



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN
PRES YÖNTEMİYLE İTERKONNEKTÖR GELİŞTİRİLMESİ

SEZER ÖNBİLGİN

HAZİRAN 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN
PRES YÖNTEMİYLE İNTERKONNEKTÖR GELİŞTİRİLMESİ

SEZER ÖNBİLGİN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK

Haziran 2019

Sezer ÖNBİLGİN tarafından **Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK** danışmanlığında hazırlanan “**Katı Oksit Yakıt Pilleri İçin Pres Yöntemiyle İnterkoneksi Geliştirilmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kemal ALDAŞ, Aksaray Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Selahattin ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/..../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/..../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Sezer ÖNBİLGİN



ÖZET

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN PRES YÖNTEMİYLE İTERKONNEKTÖR GELİŞTİRİLMESİ

ÖNBİLGİN, Sezer

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK

Haziran 2019, 78 sayfa

Bu tez kapsamında, sac formundaki Crofer22 APU interkonnektör malzemelerinin pres ile şekillendirilerek akış alanlarının oluşturulduğu yeni bir interkonnektör tasarımı yapılmıştır. Bu yeni tasarım ve üretim tekniği sayesinde daha hafif, kompakt ve düşük maliyetli KOYP sistemleri üretilebilecektir. Öncelikle farklı kalınlık ve sac formundaki Crofer22 APU'nun şekillendirilebilme kabiliyeti deneysel olarak incelenmiştir. Buradan elde edilen bilgiler doğrudan şekillendirme simülasyonlarında girdi olarak kullanılarak farklı akış alanlarının malzemeye şekil olarak verilip verilemeyeceği sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, literatürden farklı olarak yüksek hacimsel (W/m^3) ve kütleli güç yoğunluğuna (W/kg) sahip interkonnektör üretimi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, tasarım 0,2 mm sac kalınlığı, 0,5 MEG kontak genişliği, 0,5 mm kanal derinliği ve 120° rib açısı olarak optimize edilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, 1 kW gücündeki bir KOYP stak için yeni nesil tasarım, geleneksel tasarıma oranla hacimsel olarak %286 ve kütleli olarak %177 daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: İterkonnektör, katı oksit yakıt pili, geometrik optimizasyon, matematiksel model, nümerik analiz

SUMMARY

DEVELOPMENT OF INTERCONNECTORS VIA PRESS-SHOP

ONBILGIN, Sezer

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Bora TIMURKUTLUK

June 2019, 78 pages

In this thesis, a new interconnector design in which the flow field is created by forming the conventional Crofer22 APU interconnector in the form of a sheet by means of a press shop was performed. This novel design enables to manufacture relatively light weight, compact and low cost SOFC systems. Firstly the formability characteristics of Crofer22 APU sheet having different thicknesses were determined experimentally. The acquired information was applied into the forming simulations in order to numerically investigate the formability of the selected designs. In addition, unlike the literature, the production of interconnectors with high volumetric (W / m^3) and mass power density (W / kg) was realized. As a result, the design is optimized in terms of 0.2 mm sheet thickness, 0.5 MEG contact width, 0.5 mm trunking depth and 120° rib angle. When the experimental results are examined, the new generation design for a 1 kW KOYP stack has a higher power density of 286% by volume and 177% by mass compared to the conventional design.

Key Words: Interconnector, solid oxide fuel cell, geometric optimization, mathematical modelling, numerical analysis

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında sac formundaki Crofer22 APU interkonnektör malzemelerinin pres yöntemi ile şekillendirilerek akış alanlarının oluşturulduğu yeni bir interkonnektör tasarımı yapılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha ince interkonnektör üretimini mümkün kılan bu metot sayesinde stak hacim ve kütlelerinin azaltılması ve bu sayede yüksek hacimsel (W/m^3) ve kütleli güç yoğunluğuna (W/kg) sahip yeni nesil kompakt bir stak geliştirilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tezim süresince kıymetli yardımlarını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Serkan TOROS ve Doç. Dr. Selahattin ÇELİK'e de en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarında desteğini esirgemeyen meslektaşım Arş. Gör. Habip Gökay KORKMAZ'a da en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deneysel çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Vestel Savunma Sanayi Kıdemli Arge Uzmanı Çiğdem TİMURKUTLUK ve Semiha DOKUYUCU'ya da en içten teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, FEB 2017/30 ÖNAP numaralı "Pres Yöntemiyle Ara Plaka Üretimi ve Katı Oksit Yakıt Pillerine Uygulanması" isimli BAP projesine desteklerinden dolayı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri komisyonuna ayrıca teşekkür ederim.

Bu tezi, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Mahmut Çetin ÖNBİLGİN'e, annem Hülya ÖNBİLGİN'e, kardeşim Necmettin ÖNBİLGİN'e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAF DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Yakıt Pilleri	1
1.1.1 Katı oksit yakıt pilleri (KOYP)	3
1.1.1.1. Membran elektrot grubu (MEG)	7
1.1.1.2. Sızdırmazlık elemanı	10
1.1.1.3. Son (alt ve üst) interkonnektör plaka ve ara interkonnektör plaka	12
1.2 Tezin Amacı	13
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI	16
2.1 İnter-konnektör Tasarımı	16
2.2 Şekillendirilebilirlik Analizi ve Pres Yöntemi	21
BÖLÜM III SAC MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	24
3.1 Deneysel Çalışmalar ve Sonuçlar	25
3.1.1 Çekme ve anizotropi deneyi	25
3.1.1.1 Deney düzeneği	26
3.1.1.2 Deney sonuçları	27
3.1.2 Crofer 22 APU çeliğinin geri esneme davranışının incelenmesi	32
3.1.3 Erichsen ve derin çekme deneyi	35
3.1.4 Crofer 22 APU sacının şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesi	38
BÖLÜM IV ŞEKİLLENDİRME VE AKIŞ ANALİZLERİ	42
4.1 İlk Tasarımın Şekillendirme ve Akış Analizi Sonuçları	42
4.2 Yeni Tasarımın Şekillendirme ve Akış Analizi Sonuçları	45
4.2.1 Yeni tasarımın rib açısı optimizasyonu	45

4.2.2 Yeni tasarımın MEG kontak genişliği optimizasyonu	49
4.2.3 Yeni tasarımın kanal derinliği optimizasyonu	51
BÖLÜM V ARA İTERKONNEKTÖR ÜRETİMİ VE STAK TASARIMI	54
5.1. Ara İterkonnektör Üretimi	54
5.2. Stak Tasarımı	57
5.3. Deneysel Kurulum	58
5.4. Stak Performans Sonuçları.....	63
BÖLÜM VI SONUÇ	67
KAYNAKLAR	70
ÖZ GEÇMİŞ	76
TEZ ÇALIŞMASINDA ÜRETİLEN YAYINLAR	77



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve temel özellikleri	3
Çizelge 3.1. İncelenen interkonnektör tasarım parametreleri	25
Çizelge 3.2. Hesaplanan Lankford parametreleri	31
Çizelge 5.1. Hacimsel ve kütleli güç yoğunluğu karşılaştırması.....	65



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Katı oksit yakıt pili çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)	4
Şekil 1.2. Monolitik KOYP tasarımı (Minh ve Takahashi, 1995).....	5
Şekil 1.3. Tüp şekilli KOYP tasarımı	6
Şekil 1.4. Düzlemsel KOYP tasarımı (Kakac vd., 2007)	6
Şekil 1.5. Membran elektrot grubu (MEG).....	8
Şekil 1.6. Sulzer-Hexis interkonnektör tasarımı (Schmidt, 1998).....	14
Şekil 1.7. Julich interkonnektör tasarımı (Blum vd., 2005).....	14
Şekil 2.1. Geleneksel interkonnektör anot akış hızı dağılımı (a) ve geliştirilen interkonnektör tasarımı anot akış hızı dağılımı (Chen vd., 2011) (b).....	18
Şekil 2.2. Yeni geliştirilen ara interkonnektör plaka kesit görünümü (Qu vd., 2011)....	20
Şekil 3.1. İnterkonnektör tasarımı kesit görüntüsü	25
Şekil 3.2. ASTM-E8 standardına uygun olarak hazırlanmış deney numunelerinin ölçüleri (mm)	26
Şekil 3.3. Crofer 22 APU için mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; 0,2 mm (a) ve (b), 0,5 mm (c) ve (d) ve 1,0 mm (e) ve (f)	30
Şekil 3.4. Farklı kalınlıklar için Holloman eğrileri.....	31
Şekil 3.5. Geri esneme için üç noktalı bükme deneyi kurulumu	33
Şekil 3.6. Deney sonuçları; L=50 mm (a), L=100 mm (b), $\theta=90^\circ$ takım açısı için deney sonrası deney numuneleri (sol taraftaki fotoğraf L=50mm ve sağ taraftaki fotoğraf L=100mm) (c).....	34
Şekil 3.7. Erichsen (a) ve derin çekme deneyleri (b).....	36
Şekil 3.8. Deney sonuçları; Erichsen (a) ve derin çekme (b)	37
Şekil 3.9. Şekillendirme sınır diyagramı (Ozturk ve Lee, 2005).....	38
Şekil 3.10. Şekillendirme sınır diyagramı oluşturmak için kullanılan deney numunelerinin teknik resimleri (Ozturk ve Lee, 2005)	39
Şekil 3.11. Crofer 22 APU sacının farklı kalınlıkları için elde edilmiş şekillendirme sınır diyagramları	41
Şekil 4.1. 0,2 mm sac kalınlığına, 0,5 mm MEG kontak genişliği ve 0,5 mm kanal derinliğine sahip tasarım; rib açısı = 90° (a) ve rib açısı = 100° (b) ve rib açısı = 105°	44

Şekil 4.2. Ara interkonnektör plaka akış analizi.....	45
Şekil 4.3. Yeni tasarım için rib optimizasyonu şekillendirme analizi sonuçları; rib açısı =90° (a), rib açısı =100° (b), rib açısı =110° (c) ve rib açısı =120° (d) .	48
Şekil 4.4. Yeni tasarım için MEG kontak genişliği optimizasyonu şekillendirme analizi sonuçları; 1 mm (a), 3 mm (b) ve 4 mm (c).....	50
Şekil 4.5. Yeni tasarım için 0,75 mm kanal derinliği şekillendirme analizi sonucu	51
Şekil 4.6. Analizler sonucunda üretimi düşünülen ara interkonnektör plaka	52
Şekil 4.7. Nihai tasarımın akış analizi basınç dağılımı (a), sıcaklık dağılımı (b) ve akışkana ait hız dağılımı (c).....	53
Şekil 5.1. Stak tasarımının; açık (a) ve kapalı hali (b).....	57
Şekil 5.2. Geleneksel stak deney sonuçları.....	63
Şekil 5.3. Yeni nesil stak deney sonuçları	64

FOTOĞRAF DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. MEG Anot Yüzeyi	9
Fotoğraf 1.2. MEG Katot Yüzeyi	10
Fotoğraf 1.3. KOYP sızdırmazlık elemanları cam seramik (a) ve mika (b).....	11
Fotoğraf 1.4. Son interkonnektör plaka	12
Fotoğraf 1.5. Ara interkonnektör plaka	13
Fotoğraf 3.1. Çekme deney düzeneği	26
Fotoğraf 3.2. Şekillendirilmiş malzeme ve referans küp	40
Fotoğraf 3.3. Şekillendirilmiş deney numuneleri (Yukarıdan aşağı doğru sırasıyla 0,2; 0,5 ve 1,0 mm sac kalınlıkları)	40
Fotoğraf 5.1. Kalıp yüzeyi	54
Fotoğraf 5.2. Hidrolik pres	55
Fotoğraf 5.3. Punta kaynak makinesi.....	56
Fotoğraf 5.4. 0,2 mm Crofer sacdan üretilen ara interkonnektör	56
Fotoğraf 5.5. Yeni hücre tasarımı	58
Fotoğraf 5.6. Son interkonnektör plakalar	58
Fotoğraf 5.7. Stak tasarımında kullanılan elemanlar	59
Fotoğraf 5.8. Stak hazırlanırken izlenen aşamalar: stak elemanlarının bir araya getirilmesi (a-d) ve stağın fırına koyulması (e-f).....	62

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

Simgeler	Açıklama
T	Sıcaklık
V	Hız
W/m ³	Hacimsel Güç Yoğunluğu
W/kg	Kütlesel Güç Yoğunluğu
σ	Gerçek gerilme
ϵ	Gerçek birim şekil değiştirme
K	Mukavemet katsayısı
N	Pekleşme üssü

Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
AYP	Alkali Yakıt Pili
DMYP	Direk Metanol Yakıt Pili
EKYP	Eriyik Karbonat Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
PEMYP	Pem Yakıt Pili
DC	Doğru Akım
MEG	Membran Elektrot Grubu
kg	Kilogram
kW	Kilo Watt
W	Watt
YSZ	İtriyum Oksit İle Stabilize Edilmiş Zirkonyum Oksit
LSM	Lantan Stronsiyum Manganez

BÖLÜM I

GİRİŞ

Günümüzde gelişen sanayi ve hızla artan nüfus sebebi ile her geçen gün insanoğlunun enerjiye olan ihtiyacı artmaktadır. Enerji gereksinimindeki artış sebebi ile doğalgaz, petrol ve kömür vb. fosil yakıt kaynakları da her geçen gün azalmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların çevreye geri dönüşü olmayan zararlı etkileri sebebi ile klasik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen enerji üretimine alternatif olarak yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu, evrende en bol bulunan element olması ve yakıt olarak kullanıldığında zararlı emisyon açığa çıkmaması gibi avantajlarından dolayı hidrojen, fosil yakıtların yerini alacak en önemli alternatif enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir (Nikolaidis ve Poullikkas, 2017; Gong vd., 2018). Evrendeki en bol bulunan element olmasına karşın hidrojen, gezegende saf halde bulunmamaktadır. Suda, fosil yakıtlar gibi hidrokarbon bileşiklerde, karbon ve diğer elementlerle bileşik halde bulunmaktadır (Penner, 2006). Bu nedenle; hidrojen, farklı yöntemler ile yukarıda belirtilen ana kaynaklardan elde edilmektedir (Najjar, 2013; Moka vd., 2014). Hidrojenin de yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri, yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi doğrudan elektrokimyasal yöntemlerle ve düşük emisyonla elektrik enerjisine dönüştüren alternatif enerji üretim teknolojisi. Yüksek verim, geniş yakıt yelpazesi, temiz enerji üretimi ve süreklilik gibi özellikleri ile yakıt pilleri gelecek için umut vadeden alternatif enerji üretim teknolojileri arasında öne çıkmaktadır (Lucia, 2014; Sharaf ve Orhan, 2014; Arshad vd., 2018).

