giderilmesi için dağlama sıvısına daldırmaktadır. Kristalin dilimleme işlemine hazırlanması için gereken işlemlere topluca ingot şekillendirme denmektedir. Şekil 2.9'da kristal hazırlama işleminde gerçekleştirilen mekanik işlemler şematik olarak gösterilmiştir (O'Mara ve ark., 2007).

2.3.1.2 Dilimleme

Si güneş hücreleri Si ingottan ayrı ayrı kesilmiş waferların üzerinde üretilmektedir. Tarihte Si waferlar ilk olarak iç çaplı testereler kullanılarak üretilmiştir. Kesme sistemi olarak tel testerelerin kullanımına geçilmesi dilimleme işleminin üretim kapasitesini önemli miktarda arttırmıştır. Bunun artışın sebebi hem kesme kayıplarının hem de hasarlı wafer üretiminin bu yöntemle azalmasıdır. Tablo 2.4'de tel testereler ile iç çaplı testereler arasındaki temel farklılıklar özetlenmiştir (Luque ve Hegedus, 2011; Marinescu ve Kurokawa, 2012; O'Mara ve ark., 2007).



Şekil 2.9 İngot şekillendirme işlemleri (O'Mara ve ark., 2007)

Tel testere ile kesme işlemlerinde kesilen waferda çok az kalıntı gerilim oluşmakta ve bu özellik çok daha ince waferların kesilmesine olanak sağlamaktadır. Yüksek kalıntı gerilmeleri hem kesme işleminde hem de sonraki yüzey işlemlerinde kırılmalara sebep olmaktadır. İnce kalınlıklarda kesimlerde iki kesim noktası

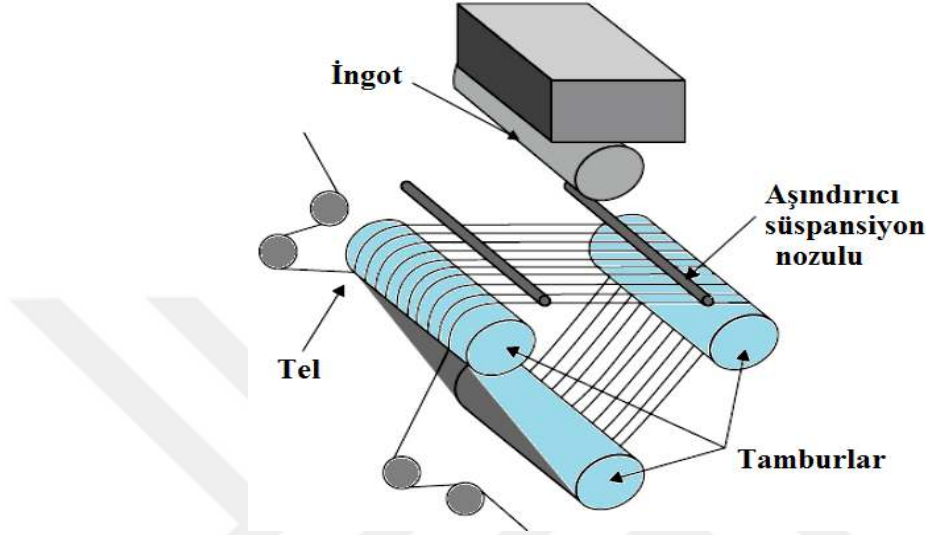
arasındaki mesafe çok yakın olduğundan kesim bölgesinde oluşan gerilmeler birbirini etkilemektedir. Ancak tel kesim yönteminde bu etkileşimler kalıntı gerilimlerinin daha az olması sebebiyle daha az önemli hale gelmektedir. Tel ile kesme işlemi daha az hasarlı ve düzgün yüzeyler elde etmek amacıyla tercih edilmektedir. Tel kesme işleminde, Si ingot ile tel testerenin temas ettiği noktalarda herhangi bir ısınma olmamakta ve böylece ısınmadan kaynaklanan kristal yapı bozulmaları da gerçekleşmemektedir. Tel testere ile iç çap testere maliyet açısından kıyaslandığında tel testerenin sarfları çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, iç çap testere çok daha kolay kolay proses edilebilmektedir. Ancak, tel testere sistemleriyle aynı anda çok fazla sayıda wafer üretilebilmekte ve bu durum maliyeti çok daha düşük seviyelere getirmektedir. Günümüzde wafer üretim sürecini iyileştirmeye doğru ilerledikçe sistematik ve teorik mekanizma tecrübelerle ilerlemeye devam etmektedir. Bu sayede, prosesin verimliliği ve üretkenliği ihtiyaçlar dahilinde optimize edilebilmektedir (Bates, 2000; Kayabasi ve ark., 2017; Reinhardt ve Kern, 2008).

Tablo 2.4 Tel ve iç çaplı testere arasındaki temel farklılıklar (Marinescu ve Kurokawa, 2012)

Özellik	Tel Testere	İç Testere
Kesme metodu	Lepleme	Zımparalama
Tipik kesme yüzeyi özellikleri	Tel izi	Talaş ve kırılma
Hasarın derinliği	10-15 μm	20-30 μm
Verimlilik	300-2000 $\text{inch}^2/\text{saat}$	200-400 $\text{inch}^2/\text{saat}$
Bir çevrimde kesilen wafer	>3200 wafer	Kesim başına 1 wafer
Kesim başına kesme kaybı	200-300 μm	300-500 μm
Kesilebilecek en ince wafer kalınlığı	>200 μm	300 μm
Inch başına kesilen wafer adeti	~30 wafer	~27 wafer
Kesilebilecek en yüksek kristal çapı	>300 mm	Maksimum 200 mm

Tel testere sistemleri aşındırıcının bulunduğu yere göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi kullanılan aşındırıcıların bir akışkan sıvının içinde bulunduğu (serbest aşındırıcılı) sistemdir (Şekil 2.10). Bu sistem yarı iletken ve fotovoltaik endüstrisinde büyük çaplı ince kristal waferların üretimi için ortaya çıkmıştır. Diğeri ise aşındırıcıları kesme teline yapışık olan sistemdir. Bu iki yöntem kıyaslandığında

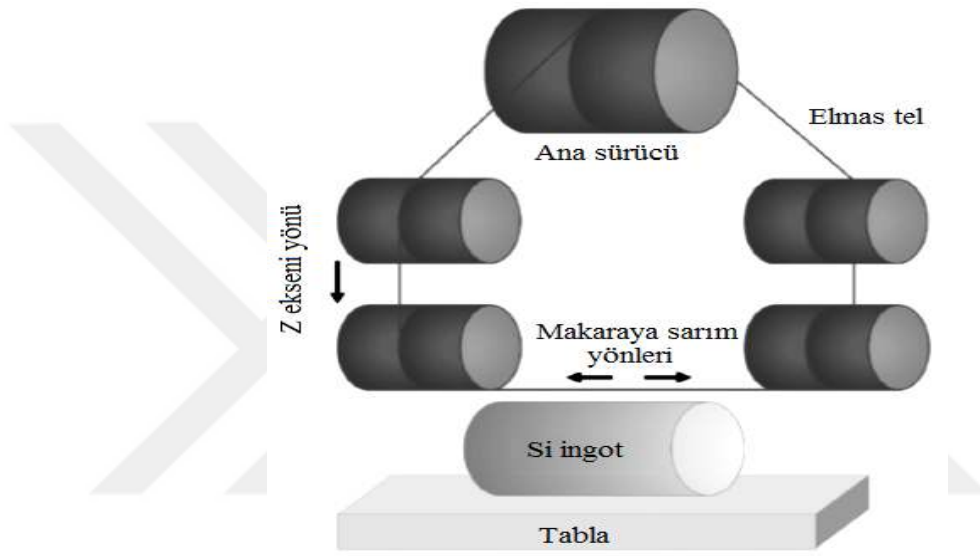
aşındırıcı solüsyonlu kesme sistemleri daha verimli olup daha ince waferlar bu sistemde kesilebilmektedir. Ancak bu sistemde üretilen waferlar elmas telli sistemlerde üretilenlerden daha pürüzlüdür ve aşındırıcı solüsyonları çevre kirliliği problemi oluşturmaktadır (Marinescu ve Kurokawa, 2012).



Şekil 2.10 Tel kesme işleminin geometrik olarak tanımlanması (Marinescu ve Kurokawa, 2012)

Serbest aşındırıcılı tel kesme işleminde üç-bünyeli aşındırma olayı gerçekleşmektedir. Bu işlemde aşındırıcı malzemeler sürekli olarak hareket halindeki tel ile kristal arasındaki sürekli olarak yuvarlanmakta ve kesilen Si wafer yüzeyinde çok fazla aşınma izi (çentikler) oluşmaktadır. Oluşan bu çentikler nispeten yumuşak Si kristali içerisine sert aşındırıcıların penetrasyonunu ile oluşmaktadır. Aşındırıcılar tel tarafından yüksek hızlarda taşındıklarında kristal malzemenin yüzeyinden talaş formunda küçük parçacıklar kopartırlar. Bu parçacıklar aşındırıcıların üzerine uygulanan kuvvetin ve Si kristali ile aralarındaki sertlik farklılığının bir sonucunda olarak oluşmaktadırlar (Chung, 2014; Sopori ve ark., 2013; Watanabe ve ark., 2010). Ayrıca toplam malzeme uzaklaştırma hızı kesme solüsyonundaki aşındırıcı konsantrasyonunun ve tel hızının bir fonksiyonudur. Tel testere ile kesme işleminde telin kesme bölgesine getirdiği aşındırıcı solüsyonun büyük bir bölümünün kesme bölgesine tam anlamıyla girmediği gözlemlenmiştir. Özet olarak kesme solüsyonun büyük bir kısmının kesme işlemine dahil olmadan sistemden atıldığı söylenebilmektedir. Bu durumun yüksek derecede yapışkan aşındırıcılı solüsyonu (yağ ya da etilen glikol bazlı) ile gerilim altında aksel olarak hareket eden tel

arasında elasto-hidrokinamik bir etkinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumla açıklamak için bazı elasto-hidrokinamik modeller geliştirilmiştir. İlk yaklaşımda aşındırıcı solüsyon Newtonyen bir sıvı olarak kabul edilmiş ve tel ise kayan bir rulman gibi modellenmiştir. Bu durumu analiz etmek Si kristal rijit olarak kabul edilip yağın davranışı için yağlama teorisinden gelen Reynold eşitliğinin ve gerilim altındaki bir tel için elastisite denklemlerinin birlikte çözülmesi gerekmektedir (O'Mara ve ark., 2007).



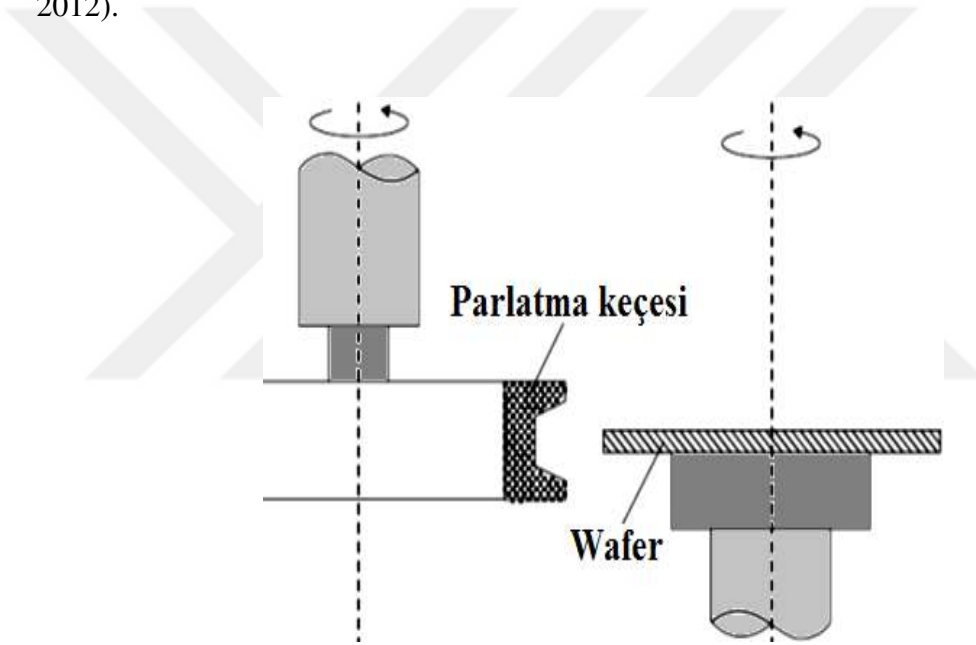
Şekil 2.11 Elmas tel kesme sisteminin şematik gösterimi (Kayabasi ve ark., 2017)

Serbest aşındırıcı solüsyonlu tek kesme sistemlerine alternatif olarak aşındırıcı elmas partiküllerin elektroliz veya reçine ile kesme teline sabitlendiği bir teknolojiye geliştirilmiştir (Şekil 2.11). Bu ikinci yöntemin avantajlarından biri herhangi bir aşındırıcı solüsyona ihtiyaç duymaksızın sadece suda çözünebilen ayrıca geri kazanılabilen bir soğutma sıvısı kullanılarak kesme işlemi yapılabilmesidir. Ayrıca, elmas tel testerede daha yüksek bir dilimleme hızı vardır. Yapılan bazı araştırmalar sabit elmas telli sistemlerle yapılan kesimlerde wafer yüzeyinde oluşan hasar tabakasının kalınlığının aşındırıcı solüsyonlu sistemler ile oluşanın neredeyse yarısı kadar olduğunu gösterilmiştir. Elmas tellerin kesme hızı solüsyonlu sistemlere göre yaklaşık 2,5 kat daha fazladır (Kayabasi ve ark., 2017; Sopori ve ark., 2013). Ayrıca iç çaplı kesme sistemleri ve tel testere sistemlerine alternatif olarak tel erozyon ve tel elektrolitik-kıvılcım ile kesme sistemleri de geliştirilmiştir. Ancak bu sistemlerde

kesme yüzeyinde oluşan yüzey deformasyonu aşındırıcılı tel sistemlerinde daha fazla olduğu için kullanımları sınırlıdır (Marinescu ve Kurokawa, 2012).

2.3.1.3 Pahlama

Tek kristalin Si çok sert ve kırılgan bir yapıya sahiptir ve kristal eksenine boyunca kolayca kırılabilir. Bu kırılmalar cihaz üretiminde wafer köşelerinde talaş oluşumu şeklinde oluşabilmektedir. Bu kırık oluşumu cihaz kalitesinin ve veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Bu gibi sorunların ortadan kaldırılması için wafer köşelerine pahlama işlemi yapılmaktadır (Şekil 2.12) (Marinescu ve Kurokawa, 2012).



Şekil 2.12 Wafer köşelerinin pahlama işleminin şematik gösterimi (Marinescu ve Kurokawa, 2012)

Metal oksit yarı iletkenler ve iki kutuplu cihazlar için gerekli olan pahlama geometrileri birbirinden farklıdır. Metal oksit yarı iletkenler için cihaz üretimi sırasında talaş oluşumunu ve ya kırılmayı engellemek için uygulanırken iki kutuplu cihaz üretiminde ise epitaksiyel büyümede taçlanma oluşumunu engellemek için uygulanmaktadır. Her iki oluk açma işleminde de 800 veya 1500 grit elmas keçesi kullanılmaktadır. Çeşitli basınçlarda uygulanan pahlama işleminde Si waferlarda elmas keçesinden kaynaklanan bazı hasarlar meydana gelebilmektedir. Ancak bu

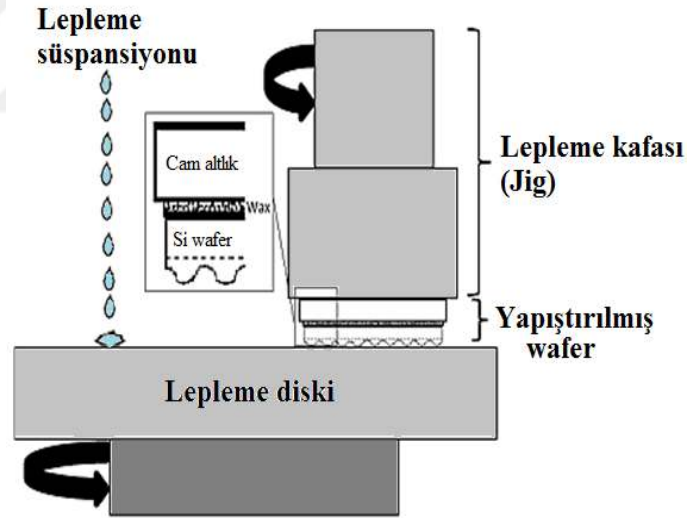
hasarlar daha sonra uygulanan bir kimyasal dağlama işlemiyle yapıdan uzaklaştırılabilmektedir (Marinescu ve Kurokawa, 2012).

2.3.1.4 Lepleme

Lepleme yüksek boyutsal doğruluk ve mükemmel yüzey kalitesine sahip malzemeler elde etmek için kullanılan bir yüzey işleme prosesi olarak tanımlanabilmektedir (Marinescu ve ark., 2006). Si wafer hazırlamada yüzey düzleştirme işlemi zımparalama veya lepleme prosesleri olarak iki şekilde yapılabilmektedir. Lepleme işlemi yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için uygulansa da asıl kullanım amacı yüzeyden malzeme kaldırmak ve yüzeye şekil vermektir. Lepleme prosesi zımparalama prosesi ile kıyaslandığında ince aşındırıcı tanelerin çalışma yüzeyine az miktarda penetre etmesinden dolayı düşük malzeme uzaklaştırma hızına sahiptir. Ancak bu işlem iş parçasına nispeten düşük kuvvetler uygulandığı için kırılgan ve gevrek malzemeler için oldukça etkin bir şekilde kullanılabilir ve çalışma alanında ekstra bir ısınma problemi de oluşmamaktadır. Ayrıca düz ve silindirik yüzeylerde mükemmel doğrulukta yüzeyler elde edilebilmektedir (Doi ve ark., 2011; Marinescu ve Kurokawa, 2012). Şekil 2.13'te tek taraflı lepleme işleminin şematik bir gösterimi verilmiştir.

Leplemenin temel ilkesi lepleme plakasının düzlüğünün iş parçasına aktarılmasıdır. Bu işlem, solüsyon içerisindeki aşındırıcı tanelerin dönen plaka tarafından iş parçasının üzerine aktarılması şeklinde gerçekleşmektedir. Dönen lepleme diski iş parçası ile aynı yönde hareket etmekte ve solüsyon iş parçası ile dönen parça arasına aşındırıcı bir film oluşturmak için beslenmektedir. Bu dönme esnasında aşındırıcı taneleri iki yüzey arasında serbestçe hareket etmektedir. Cihazda iş parçaları kontrol halkaları tarafından lepleme diski üzerinde sabit bir pozisyonda tutulmaktadır. Aşınma için gerekli yük lepleme kafasının ağırlığı ve gerek duyulursa ekstra bir ağırlık ile sağlanmaktadır. Eğer penetrasyon derinliği yeterli ise tanelerin dönen köşeleri iş parçasından (veya lepleme plakasından) bir parça kopartacaktır. Bu kopan parça plastik deformasyonun bir sonucu olarak geride bir çukur oluşturacaktır. Bu durum kayma teorisi ile açıklanabilmektedir. Burada, çukur oluşturma kuvveti

yeteri kadar büyük olduğunda kayma gerilimi kayma mukavemeti toplamından ve iç sürtünme kuvvetinden daha büyük olmakta ve malzemenin yüzeyinden kopan kısımda çukur oluşturmaktadır (Doi ve ark., 2011; Marinescu ve Kurokawa, 2012). Lepleme işleminde malzeme uzaklaştırma hızını farklı proses parametreleri etki etmektedir. Örneğin, lepleme basıncının artmasıyla malzeme uzaklaştırma hızı artmaktadır. Aşındırıcı tanelerinin boyutlarının artması yine malzeme uzaklaştırma hızını arttırmaktadır. Ancak bu artış basıncın artması kadar etkili değildir. Ayrıca lepleme sıvısının artışı malzeme uzaklaştırma hızında ciddi bir artışa sebep olmaktadır. Lepleme işlemi iş parçasını ya tek taraflı olarak ya da çift taraflı olarak uygulanabilmektedir. Genellikle yarı iletken malzemelerin (Si, Ge) lepleme işlemi tek taraflı yapılmaktadır. Bu işlemde ilk olarak wafer düz bir cam altlık yüzeyine bir yapıştırıcı ile yapıştırılmaktadır. Lepleme cihazının tutucusuna cam yüzeyinden vakum ile tutturulan wafer lepleme plakasının üzerine konulmakta ve daha sonra lepleme işlemi gerçekleştirilmektedir (Marinescu ve Kurokawa, 2012).



Şekil 2.13 Si wafer lepleme sisteminin şematik gösterimi

Lepleme işleminde farklı boyutlarda ve sertliklerde aşındırıcı partiküller kullanılmaktadırlar. Bu işlemlerde en çok kullanılan aşındırıcı partikülleri elmas kübik bor nitrür, silisyum karbür, alüminyum oksit, amorf alümina, korondum ve kalsine alüminadır. Ayrıca demir oksit, krom oksit, titanyum oksitte özel uygulamalarda kullanılan aşındırıcı malzemelerdir. Tablo 2.5'te kullanılan çeşitli aşındırıcıların çeşitli sertlikleri verilmiştir. Bu işlemde, çok farklı malzemelerden

yapılmış plakalar lepleme yüzeyi olarak kullanılmaktadır. Lepleme prosesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü tamamen lepleme plakalarıyla ilişkilidir. Lepleme işlemi yapılmadan önce bu plakaların yüzeylerinin düz olduğunu kesinleştirmek için yüzey doğruluğu ölçümleri yapılmakta ve herhangi bir çarpıklık olması durumunda farklı aşındırıcılar kullanılarak plakaların yüzeyleri düzleştirilmelidir (Marinescu ve Kurokawa, 2012).

Lepleme plakasının türü ve bileşimi önemlidir. Eğer lepleme plakası sertse aşındırıcı tanelerin gömülmesine karşı dirençli olurlar ve bu şekilde aşındırıcı taneler kayma işleminden çok yuvarlanırlar. Eğer lepleme plakası yumuşaksa aşındırıcı partiküller plakaya yapışabilir. Bu durum lepleme işleminde daha fazla sürtünme hareketinin meydana gelebileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda aşındırıcılar iş parçasına gömülmezler. Modern lepleme makinalarında sıklıkla sert plakalar ve çok ince boyutlarda aşındırıcılar kullanılmaktadır. Genel olarak lepleme plakaları dökme demir, bakır, pirinç, kurşun veya seramikten yapılmaktadır (Marinescu ve Kurokawa, 2012; Marinescu ve ark., 2006; Pei ve Strasbaugh, 2001).

Tablo 2.5 Lepleme işleminde kullanılan aşındırıcı partiküller (Marinescu ve Kurokawa, 2012)

Aşındırıcı Tipi	Mohs Sertlik Değeri
Elmas	10
Kübik bor nitrür	9,9
Bor karbür	9,7
Silisyum karbür	9,5
Alümina	9,0
Beyaz alüminyum oksit	9,0
Alfa alümina	9,0
Gama alümina	8,0
Korundum	9,0
Kalsine alümina	8,5-9,0
Krom oksit	8,5
Seryum oksit	8,0
Garnet	8,0-9,0
Kuvars	7,0
Demir oksit	6,5
Alümina hidratlar	5,0-7,0

Aşındırıcı solüsyonu aşındırıcı tanelerin lepleme plakasının üzerine taşınmasında kullanılan bir sıvı karışımıdır. Aşındırıcılar yağ veya su gibi sıvılar içerisinde süspansiyon haline getirildikten sonra plaka üzerine beslenmektedir. Aşındırıcı tanelerin süspansiyon içerisinde homojen kalması için bazı çökelme önleyici kimyasal maddeler de kullanılmaktadır. Ayrıca bu süspansiyonlar içerisine bazı korozyon önleyiciler de ilave edilmektedir. Ancak süspansiyon içerisine katılan bu kimyasallar lepleme işlemine katkı sağlamamaktadır (Marinescu ve Kurokawa, 2012).

2.3.1.5 Dağlama (Kimyasal Temizleme)

Dağlama işlemi lepleme işlemi sonrasında Si waferların tamamen paralel olması için uygulanmaktadır. Bu proses artık parçacıkların ve bozulmuş katmanların kimyasal olarak uzaklaştırılmasını içermektedir. Wafer dağlama işlemlerinde daha düşük pürüzlülük ve yüksek verim elde etmek için en çok hidroflorik ve nitrik asit kombinasyonları kullanılmaktadır (Klein ve D'stefan, 1962). Dağlama işlemleri asitlerle yapılabildiği gibi alkalilerle de yapılmaktadır. Alkalilerle yapılan işlemlerde en çok potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hidroksit (NaOH) alkalileri kullanılmaktadır. Alkalilerle yapılan dağlama işleminde (100) düzlemi (111) düzleminden 60-100 kat daha fazla dağlama hızına sahiptir. Bu seçici dağlama özelliğinden dolayı (100) düzleminde çok pürüzsüz yüzeyler elde edilmektedir (Luque ve Hegedus, 2011; O'Mara ve ark., 2007).

2.3.1.6 Parlatma

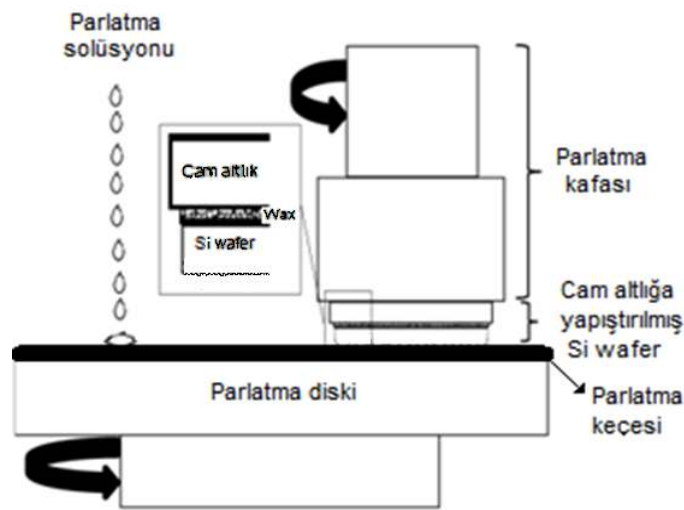
Kimyasal olarak dağlanmış wafer yüzeyleri eğer herhangi bir çarpıklık olmayan düzgün bir yüzey isteniyorsa ayna gibi parlatılmış son işlemlere ihtiyaç duyarlar. Si waferların parlatması sentetik deriden yapılmış bir keçe üzerine parlatma solüsyonu damlatılmasıyla leplemeye benzer şekilde yapılmaktadır (Şekil 2.14). Solüsyonlar yaygın olarak koloidal silika veya isli silikaların bir alkali solüsyon içerisine katılmasıyla hazırlanmaktadır. Bu proseste alkali solüsyonla birlikte yumuşak silisyum hidrat filmi wafer yüzeyinde oluşturulmaktadır. Proses sırasında bu hidrat

filmi solüsyon içindeki partiküller tarafından wafer yüzeyinden uzaklaştırılmaktadır (Doi ve ark., 2011; Marinescu ve Kurokawa, 2012; Marinescu ve ark., 2006).

Si waferların parlatmasında çeşitli parlatma yöntemleri kullanılmaktadır. Bazı proseslerde waferın her iki tarafı aynı anda parlatılabilirken diğer proseslerde ise waferın altlığı vakumla tutturulduğu tek taraflı parlatmalar yapılmaktadır. Günümüzde cam bir altlığın üzerine vaks kullanılarak (polimer bağlayıcı) yapıştırma yöntemiyle tek tarafı parlatma işlemi en çok kullanılan yöntemdir (Marinescu ve ark., 2006). Şekil 2.14’de görüleceği üzere parlatma işlemi, parlatma keçesinin yerleştirildiği masanın döndürülmesi ve waferın yerleştirildiği tutma parçasından yükün uygulanması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin lepleme işleminden farkı ise kullanılan keçenin ve solüsyonun farklı olmasıdır. Aşındırıcı partiküller wafer ile parlatma plakası arasına girdiği zaman wafer yüzeyinde sürtünme izleri oluşmakta ve bu izlerin yüzeyden tamamen giderilmesi gerekmektedir. Parlatma işlemleri üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada düzlük elde edilmeye çalışılmaktadır. İkinci ve üçüncü aşamalarda ise yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi ve parlatma izlerinin tamamen giderilmesi hedeflenmektedir. Parlatmanın ilk aşamasında polyester veya poliüretan (kumaş olmayan) sert keçeler kullanılmaktadır (Doi ve ark., 2011). İşleme süresini azaltmak ve verimi arttırmak için hızlandırıcı ajanlar solüsyonun içerisine katılmaktadır. İkinci aşamada sentetik deri bir taban üzerine koloidal yapıdaki çözelti wafer yüzeyinde mükemmel parlaklığı elde edebilmek için kullanılmaktadır. Waferlar parlatıldıktan sonra yapıştırıldıkları cam altlıktan ayrılır ve temizleme prosesine gönderilirler. Parlatma işleminden sonra elde edilen Si waferların üzerine cihaz üretimi yapılacağı için waferın yüzey hassaslığı ve kalitesi doğrudan üretilecek cihazın kalitesini etkileyecektir. Örneğin wafer yüzey pürüzlülüğü ve artık işleme bozuklukları waferın yüzeyinde oluşturulacak oksit filminin dayanımını etkilemektedir (Marinescu ve Kurokawa, 2012).

Si waferların mikro pürüzlülük değerlerinin net bir tanımlaması yoktur. Ancak tepe ve çukur değerleri ortalaması değerlerinin (R_a) 10 nm’nin altında olması istenmektedir. Şekil 2.15’de yüzey pürüzlülüğü ve bunların yatay-düşey yönlerdeki analitik davranışlarını ölçüm için kullanılacak cihazların tiplerini gösterilmiştir. Ayna

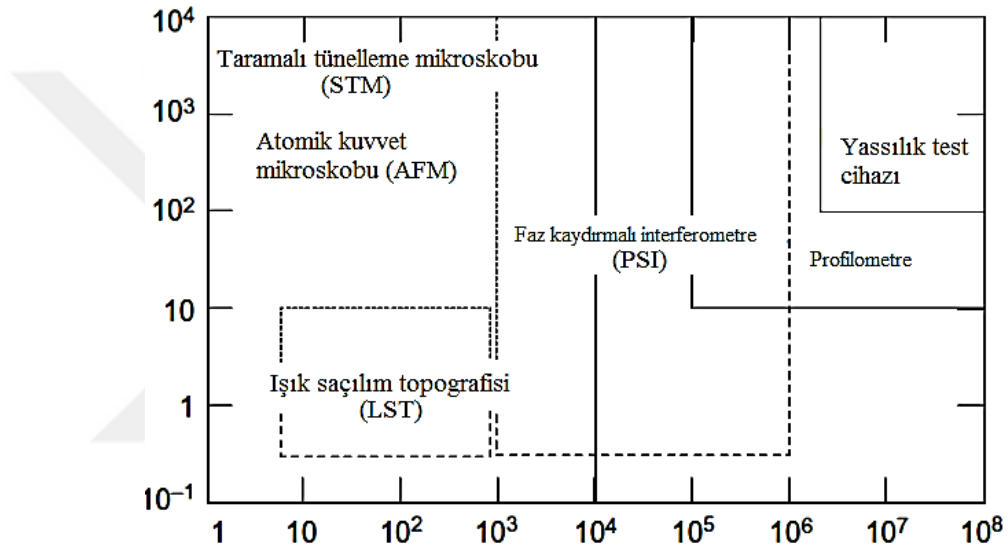
gibi parlatılmış Si waferların yüzey pürüzlülüklerinin değerlendirmesinde dalgalı ve bulanık tabirleri kullanılmaktadır. Dalgalanma bir faz kaydırma interferometre cihazı ile nicel olarak ölçülebilmektedir. Dalgalanmayı kontrol etmek için parlatma keçesinin yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilmesi çok önemlidir. Bulanıklık ise kuvvetli ışık altında kontrol edilmektedir. Fakat atomik seviyelerde yüzey geometrisini değerlendirebilen taramalı tünelleme mikroskopların geliştirilmesiyle değerlendirmeler bu cihazlar ile daha doğru yapılabilmektedir. Bulanıklık onlarca nanometrelik yüzey pürüzlülüğü olarak düşünülür. Bulanıklık bileşeninin pürüzlülük bileşeni aşındırıcı olarak kullanılan koloidal silikanın boyutu ile aynı derecede büyüktür ve bu nedenle daha küçük partiküller ile süspansiyonlar hazırlanarak bulanıklığın azaltılması sağlanabilmektedir. Ayrıca, solüsyon içerisindeki koloidal silika çok kararsız yapıdadır ve kolayca aglomera oluşturabilmektedir. Bu nedenle, çeşitli kimyasal ajanlar süspansiyon içerisine ilave edilmektedir. Parlatma prosesinde solüsyon içerisindeki alkaliler Si waferın bulanıklık bileşiminin pürüzlülüğünü etkilemektedirler. Örneğin, pH değeri 10’u aşarsa aniden bir puslanma hasarı oluşabilir. Bunun nedeni çözelti içerisindeki alkali bileşimle oluşan dağlama reaksiyonunun malzemenin mekanik olarak uzaklaştırılmasından daha hızlı olmasıdır. Bu değerın düşük olduğu durumlarda ise bulanıklık halen görülebilmekte ve bunun sebebi olarak koloidal silikanın solüsyonun içerisinde aglomere olduğu söylenebilmektedir (Marinescu ve Kurokawa, 2012).



Şekil 2.14 Si wafer parlatma sisteminin şematik gösterimi

2.3.1.7 Sulu Temizleme

Yarı iletken cihaz entegrasyonu geliştikçe üretim sürecindeki temizlik gereksinimi de artmaktadır. Bir parçanın mikronizasyonu geliştikçe çok küçük kirlilikler bile cihaz özelliklerini etkileyebilirler. Genel olarak wafer yüzeyindeki partiküllerin boyutlarının dizayn kurulma setinin onda birinden (10^{10} atom/cm³) daha aşağı olması istenmekte ve bu şekilde elektriksel özellikler partiküllerin varlığından daha az etkilenmektedir (Reinhardt ve Kern, 2008).



Şekil 2.15 Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde kullanılan cihazların sınıflandırılması (Marinescu ve Kurokawa, 2012)

Yarı iletken malzemelerin temizleme kimyasalları ABD’de VCA-şirketi tarafından geliştirilmiş ve halen kullanılmaktadır. Bu işlemde iki aşamalı temizlik işlemi uygulanmaktadır. İlk aşama SC-1 olarak isimlendirilip NH₄OH/H₂O₂/H₂O kullanılarak hazırlanmaktadır. İkinci aşama ise SC-2 olarak isimlendirmekte ve HCl/H₂O₂/H₂O kullanılarak hazırlanmaktadır. Bu solüsyonların kullanımına bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Temizleme aşamasında daha büyük çaplara sahip waferlara uygulanabilirliği arttırılması ve aynı zamanda temizleme maliyetleri ile çevreye olan zararlı etkilerinin azaltılması gerekmektedir. Hassas temizleme işleminde wafer yüzeyinde olabilecek tanecikleri gidermek için farklı temizleme solüsyonları da kullanılmaktadır (Kern, 1990; Reinhardt ve Kern, 2008).

2.4 Silisyum Wafer Uygulamaları: Silisyum Tabanlı Güneş Hücrelerinin Üretimi

2.4.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi bir genelleme yapılacak olursa dünyada kullanılan tüm enerjilerin temel kaynağıdır denebilir. Örneğin, fosil yakıtların (eski jeolojik dönemlerden gelen bitki kalıntıları) ve biokütlenin oluşumları güneş enerjisinin bir yakıtla dönüştürülmüş halleridir. Ayrıca rüzgar enerjisi oluşumunda güneşten gelen ısı dalgalarının oluşturduğu rüzgarlar kullanılmaktadır. Benzer şekilde hidroelektrik üretiminde kullanılan suyun kaynağı da güneş enerjisiyle buharlaşan suyun yeryüzünde tekrar depolanmasıdır. Bu örneklerden anlaşılabileceği gibi güneş dolaylı yollardan hayatımızı devam ettirebilmemiz için temel enerji kaynağımızdır. Bunların yanında fotovoltaikler (FV) güneş enerjisini kullanmanın basit ve en iyi tasarlanmış yöntemidir. FV cihazları güneş radyasyonunu herhangi bir gürültü, kirlilik veya taşıyıcı elemanlara ihtiyaç duyulmadan elektriğe dönüştürerek güvenilir ve uzun ömürlü hale getirmektedir (Duffie ve Beckman, 2013; Kalogirou, 2013).

2.4.1.1 Fotovoltaiklerin Önemi

Günümüzde FV cihazların büyük kısmı pratik olmaları ve ekonomik sebeplerden ötürü kullanılmasının yanı sıra elektrik üretirken çevreye hiçbir zarar vermemesi anlamında da çok önemli bir yere sahiptir. Elektrik üretiminin özellikle sera etkisi gibi çevresel etkileri düşünüldüğünde FV'lerin daha çok incelenip geliştirilmesi daha çok önem kazanmaktadır (Luque ve Hegedus, 2011).

FV'ler güneş ışığını güneş hücreleri kullanarak doğrudan elektriğe dönüştüren sistem ve elektrik üretiminde fosil yakıtlar kullanıldığı geleneksel yöntemlere karşı hızlı büyüyen ve giderek önem kazanan alternatif bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Diğer elektrik üretim teknolojileriyle kıyaslandığında ilk pratik FV cihazların 1950'lerde kullanıldığını düşünülürse göreceli olarak yeni bir teknolojidir. FV araştırma ve geliştirmeleri 1960'lı yıllarda uydu uygulamaları için ayrı bir güç

kaynağına ihtiyaç duyan uzay endüstrisinden büyük destek almıştır. O dönemde üretilen güneş pilleri bugünkü güneş pilleriyle kıyaslandığında binlerce kat daha pahalı üretilmiştir. 1970'lerdeki petrol krizi dünyadaki dikkati karasal olarak kullanım için alternatif enerji kaynaklarına yönlendirilmiştir. Bu durum, tüm dikkatleri FV sistemlerin geliştirilmesi üzerine çekmiştir. Petrol krizinin kısa sürede geçmesi FV'lerin geliştirilmesi üzerine yapılan teşviklerin azalmasına sebep olmasına rağmen FV'ler enerji üreten bir teknoloji olarak enerji piyasasının önemli bir elemanı olmuştur. Ayrıca karasal güç kaynağı alanında avantajlarının fark edilmesi FV endüstrisini geliştirmiştir. Özellikle taşınabilir küçük ölçekli uygulamaların (hesap makinesi, saatler vb) yapılabilmesi FV'lerin kullanımını daha da yaygınlaştırmıştır (Luque ve Hegedus, 2011).

2.4.2 FV'lerin Tarihçesi

Tek kristalin Si malzemesi yarı iletken cihazların ve büyük ölçekli entegre devrelerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikro elektronik fabrikasyon teknolojilerini kapsadığı için Si güneş hücreleri bütün FV cihazları içinde en yaygın olanıdır. Fotovoltaik-etki ilk olarak 1839 yılında Becquerel tarafından bir elektrolitik solüsyondaki elektrotun üzerinde ışığın hareketinden keşfedilmiştir. 1950'lerde yarı iletken cihazlar endüstriyel olarak büyük bir önem kazanmıştır. Silisyum veya germanyumun iletkenlik tiplerini değiştirmek için difüzyon teknolojilerinin kullanılması fikri 1952'de Pfann'ın patentinde açıklanmıştır. Si kristalinin büyümesindeki ve difüzyon tekniklerindeki hızlı gelişmeler mk- Si FV'lerin 1954'te Chapin ve arkadaşları tarafından % 6 verimli olarak üretilebilmesini sağlamıştır. 1958'e gelindiğinde Si hücrelerinin verimi karasal güneş ışık kaynakları altında % 14 seviyelerine kadar ulaşmıştır. Planar teknolojilerinin 1960'ların başlarında tanımlanmasından sonra yarı iletken cihazların ve entegre devrelerin üretilmesinde başlıca yöntem haline gelmiştir. 1970'lerin başlarında Planar teknolojilerinin fotolitografi teknikleriyle birlikte kullanılmasıyla güneş ışığı alan yüzeylerde yansıma kaybını azaltmak için anti-reflektans kaplamalar (ARK) Lindmayer ve arkadaşları tarafından yeni geliştirilen uzay hücrelerinde (mor hücreler) kullanılması için geliştirilmiştir. Mandelkorn ve arkadaşları mor hücrelerin içerisine bir "arka

yüzey elektrik alanı” eklemişlerdir. Yansıtma kayıplarını ARK ile azaltılması sonrasında 1974 yılında Haynos ve arkadaşları anizotropik dağlama ile yüzey tekstürleme teknolojilerini geliştirmişler ve bu sayede hücrenin güneşe bakan yüzeyindeki yansıtma kayıpları oldukça düşük hücreler üretilmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonrasında en iyi mor hücre verimliliği kara uygulamalarında yaklaşık % 17’ye uzay uygulamalarında ise % 15,5 yükseltilmiştir. 1984’lerden günümüze kadar Si FV’lerdeki en belirgin gelişme hücrelerin yüzeyleri ve hacimlerinden rekombinasyonları azaltmaya daha fazla önem verilmesidir. Bu amaçla, yüksek verimli Si FV’ler için pek çok cihaz yapıları geliştirilmiştir. 1985 yılında 25°C’de ve AM 1,5 G spektrumu altında New South Wales Üniversitesinde (UNSW) geliştirilen geleneksel bir mikro işlenmiş pasive edilmiş vericili güneş pili (PEFV) düşük dirençli p-Si altlık üzerinde % 20 verimli olarak üretilmiştir. UNSW 1988 yılında ise % 20,8 verimle güneş hücresi üretilmiştir. Sonraki dönemlerde en önemli yenilik olarak Stanford üniversitesi tarafından geliştirilen arka nokta temaslı Si FV’lerdir. Bu hücrede FV yoğunlaştırıcı sistem uygulaması ilk olarak tasarlanmıştır. 1988 yılında yoğun ışık altında standartların ortamda 0,15 cm²’lik bir hücreden yapılan ölçümlerde verim o güne kadar ulaşılamayan % 28,4 gibi çok yüksek bir değere ulaşmıştır. Bu hücre ayrıca yoğunlaştırılmamış ışık altında da iyi performans göstermiştir. 1988 yılında 8,5 cm²’lik hücrelerde % 22,3 verim elde edilmiş ve 37,5 cm²’lik hücrede ise % 21,6 verim elde edilmiştir. Hücreler az miktarda doplanmış n-Si altlık üzerine yapılmıştır. Hücrenin yapısı arka kontak ile birleştirilmiş hücreler temeline göre üretilmiştir. Arka kontak Si FV’lerde üst yüzeyler gelen ışığın yansımalarını azaltmak için tekstürlenmiştir. Bu hücrelerin p-n kavşakları pek çok küçük kare yapısı içermekte ve bu kare yapılar hücrenin arka yüzeyine çok yakın olarak üretilmiştir. Ayrıca metal kontak hız gritleri hücrenin tüm arka yüzeyine uygulanarak gölgeleme problemi oluşturulmadan üretilebilmiştir. Bu hücresinin geliştirilmesinde harcanan çabalar en yeni mikro elektronik işleme proseslerini kapsamaktaydı. 1989 yılında UNSW’de Blakers ve arkadaşları tarafından düşük dirençli p-Si hücreleri konvensiyonel pasive edilmiş ve arka kontaklı hücre (PEAK) olarak geliştirilmiş ve 4 cm²’lik hücrelerde % 22,3’lük verim elde edilmiştir. ABD uzay uygulamalarında 1993 yılında çift eklemli FV’ler üretilmiş ve verim % 20 civarlarında elde edilmiştir. 1994 yılında üç eklemli Ge güneş hücreleri üretilmiş ve

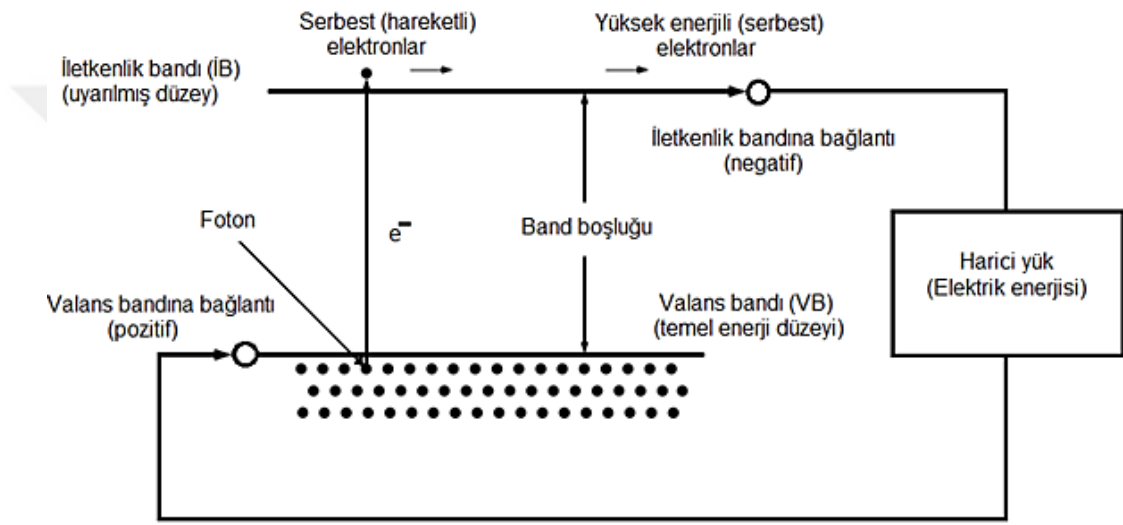
% 29,5 verim değeri elde edilmiştir. 2006 yılında Spectrolab şirketinin ürettiği ilk katı hibrit boyaya duyarlı üç eklemlı FV'ler üretilmiş ve verim % 40 olarak ölçülmüştür. 2008 yılında NREL'in (National Renewable Energy Laboratory) geliştirdiği üç eklemlı FV'lerde % 40,8 gibi rekor bir verim elde edilmiştir. NREL'in yaptığı bu çalışma gelecekte yapılacak olan 4-6 eklemlı III-V tipi hücreler için bir ön çalışma olmuştur. Ayrıca çok eklemlı güneş hücrelerinde Masafumi ve arkadaşları verimin % 50'ye kadar yükseltilebileceğini göstermiştir. 2009'da UNSW tarafından yapılan çalışmalarda % 43 verimli güneş hücreleri üretilmiştir. 2012 yılında Solar-Junction şirketi tarafından üretilen güneş panellerinde % 41,1 verimler elde edilmiştir. Fraunhofer güneş enerji sistemleri enstitüsünün güneş paneli üreten şirketlerle ortak yaptığı çalışmalarda şüana kadar elde edilmiş olan en yüksek verim % 44,7 elde edilmiştir. Yüksek verimlerin elde edildiği bu güneş hücreleri genel itibariyle küçük yüzey alanlarına sahiptir. Bu anlamda daha çok ticari olarak kullanılabilecek güneş panelleri için yapılan geliştirme çalışmalarında en yüksek verimler Panasonic şirketi tarafından 144 cm²'lik n-tipi kristalin Si hücrelerde verim % 25,6 olarak elde edilmiştir (Das, 2012; Kumar, 2013; Lai, 2014; Luque ve Hegedus, 2011).

2.4.3 FV Fiziğinin Temelleri

2.4.3.1 Güneş Hücrelerinin Uygulama Temelleri

Şematik resmi Şekil 2.16'da verilen güneş hücreleri ışık (aydınlık) ortamında elektrik akımı üretmek üzere dizayn edilmiş yarıiletken cihazlardır. Elektrik akımı basitçe bir yarı iletken içerisine fotonun absorpsiyonu ile üretilen elektronların ve boşlukların akışı olarak ifade edilebilir. Ancak foto-etkiyle yarı iletken malzeme içinde elektron-delik çifti üretildiğinde üretilen bu elektron-delik çifti yarı iletkenin kafesi içinde serbestçe hareket eder ve herhangi bir akım akışı oluşturmada enerjiyi sıfırlanır (açık devre durumu). Sıfırlanmayan bir akımın oluşturulması elektron ve deliklerin tercih edilen yönde akmasını gerektirmektedir. Bu durum güneş hücrelerinin en temel formu olan p-n kavşağının (veya diyot) oluşturulmasıyla elde edilmektedir. Hücrede p-n kavşağının oluşturulduğu yerde bir elektrik alan (ϵ)

oluşmaktadır. Elektronlar ve delikler yüklü parçacıklar oldukları için elektrik alan etkisiyle elektronlar n-bölgesine boşluklar ise p-bölgesine aktırılır. Güneş pillerinde yüklü taşıyıcıların p-n kavşağı boyunca hareketi foto akımı (I_L) oluştururken birbirinden ayrılması da potansiyel veya voltaj farkını (V) oluşturur. Bu potansiyel fark oluşturulan foto akımın dış yük üzerinden akmasını sağlamaktadır. Yani güneş hücrelerinde elektrik akımı olarak da ifade edilen bu durumda n bölgesindeki elektronlar harici bağlantı üzerinden boşlukça zengin p-tipi bölgesine akarlar ve orada boşluklara bağlanırlar (Luque ve Hegedus, 2011).