1.1 Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri, yakıt olarak hidrojen, metanol, doğal gaz ve petrol gibi hidrokarbon yakıtların kimyasal enerjisini yüksek verimle elektrokimyasal yöntemler ile doğrudan ısı ve elektrik enerjisine çeviren aygıtlardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan türbin-jeneratör ve yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin çoğunluğunda maliyet, kaynak bulunabilirliği ve çalışma sürekliliği gibi problemler bulunmaktadır. İhtiyaç duyulan enerjiyi temiz, sürekli olarak sağlayabilme ve yakıt çeşitliliği gibi avantajlarından dolayı yakıt pilleri alternatif enerji üretimi konusunda öne çıkmaktadır (Kwok vd., 2019). Ayrıca yakıt pilleri; mevcut bataryalar, aküler ve piller ile elektrokimyasal reaksiyon sonucunda

elektrik üretmesi yönü ile benzerdirler. Fakat bu cihazlar, içerisine daha önceden depolanan enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik enerjisine dönüştürüp ihtiyaç olan enerjiyi sağlamaktadır. Öte yandan bu teknolojilerde elektrik enerjisi önceden depo edilen enerji ile orantılı olmasına karşın, yakıt pilleri hava ve yakıt ile beslendiği sürece elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleştirmekte ve ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlamaya devam etmektedir (Pettersson ve Westerholm, 2001). Yakıt pillerinin elektrik verimi %45-60 arasında değişmektedir. Ayrıca atık ısının değerlendirilmesi sonucunda verim %70-80'lere kadar çıkmaktadır (Mahamud vd., 2013). Yakıt pillerinin diğer yenilenebilir enerji sistemlerine göre birçok avantajı olduğu gibi yeni bir teknoloji olduğu için dezavantajları da bulunmaktadır.

Yakıt pillerinin kullanılabilirlik açısından önemli avantajları şöyledir (Dicks ve Rand, 2018):

- ✓ Yüksek dönüşüm verimi (%40-60)
- ✓ Yakıt olarak sadece hidrojen değil metanol, doğal gaz ve petrol gibi hidrokarbon yakıtları kullanabilme
- ✓ Çevreye zararsız emisyon (yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pili çeşitlerinde atık ısı ko-jenerasyonda kullanılabilir)
- ✓ Herhangi bir mekanik parça içermedikleri için sessiz çalışma

Yakıt pillerinin kullanılabilirlik açısından önemli dezavantajları ise şöyledir (Dicks ve Rand, 2018) ;

- ✓ Yakıt pillerinde yakıt olarak yaygın bir şekilde kullanılan hidrojenin depolama problemleri olması
- ✓ AR-GE çalışmaları devam etmesi sebebiyle birim enerji maliyetinin günümüz için pahalı olması
- ✓ Özellikle taşınabilir sistemlerde batarya görevi gören yakıt pili sistemlerinin boyut ve ağırlık gibi önemli problemlerinin olması

Yakıt pilleri genel olarak kullanılan elektrolit türüne göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Celik, 2013):

- ✓ Alkali Yakıt Pili (AYP)
- ✓ Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMYP)
- ✓ Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pili (DMYP)
- ✓ Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)
- ✓ Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

Çizelge 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve temel özellikleri (Celik, 2013; Dicks ve Rand, 2018)

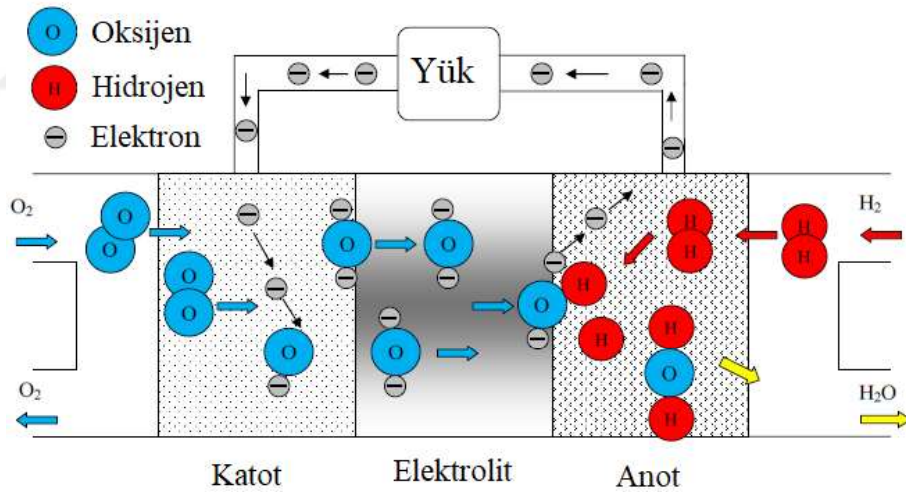
Yakıt Pilleri	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı	Elektriksel Verim	Yakıt/Oksitleyici	Temel Uygulama Alanı
AYP	Potasyum hidroksit çözeltisi	60 - 250 °C	60 - 70%	H ₂ /O ₂	Uzay Araçları
PEMYP	Proton dönüşüm membran	30-100 °C	40 - 60%	H ₂ /O ₂ , hava	Otomotiv ve sabit uygulamalar
DMYP	Polimer membran	25-90 °C	20 - 30%	CH ₃ OH/O ₂ , hava	Taşınabilir cihazlar
EKYP	Alkali karbonatlar	600 - 800 °C	65%	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava	Kojenerasyonlu sabit uygulamalar
KOYP	Erimiş alkali metal karışımı	600 - 1000 °C	60 - 65%	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava	Kojenerasyonlu sabit uygulamalar

Yakıt pillerinin son yıllarda ulaşım, evsel, askeri ve mobil alanlarda kullanılabilir seviyeye gelmesi aynı zamanda çevre dostu operasyon sunmalarından dolayı kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yakıt pillerinin genel uygulama alanları Çizelge 1.1’de verilmiştir.

1.1.1 Katı oksit yakıt pilleri (KOYP)

Temelde yakıt pillerinin özel bir tipi olan katı oksit yakıt pilleri (KOYP), yüksek sıcaklıklarda çalışan (600-1000 °C), kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik ve ısı enerjisine

yüksek verimle dönüştüren elektrokimyasal aygıtlardır. Atık gazların yüksek sıcaklıklarda olması sebebiyle kojenerasyon uygulamaları için uygun olan KOYP'lerin çalışma verimleri % 60-65'e ulaşırken atık ısıları da değerlendirildiğinde toplam verimleri %80-85'e yaklaşmaktadır. Katı oksit yakıt pillerinin çalışma prensibi Şekil 1.1'de verilmiştir. Temel olarak seramik elektrolit, katot ve anotta oluşan ve membran elektrot grubu (MEG) olarak adlandırılan yapı, KOYP sistemlerinin kilit elemanıdır. Üzerlerinde akış kanalları bulunan ve interkonnektör olarak adlandırılan plakalar arasına yerleştirilen MEG'in anot tarafına hidrojen katot tarafına ise oksijen/hava beslenmektedir. Katot elektrokimyasal reaksiyonları neticesinde üretilen oksijen iyonları seçici geçirgen seramik elektrolitten geçerek anot tarafına ulaşmakta ve burada hidrojen ile elektrokimyasal reaksiyona girerek elektronları açığa çıkarmaktadır. Açığa çıkan elektronlar interkonnektörler vasıtasıyla anot bölgesinden katot bölgesine doğru dış bir devreden dolaştırılarak elektrik akımı oluşması sağlanır ve elektroliz ters reaksiyonları olarak da tanımlanabilecek olan yakıt pili reaksiyon sonrası, doğru akım (DC) elektrik üretilmiş olur.



Şekil 1.1. Katı oksit yakıt pili çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)

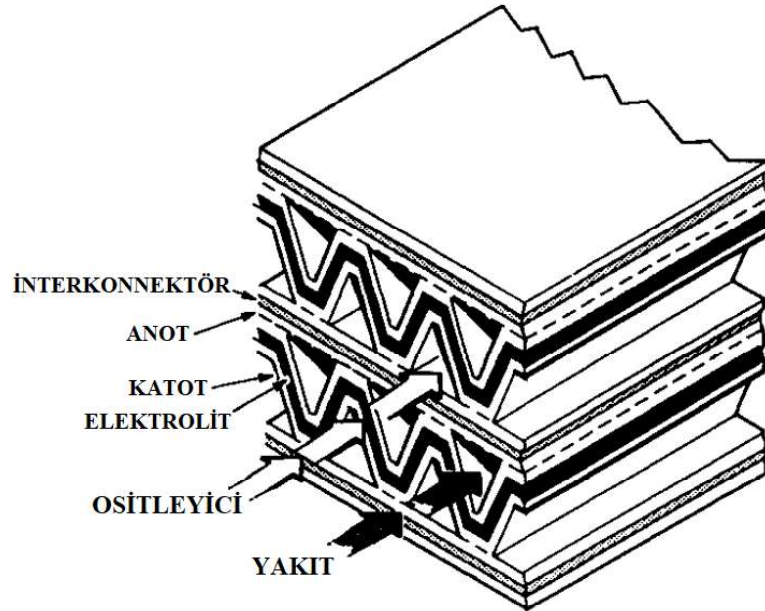
KOYP'de reaksiyonlar şu şekilde meydana gelmektedir;



Kimyasal denge durumunda yukarıda verilmiş olan reaksiyonlar sonucunda oluşan potansiyel fark yaklaşık olarak 1,1-1,2 V civarındadır. Gerçek voltaj ise çalışma anındaki sıcaklık ve kısmi olarak oluşan oksijen basıncı ile değişmektedir (Bhattacharya vd., 2018).

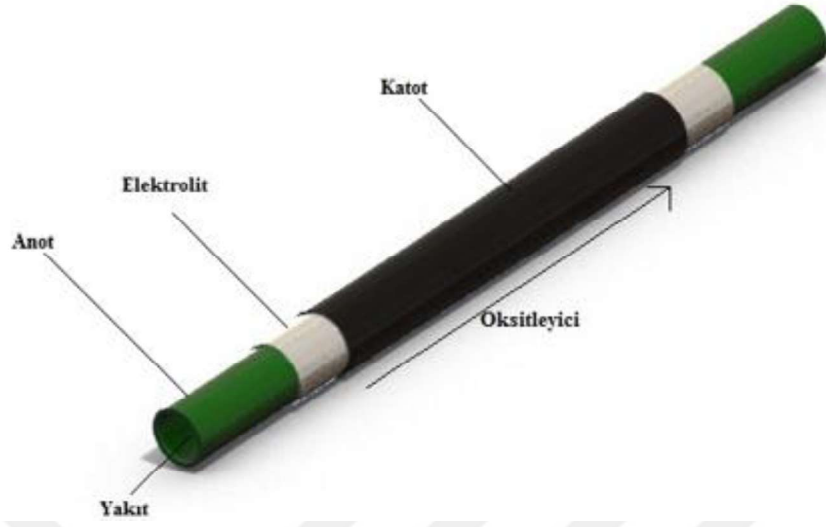
KOYP'nin literatürde yaygın olarak üç tip tasarımı bulunmaktadır. Bunlar;

- ✓ Monolitik KOYP
- ✓ Tüp KOYP
- ✓ Düzlemsel KOYP

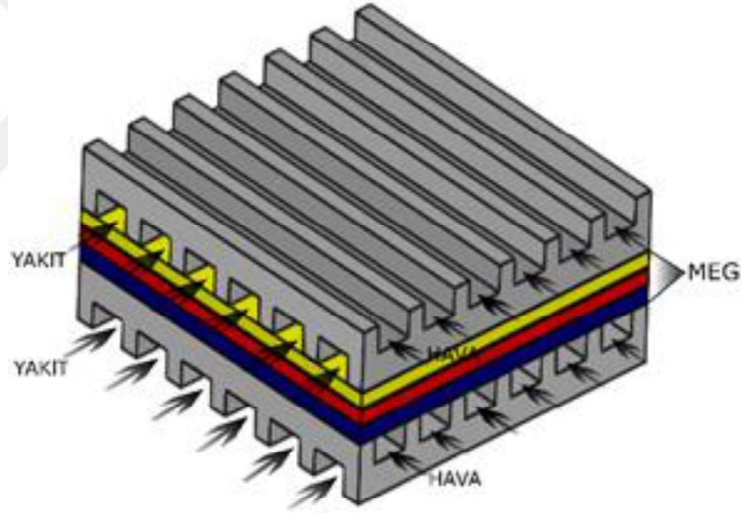


Şekil 1.2. Monolitik KOYP tasarımı (Minh ve Takahashi, 1995)

Monolitik KOYP Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Bu tasarımın en önemli dezavantajı üretiminin zor olmasıdır.



Şekil 1.3. Tüp şekilli KOYP tasarımı



Şekil 1.4. Düzlemsel KOYP tasarımı (Kakac vd., 2007)

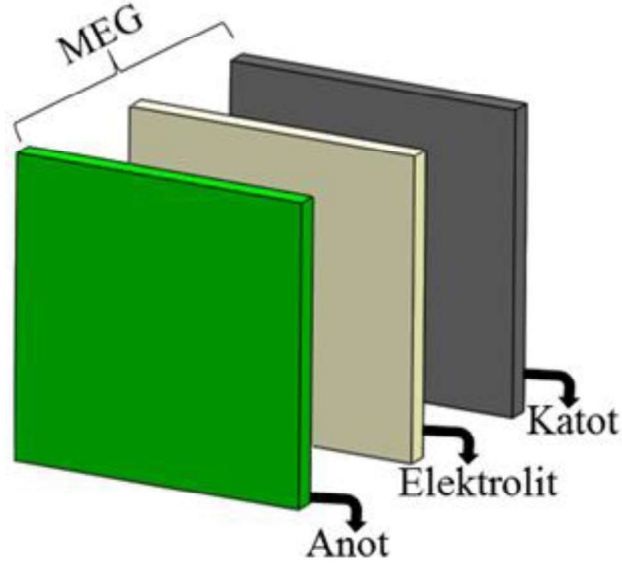
Tüp KOYP'lerin (Şekil 1.3) düzlemsel KOYP'lere (Şekil 1.4) göre küçük boyutlar, yüksek termal gerilme dayanımı ve sistemin hızlı devreye girmesi gibi termal ve mekanik özellikler bakımından üstünlükleri vardır (Ye vd., 2014). Ayrıca, tüp şekilli katı oksit yakıt pillerinin güç yoğunluğu hücrenin çapıyla ters orantılıdır, yani daha küçük çaplı hücrelerden daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmektedir (Howe vd., 2011). Bu durum mikro-tüp KOYP'lerin üretilmesine de zemin hazırlamıştır. Mikro-tüp KOYP tasarımının avantajlarının yanında düzlemsel KOYP'ler, diğer KOYP tasarımlarının ulaşamadığı

seviyede güç yoğunluğuna sahip olmaları, üretim kolaylığı gibi öne çıkan özelliklere sahiptir. Ayrıca, mikro-tüp KOYP tasarımının interkonnektör üretimi düzlemsel KOYP'lere göre daha zor ve karmaşıktır.

Tipik bir KOYP hücresi iki interkonnektör arasına yerleştirilmiş elektrolit, anot ve katottan meydana gelen bir MEG ve yakıt ile havanın birbirine karışmasını ve kısa devreyi önlemek amacı ile sızdırmazlık elemanlarından oluşmaktadır. Tek hücreden elde edilen voltaj ve gücün artırılması için bu hücreler seri/paralel olarak bağlanarak KOYP staklarını meydana getirmektedir. Çoklu hücre olarak da değerlendirilebilecek olan KOYP stakta üretilen akımın toplanması için iki son (alt ve üst) interkonnektör plaka ve hücrelerin birbirine elektriksel olarak bağlanabilmesi için ise ara interkonnektör plakalar yer almaktadır. Sisteme yakıt ve havanın sağlanabilmesi için son interkonnektörlerin tek, ara interkonnektörlerin ise iki yüzeyinde birden akış kanalları yer almaktadır. Yani; KOYP sistemi bu üç temel elemandan oluşmaktadır.

1.1.1.1. Membran elektrot grubu (MEG)

Yakıt pillerindeki anot, elektrolit ve katot olmak üzere üç ana yapıdan meydana gelen tasarıma "Membran Elektrot Grubu (MEG)" adı verilmektedir. MEG'in yaygın olarak kullanılan tasarımı Şekil 1.5'te şematik gösterimi verilen elektrolit destekli KOYP hücresidir. Bu KOYP hücresi diğer bileşenlere mekanik destek sağlamak amacı ile kalın olan bir elektrolit üzerine farklı yöntemlerle kaplanan anot ve katot tabakalarından oluşmaktadır.



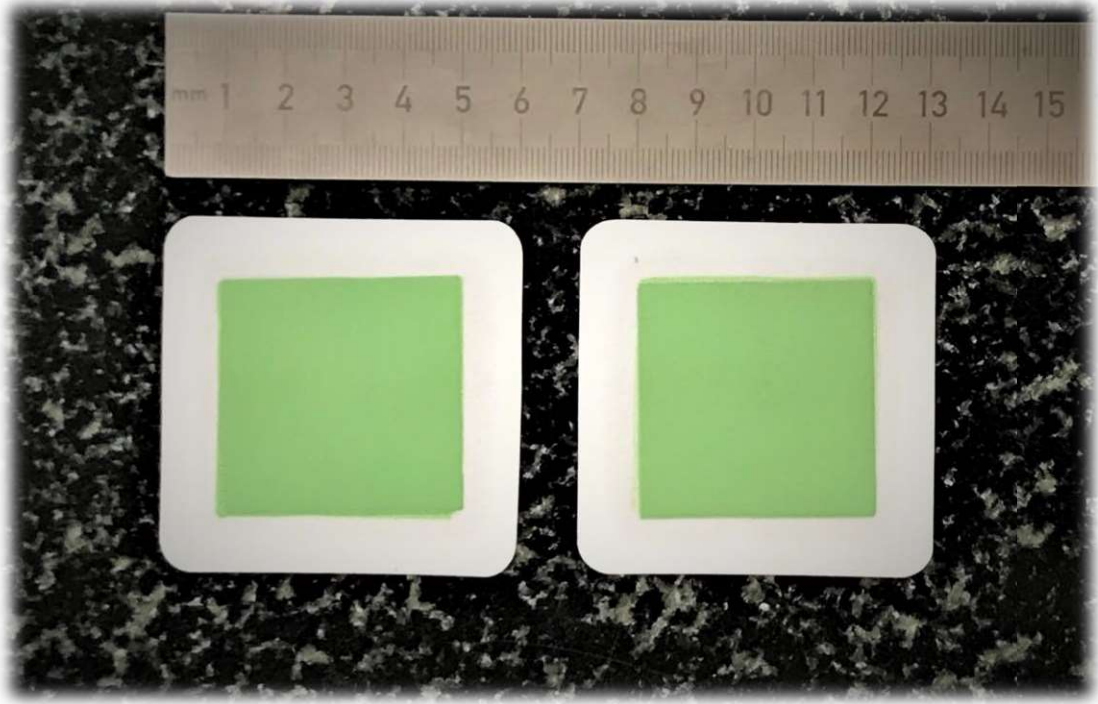
Şekil 1.5. Membran elektrot grubu (MEG)

KOYP çalışma sıcaklığını ve dolayısı ile hücre, stak veya komple bir sistemde kullanılacak malzemeleri ve sistem performansını belirleyen en önemli parametre ise elektrolit malzemesidir. Elektrolit malzemesi seçimi yapılacağı zaman yüksek oksijen iyon iletkenliği, ihmal edilebilir düzeyde elektrik iletkenliği ve anot-katot malzemelerine karşı kimyasal kararlılık gibi özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. En yaygın olarak kullanılan elektrolit malzemesi ise itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit (YSZ) olarak dikkat çekmektedir. Elektrolit üzerine kaplanmış anot bölgesindeki hidrojen, katottan gelen oksijen iyonu ile oksitlenmektedir. Bu yüzden, anot malzemesi temel olarak aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır:

- ✓ Hidrojen oksidasyonu için yüksek katalitik aktivite
- ✓ Gözenekli yapıya
- ✓ Diğer bileşenler ile benzer ısıl genleşme katsayısı
- ✓ İyon iletkenliği
- ✓ Elektriksel iletkenlik
- ✓ Elektrokimyasal reaksiyon sırasında oksitlenmeme

Bütün bu özellikleri sağlayabilen tek bir malzeme olmadığı için KOYP anot olarak kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Anot ve elektrolit yüzeylerin yapışık olarak kalabilmeleri amacıyla iki yüzeyin malzemeleri benzer ısıl genleşmelere sahip olmalıdır.

Öte yandan anot elektrokimyasal reaksiyonları reaktant-katalizör-iyon iletken ara yüzlerinde meydana gelmektedir. Bu yüzden tipik bir KOYP anot katalizör görevi gören ve elektronik iletkenlik sağlayan metal ile elektrolit malzemesinin bileşiminden oluşmaktadır. Bu kapsamda NiO-YSZ en yaygın KOYP anot malzemesi olarak dikkat çekmektedir. Fotoğraf 1.1’de Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Vestel Savunma Sanayi A.Ş. tarafından üretilen elektrolit destekli KOYP anot yüzeyi verilmiştir.



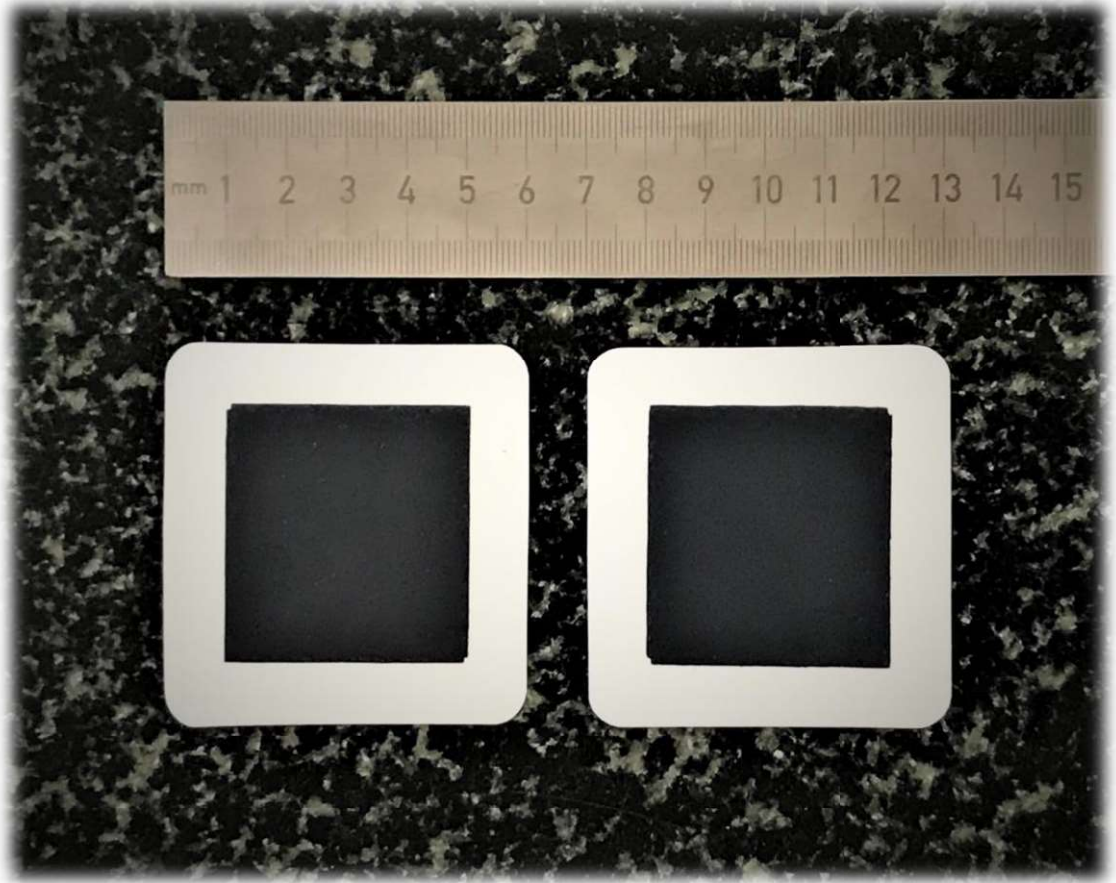
Fotoğraf 1.1. MEG Anot Yüzeyi

Elektrolit üzerine kaplanmış katot bölgesinde ise oksijen, oksijen iyonuna indirgenmektedir. Bu yüzden, katot malzemesi aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır;

- ✓ Oksijen indirgemesi için yüksek katalitik aktivite
- ✓ Gözenekli yapı
- ✓ Diğer bileşenler ile uyumlu ısıl genleşme katsayısı
- ✓ İyonik ve elektronik iletkenlik

KOYP anoda benzer şekilde gerek ısıl genleşme uyumu gerekse de daha fazla elektrokimyasal reaksiyon bölgelerinin ve bu sayede yüksek performans elde edilmesi

için KOYP katot katalizörüne de elektrolit malzemesi eklenmektedir. Bu kapsamda en yaygın kullanılan KOYP katot malzemesinin LSM (lantanyum stransiyum mangan oksit) – YSZ olduğu görülmektedir. Fotoğraf 1.2’de elektrolit destekli KOYP katot yüzeyi verilmiştir.