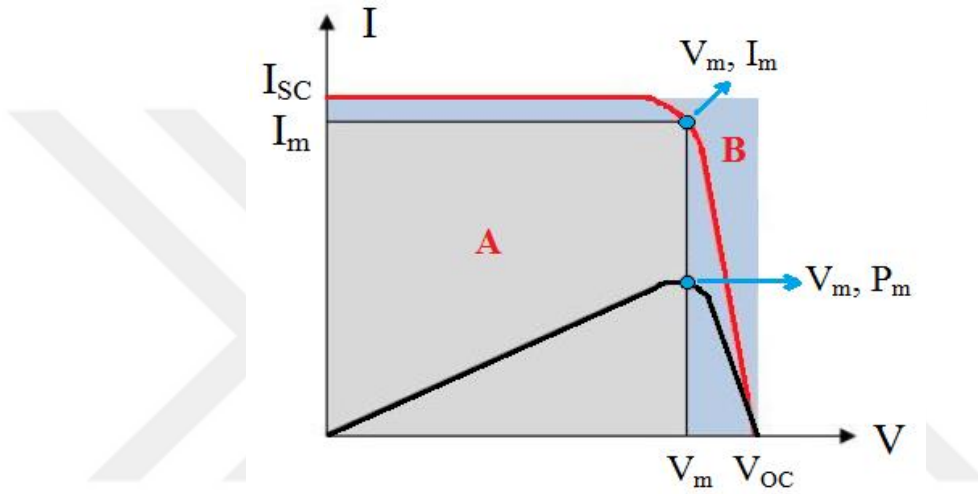
Şekil 2.16 Güneş hücresinin şematik görüntüsü (Luque ve Hegedus, 2011)

Güneş panelinin yüzeyine çarpan fotonun enerjisi (hw) yarı iletkenin valans band aralığından (E_g) büyükse absorpsiyon katsayısı (α) büyük bir değer alıp yüzeye çarpan fotonların çoğu absorbe edilmekte ve elektron-boşluk çiftleri bu bölgede oluşturulmaktadır. Eğer bu durum aktif yarı iletken bölgesinde oluşmamışsa fotonlar yüzeyden aktif bölge içerisine ilerleyemezler. Yani absorplama olmadığı için elektron-boşluk çiftleri üretilemez ve bunun sonucu olarak fotovoltajik etki üretilmemiş olur. Bununla birlikte $hw \gg E_g$ durumlarda elektron-boşluk çiftleri çok büyük enerjiler üretmekte ve bu fazla enerji fonon emisyonuna sebep olmaktadır (Luque ve Hegedus, 2011; Solymar ve Walsh, 2009).

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_0}\right) \quad (2.22)$$

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.23)$$

Standart bir güneş hücresine tarif etmek için kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), doldurma faktörü (FF) ve verim (η) olarak dört temel parametre kullanılmaktadır. İdeal koşullarda kısa devre akımının maksimum akıma (I_m) eşit olması beklenmektedir. Açık devre voltajı Eşitlik 2.22’te verildiği şekilde hesaplanabilir. Burada I_0 doygunluk akımıdır (Solymar ve Walsh, 2009).



Şekil 2.17 Güneş hücresinin I-V (akım-voltaj) karakteristiği

Güneş hücrelerinin diğer bir önemli parametresi doluluk faktörüdür. Şekil 2.17’de verilmiş şematik bir güneş hücresi akım voltaj eğrisinde açık devre voltajı ve kısa devre akımı güneş hücresinin I-V grafiğinde en yüksek voltaj ve akım değeri olarak söylenebilir. Ancak bu iki değerden birisi sıfır iken güneş hücresinden herhangi bir güç elde edilememektedir. Doluluk faktörü bir güneş hücresinden elde edilebilecek en yüksek verimi belirlemek amacıyla kullanılan bir parametredir (Eşitlik 2.23). Ayrıca Şekil 2.17’de gösterildiği gibi I-V eğrisi içerisinde kalan en büyük kare alanı (A) doluluk faktörünü temsil etmektedir (Breitenstein ve ark., 2006; McDonald ve Cuevas, 2000).

Ticari olarak üretilen güneş hücrelerinde genel olarak FF değeri % 70’den daha büyüktür. Yüksek dolum faktörlü güneş hücreleri daha düşük şant (seri) direnç değerine sahiptir. Bu durum fotonla üretilen elektrik akımını daha az ısı enerjisine

dönüştürülerek kaybolmasını sağlamaktadır (Solymar ve Walsh, 2009). Güneş hücresinin verimi hücrenin çıkışındaki elektrik gücü (P_m) değerinin hücrenin girişindeki foton gücüne ($P_{giriş}$) bölünmesiyle tarif edilmektedir (Eşitlik 2.24).

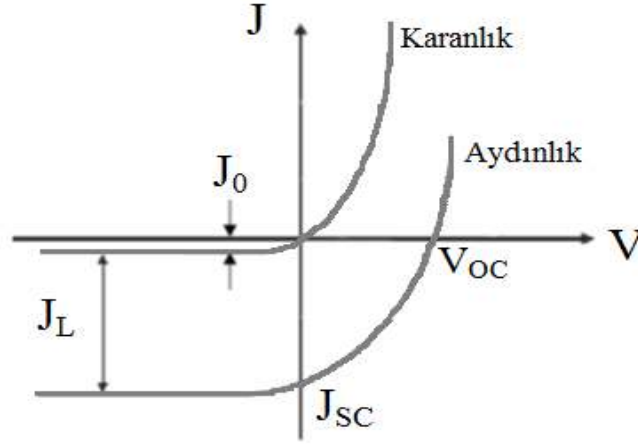
$$\eta = \frac{P_m}{P_{giriş}} \times 100 = \frac{I_m V_m}{P_m} \times 100 \quad (2.24)$$

Güneş hücrelerinden üretilecek gücün maksimum değerlere ulaştırılabilmesi için I_{sc} değerinin maksimum olması I_0 değerinin minimum olması ve seri direncin düşük olması durumlarını gerektirmektedir. Burada I_0 değerinin düşük olması V_{oc} 'yi yükseltecek ve seri direncin azalması da FF'yi arttıracaktır (Solymar ve Walsh, 2009). Matematiksel olarak güneş panelinden çıkan akım (I) Eşitlik 2.6'da verilmiştir. Burada I_L doyma akım yoğunluğu ve n ise ideallik faktörü ifade etmektedir. İleri bias diyotun I-V ilişkisinin tarif edildiği Eşitlik 2.25'deki ilk terim olan karanlık akım ($I_{karanlık}$) diyot eşitliğinin tarif edilebilmesi için kullanılmaktadır.

$$I = I_{karanlık} - I_L \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) - I_L \quad (2.25)$$

Fiziksel olarak $I_{karanlık}$ değeri elektronca zengin n^+ bölgeden (verici) elektronca zayıf p^- bölgesinin tabanına yayılmış elektronların difüzyon akımıdır. Foto-uyarılmış taşıyıcıların sürüklenme akımı karanlık difüzyon akımının tersi yöndedir ve süper pozisyon ilkesine göre karanlık akımdan basit bir şekilde çıkartılabilir. Bir güneş hücresinin I-V eğrisi foto akım tarafından aşağı doğru kaydırılan diyot I-V eğrisidir (Şekil 2.18) (Solymar ve Walsh, 2009).

Akım akışının yönü foto akım negatif olduğu için elektron akışının tersi yönündedir. Bununla birlikte geleneksel olarak güneş pillerinin foto akımı pozitif bir akım olarak yazılır ve akım yoğunluğu (J) Eşitlik 2.26'de tarif edilmektedir (Luque ve Hegedus, 2011).



Şekil 2.18 Güneş hücresinin karanlık ve aydınlık alanlardaki I-V eğrileri

Güneş hücrelerinin en önemli operasyon modu açık devre durumudur. Açık devre durumu, hücrenin her iki ucu da kısa devreyken hücrenin üzerinden hiçbir akımın geçmediği durumdur. Kısa devre koşullarında cihazda potansiyel bir düşme/voltaj farklılığı yoktur. Yani Eşitlik 2.7’de ikinci terim çıkartılırsa ve cihazın maksimum akımı $J_{SC} \approx J_L$ olur. Açık devre durumunda hiçbir harici yük yoktur ve bundan dolayı da akım akışı olmaz ($J=0$) ve Eşitlik 2.26 2.27’deki gibi tekrar yazılır (Luque ve Hegedus, 2011).

$$J = J_L - J_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.26)$$

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{J_{SC}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.27)$$

Fiziksel olarak elektron-boşluk çiftlerinin rekombinasyonu bir akım oluşturmamaktadır. Fakat matematiksel olarak rekombinasyon karanlık difüzyon akımına benzer şekilde foto akıma karşı akma davranışı göstermektedir. Eşitlik 2.25 ve 2.26’da verilen güneş hücrelerin bir diyotlu modellerinde karanlık difüzyon akımı ve rekombinasyon bir tek akım teriminde toplanabilmektedir. Karanlık difüzyon akımı veya rekombinasyon akımındaki bir artış J_0 ’ı arttırmakta ve dolayısıyla J_{sc} ve V_{oc} ’yı azaltmaktadır. İdeal bir diyotta ideallik faktörü 1’dir. Gerçek cihazlarda ise 1’den daha büyük olabilir. Gerçek cihazların ideal ve ideal olmayan davranışları 2 diyotlu model kullanılarak ayrılabilir (Eşitlik 2.28). Burada n_1 ve J_{01} ideal diyot durumundaki ideallik faktörü ve doyma akım yoğunluğudur. n_2 ve J_{02} ideal olmayan

diyot durumundaki ideallik faktörü ve doyma akım yoğunluğudur. İkinci diyot geleneksel olarak $n_2=2$ tükenme bölgesindeki rekombinasyon ile bağlantılıdır. Fakat gerçek aygıtlarda çeşitli rekombinasyonların birlikte oluşmasından dolayı değer 2'den daha büyüktür. Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi rekombinasyon hem akım hem voltaj kaybına yol açmakta ve bu nedenle Eşitlik 2.29'da tanımlanan güneş pilinin verimliliğini azaltmaktadır. Burada $P_{giriş}$ optik gücü tarif eder (1000 W/m^2) normalize edilmiş AM 1,5 aydınlık ortamı altında ve $P_{çıkış}$ elektrik çıkış gücüdür. Doldurma faktörü V_{oc} , J_{sc} ve elektrik (seri ve paralel) kayıplarından etkilenmektedir (Luque ve Hegedus, 2011).

Deneysel olarak, azınlık taşıyıcıları ömrü (τ) Si wafer içerisindeki rekombinasyon kayıplarının belirlenmesi için kullanılır yaşam ömrü istatistiksel olarak ortalama foto uyarılmış elektronların rekombinasyon öncesinde kalan miktarını temsil etmektedir. Hacimsel rekombinasyon oranı (U) aşırı taşıyıcı konsantrasyonu (Δn) ile ifade edilmektedir (Eşitlik 2.30). Burada U 'nun birimi cm^{-3}/s , Δn ise cm^{-3} biriminde ve yaşam ömrü saniye cinsindendir. Yarı iletkenlerde üç tane rekombinasyon mekanizması vardır. Bunlar ışınımsal rekombinasyon, Auger rekombinasyonu ve Shockley-Read-Hall rekombinasyonudur (yarı iletken bant aralığında kusur bölgelerinin rekombinasyonu) (Das, 2012; Sheoran, 2009). Deneysel ölçümler etkin rekombinasyon hızı ve etkin yaşam ömrünü ifade etmektedir. Eşitlik 2.30'u kullanarak τ_{eff} Eşitlik 2.31 ve Eşitlik 2.32'de gösterilmiştir.

$$J = J_L - J_{01} \left(e^{\frac{qV}{n_1 kT}} - 1 \right) - J_{02} \left(e^{\frac{qV}{n_2 kT}} - 1 \right) \quad (2.28)$$

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{giriş}} = \frac{V_{OC} J_{sc}^{FF}}{P_{giriş}} \quad (2.29)$$

$$\tau \equiv \frac{\Delta n}{U} \quad (2.30)$$

$$U_{eff} = U_{bulk} + U_{verici} + U_{ön yüzey} + U_{arka yüzey alanı(BSF)} + U_{arka yüzey} \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{verici}} + \frac{1}{\tau_{ön yüzey}} + \frac{1}{\tau_{arka yüzey alanı(BSF)}} + \frac{1}{\tau_{arka yüzey}} \quad (2.32)$$

Güneş hücrelerinde rekombinasyonlardan kaynaklanan verim kayıplarının yanı sıra optik kayıplarda güneş hücrelerinin verimlerinin azalmasında etkili bir faktördür.

Bu anlamda güneş hücrelerindeki optik kayıplar (i) ön yüzeydeki yansımaya, (ii) parlama önleyici kaplamalardaki parazitik absorpsiyon, (iii) aşırı doplanmış bölgelerdeki parazitsiz taşıyıcı absorpsiyonu, (iv) arka yüzeydeki parazitik absorpsiyon ve (v) hücrelerin içinden kaçan yansımaya kayıpları olarak beş şekilde gerçekleşmektedir. Ayrıca, akım toplayıcıların neden olduğu gölgeleme etkisi de optik kayıp olarak değerlendirilebilir (Das, 2012; Sheoran, 2009).

2.4.4 FV'lerde Optik Kayıplar

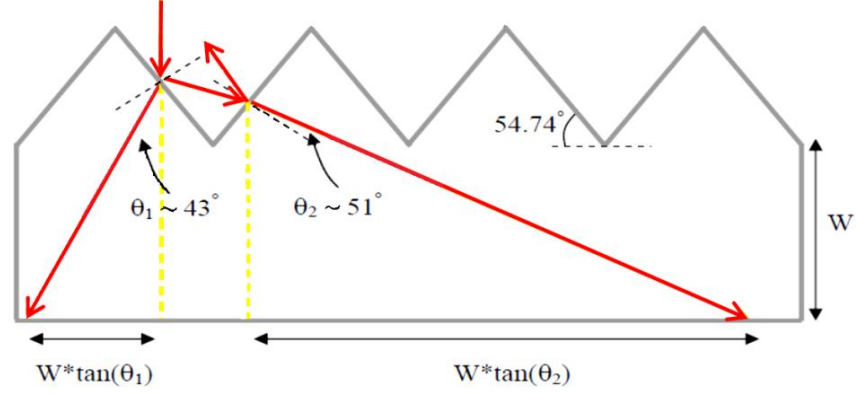
Beş aşamalı olarak tarif edilen optik kayıpların her biri foto akım üretimini azaltmakta ve dolayısıyla J_{sc} ve V_{oc} değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır. Optik kayıpların azaltılması hücre tasarımının önemli bir parçasıdır (Das, 2012).

2.4.4.1 Ön Yüzey Yansıması

Bir güneş hücresindeki kümülatif akım yoğunluğu (J_L) Eşitlik 2.33'de verilmiştir. Burada q elektron yükünü ve G_L kümülatif üretim hızını simgelemektedir. Hücrenin içerisine daha az foton girdiğinde üretim azalır ve böylece düşük foto akım ve V_{oc} 'ye sebep olur. Bu nedenle ön yüzey yansımasının azaltılması güneş hücresi tasarımı için çok önemli bir husustur. Havadaki düzlemsel bir Si wafer için normal veya normale yakın gelen ışık altında Si yüzeyindeki yansımaya Fresnel eşitliğiyle açıklanabilmektedir (Eşitlik 2.34) (Das, 2012; Sheoran, 2009). Burada n_1 ve n_2 sırasıyla havanın ve Si'nin kırılma indeksleridir ve k ise Si için sönüm katsayısıdır. Si için $n > 3,5$ olduğunda tipik dalga boyu aralığında (300-1200 nm) yüzeyinde herhangi bir işlem yapılmamış yalın haldeki Si yüzeyindeki yansımaya oranı çok yüksektir (>% 30). Bu yüksek yansıtma değeri yansımaya önleyici kaplamalarla ve/veya yüzey tekstürleme işlemleri yapılarak azaltılabilir.

Yansıtma bir yüklü ışının yüzeye en az iki defa çarpmasını sağlayacak yüzey tekstürleme işlemi ile de azaltılabilmektedir (Şekil 2.19). Rastgele piramit tekstürleme (100) tek kristalin Si wafer yüzeyinde en yaygın endüstriyel tekstürleme metodudur. Yüzey tekstürlemenin ikinci faydası ön yüzeydeki kırılmanın optik yol

uzunluğunun wafer kalınlığı (W) değerinden $W/\cos \theta$ değerine uzatmaktadır. Bu yol uzunluğu arttıkça uzun dalga boylarının absorpsiyonu artmaktadır (Das, 2012).



Şekil 2.19 Piramit dokulu bir yüzeye gelen 600 nm dalga boylu ışığın diyagramı (Das, 2012)

$$J_L = qG_L\theta \quad (2.33)$$

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k^2}{(n_2 + n_1)^2 + k^2} \quad (2.34)$$

Havada $k=0$ absorplama değerine sahip bir kaplamayla kaplanmış Si wafer için yüzey yansıtma değeri Eşitlik 2.35’de verilmektedir (Das, 2012). Burada n_0 , n_1 ve n_2 sırasıyla havanın, yansıtma yüzey kaplamalarının ve Si altlığın kırılma indeksleridir. Yansıyan ışınların faz farklılıkları (θ) Eşitlik 2.17’de verilmiştir.

$$R = \frac{n_1^2(n_1 - n_2)^2 \cos^2 \theta + (n_0 n_2 - n_1^2)^2 \sin^2 \theta}{n_1^2(n_1 + n_2)^2 \cos^2 \theta + (n_0 n_2 + n_1^2)^2 \sin^2 \theta} \quad (2.35)$$

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d}{\lambda} \quad (2.36)$$

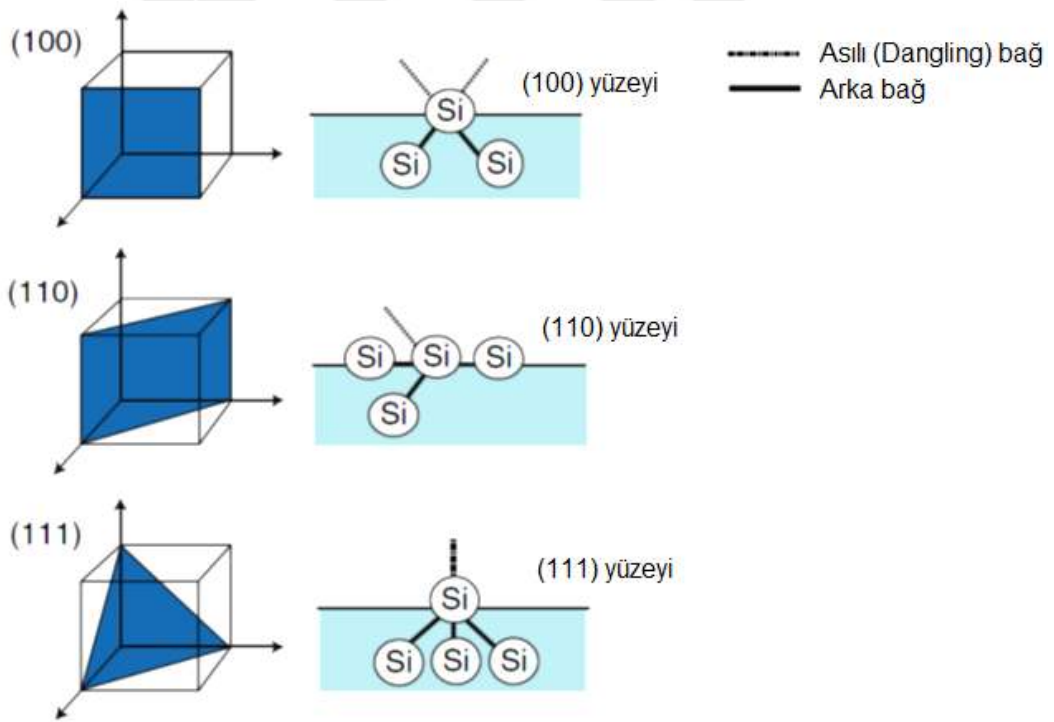
Burada d yansıtma yüzey kaplamalarının kalınlığıdır. Verilen bir dalga boyu için eğer yansıtma yüzey kaplamaları şartları karşılıyorsa reflektans değeri sıfır olacaktır. Bu durum Eşitlik 2.37 ve 2.38’de gösterilmiştir.

$$n_1 d = \frac{\lambda}{4} \quad (2.37)$$

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (2.38)$$

Yukarıda bahsi geçen koşulları yerine getirebilen yansıtma yüzey kaplamalara çeyrek dalga boylu kaplamalarda denilmektedir. Si güneş panellerinin üretiminde 600 nm'deki reflektansın minimize edilmesiyle güneş hücrelerindeki üretim maksimize olmaktadır. Si güneş hücreleri için termal SiO_2 (600 nm'de $n=1,46$) ve SiN_x kaplaması (600 nm'de $n=2,03$) en yaygın olarak kullanılan yansıtma yüzey kaplamalarıdır. Ayrıca, bu kaplamalar Si yüzeyinin pasivasyonunu da yapmaktadır (Das, 2012).

2.4.4.1.1 Silisyumun Sulu Dağlanması. Kristalin silisyumun yüzey yansıtma kayıplarının azaltılması amacıyla sulu kimyasal dağlama, kuru dağlama ve elektrokimyasal dağlama gibi yöntemleri kullanılarak silisyumun yüzeyi pürüzlendirilmektedir. Böylece hava ile silisyumun yansıtma indeksleri arasında bir gradyan oluşturulmaktadır.

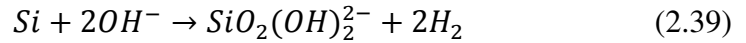


Şekil 2.20 Si'nin (100), (110) ve (111) oryantasyonlarında asılı ve alt bağ sayıları (Pal ve Sato, 2017)

Tek kristalin Si Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bir elmas kübik kristal yapısına sahip ve her bir Si atomunun dört kovalent bağı vardır. Her bağ farklı bir atom çiftini birbirine bağlamaktadır. Şekil 2.20'de aynı kristalden kesilmiş $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ ve

<111> Miller indisi yönlerindeki yüzeyler karşılaştırılmıştır. Bir atom bir yüzeye yerleştirildiğinde, bu atoma ait bağ komşu bir atoma bağlanarak yok olur ve bu durum asılı “dangling” bağ olarak bilinmektedir. Asılı bağlar dağlayıcı madde ile kolayca reaksiyona girmektedir. Birçok durumda bu bağlar dağlama işleminde yüzey reaksiyonlarının olduğu yerlerdir ve suda hidrojen atomuyla sonlandırılarak serbest uçlu halde kalmazlar. Üç farklı yönlü yüzey <100>, <110> ve <111> üzerindeki asılı bağların sayısı karşılaştırıldığında <111> yüzeyinin en az sayıda bağ içerdiği açıktır. <111> için yüzey atomu başına yalnızca bir asılı bağ bulunurken, <100> için iki tane ve <110> için bir adet asılı bağ ve iki yüzey bağı bulunur. Bu durum <111> düzleminin neden dağlayıcılara karşı daha stabil kalabildiğini açıklamaktadır (Pal ve Sato, 2017).

Potasyum hidroksit (KOH), tetrimetil amonyum hidroksit (TMAH), etilendiamin pirosatekol (EDP), hidrazin (N₂H₄), sezyum hidroksit (CsOH) ve NaOH sulu çözeltilerinde silisyumun dağlama hızının atomik oryantasyona bağımlılığı gösterilmiştir (Kumar, 2013; Pal ve Sato, 2017). Silisyum su ve bir OH⁻ iyonu ile reaksiyona girer ve hidroksit iyonu ve hidrojen gazı kabarcıkları üretir. Bu dağlama çözeltilerinden herhangi biri için kimyasal reaksiyon aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:



2.4.4.2 Parazitik Yansıtma Yüzeyi Kaplamalarındaki Parazitik Absorpsiyon

Bir malzemedan geçen ışığın absorpsiyonu Eşitlik 2.40’da verilen Beer-Lambert kanunu ile açıklanabilir. Burada I_0 yüklü ışığın şiddetidir. $I(x)$ malzemenin x derinliğindeki ışık şiddetidir. Alfa (α) kompleks yansıtma indeksidir (Eşitlik 2.41) ve k ise soğurma katsayısıdır.

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.40)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.41)$$

En yaygın yansıtma yüzey kaplama malzemeleri SiN_x ve SiO_2 'dir. Bu iki kaplamanın da sönümleme katsayıları sıfırdır veya 300-1200 nm dalga boyu aralığında ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Bu kaplama malzemelerine alternatif olarak indiyum kalay oksit (ITO), ZnO ve SiCN'dir (Das, 2012).

2.4.4.3 Serbest Taşıyıcı Absorpsiyonu

Serbest taşıyıcı absorpsiyonu (STA), taşıyıcıların valans bandından iletim bandına uyarılması yerine iletim veya valans bandında daha yüksek enerji seviyelerine uyarıldığı bir interband işlemini ifade etmektedir. Bu durum ek bir elektron-boşluk çiftinin oluşturulmasına neden olmadığı için STA işlemi foto akıma katkıda bulunmaz ve emilen enerji bunun yerine ısı olarak depolanmaktadır. STA prosesi yalnızca verici gibi aşırı katkılı bölgelerde önemlidir ve uzun dalga boylu ışığın emilimi arttırmaktadır (Schroder ve ark., 1978). Bu artan emilim Eşitlik 2.42'deki şekilde modellenilebilir:

$$\alpha_{STA} = 2,6 \times 10^{-27} n \lambda^3 + 2,7 \times 10^{-24} p \lambda^2 \quad (2.42)$$

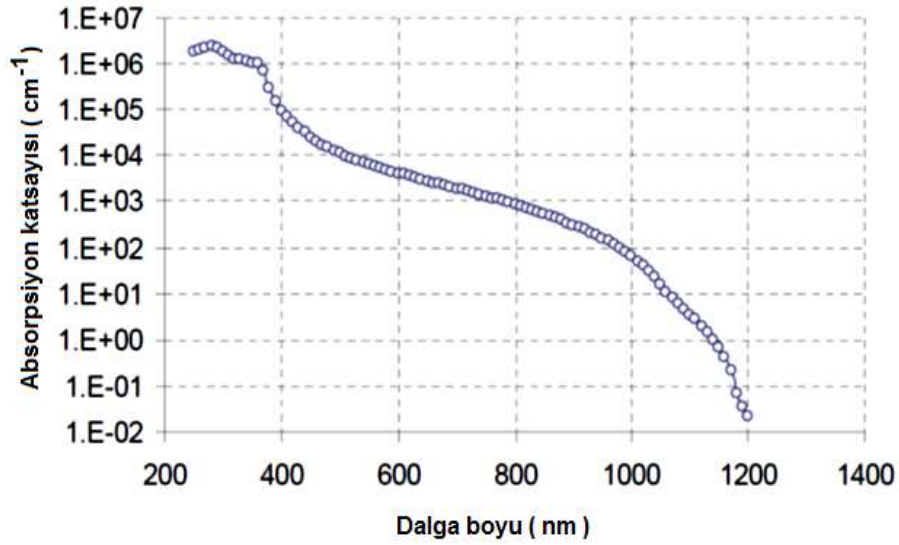
Burada λ nm biriminde dalga boyudur. STA istenmeyen bir işlem olmasına rağmen, göndericilerdeki STA'nın akım alıcılarında Auger rekombinasyonu ve bant aralığı daralmasından çok daha küçük bir etkiye sahiptir (Kray ve ark., 2008).

2.4.4.4 Arka Yüzey Absorpsiyon

Şekil 2.21'deki Si'nin dalga boyunun bir fonksiyonu olarak absorpsiyon katsayılarının bir gösterimi verilmiştir. Si 1100 nm'ye yakın dalga boylarında (1,12 eV) ışık altında enerji bandı köşesinin uzağında veya yakınında dalga boyunun düşük absorpsiyonundan dolayı 850-1200 nm aralığında tamamen absorbe olabilmesi için Si waferın kalın olması gerekmektedir (Das, 2012).

Bir güneş hücresinin arka yüzeyi % 100 yansıtma özelliğine sahipse arka ışık reflektörü ışığın hücre içerisinde en az iki geçiş yapmasını sağlayacağı için aynı

miktarda absorpsiyon wafer kalınlığının yarısı ile de elde edilebilecektir. Gerçek uygulamalarda arka yüzey reflektörleri parazitik absorpsiyon olmasından dolayı % 100'den daha az reflektans değerine sahiptirler. Buna ilave olarak yüksek verimli hücrelerde arka yüzey reflektöründen kaynaklı parazitik absorpsiyon bu uzun dalga boyu boyunca % 90'dan daha fazla reflektans değerine sahip gümüş veya alüminyum gibi metallerin kullanımıyla azaltılabilmektedir (Green, 2009).



Şekil 2.21 Si'nin absorpsiyon katsayısı (Green ve Keevers, 1995)

2.4.4.5 Işığın Bağlanması ve Reflektans Kayıpları

Bir arka yüzey reflektörünün etkinliği sadece ne kadar yansıtıcı olduğuna değil yansıyan ışığın açısal dağılımına da bağlıdır. Düzlemsel bir ön yüzeye sahip bir cihaz için arka yüzey reflektörü ayna benzeri (spekular) bir reflektansa sahip olsa bile ışığı sadece bir sıçrama sonrasında hücrenin dışına çıkarabilmektedir. Yani bir spekular arka yüzey reflektöründen dolayı optik yol uzunluğu iyileştirmesi yalnızca yaklaşık olarak 2 olmaktadır. Arka yüzey reflektansı bir hücrede çok sayıda ki toplam iç yansımayla ışığın yakalanmasını sağladığından yol uzunluğunu arttırması daha fazla olabilir. Işıklar spekular arka yüzey reflektöründeki gibi sadece 2 yansıma yerine difüze olmuş arka reflektansta % 100 yansıma sınırında $2n^2$ (yaklaşık 25) yansıma da yapabilirler. Eğik ışınların daha uzun yol uzunluğuna sahip olmasından dolayı Si içinde zayıf absorplanmış ışık için $4n^2$ 'den daha büyük olabilir. Bu iyileştirme

sınırının, ışığın mükemmel dağılmış olması durumunda veya Lambertian reflektörü tarafından yansıtıldığı zamanda bile yaklaşık % 8 kaybı olmaktadır (Das, 2012; Yablonovitch, 1982; Yablonovitch ve Cody, 1982).

2.4.5 FV Modül ve Panelleri

FV modüller güç çıkışının attırılması amacıyla bağımsız güneş hücrelerinin elektriksel olarak birbirine bağlanması ile oluşturulmaktadır. Bu bağlantılar hücreleri çevresel etkilerden koruyacak ve elektrik kaçaklarını engelleyecek şekilde yapılmaktadır. FV modül veya panellerin oluşturulmasında güç çıkışını veya ömrünü azaltan uyumsuz ara bağlantılar ve modül sıcaklığı gibi bazı problemlerle karşılaşmaktadır. Genel olarak bir FV modülü uzun ömürlü ve kararlı bir ünite içine kapsüllenmiş iç bağlantılarla birbirine bağlanmış güneş hücresinden (genellikle 36 seri bağlı) oluşturulmaktadır. Kapsülleme işleminin temel amacı güneş hücrelerini ve bağlantı tellerini dış ortamdan etkilenmelerini engellemektir. Birçok farklı modül türü vardır. Farklı uygulamalar için veya farklı tip güneş hücreleri için modül yapıları farklılık göstermektedir. Örneğin amorf silisyum güneş hücreleri için esnek panel kullanılırken yığın (bulk) silisyum güneş hücrelerinde genellikle sert cam ön yüzler tercih edilmektedir (McEvoy ve ark., 2003).

Bir yığın (bulk) silisyum PV modülü, tek bir güneş hücresinden gelen gücü ve voltajı artırmak için neredeyse her zaman seri bağlı çok sayıda ayrı güneş hücresinden oluşmaktadır. 25 °C ve AM1.5 güneş altında tek bir silisyum güneş hücresinin voltajı 0,6 V'nin biraz altında ve PV modül planlaması voltaj genellikle 12 V'luk pil ile uyumlu olacak şekilde yapılmaktadır. PV modül geriliminde sıcaklık nedeniyle oluşabilecek bir düşüş göz önüne alındığında ve ayrıca bir pili şarj etmek için 15 V veya daha fazla gerilim gerektirebileceği için bu miktarlarda voltajı sağlayabilmek için çoğu modül seri halinde bağlanmış 36 güneş pilini içermektedir. Bu boyutta bir modül standart test koşullarında yaklaşık 21V'luk açık devre gerilimini ve çalışma sıcaklığında ise yaklaşık 17-18 V'luk bir çalışma voltajı sağlayabilmektedir. Geri kalan gerilim, PV sisteminin diğer elemanlarının neden olduğu voltaj düşüşlerini (maksimum güç noktasından uzakta çalışma ve ışık

yoğunluğundaki azalmalar gibi) hesaba katmak için dahil edilmiştir (Al-Hamdani ve ark., 2016).

PV modülünden gelen voltaj güneş hücrelerinin sayısına göre belirlenirken, modülden gelen akım esas olarak güneş hücrelerinin boyutuna ve verimliliğine bağlıdır. Ticari bir güneş hücresinden akım yoğunluğu AM1.5'de ve optimum eğim koşullarında yaklaşık olarak 30-36 mA/cm² arasındadır. Tek kristal güneş hücreleri genellikle 100 cm² olup bir modülden yaklaşık 3,5 A toplam akım vermektedir. Çok kristalli modüllerinde daha büyük bireysel güneş hücreleri vardır fakat daha düşük bir akım yoğunluğuna sahiptirler. Modülden gelen akım voltajda olduğu gibi sıcaklıktan etkilenmez fakat modülün eğim açısına (tilt) büyük ölçüde bağlıdır (Al-Hamdani ve ark., 2016).

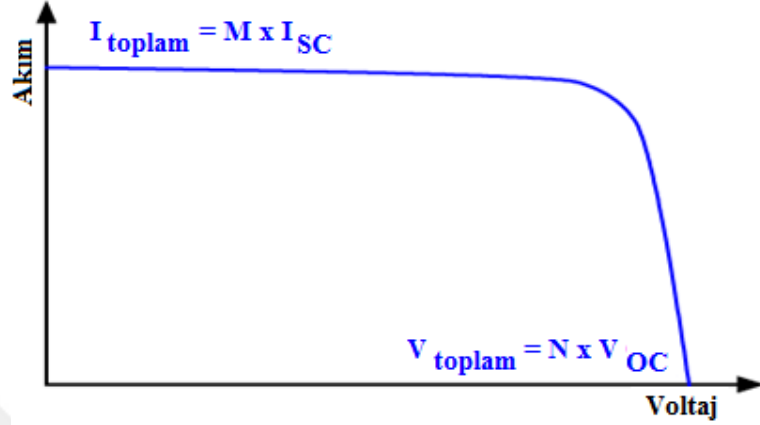
Bir modüldeki tüm güneş pilleri aynı elektrik özelliklerine sahipse ve hepsi aynı güneşlenme ve sıcaklığı çalışıyorsa tüm hücreler tam olarak aynı akım ve voltajda çalışacaklardır. Bu durumda PV modülü bütün bireysel hücrelerin I-V eğrileriyle aynı şekle sahiptir (voltaj ve akım değerleri farklıdır). Modül oluşturulmasıyla elde edilen devrenin denklemi Eşitlik 2.43'de verilmiştir (Luque ve Hegedus, 2011).

$$I_T = M \cdot I_L - M \cdot I_0 \left[\exp \left(\frac{q \frac{V_T}{N}}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.43)$$

Burada serilerdeki hücre sayısı N , paralel hücrelerin sayısı M , devreden gelen toplam akım I_T , devreden gelen toplam gerilim V_T , tek bir güneş hücresinin doyum akımı I_0 , tek bir güneş hücresinden gelen kısa devre akımı I_L , tek bir güneş pilinin ideallik faktörü n ve q , k ve T ise sırasıyla parçacık yükü, Boltzmann sabiti ve sıcaklıktır. Özdeş bağlı güneş hücrelerin toplam I-V eğrisi Şekil 2.22'de gösterilmiştir.

Toplam akım, tek bir hücrenin akımıyla paralel olarak hücrelerin sayısı ile çarpımıdır. Toplam voltaj ise tek bir hücrenin voltajının seri halindeki hücrelerin sayısı ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Seri ve paralel bağlanmış güneş

hücrelerinin akım ve voltaj değerleri Eşitlik 2.44-47'deki gibi ifade edilmektedir (Luque ve Hegedus, 2011; McEvoy ve ark., 2003).



Şekil 2.22 Paralel ve seri bağlanma ile FV'lerin akım ve voltajının değişimi

$$I_{SC \text{ toplam}} = I_{SC} \cdot M \quad (2.44)$$

$$I_{MP \text{ toplam}} = I_{MP} \cdot M \quad (2.45)$$

$$V_{OC \text{ toplam}} = V_{OC} \cdot N \quad (2.46)$$

$$I_{SC \text{ toplam}} = V_{MP} \cdot N \quad (2.47)$$

2.5 Regrasyon Analizi ve Optimizasyon

2.5.1 Regresyon Analizi

Mühendislik süreçlerinde bazı olguların ana eşitliğini sürdürmek bazen imkansız olabilmektedir. Bu nedenle bilim insanları matematiksel modeller kullanarak bu durumları açıklamaya çalışmaktadır. Bu amaçla tepki yüzeyi metodolojisi, yapay sinir ağları ve regresyon analizleri sıklıkla tercih edilen yöntemlerdir. Tepki yüzeyi metodolojisi birçok mühendislik hesaplamalarında kullanılan parametrelerinin doğrusal ve üssel şekilde birbirlerini etkilemesiyle hedef sonucunun optimize edilmesi amacıyla kullanılan bir istatistiksel araçtır. Ayrıca bu yöntem deney setinin tanımlamasını yapmak amacıyla belirli sınır değerlerine sahip deney parametrelerini kullanarak empirik modeller oluşturmakta da kullanılmaktadır. Bu şekilde modellerin oluşturulması ile deney ve analizlerin yapılması için kaybedilecek süreler de

azaltılabilmektedir. Diğer bir yöntem olan yapay sinir ağları mühendislik uygulamalarında yüksek hassaslıkta tahmin yeteneğine sahip yapay zekaya dayalı bir hesaplama yöntemidir. Bu hassas tahmin özelliği sebebiyle birçok mühendislik uygulamasında sıklıkla kullanılmaktadır. Regresyon Analizi (RA) ise fiziksel mühendislik veya benzeri sistemlerde gerçekleşen bir proses için girdi ile çıktılar arasındaki ilişkiyi modellemekte kullanılan istatistiksel bir metottur. Eğer deneysel girdilerin sayısı birden fazla ise çoklu regresyon prosedürü dikkate alınmaktadır. Ayrıca fiziksel fenomena parametreler de lineer değilse lineer olmayan çoklu regresyon modelleri sürecin fenomolojik tepkisini tahmin etmek için kullanılabilmektedir. RA deney setlerinin sayısını optimize etmek için de deney tasarımı aşamasında da kullanılmaktadır. Matematiksel optimizasyon problemlerinde bu yaklaşım tasarım değişkenlerini işlemin içerisine dahil ederek kapalı form objektif fonksiyonlarını ve kısıtlamaları yazmaya izin vermektedir (Bates ve Watts, 1988; Draper ve ark., 1966; Fox, 1997).

İstatistiksel modellemede RA değişkenler arasındaki ilişkileri tahmin etmekte kullanılan istatistiksel bir süreçtir. Bu analiz, bir bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişkenin arasındaki ilişkiye odaklanıldığı zaman birkaç değişkeni modellemek ve analiz etmek için kullanılabilecek birçok tekniği içermektedir. Daha spesifik olarak ifade edilecek olursa bağımsız değişkenlerden herhangi biri değiştiği zaman (diğer bağımsız değişkenler sabit) bağımlı değişkenin değerinin nasıl değiştiğinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. RA çoğu zaman bağımsız değişkenler göz önüne alındığında bağımlı değişkenin koşullu beklentisini (bağımsız değişkenler sabitlendiğinde bağımlı değişkenin ortalaması) tahmin etmektedir. Daha az sıklıkta ise ya bir dağılım üzerine (veya bağımlı değişkenlerin şartlı dağılımının diğer lokasyon parametreleri üzerine) odaklanmaktadır. Her durumda tahmin hedefi regresyon fonksiyonu olarak adlandırılan bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonudur ve olasılık dağılımı ile tanımlanabilen regresyon fonksiyonu etrafındaki bağımlı değişkenlerin varyasyonunu karakterize etmek için kullanılmaktadır (Fox, 1997).

RA yaygın olarak tahmin veya öngörüler için kullanılmaktadır (örneğin makine sistemlerini eğitme uygulamaları). Ayrıca RA'lar bağımsız değişkenlerin bağımlı

değişkenlerle ilişkilerinin olduğunun anlaşılması ve bu ilişkilerin biçimlerini öğrenmek amacıyla da kullanılmaktadır. Sınırlı koşullar altında bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki nedensel ilişkilerin hesaplanması için kullanılabilirler. Ancak bu yanılsama ya da yanlış tahminlere sebep olabilir. Bu sebepten dolayı RA'lar korelasyon içermezler (Bates ve Watts, 1988). RA gerçekleştirmek için birçok teknik geliştirilmiştir. En çok kullanılan regresyon tipleri lineer regresyon ve en küçük kareler regresyonudur. Regresyon modelleri parametrik olarak verilerden tahmin edilen bilinmeyen parametrelerin sonlu sayıda terimleriyle tanımlanabilirler. Parametrik olmayan regresyon, regresyon işlevinin sonsuz boyutlu olabilen belirli bir işlev kümesinde yer alan teknikleri işaret etmektedir (Fox, 1997).

RA yönteminin pratikte uygulanması veri üretme sürecinin biçimi ile kullanılan regresyon analizinin nasıl bir ilişkiye sahip olduğuna bağlıdır. Veri üretme sürecinin gerçek biçimi genel olarak bilinmediği için RA çoğunlukla bu ilişkideki varsayımları bulmaya bir ölçüde bağlıdır. Yeterli miktarda veri mevcutsa bu varsayımlar test edilebilir ve varsayımlar orta dereceli bile olsa prosesi tarif etmekte faydalıdır. Bununla birlikte küçük etkilere veya gözlemlere dayalı nedensellik sorularının cevaplanmasında gibi uygulamalarda regresyon yöntemleri yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir (Bates ve Watts, 1988; Draper ve ark., 1966; Fox, 1997).

2.5.1.1 Regresyon Modelleri

Regresyon modelleri bir skala veya vektörü temsil eden bilinmeyen parametreleri (β), bağımsız değişkenleri (X) ve bağımlı değişkenleri (Y) içermektedirler (bazı uygulamalarda farklı terminolojiler de kullanılmaktadır). Bir regresyon modeli Y 'yi X ve β fonksiyonuna ilişkilendirir. RA'da yaklaşım genel olarak $E(Y | X) = f(X, \beta)$ olarak verilmektedir. RA yapmak için f fonksiyonunun yapısı tanımlanmalıdır. Bazen bu fonksiyonun yapısı verilen datalardan çok X ve Y arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Eğer hiçbir bilgi mevcut değilse f için esnek veya kullanışlı bir form seçilmektedir. Bilinmeyen β parametresinin vektörü bir k uzunluğuna sahip olduğu varsayılırsa Bir RA gerçekleştirilmesi için bağımlı değişken Y hakkında bilgi vermelidir. Bu üç şekilde gerçekleşebilir: İlk durumda

$N < k$ olduğu durumdur ve (Y, X) formunda N tane data noktası gözlemlendiye regresyon modelini tanımlayan denklem sisteminde β verisini geri kazandıracak yeterli veri olmayacağı için RA gerçekleştirilemez. İkinci durum fonksiyonun lineer olduğu $N = k$ durumudur ve bu durumda eşitlik yaklaşık değeri yerine $Y = f(X, \beta)$ fonksiyonu ile tam olarak çözülür. Üçüncü durumda ise en yaygın olarak karşılaşılan $N > k$ olduğu durumdur. Bu durumda β için en uygun durumu göstermek için yeterli miktarda veri vardır (Draper ve ark., 1966; Fox, 1997).

Doğrusal Regresyon: Doğrusal regresyon yöntemlerinin kullanılabilmesi için bazı varsayımları kabul etmek gerekmektedir. Doğrusal regresyon yöntemi çıkarımsal bir yöntem olduğu için kullanılan iki değişkenli örneklemin istatistiksel olarak rastgele olduğu veya ana yapıyı çok iyi temsil edebildiği bilinmelidir. Bağımlı değişkenler içerisinde bazı hatalar bulunabilmektedir. Bu hataların rastsal değişkenler olduğunu ve ortalama hatanın sıfır olduğunu da belirtmek gerekmektedir. Bağımsız değişkenler hatasız olarak kabul edilmektedir (Fox, 1997).