Fotoğraf 1.2. MEG Katot Yüzeyi

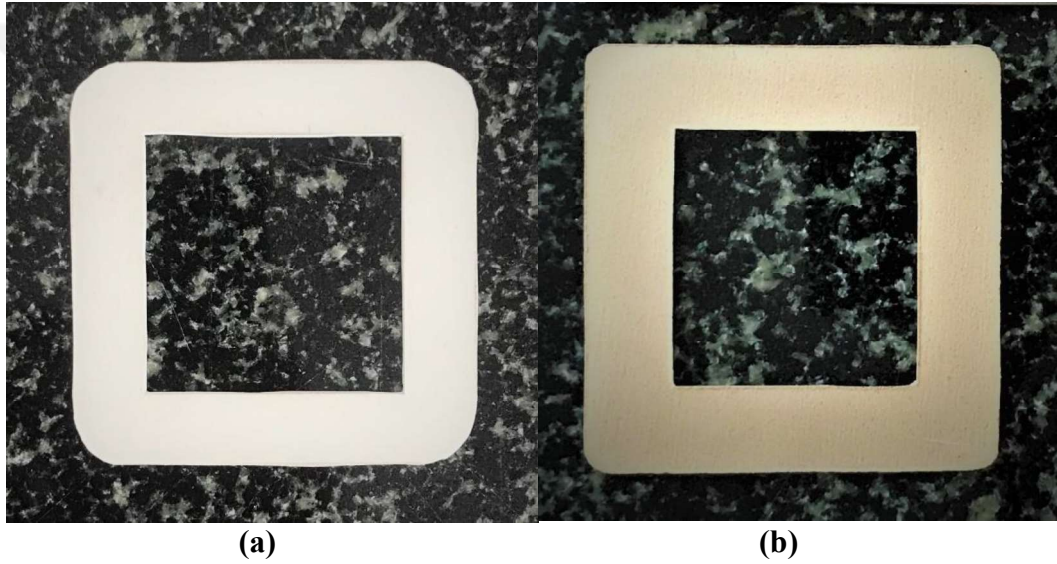
1.1.1.2. Sızdırmazlık Elemanı

KOYP'lerin uygulama alanlarını daha da genişletmek için çözülmesi gereken tasarım ve uygulama ile ilgili bir takım problemler bulunmaktadır. Uygulama esnasındaki en büyük problemlerden birisi gaz sızmalarıdır. Sızdırma problemine çözüm olması amacıyla kullanılan sızdırmazlık elemanı aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır (Fergus, 2005; Lin vd., 2012; Celik, 2015):

- ✓ Hava ve yakıtı birbirinden ayırmak
- ✓ Diğer KOYP elemanları ile benzer ısıl genişleme özelliklerine sahip olmak

- ✓ İnterkonnektör plakalar arasındaki elektriksel yalıtımı sağlamak
- ✓ Çalışma sırasında uygulanacak olan sıkıştırma basınçlarına karşı mekanik dayanım ve çevresindeki kullanılan malzemelerle gereken yapışmayı sağlamak

Literatürde en yaygın olarak kullanılan sızdırmazlık elemanı KOYP'lerde kullanmak amacıyla özel olarak hazırlanan cam seramik contalardır (Fergus, 2005). Fotoğraf 1.3'de Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Vestel Savunma Sanayi A.Ş. tarafından üretilen KOYP cam seramik sızdırmazlık elemanları verilmiştir.



Fotoğraf 1.3. KOYP sızdırmazlık elemanları cam seramik (a) ve mika (b)

Sızdırmazlık elemanı oda sıcaklığından başlayarak KOYP'lerin çalışma sıcaklıklarına kadar (600-1000 °C) bir sıcaklığa maruz kalacağı için yüksek sıcaklığa dayanımlı malzemedен yapılması gerekmektedir. Sızdırmazlık malzemesi olarak seramik kırılğan bir malzeme seçildiği düşünöldüğünde KOYP elemanlarının birbirleri arasındaki ısı genleşmelerde uyumsuzluk oluşabilmektedir. Bu durumda değışen sıcaklıklarda sızdırmazlık elemanı üzerinde çatlaklar meydana gelebilmektedir. Bu çatlaklar da hücrenin yakıt verimini ve performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle; gaz kaçaklarını ve performans kayıplarını engellemek amacıyla KOYP elemanları ile sızdırmazlık elemanı birbirine yapışarak iyi bir bağ oluşturmaları gerekmektedir (Celik, 2015).

T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Vestel Savunma Sanayi A.ř. tarafından üretilen metalik ara interkonnektör plaka verilmiştir. Gerek son gerekse de ara interkonnektör olarak KOYP'lerde yaygın olarak Crofer alaşımı tercih edilmektedir.

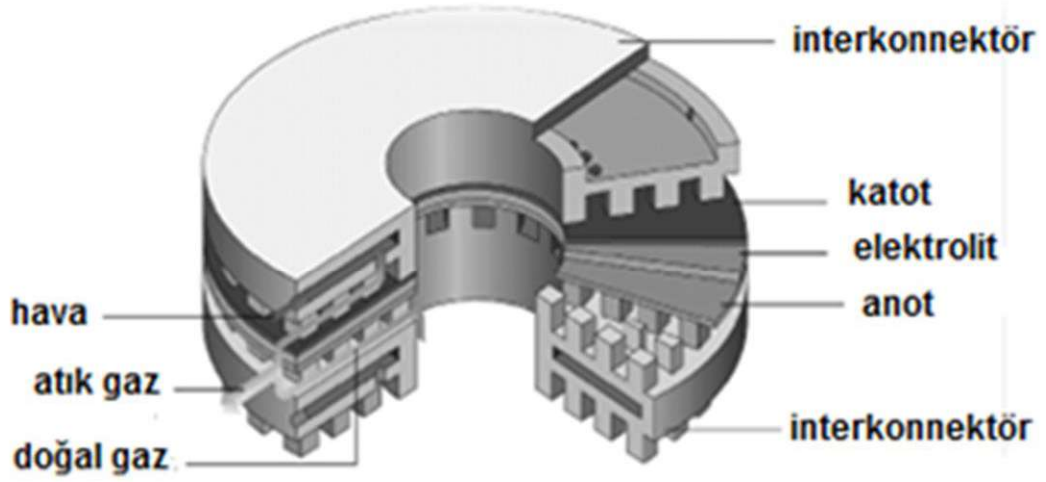


Fotoğraf 1.5. Ara interkonnektör plaka

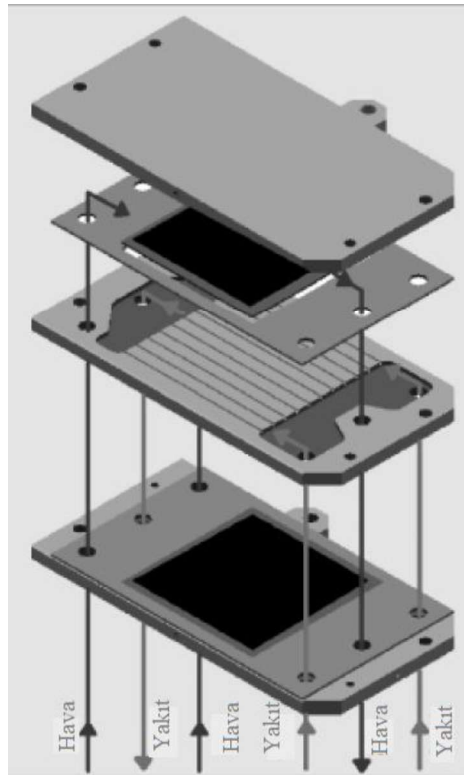
1.2 Tezin Amacı

İnterkonnektörler; üretilen akımın toplanması, stak içinde hücreler arasındaki elektriksel bağlantıların sağlanması, yakıt ve havanın sisteme beslenmesi ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ürünlerin sistemden uzaklaştırılması görevlerini üstlenmektedir. Literatürde yer alan ilk interkonnektör tasarımlarının başında İsviçre menşeli Sulzer-Hexis firması gelmektedir (Schmidt, 1998). Şekil 1.6'da görsel olarak verilen tasarımda yakıt orta kısımdaki silindirik boşluktan hücrelere dağıtılmakta iken hava dış kısımlardan içeriye doğru beslenmektedir. 950 °C çalışma sıcaklığına sahip olan bu tasarımdan Sulzer-Hexis, 70 hücre kullanarak 1,1 kW elde etmiştir. İnterkonnektörler olarak seramik malzemelerin kullanıldığı bu tasarım üzerine firmanın birçok patenti de bulunmaktadır. Daha sonra benzer tasarım yine seramik interkonnektörlere Mitsubishi ve Chubu Electric Power Company tarafından da uygulanmıştır (Nakanishi vd., 2003). Bu tasarımı kullanan 40 hücreden imal edilen stak, 1000 °C çalışma sıcaklığında 2,5 kW güç

sergilemiştir. Metalik interkonnektör tasarımında yaygın olarak tercih edilen tasarım ise Alman Julich Araştırma Merkezi'nde geliştirilmiştir (Blum vd., 2005). Şekil 1.7'de görsel olarak verilen tasarımda önceki tasarımlardaki süreksiz kanallar yerine sürekli kanallardan oluşmaktadır. Bu kanallar akışı sağlarken iki kanal arasındaki rib olarak da adlandırılan dolu kısım akım toplama görevini görmektedir.



Şekil 1.6. Sulzer-Hexis interkonnektör tasarımı (Schmidt, 1998)



Şekil 1.7. Julich interkonnektör tasarımı (Blum vd., 2005)

Bütün bu tasarımlardaki kanallar uzun süreler alan ve bu yüzden yüksek maliyet gerektiren talaşlı imalat tekniği ile imal edilmiştir. Öte yandan kanal açılması için gerekli olan kalın malzeme kullanma zorunluluğu da yine stak maliyetini arttırmaktadır. Bu tezde ise talaşlı imalat yerine pres baskı tekniği kullanılması amaçlanmıştır. Tek bir adımda çok daha ince interkonnektör üretimini mümkün kılan bu metot sayesinde stak hacim ve kütesinin azaltılması ve bu sayede yüksek hacimsel (W/m^3) ve kütesel güç yoğunluğuna (W/kg) sahip yeni nesil kompakt bir KOYP stak geliştirilmesi amaçlanmıştır.



BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

2.1 İnterkonnektör Tasarımı

Metalik interkonnektör tasarımında yaygın olarak tercih edilen tasarım Alman Julich Araştırma Merkezi'nde geliştirilmiştir (Blum vd., 2005). Tasarım önceki tasarımlardaki süreksiz kanallar yerine sürekli kanallardan oluşmaktadır. Bu kanallar akışı sağlarken iki kanal arasındaki rib olarak da adlandırılan dolu kısım akım toplama görevini görmektedir. Julich'i takiben birçok araştırmacı bu tasarım üzerinde yoğunlaşmış ve akış alanı optimizasyonu üzerinde çalışmıştır.

Bu çalışmalar arasında, Kornely vd. (2011), yaptıkları karakterizasyon çalışmasında deneysel inceleme ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonu kullanılarak, metal interkonnektör üzerindeki akış alanı geometrisi sebebi ile oluşan ohmik kayıplar ve elektrot ile metal interkonnektör arasında temas direncinden dolayı oluşan kayıplar hakkında bilgi vermişlerdir. Deneysel olarak, kanal genişliği ve MEG kontak genişliği sırası ile 1 mm ve 1 mm olacak şekilde hazırlanan akış alanı geometrisi ve katot kısımda altın elek ile anot kısımda nikel elek kullanılarak hazırlanan deney düzeneği ideal kabul edilmiştir. 1 anot, 3 katot ve 1 ideal tasarım olmak üzere 5 farklı deneme yapılmıştır. Sonuç olarak; yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarında, hücre ile metal interkonnektör teması ile ohmik kayıplar %84'e varan bir artış gösterirken katot tarafta temas direnci bu sayıya %6'dan daha az bir etki oluşturmuştur. Anot destekli hücreler ile yapılan deneylerde katot akış alanı tasarımı %41'lik bir kayba sebep olurken, anot akış alanı tasarımı < %1 bir kayba sebep olmuştur. Sonuç olarak; kanal genişliğinin 2,6 mm'den 4 mm'ye çıkarılması ve rib genişliğinin 2,4 mm'den 1 mm'ye düşürülmesi durumunda performansın 0,76 W/cm²'den 1,03 W/cm²'ye çıkarılabileceğini göstermişlerdir.

Khazae ve Rava (2017), yaptıkları çalışmada dikdörtgen kesitli gaz akış kanalları, gaz difüzyon elektrotları ve elektrolit tabakasının düzlemsel KOYP performansına etkilerini değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemine dayanan üç boyutlu bir sayısal model geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, daha önceki çalışmalarda elde edilen

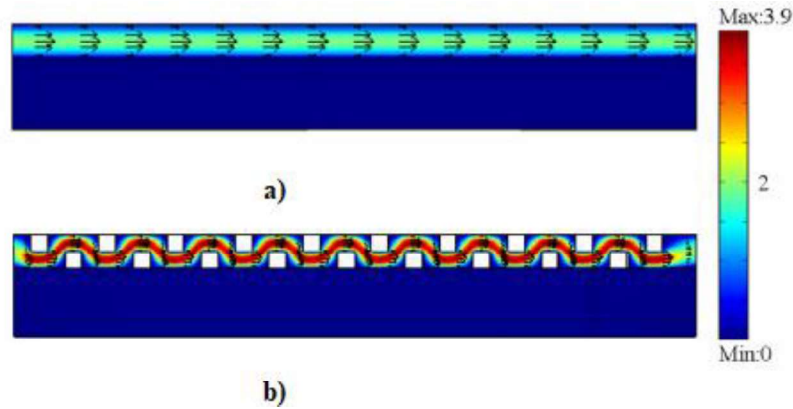
mevcut yayınlanmış deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve simülasyon sonuçlarının, özellikle düşük akımlarda deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. KOYP deney düzeneğinde, interkonnektörler üzerindeki akış kanalı geometrisi yakıt ve oksijenin homojen dağılmasında büyük öneme sahip olduğu için sabit hücre aktif alanı ve çalışma koşulları altında dikdörtgenden, üçgen ve yamuk olmak üzere 3 tip akış kanalı geometrisi performans ve hidrojen mol fraksiyonu (mol oranı) açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuç olarak anot ve katot kısımlarındaki akış kanalları için üçgen ve yamuk geometriye sahip akış kanalları ile karşılaştırıldığında dikdörtgen geometriye sahip akış alanının daha yüksek performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, sonuçlar incelendiğinde hidrojen mol fraksiyonunun, hidrojen gazı tüketimi sebebi ile uzunluğun artmasıyla kademeli bir şekilde azaldığı ve yamuk geometriye sahip akış kanalları için hidrojen mol fraksiyonunun üçgen ve dikdörtgen kanallardan daha yüksek bir değere sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Fakat akış kanalı sonunda üçgen geometriye sahip akış kanalı tasarımının hidrojen mol fraksiyonunun daha yüksek olduğunu incelemeler sonucunda elde etmişlerdir.

Zeng vd. (2018), geliştirdikleri yeni interkonnektör tasarımlarının KOYP performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç boyutlu model oluşturmuşlar ve akım yoğunluğunun ve ısıl gerilmenin hem ara interkonnektör rib şekli hem de katot içerisindeki kontak derinliği ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Bunun üzerine, voltajın 0,7 V olarak sabit kaldığı dikdörtgenden, üçgen ve yamuk olmak üzere üç farklı rib şekli ve farklı katot kontak derinliği için analiz yapmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde, standart olarak kabul edilen durumda interkonnektörlerin en dış sınırlarında anot tarafında maksimum akım yoğunluğu 4541.7 A/m^2 ve katot tarafında 4482.1 A/m^2 olarak ölçülmüştür. Farklı rib şekli için yapılan analizlerde, $1 \mu\text{m}$ katot kontak derinliğe ve üçgen rib şekline sahip interkonnektör ile standart analiz sonucunun %11,4 fazlası olan 5060 A/m^2 elde edilmiştir. Katot kontak derinliği $10 \mu\text{m}$ 'ye çıkarıldığında akım yoğunluğunun doğrusal olarak arttığı ve 5080 A/m^2 'ye ulaştığı gözlemlenmiştir.

Manglik ve Magar (2015), yaptıkları çalışmada dikdörtgen, yamuk ve üçgen olmak üzere üç farklı ara interkonnektör plaka kanal geometrisinin ısı ve kütle transferi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı akış kanalları ile ve sabit reaksiyon hızı ile simüle etmişlerdir. Dikdörtgen kanal geometrisinin, KOYP hücresi boyunca üçgen ve yamuk kanal geometrisine göre nispeten daha homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olduğu

görülmüştür. Ayrıca yakıt ve oksijen akışının üçgen ve yamuk kanal geometrisine göre dikdörtgen kanal geometrisinde daha yüksek ısı transferi katsayısı ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; dikdörtgen kanal geometrisine sahip ara interkonnektör plakası ile hazırlanan simülasyonun daha iyi ısı ve kütle transferi performansı olduğu rapor edilmiştir.

Chen vd. (2011), KOYP'ler için çift katmanlı interkonnektör adını verdikleri yeni bir interkonnektör tasarımı yapmışlar ve KOYP stağının yakıt tarafındaki konsantrasyon kayıplarını incelemek amacıyla iki boyutlu bir hücre modeli geliştirmişlerdir. Sayısal sonuçlar, yeni çift katmanlı interkonnektörün, gözenekli anottaki yakıt olarak kullanılan gazın hızını artırabildiğini göstermiştir. Hem geleneksel hem de yeni interkonnektör tasarımları için maksimum akış hızı $u_{max} = 2$ m/s parabolik giriş hızı dağılımı kullanılmıştır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi geleneksel interkonnektöre sahip KOYP'nin maksimum hızı $u_{max} = 2$ m/s iken, çift katmanlı interkonnektörün özel yapısından dolayı yeni tasarımda maksimum akış hızınının $u_{max} = 3,9$ m/s olduğu gözlemlenmiştir. Çift katmanlı interkonnektöre sahip KOYP stağının gözenekli anotundaki ortalama H_2 mol yüzdesi, geleneksel KOYP stağından yaklaşık olarak % 4,7 daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca, Üçlü faz sınırında ortalama H_2 mol yüzdesi yaklaşık % 9,2 daha yüksek olmuştur. Çift katmanlı interkonnektör tasarımının gözenekli elektrottaki kütle transferini artırabileceğini ve KOYP'nin performansını iyileştirebileceğini göstermişlerdir.



Şekil 2.1. Geleneksel interkonnektör anot akış hızı dağılımı (a) ve geliştirilen interkonnektör tasarımı anot akış hızı dağılımı (Chen vd., 2011) (b)

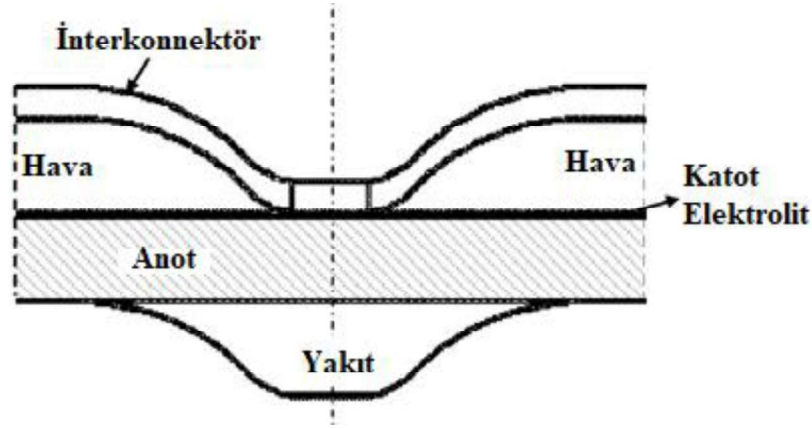
Huang vd. (2008), KOYP'ler için geliştirmiş oldukları dört farklı interkonnektör tasarımının akış dağılımını ve hücre performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İnter-konnektörlerin hepsi 12 dikdörtgen akış kanalından oluşmakta olup tasarımlar şu

şekilde yapılmıştır; (I) tek giriş / tek çıkışa sahip tasarım, (II) çift giriş / tek çıkışa sahip tasarım, (III) çift giriş / tek çıkışa sahip ortadan ikiye rib çıkıntısı ile ayrılarak elde edilen tasarım, (IV) çift giriş / tek çıkışa sahip besleme kısmında 10 adet eşit aralıklı kanatçık eklenerek elde edilen tasarım. Sonuç olarak; (IV) no'lu tasarımın diğer tasarımlar ile kıyaslandığında daha homojen bir akış dağılımına sahip olduğu ve buna bağlı olarak hücre güç yoğunluğunda yaklaşık olarak % 11'e kadar artış sağlandığı görülmüştür. Ayrıca; anot üzerinde nikel-elek kullanıldığında interkonnektör üzerindeki akış kanalları ve rib arasındaki sıcaklık dağılımındaki değişimleri önemli ölçüde azaldığı ve buna bağlı olarak hücre güç yoğunluğunun genel olarak yaklaşık % 14,6'ya kadar artış sağlandığı rapor edilmiştir.

Pulagam (2009), yaptığı çalışmada KOYP hücresi ile interkonnektör akış alanı temas yüzeyinin toplam alandaki yüzdesi %25, 40, 50, 60, 75 olmak üzere beş tip interkonnektör temas yüzeyi geliştirilmiştir. Buna ek olarak, 3m/s sabit oksijen akış hızında, hidrojen kütle oranını belirlemek amacıyla 0,4, 0,6, 0,8, 1-4 m/s olmak üzere beş farklı hidrojen akışı için inceleme yapılmıştır. Yeni interkonnektör tasarımlarının KOYP performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla üç boyutlu model oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, temas alanı arttıkça güç yoğunluğu ve sıcaklık gradyanı azalmaktadır. %60 temas oranına sahip interkonnektör tasarımı diğer tasarımlar arasında iyi termal davranış ve iyi bir güç çıkışıyla en iyi tasarım olarak seçilmiştir. 0,6 V. çalışma geriliminde %60 temas oranına sahip interkonnektör tasarımı sırasıyla 4723.85 A/m² ve 2834.31 W/m² akım ve güç yoğunluğu sergilemiş, yakıt girişi ve hava girişi arasındaki fark ise 37 K olarak belirlenmiştir. Anot akış kanalları için farklı yakıt kütle akış hızları için yapılan simülasyonlarda hidrojen akış hızının 0,4 m/s'den 0,8 m/s'ye çıkarıldığında güç çıkışında %0,66'lık bir azalma olduğu görülmüştür.

Qu vd. (2011), KOYP'ler için Şekil 2.2'de verilen ara interkonnektör plaka tasarımını geliştirmişlerdir. Çalışmada anot destekli KOYP hücresi incelenmiş ve hücre üzerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları ve geliştirilen tasarımın performansı incelenmiştir. Geliştirilen tasarımın gaz kanalları boyunca sıcaklık, akış hızı, basınç ve gaz (yakıt ve hava) konsantrasyon dağılımlarını üç boyutlu bir model oluşturularak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; hava ve yakıt giriş sıcaklığı 973 K ve %80 yakıt kullanım verimi ile çalıştığı göz önüne alınan sistemin 5000 A/m² akım yoğunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca katot kısmın geometrisi hem oksijen

dağılımı için hem de hücre performansı için önemli bir etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 2.2. Yeni geliştirilen ara interkonnektör plaka kesit görünümü (Qu vd., 2011)

Lee vd. (2016), düzlemsel anot destekli KOYP hücreleri ile hazırlanan KOYP stak modelinin yakıt kullanımı üzerine parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada; yakıtın akış hızı dışındaki çalışma koşulları sabit tutularak yakıt kullanımı arttıkça ısı ve kütle transferindeki değişim gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel olarak ölçülen performanslar arasında karşılaştırma yapılmış ve model doğrulanmıştır. Sonuç olarak; yakıt kullanımı artırıldığında yakıt kısmının girişinde düzensiz elektrokimyasal reaksiyon bölgesi oluştuğu ve hidrojen tüketimindeki artış sebebiyle anot tarafındaki kısmi oksijen basıncında artış gözlemlenmiştir.

Bhattacharya vd. (2018), yaptıkları çalışmada ara interkonnektör plaka üzerindeki akış kanallarının KOYP performansına etkisini incelemişlerdir. Bu bağlamda, serpantin ve düz olmak üzere iki tip kanal geometrisine sahip ara interkonnektör tasarlamışlardır. Tasarımı yapılan ara interkonnektör plakaların analizleri yapılmış ve önceki çalışmalarda elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde yakıt kullanımı, hücre sıcaklığı, basınç kayıpları ve akım yoğunluğu incelenmiştir. Düz kanal geometrisinin simetrik tasarım ve üretim kolaylığı gibi önemli avantajlara sahip olduğu, fakat hidrojen ve oksijenin kanalda kalma süresi düşük olmasının yakıt kullanım veriminin düşmesine sebep olduğunu belirlemişlerdir. Daha yüksek akış alanına sahip serpantin kanal geometrisi, düz kanal geometrisinin aksine gazların kanalda kalma sürelerinin yüksek olması sebebiyle daha yüksek yakıt kullanım verimi sunduğu belirtilmiştir. Yapılan analizler sonucunda serpantin kanal geometrisinde iyonik akım

yoğunluğunun iyi bir dağılım gösterdiği ve aynı zamanda yüksek yakıt kullanım verimi elde edilmesi sebebiyle önemli ölçüde daha yüksek güç çıkışına sahip olduğunu belirlemişlerdir.