Doğrusal regresyonda model belirlenmesine bağlı olarak ana yapı bağımlı değişken (y_i) parametrelerin bir doğrusal bileşimi olur. Örneğin, x_i bağımsız değişkenli ve β_0 ve β_1 parametrelili bir yapı:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, n \quad (2.48)$$

Burada ε_i , bir hata terimini ve i alt indeksi göstermektedir. Çoklu lineer regresyonda en az iki bağımsız değişken ve onların bağımsız değişken fonksiyonları bulunmaktadır (Fox, 1997). Eşitlik 2.27'ye yeni bir x_i^2 terimi eklenirse Eşitlik 2.49'deki polinom denklemi olarak elde edilir. Denklemin sağ tarafındaki bağımsız değişken (x_i) için ikinci dereceden bir ifade bulunmasına rağmen Eşitlik 2.49 halen doğrusal bir regresyon modelidir. Çünkü denklemin içerisindeki β_0 , β_1 ve β_2 çok değişkenli doğrusal yapıdadır. Bu her iki durum için de ε_i ve alt indeks i , sırasıyla hata terimi ve gözlem indeksidir. Genel olarak çoklu lineer regresyon modeli p tane bağımsız değişkene sahip olduğu varsayılır ve genel Eşitlik 2.50'da verildiği şekilde yazılır (Fox, 1997) veya Eşitlik 2.50'u kısaltacak olursak Eşitlik 2.51 elde edilir.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \varepsilon_i, \quad i = 1, m \quad (2.49)$$

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \varepsilon_i \quad (2.50)$$

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p X_{ij} \beta_j + \varepsilon_i \quad (2.51)$$

Bu denklemlerde ε_i değeri ($y_i - \hat{y}_i$) bağımlı değişkenin gerçek değerleri (y_i) ile modelin tahmin ettiği değer ($\hat{y}_i$) arasındaki farktır. Bir tahmin metodu da en küçük kareler yöntemidir (Eşitlik 2.52). Bu metod da kalıntıların toplamını en aza indirgeyen parametre tahminleri elde edilmektedir (Bates ve Watts, 1988; Fox, 1997). Bu fonksiyonun en küçük değerini bulmak için her parametre birinci dereceden kısmi türev alınarak sıfıra eşitlenir ve bu şekilde her kısmi türeve göre bir denklem elde edilir. Basit regresyon durumunda en küçük kareler tahmini için denklemler Eşitlik 2.53'deki gibidir.

$$AKT = \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (2.52)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \hat{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad \hat{\beta}_0 = \hat{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.53)$$

$$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = \frac{SSE}{n-2} \quad (2.54)$$

Burada $\bar{x}$, x değerlerinin ve $\hat{y}$, y değerlerinin ortalamasıdır. Popülasyon hata terimi, sabit bir varyansa sahip olduğu varsayıldığında bu varyansın tahmini şu şekilde verilir:

Eşitlik 2.54'de elde edilen denkleme ortalama karelerin hatası denir. Payda aynı veriden tahmin edilen model parametrelerinin sayısı azaltılmış örneklem boyutudur ($n-p$). P regresörleri için veya $n-p-1$ eğer bir kesme noktası kullanılıyorsa örneklem boyutudur (Fox, 1997). Bu durumda $p=1$ olur ve paydada $n-2$ 'dir. Standart parametre tahminlerinin standart hataları Eşitlik 2.55 ve Eşitlik 2.56'da verilmiştir.

$$\hat{\sigma}_{\beta_0} = \hat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.55)$$

$$\hat{\sigma}_{\beta_1} = \hat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.56)$$

Genel lineer modelde en genel çoklu regresyon modellerinde n tane bağımsız değişken vardır. Genel regresyon modeli Eşitlik 2.57 denklemlerindeki gibi verilmektedir.

$$y_i = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i \quad (2.57a)$$

$$\varepsilon_i = y_i - \widehat{\beta}_1 x_{i1} - \cdots - \widehat{\beta}_p x_{ip} \quad (2.57b)$$

En küçük kareler parametresi tahminleri p normal denklemlerinden elde edilmiş ve Eşitlik 2.58'deki gibi yazılabilir. Matris gösteriminde ise Eşitlik 2.59 gibi yazılabilir. Matris notasyonunda normal eşitlikler aşağıdaki gibi yazılabilir. Eğer $X^T X$ singüler yapıda ise bu durumda Eşitlik 2.60 şeklinde yazılabilir.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p X_{ij} X_{ik} \widehat{\beta}_k = \sum_{i=1}^n X_{ij} y_i, j = 1, \dots, p \quad (2.58)$$

$$(X^T X) \widehat{\beta} = X^T Y \quad (2.59)$$

$$\widehat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2.60)$$

Hatalar Varyansı ve Toplam Karelerin Hesaplanması: Ana yapıdaki hataların normal dağılım gösterdiği durumlarda kullanılan diğer bir varsayımda hatalar varyansı ve toplam kareler değerlerinin bulunmasıdır (Draper ve ark., 1966). Ana yapıdaki hata terimi sabit bir varyansa sahip olduğu durumlarda hatalar varyansı Eşitlik 2.61'deki gibi yazılabilir. Bu ifadeye regresyon hesaplamaları için ortalama hata karekökü adı verilir ve Eşitlik 2.62 ve Eşitlik 2.63'deki gibi denklemleri yazılır.

$$\widehat{\sigma}_\varepsilon = \sqrt{\frac{SSE}{N-2}} \quad (2.61)$$

$$\widehat{\sigma}_{\beta_0} = \widehat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.62)$$

$$\widehat{\sigma}_{\beta_1} = \widehat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.62)$$

Örneklem veri serisinin değişebilirliği toplam kareler hesabıyla bulunmaktadır (Eşitlik 2.64) (Draper ve ark., 1966). Ayrıca regresyon toplam kareleri hesabı Eşitlik 2.65'te verilmiştir.

$$SS_{toplam} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.64)$$

$$SS_{reg} = \sum_i (f_i - \bar{f})^2 \quad (2.65)$$

Toplam hataların karesi ε değerlerinin toplam karesi olarak isimlendirilir ve Eşitlik 2.66'de gösterilmiştir. Bir regresyon modelinde kullanılan parametreler en küçük kareler yöntemiyle tahmin edildikten sonra çıkarımsal kontrol işleminin yapılması gerekmektedir. Özetle uyumsal doğruluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu işlemin yapılması için “Belirlilik katsayısı” (R^2) değerinin bulunması veya F sınaması uygulamaları yapılmaktadır. R^2 değerinin hesaplanmasında Eşitlik 2.67 kullanılmaktadır (Bates ve Watts, 1988; Draper ve ark., 1966; Fox, 1997).

$$SS_{hata} = \sum_i (y_i - f_i)^2 \quad (2.66)$$

$$R^2 \equiv 1 - \frac{SS_{hata}}{SS_{toplam}} \quad (2.67)$$

Parametrik regresyon analizinde R^2 değerleri hesaplanmakta ve R^2 değer aralığı 0 ile 1 arasındadır. R^2 değerlerinin hesaplanmasında sadece iki değişkenli modeller kullanılıyorsa geometrik olarak X-Y düzlemlerinde doğrusal regresyon tahminleri yapılmakta ve en küçük kareler prensibine göre en iyi uyan bir doğru uydurması yapılmaktadır. Üç değişkenli regresyon uyumunun olmadığı kabul edilmektedir. Eğer R^2 değeri bire yakınsa modelin deneysel sonuçlarıyla modelin tahmini uygundur. Bu durumda geometrik olarak çok değişkenli uzay boyutunda örneklem veri noktalarının hepsi regresyonla elde edilen hiper düzey üzerindedir. Diğer kullanılan uygunluk testi ise F testidir. Regresyon denklem uyumunda F testi için sıfır hipotez ana yapı model katsayılarının hepsi sıfıra eşittir. Yani sıfır hipotez durumu gerçekse model kullanılarak elde edilecek katsayı tahminlerinin hepsi sıfır olmaktadır. Hiçbir etki ve bağlantı olmadığı sonucuna varılır. Eğer sıfır hipotez olduğu durumunda da regresyon tahminleri yapılabilir ve çıkarımsal kontrol analizine devam edilmektedir (Bates ve Watts, 1988; Draper ve ark., 1966; Fox, 1997). Farklı doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri, kısaltmaları ve formülleri Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6a İki değişkenli lineer ve lineer olmayan (lineer olmayan) regresyon modelleri

Model	Kısaltma	Formül
Çoklu Lineer	L	$Y = a_0 + a_1 t + a_2 k$
Çoklu Lineer Rasyonel	LR	$Y = \frac{a_0 + a_1 t + a_2 k}{b_0 + b_1 t + b_2 k}$
İkinci Dereceden Çoklu Nonlineer	SON	$Y = a_0 + a_1 t + a_2 k + a_3 t^2 + a_4 k^2 + a_5 tk$
İkinci Dereceden Çoklu Nonlineer Rasyonel	SONR	$Y = \frac{a_0 + a_2 k + a_4 k^2 + a_1 t + a_3 kt + a_5 t^2}{b_0 + b_2 k + b_4 k^2 + b_1 t + b_3 kt + b_5 t^2}$
Birinci Dereceden Trigonometrik Çoklu Nonlineer	FOTN	$Y = a_0 + a_1 \sin t + a_2 \sin k + a_3 \cos t + a_4 \cos k$
Birinci Dereceden Trigonometrik Çoklu Nonlineer Rasyonel	FOTNR	$Y = \frac{a_0 + a_1 \sin t + a_2 \sin k + a_3 \cos t + a_4 \cos k}{b_0 + b_1 \sin t + b_2 \sin k + b_3 \cos t + b_4 \cos k}$
İkinci Dereceden Trigonometrik Çoklu Nonlineer	SOTN	$Y = (a_0 + a_1 \sin t + a_2 \sin k + a_3 \cos t + a_4 \cos k + a_5 \sin^2 t + a_6 \sin^2 k + a_7 \cos^2 t + a_8 \cos^2 k)$
İkinci Dereceden Trigonometrik Çoklu Nonlineer Rasyonel	SOTNR	$Y = \frac{(a_0 + a_1 \sin t + a_2 \sin k + a_3 \cos t + a_4 \cos k + a_5 \sin^2 t + a_6 \sin^2 k + a_7 \cos^2 t + a_8 \cos^2 k)}{(b_0 + b_1 \sin t + b_2 \sin k + b_3 \cos t + b_4 \cos k + b_5 \sin^2 t + b_6 \sin^2 k + b_7 \cos^2 t + b_8 \cos^2 k)}$
Birinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlineer	FOLN	$Y = a_0 + a_1 \ln k + a_2 \ln t$
Birinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlineer Rasyonel	FOLNR	$Y = \frac{a_0 + a_1 \ln k + a_2 \ln t}{b_0 + b_1 \ln k + b_2 \ln t}$
İkinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlineer	SOLN	$Y = a_0 + a_1 \ln k + a_2 \ln t + a_3 \ln k t + a_4 \ln^2 k + a_5 \ln^2 t$
İkinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlineer Rasyonel	SOLNR	$Y = \frac{a_0 + a_1 \ln k + a_2 \ln t + a_3 \ln k t + a_4 \ln^2 k + a_5 \ln^2 t}{b_0 + b_1 \ln k + b_2 \ln t + b_3 \ln k t + b_4 \ln^2 k + b_5 \ln^2 t}$

Tablo 2.6b Üç değişkenli lineer ve lineer olmayan (nonlinear) regresyon modelleri

Model	Kısaltma	Formül
Çoklu Lineer	L	$Y = a_0 + a_1n + a_2t + a_3t$
Çoklu Lineer Rasyonel	LR	$Y = \frac{a_0 + a_1n + a_2t + a_3t}{b_0 + b_1n + b_2t + b_3t}$
İkinci Dereceden Çoklu Nonlinear	SON	$Y = a_0 + a_1n + a_2t + a_3t + a_4n^2 + a_5t^2 + a_6t^2 + a_7tn + a_8nt + a_9it$
İkinci Dereceden Çoklu Nonlinear Rasyonel	SONR	$Y = \frac{(a_0 + a_1n + a_2t + a_3t + a_4n^2 + a_5t^2 + a_6t^2 + a_7tn + a_8nt + a_9it)}{(b_0 + b_1n + b_2t + b_3t + b_4n^2 + b_5t^2 + b_6t^2 + b_7tn + b_8nt + b_9it)}$
Birinci Dereceden Trigonometrik Çoklu Nonlinear	FOTN	$Y = a_0 + a_1\sin(n) + a_2\sin(t) + a_3\sin(t) + a_4\cos(n) + a_5\cos(t) + a_6\cos(t)$
Birinci Dereceden Trigonometrik Çoklu Nonlinear Rasyonel	FOTNR	$Y = \frac{(a_0 + a_1\sin(n) + a_2\sin(t) + a_3\sin(t) + a_4\cos(n) + a_5\cos(t) + a_6\cos(t))}{(b_0 + b_1\sin(n) + b_2\sin(t) + b_3\sin(t) + b_4\cos(n) + b_5\cos(t) + b_6\cos(t))}$
Birinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlinear	FOLN	$Y = a_0 + a_1\ln(n) + a_2\ln(t) + a_3\ln(t)$
Birinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlinear Rasyonel	FOLNR	$Y = \frac{a_0 + a_1\ln(n) + a_2\ln(t) + a_3\ln(t)}{Y = b_0 + b_1\ln(n) + b_2\ln(t) + b_3\ln(t)}$
İkinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlinear	SOLN	$Y = a_0 + a_1\ln(t) + a_2\ln^2(t) + a_3\ln(n) + a_4\ln(t)\ln(n) + a_5\ln^2(n) + a_6\ln(t) + a_7\ln(t)\ln(t) + a_8\ln(n)\log(t) + a_9\ln^2(t)$
İkinci Dereceden Logaritmik Çoklu Nonlinear Rasyonel	SOLNR	$Y = \frac{a_0 + a_1\ln(t) + a_2\ln^2(t) + a_3\ln(n) + a_4\ln(t)\ln(n) + a_5\ln^2(n) + a_6\ln(t) + a_7\ln(t)\ln(t) + a_8\ln(n)\ln(t) + a_9\ln^2(t)}{b_0 + b_1\ln(t) + b_2\ln^2(t) + b_3\ln(n) + b_4\ln(t)\ln(n) + b_5\ln^2(n) + b_6\ln(t) + b_7\ln(t)\ln(t) + b_8\ln(n)\ln(t) + b_9\ln^2(t)}$

2.5.2 Optimizasyon

Matematikte optimizasyon, bir gerçek fonksiyonu maksimize ya da minimize etmek amacıyla fonksiyonun parametre değerlerini belirlenen bir aralıkta fonksiyonun içine yerleştirerek problemi incelemek ya da çözmek işlemlerini ifade

etmektedir. Bir tasarım problemini çözmek için pek çok optimizasyon algoritması mevcuttur. Bu algoritmalar geleneksel ve ya geleneksel olmayanlar olarak sınıflandırılırlar. “Kısıtlı Varyasyon” ve “Lagrange Çarpanları” gibi geleneksel yöntemler analitiktirler ve yalnızca sürekli ve türevi alınabilecek fonksiyonların optimum çözümlerini bulabilirler (Dette ve ark., 1999). Mühendislikte yüzey işleme proseslerinde deneysel verilerin modelleme tepkisi son derece lineer olmayan terimler içerdiğinden geleneksel optimizasyon yöntemleri ile matematiksel optimizasyon problemlerini çözünmesinde başarısız olunmaktadır. Bu koşullar altında genetik algoritma (GA), Diferansiyel Gelişim (DE), Nelder-Mead (NM), Rastgele Arama (RS) ve Benzetimli Tavlama (SE) algoritmaları gibi geleneksel olmayan stokastik optimizasyon yöntemlerinin kullanılması daha uygundur. Çeşitli optimizasyon yöntemleri ve algoritmaları hakkında ayrıntılı bir tartışma ve mühendislikteki genel tasarım uygulamaları için (Rao ve Rao, 2009) kaynağından detaylı bilgi edinilebilir.

2.5.2.1 Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution) Algoritması

DE algoritması, bir stokastik optimizasyon metodudur ve işleyici parçaların aşınması ve malzeme uzaklaştırma hızı kesici uçla işleme prosesleri gibi kompleks yapıları mühendislik uygulamalarında alternatif çözümler sunmaktadır. DE algoritması, (1) başlatma aşaması, (2) mutasyon aşaması, (3) çaprazlama aşaması ve (4) seçim aşaması olmak üzere dört ana aşama içermektedir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 DE algoritması akış şeması (Yang ve Natarajan, 2010)

Algoritmanın optimum sonuçları ölçek faktörü, çaprazlama ve popülasyon büyüklüğü parametreleriyle değişmektedir. DE algoritmasının ayrıntılı açıklaması Storn ve Price’in çalışmalarında bulunabilir (Storn ve Price, 1997). DE algoritması

her iterasyon da tek bir çözüm yerine her zaman bir çözümler popülasyonu düşünür ve sayısal olarak değerli bir algoritmadır. Bununla birlikte, bu algoritma ile bir global optimum sonuç bulmanın garantisi yoktur (Yang ve Natarajan, 2010).

2.5.2.2 Nelder-Mead Algoritması

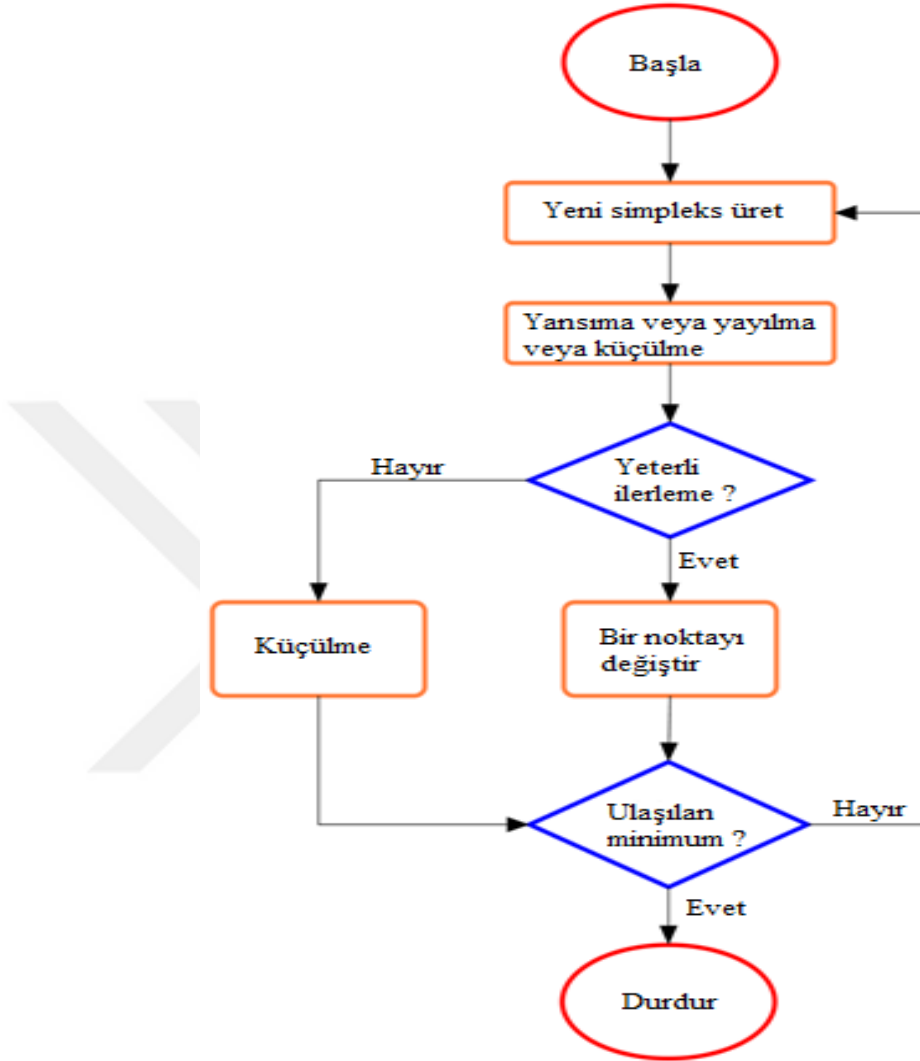
NM algoritması (veya simpleks arama) öncelikle sınırlandırılmamış optimizasyon problemleri için geleneksel lokal arama metodu olarak dizayn edilmiştir. NM global bir optimizasyon algoritması olmasa da pratik kullanımda çok fazla yerel minimuma sahip olmayan problemler için oldukça iyi çalışmaya eğilimlidir. Algoritma opsiyonlarının ayarlanması (i) yansıma, (ii) genişleme, (ii) daralma ve (iv) büzülme olmak üzere dört temel işlemde kontrol edilmektedir (Vo-Duy ve ark., 2017). Algoritmanın ana adımları Şekil 2.24’te verilmiştir.

NM algoritmasının karakteristik özelliklerinden biri birkaç iterasyonda çoğunlukla önemli iyileşmeler sağlaması ve oldukça elverişli sonuçları hızlı bir şekilde üretebilmesidir. Dahası bu metot genelde her bir iterasyon için sadece bir veya iki tane fonksiyon değerlendirmesine ihtiyaç duymaktadır (nadiren görülen büzülme dönüşümleri haricinde). Bu durum her fonksiyon değerlendirmesi çok pahalı veya zaman alan uygulamalar için çok önemlidir. Ayrıca, simpleks hedef fonksiyonunun lokal kontürüne uyacak şekilde oryantasyonunu, boyutunu ve şeklini değiştirebilmektedir. Bu nedenle NM karmaşık sistemlerin araştırılması çalışmalarında yüksek esnekliğe sahiptir (Vo-Duy ve ark., 2017).

2.5.2.3 Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing) Algoritması

En popüler rastgele arama metotlarından birisi SA’dır. Bu algoritmanın temeli metal bir nesnenin yüksek sıcaklığa ısıtılıp soğutmaya bırakıldığı tavlama işleminin fiziksel sürecine dayanmaktadır. Optimizasyon açısından SE algoritmasında tavlama işlemi yapılan yerel bir maksimumdan uzaklaşmasına ve daha iyi bir global optimum noktasını keşfetmesini sağladığı söylenebilir. SA’nın en büyük avantajı karışık tam sayı ayrık veya sürekli optimizasyon problemlerinin çözülebileme ihtimalini

verebilmesidir. Yeni noktanın gerçek noktadan farkı Boltzman'nın olasılık dağılımına dayanmaktadır.



Şekil 2.24 NM algoritması akış şeması (Vo-Duy ve ark., 2017)

Bu dağılım sistemin bir “T” sıcaklığında termal denge içerisindeki enerjisini ifade etmektedir. Boltzman'nın olasılık dağılımı Eşitlik 2.68'deki gibi yazılabilir (Pham ve Karaboga, 2012).

$$P(E) = e^{-E/kT} \quad (2.68)$$

Burada $P(E)$ enerji seviyesinin E olasılığını temsil eder, k Boltzman sabiti ve T sıcaklıktır. Algoritmanın prosedürünün kolayca incelenebilmesi için SE algoritmasının akış şeması Şekil 2.25'te verilmiştir.

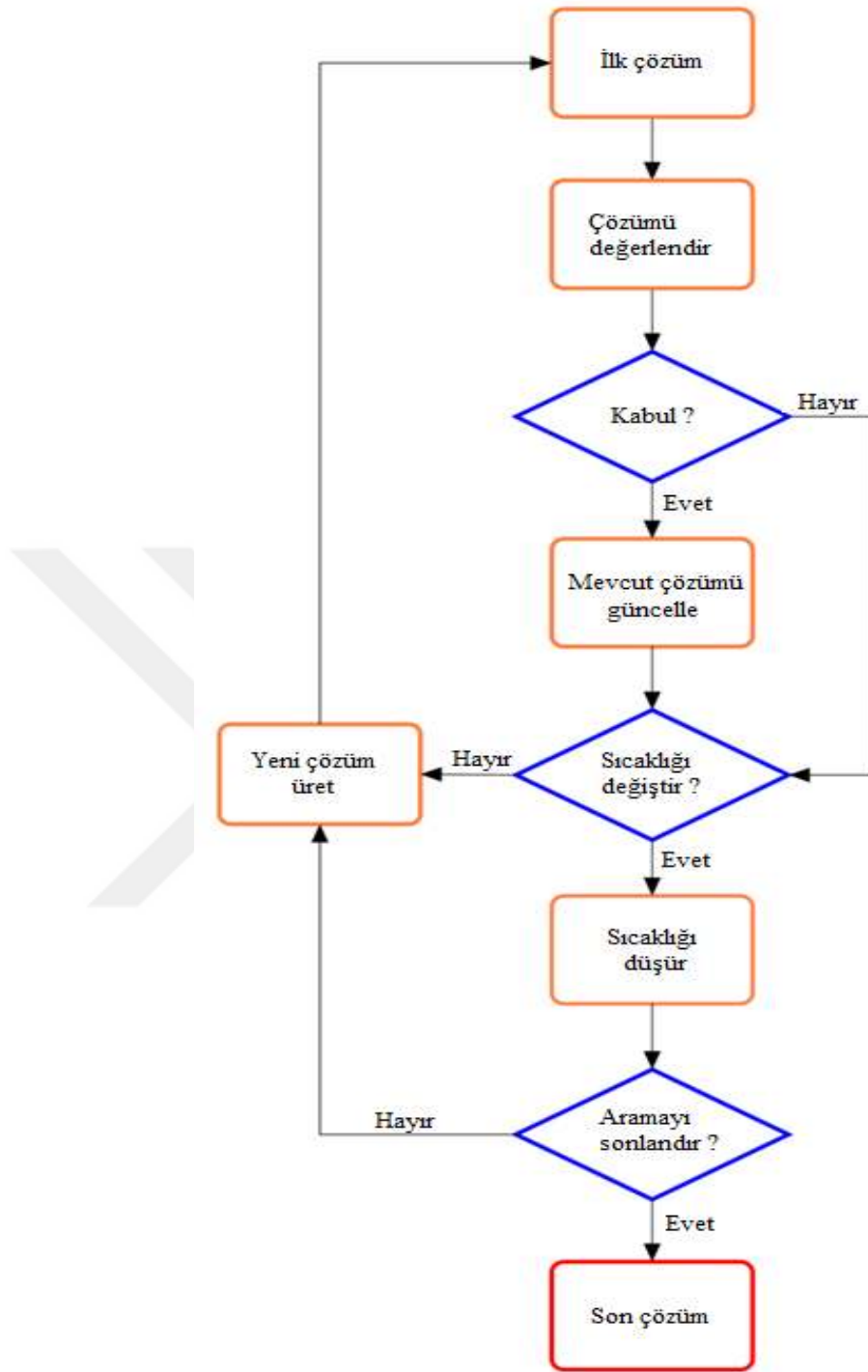
2.5.2.4 Rastgele Arama (Random Search) Algoritması

Monte Carlo yöntemi olarak bilinen RS metodu bir stokastik algoritma olup pek çok Branch&Bound, Aralık Analizi ve Tünelleme gibi deterministik maksimum arama metodlarından farklıdır. Bu özellik, küçük basamaklı yöntemler sadece bir zirvenin üstünde bulunabileceğinden çok modlu bir işlemin mutlak maksimumunun aranması işlemlerinde gerçek arama yöntemiyle birleştirilmesi gibi bazı avantajlar sağlamaktadır. RS algoritmasının kullanımının temel avantajları konveks olmayan ve türevi alınamayan nesnel fonksiyonlar için global optimuma ulaşmanın mümkün olmasıdır. Diğer bir avantajı ise karmaşık problemlerde uygulamasının nispeten kolay olmasıdır. Genellikle RS algoritmasının kötü yapılandırılmış global optimizasyon problemleri için hızlı bir şekilde yararlı bilgiler verdiği ve iyi performans gösterdiği için “kuvvetli” oldukları bilinmektedir (Zabinsky, 2009).

Rastgele süreç sahte-rastgele sayı üreticine dayanan bir takım standart teknikler ve programlar içermektedir. Bu algortmada elde edilen değerler arzulanan herhangi bir dağılıma yakınlık üretmek için ölçeklendirilmeli ve dönüştürülmelidir (Zabinsky, 2009). RS algoritmasının çalışma prosedürü Şekil 2.26'da verilmiştir.

2.5.3 Yüzey Hazırlama İle İlgili Yapılan Modelleme ve Optimizasyonu Çalışmaları

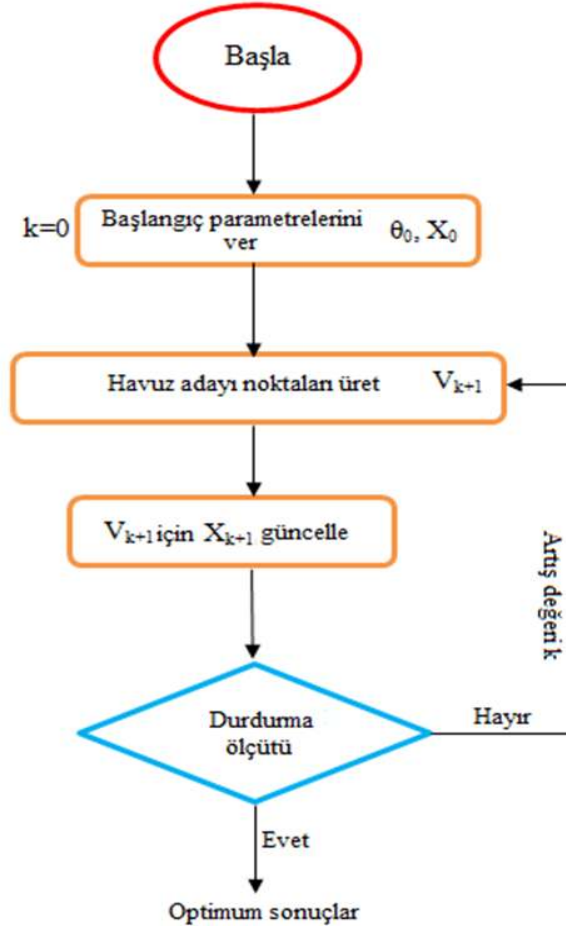
Tez çalışması kapsamında Si ingottan wafer kesilmesi, waferların leplenmesi ve tekstürleme çalışmalarında deneysel verilerin modellenmesi ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Si ingotun wafer halinde kesilmesi ve waferların leplenmesi çalışmaları yüzey pürüzlülüğü ve tekstürleme çalışmasında ise yüzde reflektans değerinin regresyon analizi ile modellenmesi ve optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 2.25 SA algoritmasının akış şeması (Pham ve Karaboga, 2012)

Tablo 2.7’de yüzey işleme proseslerinde hacimsel malzeme uzaklaştırma hızı, aşınma oranı, malzeme uzaklaştırma miktarı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerine hazırlanan optimizasyon problemleri için modelleme metodolojisi, model tipi ve kullanılan optimizasyon algoritmalarının verildiği bir özet liste hazırlanmıştır. Yüzey

işleme proseslerinde yapay zekaya dayalı yüksek hassasiyette öngörü yeterliliğine sahip en iyi hesaplama yöntemlerinden biri yapay sinir ağlarıdır (ANN). Bu nedenle, birçok araştırmacı yüzey pürüzlülüğü modellemesinde ANN modellerinin verimliliğini araştırmışlardır. Örneğin, Sharma ve ark. (Sharma ve ark., 2008) talaşlı işlem çalışmasında hız, ilerleme, kesme derinliği ve yaklaşma açısının yüzey pürüzlülüğüne etkileriyle ilişkili bir ANN modeli çalışmışlar ve % 76'dan daha yüksek doğruluk katsayısı bulmuşlardır. Kayabaşı ve arkadaşları (Kayabasi ve ark., 2017) yaptıkları Si kesme çalışmasında ANN ile yüzey pürüzlülüğü modeli oluşturmuşlar ve elde ettikleri kara kutu modeli ile deneysel sonuçların % 90'ın üzerinde uyumlu olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 2.26 RS algoritmasının akış şeması (Zabinsky, 2009)

Tablo 2.7 Yüzey işleme prosesinin optimizasyonu ile ilgili yapıla çalışmaların özet listesi

Referanslar	Opt. Problemi	Malzeme	Modelleme Metodu (*)	Model Tipi	Opt. Algoritması (**)
(Suresh ve ark., 2002)	Min. SR	Çelik	RSM	$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1^2 + a_6X_2^2 + a_7X_3^2 + a_8X_4^2 + a_9X_1X_2 + a_{10}X_2X_3 + a_{11}X_3X_4 + a_{12}X_4X_1 + a_{13}X_3X_1 + a_{13}X_2X_4$	GA
(Kanagarajan ve ark., 2008)	Maks. RR, Min. SR	Ser-Met Kompozit	RA	$Y = a_0 + a_1R + a_2I + a_3T + a_4P + a_5R^2 + a_6I^2 + a_7T^2 + a_8P^2 + a_9RI + a_{10}RT + a_{11}RP + a_{12}IP + a_{13}TP$	SGA
(Patel ve ark., 2009)	Min. SR	Ser-Met Kompozit	RSM	$R_a = a_0 + a_1I_p + a_2t_c + a_3\eta + a_4I^2 + a_5\eta^2$	TRM
(S. Pal ve ark., 2011)	Min. SR	Çelik	ANN bazlı sensör fisyon modeli	$R_a = \frac{a_1 f^2}{r_E} (1 - a_2 T_w)^{a_3}$	GA
(Zain ve ark., 2010)	Min. SR	Titanyum alaşımı	RA	$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3$	GA
(Zain ve ark., 2011)	Min. SR	Aluminyum alaşımı	RA	$R_a = a_0 + a_1V + a_2P + a_3h + a_4d + a_5m + a_6V^2 + a_7P^2 + a_8h^2 + a_9d^2 + a_{10}m^2 + a_{11}Vm + a_{12}Pm + a_{13}hm + a_{14}dm$	GA, SA
(Maji ve Pratihari, 2011)	Min. SR	Çelik	RA	$R_a = a_0 + a_1I_p + a_2T_{on} + a_3t + a_4I_p^2 + a_5a_2T_{on}^2 + a_6t^2 + a_7I_pT_{on} + a_8I_pt + a_9T_{on}t$	GA
(Mukherjee ve ark., 2012)	Maks. VMRR, Min. SR, Min. WR	Bakır-çinko,nikel-krom-demir alaşımı	RSM	$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1^2 + a_6X_2^2 + a_7X_3^2 + a_8X_4^2 + a_9X_1X_2 + a_{10}X_1X_4 + a_{11}X_2X_3 + a_{12}X_2X_4 + a_{13}X_3X_4$	GA, PSO, SFO, ACO, ABCO, BBO
(Yusup ve ark., 2014)	Min. SR	Al alaşımı	RA	$SR = a_0 + a_1V + a_2P + a_3h + a_4d + a_5m + a_6V^2 + a_7P^2 + a_8h^2 + a_9d^2 + a_{10}m^2 + a_{11}Vm + a_{12}Pm + a_{13}hm + a_{14}dm$	ABC
(Hanief ve Wani, 2015)	Min. SR	Çelik ve Bakır-çinko alaşımı	ANN	$R_a = R_i + A(1 - e^{kt})$	GNA
(Kuriachen ve ark., 2015)	Min. MRR, Min. SR	Titanyum alaşımı, Tungsten	RSM	$MRR = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_4AB + a_5BC + a_6B^2$ $SR = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_4BC + a_5A^2 + a_6C^2$	PSA

*Hacimsel malzeme uzaklaştırma hızı: VMRR, Aşınma oranı: WR, Malzeme uzaklaştırma hızı: MRR

**SGA: Short Genetic Algoritması, TRM: Trust Region Metodu, GA: Genetik Algoritma, SA: Simulated Annealing Algoritması, PSO: Particle Swarm Optimizasyonu, SFO: Sheep Flock Optimizasyonu, ACO: Ant Colony Optimizasyonu, ABCO: Artificial Bee Colony Optimizasyonu, BBO: Biogeography-Based Optimizasyonu, GNA: Gauss-Newton Algoritması

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Tek Kristalli Silisyum İngot Büyütülmesi

Silisyum ingotların büyütülmesi işleminde yüksek saflıkta çok kristalin Si hammaddesi kullanılmaktadır. Çok kristalin Si hammaddesi çift ambalajlı 5 kg'lık paketlerde 5N sınıfı yüksek saflıkta temin edilmiştir (Şekil 3.1a). Si ergitme işleminde Şekil 3.1b'de gösterilen 8 mm duvar kalınlığına ve 237,8 mm çapındaki yüksek saflıkta (% 99,9995) kuvars pota (PVA-TePla) kullanılmıştır. Ayrıca kuvars potanın transisyon açısı 80 mm'dir. Sistemin temizliği ve Si kütüğün büyütülmesi aşamalarında proses gazı olarak yüksek saflıkta (% 99,9995 saflıkta) argon (Ar) gazı kullanılmıştır. N-tipi Si kütük büyütmesi uygulamalarında fosfor kaynağı olarak % 99,9995 saflıkta silisyum fosfit (SiP) (American Elements Co.) plaka kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Si ingot üretimi sarf maddeleri, a) % 99,999 saflıkta çok kristalin Si, b) Kuvars pota (Kişisel arşiv, 2017)

Si kütük üretim işlemlerinde Şekil 3.2'de gösterilen PVA TePla-CGS Lab Cz sistemi kullanılmıştır. Cz sistemi; (1) Si eritme bölgesi, (2) Si ingot çekme sistemi, (3) sistem kontrol ekipmanları, (4) vakuma alma ve gaz tahliye sistemi, (5) güç kabini, (6) su soğutma sistemi ve (7) gaz besleme sistemi olmak üzere yedi temel kısımdan oluşmaktadır.

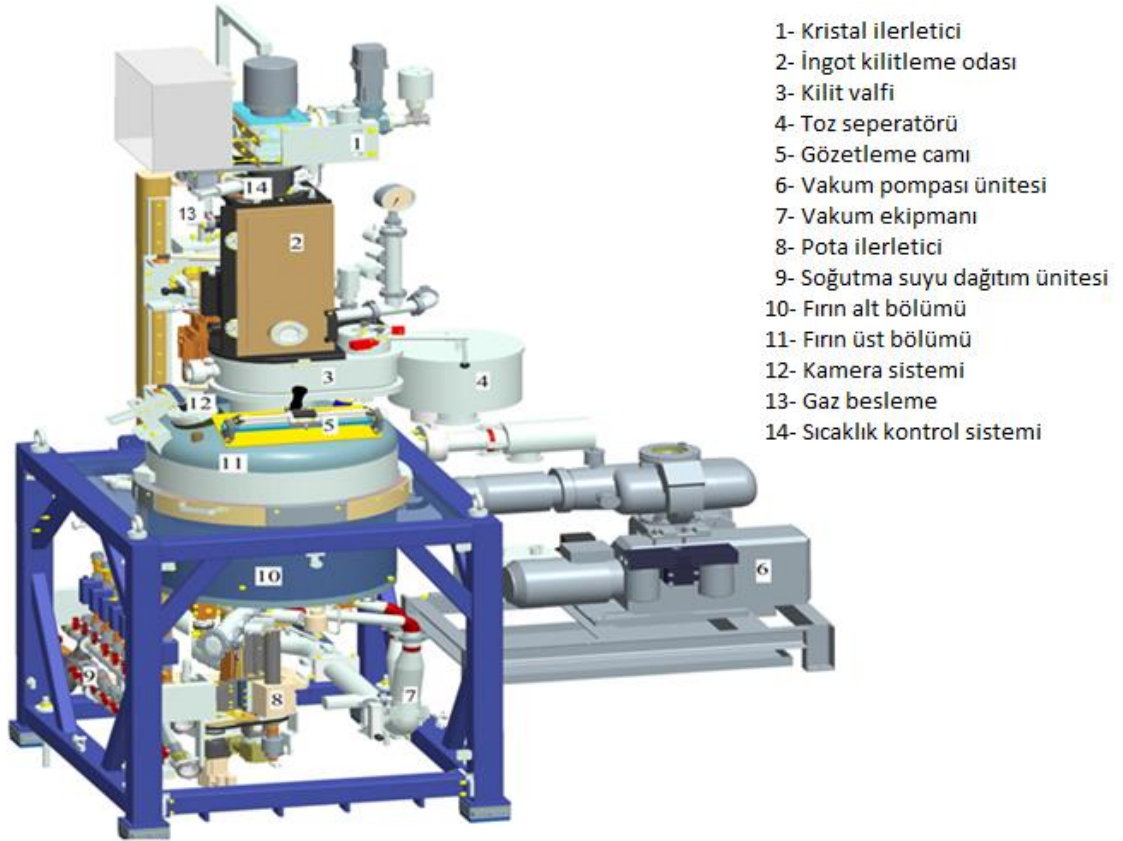


Şekil 3.2 PVA TePla-CGS Lab Cz-Si Büyütme Sistemi (Kişisel arşiv, 2017)

Cz sisteminin eritme bölgesini alt (ana) ve üst fırın bölgeleri oluşturmaktadır. Alt bölge eritmenin gerçekleştirildiği şarj bölgesi ekipmanları (grafit destek ekipmanı, potayı döndürme ve kaldırma ekipmanları), ısıtıcı ekipmanları ve potayı çevreleyen grafit izolasyon keçesi oluşmaktadır. Bu ekipmanlara ilave olarak potaya yükleme işlemi yapıldıktan sonra potanın üzerine bir konik SiC parça konulmaktadır. Üst fırın bölgesi bir proses kontrol-gözlem camı, pirometre ile gözlem için bir küçük gözlem camı ve ingot büyütme-çekme kolonuna sahiptir. Her iki bölgede de su soğutma kanalları mevcuttur. Pota kaldırma sürücüsü 0,02-200 mm/dk aralığında değişen kaldırma hızlarına, 0,5-35 devir/dk aralığında değişen pota döndürme hızlarına ve 200 mm pota kaldırma yüksekliği kapasitesine sahiptir. Üst fırın bölgesi şarj ve temizleme işlemleri sırasında 200 mm yukarı kaldırılabilir.

Cz sisteminin şematik olarak bütün ekipmanlarını gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir. Cz sisteminde ingot büyütme kolonunun üstüne kurulmuş kristal çekme ve döndürme sistemi mevcuttur. Bu bölgede, elektrik motoru ile kontrol ettirilen kolonun içine sarkıtılmış ve ucuna Si çekirdeğin bağlandığı bir tel mevcuttur. Kristal çekme hızı aralığı 0,1-1000 mm/dk ve çekme mesafesi 500-1100 mm arasındadır. Isıtma sistemi eritme bölgesinde kuvars potanın etrafını saracak şekilde konumlandırılmıştır. Ergitme işleminde güç kaynağı performansı maksimum 500

kW, akım maksimum 1600 A ve voltaj 0-35 V (DC)'dir. Ergitme prosesinde yaklaşık 1600 °C'de 150 kW güçte direnç değeri yaklaşık 29,3 mΩ'dur ve proses sırasında eriyik sıcaklığı 1500 °C olduğunda ısıtıcıların sıcaklığı 1600 °C olmaktadır.



Şekil 3.3 PVA TePla-CGS Lab Cz sistemi ve ekipmanlarının şematik görüntüsü

Vakum sistemi Şekil 3.3'te 6 nolu bölümde bulunmakta ve içerisinde bir siklon sistemi mevcuttur. Cz sisteminde yükleme yapılmadığı ve güç uygulanmadığı durumda sızdırma oranı 5×10^{-3} mbar l/s olmalıdır. Proses sırasında sisteme beslenen Ar gazı ve Si eriyiğinden buharlaşan SiO vakum sistemiyle eritme bölgesinden siklonlar içine emilmekte ve bu bölgede SiO tozu yavaşlatılıp soğutulmaktadır. Soğutma sistemi proses sırasında ısınan bütün bölümlerde soğuk (<20 °C) basınçlı suyun dolaşımını sağlamaktadır. Soğutma sistemi cihazın bulunduğu bölgeden uzağa konumlandırılmış ve proses sırasında ortalama 100 l/dk'lık bir su beslemesi yapmaktadır. Sistemin içindeki soğutma kanallarında su basıncı 4-5 bar aralığında ve sistemin dışındaki su borularında ise 1,5 bar'dır. Cz sistemine su dağıtımı Şekil

3.3'te 9 ile gösterilen bölümde 8 farklı akış metreden basıncı ayarlanarak yapılmaktadır.

Cz sistemi temizleme ve proses gazını (Ar) sisteme aktaran sistem su soğutma sistemi gibi cihazın bulunduğu odanın dışına kurulmuş ve gaz bu sistemden bakır borular içinde Cz sistemine taşınmaktadır. Şekil 3.3'te 13 numaralı bölümden sisteme verilen gaz 6 ve 7 numaralı bölgeler ile sistemden uzaklaştırılmaktadır. Proses sırasında temizleme adımına gaz basıncı 2-3 ve proses aşamasında ise 6-9 bar'dır. Proses boyunca toplam gaz tüketimi yaklaşık 24 m³'tür ve proses sırasında dakikalık gaz tüketimi en fazla 100 l/dk'dır. Cz sisteminde her bir proses adımı bilgisayar sisteminde programlanmakta ve sistemin bütün ekipmanlarının kontrolü de bu kısımda yapılmaktadır. Si ergitme işlemi aşamaları manuel, yarı otomatik ve otomatik olarak üç şekilde de yapılabilmektedir. Ergitme prosesinin herhangi bir aşamasında sistem kontrolü değiştirilerek çalıştırmaya devam edilebilmektedir.

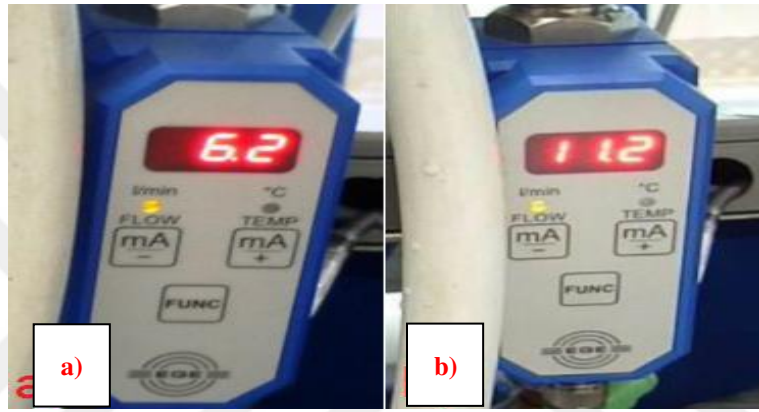
3.1.1 Üretim Öncesi Kontrol Aşamaları

Cz sisteminde bütün ısıtma ve ergitme ekipmanlarının olduğu bölgeler ergitme işlemi yapılmadan önce düşük vakumda emilim ile temizlenmektedir. Temizleme işlemi sonrası sızdırma testleri yapılmaktadır. Bu işlemde sistem vakuma alınmakta ve 10 dk boyunca vakum değişimi kontrol edilmektedir. Vakum seviyesi 5×10^{-3} mbar l/s'nin üstünde olması durumunda sistem tekrar temizlenip sızdırma testi tekrarlanmaktadır.

Cz sisteminde soğutma suyu cihazın farklı bölgelerindeki farklı akış hızlarına sahip ve ergitme işlemi yapılmadan önce istenilen akış hızlarının sağlanması için akış metreler temizlenmektedir. Sistemin uzun süre çalıştırılmadığı hallerde akış metrelerde oluşan kirlilik Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Kirliliklerin temizlenmediği durumlarda akış metreler hatalı ölçümler yapmaktadır. Bu hallede cihaz hata oluşmakta ve çalışmamaktadır. Şekil 3.5'te akış miktarı minimum 11 l/dk olması gereken soğutma suyu akış metresinin temizlenme öncesi ve temizlenme sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.4 Cz sistemi soğutma sistemindeki akış metrelerin temizlenmesi (Kişisel arşiv, 2017)

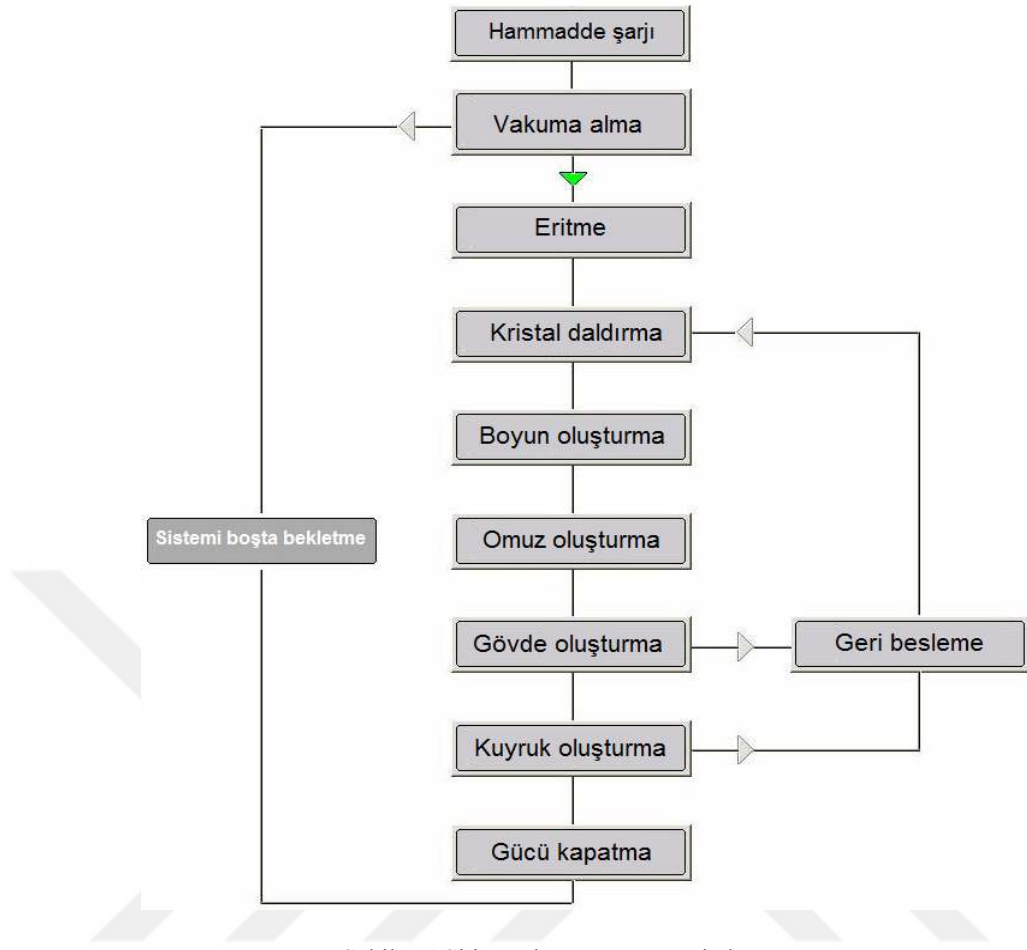


Şekil 3.5 Soğutma suyu akış metresinin görüntüsü; a) Temizleme işlemi öncesi, b) Temizleme işlemi sonrası (Kişisel arşiv, 2017)

3.1.2 DeneySEL Prosedür

Cz sisteminde şarj ve vakuma alma işlemleri gerçekleştirildikten sonra Si hammaddesinin ergitilmesi aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada gerçekleştirilen proses adımlarının akış şeması Şekil 3.6’te verilmiştir.

Vakuma alma işlemi sonrası sistem kontrol panelinden manuel konumdan otomatik konuma değiştirilmektedir. Si hammaddesinin eritilmesi aşaması otomatik modda tamamlanmaktadır. Ancak Si çekirdeğinin daldırılması işleminde tekrar manuel moda değiştirilmektedir.



Şekil 3.6 Si ingot büyütme prosesi akış şeması

3.1.2.1 Si Hammaddelerin Sarj Edilmesi

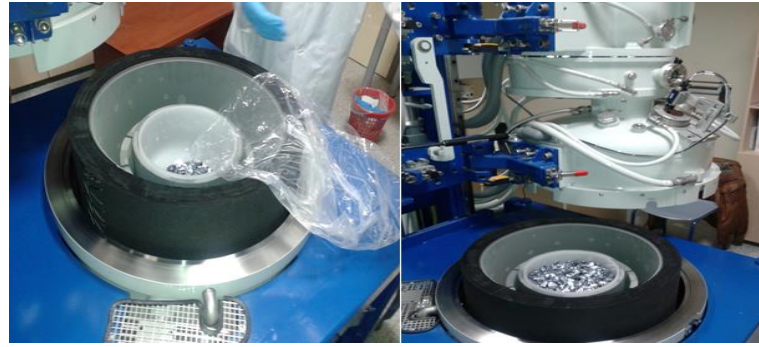
Şarj işlemi çok kristalin Si hammaddesinin ve eğer n-tipi üretim yapılacaksa SiP katkısının kuvars pota içine yüklenmesi işlemini kapsamaktadır. Şarj işlemi öncesi fırın içi sökölüp temizleme işlemleri yapılmıştır (Şekil 3.7).

Yapılan deneysel çalışmalarda hem katkısız hem de n-tipi Si ingotların üretimi gerçekleştirilmiştir. PVA TePla-CGS Lab Cz sistemi laboratuvar ölçekli hammadde yükleme kapasitesi maksimum 5 kg olan bir Si ingot üretimi sistemidir. Bu kısıtlama doğrultusunda katkılı ve katkısız Si ingot üretiminde 5 kg çok kristalin Si kuvars pota içine yüklenmiştir. N-tipi Si üretimi amacıyla SiP malzemesi 0,4 gr olarak tartılıp Si sarjının içerisine ilave edilmiştir. Şarj işlemleri kuvars pota Cz sisteminde eritme bölgesine yerleştirildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’da kuvars potanın

fırın içine yerleştirilmesinden sonraki Si hammaddesinin şarj aşamalarını göstermektedir.



Şekil 3.7 Si şarj işlemi öncesi fırın bölgesi ekipmanının; a) Fırın bölgesi ve pota döndürme ve destek parçası, b) Fırın içi ısıtıcı ekipmanın bağlanması, c) Grafit izolasyon keçesi, d) Grafit pota haznesi, grafit koni ve fırın üstü ekipmanları (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 3.8 Kuvars pota içine Si hammaddesinin şarj edilmesi (Kişisel arşiv, 2017)

3.1.2.2 Sistemin Temizlenmesi ve Vakuma Alınması

Cz sisteminde şarj işlemi sonrası ergitme prosesine başlanmadan önce sistemin temizlenmesi işlemleri yapılmaktadır. Temizleme işlemleri, standart olarak sisteme 20 l/dk besleme hızında Ar gazının 5 dk süreyle verilmesi ve her aşama sonrasında

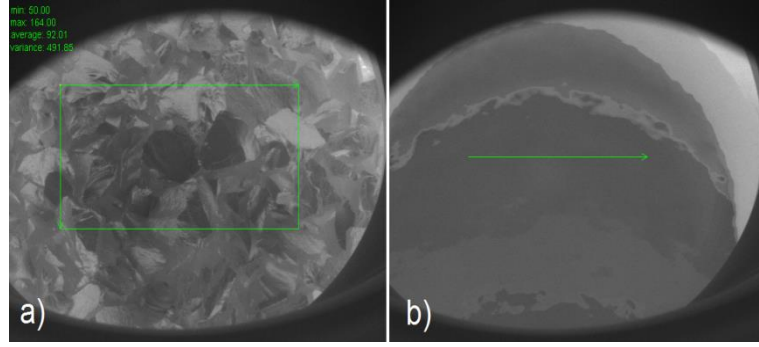
vakuma alınmasını kapsamaktadır. Vakuma alma işlemi yaklaşık 20 dk sürmekte ve basınç değeri 10^{-3} mbar'a indirilmiştir. Bu işlemler bütün Si ingot üretimi çalışmalarında 10 dk sızıntı testi sonrası 8×10^{-4} mbar l/s vakum değeri elde edilinceye kadar devam ettirilmiştir.

3.1.2.3 Sisteme Güç Verilmesi ve Si Eritme İşleminin Başlatılması

Cz sisteminde Si hammaddesinin kuvars pota içinde ergitilmesi işlemi otomatik olarak gerçekleşmektedir. Ergitme aşamasında her bir proses adımı için süre, pota dönüş hızı, pota rotasyonu, ısıtıcı gücü değişimi, Si çekirdek rotasyonu, gaz akışı ve basınç değişimleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Ayrıca, Cz sisteminde proses kontrolü için termal kamera ile her 10 dakikada bir görüntü alınmıştır.