2.2 Şekillendirilebilirlik Analizi ve Pres Yöntemi

Günümüzde hafif ve hacimsel olarak küçük tasarımlara olan talebin artmasıyla, düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli saclar yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Sac malzemeler için deformasyon kabiliyetinin belirlenmesinde şekillendirilebilirlik önemli bir özelliktir ve şekillendirme sınır diyagramı (FLD) ile değerlendirilmektedir. Ayrıca belirlenen tasarıma göre sac metallerde ne tür deformasyonlar oluşacağını tahmin etmek için çeşitli sayısal analiz programları kullanılmaktadır (Bhattacharya vd., 2018). Bunun yanında tez kapsamında talaşlı imalat yerine tek bir adımda çok daha ince interkonnektör üretimini mümkün kılan pres baskı tekniği kullanılması amaçlanmıştır. Bu yöntem istenen şekil ve boyutta üretim kolaylığı sağlayan bir tekniktir. Sac levha şekillendirilebilirliği için sayısal ve deneysel birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları;

Zhang vd. (2013), yaptıkları çalışmada binek bir otomobile ait çelik kaputu hafif alüminyum bir malzeme ile değiştirebilmek için dört farklı tasarım önermişlerdir. İncelenen tasarımlar; çelik dış panel alüminyum iç panel, alüminyum dış panel çelik iç panel, alüminyum dış panel alüminyum iç panel ve optimize edilmiş alüminyum dış panel alüminyum iç panel olarak dört farklı tasarım için analizler gerçekleştirilmiştir. DYNAFORM programını kullanarak üretimi düşünülen kaputun iç ve dış panelleri hem çelik hem de alüminyum olarak tasarımını gerçekleştirilerek pres yöntemi sırasında gerçekleşen (şekillendirme, kesme, ve geri esneme) işlemleri simüle edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları modal analizi ile incelenmiştir. Sayısal çalışmalar sonucunda, en hafif tasarımın 3,62 kg yani %33 ağırlık azalmasına sahip olan alüminyum dış panel alüminyum iç panel olduğu belirlenmiştir.

Lumelskyj vd. (2017), sac metal şekillendirme ve Nakazima testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sayısal simülasyonları yapılmıştır. Deneysel çalışmada; 0,85 mm kalınlığa sahip DC04 sac levhanın FLD'sini oluşturmak için 100 mm çapında zımba ve 30, 180 mm arasında 6 adet örnek kullanılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar,

sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmış ve birbirine yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak; pres yöntemi ile şekillendirme işlemi için sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilen sayısal modelin alternatif olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Lumelsky vd. (2012), yaptıkları çalışmada 1 mm kalınlığa sahip DC04 çelik sac malzemenin şekillendirilebilirliğini sayısal simülasyon ile incelemiştir. Sayısal model sacın tek eksenli gerilmesi, önceden gerilmiş malzemenin kesilmesi ve yarım küre şeklindeki bir zımba ile şekillendirilmesi gibi aşamalardan oluşmaktadır. Ayrıca malzemenin şekillendirilebilirliği deneysel olarak da incelenip simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde sayısal ve test sonuçlarının birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca sayısal model yardımıyla farklı şekillendirme işlemlerinin kolayca simüle edilebileceğini ve şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesinde kullanılabilmesini belirtmişlerdir.

Hattalli ve Srivatsa (2018), yaptıkları çalışmada sac şekillendirmeye ilgili literatürdeki çalışmaların çoğunda elde edilen ürünün kalitesi ve üretim aşamasındaki ekonomik faktörü etkileyen parametreler üzerinde durulduğunu belirtmişlerdir. Pres yöntemi ile şekillendirme işleminde genellikle, bükülme, kesilme esneme ve derin çekme gibi işlemlerin uygulanmakta olduğu ifade edilmiştir. Belirtilen işlemler sırasında kullanılan takım boyutları, baskı plakası kuvveti, üretilecek malzeme derinliği, sac kalınlığı, baskı kalıbı kuvveti ve hızı, malzemenin geri esneme özelliği ve akma dayanımı gibi birçok özelliğin sac malzeme üretimi sırasında etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Jin vd. (2014), yaptıkları çalışmada sac bir levha içerisine pres baskı metodunun bir türü olan kauçuk pres yöntemi ile iç ve dış bükey şekle sahip kanallar oluşturmuşlardır. Üretimi yapılan sac PEM yakıt pilinde bipolar (iki kutuplu) plaka olarak tasarlanmıştır. Al1050, SS304 ve Ti-G5 olmak üzere üç malzeme üzerinde deneme yapılmıştır. Yapılan denemelerde daha yumuşak bir malzeme olan Al1050 üzerinde SS304 ve Ti-G5 malzemelerine göre daha derin kanallar oluşturmanın mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Şekillendirme işlemini 30 mm/s ve 55MPa basınç altında gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak bipolar (iki kutuplu) plaka kanal derinliklerinin Al1050, SS304 ve Ti-G5 için sırasıyla 0.453, 0.307 ve 0.270 mm olduğu rapor edilmiştir.

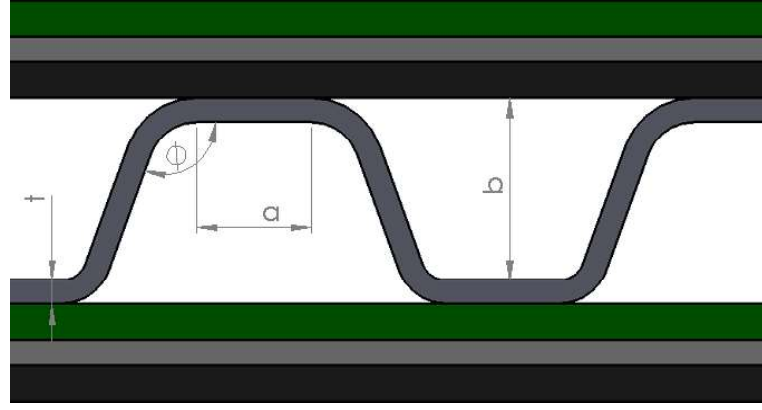
Ghadikolaee vd. (2017), yaptıkları çalışmada sac bir levha içerisine bipolar (iki kutuplu) plaka olarak kullanmayı düşündükleri akış kanallarını sac üzerine işlemek için hidro şekillendirme, elektromanyetik şekillendirme ve pres baskı pres baskı metodunun bir türü olan kauçuk pres yöntemi ile deneme yapmışlardır. Yapılan denemeler sonucunda yapılacak malzeme üretimi için kauçuk pres yönteminin diğer yöntemlere göre daha kullanılabilir olduğuna karar vermişlerdir. 0,1 mm kalınlığa sahip paslanmaz çelik 316 sac malzemesi kullanılarak yapılan deneylerde maksimum kanal derinliği 450 kN kuvvet ve 30 mm kalınlığındaki kauçuk kullanılarak yapılan denemede 0,576 mm olarak elde edilmiştir.

Liu ve Hua (2010), yaptıkları çalışmada kauçuk pres yöntemi ile SS304 sac malzemesi şekillendirilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemin sadece bir kalıp gerekli olduğu için yüksek yüzey kalitesi ve şekillendirilmiş parçaların boyutsal doğruluğu, kalıbın düşük maliyeti ve yüksek verimi gibi özellikleri ile öne çıktığını bildirmişlerdir. Bipolar (iki kutuplu) plaka olarak kullanmayı düşündükleri akış kanallarını sac üzerine işlemek için denemeler yapmışlardır. Sonuç olarak, kauçuk pres yöntemi ile bipolar plakaları imal etmenin mümkün olduğunu yapılan çalışmada göstermişlerdir.

BÖLÜM III

SAC MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu tez kapsamında KOYP için pres yöntemi ile yaygın olarak kullanılan Crofer malzemedeki interkonnektör tasarımı, modellenmesi ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Özellikle etkin bir tasarım ve gerçeğe yakın modelleme sonuçlarının elde edilmesi için malzemenin mekanik özelliklerinin doğru olarak bilinmesi/ölçülmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda farklı kalınlıklardaki (0,2 mm, 0,3 mm, 0,5 mm ve 1 mm) Crofer 22 APU sac levhaları için çekme, anizotropi, Erichsen, geri esneme ve derin çekme deneyleri gerçekleştirilerek genel şekillendirilebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Ardından incelenecek olan akış alanı tasarımlarının Solidworks programıyla Şekil 3.1’de verilen parametreler dikkate alınarak çizimleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımları yapılan yeni interkonnektörlerin üzerinde gerçekleşecek olan gaz akışlarının kanallar içerisindeki dağılımın homojenliği, akışkan hızı ve basıncı gibi özellikleri incelemek amacıyla Solidworks programında akış analizleri de gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan interkonnektörlerin her biri için kalıp imal edilip belirlenen şeklin kazandırılıp kazandırılmayacağını belirlemek mümkün olmadığı için her bir tasarım için dişi ve erkek olmak üzere iki kalıp tasarımı gerçekleştirilerek akış alanlarının malzemeye kazandırılıp kazandırılmayacağı ETA-DynaForm sonlu elemanlar programı yardımı ile belirlenmiştir. ETA-DynaForm yazılımı gerçek parça üretimi öncesi tasarlanan kalıpların ve malzemelerin analizlerinin yapılması adına oldukça yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Mevcut şekillendirme simülasyon programlarında kullanılan malzeme modellerinin, malzemeyi temsil etme kabiliyetini belirlemek ve analizlerde doğru modelleri kullanmak elde edilecek sonuçların doğruluğunu önemli oranda etkilemektedir. Bir sac şekillendirme simülasyonunda öncelikli olarak sırayla malzemenin pekleşme eğrisi, elastisite modülü, seçilen akma yüzeyi model parametreleri ve varsa kırılma kontrolü için şekillendirme sınır diyagramları tanıtılmaktadır. Pekleşme eğrisi olarak malzemelerin çekme deneyi sonucu deneysel veya mevcut programda yer alan pekleşme eğrisi modelleri kullanılarak tanıtılabilmektedir. Sonuç olarak; elde edilen veriler incelenerek en uygun tasarım seçilmiş ve üretimi pres yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. İnterkonnektör tasarımı kesit görüntüsü

Çizelge 3.1. İncelenen interkonnektör tasarım parametreleri

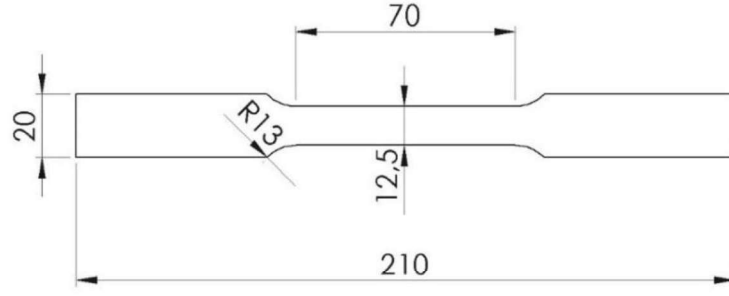
Parametre	İncelenecek aralık
İnterkonnektör kalınlığı (t)	0,2-2 mm
MEG kontak genişliği (a)	0,5-4mm
Kanal derinliği (b)	0.5-2 mm
Rib açısı (Ø)	90-120 °

3.1 Deneysel Çalışmalar ve Sonuçlar

Bu başlık altında tasarımı gerçekleştirilen yeni nesil stak tasarımı için üretilecek olan ara interkonnektör malzemesinin özellikleri verilmiştir.

3.1.1 Çekme ve anizotropi deneyi

Tez kapsamında KOYP'lerde interkonnektör malzemesi olarak sıkça kullanılan Fe-Cr alaşımı olan Crofer 22 APU çeliğinin gerekli mekanik özelliklerini belirlemek için, oda sıcaklığında ve 0.0016 s^{-1} (25 mm/dak) hızda çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan deney numunelerinin Şekil 3.1'de gösterilen ölçülerde ve 0,2; 0,3; 0,5 ve 1 mm olacak şekilde farklı numune kalınlıklarında deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney numuneleri ASTM-E8 standardına uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. ASTM-E8 standardına uygun olarak hazırlanmış deney numunelerinin ölçüleri (mm)

3.1.1.1 Deney düzeneği

Deneyler, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi alt yapısında bulunan SHIMADZU-Autograph 100 kN çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Malzeme üzerindeki deformasyonlar, olası temas problemini önleyen bir video tipi deformasyon ölçüm sistemi ile ölçülmüştür. Fotoğraf 3.1’de ilgili deney düzeneği görülmektedir.