Tablo 3.1 Cz sistemi parametrelerinin eritme prosesi boyunca değişimi

Proses adımı	Süre	Pota Dönüş Hızı	Isıtıcı Gücü	Kristal Rotasyonu	Pota Rotasyonu	Gaz Akışı	Basınç
1	1 dk	0	2 kW				
2	1 dk	0	4 kW				
3	1 dk	0	6 kW				
4	1 dk	0	8 kW				
5	1 dk	0	10 kW				
6	5 dk	0	12 kW				
7	5 dk	0	14 kW				
8	10 dk	0	16 kW	0	1 devir/dk	20 l/dk	10 mbar
9	10 dk	0	18 kW				
10	10 dk	0	20 kW				
11	15 dk	0	25 kW				
12	15 dk	0	30 kW				
13	15 dk	0	35 kW				
14	60 dk	0	38 kW				
15	15 dk	20mm/dk	29 kW	5 devir/dk	2 devir/dk	20 l/dk	10 mbar
16	15 dk	20mm/dk	29 kW	5 devir/dk	5 devir/dk	15 l/dk	15 mbar
17	15 dk	20mm/dk	29 kW	10 devir/dk	10 devir/dk	10 l/dk	20 mbar

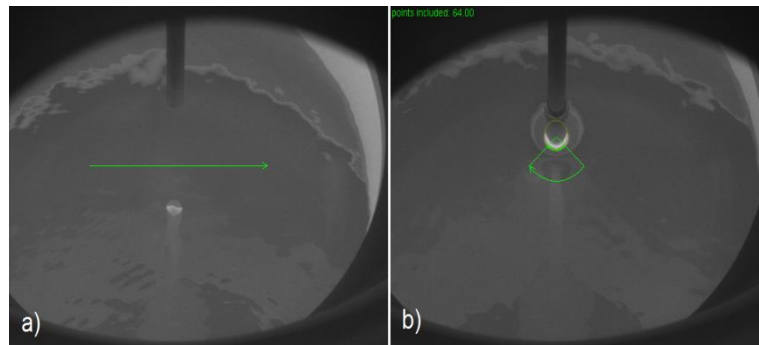


Şekil 3.9 Si eritme aşamalarının termal kamera görüntüsü (Kişisel arşiv, 2017)

Si eritme işlemi silisyum eriyiği tamamen homojen oluncaya kadar toplam 195 dk sürmektedir. Si eriyiği bu proses boyunca maksimum 1560 °C sıcaklığa 14. adımda ulaşmaktadır. Eritme prosesinin son 3 adımında güç azaltılarak sıcaklık 1440 °C'ye indirilmektedir. Şekil 3.9'da Si eritme prosesinin 10. ve 17. adımlarında termal kamera ile alınan görüntüler verilmiştir.

3.1.2.4 Eriyik İçine Si Çekirdeğin Daldırılması

Si eriyiği homojen bir yapıya geldikten sonra sıcaklık 1440 °C'ye indirilmekte ve Si çekirdeği eriyiğin içine daldırılarak boyun oluşumu başlatılmaktadır. Bu işlem uygulanırken cihaz otomatik moddan manuel moda alınmaktadır. Daldırma işleminden önce Si çekirdek eriyiğe manuel olarak yaklaştırılıp ısıtılmaktadır. Daldırma işleminde daldırma sıcaklığı 1140 °C, kristal rotasyonu 10 devir/dk, pota



Şekil 3.10 Si eriyiğine Si çekirdeğin daldırılması işleminin termal kamera görüntüleri; a) Si çekirdek ısıtma işlemi, b) Boyun oluşumun başlangıcı (Kişisel arşiv, 2017)

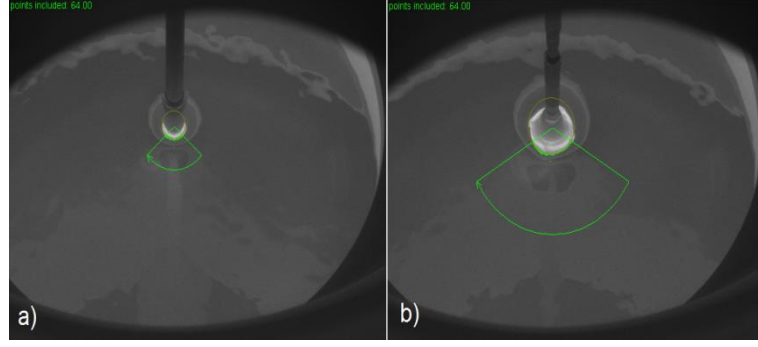
rotasyonu 10 devir/dk, gaz akışı 10 l/dk ve basınç 30 mbar'dır. Daldırma işleminde kristal çekirdeğinin uç kısmından yaklaşık 1 cm kısmı eriyik içine daldırılmış ve boyun oluşumu başlanıncaya kadar bekletilmiştir. Daldırma prosesinde çekirdeği eriyiğe yaklaştırma Şekil 3.10a'da ve boyun oluşumunu Şekil 3.10b'de gösterilmiştir.

3.1.2.5 Boyun Kısımının Oluşturulması

Bu aşamada sistem boyun oluşturuluncaya kadar manuel modda çalıştırıldıktan sonra otomatik moda değiştirilmektedir. Boyun oluşumunun ilk adımı Si çekirdeği üzerinde kristallenmenin başlamasıdır. Bu adımda eriyik sıcaklığı hafif düşürülerek pota ile Si çekirdeği aynı yönde dönerken çekirdek eriyikten yukarı doğru çekilmiş ve çekirdek kristalinin ucuna asılı bir tek kristal üretilmiştir. Boyun oluşumu işleminde boyunca çekilen boyunun uzunluğu ve kalınlığı ile birlikte proses parametreleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.11'de boyun oluşumunun termal kamera görüntüleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Si ingot üretiminde boyun oluşumu parametreleri

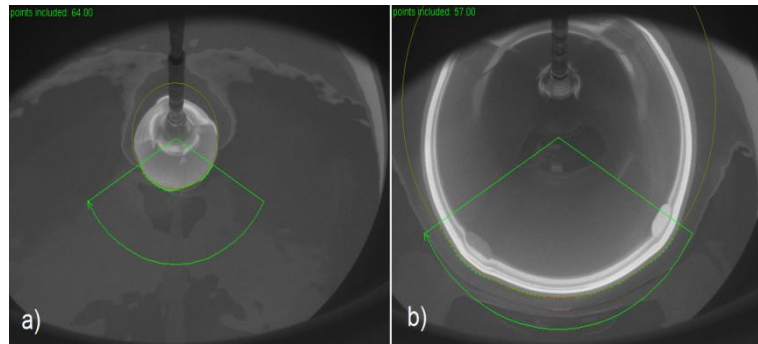
Boyun Uzunluğu	Kristal Çapı	Ortalama Çekme Hızı	Sıcaklık	Kristal Rotasyonu	Pota Rotasyonu	Gaz Akışı	Basınç
0	6 mm	0,5 mm/dk	1440 °C				
5 mm	4,7 mm	1,7 mm/dk	1438 °C				
30 mm	4 mm	2,5 mm/dk	1435 °C	10 devir/dk	10 devir/dk	10 l/dk	20 mbar
60 mm	3,5 mm	3,5 mm/dk	1432 °C				
80 mm	3,5 mm	3,5 mm/dk	1428 °C				
100 mm	3,5 mm	3,5 mm/dk	1426 °C				



Şekil 3.11 Boyun oluşumu kademesinin termal kamera görüntüleri; a) Boyun oluşumun başlangıcı, b) Omuz bölgesinin oluşumu (Kişisel arşiv, 2017)

3.1.2.6 Omuz Kısımının Oluşturma

Omuz oluşumu literatürde çanak oluşumu olarak bilinmekte ve çanağın sonlandığı ve vücut oluşumunun başladığı kısım omuz olarak isimlendirilmektedir. Ancak yapılan deneysel çalışmalar için bu iki kısım omuz oluşumu olarak açıklanacaktır. Si ingot üretiminde omuz oluşumu kademesi istenilen boyun uzunluğuna ulaşıldıktan sonra çekme hızının ve eriyik sıcaklığının düşürülmesi ile başlamaktadır. Bu aşamada istenilen son çap elde edilene kadar omuz büyümesi devam etmektedir. Omuz oluşumu için istenilen çapa ulaşıldığında çekme hızı ve büyüme hızı değiştirilerek vücut oluşumu kademesi başlatılmaktadır. Tablo 3.3'te omuz oluşturma kademesi için proses parametreleri gösterilmiştir. Şekil 3.12a'da omuz oluşumunun başladığı ve Şekil 3.12b'de omuz çapının istenilen değerlere geldikten sonraki hallerinin termal kamera görüntüleri verilmiştir.



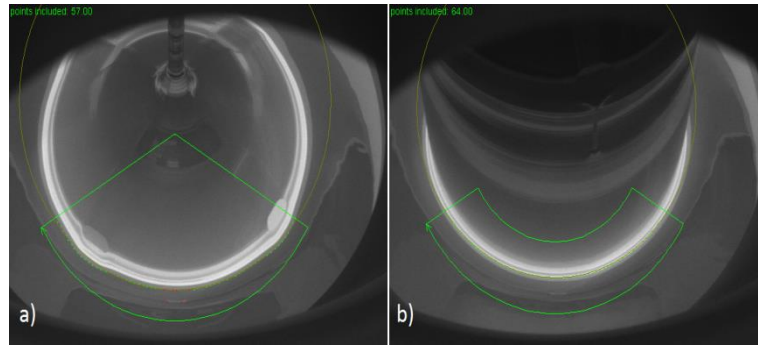
Şekil 3.12 Omuz oluşumu kademesinin termal kamera görüntüleri; a) Omuz oluşumun başlangıcı, b) Vücut oluşumunun başlangıcı (Kişisel arşiv, 2017)

Tablo 3.3 Si ingot üretiminde omuz oluşumu parametreleri

Omuz Oluşturma Aşaması						
Uzunluk	Çap artışı	Sıcaklık	Kristal Rotasyonu	Pota Rotasyonu	Gaz Akışı	Basınç
0 mm	0,5 mm/dk	1426 °C	10 devir/dk	10 devir/dk	10 litre/dk	20 mbar
5 mm	0,9 mm/dk	1425 °C				
10 mm	1,3 mm/dk	1423 °C				
15 mm	1,8 mm/dk	1420 °C				
20 mm	2 mm/dk	1417,3 °C				
25 mm	2 mm/dk	1414,4 °C				
30 mm	2 mm/dk	1411 °C				
35 mm	2 mm/dk	1407,5 °C				
40mm	2 mm/dk	1404,2 °C				
45 mm	1,8mm/dk	1400 °C				
Omuz Sonlandırma Aşaması						
Çap		Çekme Hızı		Büyüme Hızı		
95 mm		1,6 mm/dk		1,2 mm/dk		

3.1.2.7 Gövde Kısımının Oluşturulması

Si ingot üretiminde vücut oluşumu omuz oluşumu bittikten sonra başlatılmakta ve Cz sisteminde otomatik modda yürütülmektedir. N-tipi Si ingot üretimlerinde kristal çapı 105 mm ve katkısız olanlar için 95 mm olarak üretimler yapılmıştır. Bütün üretimler için vücut büyütme uzunluğu 220 mm'dir. Vücut üretiminde başlangıç ve



Şekil 3.13 Omuz oluşumu kademesinin termal kamera görüntüleri; a) Vücut oluşumun başlangıcı, b) Vücut büyütmenin devam ettirilmesi (Kişisel arşiv, 2017)

bitiş toplam 14 adımdır. Bu adımlar sırasında eriyik sıcaklığı toplam 103 °C azaltılmıştır. Vücut oluşturma 1. ve 10. adımlarında termal kamera ile alınan görüntüler Şekil 3.13’de verilmiştir. Vücut oluşumu işleminde boyunca çekilen Si vücutun uzunluğu ile birlikte proses parametreleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4 Si ingot üretiminde vücut oluşumu parametreleri

Proses Adımı	Uzunluk	Sıcaklık	Ortalama Büyüme Hızı	İngot Çapı	Kristal Rotasyonu	Pota Rotasyonu	Gaz Akışı	Basınç
1	0	1400 °C	1,1 mm/dk					
2	5 mm	1438 °C	1,3 mm/dk					
3	10 mm	1434 °C	1,3 mm/dk					
4	20 mm	1428 °C	1,3 mm/dk					
5	40 mm	1418 °C	1,3 mm/dk	105				
6	60 mm	1406 °C	1,3 mm/dk	mm				
7	80 mm	1392 °C	1,3 mm/dk	&	10	10	10	20
8	100 mm	1388 °C	1,3 mm/dk		devir/dk	devir/dk	l/dk	mbar
9	12 mm	1382 °C	1,3 mm/dk	95				
10	140 mm	1376 °C	1,3 mm/dk	mm				
11	160 mm	1369 °C	1,3 mm/dk					
12	180 mm	1362 °C	1,3 mm/dk					
13	200 mm	1349 °C	1,3 mm/dk					
14	220 mm	1337.5 °C	1,3 mm/dk					

3.1.2.8 Kuyruk Kısımının Oluşturulması

Cz sisteminde kuyruk kısmı vücut oluşumu bittiği bölgede başlamakta ve ingot büyütmenin sonlandığı kısma kadar devam etmektedir. Bu aşama sistemde otomatik modda yürütülmüştür. Kuyruk oluşumu işlemi 17 adımda gerçekleştirilmiştir ve proses parametreleri ve kuyruk uzunluğu Tablo 3.5’de verilmiştir. Kuyruk oluşumu başladığında eriyik yaklaşık olarak başlangıç miktarının % 25-35 seviyelerinde ve kuyruk oluşumunu ile bu miktar % 15-20 seviyelerine düşmektedir. Kuyruk oluşumu sırasında eriyik sıcaklığı hızlı bir şekilde düşmektedir.

Tablo 3.5 Si ingot üretiminde kuyruk oluşumu parametreleri

Proses Adımı	Uzunluk	Sıcaklık	Çekme Hızı	Pota Rotasyonu	Kristal Rotasyonu	Gaz Akışı	Basınç
1	0	1338 °C	-0,05 mm/dk	10 devir/dk			
2	8 mm	1341 °C	-0,10 mm/dk	10 devir/dk			
3	16 mm	1342 °C	-0,05 mm/dk	10 devir/dk			
4	24 mm	1344 °C	0	9 devir/dk			
5	32 mm	1347 °C	0,08 mm/dk	9 devir/dk			
6	40 mm	1350 °C	0,16 mm/dk	9 devir/dk			
7	48 mm	1353 °C	0,24 mm/dk	9 devir/dk	10 devir/dk		
8	56 mm	1357 °C	0,32 mm/dk	9 devir/dk			
9	64 mm	1364 °C	0,42 mm/dk	7 devir/dk	(ters yönde)	10 litre/dk	20 mbar
10	72 mm	1375 °C	0,57 mm/dk	7 devir/dk			
11	80 mm	1388 °C	0,80 mm/dk	7 devir/dk			
12	88 mm	1403 °C	1,2 mm/dk	5 devir/dk			
13	96 mm	1418 °C	2,08 mm/dk	5 devir/dk			
14	104 mm	1433 °C	3,30 mm/dk	5 devir/dk			
15	120 mm	1438 °C	5,80 mm/dk	3 devir/dk			
16	140 mm	1448 °C	8,50 mm/dk	3 devir/dk			
17	150 mm	1458 °C	10 mm/dk	3 devir/dk			

Kuyruk istenilen boya geldikten sonra ve Si ingot büyütme işlemi bitmekte ve otomatik olarak ingot eriyikten yukarı doğru hızlı bir şekilde çekilmektedir. Ingotun bekleme bölgesine alınmasından sonra sistem kapatma aşamasına otomatik olarak geçmektedir. Deneysel çalışmalarda bu aşama yaklaşık 20 dk sürmüştür ve sıcaklık bu aşamanın başlangıç ve bitişi arasında 120 °C'dir. Kuyruk kısmı oluşturma işleminde vücut oluşumunun son aşamasında sıcaklık ve çekme hızı artırılarak kristalin eriyikten düzgün bir şekilde ayrılması sağlanmıştır.

3.1.2.9 Sistemin Kapatılması

Cz sisteminde kuyruk oluşumu işlemi bittiği zaman Si ingot kolon bölgesindeki bekleme odasına alınmakta ve eritme kısmı ile kolon arasındaki kilit valfi kapatılmaktadır. Si ingot bekleme odasında soğutulurken sistemin kapatma aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada, sistem otomatik modda çalışmakta ve ısıtıcıların gücü sıfıra indirilecek şekilde 50 dk boyunca adım adım azaltılmaktadır.



Şekil 3.14 Si ingot üretimi son ürünleri; a) Cz eritme bölgesinin görüntüsü, b) Kilit bölgesinin ve üretilen n-tipi tek kristalin Si ingotun görüntüsü (Kişisel arşiv, 2017)

Üretim aşamasında Si eriyikten buharlaşan SiO 'ın güvenlik açısından SiO_2 'ye dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla sistem kapatma aşamasında Si ingot bekleme odasına çekilip kilit valfi kapatıldıktan sonra oksidasyon valfi açılarak vakum hattındaki Ar gazına kuru hava kontrollü bir şekilde karıştırılmaktadır. Oksidasyon valfi 75 dk boyunca açık bırakıldıktan sonra kapatılmaktadır. Cz sistemi kapatma prosesi bittikten sonra sızıntı testi yapılmaktadır. Sızıntı testi için ilk olarak Ar gazı sisteme dakikada 8 litre olacak şekilde 10 dk boyunca verilmekte ve daha sonra sistem tekrar vakuma alınmaktadır. Tek kristalin Si ingot büyütüldükten sonra potanın içinde kalan Si eriyiği çok kristalli olarak kristallenmektedir. Yapılan bütün üretimler sonrasında fırın sistemi açılarak ve temizlik işlemleri yapılmaktadır. Fırın ekipmanlarının, kuvars potanın ve pota içindeki katılaşmış proses fazlası Si'nin görüntüsü Şekil 3.14a'da verilmiştir. Ayrıca kilit odasında soğutulmuş Si ingotun görüntüsü Şekil 3.14b'de verilmiştir.

3.2 Si Waferların Hazırlanması

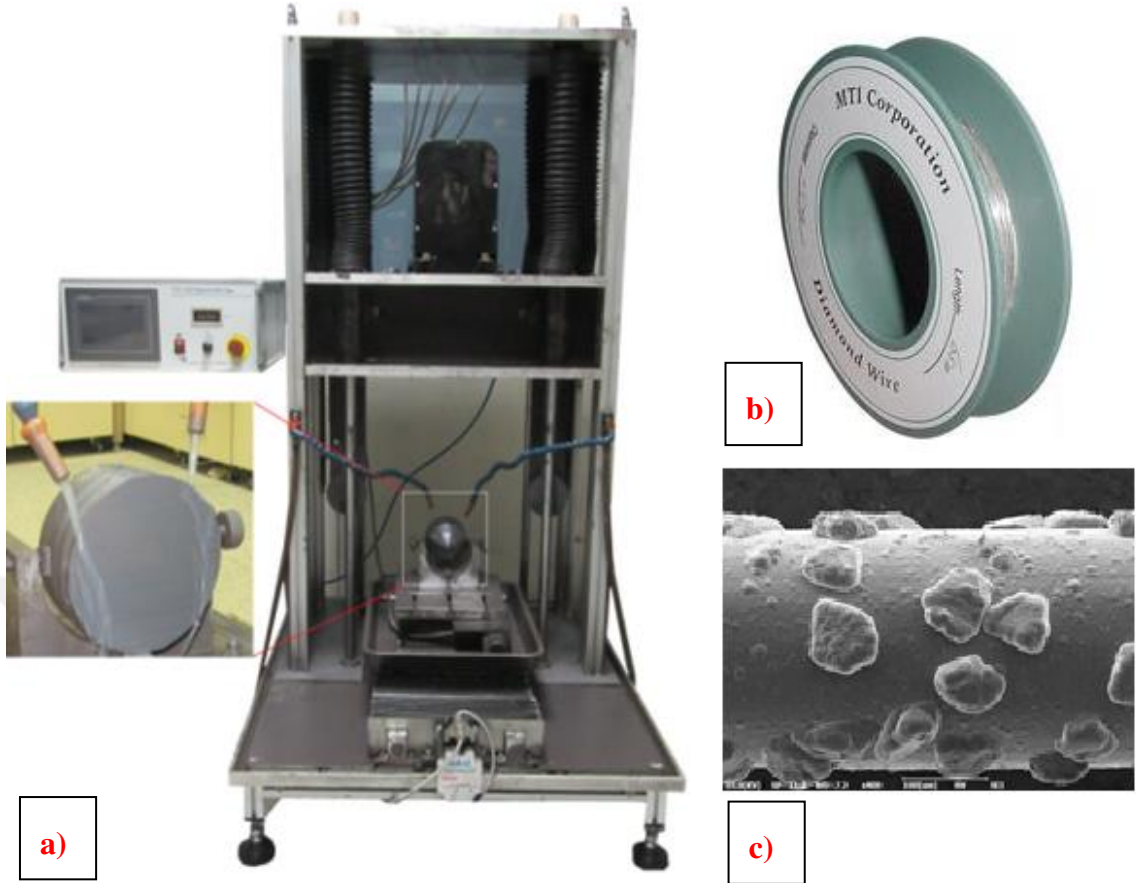
Si wafer hazırlama işlemlerinde dört adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, Cz sistemiyle üretilmiş tek kristal Si ingotlar tel testere kesme cihazıyla 0,375 mm kalınlığında waferlar şeklinde kesilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda, lepleme sistemi ile 0,375 mm kalınlığında kesilen waferların yüzeylerinin düzleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise parlatma sistemi ile leplenmiş Si waferların parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dördüncü ve son aşamada ise parlatılmış Si waferların temizleme işlemleri yapılmıştır.

3.2.1 Si İngotların Elmas Tel Testere Sistemi ile Wafer Halinde Kesilmesi

Wafer kesme işlemleri Dokuz Eylül Üniversitesi EMUM Laboratuvarlarında üretilmiş 105 mm çapında n-tipi tek kristalin Si ingotlar tek telli testere sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerde elmas kesme teli kullanılmıştır. Kesme sisteminde soğutma sıvısı olarak organik bazlı kesme yağı kullanılmıştır.

Si ingotların kesilmesi işlemi STX 1202 tek telli kesme cihazıyla (Şekil 3.15a) gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemlerinde ortalama 60 µm elmas aşındırıcı partikül elektrolitik olarak kaplanmış 300 µm çapında ve 150 m uzunluğunda kesme teli (MTI Corporation) kullanılmıştır (Şekil 3.15b,c). Kesme işlemleri 375 µm wafer kalınlığı elde edilecek şekilde programlanmıştır.

STX 1202 tek telli kesme cihazı toplam 80 cm yatay koordinatlarda hareket edebilen bir numune tutma bölgesine sahiptir ve kesme teli düşey koordinatlarda hareket etmektedir. Cihaz hem manuel hem de bir bilgisayar destekli yazılım ile otomatik olarak da kullanılmaktadır. Otomatik programlama işleminde kesme hızını, kesme kalınlığını, kesme mesafesini ve toplam kaç kesme işleminin yapılacağını belirlenebilirken tel besleme hızı manuel olarak ayarlanmaktadır. STX 1202 tek telli kesme cihazında kesme telinin gerginliği bir kompresör sistemi ile desteklenmiş pinomatik sistem ile sağlanmakta ve basınç 1,5 paskal olarak sabit tutulmaktadır. Kesme işlemlerinde bir mineral katkılı kesme/soğutma yağı kullanılmakta ve sistemin içinde kapalı devre şeklinde kesme parçasının üzerine 1litre/dk hızda akış yapan iki musluktan proses boyunca sürekli beslenmektedir. Kesme telinin bir ucu 1,5 Pa tel gerginliğinde cihazın tel beslemesinin yapan silindirik tamburun başlangıç kısmına sabitlendikten sonra tamburun üzerine kontrollü şekilde sarılmakta ve telin diğer ucu sistemin kesme bölgesinin tutucularından geçirildikten sonra tamburun bitiş kısmına sabitlenmektedir. Ayrıca tamburun ileri ve geri hareketleri 4 adet sensor ile kontrol edilmektedir. Kesme işleminde tambur bir yönde harekete başladıktan sonra sensorler ile belirlenmiş ilerleme limiti noktasına geldiğinde durmakta ve diğer yönde dönmeye başlamaktadır.



Şekil 3.15 Tek teli kesme sistemi, a) STX 1202 tek telli kesme cihazı, b) Elmas kesme teli, c) Elmas kesme telinin SEM görüntüsü (Kişisel arşiv, 2017)

3.2.1.1 Deneysel Prosedür

Si kütüklerinin elmas tel testere ile kesilmesi işlemleri maksimum 5 m/s tel hızı ve 10 mm/dk kesme hızı kapasitesine sahip STX 1202 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri 3.15c’de SEM görüntüsü verilmiş yüksek dayanımlı paslanmaz çelik üzerine elektrolitik olarak ortalama 60 m μ elmas partiküllerinin kaplandığı 300 m μ çapında ve 150 metre uzunluğundaki kesme teli kullanılmıştır.

Deneysel parametreler olarak tel besleme hızı ve kesme hızı seçilmiş ve kesme hızı “k” ve tel besleme hızı “t” olarak kısaltılmıştır. Bütün kesme işlemleri aynı çevresel koşullarda 105 mm çapındaki n-tipi Si kütüğün 375 m μ kesme kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Yüksek kesme hızlarında ve düşük tel besleme değerlerinde çok sayıda tel kopması meydana gelmesinden dolayı kesme parametrelerini tel besleme hızı için 2,5 - 4,5 m/s ve kesme hızı için 0,5 - 1 mm/dk değerleri limit olarak

belirlenmiştir. Deneysel parametrelerin ve seviyelerinin gösterimi Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 Wafer kesme parametreleri ve faktör seviyeleri

Proses Değişkenleri		Faktör Seviyeleri			
Tel Hızı (m/s)	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Besleme Hızı (mm/dk)	0,5	0,75	1,0		

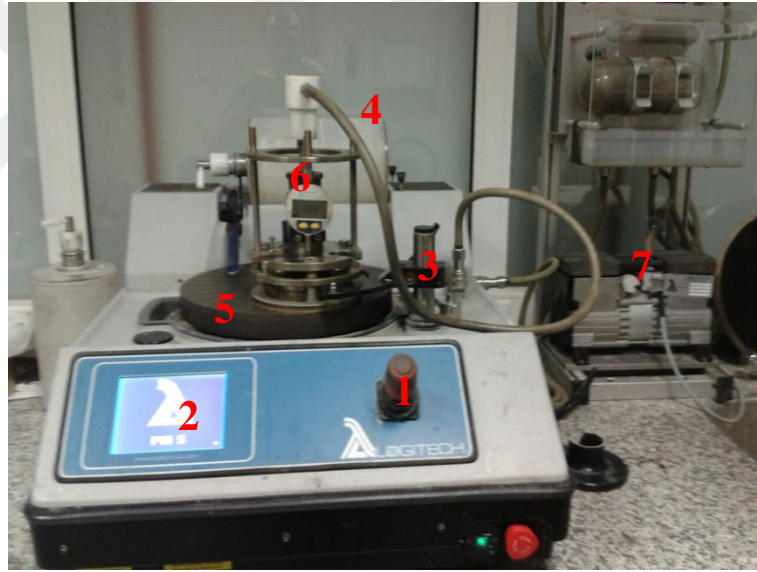
Deneysel set basit faktöriyel dizayn ile 15 set olarak belirlenmiştir ve deneysel sonuçların homojen olarak değerlendirilmesi için deneysel set 5 kez tekrarlanarak toplam 75 Si wafer üretilmiştir. Kesme işlemlerinde soğutma sıvısı olarak mineral bazlı kesme/soğutma yağı kullanılmış ve kapalı devre dolaşım sistemi ile 1 l/dk gaz besleme hızında numune yüzeyine iki hortumdan beslenmiştir. Kesme işlemleri sonrası üretilen Si waferlar ilk olarak sabunlu su ile temizlenmiştir ve daha sonra saf su içerisinde ultrasonik banyoda kesme atıklarının uzaklaştırılması için 30 dk bekletilmiştir. İkinci temizleme kademesinde ise kesme yağının tam olarak Si wafer yüzeyinden uzaklaştırılması için 15 dk ultrasonik banyoda hegzan içinde (% 95-Sigma Aldrich) bekletilmiştir.

3.2.2 Si Waferların Leplenmesi

Deneysel çalışmalarda DEU-EMUM laboratuvarlarında 105 mm çapında üretilmiş Si kütüklerden elmas tel kesme sistemi ile kesilerek üretilen Si waferlar kullanılmıştır. Si waferların lepleme işlemleri Logitech PM5 lepleme cihazı (Şekil 3.16) ve dökme demir laplama plakası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı partikül olarak ortalama 9 µm boyutlara sahip eritilmiş alümina (Logitech OCON-019) kullanılmıştır. Lepleme süspansiyonu aşamasında erimiş alümina tozu saf su ile 0,2 oranında karıştırılarak hazırlanmıştır.

Logitech PM5 lepleme/parlatma cihazı Şekil 3.16’te görüldüğü gibi bir (1) oynatma kolu, (2) PLD kontrol sistemi, (3) numune tutma-hareket ettirme aparatı, (4) solüsyon besleme silindiri, (5) lepleme plakası, (6) numune tutma kafası ve (7) numune tutma kafasındaki vakumu sağlayan bir kompresör sistemine sahiptir. PLD

sisteminde hem lepleme hem de parlatma işlemlerini yapabilecek özel yazılımları mevcuttur. Lepleme işleminde numune tutucu sabit tutulurken parlatma işleminde parlatma plakasının belirlenen iki noktası arasında sürekli hareket etmektedir. Aşındırıcı solüsyon cihazın üst kısmında besleme bölgesinden çalışma alanına beslenmektedir. Bu kısımda cihaz çalıştığı zaman dönmeye başlayan tekerlek sistemi ile solüsyonun homojenliği kontrol edilmektedir. Besleme silindiri özel bir ağız yapısına sahiptir. Solüsyon miktarı bu ağzın sıkılıp-gevşetilmesi ile ayarlanmaktadır. Parlatma cihazı PLD kontrol ile ilk olarak cihazın hangi modda çalışacağı seçilmekte (lepleme veya parlatma modu) ve daha sonra çalışmak istenilen süre ve lepleme/parlatma plakalarının dönme hızı devir/dk olarak ayarlanmaktadır. Bu cihazda süre 0-10 saat arasında dakika cinsinden ve plaka dönme devri ise 0-70 devir/dk arasında ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.16 Logitech PM5 lepleme sistemi (Kişisel arşiv, 2017)

Si waferlar lepleme işlemi öncesinde mekanik yüklemelere karşı dayanımlarının artırılması amacıyla Şekil 2.13'te gösterildiği gibi bir cam altlık yüzeyine polimerik bağlayıcı ile yapıştırılmaktadır. Bu işlem sonrasında numune tutucu kafanın üzerine Si wafer yüzeyi üste kalacak şekilde 0,2 paskalın altında vakum ile sabitlenmektedir. Lepleme işlemi sırasında numuneye uygulanan yük yaklaşık 0,2-4 kg arasında ve bu yük tutma kafasının ağırlığından (8,4 kg) türetilmektedir.

3.2.2.1 Deneysel Prosedür

Si waferların lepleme işlemleri maksimum 70 devir/dk dönme hızına sahip Logitech PM5 lepleme/parlatma sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel parametreler olarak dönme hızı ve lepleme süresi belirlenmiştir. Bütün lepleme işlemleri aynı çevresel koşullarda 105 mm çapındaki n-tipi Si waferlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel parametrelerin ve seviyelerinin gösterimi Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Deneyde kullanılan kesme parametreleri

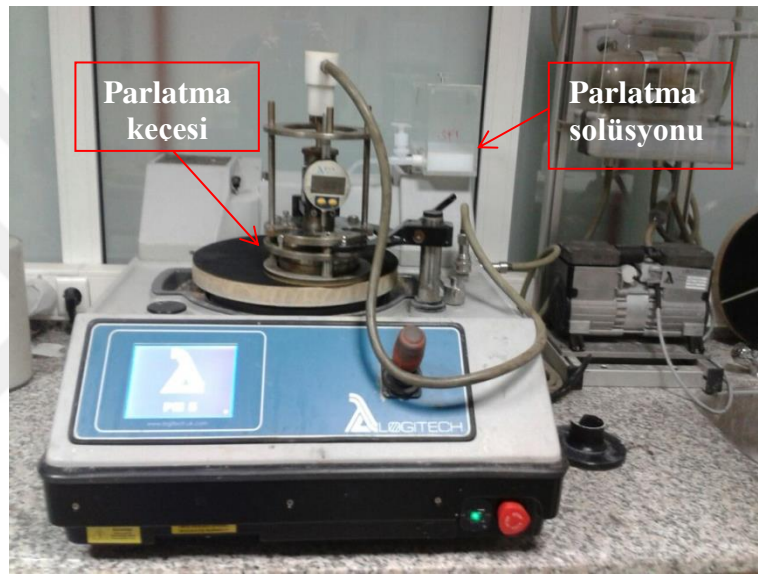
Proses Değişkenleri		Faktör Seviyeleri				
Dönem Hızı (devir/dk)	25	50	70			
Zaman (dk)	5	10	15	30	45	60

Deneysel set basit faktöriyel dizayn ile 18 set olarak belirlenmiştir ve deneysel sonuçların homojen olarak değerlendirilmesi için deneysel set 5 kez tekrarlanarak toplam 90 Si wafer leplenmiştir. Lepleme işlemlerinde aşındırıcı partikül olarak 9 µm ortalama tane boyutunda alümina tozu kullanılmış ve 0,2 karıştırma oranında saf su ile karıştırılarak aşındırıcı süspansiyonu hazırlanmıştır. Bütün lepleme işlemlerinde yaklaşık 3,5 ml/dk besleme miktarında süspansiyon besleme silindirinden lepleme plakasının üzerine damlatılmıştır. Lepleme işlemleri sonrası üretilen Si waferlar ilk olarak sabunlu su ile temizlenmiştir ve saf su içerisinde ultrasonik banyoda lepleme atıklarının uzaklaştırılması için 30 dk’a bekletilmiştir. İkinci temizleme kademesinde ise Si yüzeyine yapışık kalan oksitlerin uzaklaştırılması için % 15 NaOH + DI (de-iyonize su) su çözeltisi içinde bekletilmektedir. Son temizleme işlemi olarak tekrar Si waferlar saf su içerisinde bekletilmektedir.

3.2.3 Si Waferların Parlatma İşlemi

Deneysel çalışmalarda DEU-EMUM Laboratuvarlarında 105 mm çapında üretilmiş Si kütüklerden kesilip leplenmiş yaklaşık 300 µm kalınlığındaki Si waferlar

kullanılmıştır. Lepleme işlemlerinde Si waferlar cam altlık üzerine yapıştırılmış ve aynı işlem parlatma işlemlerinde de yapılacağı için waferlar lepleme işlemi sonrası yapıştırıcısından ayrılmamıştır. Parlatma işlemlerinde lepleme işlemi sonrası temizlenmiş Si waferlar kullanılmıştır. Parlatma işlemleri Logitech PM5 Lepleme/Parlatma Cihazı ve üzerine kadife keçe yapıştırılmış alüminyum parlatma plakası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerde aşındırıcı olarak 3 µm ortalama boyutlu Ce_2O_3 (seryum oksit, Logitech OCON-023) ve 0,05 µm boyutlu koloidal silika süspansiyonu (Logitech SF1) kullanılmıştır.



Şekil 3.17 Logitech PM5 parlatma sistemi (Kişisel arşiv, 2017)

Şekil 3.17’de gösterilen Logitech PM5 parlatma cihazı hem lepleme hem de parlatma işlemlerinde kullanılmaktadır. Parlatma işlemlerinde alüminyum plaka üzerine yapıştırılmış parlatma keçesi kullanılmaktadır. Ce_2O_3 süspansiyonu besleme silindiri ile koloidal silika solüsyonu ise cihazın sağ üstüne sabitlenmiş besleme haznesinden parlatma keçesinin üzerine beslenmektedir.

Si waferlar parlatma işlemlerinde mekanik yüklemelere karşı dayanımlarının artırılması amacıyla bir cam altlık yüzeyine bir polimerik bağlayıcı ile yapıştırılmaktadır. Bu işlem lepleme aşamasında gerçekleştirilmiş ve yapışkan sökülmeden parlatma işlemleri devam ettirilmiştir.

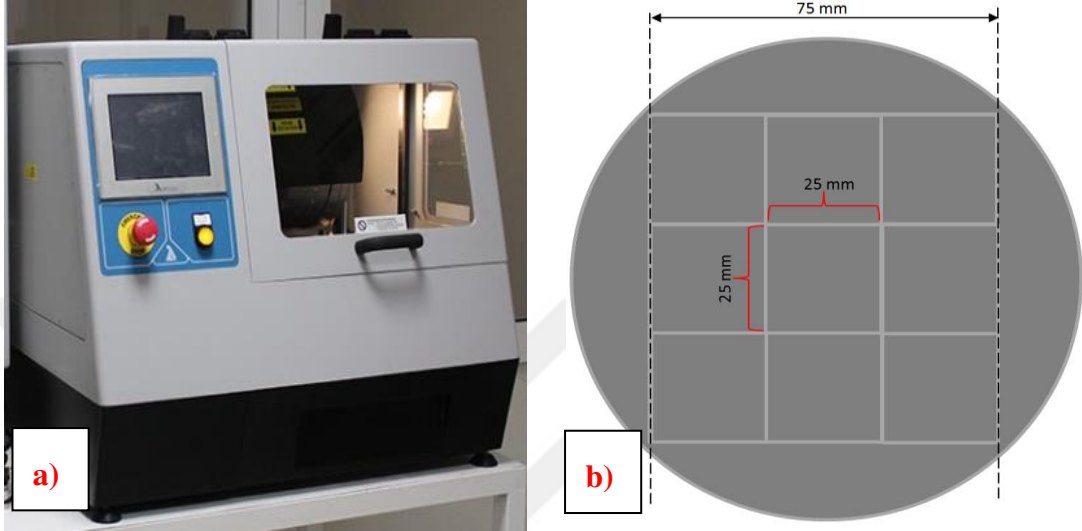
3.2.3.1 Deneysel Prosedür

Si waferların parlatma işlemleri maksimum 70 devir/dk dönme hızına sahip Logitech PM5 parlatma sistemi ile iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada 3 µm ortalama tane boyutunda Ce₂O₃ tozu 0,2 karıştırma oranında saf su ile karıştırılarak hazırlanan aşındırıcı süspansiyonu kullanılmıştır. İkinci aşamada ise SF1 parlatma solüsyonu kullanılmıştır. Bütün parlatma işlemlerinde süspansiyon damlatma miktarı yaklaşık 3 ml/dk olarak ayarlanmıştır. Ayrıca parlatma plakasının dönme hızı 40 devir/dk ve süre 60 dk deney parametreleri kullanılmıştır. Parlatma işlemleri sonrası üretilen Si waferlar ilk olarak sabunlu su içinde ve daha sonra saf su içinde ultrasonik banyoda parlatma atıklarının uzaklaştırılması için 30 dk bekletilmiştir. Bu işlemden sonra Si waferlar cam altlıklar üzerinden aseton kullanılarak ayrılmıştır. İkinci temizleme kademesinde ise Si yüzeyine yapışık kalan oksitlerin uzaklaştırılması için waferlar % 2 HF (hidroflorik asit) çözeltisi içinde bekletilmiştir. Ayrıca bekletme sürelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi amacıyla waferlar 2,5 dk, 5 dk, 10 dk ve 20 dk asit çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Son temizleme işlemi olarak tekrar Si waferlar saf su içerisinde bekletilmiştir.

3.3 Si Tabanlı Güneş Hücrelerinin Üretilmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan Si altlık malzemesi DEU-EMUM Laboratuvarlarında 105 ± 5 mm çapında ve yaklaşık 300 ± 5 µm kalınlığındaki n-tipi Si waferlardan 1 cm x 1 cm ve 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarında dilimlenmiş Si altlıklar kullanılmıştır. 1 cm x 1 cm boyutlarındaki numuneler test ve analizler için kullanılmıştır. Güneş hücresi üretiminde ise Şekil 3.18b’de şematik kesme şablonu gösterilen 110 mm çapındaki waferların 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarındaki altlıklar kullanılmıştır. Tekstürleme işlemleri yüksek saflıkta (> % 98) sodyum hidroksit (NaOH) alkalisi (Sigma Aldrich) ile soksalet sisteminde gerçekleştirilmiştir. Tekstürleme çalışmaları sonucu optimum % Reflektans değerine sahip Si altlıkların yüzeyinde n-p kavşağı oluşturma çalışmalarında elektronik malzeme saflığında (% 99,995) borik asit bor kaynağı olarak kullanılmıştır. İTO yansıtma yüzey kaplaması

olarak altlıkların yüzeyine plazma destekli kimyasal buhar biriktirme sisteminde kaplanmıştır. Son işlem olarak akım toplayıcıların yüzeye kaplanması işlemi perde baskı sisteminde gümüş pasta (Heraeus SOL 9360A Series) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18 Si wafer dilimleme; a) Logitech APD1 elmas diskli kesme cihazı, b) FV üretimi için 105 ± 5 mm çapındaki Si waferların 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarında kesme şablonu (Kişisel arşiv, 2017)

Si waferların dilimlenmesi işlemlerinde Logitech APD1 elmas diskli kesme cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.18a). Logitech APD1 elmas diskli kesme cihazında kesme hızı 0,01 mm/sn-2,0 mm/s aralığında ve kesme diski dönüş hızı 100-5000 devir/dk arasında ayarlanabilmektedir. Soğutma sıvısı kesme diskinin üzerinden, ön ve arka bölgesinden beslenmektedir. Ayrıca kesme mesafesi, numune ilerleme mesafesi ve kesim sayısı PLD kontrol sisteminde programlanmaktadır. Programlama işlemi sonrası kesim işlemleri otomatik olarak gerçekleşmektedir. Cihazda numune tutma-sabitlenme bölgesi 110 mm cam altlığın oturacağı büyüklüktedir. Kesme işlemlerinde 0,2-0,5 mm kalınlığında 152 mm çapında elmas kesme diskleri kullanılmaktadır.

Si yongaların tekstürlenmesi işlemlerinde bir buharlaştırma-yoğunlaştırma (destinasyon) seti (soksalet) kullanılmıştır (Şekil 3.19). Bu sette bir balon joje, bir toplayıcı ve birde soğutucu cam aparatı bulunmaktadır. Su beslemesi ve tahliyesi soğutucu camın alt ve üst kısımlarındaki bağlantı çıkışlarından kauçuk hortumlar ile

yapılmaktadır. Sistem balon jojenin içine oturabildiği bir ısıtıcı üzerine tutma kolları ile sabitlenmektedir.



Şekil 3.19 Soksalet sistemi (Kişisel arşiv, 2017)

P-n kavşağı oluşturma çalışmaları borik asit solüsyonunun Si altlık üzerine ince film şeklinde biriktirilmesi ve bu ince filmden bor silikat camının oluşturulması işlemlerini kapsamaktadır. Borik asit solüsyonun n-tipi Si yonga üstüne ince film şeklinde kaplanması işlemlerinde Europe Spin 150 spin kaplama cihazı (Şekil 3.20) kullanılmıştır. Bu cihazda numune cihazın numune tutucusuna (4 cm x 4 cm kapasiteli) vakum ile sabit sabitlenmekte ve numune tutucu ile birlikte maksimum 12000 devir/dk hızlarda döndürülmektedir. Kaplama işleminde numune tutucu ile döndürülürken hazırlanan kimyasal solüsyon numunenin tam orta noktasına gelecek şekilde damlatılmaktadır. Altlık üzerinde oluşturulacak filmin kalınlığı ve kalitesi kimyasal solüsyonun yapısına (viskozite, kuruma hızı, katı miktarı, yüzey gerilimi vb.) ve spin kaplama cihazı parametrelerine bağlıdır.

Si yongaların yüzeylerine spin kaplama borik asit solüsyonu ile kaplanması işlemi sonrasında 950 °C’de argon gazı atmosferinde yaklaşık bir saat tutularak borik asidin bor-silikat camına dönüştürülmesi işlemleri Firstnano Easy Tube 101 CVD cihazı

(Şekil 3.21) gerçekleştirilmiştir. Cihaza argon, azot, oksijen ve hidrojen gazları beslenebilmektedir. Ayrıca numuneler cihazın cam altlığı üzerine konulmakta ve bu bölüm tüp fırın bölümüne ilerletilip kapatılarak dış ortama karşı tamamen yalıtılmaktadır. Proses parametreleri (sıcaklık, süre, gaz basıncı, gaz tipi) CVD cihazının bilgisayar sistemine kayıt edilmekte ve sonrasında cihaz bu parametrelere göre otomatik modda çalıştırılmaktadır.



Şekil 3.20 Spin kaplama cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

Borik asit (H_3BO_3) kristal fazda bulunan bir bor oksidin (B_2O_3) hidratıdır. Borik asitten Si içine borun difüzyonu borik asidin iki adımda dehidrasyonu ile gerçekleşmektedir. İlk adımda yaklaşık $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de metaborik asit oluşmaktadır. Metaborik asit B_2O_3 'ün bir hidratı ve içerisinde ortorombik, poliklinik ve kübik olarak üç faz bulunmaktadır. Bu karışım $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerine ısıtıldığında susuz borik oksit (B_2O_3) oluşmaya başlar ve $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de karışımın ağırlıkça % 90'dan fazlası B_2O_3 formundadır. B_2O_3 daha sonra yüksek sıcaklıklarda Si ile reaksiyona girerek Si'ye difüze olan bor atomlarını serbest bırakmaktadır.

Si yongalar p-n kavşağı oluşturulmasından sonra reflektans değerinin azaltılması ve bütün hücrenin yüzeyinden akım toplanması amacıyla kırılma indeksi yaklaşık 2 olan indiyum kalay oksit (İTO) kaplaması 100 nm olarak Meyer Burger AK1000 plazma destekli kimyasal/fiziksel buhar biriktirme (PECVD/PVD) cihazında gerçekleştirilmiştir. Meyer Burger AK1000 plazma destekli kimyasal/fiziksel buhar

biriktirme (PECVD/PVD) cihazı $1000\text{-}10^{-9}$ Torr vakum aralığına sahiptir. Altı adet kaynak kullanımı kapasitesine sahip ve numuneler bias uygulanmadan $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye bias uygulanarak $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılabilir. Cihazın birinci nesil biriktirme (PECVD/PVD) cihazı $1000\text{-}10^{-9}$ Torr vakum aralığına sahiptir. Altı adet kaynak kullanımı kapasitesine sahip ve numuneler bias uygulanmadan $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye bias uygulanarak $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılabilir.



Şekil 3.21 Firstnano Easy Tube 101 CVD cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

Güneş panellerinde ön yüzeyindeki metal akım toplayıcıların ve arka yüzey metalizasyon işlemleri Dek Horizon 03IX ekran yazıcı (screen printer) cihazı ile gümüş pasta (Heraeus SOL 9360A Series) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dek Horizon 03IX ekran yazıcısı $12,5\text{ }\mu\text{m}$ hizalama kapasitesine ve $20\text{ }\mu\text{m}$ proses hizalama kapasitesine sahiptir. Ayrıca proses süresine ilave 8 saniye döngü süresine, motorize olarak iki eksende hareket edebilme kapasitesine sahiptir. Ekran yazıcı ile Si yongaların yüzeyine kaplanan gümüş pastanın solventin uçurulması ve altlığa daha iyi bağlanabilmesi için tavlama işlemleri Memmert UN110 etüv fırınında $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir. Fırının maksimum çalışma sıcaklığı $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.

3.3.1 DeneySEL Prosedür

Güneş hücresi üretimi çalışmalarında n-tipi Si yongaların hazırlanması çalışmaları Şekil 3.18a'da gösterilen Logitech APD1 elmas diskli kesme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Si waferlar cam altlığa vaks yapıştırıcı ile yapıştırıldıktan sonra $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ve $2,5\text{ cm} \times 2,5\text{ cm}$ boyutlarında kareler şeklinde kesilmiştir. Kesme işlemlerinde cihazın çalışma parametreleri disk dönme hızı 3000 devir/dk ve

kesme hızı 0,25 mm/s olarak sabit tutulmuştur. Kesme işlemi sonrası Si yongaların direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir (n-tipi Si yongaların direnç değerleri ortalama 7,67 $\Omega \cdot \text{cm}$ olarak ölçülmüştür).

Tablo 3.8 Si yongaların tekstürleme işlemlerinde kullanılan Box-Behnken deneysel dizayn seti

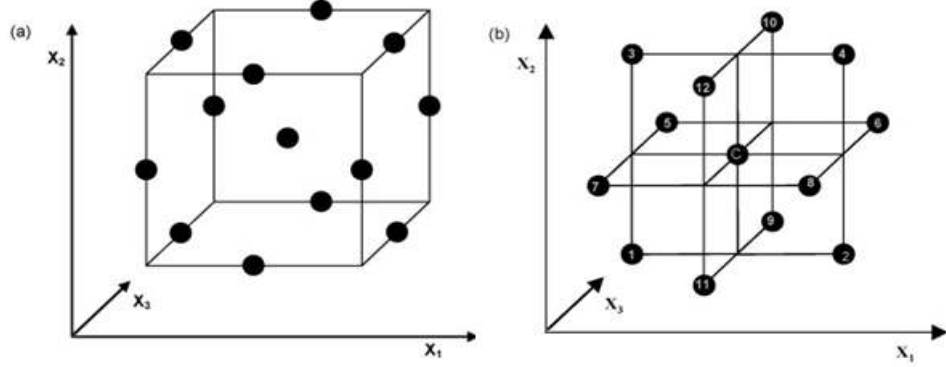
Değişkenler	Deneysel Dizayn seviyeleri	
	Düşük	Yüksek
NaOH (% Ağırlık)	1	6
IPA (% Hacim)	2	8
Zaman (dakika)	20	60

Si yongaların tektürlenmesi işlemleri Şekil 3.19’da gösterilen Soksalet sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda dağılayıcı olarak % 98’den daha yüksek saflıkta NaOH alkalisi (Sigma Aldrich BioXtra) ve tekstürleme yüzeylerinin homojenizasyonu için % 99,7’den daha yüksek saflıkta izopropil alkol (Sigma Aldrich FCC) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda tekstürleme parametrelerinin piramit boyutlarına ve reflektans değerleri üzerine etkileri Box-Behnken deneysel dizayn ile araştırılmıştır. Deneysel parametreleri (NaOH miktarı, IPA miktarı ve dağlama süresi) ve parametre seviyeleri Tablo 3.8’de gösterilmiştir. Deneysel parametreler literatürde Si’nin NaOH ile tekstürlenmesi çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir.

Box-Behnken deneysel dizaynı üç seviyeli tamamlanmamış faktöriyel tasarımlara dayalı dönebilir veya neredeyse dönebilir ikinci dereceden tasarım sınıfıdır. Üç faktör için grafik gösterimi iki biçimde görülebilir. Birincisi Şekil 3.22a’da görülebileceği üzere kenarların merkez noktası ve orta noktalarından oluşan bir küp şeklinde veya Şekil 3.22b’de gibi merkez noktasında birbirine geçen 2^2 faktöriyel dizaynı ve bir merkezli biçimde olabilmektedir.

Box-Behnken deneysel dizayn için gerekli deney sayısı $N = 2k(k - 1) + C_0$ formülü ile hesaplanmaktadır (Box ve Behnken, 1960). Bu formülde k faktör sayısını ve C_0 ise merkez noktası sayısını göstermektedir. Tablo 3.9 Box-Behnken deneysel dizayn için üç faktör seviyesinin kodlanmış değerlerini göstermekte ve ‘-1’ deneysel

faktörün düşük değerini, '+1' deneysel faktörün yüksek değerini ve '0' deneysel faktörün orta değerini göstermektedir. Deneyler kısmındaki 'C' ise deneysel dizanyda merkez noktayı (bütün faktörlerin orta değerini) temsil etmektedir (Aslan ve Cebeci, 2007).



Şekil 3.22 Üç Faktörlü Box-Behnken deneysel dizayn setinin gösterimleri (Aslan ve Cebeci, 2007)

Si yongaların üç faktörlü Box-Behnken deneysel dizayn setine göre tekstürleme işlemleri yapıldıktan sonra Thermo Scientific Evolution 600 UV-Vis spektroskopi cihazıyla % R ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra elde edilen % R sonuçları ile regresyon analizleri ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. En düşük % R değerine sahip % 3,5 NaOH + % 5 IPA ile 40 dk tekstürlenmiş Si yongalar güneş hücresi üretimi için kullanılmıştır. Bu aşamada ilk olarak Si yongaların 2:1:1 hacimsel karıştırma oranında $H_2O:H_2O_2:H_2SO_4$ asit solüsyonu içinde 10 dakika tutularak yüzeyleri hidrofilik hale getirilmiştir. Daha sonraki aşamada ise (Das, 2012) referansı dikkate alınarak Si yongaların bir yüzeyinde p-n kavşağı oluşturulması amacıyla yüksek saflıkta borik asit (% 99,9999 H_3BO_3 , Sigma Aldrich Suprapur) DI su içerisine ağırlıkça % 1 karıştırılmış ve Şekil 3.20'de gösterilen Spin kaplama cihazı kullanılarak yongaların yüzeyine damlatılmıştır. Spin kaplama işlemleri dönme hızı 5000 devir/dk, damlatma süresi 20 sn ve damlatma miktarı 2 ml olarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemleri sonrasında solüsyonun kurutulması işlemleri 40 °C'de etüv fırını içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Kurutma işlemi sonrasında borik asidin bor silikat camına dönüştürülmesi amacıyla Şekil 3.21'de gösterilen Firstnano Easy Tube 101 CVD cihazı içinde argon

gazı atmosferinde fırınlama işlemi yapılmıştır. Bor silikat camının oluşturulması aşamasında cihazın parametreleri Tablo 3.10'da verilmiştir. Yüzeylerinde bor silikat camı oluşturulmuş ve difüzyon işlemi gerçekleştirilmiş Si yongaların yüzeylerindeki oksit tabakasının kaldırılması için % İTO HF solüsyonu içinde 10 dk bekletilmiştir.

Tablo 3.9 Üç değişkenli bir sistemin Box-Behnken tasarımında kodlanmış faktör seviyeleri

Deneyler	Kodlar		
	X1	X2	X3
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
C	0	0	0
C	0	0	0
C	0	0	0
C	0	0	0
C	0	0	0

Yüzeyinden bor silikat tabakası HF solüsyonu ile temizlenmiş Si yongaların yüzeylerine Meyer Burger AK1000 cihazının PVD-RF ünitesinde 100 nm İTO ince filmi kaplanmıştır. Kaplama işlemi öncesi numuneler yüzeyinde oluşan oksitlerin giderilmesi amacıyla % 2 HF+DI su çözeltisinde 2 dk bekletilmiştir. Daha sonra ise numuneler ultrasonik banyoda DI su içinde 2 dk bekletilerek temizlenmiştir ve N₂ gazı üflenerek kurutulmuştur. Kaplama işleminde % 99,99 saflıkta In₂O₃/SnO₂ (90/10) kaynak malzemesi kullanılmış ve Ar/O₂ plazma gazı oranı 98/2'dir. Giriş gücü yoğunluğu 320 mV/cm², basınç 3,7x10⁻³ mbar ve kaplama mesafesi 5 cm'dir. Yapılan kaplamanın performansının ölçülmesi amacıyla Si yongalarla birlikte 2,5 cm

x 2,5 cm x 0,7 mm boyutlarında cam altlıklara da İTO ince filmi kaplanıştır. Cam numunelerin kontaklarının oluşturulması amacıyla dört köşesine 100 nm kalınlığında ve 0,5 mm çapında gümüş biriktirilmiştir.

Tablo 3.10 Si yongalar üzerinde bor silikat camı oluşturma işlemi proses parametreleri

Proses Adımları	Proses parametreleri			
	Gaz Basıncı		Zaman (dakika)	Sıcaklık (°C)
	Azot (slpm)	Oksijen (sccm)		
Başlangıç	0,5	0	1	30
Temizleme	0,5	0	5	30
Oksidasyon sıcaklığına ısıtma	3	10	30	750
Oksidasyon ve stabilizasyon	0,5	80	45	750
Proses sıcaklığına çıkma	3	50	20	925
Proses işlemi	5	10	45	925
Temizleme	5	0	5	400
Soğutma	2	0	30	200
Proses sonlandırma	0,5	0	20	30

Si yongaların yüzeylerine İTO kaplaması yapıldıktan sonra metal akım toplayıcıları ve arka yüzey metalizasyonu işlemleri Dek Horizon 03IX Ekran Yazıcı cihazı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerde gümüş pasta kullanılmış ve 50 µm tarak genişliği ve 850 µm genişliğinde bas bar Si yongaların yüzeyine kaplanmıştır. Kaplama işlemi sonrası gümüş pasta içindeki kimyasalların uzaklaştırılması ve gümüş pastanın altlığa daha iyi yapışabilmesi için 200 °C’de etüv içinde numuneler tutulmuştur.

3.4 Karakterizasyon Çalışmaları

3.4.1 Si İngot Üretimi: Hammadde Karakterizasyonu

Si ingot üretiminde karakterizasyon çalışmaları olarak XPS ve XRD analizleri yapılmıştır. Hammaddelerin elementel analizleri XPS analizleri ile

gerçekleştirilmiştir. Üretilen Si waferların ve faz analizleri ve kristalin yapının belirlenmesi çalışmaları ise XRD analizleri ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23 Thermo Scientific-Al K-Alpha XPS cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

X ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), bir maddenin kimyasal formülasyonu, empirik formülü, elektronik durumları hakkında bilgi veren ve elementel kompozisyonu ölçen yüzey duyarlı bir kantitatif spektroskopik tekniktir. XPS spektrumu, bir malzemeye X ışını demetiyle ışınlanırken aynı anda analiz edilen malzemenin 0-10 nm'lik üst kısmından kaçan elektronların atom numaralarının ve kinetik enerjilerinin analiz edilmesiyle elde edilmektedir. XPS cihazı ultra yüksek vakum ($P < 10^{-9}$ milibar) basınç aralığında şartlarda çalıştırılmaktadır. XPS analizi süresi tipik olarak tespit edilebilir tüm elementlerin miktarlarının geniş bir tarama yapılması durumunda 1-20 dk arasında değişmekte ve algılama limiti atmosferde 0,1-1,0 (ppm) mertebesindedir. Ölçüm alanı cihaz tasarımına bağlı ve minimum analiz alanı 10-200 μm arasındadır. XPS analizleri için Şekil 3.23'te gösterilen Thermo Scientific K-Alpha cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda 128 kanallı detektörlü 180° çift odaklanabilen yarı küresel analizör, X-ışını kaynağı olarak 5 μm adım aralığı ve 30-400 μm spot genişliğinde Al-K α mikro-odaklı monokromatör kullanmakta ve iyon tabancasının enerji aralığı 100-4000 eV arasındadır. Yapılan deneysel çalışmalarda XPS analizlerinde X-ışını tabancası olarak Al K α , toplam tarama sayısı 15, spot boyutu 400 μm , 150,0 eV geçiş enerjisi analiz modunda ve enerji adım boyutu 1,0 eV olarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

X-ışını kristalografisi (XRD), bir kristalin atomik ve moleköl yapısını belirlemek için kullanılan bir tekniktir ve kristalin atomlarda birçok belirli yönde için bir dizi X-ışını demeti yansıması oluşturmaya neden olur. Bu kırınmış demetin açılarının ve yoğunluklarının ölçülmesi ile kristal içindeki elektron yoğunluğunun üç boyutlu bir görüntüsü üretilebilir. Bu elektron yoğunluğundan, kristal içindeki atomların ortalama pozisyonlarının yanı sıra kimyasal bağları, bozuklukları ve çeşitli diğer bilgiler de belirlenebilir.



Şekil 3.24 Thermo Scientific-ARL K α XRD cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

Tek kristalli malzeme bir X ışını kırınım ölçümünde kristali seçilen yönlerde konumlandırmak için bir goniometre üzerine monte edilir. Yansımalar olarak bilinen düzenli aralıklı spotların kırınım desenini üreten kristal ince odaklanmış bir monokromatik ışın demeti ile aydınlatılır. Farklı yönlerde alınan iki boyutlu görüntüler, numune için bilinen kimyasal verilerle birleştirilip Fourier dönüşümlerinin matematiksel yöntemi kullanılarak kristal içindeki elektron yoğunluğunun üç boyutlu bir modeline dönüştürülür. Deneysel çalışmalarda XRD analizleri için Şekil 3.24’de gösterilen ve X-ışını kaynağı Cu-K α (1,5405 Å) Thermo Scientific ARL K-Alpha cihazı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda XRD analizleri 45 kV voltaj ve 44 mA akım değerlerinde Cu-K α (1,5405 Å) radyasyon kaynağı kullanılarak 5°-80° 2 θ derecesi aralığında ve 1,25°/dk tarama hızında gerçekleştirilmiştir.

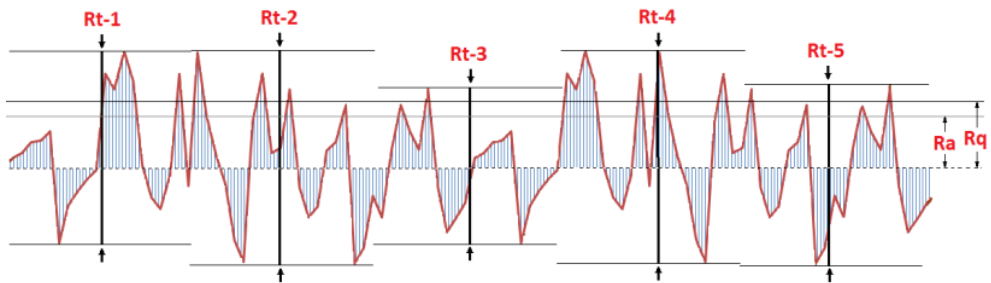
3.4.2 Kesme İşlemi Sonrası Wafer Karakterizasyonu

Si kütüklerin kesme işlemleri sonrası kesme yüzeylerinin topografik olarak incelenmesi işlemleri bir profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kesme yüzeylerinin görsel olarak incelenmesini kapsamaktadır.



Şekil 3.25 Mitutoyo SJ210 Profilometre cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

Kesilen Si waferların yüzey pürüzlülüğü ölçümü işlemleri Mitutoyo SJ210 profilometre cihazı (Şekil 3.25) ile gerçekleştirilmiştir. Profilometre cihazında ölçümlerde 2 μm tip açılı standart bir stylus ucu kullanılmış ve 0,75 mN ölçüm yüklerinde JIS-B0601-2001 standardına uygun olarak 2,5 mm ölçüm uzunluğunda yüzey pürüzlülük değerleri R_a , R_q ve R_z ölçmüştür.



Şekil 3.26 Yüzey pürüzlülükleri R_a , R_q ve R_z parametrelerinin şematik görünümü

Yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ210 profilometre cihazında otomatik olarak hesaplanmaktadır. Burada R_a parametresi ölçüm profili üzerindeki saptmaların aritmetik ortalamasının mutlak değeri olarak tanımlanmaktadır. R_a paramteresinin matematiksel ifadesi Eşitlik 3.1’de verilmiştir. R_q parametresi ölçüm profili üzerindeki profil saptmalarının kareleri toplamının aritmetik ortalamasının karekökünü ifade etmektedir (Eşitlik 3.2). Diğer önemli yüzey pürüzlülüğü parametresi R_z ise ölçüm profilini 5 eşit parçaya bölmekte ve bu bölünen her bir parçanın en yüksek tepesi ile en derin çukuru arasındaki mesafelerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.3). Yüzey pürüzlülükleri R_a , R_q ve R_z ’nin ölçümünün şematik görünümü Şekil 3.26’da verilmiştir. Burada s örnek uzunlukları miktarını, R_{ti} ise I. örnek uzunluğundaki R_t değerini göstermektedir (DeGarmo ve ark., 1997).

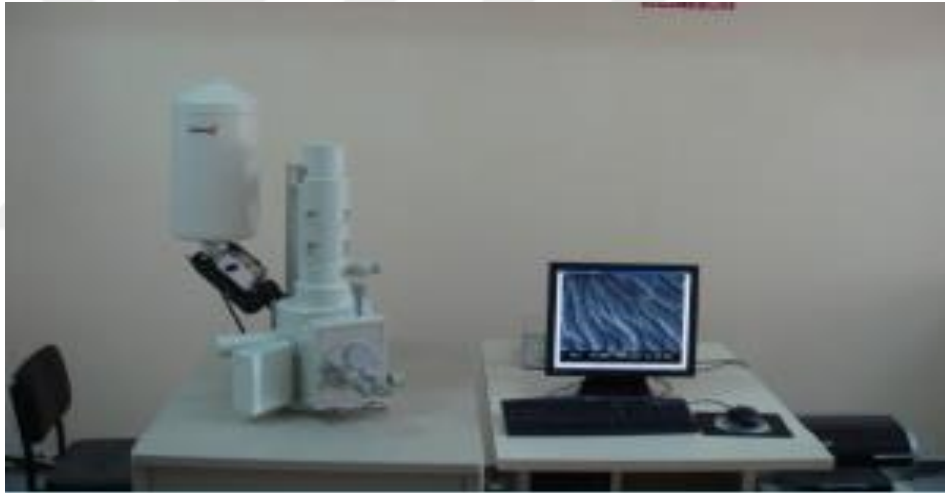
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (3.2)$$

$$R_z = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s R_{ti} \quad (3.3)$$

Taramalı elektron mikroskopları (Scanning Electron Microscope-SEM) optik kolon, görüntüleme sistemi ve numunelerin tutulduğu üç kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon bölgesinde elektron tabancasında üretilen elektron demeti anot plakasına uygulanan yüksek gerilim ile numuneye doğru hızlandırılmaktadır. Ayrıca kolon kısmında elektronu elektromanyetik alan ile bir noktada yoğunlaştırıp inceltten ve numune üzerinde odaklama-tarama işlemlerinin yapılmasını sağlayan çeşitli bobinler ve apatürler bulunmaktadır. SEM cihazında tüm kolon kısmı ve numune bölgesi yaklaşık 10^{-6} paskal basınçlarda tutulmaktadır. Görüntü oluşumu, elektron demeti ile numunenin etkileşimi sonucu oluşan çeşitli elektron ve ışımaların detektörlerde toplanması ve bunların sinyal çoğaltıcılar ile senkronize çalışan bilgisayar yazılımı tarafından işlenmesi sonucu elde edilmektedir. Elektron demetinin numune yüzeyindeki etkileşimi sonucu enerjileri azaltılarak yörüngelerinden atılan numune yüzeyine doğru hareket ederler. İkincil elektron (Seconder Electron-SE) olarak

isimlendirilen bu elektronlar numunen üstüne konumlandırılmış detektörde toplanarak elektron görüntüsü sinyalini oluştururlar. SE elektronlar numunenin 10 nm'den daha derinliklerinden geldiği için numunenin topografik görüntüsünü oluşturmaktadırlar. SEM analizinde numunelerin incelenmesi işleminde incelenecek numunelerin belirli bir direnç değerine ($10^{-10} \Omega$) sahip olması istenmektedir. Bu basınç değerine sahip olmayan (yalıtkanlar) katı malzemeler düşük hızlandırma voltajı kullanmadan yüksek çözünürlükte inceleme yapılması isteniyorsa altın (Au), karbon (C), altın/paladyum (Au/Pd) gibi yüksek iletkenliğe sahip malzemeler ile 10-30 nm kalınlığında kaplama yapılarak incelenmektedir. Bu çalışmada, iletken yüzey kaplaması yapılmamış Si waferlar 15 kV'luk bir hızlanma geriliminde çalışan JEOL JSM-6060 (Şekil 3.27) taramalı elektron mikroskobu SE detektörü ile birlikte kullanılmıştır.

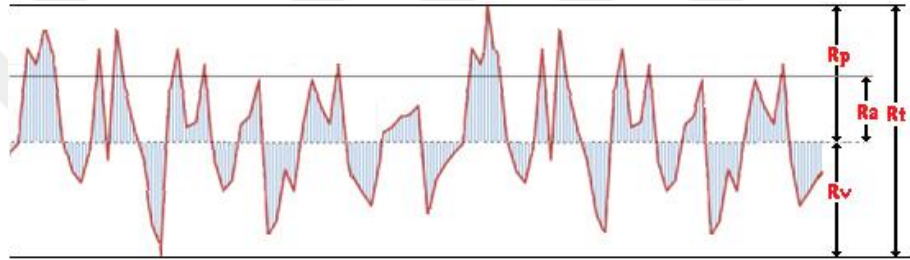


Şekil 3.27 JEOL JSM-6060 taramalı elektron mikroskobu (Kişisel arşiv, 2017)

3.4.3 Lepleme İşlemi Sonrası Wafer Karakterizasyonu

Si waferlar lepleme işlemi sonrasında topografik incelenmesi işlemleri bir profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi ve bir atomik kuvvet mikroskobu topografik olarak yüzeylerin incelenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Leplenen Si waferların yüzey pürüzlülüğü ölçümü işlemleri Mitutoyo SJ210 profilometre cihazı (Şekil 3.25) ile gerçekleştirilmiştir. Profilometre cihazında ölçümlerde 2 μm tip açılı standart bir stylus ucu kullanılmış ve 0,75 mN ölçüm

yüklerinde JIS-B0601-2001 standardına uygun olarak 2,5 mm ölçüm uzunluğunda yüzey pürüzlülük değerleri R_a ve R_t ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ210 profilometre cihazında otomatik olarak hesaplanmaktadır. Burada R_a parametresi ölçüm profili üzerindeki sapmaların aritmetik ortalamasının mutlak değeri olarak tanımlanabilir. R_t parametresi ise tarama hattı boyunca yüksek tepesi ile en derin çukuru arasındaki mesafedir. Yüzey pürüzlülükleri R_a ve R_t 'nin matematiksel ifadeleri Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.4'te verilmiştir. Yüzey pürüzlülükleri R_a ve R_t 'nin ölçümünün şematik görünümü Şekil 3.28'de verilmiştir. Burada R_p bütün yüzey profili üzerinde maksimum pik yüksekliğini ve R_v maksimum çukur derinliğini göstermektedir (DeGarmo ve ark., 1997).



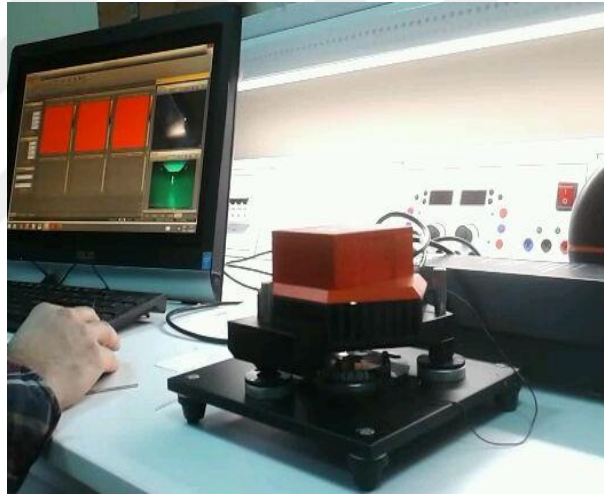
Şekil 3.28 Yüzey pürüzlülükleri R_a ve R_t parametrelerinin şematik görünümü

$$R_t = R_p + R_v \quad (3.4)$$

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) hassas hazırlanmış yüzeylerin üç boyutlu yüzey topoğrafyasını ve morfolojik kalitesini değerlendirmek için kullanılan güçlü bir araçtır. Lepleme prosesi deneysel setine göre hazırlanmış her bir Si waferin yüzey topoğrafyasının incelenmesi Şekil 3.29'da gösterilen Nanosurf Flex Axiom AFM cihazı ile 'Tapping Mode' tekniği ile gerçekleştirilmiştir. 'Tapping Mode' tekniğinde, AFM kafası probu yüzey boyunca tarama yaparken sabit frekansta titreşmektedir. Uzun salınım genliği, incelenen numunenin yüzeyine yaklaştıkça değişir. Bu değişim numune-uç mesafesini kontrol etmek ve numunenin yüzey yüksekliğini çıkarmak için geribildirim olarak kullanılır. Kullanılan AFM cihazı z ekseninde iyi kalibre edilmiş ve kalibrasyon numunesinde 180 nm derin çukurları görüntülemeye maksimum ± 2 nm hata bulunmuştur. AFM cihazının tarama aralığı 10 μm ve deneysel incelemelerde bu tarama aralığında çalışılmıştır.

3.4.4 Parlatma İşlemi Sonrası Wafer Karakterizasyonu

Si waferların parlatma işlemi sonrasında topografik incelemeleri Nanosurf Flex Axiom AFM cihazı (Şekil 3.29) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Si waferların reflektans ve absorbans ölçümleri Thermoscientific Evolution 600 UV-Vis (ultraviyole ve görünür ışık absorpsiyon) spektroskopi cihazıyla (Şekil 3.30) gerçekleştirilmiştir. Absorbans sonuçlarına göre enerji band aralığı (E_G) hesaplamaları yapılmıştır. UV-Vis spektrometre cihazları hem ultraviyole hem de görünür ışık bölgelerinde iki farklı ışık kaynağı kullanmaktadır. Bu analiz hem ultraviyole (200-400 nm) hem de görünür (400-800 nm) dalga boylarındaki ışık demetlerinin yüzeyinden yansıdıktan sonraki yoğunluğunun başlangıç halindeki ışık yoğunluğu ile kıyaslanmasıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.29 Nanosurf Flex Axiom AFM cihaz (Kişisel arşiv, 2017)

Parlatılmış Si waferların elektriksel karakterizasyon çalışmaları DEU-EMUM laboratuvarlarında, direnç ölçümü ve Hall Effect analizi ile gerçekleştirilmiştir. Direnç ölçümleri Keithley 26368 ölçüm aletiyle birlikte çalıştırılan 4 nokta prob sistemiyle ve Hall Effect analizleri Ecopia HMS 3000 Hall Effect ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Dört nokta probu yarı iletken numunelerin direncini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Bu cihazda sabit aralıklarda dört tane prob bulunmakta ve akım iki dış probtan geçirilirken voltaj ise iki iç prob arasında ölçülmektedir.

Thermoscientific Evolution 600 UV-Vis spektroskopi cihazı ışık kaynağı olarak 20 W halojen lamba ve döteryum lambası kullanmaktadır. Birleştirilmiş sapma düzeltici içbükey parlatılmış holografik ızgara monokromatöre ve silisyum foto diyot detektöre sahiptir. Spektrum bant genişliği 5 nm ve analiz dalga boyu 190-1100 nm aralığındadır. Ayrıca dalga boyunun kesinliği $\pm 1,0$ nm ve tekrarlanabilirliği: $\pm 0,3$ nm'dir. Deneysel çalışmalarda reflektans ölçümleri 300-900 nm ve absorbans ölçümleri 300-1100 nm dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.30 Thermoscientific Evolution 600 UV-Vis spektroskopi cihazı (Kişisel arşiv, 2017)

Cihazda okunan akım ve voltaj değerleri okunarak t kalınlığındaki (cm) waferin öz direnç değeri Eşitlik 3.5 ile hesaplanabilmektedir. Hall etkisinde yarıiletken bir malzemedeki elektronlar uygulanan herhangi bir manyetik alana dik yönde hareket ederken hareket yönü iç elektriksel kuvvetlerin ve manyetik kuvvet etkisine göre değişmektedir. İletken plakanın üzerinden I akımı geçtiğinde bu akım manyetik alan kuvvet çizgilerine dik şekilde hareket ediyorsa serbest yük taşıyıcıları Lorentz Kuvvetinin etkisiyle bir noktada toplanmaktadır. Yüklü parçacıkların hareketi manyetik alan ve elektrik alanında değişimi Eşitlik 3.6'da gösterilmektedir. Burada meydana gelen kuvvet F , elektrik alanı E , elektron yükü q_o , elektronun sürüklenme hızı v ve manyetik alan B olarak tanımlanmaktadır. Burada elektronların oluşturacağı elektrik alan manyetik alanı dengelemeye çalışmaktadır. Bu durum elektrik alandan oluşan F_m kuvveti ile F_e manyetik kuvveti eşit oluncaya kadar devam etmektedir. Denge durumunda F_e ile F_m birbirine eşit olduğundan Hall gerilimi Eşitlik 3.7'de

verilmiştir. Burada Akım I , yük taşıyıcıları yoğunluğu n ve iletken kalınlığı d olarak tanımlanmıştır.

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} t \frac{V}{I} \quad (3.5)$$

$$\vec{F} = q_0 \vec{E} + q_0 \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.6)$$

$$V_h = \frac{I B}{n q_0 d} \quad (3.7)$$

3.4.5 Güneş Hücresi Karakterizasyonu

Tekstürkenmiş Si yongaların reflaktans ölçümleri Şekil 3.30'de gösterilen Thermoscientific Evolution 600 UV-Vis spektroskopi cihazıyla gerçekleştirilmiştir. UV-Vis spektrometre cihazları hem ultraviyole hem de görünür ışık bölgelerinde iki farklı ışık kaynağı kullanmaktadır. Bu analiz hem ultraviyole (200-400 nm) hem de görünür (400-800 nm) dalga boylarındaki ışık demetlerinin yüzeyinden yansdıktan sonraki yoğunluğunun başlangıç halindeki ışık yoğunluğu ile kıyaslanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Deneysel çalışmalarda reflektans ölçümleri 300-900 nm dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir.

P-n kavşağı derinlik ölçümleri ikincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS) analizi ile gerçekleştirilmiştir. SIMS katı yüzeyler ve ince filmlerden odaklanmış birincil iyon demetiyle sıçratılan ve bu yüzeylerden yayılan ikincil iyonları analiz ederek malzemeler hakkında bilgi elde edilmesinde kullanılan bir tekniktir. Bu sistemde üretilen ikincil iyonlar kütle/yük oranları bir kütle spektroskopisi ile yüzeyden 1-5 µm derinliklerinden elementel, izotopik ve moleküler yüzey kompozisyonlarının ölçümünde kullanılmaktadır. SIMS farklı malzemelerin iyonlaşabilirliğine bağlı olarak standartların kullanımıyla miktar belirlemede kullanılsa da genellikle nitel bir teknik olarak kabul edilir. SIMS, en hassas yüzey analizi tekniği ve elementel tespit limitleri milyonda bir parça parça ile milyarda bir parça hassasiyetindedir.



Şekil 3.31 Atlas Suntest-SO güneş simülatörü sistemi (Kişisel arşiv, 2017)

Tekstürlenmiş ve p-n kavşağı oluşturulmuş Si yongaların yüzeylerine reflektans değerinin azaltılması için İTO kaplamaları yapılmış ve bu kaplamaların % reflektans-dalga boyu ölçümleri Thermoscientific Evolution 600 UV-Vis spektroskopi cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler tekstürlenmiş Si yongaların reflektans ölçümlerindeki test standartlarına göre uygulanmıştır. İTO kaplaması sonrası Si yongaların ön yüzeyine ekran yazıcı cihazıyla kaplanan gümüş akım toplayıcıların kalınlık ölçümleri Nikon LV150N optik mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda en son gerçekleştirilen ölçüm güneş hücresi performans ölçümleri olup, bu ölçümler Atlas Suntest-SO (Şekil 3.31) güneş simülatöründe gerçekleştirilmiştir. Bu cihazda açık devre I-V eğrisi oluşturma, verimi, doluluk faktörü ve iki-diyot ölçümleri yapabilmektedir. Tipik kalibre edilmiş aydınlatma 900-1900 W aralığındadır. Ayrıca ışık kaynağı olarak 60 W zenon lamba kullanılmaktadır. Atlas Suntest-SO sistemi bir eldivenli vakum odası (glove box) sistemi içine monte edilmiştir. Güneş hücresi ölçümlerinde Keitley 2400 SourceMeter SMU cihazı kullanılmıştır. Yapılan deneyisel çalışmalarda 1 güneş değeri kullanılmıştır.

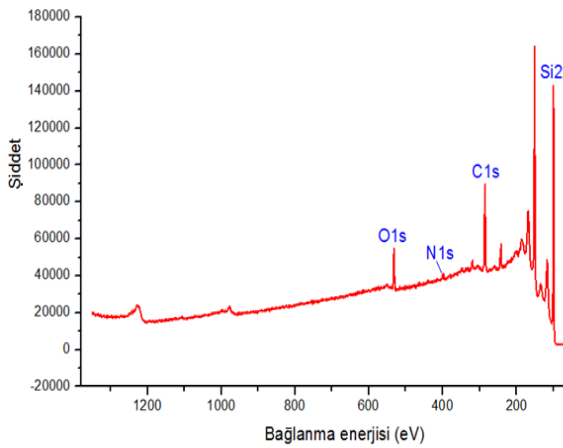
BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR

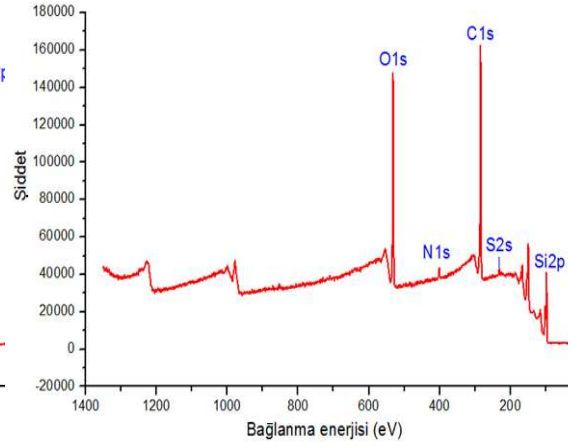
4.1 Üretim ve Karakterizasyon Sonuçları

4.1.1 Si İngot Büyütme

Si ingot üretiminde kullanılan hammaddeler SiP ve çok kristalin Si'nin XPS analizleri üretim öncesinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen n-tipi Si ingottan kesilen waferlara XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 4.1'de fosfor katkısı SiP'nin ve Şekil 4.2'de ise çok kristalin Si'nin XPS analizi sonucu verilmiştir.



Şekil 4.1 SiP hammaddesinin XPS sonucu



Şekil 4.2 Çok kristalin Si XPS analizi sonucu

Şekil 4.1 incelendiğinde, Si'nin 99,88 bağlanma enerjisi değerinde (Si-P bağı) ve ağırlıkça % 80,69 olduğunu göstermektedir. Diğer pikler yüzeye yapışık kirliliklerden kaynaklanmakta ve bu kirlilik pikleri elimine edildiğinde SiP hammaddesinin yüksek saflıkta olduğu görülmektedir. Şekil 4.2 incelendiğinde ise Si'nin 99,03 bağlanma enerjisi değerinde (Si-Si bağı) ve ağırlıkça % 38,30 olduğunu göstermektedir. Diğer pikler yüzeye yapışık kirliliklerden kaynaklanmakta ve bu kirlilik pikleri elimine edildiğinde Si hammaddesinin ultra yüksek saflıkta olduğu görülmektedir.

Si ingot üretimi çalışmalarında 4 adet n-tipi ve 1 adet katkısız tek kristalin Si ingot üretilmiştir. Üretilen ingotların görüntüleri Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.3a’da gösterilen Si ingot katkısız diğer dört Si ingot ise fosfor katkılı (n-tipi) olarak büyütülmüştür. Si ingotların ağırlık ve çap ölçümleri sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Üretilen tek kristalin Si ingotlar; a) katkısız Si ingot, b-e) n-tipi Si ingot (Kişisel arşiv, 2017)

Si ingot üretimi çalışmalarında Şekil 4.3d ve Şekil 4.3e’de gösterilen ingotlarda üretim sırasında kullanıcı kaynaklı üretim hataları oluşmuştur. Şekil 4.3d’deki ingotun vücut oluşumu sırasında çekme hızı ve pota dönme hızı uyumsuzluğundan dolayı dalgalanmalar oluşmuştur. Şekil 4.3e’de ise vücut istenilen uzunlukta büyütülememiş ve kuyruk oluşumu sırasında aşırı büyüme oluşmuştur. Bu üretimde eriyiğin yaklaşık vücut kısımlarının çapları ise elektronik kumpas kullanılarak ölçülmüştür. Cz sisteminde üretim aşamasındaki yüksek sıcaklık dolayısıyla fırın ekipmanları oksitlenmekte ve kuvars pota da deforme olmaktadır. Şekil 4.4’de deforme olmuş kuvars potanın taban görüntüsü ve oksitlenmiş eritme bölgesi elemanlarının görüntüleri verilmiştir.

Tablo 4.1 Büyütülen tek kristalin Si ingotların özellikleri

Si İngot Kodu	Dopant Tipi	Vücut Çapı	Vücut Uzunluğu	Toplam Ağırlık
A	katkısız	105 mm (± 1)	150 mm	4108 gr
B	Fosfor (n tipi)	105 mm(± 1)	150 mm	4230 gr
C	Fosfor (n tipi)	100 mm (± 1)	150 mm	4286 g
D	Fosfor (n tipi)	94-105 mm (± 1)	150 mm	3940 gr
E	Fosfor (n tipi)	100-115mm (± 1)	70 mm	2115 gr



Şekil 4.4 Si ingot üretimi sonrası sıcak bölge ekipmanlarının görüntüleri; a) Isıtıcı elektrot, b) Destek grafit potası, c) Koruyucu huni, d) Deforme olmuş kuvars pota (Kişisel arşiv, 2017)

Cz sisteminde Si ingot üretimi aşamasında yaklaşık 1600 °C sıcaklıklara çıkılmaktadır. Bu sıcaklığa maruz kalan grafit ekipmanları proses sırasında buharlaşan SiO sebebiyle oksitlenmektedir. Ayrıca bu sıcaklıklarda kuvars pota yumuşamakta ve deformasyona uğramaktadır. Şekil 4.4c’de gösterilen pota hunisi içinde eriyik olan potanın çok yükseltilmesi neticesinde Si eriyiğinin temas etmesi sonucunda hasara uğramıştır.

4.1.2 Si İngot Kesme

Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemek amacıyla Mitutoyo SJ210 (2 μm tip açısı) bir profilometre cihazı 2,5 mm ölçüm uzunluğuyla yüzey pürüzlülük değerleri R_a , R_q ve R_z 'i ölçmüştür. Yapılan bu ölçümlerden sonra değerler matematiksel olarak ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları ve deneysel parametreler ile birlikte Tablo 4.2'de verilmiştir.

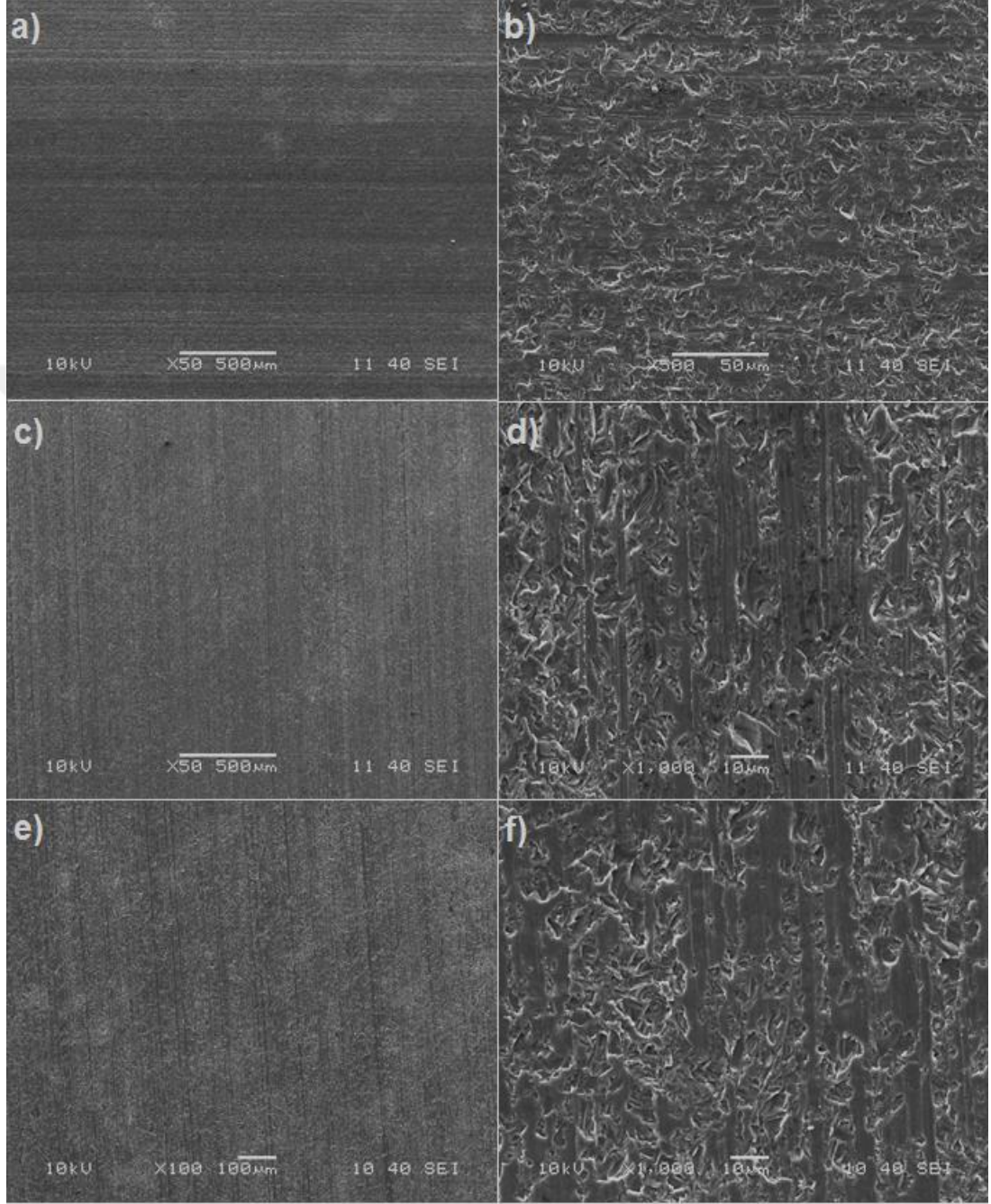
Tablo 4.2 Kesme parametreleri ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri

Deney Seti No	Kesme Parametreleri		Ölçülen Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri		
	Tel Besleme Hızı (m/s)	Kesme Hızı (mm/dk)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
1	2,5	0,5	3,26	4,08	16,04
2	2,5	0,75	2,03	2,46	10,55
3	2,5	1,0	2,07	2,73	10,78
4	3,0	0,5	1,14	1,39	6,62
5	3,0	0,75	1,43	1,79	8,19
6	3,0	1,0	2,21	2,79	11,02
7	3,5	0,5	1,15	1,41	6,70
8	3,5	0,75	1,49	1,87	8,79
9	3,5	1,0	2,17	2,69	11,78
10	4,0	0,5	1,08	1,32	6,30
11	4,0	0,75	1,78	2,15	9,48
12	4,0	1,0	2,30	3,01	10,79
13	4,5	0,5	1,25	1,52	7,21
14	4,5	0,75	1,83	2,21	10,30
15	4,5	1,0	2,90	3,56	12,99

Kesme parametrelerinin Si waferların yüzeylerinde oluşturduğu topografik değişimleri inceleme işlemleri JEOL JSM-6060 SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Deneysel parametrelerin Si wafer yüzeylerinde oluşturduğu kesme izlerinin kıyaslanması amacıyla 3,5 m/sn sabit tel besleme hızında kesme hızları 0,5 mm/dk ile 1 mm/dk arasında değişen numunelerin SEM-SE görüntüleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Besleme hızının etkisini incelemek amacıyla 0,75 mm/dk sabit kesme

hızında tel besleme hızı 2,5-4,5 m/sn arasında değişen numunelerin SEM-SE görüntüleri Şekil 4.6’da verilmiştir.

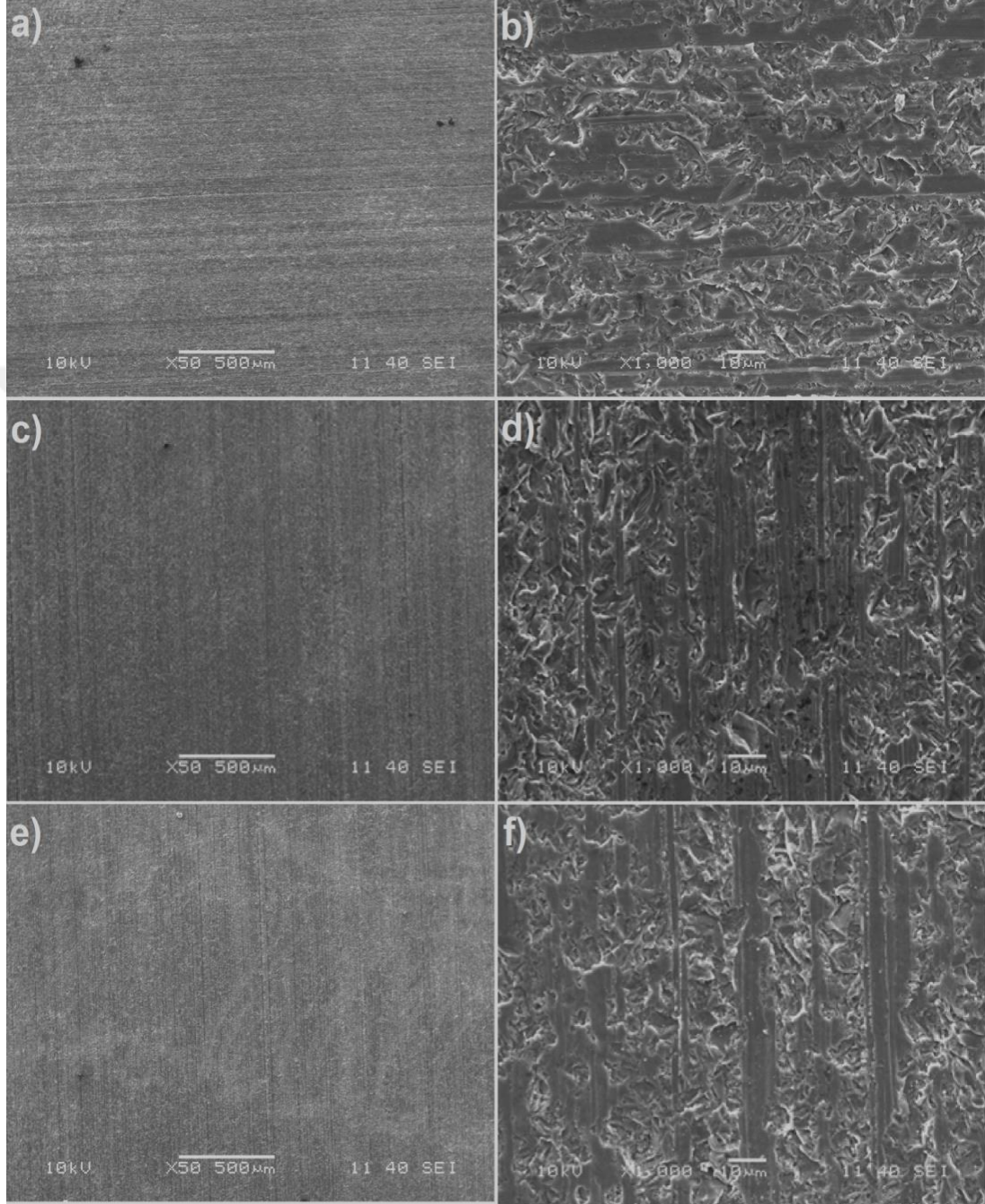


Şekil 4.5 3,5 m/s tel besleme hızında farklı kesme hızlarında üretilen Si waferların SEM-SE görüntüleri, a) 0,5 mm/dk (50x), b) 0,5 mm/dk (1000x), c) 0,75 mm/dk (50x), d) 0,75 mm/dk (1000x), e) 1 mm/dk (50x), f) 1 mm/dk (1000x)

Şekil 4.5’de sabit 3,5 m/s tel besleme hızında 0,5 mm/dk, 0,75 mm/dk ve 1 mm/dk kesme parametreleri ile kesilmiş Si waferların SEM-SE görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.5a ve 4.5b 0,5 mm/dk kesme hızında kesilmiş waferların, Şekil 4.5c ve Şekil 4.5d’de 0,75 mm/dk kesme hızlarında ve Şekil 4.5e ve Şekil 4.5f’de 1 mm/dk kesme hızlarında kesilmiş Si waferların sırasıyla 50x ve 1000x büyütmelemlerde SEM-SE görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.6’da sabit 0,75 m/s kesme hızında 2,5 m/s, 3,5 m/s ve 4,5 m/s kesme parametreleri ile kesilmiş waferların SEM-SE görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.6a ve Şekil 4.6b 2,5 m/s kesme hızında kesilmiş waferların, Şekil 4.6c ve Şekil 4.6d 3,5 mm/dk kesme hızlarında ve Şekil 4.6e ve Şekil 4.6f 4,5 m/s kesme hızlarında kesilmiş Si waferların sırasıyla 50x ve 1000x büyütmelemlerde SEM-SE görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde Si wafer yüzeylerinde bazı gevrek kırık alanlar, pek çok yivli çizik ve çok sayıda mikro çukur gözükmelemlerle. Tel testere kesme prosesinde, testere tamburu sınır noktasına geldiğinde tambur diğerk yönde dönünceye kadar tel besleme bir süre durmaktadır. Literatürde (Sunder ve ark., 2015) dalga biçimli kesme izleri ve/veya derin olukların kesme telinin ileri ve geri hareketinin aralık süresi içinde maksimum hıza ulaşamadığı süre içinde oluştuğu kaydedilmiştir. Bu bilgiler doğrulayacak biçimde Şekil 4.6a, Şekil 4.6c ve Şekil 4.6e incelendiğinde kesme hızının değişiminin Si yüzeyinde dalga şeklindeki yapının frakansını değiştirdiği görülmüştür. Kesme hızı arttıkça dalgaların genişliği azalmaktadır. Bununla birlikte, yüzeydeki derin yivli çiziklerin oluşumları küçük bekleme süresinde malzeme kesme ilerlemesinin devam etmesiyle arttığı düşünmelemlerle. STX 1202 tek telli kesme cihazında bu bekleme süreleri tel besleme hızına bağlı olarak değişmelemlerle düşük tel besleme hızlarında 2-3 saniyeye ulaşırken ve yüksek tel besleme hızlarında 1 saniyenin altına düşmelemlerle. Ayrıca Si yüzeylerinde görülen kopmuş bölgelerde kesme teli ile Si bünye arasında oluşan çekme kuvvetlerinden kaynaklandığı düşünmelemlerle.

Şekil 4.6’da tel besleme hızının artışının Si waferların yüzey kalitesi üzerindeki etkisini gösterilmiştir. Tel besleme hızının artması ile yüzeyde oluşan çukurların derinlikleri azalmıştır. Bu durumun nedeni olarak artan tel besleme hızlarında her bir elmas partikülü için Si yüzeyine sürtme süresi azalması ve malzeme giderme hızının

artması söylenebilir. Ancak tel besleme hızının 4,5 m/s çıkması yüzeyde oluşan yivlerin miktarını azaltmamıştır.