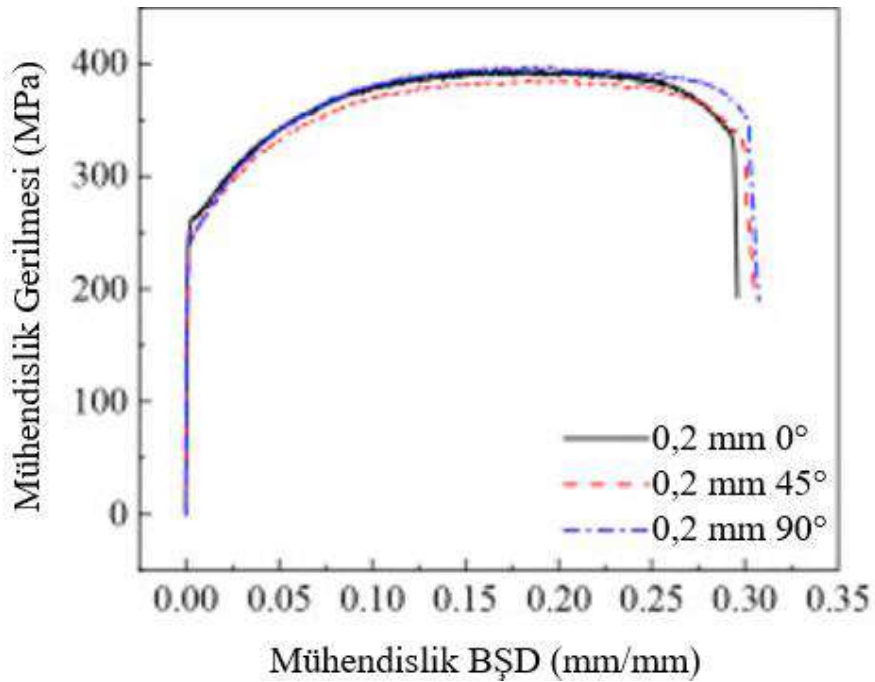


Fotoğraf 3.1. Çekme deney düzeneği

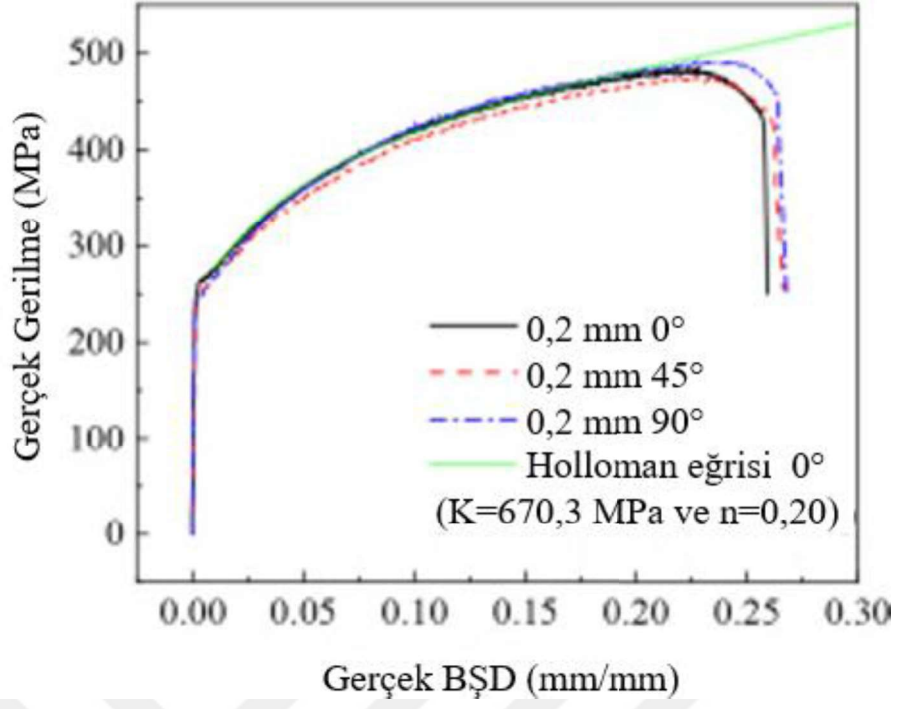
Ayrıca, numunelerin akma dayanımları ve malzemenin Lankford parametreleri gibi anizotropik özelliklerini belirlemek için farklı hadde yönüne sahip numuneler hazırlanmış ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler, hadde yönünde, hadde yönüne çapraz ve hadde yönüne dik doğrultularda (sırasıyla 0°, 45° ve 90°) hazırlanmıştır. Tüm deneyler 0,2, 0,5 ve 1,0 mm kalınlık ve yönler için en az üçer kez tekrar edilmiş ve ortalama değerler sunulmuştur. Literatürden iyi bilindiği gibi, bu mekanik özelliklerin belirlenmesi, sonlu elemanlar simülasyonlarında karmaşık şekil oluşturma işlemlerinin gerçekçi bir şekilde modellenmesine yardımcı olmaktadır.

3.1.1.2 Deney sonuçları

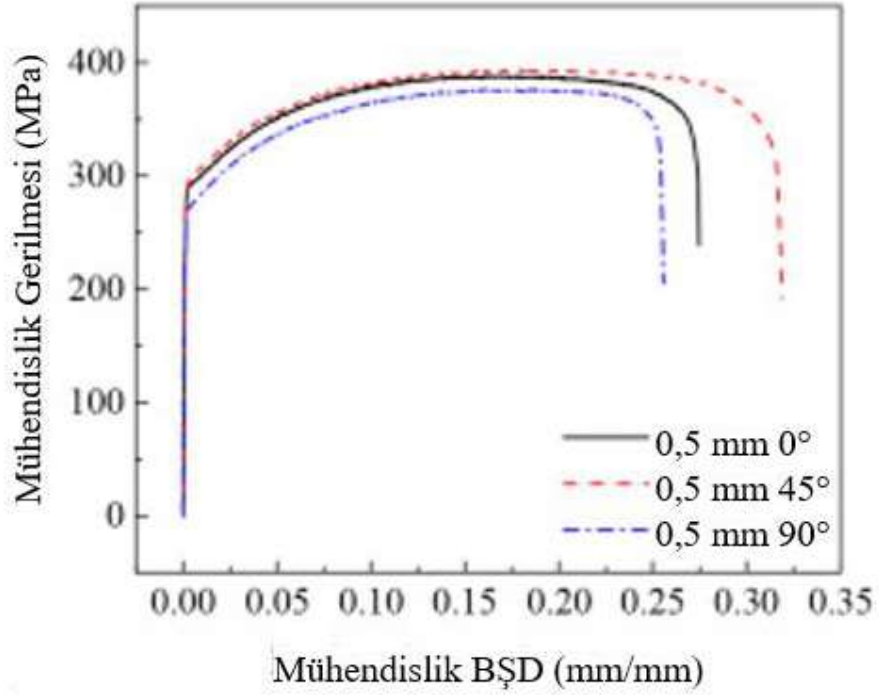
Çekme deneylerinden elde edilen gerekli ve önemli malzeme verilerinden birisi malzemelerin şekillendirilebilirliği ve dayanım özellikleri hakkında temel bilgileri içeren gerilme-birim şekil değiştirme (BŞD) eğrileridir. Şekil 3'te, farklı kalınlıklara sahip sac levhaların mühendislik gerilme-BŞD eğrileri (a, c ve e) ve gerçek gerilme- BŞD eğrileri (b, d ve f) gösterilmiştir. Holloman denkleminde uydurulmuş eğri ($\sigma = K\varepsilon^n$), gerçek gerilme-BŞD grafiklerinde gösterilmiştir. Holloman denkleminde, σ gerçek gerilmeyi, ε gerçek BŞD'yi gösterirken, K ve n sırasıyla sırası ile mukavemet katsayısını ve pekleşme üssünü temsil eder.



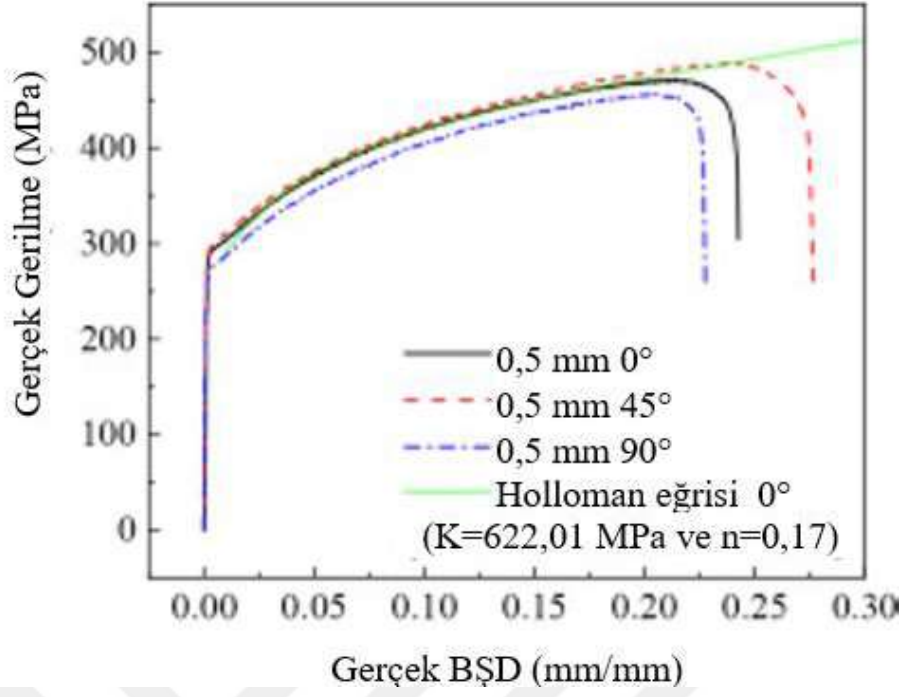
(a)



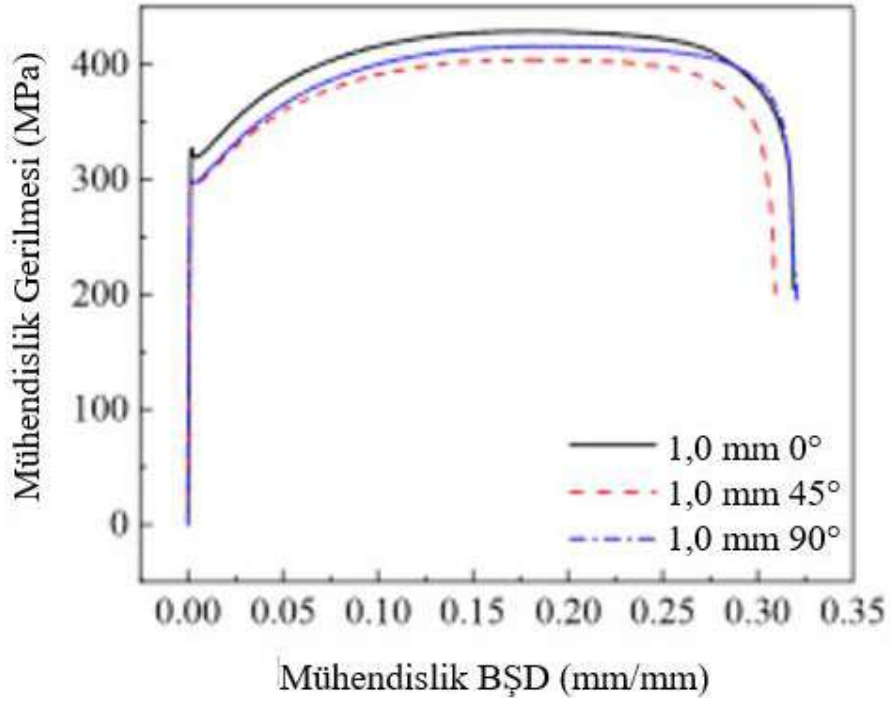
(b)



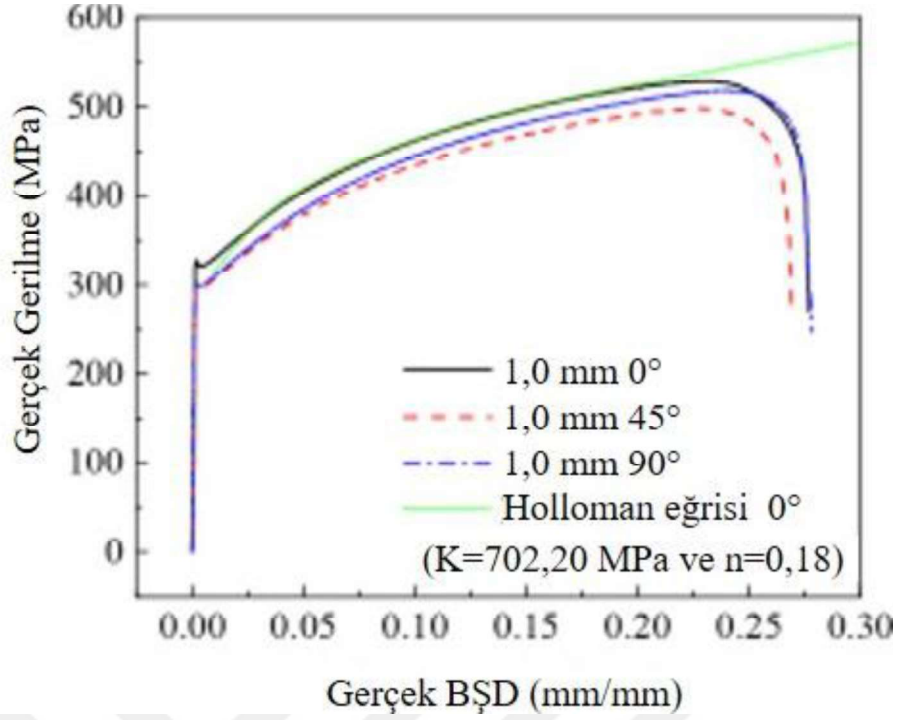
(c)