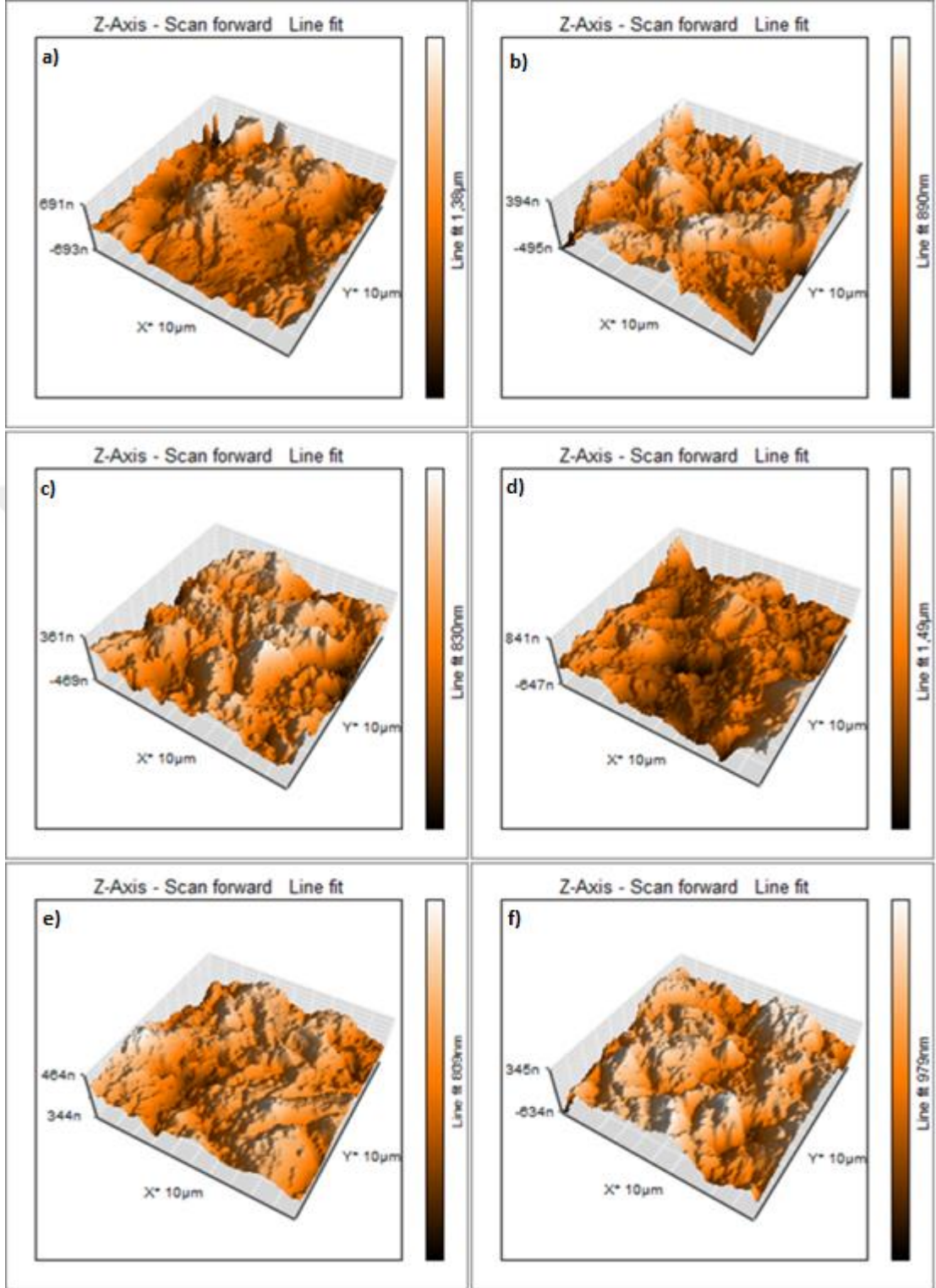
Şekil 4.6 0,75 mm/dk kesme hızında farklı tel besleme hızlarında üretilen Si waferların SEM-SE görüntüleri, a) 2,5 m/s (50x), b) 2,5 m/s, (1000x), c) 3,5 m/s (50x), d) 3,5 m/s (1000x), e) 4,5 m/s (50x), f) 4,5 m/s (1000x)

4.1.3 Si Wafer Lepleme

Lepleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemek amacıyla Mitutoyo SJ210 (2 μm tip açısı) bir profilometre cihazı 2,5 mm ölçüm uzunluğuyla yüzey pürüzlülük değerleri R_a ve R_t ölçmüştür. Yapılan bu ölçümlerden sonra değerler matematiksel olarak ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları ve deneysel setlerde kullanılan parametreler ile birlikte Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3 Lepleme parametreleri ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri

Deney Seti Numarası	Lepleme Parametreleri		Ölçülen Yüzey Pürüzlülükleri	
	Dönme Hızı (devir/dk)	Zaman (dk)	R_a (μm)	R_t (μm)
1	25	5	1,640	9,830
2	25	10	1,480	9,313
3	25	15	0,733	6,767
4	25	30	0,273	3,923
5	25	45	0,233	3,517
6	25	60	0,283	2,967
7	50	5	1,660	11,137
8	50	10	1,323	9,167
9	50	15	1,023	8,740
10	50	30	0,260	2,900
11	50	45	0,257	2,843
12	50	60	0,257	2,407
13	70	5	1,930	11,527
14	70	10	1,577	10,913
15	70	15	1,270	7,883
16	70	30	0,517	5,617
17	70	45	0,347	5,063
18	70	60	0,270	2,480



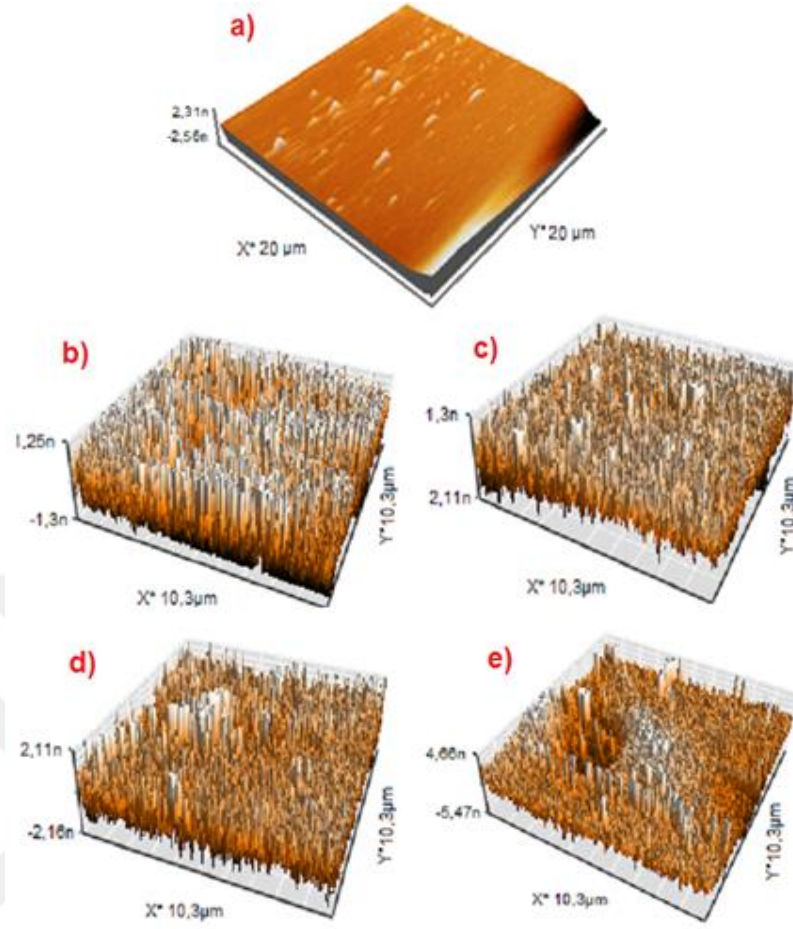
Şekil 4.7 Leplenmiş Si waferların AFM görüntüleri; a) 50 devir/dk-15 dk, b) 50 devir/dk-30 dk, c) 50 devir/dk-60 dk, d) 20 devir/dk-45 dk, e) 50 devir/dk-45 dk, f) 70 devir/dk-45 dk

Lepleme parametrelerinin Si waferların yüzeylerinde oluşturduğu topografik değişimleri inceleme işlemleri Nanosurf Flex Axiom AFM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel parametrelerin Si wafer yüzeylerinde oluşturduğu aşınma izlerinin kıyaslanması amacıyla Şekil 4.7’de farklı parametreler kullanılarak leplenen Si waferların AFM görüntüleri verilmiştir.

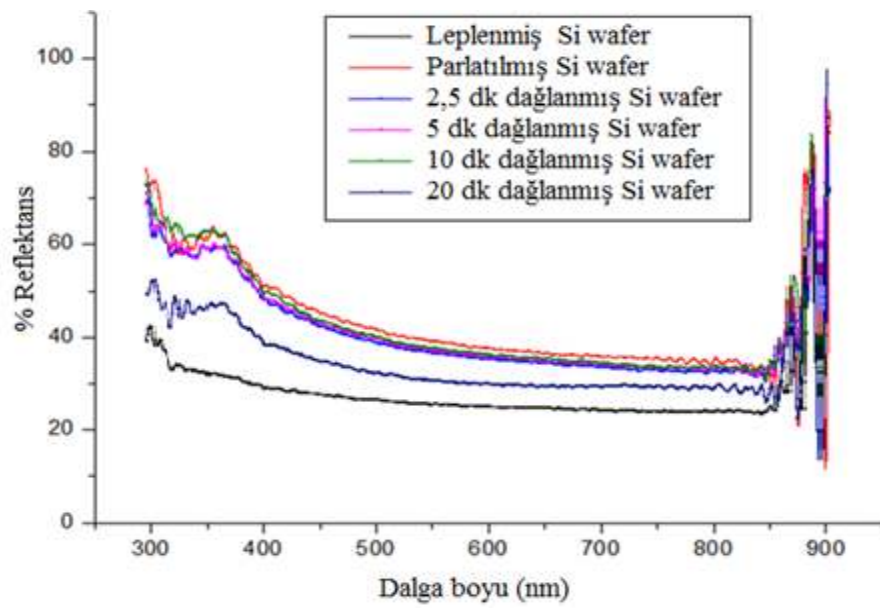
Şekil 4.7 incelendiğinde Si wafer yüzeylerinde bazı tepeciklerin, çukurların ve bir çok tam boy yivli çiziklerin olduğu görülmektedir. Lepleme süresinin yüzey topografya üzerindeki etkisi incelemek için Şekil 4.7a-c’de sabit dönme hızında lepleme süresinin 15 dk’dan 60 dk’ya yükseltilmiştir. 15 dk lepleme süresinde diğer süreler ile kıyaslandığında daha derin çukurların olduğu görülmüştür. Sürenin artması ile yüzeyde görülen tepeciklerin ve çukurların yükseklikleri azalmaktadır. Şekil 4.7d-f lepleme plakası dönüş hızının Si waferın yüzey topoğrafyası üzerindeki etkisini incelemek için sabit lepleme süresinde (45 dk) devir sayısının 25 devir/dk’dan 70 devir/dk’ya yükseltilmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde wafer yüzey pürüzlülüğünün lepleme plakası dönme hızının 25 devir/dk’dan 50 devir/dk’ya yükseltilmesi ile azaldığı görülmektedir. Ancak 50 devir/dk’dan 70 devir/dk’ya yükseltildiğinde aynı etkiyi göstermemiştir. Bu durum lepleme solüsyonunun santrifüj etkisinin dönme oranının artmasıyla ve lepleme plakasının yüzeyinden uzaklaşmasından kaynaklandığı şeklinde açıklanabilir. Ayrıca wafer yüzeyindeki tepeler ve çukurlar 45 dk-50 devir/dk parametre çifti ile elde edilen yüzeylerde daha homojen bir şekilde dağıldığı söylenebilir.

4.1.4 Si Wafer Parlatma

Parlatma işlemleri sonrasında Si waferların yüzeylerinin topografik inceleme işlemleri Nanosurf Flex Axiom AFM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8’de kimyasal temizlik işlemi yapılmamış ve farklı sürelerde HF çözeltisi içinde bekletilmiş Si waferların AFM görüntüleri verilmiştir. Parlatılmış Si waferlar ile leplenmiş bir Si waferın reflektans ölçümleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.8 Parlatılmış Si waferların AFM görüntüleri; a) Parlatılmış, b) 2.5dk HF çözeltisinde bekletilmiş, c) 5dk HF çözeltisinde bekletilmiş, d) 10 dk HF çözeltisinde bekletilmiş, e) 20 dk HF çözeltisinde bekletilmiş



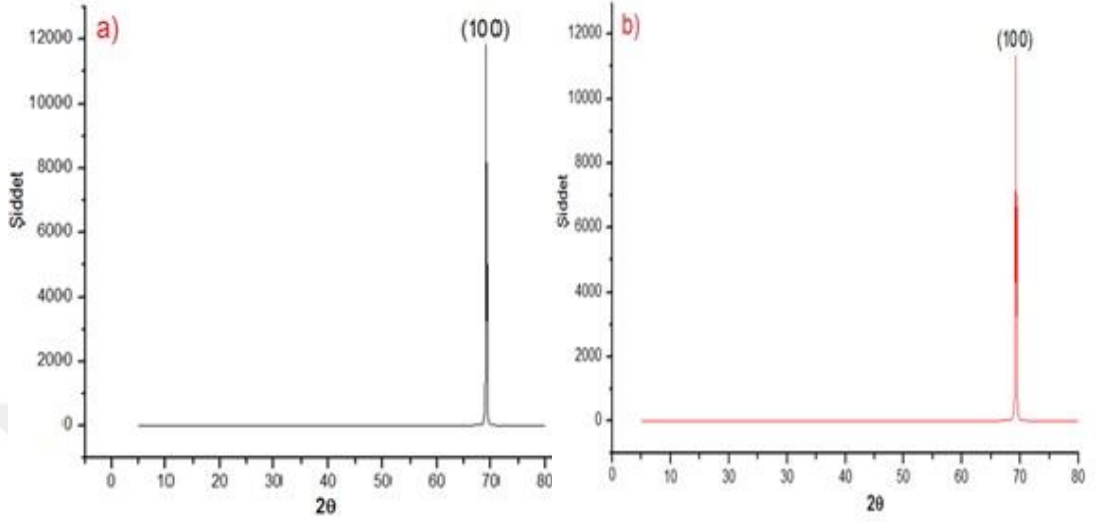
Şekil 4.9 Parlatılmış ve leplenmiş Si waferların reflektans ölçümü sonuçları

Şekil 4.8a incelendiğinde, Si wafer yüzeylerinde bazı tepeciklerin olduğu görülmektedir. Bu tepeciklerin yüzeye yapışıp kalan parlatma partikülleri olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.8b-e incelendiğinde kimyasal dağlama süresinin artması ile çukurlaşmaların arttığı yani pürüzlülüğün arttığı görülmüştür. AFM sonuçlarına göre Si waferların Ra yüzey pürüzlülük değerleri kimyasal temizlik yapılmamış Si wafer'ın 4,5 nm, 2,5 dk dağlanmış için 1,684 nm, 5 dk dağlanmış için 1,812 nm, 10 dk dağlanmış için 2,143 nm ve 20 dk dağlanmış için 3,4 nm'dir. Güneş panelleri için ideal yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip ve kirliliklerden arındırılmış yüzeylere 2,5 dk, 5 dk ve 10 dk HF ile dağlanmış numunelerde ulaşılmıştır. Şekil 4.9'da ise leplenmiş, kimyasal ile temizleme işlemi yapılmayan parlatılmış ve parlatıldıktan sonra HF ile yüzey temizliği yapılmış Si waferların % Reflektans-Dalga boyu grafikleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde parlatılmış, 2,5dk, 5 dk ve 10 dk % 2 HF ile temizlenmiş Si waferların davranışlarının birbirlerine çok benzediği görülmektedir. 20 dk'lık olan ise daha düşük reflektans değerleri elde edilmiştir. Ayrıca parlatma işlemi yapılmamış (leplenmiş) Si waferın reflektans değeri diğer bütün waferlardan daha düşüktür. 300-900 nm dalga boyu aralığında Si waferların ortalama % Reflektans değerleri sırasıyla leplenmiş için % 28,09, parlatılmış için % 55,15, % 2 HF ile 2,5 dk temizlenmiş için % 42,18, % 2 HF ile 5 dk temizlenmiş için % 41,28, % 2 HF ile 10 dk temizlenmiş için % 34,31 ve % 2 HF ile 20 dk temizlenmiş için % 28,09 olarak hesaplanmıştır.

Kimyasal temizleme işlemleri gerçekleştirilmiş Si yongaların elektriksel öz direnci 4, 85 Ωcm ve iletkenlik değeri 0,218 $1/\Omega$ olarak ölçülmüştür. Hall etkisi ölçümleri sonuçları ise bulk konsantrasyonu $8,68 \cdot 10^{16} 1/\text{cm}^3$, mobilite $2,287 \cdot 10^3$, öz direnç 5, 417 $\Omega \cdot \text{cm}$ ve ortalama Hall katsayısı $7,188 \cdot 10^4 \text{ cm}^3/\text{C}$ olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.10a'da üretilen n-tipi tek kristalin Si waferın ve Şekil 4.10b'de XRD analizi sonucu verilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde hem katkısız hem de n-tipi Si ingotların (100) yönünde büyütülmüş tek kristalin yapıda oldukları anlaşılmaktadır. Fosfor katkısı çok düşük seviyelerde yapılmış olduğundan XRD analizi ile anlaşılamamıştır. Si ingotların omuz kısımlarında 4 adet düzlem boğumu

görülmektedir. Ayrıca, bu dörtlü boğum yapısı Si ingotların (100) düzleminde büyütüldüğünü göstermektedir.



Şekil 4.10 Büyütülen tek kristalin Si ingotların XRD analizi sonuçları; a) katkısız, b) n-tipi

Si waferların E_G değerlerinin belirlenmesi için absorbands ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen % Absorbans-Dalga boyu grafikleri ile E_G hesaplamaları yapılmış ve HF ile temizleme işlemlerin enerji bandı mesafesinde belirgin bir değişime sebep olmadığı görülmüştür. Bütün numuneler için E_G değeri 1.124 eV olarak hesaplanmıştır.

4.1.5 Si Tabanlı Güneş Hücresi Üretimi

Si güneş hücresi üretimi çalışmaları sırasıyla Si yongaların tekstürlenmesi, n-p kavşak üretimi, yansıtma yüzey kaplama ve akım toplayıcıların kaplanması çalışmalarını içermektedir. Bu çalışmalarda güneş hücresi veriminin artırılması amacıyla parlatılmış ve yongalar ahalinde kesilmiş Si waferlarda reflektans değerlerinin azaltılması için anizotropik dağlama çalışmaları deneysel dizayn ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tekstürleme çalışmalarında deneysel parametrelerin ve sonuçların matematiksel olarak modellenmiştir ve % R'nin minimizasyonu için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bütün deneysel adımlardan sonra gerekli analiz ve karakterizasyon çalışmaları ve en son aşamada ise güneş hücresi karakterizasyonları yapılmıştır.

4.1.5.1 Si Yongaların Tekstürleşmesi

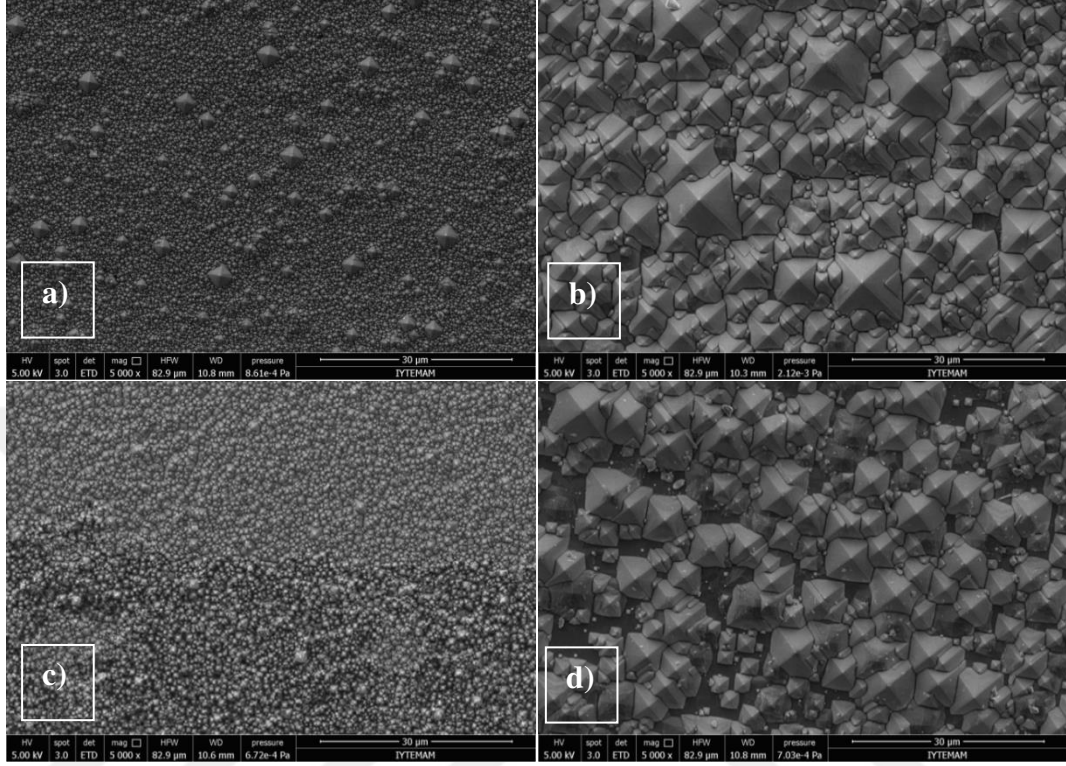
Si yongalar Box-Behnken Deneysel dizayn yöntemine göre Tablo 3.9'da belirlenen deneysel parametreler ile soksalet sistemi kullanılarak tekstürleşmiş ve Tablo 4.3'te deneysel dizayn parametreleri ve yüzde reflektans değerleri verilmiştir.

Tablo 4.3 Si yongaların tekstürleşme parametreleri ve reflektans sonuçları

Deney Seti	NaOH (% ağı.)	IPA (% hacim)	Zaman (dk)	Reflektans (% R)
1	3,5	2	60	21,602
2	1	2	40	18,965
3	6	8	40	22,745
4	6	2	40	17,526
5	3,5	5	40	17,162
6	3,5	5	40	17,247
7	1	5	60	19,172
8	6	5	60	17,773
9	3,5	5	40	17,904
10	3,5	8	20	19,476
11	3,5	8	60	23,269
12	3,5	2	20	19,316
13	6	5	20	18,248
14	1	5	20	20,99
15	1	8	40	28,807
16	3,5	5	40	17,346
17	3,5	5	40	17,533

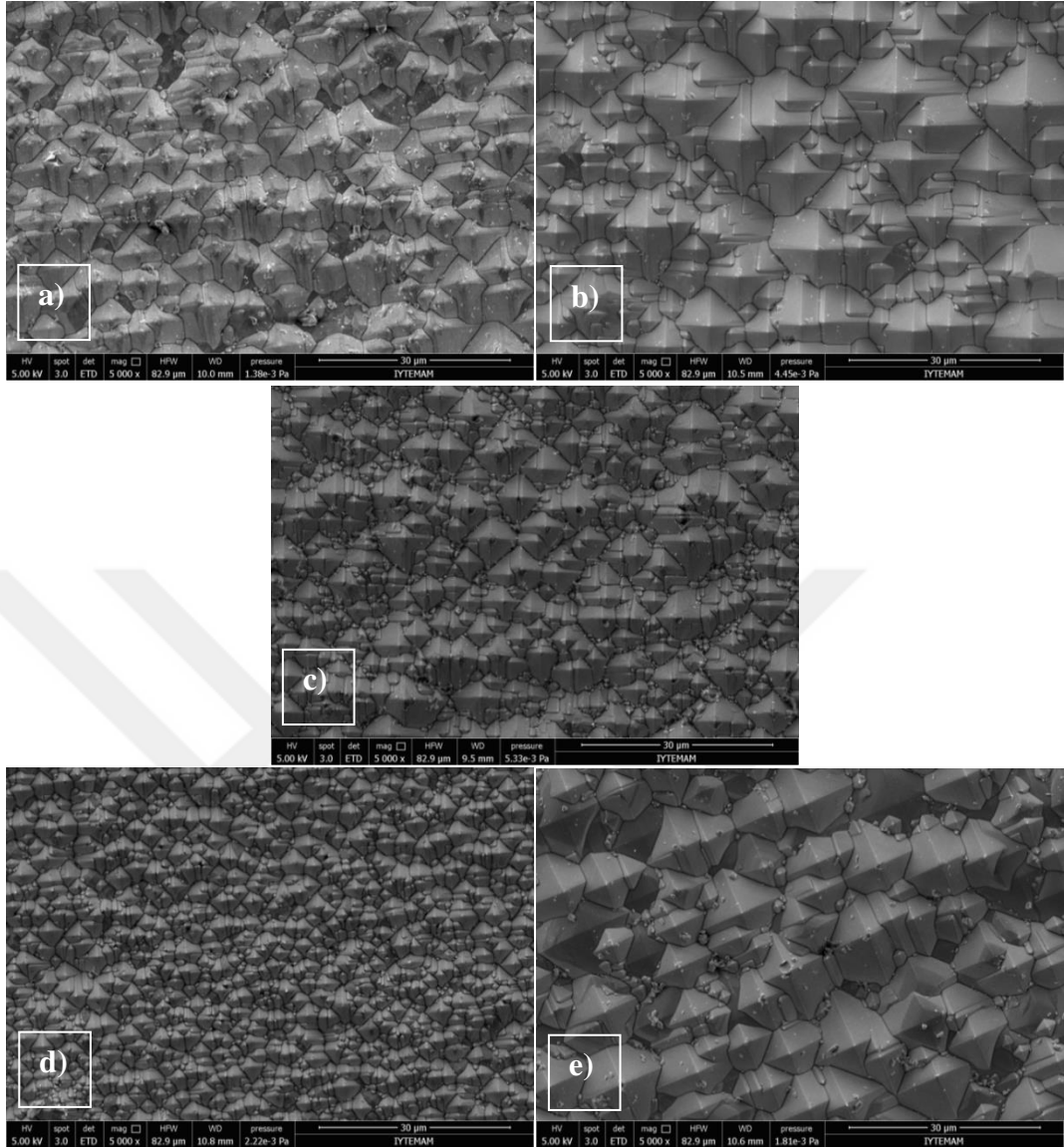
Tablo 4.3 incelendiğinde % 17,162, % 17,247, % 17,346, % 17,526, % 15,526, % 17,533, % 17,533 ve % 17,773 ve % 17,904 en düşük % R değerleri olarak görülmektedir. Bu değerler deneysel parametrelerin orta değerlerinin (NaOH (% ağı.) = 3,5, IPA % hacim = 5 ve zaman = 40 dk) kullanıldığı 5, 6, 9, 16 ve 17 nolu deneylerde elde edilmiştir. Ayrıca 4 nolu set (NaOH (% ağı.)= 6, IPA % hacim = 2 ve zaman = 40 dk) ve 8 nolu set ile (NaOH (% ağı.) = 6, IPA % hacim= 5 ve zaman=60 dk) elde edilmiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki NaOH (% ağı.) = 3,5, IPA % hacim

= 5 ve zaman = 40 dk değerleri en iyi reflektans sonuçlarını vermekte ve 4 ve 8 nolu deneylerde de düşük % R sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Ağ. % 1 NaOH ile tekstürlenmiş Si yongaların SEM görüntüleri; a) % 8 IPA-40 dk, b) % 5 IPA-60 dk, c) % 2 IPA-40 dk ve d) % 5 IPA-20 dk

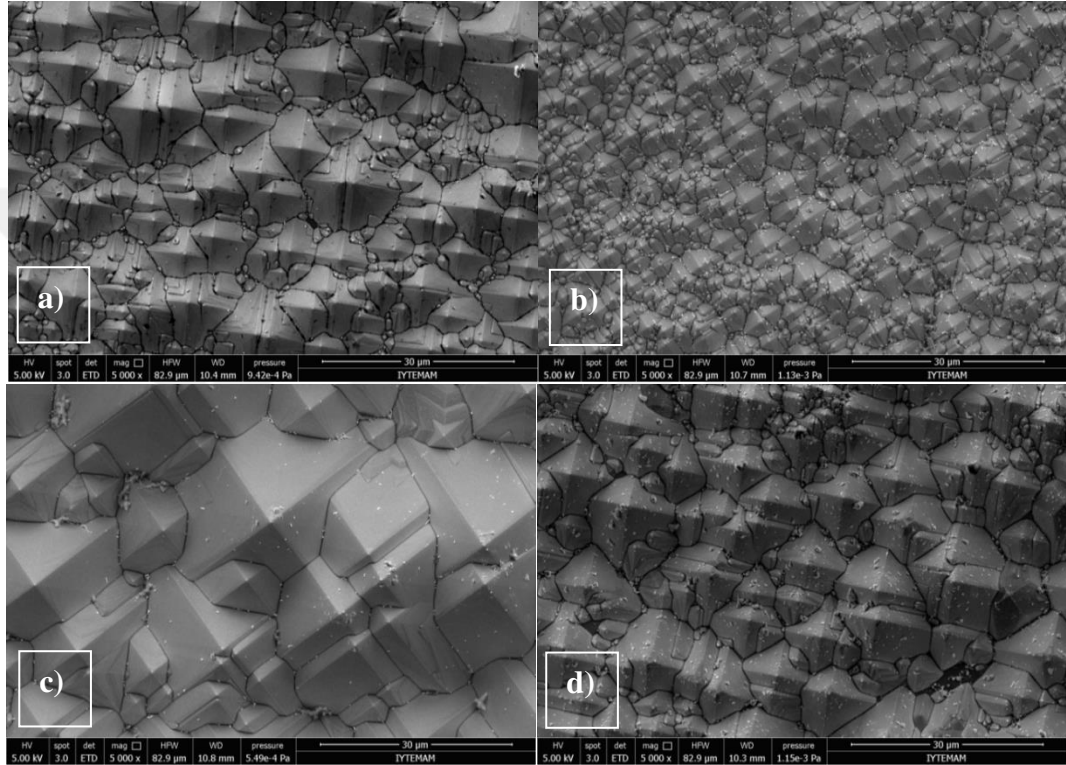
Şekil 4.11a’de 80 °C’de 20 dakika süreyle % 1 NaOH ve % 5 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 0,5-8 µm aralığında boy piramit boyutlarına sahip ve piramitlerle tamamen doldurulmuş olsada homojen tekstürlenmemiş bir yüzeye sahiptir. Şekil 4.11b incelendiğinde 80 °C’de 40 dk süreyle % 1 NaOH ve % 2 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 2-10 µm aralığında boy piramit boyutlarına sahip ve piramitlerle doldurulmuş ve bazı bölgelerinde tekstürlenmemiş düz bölgeleri olan bir yüzeye sahiptir. Şekil 4.11c’de 80° C’de 60 dk süreyle % 1 NaOH ve % 5 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 0,3-1 µm aralığında boy piramit boyutlarına sahip ve piramitlerle tamamen doldurulmuş bir yüzeye sahiptir. Şekil 4.11d’de ise 80°C’de 40 dk süreyle % 1 NaOH ve % 8 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 1-5 µm aralığında boy piramit boyutlarına sahip ve piramitlerle doldurulmuş bazı bölgelerinde tekstürlenmemiş düz bölgeleri olan bir yüzeye sahiptir.



Şekil 4.12 Ağ. % 3,5 NaOH ile tekstürlenmiş Si yongaların SEM görüntüleri; a) % 2 IPA-20 dk, b) % 2 IPA-60 dk, c) % 5 IPA-40 dk, d) % 8 IPA-20 dk ve e) % 8 IPA-60 dk

Şekil 4.12a incelendiğinde 80 °C'de 20 dk süreyle % 3,5 NaOH ve % 2 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 5-10 μm piramit boyutlarına sahip ve piramitlerle doldurulmuş ve bazı bölgelerinde düz bölgeleri olan bir yüzeye sahiptir. Şekil 4.12b'de 80 °C'de 60 dk süreyle % 3,5 NaOH ve % 2 IPA (DI H₂O içinde) ile tekstürlenmiş numunenin yüzeyi 5-20 μm boyutlarında küçük ve büyük piramit yapıları ile tamamen doldurulmuş ve bu numunede homojen yüzey tekstürlenmesi olmadığı görülmüştür. Şekil 4.12c'de 80 °C'de 40 dk süreyle % 3,5 NaOH ve % 5 IPA (DI H₂O içinde) ile tekstürlenmiş numune 2-10 μm boyutlarına piramitlerle

tamamen dolu bir yüzeye sahiptir. Şekil 4.12d'de 80 °C'de 20 dk süreyle % 3,5 NaOH ve % 8 IPA (DI H₂O içinde) ile tekstürlenmiş numune 3-6 µm boyutlarında piramit yapılarıyla tamamen dolu bir yüzeye sahiptir. Şekil 4.12e'de ise 80 °C'de 60 dk süreyle % 3,5 NaOH ve % 8 IPA (DI H₂O içinde) ile tekstürlenmiş numune 3-15 µm aralığında uzunlukta piramit yapılarıyla tamamen dolu bir yüzeye sahiptir. Ancak numunenin yüzeyinde bazı düz bölgeler olduğu da gözlemlenmiştir.



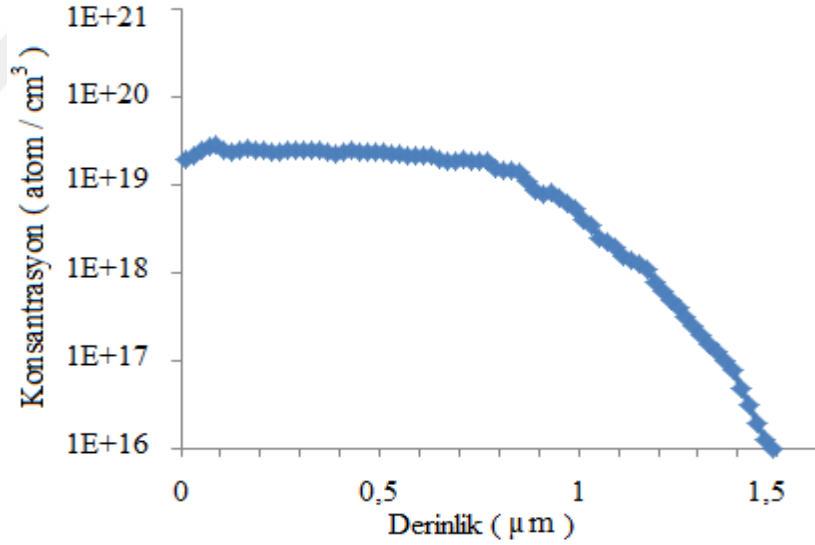
Şekil 4.13Ağ. % 6 NaOH ile tekstürlenmiş Si yongaların SEM görüntüleri; a) % 2 IPA-40 dk, b) % 5 IPA-20 dk, c) % 5 IPA-60 dk ve d) % 8 IPA-40 dk

Şekil 4.13a incelendiğinde 80 °C'de 40 dk süreyle % 6 NaOH ve % 2 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune yüzeyi 2-15 µm boyutlarında piramit yapıya sahip ve yüzey piramitlerle tamamen doldurulmuş homojen bir yüzeye sahiptir. Ancak tekstürleme işleminin bu numunede homojen olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.13b incelendiğinde 80 °C'de 40 dk süreyle % 6 NaOH ve % 5 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 2-10 µm boyutlarında piramitlere sahiptir. Şekil 4.13c incelendiğinde 80 °C'de 60 dk süreyle % 6 NaOH ve % 5 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 5-30 µm aralığında boy piramit boyutlarına sahiptir. Şekil

4.13d ise 80 °C'de 40 dk süreyle % 6 NaOH ve % 8 IPA (DI H₂O içinde) tekstürlenmiş numune 5-15 µm aralığında boy piramit boyutlarına sahiptir. Ayrıca Şekil 4.13'teki bütün numunelerin neredeyse boşluksuz olarak tekstürlendiği tespit edilmiştir.

4.1.5.2 P-n Kavşak Üretimi

Tekstürleme işlemleri ile % R değerlerinin en düşük olduğu (% 17,162-% 17,904 aralığında) % 3,5 NaOH + % 5 IPA + DI su içinde 40 dk tekstürlenmiş Si yongalar üzerine n-p kavşak üretimi DI su ile hazırlanan % 1 borik asit solüsyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde Si yongaların yüzeyinde oluşan bor silikat camı DI su ile hazırlanan HF çözeltisi ile yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Bu işlemin sonrasında bor elementinin Si yüzeyinden difüzyon miktarı SİMS analizi ile belirlenmiştir. SİMS analizi sonucu Şekil 4.14'de verilmiştir.

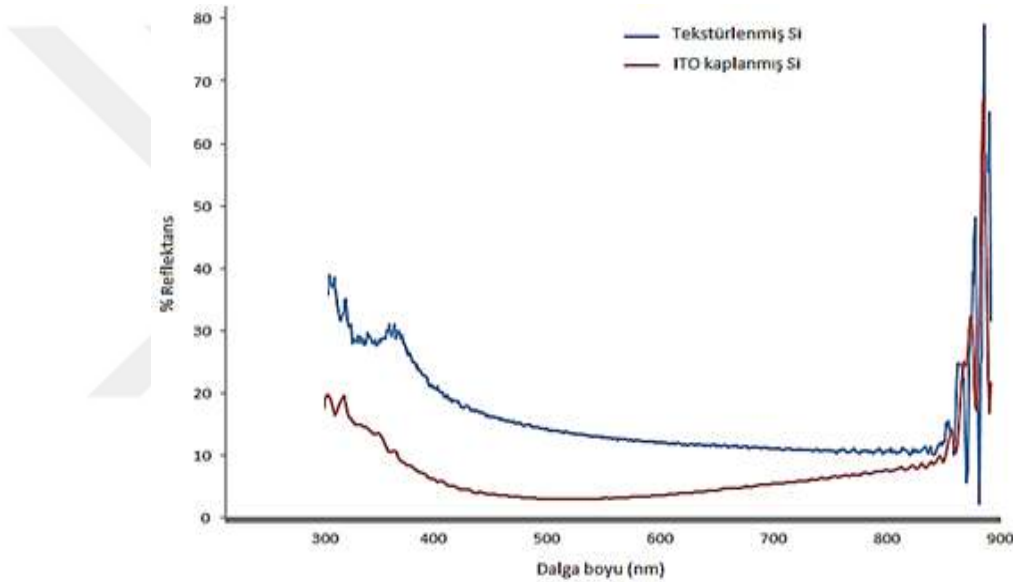


Şekil 4.14 925°C'de % 1 borik asit/DI su kaynağından bor difüzyon edilmiş Si yonganın SİMS analizi

4.1.5.3 Yansıtma Yüzey Kaplama

% 3,5 NaOH + % 5 IPA + DI su içinde 40 dk tekstürlenmiş Si yongalar yüzeylerinde p-n kavşağı oluşturulduktan sonra yüzeylerine yansıtma yüzey oluşturmak için İTO kaplaması yapılmıştır. Kaplama işlemi sonrasında hücrelerin

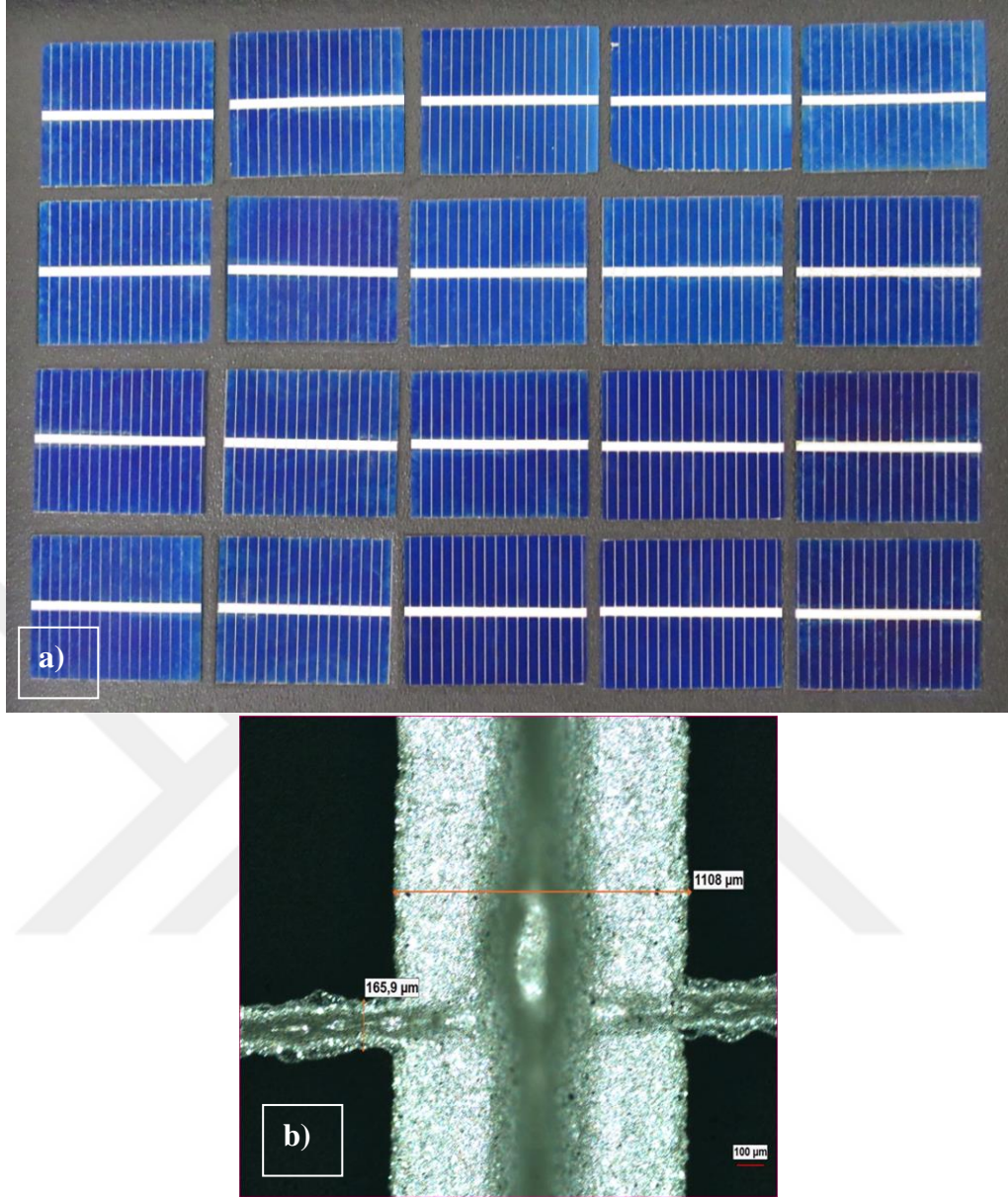
reflektans ölçümleri Thermoscientific Evolution 600 UV-Vis spektroskopi cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler sonrası elde edilen UV ölçümü grafiği Şekil 4.15’de İTO kaplaması yapılmamış tekstürlenmiş Si yonga ile birlikte gösterilmiştir. Tekstürlenmiş Si yonganın 300-900 nm dalga boyu aralığında ortalama % R değeri 17,12 iken İTO kaplanmış olanın ortalama değeri % 7,83 olarak hesaplanmıştır. Kaplama işlemleri Si yongalar ile birlikte cam altlıklara da uygulanmış ve Hall Etkisi ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda Taşıyıcı konsantrasyonu (n) $9,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, mobilite (μ) $28,6 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ ve özdirenç (ρ) $1,05 \text{ m}\Omega\text{cm}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.15 Tekstürlenmiş ve İTO kaplanmış Si yongaların reflektans ölçümü sonuçları

4.1.5.4 Akım Toplayıcıların Oluşturulması

Tekstürlenmiş ve n-p kavşağı oluşturulmuş Si yongaların ön yüzeylerine İTO kaplaması sonrasında akım toplayıcı metal gritlerin (tarak) ve arka yüzey metalizasyonu Dek Horizon 03IX Ekran Yazıcı cihazı ile gümüş pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerde metal tarak kalınlığı $165 \mu\text{m}$ ve bas barın kalınlığı $1100 \mu\text{m}$ 'dir. Üretilen 20 adet FV hücrenin görüntüsü Şekil 4.16a'da gösterilmiştir. Ayrıca ön yüzey metal gridlerinin ve bas barın optik mikroskop görüntüleri Şekil. 4.16b'da verilmiştir. Şekil. 4.16b incelendiğinde kaplamanın boşluksuz ve yoğun bir yapıda gerçekleştirildiği görülmektedir.



Şekil 4.16 Üretilen güneş hücreleri; a) 2,5 x 2,5 cm boyutlarında üretilmiş tek kavşaklı güneş hücrelerinin görüntüsü, b) FV üzerindeki akım toplayıcıların optik mikroskop görüntüleri (Kişisel arşiv, 2017)

4.1.5.5 Güneş Hücresi Ölçümleri

Deneyisel çalışmalarda 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarında üretilen güneş hücrelerinin I-V ölçümleri 1 güneş altında (1000 W/m^2) Atlas Suntest-SO güneş simülatöründe ölçülmüştür. Ölçüm işlemleri öncesinde güneş hücrelerinin pozitif ve negatif bölgelerinin elektriksel bağlantıları kalay tel ile yaklaşık $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılan havaya kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hücrelerin açık devre voltajı, maksimum güç ve

verim değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda üretilen hücrelerde en yüksek açık devre voltajı (V_{OC}) 494 mV, kısa devre akımı (I_{SC}) 13,95 mA, doluluk faktörü (FF) % 80,1 ve hücre verimi (η) ise 8,83 olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.4 Üretilen güneş hücrelerinin güneş simülatörü sonuçları

Hücre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{OC}(mV)$	493	484	493	491	486	493	491	488	492	493
$P_{mak}(mW)$	54,95	51,38	53,12	52,45	53,02	54,84	52,80	52,82	54,04	54,39
η (%)	8,79	8,22	8,49	8,39	8,48	8,77	8,44	8,45	8,64	8,70

Hücre	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_{OC}(mV)$	490	488	493	488	494	491	490	491	487	493
$P_{mak}(mW)$	52,98	52,21	53,19	54,24	55,19	53,25	51,94	51,98	52,54	53,67
η (%)	8,47	8,35	8,51	8,67	8,83	8,52	8,31	8,31	8,40	8,58

4.2 Deneysel Verilerin Modellenmesi ve Optimizasyonu

Yapılan tez çalışmasında matematiksel modelleme ve optimizasyon çalışmaları Si ingot kesme, wafer lepleme işlemlerinde ve Si yongaların tekstürlenmesi işlemlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda ilk olarak deneysel parametreler ve sonuçlar Tablo 2.6'ya göre Wolfram Matematica 10 programı kullanılarak ayarlama (fitting) işlemi ile regresyon modelleri oluşturulmuştur. Her üç deneysel çalışmada sonuçlar kullanılarak çoklu lineer ve çoklu lineer olmayan regresyon modelleri oluşturulmuştur ve ilgili deneysel sonuca göre tablolarda listelenmiştir. Ayrıca modellerin verimliliğini tespit etmek için her bir modelin R^2 değerleri hesaplanmıştır. Optimizasyon çalışmalarında Si ingot kesme ve wafer lepleme çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonu ve Si yongaların tekstürlenmesi çalışmaların ise yüzde reflektans (% R) değerinin minimizasyonu amacıyla her regresyon modeli fonksiyonu için Diferansiyel Gelişim (DE), Nelder-Mead (NM), Rastgele Arama (RS) ve Benzetimli Tavlama (SA) algoritmaları ile çalışılmıştır. Oluşturulan tablolarda optimizasyon algoritmalarının belirtmek amacıyla; D.E için “+”, N.M için “-”, R.S için “◇” ve S.A için “•” simgeleri kullanılmıştır.

4.2.1 Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Optimizasyon Çalışmaları

Si ingotların STX 1202 tek telli kesme cihazı ile kesilmesiyle üretilen Si waferların yüzey pürüzlülük değerlerine (R_a , R_q ve R_z) deneysel parametrelerin etkilerinin incelenmesi amacıyla ilk olarak regresyon analizi çalışmaları yapılmıştır. Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6 sırasıyla R_a , R_q ve R_z için oluşturulan regresyon modellerini, elde edilen R^2 değerlerini ve her bir regresyon modeli fonksiyonu için Diferansiyel Gelişim (DE), Nelder-Mead (NM), Rastgele Arama (RS) ve Benzetimli Tavlama (SA) algoritmaları ile yüzey pürüzlülüklerinin minimizasyonu için optimizasyon çalışmaları çalışmalarının sonuçlarını göstermektedir. Deneysel parametreler olan kesme hızı 'k' ve tel besleme miktarı 't' ile kısaltılarak modellerde kullanılmıştır.

Tablo 4.4'de wafer kesme işlemi sonucunda elde edilen R_a pürüzlülük değeri sonuçlarının Tablo 2.6'ya göre hazırlanmış regresyon modelleri ve R_a minimizasyonu için deneysel parametreler olan k ve t'nin her bir regresyon modeli için optimum değerleri verilmiştir. Tablo 4.4 incelendiğinde doğrusal regresyon modelinin çok düşük R^2 değeri (0,274) hesaplanmış ve optimum yüzey pürüzlülüğü optimizasyon algoritmaları ile 1,342 μm ile 1,584 μm arasında tahmin edilmiştir. Fakat doğrusal modelde parametrelerin doğrusal olmayan etkileri dikkate alınmadığı için doğrusal modelin optimum değerleri kullanılamamaktadır. Ayrıca DE optimizasyon metodu kullanılarak k ve t değerleri sırasıyla 0,5 mm/dk ve 4,5 m/s olarak seçildiğinde R_a 1,342 μm bulunmaktadır. SONR model en yüksek R^2 (0,989) değerine sahiptir. Bu modelde, DE optimizasyon yöntemi ile önerilen işlem parametreleri olarak k = 0,61 mm/dk ve t = 2,71 m/s için en düşük R_a değeri 0,105 μm olarak bulunmuştur. Doğrusal modelin R_a tahmini 1,342-1,584 μm arasında iken MLR modellerinin tahminleri 0,242-1,181 μm arasındadır. Tüm modellerin R^2 değerlerini göz önüne alındığında her rasyonel olmayan doğrusal veya doğrusal olmayan model yerine rasyonel modeller kullanıldığında R^2 değerlerinin arttığı görülmüştür. Rasyonelleştirme işlemi ile R^2 değerleri, doğrusal modeller için 0,274'den 0,724'e, ikinci dereceden sinüzoidal modeller için 0,802'den 0,989'a,

birinci dereceden trigonometrik model için 0,510'dan 0,958'e, ikinci dereceden trigonometrik model için 0,532'den 0,955'e, birinci dereceden logaritmik model için 0,271'den 0,791'e ve ikinci dereceden logaritmik model için 0,532'den 0,957'ye artmıştır. Dolayısıyla rasyonel modellerin en iyi yaklaşım olduğu SONR modelin R_a 'nın tahmininde en iyi model olduğu görülmüştür. Ayrıca bu gerçeğe bakılmaksızın ikinci derecedeki modellerin ve birinci dereceli durumlarından daha iyi çalışacağı öngörülmüştür. Bu sonuçlara ilave olarak R^2 'nin en yüksek değerine sahip SONR modeli R_a için en düşük optimizasyon tahmininin (0,105 μm) DE algoritması tarafından elde edildiği söylenebilirken SA ve NM'yi kullanarak da nispeten iyi sonuçlar elde edilmiştir. En kötü tahmin RS algoritması ile elde edilmiştir. Hemen hemen tüm vakalarda (SONTR hariç) DE'ye dayalı sonuçların diğerlerinden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Aslında yapılan optimizasyon çalışmalarında kabul edilebilir R_a değerlerinin elmas tel ile Si ingot kesilmesi işlemi için pratik mühendislik açısından 0,1 μm 'den büyük olduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada SOTNR modelini kullanılarak hesaplanan 0,105 μm ve 0,845 μm 'lik R_a değerleri de kabul edilebilir değerlerdir.

Tablo 4.5'da wafer kesme işlemi sonucunda elde edilen R_q yüzey pürüzlülük değeri sonuçlarının Tablo 3.1'e göre hazırlanmış regresyon modelleri ve R_q minimizasyonu için deneysel parametreler olan k ve t 'nin her bir regresyon modeli için optimum değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde R^2 'nin en yüksek değeri SONTR modelde elde edilmiş minimum R_q değerleri 0,109 μm DE, NM ve SA yöntemleri tarafından önerilen işlem parametreleri 0,59 mm/dk ve 2,61 m/s kullanılarak elde edilmiştir. Bu modellerin R_q tahminleri incelendiğinde, 0,665 μm SONTR modelde 0,56 mm/dk ve 4,44 m/s parametreleri kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca 0,95'den büyük R^2 değerleri için sırasıyla DE, NM ve RS algoritmaları ile nispeten düşük R_q değerleri (1,334 μm ve 1,348 μm) elde edilmiştir. Yüksek R^2 'ye sahip diğer modeller tarafından tahmin edilen düşük R_q değerleri, SONR modeli en yüksek R^2 değerine sahip olsa da kullanılabilir. SONR modelinin R_q örneğinde olduğu gibi bu fiziksel fenomenanın en iyi gösterimi olduğu söylenebilir.

Tablo 4.4 R_a için oluşturulan regresyon modelleri ve optimizasyon sonuçları

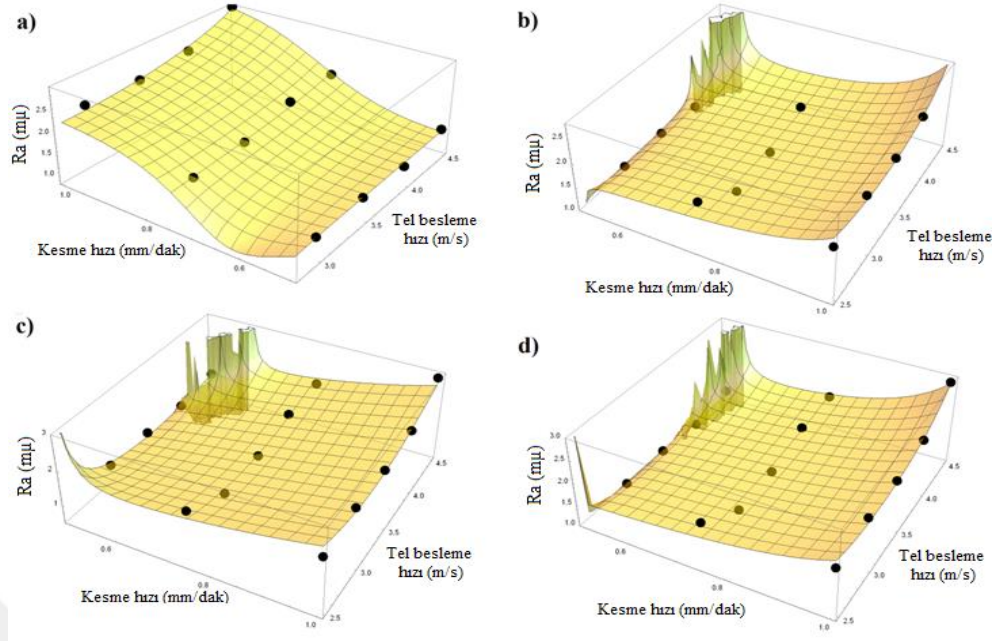
Regresyon Modelleri	R ²	k	t	R _a
$R_a = 1,509720 k - 0,1588133 t + 1,302563$	0,274	+0,50 -0,66 0,54 +0,50	+4,50 -4,50 0,450 +4,50	+1,342 -1,584 0,1,403 +1,342
$R_a = \frac{555,608 k + 10,36277 t - 304,519}{264,1582 k + 8,454667 t - 6,662233}$	0,724	+0,50 -0,50 0,50 +0,50	+2,59 -2,59 0,3,89 +2,59	+0,242 -0,242 0,1,181 +0,242
$R_a = 3,855520 k^2 + 0,6798286 t^2 - 12,41512 k - 6,662233 t + 2,32616 kt + 17,4048$	0,802	+0,50 -0,50 0,50 +0,50	+4,04 -4,04 0,3,89 +4,04	+1,040 -1,040 0,1,056 +1,040
$R_a = \frac{17,497 k^2 - 0,378 t^2 - 20,617 k + 3,777 t - 0,447 kt - 0,643}{8,358 k^2 - 0,34 t^2 - 7,245 k + 3,757 t - 1,27 kt - 4,161}$	0,989	+0,61 -0,55 0,60 +0,58	+2,71 -2,65 0,2,88 +2,69	+0,105 -0,137 0,0,845 +0,112
$R_a = 10,611 - 4,167 \sin k - 6,711 \cos k + 1,332 \cos t + 0,685 \sin t$	0,510	+0,56 -0,56 0,58 +0,56	+3,62 -3,62 0,3,72 +3,62	+1,213 -1,213 0,1,223 +1,213
$R_a = \frac{1,535 \cos k - 0,058 \cos t + 1,825 \sin k - 0,005 \sin t - 2,268}{1,173 \cos k - 0,048 \cos t + 1,268 \sin k - 0,003 \sin t - 1,674}$	0,958	+0,50 -0,50 0,54 +0,50	+2,55 -2,55 0,3,07 +3,92	+0,127 -0,127 0,1,439 +0,155
$R_a = 5,365 \sin k^2 + 3,866 \sin t^2 + 2,381 \cos k^2 + 2,305 \cos t^2 - 5,994 \sin k + 0,668 \sin t - 0,533 \cos t - 4,44 \cos k + 2,143$	0,532	+0,56 -0,56 0,64 +0,56	+3,40 -3,40 0,3,27 +3,40	+1,172 -1,172 0,1,221 +1,172
$R_a = \frac{(13,105 \cos k^2 + 9,133 \cos t^2 + 30,683 \sin k^2 - 8,445 \sin t^2 - 29,058 \cos k - 8,063 \cos t - 3,228 \sin k + 1,221 \sin t + 16,5765)}{(17,777 \cos k^2 - 10,434 \cos t^2 - 7,849 \sin k^2 - 15,19 \sin t^2 + 31,676 \cos k - 3,104 \cos t + 51,907 \sin k - 0,214 \sin t - 26,622)}$	0,955	+0,50 -0,50 0,50 +0,52	+3,95 -3,62 0,3,89 +4,04	+0,949 -1,046 0,1,083 +0,049
$R_a = 1,039 \ln k - 0,66 \ln t + 3,032$	0,271	+0,50 -0,50 0,54 +0,50	+4,50 -4,50 0,4,50 +4,50	+1,318 -1,318 0,1,398 +1,318
$R_a = \frac{0,021 \ln k + 0,001 \ln t + 0,013}{0,01 \ln k + 0,001 \ln t + 0,005}$	0,722	+0,50 -0,50 0,50 +0,50	+2,57 -2,57 0,3,89 +2,59	+0,127 -0,127 0,1,180 +0,306
$R_a = 2,615 \ln k^2 + 7,91 \ln t^2 + 14,174 \ln k - 8,515 \ln t - 11,272 \ln kt + 14,367$	0,532	+0,57 -0,57 0,58 +0,57	+3,49 -3,50 0,3,72 +3,49	+1,187 -1,187 0,1,219 +1,187
$R_a = \frac{-0,088 \ln k^2 - 0,05 \ln t^2 + 22,891 \ln k + 23,03 \ln t - 22,915 \ln kt - 0,036}{-0,07 \ln k^2 - 0,043 \ln t^2 - 6,675 \ln k - 6,544 \ln t + 6,642 \ln kt - 0,042}$	0,957	+0,52 -0,50 0,50 +0,52	+4,36 -3,12 0,3,89 +4,36	+0,018 -1,170 0,1,103 +0,018

Tablo 4.5 R_q için oluşturulan regresyon modelleri ve optimizasyon sonuçları

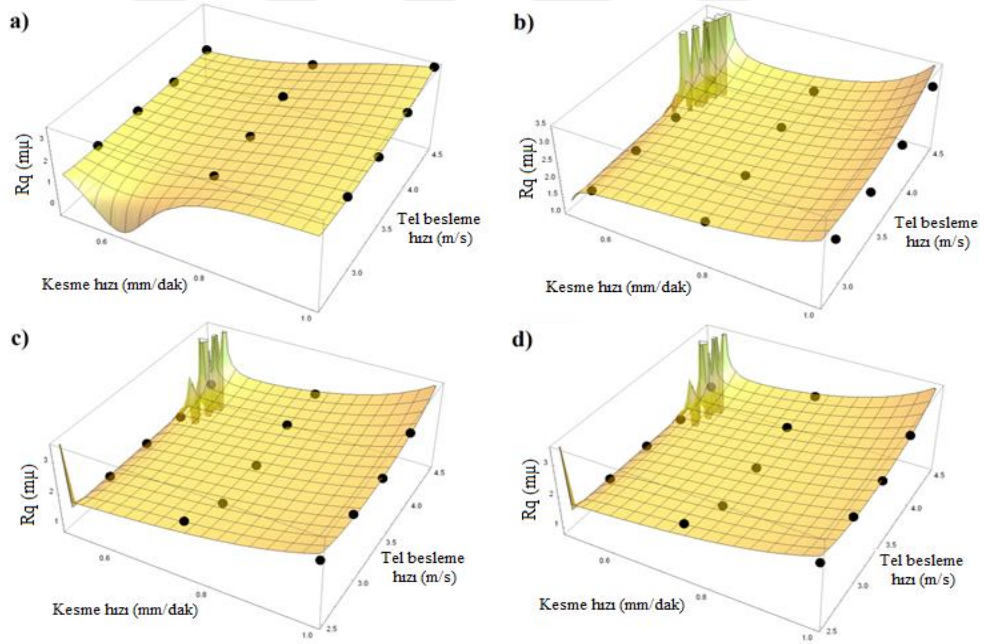
Regresyon Modelleri	R^2	k	t	R_q
$R_q = 2,028 k - 0,23 t + 1,622$	0,312	+0,50 -0,50 0,54 -0,50	+4,50 -3,64 0,450 -4,50	+1,559 -1,797 0,1680 -1,599
$R_q = \frac{961,593 k + 26,895 t - 550,561}{359,207 k + 17,75 t - 224,598}$	0,728	+0,50 -0,50 0,50 -0,50	+2,60 -2,60 0,389 -2,61	+0,141 -0,141 0,1449 -0,324
$R_q = 5,715 k^2 + 0,831 t^2 - 16,41 k - 8,167 t + 2,818 kt + 21,772$	0,809	+0,50 -0,50 0,50 -0,50	+4,06 -4,06 0,389 -4,06	+1,270 -1,270 0,1295 -1,270
$R_q = \frac{1746,436 k^2 - 34,333 t^2 - 2130,074 k + 355,817 t - 4,713 kt - 1,622}{620,318 k^2 - 29,439 t^2 - 478,867 k + 339,076 t - 111,249 kt - 1,622}$	0,994	+0,59 -0,59 0,60 -0,59	+2,61 -2,61 0,288 -2,61	+0,109 -0,109 0,1220 -0,109
$R_q = 14,987 - 6,332 \sin k - 9,804 \cos k + 1,617 \cos t + 0,876 \sin t$	0,543	+0,69 -0,69 0,69 -0,69	+3,64 -4,50 0,365 -3,65	+1,487 -2,128 0,1487 -1,487
$R_q = \frac{14,772 \cos k - 0,619 \cos t + 18,563 \sin k - 0,072 \sin t - 22,333}{10,131 \cos k - 0,418 \cos t + 11,086 \sin k - 0,043 \sin t - 14,52}$	0,970	+0,50 -0,50 0,50 -0,50	+2,55 -2,55 0,389 -2,55	+0,428 -0,428 0,1496 -0,428
$R_q = 7,57 \sin k^2 + 5,469 \sin t^2 + 3,35 \cos k^2 + 3,236 \cos t^2 - 8,916 \sin k + 0,852 \sin t - 1,052 \cos t - 6,594 \cos k + 3,02$	0,571	+0,58 -0,58 0,64 -0,58	+3,40 -3,40 0,327 -3,37	+1,418 -1,418 0,1470 -1,419
$R_q = \frac{(-7,116 \cos k^2 + 5,684 \cos t^2 + 16,245 \sin k^2 + 3,444 \sin t^2 - 13,99 \cos k - 2,348 \cos t + 0,243 \sin k + 0,18 \sin t + 8,128)}{(-8,646 \cos k^2 - 5,769 \cos t^2 - 5,759 \sin k^2 - 8,633 \sin t^2 + 18,925 - 0,512 \cos t + 28,416 \sin k - 0,324 \sin t - 15,403)}$	0,973	+0,50 -0,50 0,50 -0,56	+3,65 -3,65 0,389 -4,44	+1,334 -1,334 0,1348 -0,665
$R_q = 1,391 \ln k - 0,932 \ln t + 3,94$	0,306	+0,50 -0,50 0,54 -0,50	+4,50 -4,50 0,450 -4,50	+1,573 -1,573 0,1680 -1,573
$R_q = \frac{0,007 \ln k + 0,0009 \ln t + 0,004}{0,002 \ln k + 0,0006 \ln t + 0,001}$	0,725	+0,50 -0,50 0,50 -0,50	+2,59 -2,59 0,389 -2,61	+0,043 -0,043 0,1448 -0,365
$R_q = 3,801 \ln k^2 + 9,681 \ln t^2 + 17,927 \ln k - 10,511 \ln t - 13,829 \ln kt + 17,839$	0,567	+0,58 -0,58 0,58 -0,58	+3,52 -3,52 0,372 -3,53	+1,435 -1,435 0,1466 -1,435
$R_q = \frac{-1,401 \ln k^2 - 1,214 \ln t^2 + 19,722 \ln k + 22,59 \ln t - 19,809 \ln kt - 0,919}{-1,087 \ln k^2 - 0,84 \ln t^2 - 2,425 \ln k - 0,042 \ln t + 1,973 \ln kt - 0,854}$	0,970	+0,50 -0,50 0,50 -0,50	+3,16 -3,16 0,389 -3,16	+0,939 -0,939 0,0944 -0,939

Tablo 4.6 R_z için oluşturulan regresyon modelleri ve optimizasyon sonuçları

Regresyon Modelleri	R^2	k	t	R_z
$R_z = 5,792 k - 0,86 t + 8,535$	0,267	+0,50 0,50 0,54 0,50	+4,50 4,50 4,50 4,50	+7,525 7,525 7,756 7,525
$R_z = \frac{611,651 k + 9,481 t - 330,065}{57,049 k + 1,363 t - 31,965}$	0,823	+0,50 0,50 0,50 0,50	+2,56 2,56 3,89 2,56	+0,652 0,652 6,792 0,652
$R_z = 8,968 k^2 + 2,743 t^2 - 38,689 k - 26,724 t + 8,865 kt + 68,718$	0,722	+0,50 0,50 0,50 0,50	+4,06 4,06 3,89 4,06	+6,341 6,341 6,422 6,341
$R_z = \frac{6958,94 k^2 - 43,441 t^2 - 9237 k + 409,64 t + 197,73 kt + 1904,31}{632,019 k^2 - 9,982 t^2 - 733,12 k + 111,64 t - 23,113 kt + 22,305}$	0,982	+0,65 0,57 0,60 0,71	+2,78 2,73 2,88 2,63	+0,186 0,581 3,251 0,084
$R_z = 32,092 - 8,007 \sin k - 17,183 \cos k + 5,269 \cos t + 3,005 \sin t$	0,469	+0,50 0,50 0,50 0,50	+3,66 3,66 3,89 3,66	+7,108 7,108 7,268 7,108
$R_z = \frac{233,77 - 477,039 \cos k - 88,1 \cos t + 259,216 \sin k - 17,411 \sin t}{-51,883 + 10,748 \cos k - 12,854 \cos t + 70,276 \sin k - 2,618 \sin t}$	0,962	+0,54 0,50 0,54 0,50	+4,42 2,51 4,50 4,16	+0,158 3,251 5,163 2,111
$R_z = 15,993 \sin k^2 + 11,916 \sin t^2 + 6,919 \cos k^2 + 6,513 \cos t^2 - 13,563 \sin k + 2,946 \sin t - 1,19 \cos t - 10,28 \cos k + 6,331$	0,485	+0,50 0,50 0,58 0,50	+3,46 3,46 3,72 3,46	+7,062 7,062 7,457 7,062
$R_z = \frac{(-14,561 \cos k^2 + 4,566 \cos t^2 + 19,39 \sin k^2 + 0,174 \sin t^2 - 9,387 \cos k - 2,046 \cos t + 15,27 \sin k - 0,262 \sin t + 3,853)}{(-2,347 \cos k^2 - 0,927 \cos t^2 - 0,368 \sin k^2 - 1,76 \sin t^2 + 3,966 \cos k - 0,124 \cos t + 7,066 \sin k - 0,087 \sin t - 3,755)}$	0,961	+0,50 0,50 0,54 0,55	+3,96 3,96 4,50 4,41	+2,328 2,328 5,589 0,570
$R_z = 4,047 \ln k - 3,437 \ln t + 15,398$	0,276	+0,50 0,50 0,54 0,50	+4,50 4,50 4,50 4,50	+7,422 7,422 7,733 7,422
$R_z = \frac{6,896 \ln k + 0,493 \ln t + 4,317}{0,644 \ln k + 0,07 \ln t + 0,381}$	0,822	+0,50 0,50 0,50 0,50	+2,56 2,56 3,89 2,56	+0,884 0,884 6,789 0,884
$R_z = 6,915 \ln k^2 + 31,567 \ln t^2 + 54,6 \ln k - 34,135 \ln t - 45,629 \ln kt + 60,47$	0,493	+0,52 0,53 0,58 0,52	+3,54 3,55 3,72 3,54	+7,172 7,174 7,327 7,172
$R_z = \frac{-2,929 \ln k^2 - 12,19 \ln t^2 + 2,84 \ln k + 5,019 \ln t + 20,978 \ln kt + 0,39}{-1,69 \ln k^2 - 1,828 \ln t^2 - 1,079 \ln k + 2,174 \ln t + 1,72 \ln kt - 0,77}$	0,951	+0,55 0,50 0,54 0,54	+4,50 3,37 4,50 4,34	+0,678 5,947 4,191 0,233



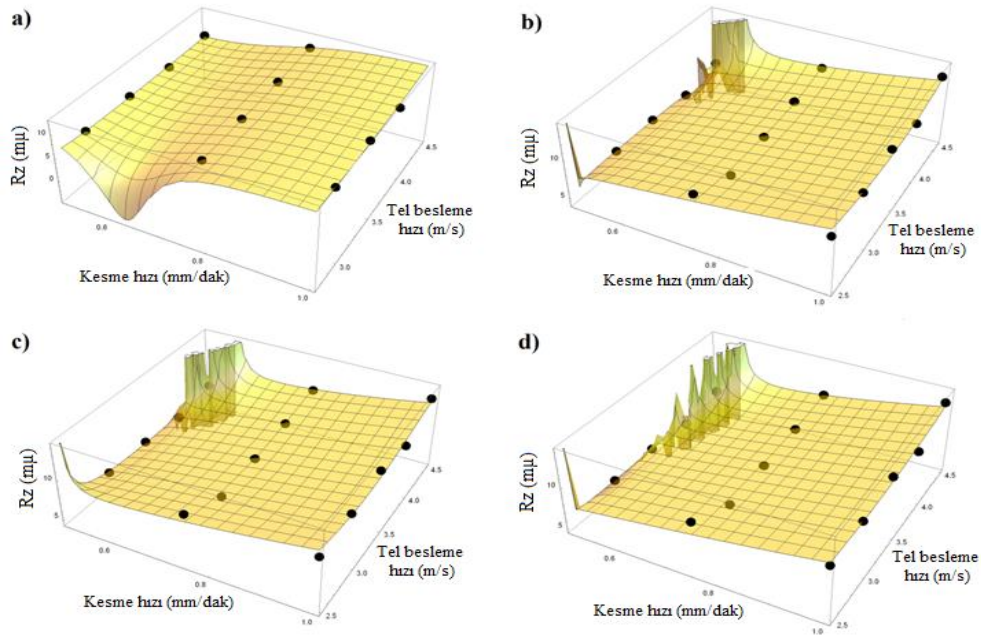
Şekil 4.18 R_a sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SONR, b) FOTNR, c) SOTNR, d) SOLNR (● deneysel sonuçları göstermektedir)



Şekil 4.19 R_q sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SONR, b) FOTNR, c) SOTNR, d) SOLNR (● deneysel sonuçları göstermektedir)

Tablo 4.6’da wafer kesme işlemi sonucunda elde edilen R_z pürüzlülük değeri sonuçlarının Tablo 2.6’ya göre hazırlanmış regresyon modelleri ve R_z minimizasyonu için deneysel parametreler olan k ve t ’nin her bir regresyon modeli

için optimum değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde genel olarak rasyonel modellerin R_z için daha iyi sonuçlar verdiği ve R^2 değerinde en iyi sonuç özellikle SONR modeline dayalı olarak elde edildiği görülmektedir. SONR modeli için SA'ya dayalı optimizasyon işleminde elde edilen en düşük değer (0,084 μm) gerçekçi değildir. Ancak diğer değerler, DE, NM ve RS temel alınarak 0,186 μm , 0,581 μm ve 3,251 μm değerleri kabul edilebilir değerlerdir. 0,233 μm olarak en iyi tahmin değeri SOLNR modelinde elde edilebilir. SONR modeli R_a ve R_q sonuçlarına benzer şekilde en yüksek R^2 değerini (0,982) verir. Fakat tahmin edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin gerçekçi değerleri dikkate alındığında SONR modeli, SOTNR ve SOLNR modellerinin sırasıyla R_a , R_q ve R_z için daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.



Şekil 4.20 R_z sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SONR, b) FOTNR, c) SOTNR, d) SOLNR (● deneysel sonuçları göstermektedir)

Yapılan regresyon çalışmaları sonrası her bir yüzey pürüzlülüğü değeri için R^2 değeri 0,95'ten büyük olan modellerin yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ve tel besleme miktarı ile olan ilgisini göstermek için üç boyutlu grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 sırasıyla R_a , R_q ve R_z için modelle ve deneysel sonuçlarla birlikte göstermektedir. 3 boyutlu grafikleri bütün yüzey pürüzlülüğü değerleri için incelendiğinde R^2 değeri 0,95'ten büyük modellerin grafikleri ile

gerçek deneysel sonuçların örtüştüğü görülmektedir. Bu durum önerilen bu modellerin elmas tel ile Si kütük kesme prosesini çok iyi tahmin ettiğini göstermektedir.

4.2.3 Lepleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Optimizasyon Çalışmaları

Si waferların lepleme işlemi sonrasında yüzey pürüzlülük değerleri R_a ve R_t değerlerine deneysel parametrelerin etkilerinin incelenmesi amacıyla ilk olarak regresyon analizi çalışmaları yapılmıştır. Tablo 4.7 ve Tablo 4.8 sırasıyla R_a ve R_t için oluşturulan regresyon modellerini, elde edilen R^2 değerlerini ve her bir model için yapılan optimizasyon çalışmalarının sonuçlarını göstermektedir. Deneysel parametreler olan lepleme diski dönme hızı 'd' ve süre 's' ile kısaltılarak modellerde kullanılmıştır. Optimizasyon problemlerinde deneysel parametrelerin ve sonuçların fizibilite açısından gerçekçi olması arzu edilmektedir. Bu amaçla optimizasyon çalışmasında deneysel parametre sınır şartları için yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a , R_t) 0,1 μm 'den büyük olacağı, deney parametrelerinin (d ve s) tamsayı değerleri alacağını ve bu değerlerin birer birer artacağı şeklinde belirlenmiştir.

Tablo 4.7'te lepleme işleminde elde edilen R_a pürüzlülük değeri sonuçlarının Tablo 2.6'daki model kalıplarına göre hazırlanmış regresyon modelleri ve R_a minimizasyonu için deneysel parametreler olan d ve s'nin her bir regresyon modeli için optimum değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre SONR model en yüksek R^2 değerine sahiptir (0,997) ve diğer en yüksek R^2 değerleri sırasıyla SOLNR (0,987), SON (0,973) ve MLR (0,949) modelleridir. Özellikle belirtmek gerekir ki geleneksel modellerin tüm rasyonel formlarının R^2 değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. R^2 değerleri çoklu doğrusal modellerde için 0,786'dan 0,949'a, ikinci dereceden doğrusal olmayan modeller için 0,86'dan 0,997'ye, birinci dereceden doğrusal olmayan trigonometrik modeller için 0,15'den 0,831'e, ikinci dereceden doğrusal olmayan trigonometrik modeller için 0,201'den 0,660'a, birinci dereceden doğrusal olmayan logaritmik modeller için 0,928'den 0,934'e ve ikinci dereceden doğrusal olmayan trigonometrik modeller için 0,941'den 0,987'ye yükselmiştir.

Dolayısıyla, lepleme işleminde rasyonel modellerin en iyi yaklaşımlara sahip olduğu söylenebilir.

Rasyonelleştirme işleminin trigonometrik modeller dışındaki diğer modellerde R^2 değerlerinde anlamlı bir artışa neden olmadığı söylenebilir. Modelin üstel derecesinin arttırılması işlemi R^2 değeri üzerindeki etkisini incelediğimizde en fazla artışın polinom modellerde olduğu söylenebilir. Ayrıca, R^2 'yi arttırmak için model derecesinin arttırılmasının trigonometrik ve logaritmik modellerde rasyonalizasyon kadar etkili olmadığını söylenebilir. Tüm regresyon modellerin optimizasyon sonuçları incelendiğinde (SOTNR hariç) DE ve SA algoritmalarının en iyi R_a sonuçlarını verdiği görülmektedir. Bu çalışmada SONR ve SON modellerinde DE ve SA algoritmaları ile sırasıyla 0,222 μm ve 0,103 μm R_a tahmin değerleri elde edilmiş ve SONR'deki 33-35 ve SON'deki 41-47 d-s çiftlerinin deneysel olarak kabul edilebilir olduğu söylenebilir. R^2 değerleri SONR, SON ve SOLNR modellerinden daha düşük olmasına rağmen, FONR modeli DE ve SA algoritmaları kullanılarak önerilen 25 devir/dk-60 dk d-s çifti ile minimum 0,102 μm 'lik R_a değerlerine ulaşılmıştır.

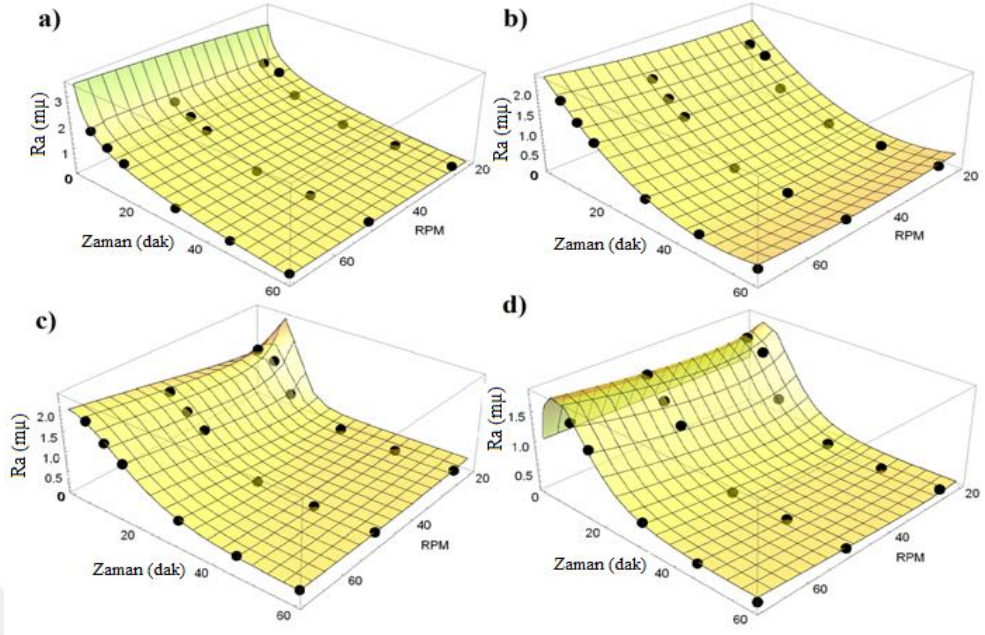
Tablo 4.8'de lepleme işleminde elde edilen R_t pürüzlülük değeri sonuçlarının Tablo 2.6'daki model kalıplarına göre hazırlanmış regresyon modelleri ve R_a minimizasyonu için deneysel parametreler olan d ve s'nin her bir regresyon modeli için optimum değerleri verilmiştir. R^2 0,969'un en yüksek değeri SONR modeli ile elde edilmiştir. SONLR modelde DE ve SA algoritmaları ile yapılan optimizasyon işlemlerinde 46 devir/dk ve 60 dk kullanıldığında minimum 2,279 μm minimum R_t değeri elde edilmiştir. FONL modelin yalnızca 3 parametreye sahip olmasına rağmen yüksek bir R^2 tahmini (0,923) vermesi oldukça dikkat çekicidir. Polinom ve logaritmik modeller incelendiğinde hem rasyonelleştirmenin hem de modellerin derecesinin arttırılmasının R^2 değerlerinde önemli bir etkiye neden olmamıştır. Ancak R_a sonuçlarına benzer şekilde R_t 'nin trigonometrik modellerin rasyonelleştirilmesi R^2 değerlerinde önemli bir artışa neden olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda lepleme işleminin trigonometrik olarak tanımlanmasının oldukça zor olduğu sonucuna varılmıştır. Genel bir sonuç olarak ikinci dereceden ve

Tablo 4.7 R_a için lepleme işlemi parametrelerinin regresyon modellerinin oluşturulması ve optimizasyonu

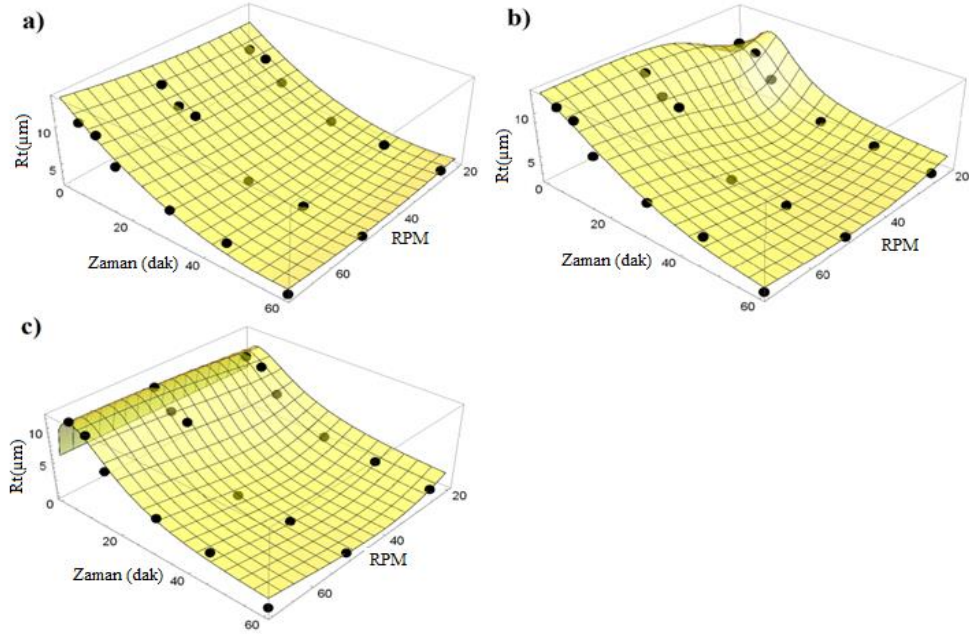
Regresyon Modelleri	R^2	d	s	R_a
$Ra = 0,00454508 d - 0,0268881 s + 1,37158$	0,786	+28	+52	+0,100
		-70	-59	-0,103
		◊65	◊51	◊0,295
		*53	*60	*0,100
$Ra = \frac{0,3009001d - 0,5411664s + 36,45803}{0,07253386d + 1,580841s + 15,23613}$	0,949	+25	+60	+0,102
		-70	-60	-0,217
		◊28	◊60	◊0,110
		*25	*60	*0,102
$R_a = 0,000189d^2 - 0,000117519ds - 0,01002322d + 0,0008946273s^2 - 0,07844976s + 2,119191$	0,973	+41	+47	+0,103
		-41	-47	-0,103
		◊25	◊43	◊0,151
		*41	*47	*0,103
$Ra = \frac{(1772,838 d^2 - 1939,206 ds - 25694d + 3526,041 s^2 - 85275,384 s + 1322619,15075)}{(443,277 d^2 + 1620,94 ds + 17155,865 d + 8500,295 s^2 - 206533,113 s + 647867,067)}$	0,997	+33	+35	+0,222
		-33	-35	-0,222
		◊45	◊47	◊0,224
		*33	*35	*0,222
$Ra = -0,0381488 \sin(d) - 0,687576 \cos(d) - 0,287067 \sin(s) - 0,102435 \cos(s) + 1,3611$	0,150	+44	+39	+0,369
		-70	-58	-0,598
		◊38	◊26	◊0,408
		*44	*39	*0,369
$Ra = \frac{-0,7 \sin(d) + 0,169 \cos(d) + 21,348 \sin(s) + 10,975 \cos(s) + 18,517}{-0,244 \sin(d) + 0,751 \cos(d) + 34,446 \sin(s) + 14,744 \cos(s) + 28,942}$	0,831	+33	+60	+0,206
		-25	-36	-0,600
		◊34	◊60	◊0,286
		*56	*35	*0,119
$Ra = 0,584 \sin^2(d) - 0,017 \sin(d) + 0,111 \cos^2(d) + 0,134 \cos(d) + 0,656 \sin^2(s) - 0,152 \sin(s) - 0,482 \cos^2(s) - 0,65 \cos(s) + 0,144$	0,201	+57	+26	+0,101
		-28	-43	-0,227
		◊42	◊37	◊0,204
		*28	*18	*0,115
$Ra = \frac{(-395,903 \sin^2(d) - 163,263 \sin(d) + 37,31 \cos^2(d) - 10,99 \cos(d) - 192,84 \sin^2(s) - 143,96 \sin(s) + 183,412 \cos^2(s) + 236,005 \cos(s) - 24,418)}{(-474,057 \sin^2(d) - 143,711 \sin(d) - 6,987 \cos^2(d) - 120,8 \cos(d) - 15,399 \sin^2(s) - 203,796 \sin(s) + 14,671 \cos^2(s) - 6,808 \cos(s) - 28,251)}$	0,666	+60	+60	+0,102
		-70	-56	-0,156
		◊38	◊26	◊0,292
		*60	*60	*0,292
$Ra = 0,179668 \ln(d) - 0,6668307 \ln(s) + 2,162183$	0,928	+25	+60	+0,110
		-70	-60	-0,195
		◊28	◊60	◊0,130
		*25	*60	*0,110
$Ra = \frac{3794,566 \ln(d) - 26847,39 \ln(s) + 102419,4}{-5140,632 \ln(d) + 3001,398 \ln(s) + 55492,13}$	0,934	+25	+60	+0,101
		-70	-60	-0,187
		◊28	◊60	◊0,101
		*25	*60	*0,101
$Ra = -0,8857062 \ln(ds) + 0,5118809 \ln^2(d) - 2,731283 \ln(d) + 0,06936979 \ln^2(s) - 0,1805224 \ln(s) + 9,626367$	0,941	+34	+60	+0,134
		-70	-60	-0,296
		◊34	◊60	◊0,134
		*34	*60	*0,134
$Ra = \frac{(-312,552 \ln(ds) + 98,486 \ln(d) - 343,227 \ln(d) + 181,819 \ln^2(s) - 976,298 \ln(s) + 3461,911)}{(23,521 \ln(ds) - 92,85 \ln^2(d) + 669,331 \ln(d) + 193,669 \ln^2(s) - 1050,614 \ln(s) + 339,7641)}$	0,987	+30	+43	+0,191
		-70	-60	-0,345
		◊33	◊39	◊0,197
		*30	*43	*0,191

Tablo 4.8 R_t için lepleme işlemi parametrelerinin regresyon modellerinin oluşturulması ve optimizasyonu

Regresyon Modelleri	R^2	d	s	R_t
$Rt = 0,02569262d - 0,1499622s + 9,381818$	0,853	$\begin{smallmatrix} +25 \\ -70 \\ \diamond 28 \\ +25 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +60 \\ -60 \\ \diamond 60 \\ +60 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +1,026 \\ -2,182 \\ \diamond 1,103 \\ +1,026 \end{smallmatrix}$
$Rt = \frac{4,961098 d - 7,6761098 s + 1101,79036}{0,02565808 d + 4,2634218 s + 94,045903}$	0,940	$\begin{smallmatrix} +25 \\ -70 \\ \diamond 28 \\ +25 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +60 \\ -60 \\ \diamond 60 \\ +60 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +2,183 \\ -2,811 \\ \diamond 2,225 \\ +2,183 \end{smallmatrix}$
$Rt = 0,001034703d^2 - 0,0006485684ds - 0,05392048d + 0,003333482s^2 - 0,3319041s + 12,50779$	0,949	$\begin{smallmatrix} +43 \\ -70 \\ \diamond 34 \\ +43 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +54 \\ -60 \\ \diamond 60 \\ +54 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +2,394 \\ -3,165 \\ \diamond 2,633 \\ +2,394 \end{smallmatrix}$
$Rt = \frac{(8907,257 d^2 - 4861,75 ds - 405966,199 d + 3924,113 s^2 + 34189,783 s + 6148128,54)}{(791,306 d^2 + 362,24 ds - 40772,073 d + 1153,46 s^2 - 28047,222 s + 715988,387)}$	0,969	$\begin{smallmatrix} +46 \\ -46 \\ \diamond 33 \\ +46 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +60 \\ -60 \\ \diamond 39 \\ +60 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +2,279 \\ -2,279 \\ \diamond 2,572 \\ +2,279 \end{smallmatrix}$
$Rt = -0,298 \sin(d) - 4,092 \cos(d) - 1,24 \sin(s) - 0,32 \cos(s) + 9,717$	0,106	$\begin{smallmatrix} +44 \\ -70 \\ \diamond 38 \\ +44 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +39 \\ -58 \\ \diamond 26 \\ +39 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +4,340 \\ -5,625 \\ \diamond 4,568 \\ +4,340 \end{smallmatrix}$
$Rt = \frac{(-9,472 \sin(d) - 20,437 \cos(d) - 125,664 \sin(s) + 104,009 \cos(s) + 76,015)}{(-3,206 \sin(d) - 6,034 \cos(d) - 15,964 \sin(s) + 14,369 \cos(s) + 13,027)}$	0,901	$\begin{smallmatrix} +43 \\ -70 \\ \diamond 35 \\ +40 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +20 \\ -60 \\ \diamond 20 \\ +41 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +0,174 \\ -2,392 \\ \diamond 2,556 \\ +0,156 \end{smallmatrix}$
$Rt = 4,057 \sin^2(d) - 0,164 \sin(d) + 1,033 \cos^2(d) + 1,158 \cos(d) + 5,041 \sin^2(s) - 0,236 \sin(s) - 3,471 \cos^2(s) - 4,417 \cos(s) + 1,178$	0,205	$\begin{smallmatrix} +70 \\ -70 \\ \diamond 65 \\ +70 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +12 \\ -51 \\ \diamond 51 \\ +12 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +0,108 \\ -1,546 \\ \diamond 0,408 \\ +0,108 \end{smallmatrix}$
$Rt = \frac{(-603,176 \sin^2(d) - 205,041 \sin(d) + 26,033 \cos^2(d) - 57,224 \cos(d) + 127,013 \sin^2(s) - 27,282 \sin(s) - 151,322 \cos^2(s) - 167,645 \cos(s) - 62,265)}{(-135,045 \sin^2(d) - 29,733 \sin(d) - 3,132 \cos^2(d) - 93,747 \cos(d) + 113,728 \sin^2(s) - 7,268 \sin(s) + 20,207 \cos^2(s) - 54,989 \cos(s) - 2,496)}$	0,705	$\begin{smallmatrix} +28 \\ -29 \\ \diamond 29 \\ +54 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +5 \\ -21 \\ \diamond 21 \\ +14 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +0,102 \\ -0,261 \\ \diamond 0,261 \\ +0,108 \end{smallmatrix}$
$Rt = 1,018 \ln(d) - 3,559 \ln(s) + 13,27$	0,923	$\begin{smallmatrix} +25 \\ -70 \\ \diamond 28 \\ +25 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +60 \\ -60 \\ \diamond 60 \\ +60 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +1,973 \\ -3,022 \\ \diamond 2,089 \\ +1,973 \end{smallmatrix}$
$Rt = \frac{-93,653 \ln(d) - 1599,73 \ln(s) + 7781,184}{-83,465 \ln(d) - 26,66 \ln(s) + 795,075}$	0,931	$\begin{smallmatrix} +25 \\ -70 \\ \diamond 28 \\ +25 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +60 \\ -60 \\ \diamond 60 \\ +60 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +2,228 \\ -2,515 \\ \diamond 2,254 \\ +2,228 \end{smallmatrix}$
$Rt = -4,352 \ln(ds) + 2,82 \ln^2(d) - 15,55 \ln(d) - 0,264 \ln^2(s) + 2,318 \ln(s) + 49,532$	0,934	$\begin{smallmatrix} +34 \\ -70 \\ \diamond 34 \\ +34 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +60 \\ -60 \\ \diamond 60 \\ +60 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +1,652 \\ -3,116 \\ \diamond 1,652 \\ +1,652 \end{smallmatrix}$
$Rt = \frac{(-485,569 \ln(ds) + 260,238 \ln^2(d) - 1437,843 \ln(d) + 68,253 \ln^2(s) - 25,026 \ln(s) + 4576,867)}{(-99,991 \ln(ds) + 26,694 \ln^2(d) - 102,217 \ln(d) + 11,052 \ln^2(s) + 38,41 \ln(s) + 488,089)}$	0,966	$\begin{smallmatrix} +39 \\ -70 \\ \diamond 34 \\ +39 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +60 \\ -60 \\ \diamond 60 \\ +60 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} +1,983 \\ -3,550 \\ \diamond 2,093 \\ +1,983 \end{smallmatrix}$



Şekil 4.21 R_a sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) LR, b) SON, c) SONR, d) SOLNR (● deneysel sonuçları göstermektedir)



Şekil 4.22 R_t sonuçlarının deneysel ve önerilen model sonuçları karşılaştırmasının 3-boyutlu grafik gösterimi, a) SON, b) SONR, c) SOLNR (● deneysel sonuçları göstermektedir)

rasyonel polinom ve logaritmik modellerin bu deneysel fenomenayı yüksek tahmin yeteneğine sahip oldukları söylenebilir. Ancak basit kurulumu ve yüksek kararlılığı nedeniyle birinci dereceden logaritmik modeller de önerilebilir. Genel değerlendirme

açısından R_a sonuçlarına benzer şekilde DE ve SA algoritmalarının hangi regresyon metodu kullanıldığı fark etmeksizin en iyi optimizasyon sonuçlarını verdiğini söyleyebiliriz.

Yapılan regresyon çalışmaları sonrası her bir yüzey pürüzlülüğü değeri için R^2 değeri 0,95'ten büyük olan modellerin yüzey pürüzlülüğünün lepleme plakası dönme hızı ve lepleme süresi ile olan ilişkisini göstermek için 3 boyutlu grafikleri oluşturulmuştur. Kareli sarı eğri modeli göstermekte ve siyah yuvarlak noktalar ise deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 sırasıyla R_a ve R_t değerleri için modellerle ve deneysel sonuçlarla birlikte göstermektedir. Her iki şekilde de bütün modellerin grafikleri incelendiğinde deneysel verilerin modeller ile örtüştüğü görülmektedir.

4.2.4 Tekstürleme Parametrelerinin Reflektans Değerine Etkilerinin Regresyon Analizi ile Belirlenmesi ve Optimizasyon Çalışmaları

Tekstürleme işlemi gerçekleştirilen Si yongaların % R değerlerine deneysel parametrelerin etkilerinin incelenmesi amacıyla ilk olarak regresyon analizi çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla Tablo 2.6'da verilen regresyon modellerine deneysel parametrelerin ve sonuçların Wolfram Matematica 10 programı kullanılarak ayarlama (fitting) işlemleri ile oluşturulmuştur. Ayrıca bu çalışmada üçüncü dereceden lineer olmayan bir denklem de kullanılmıştır. Bu çalışmalarda R^2 değeri 0,95'in üzerinde elde edildiğinde derece arttırma ve rasyonelleştirme işlemleri o modelde devam edilmemiştir. İkinci olarak ise elde edilen regresyon modellerine göre yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek amacıyla DE, NM, RS ve SA algoritmaları ile optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Tablo 4.9 % R için Tablo 2.6'daki model kalıplarına göre hazırlanmış regresyon modelleri, elde edilen R^2 değerlerini ve her bir model için yapılan optimizasyon çalışmalarının sonuçlarını göstermektedir. Tablo 4.9'da optimizasyon algoritmalarının belirtmek amacıyla; D.E için "+", N.M için "-", R.S için "◇" ve S.A için "•" simgeleri kullanılmıştır. Deney parametreleri % hacimce IPA 'ı', tamsayı

değerleri alacağını ve bu değerlerin birer birer artacağı şeklinde belirlenmiştir. % ağırlıkça NaOH 'n' ile, % hacimce IPA 'ı' ile ve zaman da 't' ile sembozile edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada üçüncü dereceden lineer olmayan polinom model de kurulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre üçüncü dereceden lineer olmayan (TON) model en yüksek R^2 değerine sahiptir (0,997) ve diğer en yüksek R^2 değerleri sırasıyla SOTNR (0,989), SONLR ile SONR (0,887) ve FONR (0,879) modelleridir. Özellikle belirtmek gerekir ki geleneksel modellerin tüm rasyonel formlarının R^2 değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. R^2 değerleri FOR model için 0,399'dan 0,879'a, SOR model için 0,761'dan 0,887'ye, FOTN model için 0,715'den 0,989'a, FOLN model için 0,314'den 0,701'e ve SOLN model için 0,802'den 0,887'ye yükselmiştir. Dolayısıyla, lepleme işleminde rasyonel modellerin en iyi yaklaşımlara sahip olduğu söylenebilir. Modelin üstel derecesinin arttırılması işlemi R^2 değeri üzerindeki etkisini incelediğimizde en fazla artışın polinom modellerde olduğu söylenebilir. Ayrıca, R^2 'yi arttırmak için model derecesinin arttırılmasının logaritmik modellerde ve polinom modellerde birbirine çok yakın etkiye sahip olduğu söylenebilir ayrıca bu iki tip model için de modelin derecesinin arttırılması rasyonelleştirme kadar etkili olduğu da söylenebilir.

Tüm regresyon modellerin optimizasyon sonuçları incelendiğinde DE ve SA algoritmalarının en iyi R_a sonuçlarını verdiği görülmektedir. Bu çalışmada SONTR ve SONLR modellerinde SA algoritması ile sırasıyla 10,004 % R tahmin değerleri elde edilmiştir. Ayrıca en düşük R^2 değeri üçüncü dereceden polinom rasyonel modellerde elde edilmiş olmasına rağmen bu model kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında % R tahminleri 10,01 ile 17,946 arasındadır. Deneysel çalışmalarda en düşük % R değerine sahip numunelerin % 5 IPA + % 3,5 NaOH + DI su çözeltisi ile 40 dk hazırlanan numuneler oldukları düşünüldüğünde SONTR, SONLR, SONR ve FONLR modelleri ile elde edilen optimum sonuçların hepsi daha düşük değerlere sahiptir. Özellikle SONTR'de SA algoritmasının önerdiği 3,9-2,17-59 değerlerindeki 1-n-t üçlü deney seti hem en düşük % R değerinin elde edilebileceği hem de kimyasal tüketiminin nispeten az olması açısından en dikkat çekici sonuçtur.

Tablo 4.9 % R değerleri için regresyon modellerinin oluşturulması ve optimizasyon sonuçları

Regresyon Modelleri	R ²	I	n	T	% R
$\%R = 0,7 \iota - 0,58 n + 0,02 t + 17,58$	0,399	+2,00	+6,0	+10	+15,524
		-2,00	-6,0	-10	-15,524
		◊4,07	◊6,0	◊15	◊17,312
		-2,00	-6,0	-10	-15,524
$\%R = \frac{-48,42 \iota - 12,14 n - 0,08 t + 413,82}{-2,54 \iota - 0,51 n + 0,00003 t + 21,23}$	0,879	+2,00	+6,0	+10	+23,899
		-2,00	-6,0	-10	-23,899
		◊4,93	◊6,0	◊10	◊25,933
		-2,00	-6,0	-10	-23,899
$\%R = 0,35 \iota^2 - 0,15 \iota n + 0,006 \iota t - 2,58 \iota + 0,21 n^2 + 0,006 n t - 1,59 n + 0,0006 t^2 - 0,08 t + 27,1333$	0,761	+4,58	+5,08	+15	+16,537
		-4,56	-5,06	-16	-16,537
		◊3,88	◊4,62	◊24	◊16,708
		-4,56	-5,07	-16	-16,537
$\%R = \frac{(-3975,74 \iota^2 - 1859,22 \iota n - 19972,4 \iota t - 1338,17 \iota + 163,51 n^2 - 1679,76 n t + 341,97 n + 9041,24 t^2 + 1920,06 t + 525,51)}{(-1946,32 \iota^2 + 2824,93 \iota n - 1856,76 \iota t + 22458,4 \iota - 3082,04 n^2 + 390,19 n t - 961,02 n + 512,4 t^2 - 969,17 t - 7440,05)}$	0,887	+3,61	+2,11	+9	+10,010
		-2,00	-6,00	-60	-17,946
		◊5,59	◊3,04	◊13	◊14,408
		-7,83	-5,84	-20	-10,014
$\%R = 0,007 \iota^3 - 0,02 \iota^2 n + 0,008 \iota^2 t - 0,0195 \iota^2 + 0,11 \iota n^2 - 0,72 \iota n - 0,0009 \iota t^2 - 0,007 \iota t + 0,33 \iota - 0,01 n^3 - 0,004 n^2 t - 0,05 n^2 + 0,0002 n t^2 + 0,01 n t + 0,8 n + 0,00004 t^3 - 0,001 t^2 - 0,03 t + 20,5$	0,997	+8,00	+4,18	+10	+12,997
		-3,72	-6,00	-44	-16,876
		◊5,24	◊5,17	◊50	◊17,331
		-8,00	-4,18	-10	-12,997
$\%R = 20,24 + 13,88 \cos(\iota) - 0,15 \cos(n) - 0,09 \cos(t) + 5,79 \sin(\iota) + 2,54 \sin(n) - 0,66 \sin(t)$	0,715	+3,54	+4,77	+14	+11,973
		-3,54	-5,55	-20	-12,732
		◊3,43	◊4,43	◊28	◊12,794
		-3,57	-4,77	-33	-11,999
$\%R = \frac{(1211,79 \sin(\iota) + 522,28 \cos(\iota) - 1001,65 \sin(n) - 2150,51 \cos(n) + 2567,99 \sin(t) + 1375,73 \cos(t) + 252,4)}{(52,19 \sin(\iota) + 6,58 \cos(\iota) - 54,74 \sin(n) - 115,08 \cos(n) + 151,53 \sin(t) + 62,66 \cos(t) - 0,82)}$	0,989	+7,21	+4,92	+50	+10,006
		-5,27	-5,21	-50	-10,287
		◊5,24	◊5,17	◊50	◊12,986
		-3,9	-2,17	-59	-10,004
$\%R = 15,41 + 2,25 \ln \iota - 1,71 \ln n + 0,84 \ln t$	0,314	+2,00	+6,00	+10	+13,909
		-2,00	-6,00	-10	-13,909
		◊4,93	◊6,00	◊10	◊15,943
		-2,00	-6,00	-10	-13,909
$R = \frac{873,12 \ln \iota + 757,82 \ln n + 572,91 \ln t - 3951,77}{44,55 \ln \iota + 38,93 \ln n + 28,13 \ln t - 197,21}$	0,701	+2,60	+5,21	+26	+10,015
		-4,04	-6,00	-11	-10,471
		◊4,07	◊6,00	◊15	◊16,261
		-3,75	-5,77	-13	-10,004
$\%R = -2,32 \ln \iota \ln n + 1,04 \ln \iota \ln t + 9,12 \ln^2 \iota - 23,53 \ln \iota + 1,1 \ln n \ln t + 1,16 \ln^2 n - 4,23 \ln n + 1,02 \ln^2 t - 9,15 \ln t + 48,35$	0,802	+3,88	+6,00	+17	+15,647
		-3,87	-5,89	-17	-15,649
		◊4,07	◊6,00	◊15	◊15,671
		-3,83	-6,00	-17	-15,648
$\%R = \frac{15,95 \ln \iota \ln n - 2,76 \ln \iota \ln t + 6,83 \ln^2 \iota + 7,95 \ln \iota + 26,03 \ln n \ln t + 28,71 \ln^2 n + 16,76 \ln(n) + 3,74 \log^2(t) + 15,27 \ln(t) + 14,11}{0,96 \ln \iota \ln n - 1,31 \ln \iota \ln t - 5,98 \ln^2 \iota + 20,44 \ln \iota - 0,57 \ln n \ln t + 0,80 \ln^2 n + 9,24 \ln n - 4,27 \ln^2 t + 34,73 \ln t - 71,4}$	0,887	+2,00	+1,00	+10	+10,381
		-3,43	-1,00	-35	-14,791
		◊4,93	◊6,00	◊10	◊16,599
		-2,00	-1,00	-10	-10,381

BÖLÜM BEŞ

GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında tek kavşaklı n-tipi tek kristalli Si tabanlı güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Güneş hücrelerinin üretimi çok kristalli Si ham maddesinin Czochralski sisteminde (100) düzleminde tek kristalli Si ingot olarak büyütülmesinden başlayarak birçok üretim adımını içermektedir. Bu adımlar Si waferların hazırlanması ve hazırlanan waferlar kullanılarak güneş hücrelerinin üretimi şeklinde iki temel sınıfa ayrılabilir. Si wafer hazırlanması (i) Si ingotun büyütülmesi, (ii) Si ingotun wafer halinde kesilmesi, (iii) kesilen waferların leplenmesi ve (iv) leplenen waferların parlatılması olarak dört temel adım içermektedir. Güneş hücresi üretimi ise (i) parlatılmış waferların yongalar halinde dilimlenmesi, (ii) Si yongaların tekstürlenmesi, (iii) tekstürlenmiş Si yongaların bir yüzeyinde p-n kavşağı oluşturulması, (iv) Si yonganın kavşak oluşturulmuş yüzeyine yansıtma azaltıcı kaplama yapılması ve (v) yonganın yüzeylerine akım toplayıcıların kaplanması olarak beş adım içermektedir. Ayrıca, Si ingotun wafer halinde kesilmesi, kesilen waferların leplenmesi ve Si yongaların tekstürlenmesi işlemlerinde deneysel verilerin regresyon analizi kullanılarak modellenmesi ve Diferansiyel Gelişim, Nelder-Mead, Rastgele Arama ve Benzetimli Tavlama Algoritmaları ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel, modelleme ve optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen genel sonuçları alt başlıklar halinde aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

Si İngot Üretimi

Deneysel anlamda en kritik aşama olan ingot üretimi aşamasında 4 adet n-tipi ve 1 adet katkısız olmak üzere toplam 5 adet Si ingot üretilmiştir. Üretilen 2 adet n-tipi Si ingot tek kristalli olarak büyütülmelerine rağmen büyütme aşamasında yaşanan problemlerden dolayı boyut, ağırlık ve vücut bölgesinde dalgalanma gibi kusurlar içermektedir. Ancak diğer 3 Si ingot üretiminde bir problemle karşılaşılmamış ve belirlenen boyutlarda üretimler gerçekleştirilmiştir. Yaşanan bir diğer önemli problem ise üretim öncesi ve sonrası cihaz ve üretim bölgesinin temizliğidir.

Bilindiği gibi üretim sırasında Si eriyiği üzerinde korozif özellikli SiO buharı oluşmakta ve cihazın pek çok bölgesinde birikmektedir. Ayrıca laboratuvar ortamı temiz oda standartlarında olması tek kristalin yapının oluşmasını engelleyen kirliliklerin sisteme girişini engelleyecektir.

Yapılan ingot üretimlerinde çekirdek kristalinin eriyiğe daldırılması, boyun, omuz ve vücut kısımlarının oluşturulması adımlarında Czochralski cihazı yarı otomatik modda (operatör kontrolünde) çalıştırılmıştır. Hatalı üretimlerde karşılaşılan problemlerin yarı otomatik modda vücut kısmı büyütülürken operatör ingot çekme hızı, ingot dönme hızı, pota yükselme hızı ve pota dönme hızı arasındaki dengeyi sağlayamamasından kaynaklanmıştır. Yaşanılan bu problemler operatörlerin deneyiminin artması ile çözülmüştür. Ayrıca cihazın iç bölgelerinin ve laboratuvarın temizliği amacıyla yüksek emiş kapasiteli ve su hazneli bir vakum temizleme cihazı kullanılmıştır. Cihazın açık olduğu (sistemin içinin temizlenmesi ve malzeme yükleme aşaması) sürelerde tozsuz eldiven, maske ve laboratuvar önlüğü kullanılmıştır.

Wafer Hazırlama

Si ingotların wafer halinde kesilmesi: Deneysel çalışmalarda üretilen Si ingotlar altlık malzeme olarak kullanılması amacıyla farklı operatörler tarafından STX 1202 elmas tel kesme cihazı ile 250-1000 μm kalınlıklarda kesilmiştir. Güneş hücresi üretimi amacıyla kullanılacak Si waferlar ise 375 μm kalınlığında kesilmiştir. Kesme işlemlerinde kesme teli gerginliği, tel tipi ve çevresel koşullar sabit tutulmuştur. Kesilen waferların yüzey pürüzlülüğüne tel besleme hızı ve kesme hızı değişimlerinin nasıl etkilerde bulundukları araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda 4 m/s tel besleme hızı ve 0,5 mm/dk kesme hızı parametreleri ile kesilen Si waferlarda en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri ($R_a = 1,08 \mu\text{m}$, $R_q = 1,32 \mu\text{m}$ ve $R_z = 6,3 \mu\text{m}$) elde edilmiştir.

Deneysel çalışmaların yanı sıra deneysel parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkileri regresyon analizi ile 12 farklı lineer veya lineer olmayan fonksiyon

kullanılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüklerinin minimizasyonu amacıyla 4 farklı optimizasyon algoritması (Diferansiyel Gelişim, Nelder-Mead, Rastgele Arama ve Benzetimli Tavlama Algoritmaları) ile oluşturulan her bir model için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modeller her bir yüzey pürüzlülüğü değeri (R_a , R_q , R_z) için incelendiğinde en yüksek R^2 değerleri SONR modellerde R_a için 0,989, R_q için 0,994 ve R_z için 0,982 elde edilmiştir. Ayrıca görülmüştür ki FOTNR, SOTNR ve SOLNR modelleri de 0,95 değeri üzerinde R^2 sonuçları vermekte ve silisyum ingotun elmas tel testere sistemiyle kesilmesi prosesinin matematiksel olarak ifade edilmesinde deneysel veriler ile oldukça uyumlu sonuçlar verebilmektedirler. Bu modeller incelendiğinde hepsinin rasyonel formda olduğu görülmekte ve rasyonelleştirme işleminin R^2 değeri üzerinde çok etkili olduğu söylenebilir. Si ingotun elmas tel testere sistemiyle kesilmesi prosesi için yapılan optimizasyon çalışmalarında en yüksek R^2 değerine sahip SONR modellerinde; R_a için en düşük optimizasyon tahmininin DE algoritması ($R_a= 0,105 \mu\text{m}$, $k = 0,61 \text{ mm/dk}$, $t = 2,71 \text{ m/s}$) tarafından elde edildiği söylenebilirken SA ($R_a= 0,112 \mu\text{m}$, $k = 0,58 \text{ mm/dk}$, $t = 2,69 \text{ m/s}$) ve NM ($R_a=0,137 \mu\text{m}$, $k= 0,55 \text{ mm/dk}$, $t= 2,65 \text{ m/s}$) kullanılarak da nispeten iyi sonuçlar elde edilmiştir. R_q için ise DE, SA ve NM algoritmalarının hepsi $k = 0,59 \text{ mm/dk}$, $t = 2,61 \text{ m/s}$ parametre değerleri için $0,109 \mu\text{m}$ değerini vermektedir. R_z için en düşük optimizasyon tahmininin DE algoritması ($R_z= 0,186 \mu\text{m}$, $k = 0,65 \text{ mm/dk}$, $t = 2,78 \text{ m/s}$) tarafından elde edildiği söylenebilirken SA ($R_z= 0,188 \mu\text{m}$, $k= 0,71 \text{ mm/dk}$, $t = 2,63 \text{ m/s}$) ve NM ($R_z= 0,581 \mu\text{m}$, $k = 0,57 \text{ mm/dk}$, $t = 2,73 \text{ m/s}$) kullanılarak da nispeten iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bütün regresyon modelleri için yapılan optimizasyon çalışmalarında görülmüştür ki DE algoritması dört algoritma içerisinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini verirken RS algoritması ise en yüksek değerleri vermiştir.

Si ingotun elmas tel testere sistemiyle kesilmesi prosesi genel anlamda değerlendirilecek olursa, sanayi tipi kesme sistemleri ile kıyaslandığında kesme kapasitesi (kesme hızı ve minimum kesilebilecek wafer kalınlığı) ve hızı oldukça düşüktür. Yağ besleme sisteminin ve kesme bölgesinin açık olması hem kullanıcı yaralanmaları hem de cihaz performansını etkilemektedir. Ayrıca kesim işlemlerinde

yaşanılan en önemli problem kesme telinin proses sırasında kopmasıdır. Bu problemin kesme telinin sarılı olduğu tamburun proses sırasında elektrostatik olarak yüklenmesi ve kesme telinde burkulumaya sebep olmasıdır. Bu problemin çözümü amacıyla kesme sistemine kullanım ve kurulum talimatında olmamasına rağmen topraklama bağlantıları yapılmıştır. Bu işlem sonrasında kesme telinde kopma sıklığı oldukça azalmıştır.

Si waferların leplemesi: Elmas tel kesme sistemi ile 375 μm olarak kesilen Si waferlar Logitech PM5 lepleme cihazıyla kesme izlerinin ve deformasyonlarının giderilmesi amacıyla 9 μm alümina tozuyla dökme demir plaka üzerinde sabit yük, sabit aşındırıcı besleme ve sabit ortam koşullarında leplenmiştir. Deneysel çalışmalarda yüzey pürüzlülüğü değerlerinin (R_a , R_t) lepleme plakasının dönme hızı ve lepleme süresiyle değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki yüzey pürüzlülüğü değeri ($R_a=0,257 \mu\text{m}$, $R_t= 2,843 \mu\text{m}$) için en ideal 50 devir/dk lepleme plakası dönme hızında ve 45 dk lepleme süresinde elde edilmiştir. Ancak yapılan deneysel çalışmalar bütün dönme hızları için 30 dk'dan sonra yüzey pürüzlülük değerlerinin hızlı bir şekilde azaldığını göstermektedir. Bu durum düşük dönme hızlarında çalışılabileceğini ve yüksek hızlarda merkezkaç kuvveti etkisiyle fazla tüketilen aşındırıcı solüsyon miktarının da azaltılabileceğini göstermektedir.

Lepleme işleminde dönme plakasının dönme hızı ve lepleme süresi deneysel parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri regresyon analizi ile 12 farklı lineer veya lineer olmayan fonksiyon kullanılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüklerinin minimizasyonu amacıyla 4 farklı optimizasyon algoritması (Diferansiyel Gelişim, Nelder-Mead, Rastgele Arama ve Benzetimli Tavlama Algoritmaları) ile oluşturulan her bir model için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modeller R_a yüzey pürüzlülüğü değeri için incelendiğinde en yüksek R^2 değerleri SONR modelde (0,997) ve daha sonra ise SOLNR (0,987), SON (0,973), MLR (0,949) modellerde elde edilmiştir. R_t için ise en yüksek R^2 değeri benzer şekilde SONR (0,969) modelde daha sonra ise SOLNR (0,966) ve SON (0,949) modellerde elde edilmiştir. Si waferların leplemesi prosesi için yapılan optimizasyon çalışmalarında en yüksek R^2 değerine sahip SONR

modellerinde; R_a için DE, SA ve NM algoritmalarının hepsi $d=33$ devir/dk ve $s=35$ dk parametre değerleri için $0,222 \mu\text{m}$ değerini vermektedir. R_t içinde aynı algoritmalar en düşük optimizasyon tahmini olarak $2,279 \mu\text{m}$ değerini $d=46$ devir/dk ve $s=60$ dk parametre değerleri ile sağlamışlardır. Bütün regresyon modelleri için yapılan optimizasyon çalışmalarında görülmüştür ki DE ve SA algoritmaları dört algoritma içerisinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini verirken RS algoritması ise en yüksek değerleri vermiştir.

Si waferların leplenmesi çalışmalarında karşılaşılan en büyük problemler sırasıyla: (i) Si waferların cam altlık üzerine yapıştırılması ve yüzeyin paralelliğinin sağlanması, (ii) dökme demir lepleme plakasının düzlüğünün her proses öncesinde ve uzun süreli kullanımlarda bozulması ve (iii) Si waferların çift yüzey leplenmesi işleminde yüzey paralelliğinin sağlanması ve uzun proses süreleridir. Bu problemler operatörlerin deneyiminin artması ve kullanım talimatlarına uyulması ile kısmen azaltılmıştır.

Si waferların parlatılması: Si waferlar lepleme işlemi sonrasında Logitech PM5 cihazında kadife keçe üzerinde $3 \mu\text{m}$ Ce_2O_3 ve kollaidal silika solüsyonu ile parlatılmıştır. Parlatma işlemleri sonrasında yüzeydeki kirliliklerin giderilmesi için kimyasal temizleme işlemi yapılmış ve AFM cihazı ile yüzey topografisi incelenmiş ve UV-VIS ile de % R değerleri ölçülmüştür. AFM sonuçlarına göre en düşük yüzey pürüzlülüğü R_a değeri $2,5$ dk HF çözeltisi içinde dağlanmış numunelerde $1,684 \text{ nm}$ olarak ölçülmüştür. Parlatma işlemi öncesi ve kimyasal temizleme işlemleri sonrası reflektans ölçümlerinde en düşük % R değeri 20 dk HF çözeltisi içinde dağlanmış numunelerde % $28,09$ olarak ölçülmüştür. Parlatılmış Si waferlar güneş hücresi üretimi için Logitech APD1 elmas diskli kesme cihazında $2,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$ boyutlarında kare şeklinde kesilmiştir. Kesilen Si yongaların öz direnci $4,85 \Omega\text{cm}$ ve iletkenlik değeri $0,218 \text{ } 1/\Omega$ olarak ölçülmüştür. Hall etkisi ölçümleri sonuçları ise bulk konsantrasyonu $8,68 \cdot 10^{16} \text{ } 1/\text{cm}^3$, mobilite $2,287 \cdot 10^3$ ve ortalama Hall katsayısı $7,188 \cdot 10^4 \text{ cm}^3/\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca numunelerin % Absorbans-Dalga boyu grafikleri ile E_G hesaplamaları yapılmış ve bütün numuneler için E_G değeri $1,124 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır.

Güneş Hücresi Üretimi

Güneş hücresi üretimi çalışmalarında 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarında Si yongalar kullanılmış ve bu yongalara tek kavşaklı hücre üretmek amacıyla sırasıyla (i) tekstürleme, (ii) n-p kavşak üretimi, (iii) yansıtma yüzey kaplama ve (iv) akım toplayıcıların kaplanması işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlerin sonrasında ise hücrelere elektriksel bağlantıları yapılmış ve akım-voltaj ölçümleri güneş simülatöründe ölçülmüştür.

Si yongaların tekstürlenmesi: Si yongalar reflektans değerlerinin azaltılması amacıyla soksalet sisteminde NaOH alkali ile hazırlanan kimyasal çözelti içinde piramit benzeri şekillerde tekstürlenmiştir. Deneysel çalışmalarda 3 değişkenli ve 3 seviyeli Box-Behnken deneysel dizayn seti en düşük % R değerinin elde edileceği kimyasal çözelti setinin bulunabilmesi amacıyla kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen en düşük % R değeri % 17,162 olarak % 3,5 NaOH-%5 IPA solüsyonunda 40 dk tekstürlenmiş numunelerde bulunmuştur. Tekstürlenmiş numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde oluşturulan piramitlerin köşegen mesafelerinin % 1 NaOH-% 8 IPA-40dk ve % 1 NaOH-% 2 IPA-40 dk tekstürlenmiş örneklerinde 1 μm 'nin altında % 6 NaOH-% 5 IPA-60 dk tekstürlenmiş numunenin ise 20 μm 'nin üstünde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar göstermiştir ki çözelti içindeki % NaOH miktarının artması (aynı % IPA ve tekstürleme sürelerinde) oluşturulan piramitlerin boyutlarını arttırmaktadır. Sürenin tekstürlenmeye olan etkisi incelendiğinde 20 dk sürelerde tekstürlenmiş numunelerde örneğin % 1 NaOH-% 5 IPA-20 dk ve % 3,5 NaOH-% 2 IPA-20 dk parametreleri ile tekstürlenmiş numunelerde olduğu gibi kısmi boşluklar olduğu görülmüştür. Boşluksuz yüzeylerin homojen piramit boyları % 3,5 NaOH-% 5 IPA-40 dk ve % 3,5 NaOH-% 8 IPA-20dk parametreleri ile tekstürlenmiş numunelerde elde edilmiştir. Özellikle boyları % 3,5 NaOH-% 5 IPA-40 dk parametreleri hem % R hem de homojen tekstürleme sonuçlarına dolayısıyla oldukça dikkat çekicidir.

Tekstürleme işleminde % NaOH, % IPA miktarları ve tekstürleme süresi deneysel parametrelerin Si yongaların reflektans değerlerine etkileri regresyon analizi ile 11

farklı lineer veya lineer olmayan fonksiyon kullanılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüklerinin minimizasyonu amacıyla 4 farklı optimizasyon algoritması (Diferansiyel Gelişim, Nelder-Mead, Rastgele Arama ve Benzetimli Tavlama Algoritmaları) ile oluşturulan her bir model için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modeller incelendiğinde en yüksek R^2 değerleri TON modelde (0,997) ve daha sonra ise SOTNR (0,989) modellerde elde edilmiştir. Bütün modeller incelendiğinde oluşturulan modelin derecesinin artması ve rasyonel formda yazılması genel olarak R^2 değerini arttırmaktadır. Si yongaların tekstürlenmesi prosesi için yapılan optimizasyon çalışmalarında en yüksek R^2 değerine sahip TON fonksiyon için DE ve SA algoritmaları % 4,18 NaOH-% 8 IPA-10 dk tekstürleme parametreleri kullanılırsa % R değeri 12,997 olacağını tahmin etmektedir. Diğer en yüksek R^2 değerine sahip SOTNR modelde ise SA algoritmasının önerdiği 3,9-2,17-59 değerlerindeki 1-n-t üçlü deney seti hem en düşük % R değerinin (10,004) elde edilebileceği hem de kimyasal tüketiminin nispeten az olması açısından en dikkat çekici sonuçtur.

Deneysel çalışmalarda tekstürleme prosesi ile ilgili yaşanan en büyük problem uzun süreli çalışma programlarında çalışmaların yapıldığı çeker ocağın ısınan çözültiden çıkan kimyasalı tam olarak uzaklaştıramaması problemidir. Bilindiği gibi NaOH insan sağlığı için oldukça tehlikeli ve göz ile temas etmesi durumunda körlüğe sebep olan bir kimyasaldır. Ayrıca soksalet sisteminde yalnızca iki Si yonga aynı anda tekstürlenebilmektedir. Bu durum kullanılan kimyasal miktarının ve süresinin artmasına sebep olmaktadır.

P-n kavşak oluşturma, yansıtma yüzey kaplama ve akım toplayıcıların oluşturulması: Tekstürleme işlemleri ile % R değerlerinin en düşük olduğu Si yongalar üzerine n-p kavşak üretimi % 1 borik asit-DI su solüsyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrasında numunelerin SIMS analizi kavşak derinliği 10×10^{16} atom/cm³ konsantrasyon değerinde ortalama 1,52 μ m olarak ölçülmüştür. P-n kavşak oluşturulmuş Si yongaların ön yüzeylerine yansıtma yüzey kaplama çalışmaları kapsamında 100 nm İTO ince filmi Meyer Burger AK1000 PECVD/PVD cihazı kullanılarak biriktirilmiştir. İTO kaplaması öncesi ve sonrası numunelerin

reflektans-dalga boyu ölçümlerinde 400-800 nm dalga boyu aralığında % R değeri % 54,2 azalarak % 7,83 olarak ölçülmüştür. Akım toplayıcıların oluşturulması Dek Horizon 03IX Ekran Yazıcı cihazı ile gümüş pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonrasında yapılan optik mikroskop incelemelerinde yüzeye biriktirilen gümüş partiküllerinin boşluksuz yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca metal tarakların kalınlığı yaklaşık 50 µm ve bas barın kalınlığı 850 µm olarak ölçülmüştür. Güneş hücresi üretimi çalışmalarının en son aşamasında akım toplayıcıların elektriksel bağlantıları ticari olarak güneş hücresi bağlantılarında kullanılan kalay telinin hücrelere havya kullanılarak birleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında 20 adet 2,5 cm x 2,5 cm boyutlarında Si tabanlı tek kavşaklı güneş hücresi üretilmiştir. Hücrelerin güneş simülatöründe ölçümleri sonrasında en yüksek açık devre voltajı (V_{OC}) 494 mV, kısa devre akımı (I_{SC}) 13,95 mA, doluluk faktörü (FF) % 80,1 ve hücre verimi (η) ise 8,83 olarak ölçülmüştür.

Öneriler

İngot üretimi aşamasında uzun vadede cihaz veriminin artırılması amacıyla cihazın kurulu olduğu laboratuvarın temiz odaya çevrilmesi ve kullanıcılar tarafından temiz oda kıyafetlerinin kullanılması faydalı olacaktır.

Kesme verimin artırılması, sistemde mevcut kullanılan 300 µm kesme telinin daha ince ve aşındırıcı elmas partikül yoğunluğu daha yüksek tellerin kullanılması ile sağlanabilir. Ayrıca cihazın kullanım alanının kapalı sistem haline çevrilmesi ortam kirliliklerinden kaynaklanan cihaz arızaları ve tel kopmalarını engelleyecek ve cihaz performansını arttıracaktır.

Si wafer lepleme prosesinde karşılaşılan problemlerin azaltılması ve üretim veriminin artması için sisteme bazı ilave aparatlar takılması ve ölçüm aletlerin alınması faydalı olacaktır. Cam altlığa yapıştırılan Si waferin paralellik problemi Logitech WSBU Wafer Substrate Bonding Units cihazı kullanılarak çözülebilir.

Ayrıca Logitech GI Flatness Measurement cihazı lepleme işlemi öncesinde yapıştırılan waferin düzgünlüğünü ölçerek açısal ayarlama plakası ile ince ayarların yapılabilmesine olanak sağlayacaktır. Lepleme plakasının düzgünlüğünün bozulmaması için düzleştirme dökme demiri belirli aralıklarda lepleme plakasının üzerine konulmalıdır. Ancak sistemde yalnızca bir tane tutma kolu vardır. Bu kol numune tutma kafasını tutmaktadır. İkinci bir tutma kolu cihaza monte edilebilmektedir. Cihaza gerekli modifikasyonlar yapıldıktan sonra aynı anda hem plaka düzleştirme hem de Si wafer lepleme işlemi yapılabilir.

Güneş hücresi üretimi çalışmalarında parlatılmış numunelerin alkali dağlayıcılarla tekstürleme işlemi yapıldığı için parlatma yapılmamış numunelerin kullanımıyla gereksiz zaman ve malzeme kaybı azaltılacaktır.

Tekstürleme prosesinde karşılaşılan problemlerin azaltılması ve prosesin pratik hale getirilmesi amacıyla deneysel çalışmaların yapıldığı çeker ocağın vakum kapasitesinin artırılması öncelikli olarak yapılmalıdır. Ayrıca soksalet sistemi yerine daha fazla numunenin aynı anda konulabileceği ve çıkartılabileceği daha büyük bir haznenin tasarlanması prosesin kontrolü açısından faydalı olacaktır.

Güneş hücresi verimi; (i) daha ince Si wafer ($\leq 200 \mu\text{m}$) altlık kullanımı, (ii) Si yongaların alkali ile dağlanması sonrası nano tekstürlenmesi ile % R değerinin azaltılması, (iii) p-n kavşak oluşturma çalışmalarında borik asit yerine amorf Si'nin (p-tipi) kullanılması ve (iv) İTO kaplamanın sadece Si yongaların üst kısmına değil her iki kısmına da biriktirilmesi ile arttırılabilir.

KAYNAKLAR

- Al-Hamdani, A., Al-Abdin, F. ve Ali, J. (2016). Effect of Angle of Orientation of Flat Mirror Concentrator on Solar Panel System Output. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 18(1-I), 16-23.
- Andreaco, M. S., Marlar, T. ve Quinton, B. (2014). Crystal Growth Chamber With O-Ring Seal For Czochralski Growth Station: Google Patents.
- Anttila, O. (2006). Some Observations of Growth of Cz-Silicon and Dream of Ideal Growth. *ECS Transactions*, 3(4), 3-23.
- Anttila, O., Tilli, M. ve Lindroos, V. (1985). *Computer Modelling of the Temperature Distribution in the Silicon Single Crystals During Growth and the Thermal History of the Crystal*. MRS Online Proceedings Library Archive, 59.
- Aslan, N. ve Cebeci, Y. (2007). Application of Box–Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals. *Fuel*, 86(1), 90-97.
- Bates, D. M. ve Watts, D. G. (1988). *Nonlinear regression analysis and its applications*. New York: Wiley.
- Bates, S. P. (2000). Silicon wafer processing. *Industry Initiatives for Science and Math Education (IISME)*, San Jose, CA.
- Bergholz, W. ve Gilles, D. (2000). Impact of research on defects in silicon on the microelectronic industry. *Physica Status Solidi (B)*, 222(1), 5-23.
- Borghesi, A., Pivac, B., Sassella, A. ve Stella, A. (1995). Oxygen precipitation in silicon. *Journal of Applied Physics*, 77(9), 4169-4244.
- Box, G. E. ve Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2(4), 455-475.
- Braunsfurth, M., Skeldon, A., Juel, A., Mullin, T. ve Riley, D. (1997). Free convection in liquid gallium. *Journal of Fluid Mechanics*, 342, 295-314.

- Breitenstein, O., Altermatt, P., Ramspeck, K., Green, M., Zhao, J. ve Schenk, A. (2006). *Interpretation of the commonly observed IV characteristics of c-Si cells having ideality factor larger than two*. 4th IEEE World Conference, USA.
- Brice, J. (1968). Analysis of the temperature distribution in pulled crystals. *Journal of Crystal Growth*, 2(6), 395-401.
- Bye, G. ve Ceccaroli, B. (2014). Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 634-646.
- Carruthers, J. ve Nassau, K. (1968). Nonmixing cells due to crucible rotation during Czochralski crystal growth. *Journal of Applied Physics*, 39(11), 5205-5214.
- Carslaw, H. S. (1921). *Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids* (Vol. 2). London: Macmillan.
- Chiang, C. L. (2003). *Statistical methods of analysis*. London: World Scientific.
- Chung, C. (2014). Generation of diamond wire sliced wafer surface based on the distribution of diamond grits. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(5), 789-796.
- Committee, F. (1999). *Practice for Conversion Between Resistivity and Dopant Density for Boron-Doped, Phosphorus-Doped, and Arsenic-Doped Silicon*. Technical Representative, ASTM International.
- Coriell, S. ve Sekerka, R. (1981). Effect of convective flow on morphological stability. *PhysicoChem. Hydridyn*, 2, 281.
- Çanka Kılıç, F. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Engineer and The Machinery Magazine* (671).
- Das, A. (2012). *Development of high-efficiency boron diffused silicon solar cells*. Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Dash, W. C. (1959). Growth of silicon crystals free from dislocations. *Journal of Applied Physics*, 30(4), 459-474.

- Davis, J., Rohatgi, A., Hopkins, R. H., Blais, P. D., Rai-Choudhury, P., McCormick, J. R. ve Mollenkopf, H. (1980). Impurities in silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 27(4), 677-687.
- De Kock, A. (1970). Vacancy Clusters In Dislocation Free Silicon. *Applied Physics Letters*, 16(3), 100-102.
- DeGarmo, E. P., Black, J. T., Kohser, R. A. ve Klamecki, B. E. (1997). *Materials and process in manufacturing*. New York: John Wiley & Sons.
- Dette, H., Haines, L. M. ve Imhof, L. (1999). Optimal designs for rational models and weighted polynomial regression. *The Annals of Statistics*, 27(4), 1272-1293.
- Dhanaraj, G., Raghothamachar, B. ve Dudley, M. (2010). *Growth and Characterization of Silicon Carbide Crystals*. Berlin: Springer.
- Doi, T., Marinescu, I. D. ve Kurokawa, S. (2011). *Advances in CMP/polishing Technologies for the Manufacture of Electronic Devices*. Oxford: Elsevier.
- Dornberger, E. ve von Ammon, W. (1996). The Dependence of Ring- Like Distributed Stacking Faults on the Axial Temperature Gradient of Growing Czochralski Silicon Crystals. *Journal of the Electrochemical Society*, 143(5), 1648-1653.
- Draper, N. R., Smith, H. ve Pownell, E. (1966). *Applied regression analysis*. New York: Wiley.
- Duffar, T. (2010). *Crystal growth processes based on capillarity: Czochralski, floating zone, shaping and crucible techniques*. New York: John Wiley & Sons.
- Duffie, J. A. ve Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. New York: John Wiley & Sons.
- Ekhult, U. ve Carlberg, T. (1986). Czochralski growth of tin crystals under constant pull rate and IR diameter control. *Journal of Crystal Growth*, 76(2), 317-322.

- Ekhlut, U. ve Carlberg, T. (1989). Oxygen and carbon incorporation during infra-red assisted Czochralski growth of silicon crystals. *Journal of Crystal Growth*, 98(4), 801-809.
- Falster, R. ve Voronkov, V. (2000). The engineering of intrinsic point defects in silicon wafers and crystals. *Materials Science and Engineering: B*, 73(1), 87-94.
- Falster, R., Voronkov, V. ve Quast, F. (2000). On the properties of the intrinsic point defects in silicon: a perspective from crystal growth and wafer processing. *Physica Status Solidi B Basic Research*, 222(1), 219-244.
- Forster, M., Fourmond, E., Rougieux, F., Cuevas, A., Gotoh, R., Fujiwara, K., . . . Lemiti, M. (2012). Boron-oxygen defect in Czochralski-silicon co-doped with gallium and boron. *Applied Physics Letters*, 100(4), 042110.
- Fox, J. (1997). *Applied regression analysis, linear models, and related methods*. California: Sage Publications.
- Francis, T. (1971). Process for producing pyrolytic carbon impregnated thermal insulating carbonized felt: Google Patents.
- Glunz, S., Rein, S., Lee, J. ve Warta, W. (2001). Minority carrier lifetime degradation in boron-doped Czochralski silicon. *Journal of Applied Physics*, 90(5), 2397-2404.
- Green, M. A. (2009). The path to 25 % silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17(3), 183-189.
- Green, M. A. ve Keevers, M. J. (1995). Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 3(3), 189-192.
- Hanief, M. ve Wani, M. (2015). Modeling and prediction of surface roughness for running-in wear using Gauss-Newton algorithm and ANN. *Applied Surface Science*, 357, 1573-1577.

- Harada, K., Tanaka, H., Matsubara, J., Shimanuki, Y. ve Furuya, H. (1995). Origins of metal impurities in single-crystal Czochralski silicon. *Journal of Crystal Growth*, 154(1-2), 47-53.
- Hobgood, H., Swanson, B. ve Thomas, R. (1987). Czochralski growth of CdTe and CdMnTe from liquid encapsulated melts. *Journal of Crystal Growth*, 85(3), 510-520.
- Hoshi, K., Suzuki, T., Okubo, Y. ve Isawa, N. (1980). Cz-Silicon Crystal Grown In Transverse Magnetic-Fields. *Journal of the Electrochemical Society*, 132(3), 693-700.
- Hull, R. (1999). *Properties of crystalline silicon*. London: INSPEC.
- Hurle, D. (1983). Analytical representation of the shape of the meniscus in Czochralski growth. *Journal of Crystal Growth*, 63(1), 13-17.
- Istratov, A., Buonassisi, T., Pickett, M., Heuer, M., & Weber, E. (2006). Control of metal impurities in “dirty” multicrystalline silicon for solar cells. *Materials Science and Engineering: B*, 134(2), 282-286.
- Javidi, M. (2006). *Czochralski silicon crystal growth: Modeling and simulation study*. Doktora Tezi, Harvard University, USA.
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*. Oxford: Elsevier.
- Kanagarajan, D., Karthikeyan, R., Palanikumar, K. ve Davim, J. P. (2008). Optimization of electrical discharge machining characteristics of WC/Co composites using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(11-12), 1124-1132.
- Karnopp, D. C. (1963). Random search techniques for optimization problems. *Automatica*, 1(2-3), 111-121.

- Kayabasi, E., Ozturk, S., Celik, E. ve Kurt, H. (2017). Determination of cutting parameters for silicon wafer with a Diamond Wire Saw using an artificial neural network. *Solar Energy*, 149, 285-293.
- Kern, W. (1990). The evolution of silicon wafer cleaning technology. *Journal of the Electrochemical Society*, 137(6), 1887-1892.
- Kinney, T. A. (1992). *Quantitative modelling for optimization of the Czochralski growth of silicon*. Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Klein, D. ve D'stefan, D. (1962). Controlled Etching of Silicon in the HF- HNO₃ System. *Journal of The Electrochemical Society*, 109(1), 37-42.
- Klett, R. D. (1975). High temperature insulating carbonaceous material: Google Patents.
- Kobayashi, N. (1978). Computational simulation of the melt flow during Czochralski growth. *Journal of Crystal Growth*, 43(3), 357-363.
- Kobayashi, S. (1999). Si melt growth: segregation of light elements, dopants and heavy metals. *Properties of Crystalline Silicon* (20) .London: INSPEC.
- Kray, D., Hermle, M. ve Glunz, S. W. (2008). Theory and experiments on the back side reflectance of silicon wafer solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(1), 1-15.
- Kumar, K. (2013). *High Performance Inverted Pyramidal Texture for Silicon Photovoltaics*.Doktora Tezi, University of Toronto, Toronto.
- Kuriachen, B., Somashekhar, K. ve Mathew, J. (2015). Multiresponse optimization of micro-wire electrical discharge machining process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1-4), 91-104.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. ve Neter, J. (2004). *Applied linear regression models*. Chicago: Irwin.

- Lai, J. H. (2014). *Development of low-cost high-efficiency commercial-ready advanced silicon solar cells*. Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Langlois, W., & Kim, K. (1986). *The Effect of Incorporating Radiation Enclosure Theory Into the Simulation of Melt Flow in Magnetic Czochralski Growth of Silicon*. ABD: IBM Thomas J. Watson Research Division.
- Lemons, R. ve Bösch, M. (1982). Microscopy of Si films during laser melting. *Applied Physics Letters*, 40(8), 703-706.
- Lin, W. (1994). The incorporation of oxygen into silicon crystals. *Semiconductors and Semimetals*, 42, 9-52.
- Ludge, A. ve Riemann, H. (1998). *Doping inhomogeneities in silicon crystals detected by the lateral photovoltage scanning (LPS) method*. Conference Series- Institute Of Physics: IOP Publishing.
- Luque, A. ve Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Machida, N., Hoshikawa, K. ve Shimizu, Y. (2000). The effects of argon gas flow rate and furnace pressure on oxygen concentration in Czochralski silicon single crystals grown in a transverse magnetic field. *Journal of Crystal Growth*, 210(4), 532-540.
- Maji, K. ve Pratihari, D.K. (2011). Modeling of electrical discharge machining process using conventional regression analysis and genetic algorithms. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(7), 1121-1127.
- Marinescu, I. D. ve Kurokawa, S. (2012). Advances in CMP polishing technologies. *Advances in CMP Polishing Technologies*. Oxford: Elsevier.
- Marinescu, I. D., Uhlmann, E. ve Doi, T. (2006). *Handbook of lapping and polishing*. Florida: CrC Press.

- Martin, J., Kuetsgens, U., Stümpel, J. ve Becker, P. (1998). The silicon lattice parameter-an invariant quantity of nature?. *Metrologia*, 35(6), 811.
- McDonald, D. ve Cuevas, A. (2000). Reduced fill factors in multicrystalline silicon solar cells due to injection-level dependent bulk recombination lifetimes. *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, 8, 363-375.
- McEvoy, A., Markvart, T., Castañer, L., Markvart, T. ve Castaner, L. (2003). *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Oxford: Elsevier.
- Mukherjee, R., Chakraborty, S. ve Samanta, S. (2012). Selection of wire electrical discharge machining process parameters using non-traditional optimization algorithms. *Applied Soft Computing*, 12(8), 2506-2516.
- Mullins, W. W. ve Sekerka, R. F. (1963). Morphological stability of a particle growing by diffusion or heat flow. *Journal of Applied Physics*, 34(2), 323-329.
- Myers, S. M., Seibt, M. ve Schröter, W. (2000). Mechanisms of transition-metal gettering in silicon. *Journal of Applied Physics*, 88(7), 3795-3819.
- O'Mara, W., Herring, R. B. ve Hunt, L. P. (2007). *Handbook of semiconductor silicon technology*. South Africa: Crest Publishing House.
- Pal, P. ve Sato, K. (2017). *Silicon wet bulk micromachining for MEMS*. Florida: CRC Press.
- Pal, S., Heyns, P. S., Freyer, B. H., Theron, N. J. ve Pal, S. K. (2011). Tool wear monitoring and selection of optimum cutting conditions with progressive tool wear effect and input uncertainties. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(4), 491-504.
- Patel, K., Pandey, P. M. ve Rao, P. V. (2009). Determination of an optimum parametric combination using a surface roughness prediction model for EDM of Al₂O₃/SiCw/TiC ceramic composite. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(6), 675-682.

- Pei, Z. ve Strasbaugh, A. (2001). Fine grinding of silicon wafers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(5), 659-672.
- Petersen, K. E. (1982). Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5), 420-457.
- Pham, D. ve Karaboga, D. (2012). *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks*. London: Springer Science & Business Media.
- Phang, S. ve Macdonald, D. (2011). Direct comparison of boron, phosphorus, and aluminum gettering of iron in crystalline silicon. *Journal of Applied Physics*, 109(7), 073521.
- Prasad, V. ve Larson Jr, D. (1998). Diameter-controlled Czochralski growth of silicon crystals. *Journal of Heat Transfer*, 120, 875.
- Pudasaini, P. R. (2014). *Low-cost, high-efficiency, silicon based photovoltaic devices*. Doktora Tezi, The University of Texas, San Antonio.
- Rabier, J. ve Demenet, J. (2000). Low temperature, high stress plastic deformation of semiconductors: the silicon case. *Physica Status Solidi (B)*, 222(1), 63-74.
- Rao, S. S. ve Rao, S. S. (2009). *Engineering optimization: theory and practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Rea, S. N. (1981). Czochralski silicon pull rate limits. *Journal of Crystal Growth*, 54(2), 267-274.
- Reinhardt, K. ve Kern, W. (2008). *Handbook of silicon wafer cleaning technology*. Oxford: Elsevier.
- Roosen, A. R. (1993). *Modeling crystal growth in a diffusion field with fully-faceted crystals*. Doktora Tezi, Rutgers University, New Jersey.
- Rutter, J. W. ve Chalmers, B. (1953). A prismatic substructure formed during solidification of metals. *Canadian Journal of Physics*, 31(1), 15-39.

- Ryu, K. S. (2015). *Development of low-cost and high-efficiency commercial size n-type silicon solar cells*. Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Samuels, J. ve Roberts, S. (1989). The brittle-ductile transition in silicon. I. Experiments. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 421.1860, 1-23.
- Schroder, D., Thomas, R. N. ve Swartz, J. C. (1978). Free carrier absorption in silicon. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 13(1), 180-187.
- Sethian, J. A. ve Straint, J. (1992). Crystal growth and dendritic solidification. *Journal of Computational Physics*, 98(2), 231-253.
- Sharma, V. S., Dhiman, S., Sehgal, R. ve Sharma, S. (2008). Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(4), 473-483.
- Sheoran, M. (2009). *Development of high-efficiency solar cells on thin silicon through design optimization and defect passivation*. Doktora Tezi, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Shimura, F. (2012). *Semiconductor silicon crystal technology*. Oxford: Elsevier.
- Shiraishi, Y., Takano, K., Matsubara, J., Iida, T., Takase, N., Machida, N., Yamagishi, H. (2001). Growth of silicon crystal with a diameter of 400mm and weight of 400kg. *Journal of Crystal Growth*, 229(1), 17-21.
- Sieminski, A. (2014). International energy outlook. Energy Information Administration. *Deloitte Oil and Gas Conference* (8). Houston.
- Sinno, T., Dornberger, E., Von Ammon, W., Brown, R. ve Dupret, F. (2000). Defect engineering of Czochralski single-crystal silicon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 28(5), 149-198.
- Solymar, L. ve Walsh, D. (2009). *Electrical properties of materials*. Oxford, OUP.

- Sopori, B., Devayajanam, S., Shet, S., Guhabiswas, D., Basnyat, P., Moutinho, H., Appel, J. (2013). *Characterizing damage on Si wafer surfaces cut by slurry and diamond wire sawing*. IEEE 39th, Florida, USA.
- Srivastava, R., Ramachandran, P. ve Duduković, M. (1985). Interface shape in Czochralski grown crystals: Effect of conduction and radiation. *Journal of Crystal Growth*, 73(3), 487-504.
- Storn, R. ve Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359.
- Sumino, K. ve Yonenaga, I. (1994). Oxygen effect on mechanical properties. *Semiconductors and Semimetals*, 42, 449-511.
- Sumino, K., Yonenaga, I. ve Yusa, A. (1980). Mechanical Strength of Oxygen-Doped Float-Zone Silicon Crystals. *Japanese Journal of Applied Physics*, 19(12), L763.
- Sunder, K., Buchwald, R. ve Anspach, O. (2015). *Origin of the Periodic Structures on Silicon Wafers Sawn with Diamond Wire*. 31. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany.
- Surek, T. (1976). Theory of shape stability in crystal growth from the melt. *Journal of Applied Physics*, 47(10), 4384-4393.
- Suresh, P., Rao, P. V. ve Deshmukh, S. (2002). A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(6), 675-680.
- Sze, S. (1981). Physics of semiconductor devices. *New York: Wiley*.
- Sze, S. M. ve Ng, K. K. (2006). *Physics of semiconductor devices: New York: Wiley*.

- Taishi, T., Huang, X., Yonenaga, I. ve Hoshikawa, K. (2002). Dislocation behavior in heavily germanium-doped silicon crystal. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 5(4), 409-412.
- Tempelhoff, K., Spiegelberg, F., Gleichmann, R. ve Wruck, D. (1979). Precipitation of oxygen in dislocation free silicon. *Physica Status Solidi (a)*, 56(1), 213-223.
- Tilli, M. ve Haapalinna, A. (2009). Properties of silicon. *handbook of silicon based MEMS materials and technologies* Oxford: Elsevier.
- Tilli, M., Motooka, T., Airaksinen, V.-M., Franssila, S., Paulasto-Krockel, M., ve Lindroos, V. (2015). *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. Oxford: Elsevier.
- Van der Hart, A. ve Uelhoff, W. (1981). Macroscopic Czochralski growth: I. Theoretical investigation, heat flow and growth model. *Journal of Crystal Growth*, 51(2), 251-266.
- Vedde, J. ve Gravesen, P. (1996). The fracture strength of nitrogen doped silicon wafers. *Materials Science and Engineering: B*, 36(1-3), 246-250.
- Vo-Duy, T., Ho-Huu, V., Do-Thi, T., Dang-Trung, H. ve Nguyen-Thoi, T. (2017). A global numerical approach for lightweight design optimization of laminated composite plates subjected to frequency constraints. *Composite Structures*, 159, 646-655.
- Watanabe, N., Kondo, Y., Ide, D., Matsuki, T., Takato, H. ve Sakata, I. (2010). Characterization of polycrystalline silicon wafers for solar cells sliced with novel fixed abrasive wire. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(7), 485-490.
- Woditsch, P. ve Koch, W. (2002). Solar grade silicon feedstock supply for PV industry. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72(1), 11-26.
- Wu, H. (2016). Wire sawing technology: a state-of-the-art review. *Precision Engineering*, 43, 1-9.

- Yablonovitch, E. (1982). Statistical ray optics. *JOSA*, 72(7), 899-907.
- Yablonovitch, E. ve Cody, G. D. (1982). Intensity enhancement in textured optical sheets for solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(2), 300-305.
- Yang, S. ve Natarajan, U. (2010). Multi-objective optimization of cutting parameters in turning process using differential evolution and non-dominated sorting genetic algorithm-II approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(5), 773-784.
- Yonenaga, I., Sumino, K. ve Hoshi, K. (1984). Mechanical strength of silicon crystals as a function of the oxygen concentration. *Journal of Applied Physics*, 56(8), 2346-2350.
- Yoshimura, I. (1991). High temperature furnace with thermal insulation: Google Patents.
- Yu, X., Wang, P., Li, X. ve Yang, D. (2012). Thin Czochralski silicon solar cells based on diamond wire sawing technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98, 337-342.
- Yusup, N., Sarkheyli, A., Zain, A. M., Hashim, S. Z. M. ve Ithnin, N. (2014). Estimation of optimal machining control parameters using artificial bee colony. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(6), 1463-1472.
- Zabinsky, Z. B. (2009). Random search algorithms. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Zain, A. M., Haron, H. ve Sharif, S. (2010). Simulated annealing to estimate the optimal cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling Ti-6Al-4V. *Machining Science and Technology*, 14(1), 43-62.
- Zain, A. M., Haron, H. ve Sharif, S. (2011). Genetic algorithm and simulated annealing to estimate optimal process parameters of the abrasive waterjet machining. *Engineering with Computers*, 27(3), 251-259.

Zhang, H. ve Prasad, V. (1995). A multizone adaptive process model for low and high pressure crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 155(1-2), 47-65.

Zulehner, W. (1983). Czochralski growth of silicon. *Journal of Crystal Growth*, 65(1-3), 189-213.

Zulehner, W. (1994). The growth of highly pure silicon crystals. *Metrologia*, 31(3), 255.

Zulehner, W. ve Huber, D. (1982). Czochralski-grown silicon *Silicon Chemical Etching*. Berlin: Springer.