(d)



(e)

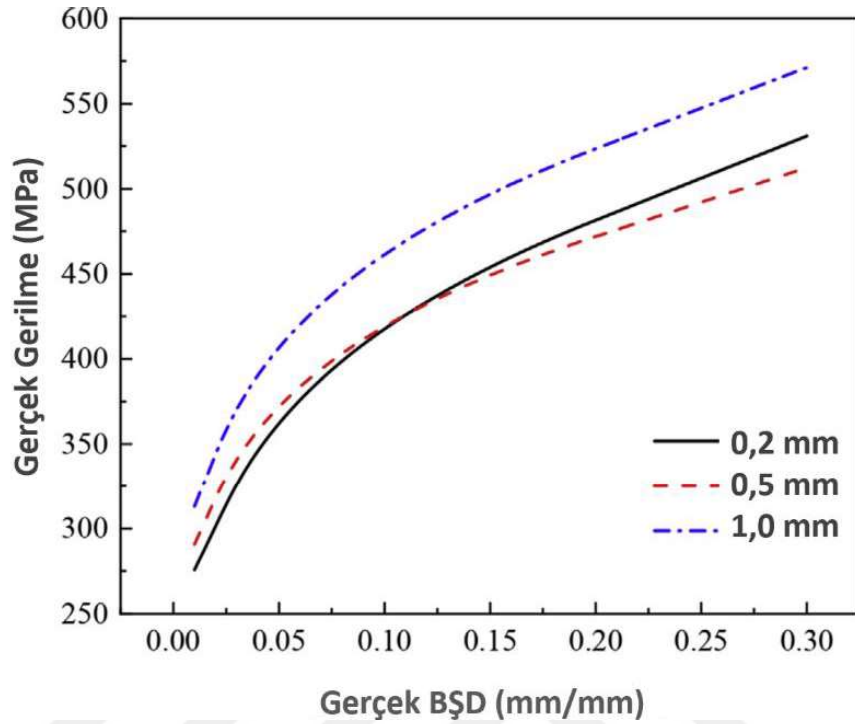


(f)

Şekil 3.3. Crofer 22 APU için mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri; 0,2 mm (a) ve (b), 0,5 mm (c) ve (d) ve 1,0 mm (e) ve (f)

Mühendislik ve gerçek gerilme değerleri her bir kalınlık için benzer bulunmuştur. Bunun yanında, malzemenin akma dayanımının, sac levha kalınlığının artmasıyla artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Benzer eğilim farklı hadde yönüne sahip (45° ve 90°) örnekler için de elde edilmiştir. Buna ek olarak, her kalınlık için akma dayanımı değerlerinin, hadde yönüne bağlı olarak değiştiği ve bir anizotropik davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 3 (b), (d) ve (f), gerçek gerilme-BŞD eğrileri Holloman denklemi ile gösterilmiştir. 0,2 mm kalınlığa sahip sac levhanın pekleşme üssü $n=0,2$ olarak belirlenmiştir. 0,5 ve 1 mm kalınlığında sırasıyla pekleşme üssü $n=0,17$ ve $n=0,18$ olarak bulunmuştur. Holloman denkleminde, mukavemet katsayısını gösteren K en yüksek 1,0 mm sac kalınlığı için 702,20 MPa olarak bulunmuştur. Beklendiği gibi şekillendirilebilirlik açısından 1,0 mm sac kalınlığına ve hadde yönünde (0°) en yüksek mühendislik BŞD değeri 0,315 mm/mm olarak elde edilmiştir. Tez kapsamında üretimi düşünülen interkonnektör tasarımının ana amaçlarından birisi yeni stak tasarımının özgül gücünü artırmak olduğu için interkonnektör'ün üretileceği sac malzemenin mümkün olduğu kadar ince olması gerekmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, 0,2 mm sac kalınlığı ve hadde yönünde 0,29 mm/mm mühendislik BŞD değerine sahip olan örneğin

pres yöntemiyle üretilecek yeni tip interkonnektör tasarımı için uygun bir değer olduğu belirlenmiştir (Timurkutluk vd., 2018).



Şekil 3.4. Farklı kalınlıklar için Holloman eğrileri

Şekil 3.4'de deneyleri yapılan farklı kalınlıkların Holloman eğrileri oluşturularak karşılaştırılma yapılmıştır. 0,2 mm ve 0,5 mm kalınlığa sahip sac levhaların mukavemetlerinin verilen deformasyonla hemen hemen aynı olmasına rağmen, 1,0 mm kalınlığa sahip sac levhanın diğer kalınlıklara göre nispeten daha yüksek mukavemet sergilediği görülmektedir. Malzemenin daha yüksek kalınlıklarda daha yüksek şekillendirilebilirliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, şekildeki mukavemet değerleri arasındaki fark çok büyük olmadığı için, yeni interkonnektör tasarımının pres yöntemi ile imal edilirken 0,2 mm kalınlığa sahip sacın kullanılabilir olduğuna karar verilmiştir (Timurkutluk vd., 2018).

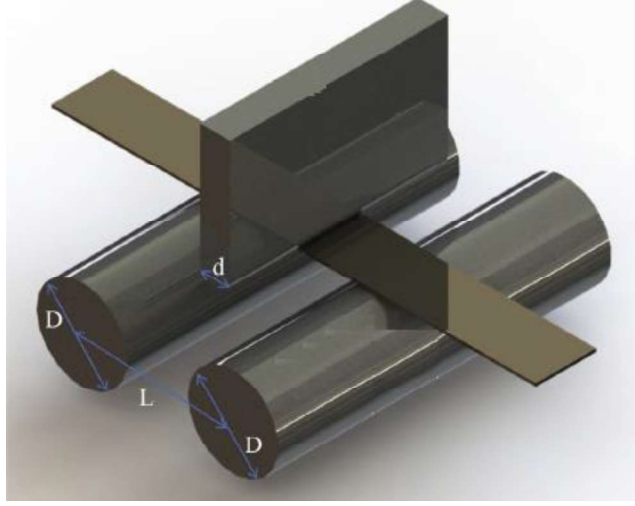
Çizelge 3.2. Hesaplanan Lankford parametreleri (Timurkutluk vd., 2018)

Sac Kalınlığı (mm)	R ₀	R ₄₅	r ₉₀	σ ₀	σ ₄₅	σ ₉₀
0,2	1,86	1,65	1,14	263	236	235
0,5	1,20	1,38	0,93	290	296	269
1,0	1,55	1,25	1,04	326	94	299

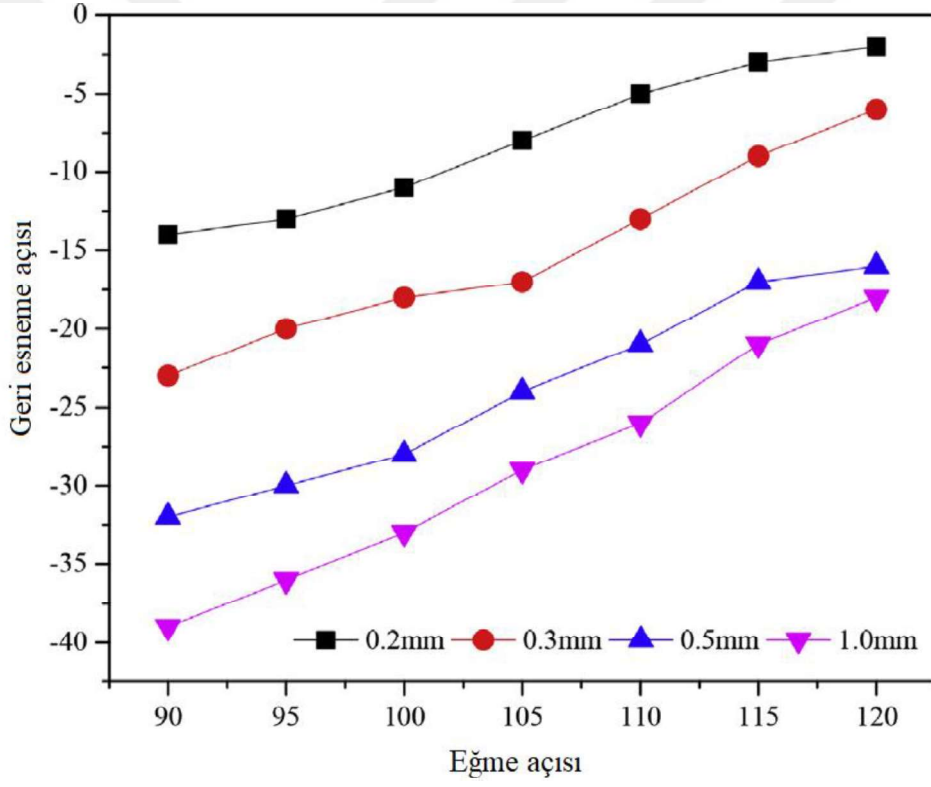
Malzemenin akma gerilmeleri, mukavemetleri, BŞD ve anizotropik katsayılarını belirlemek amacıyla çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sac şekillendirme işlemi sırasında malzeme üzerinde oluşan deformasyonlar tek yönde gerçekleşmeyebilir. Bu sebeple, farklı yönlerde gerçekleşebilecek deformasyonlar Lankford parametreleri hesaplanmıştır. Anizotropik davranışın büyüklüğü farklı haddeleme açılara (hadde yönünde, hadde yönüne çapraz ve hadde yönüne dik doğrultularda (sırasıyla 0°, 45° ve 90°)) sahip numuneler için çekme deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2'de sunulmuş olup Crofer'in anizotropik özellik sergilediği sonucuna varılmıştır.

3.1.2 Crofer 22 APU çeliğinin geri esneme davranışının incelenmesi

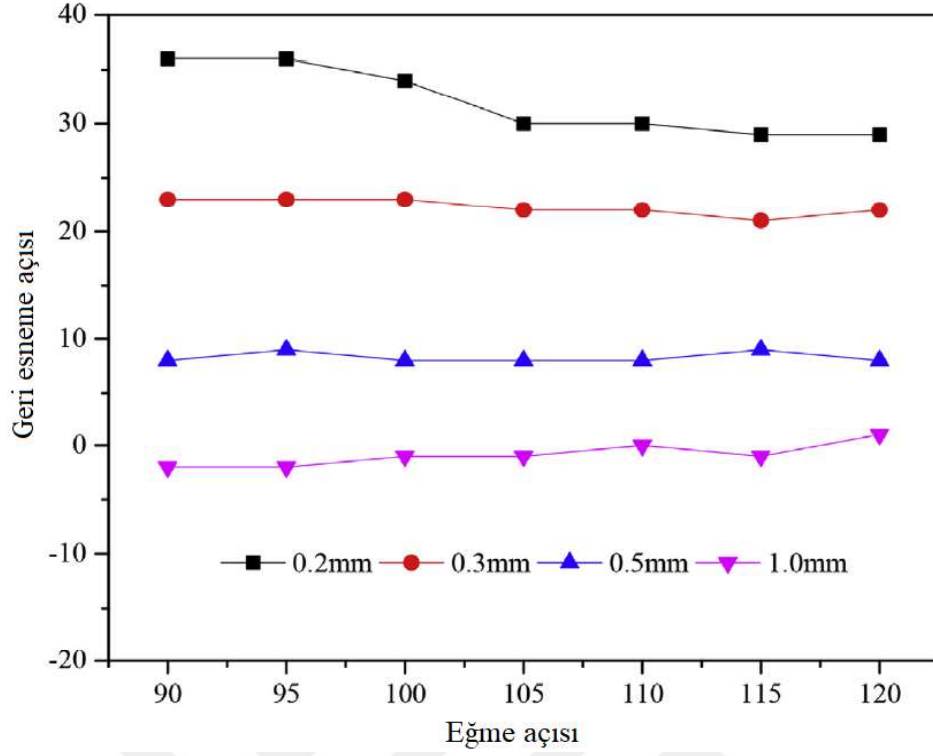
Bir malzeme için geri esneme, elastik şekil değiştirme olarak tanımlanabilmektedir. Sac metal şekillendirme işlemlerinde, üstesinden gelinmesi gereken önemli konulardan birisi de ince sacların geri esnemesi ve bükülmesidir. Malzemeler genellikle uygulanan yüklerin serbest bırakılmasından sonra eski halini geri dönme eğilimindedir. Bu nedenle, bu çalışmada, SHIMADZU-Autograph 100 kN çekme deney cihazına uyarlanan özel bir aparatla farklı miktarlarda deformasyonlarda 0,2, 0,3, 0,5 ve 1,0 mm kalınlıktaki Crofer sac tabakalara üç noktadan bükme işlemi uygulanmıştır. Deney düzeneği ve aparatlar Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Eş destek silindirlerinin çapı $D=30$ mm ve yükleme aparatının çapı $D-10$ mm'dir. Diğer yandan, destek silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafe (L), belirlenen her bir kalınlık için $L=50$ mm ve $L=100$ mm olarak ayarlanmıştır. Deney numunesi olarak 160 mm uzunluğunda ve 20 mm genişliğinde dikdörtgen sac şeritler hazırlanmıştır. Şeritler daha sonra eğme açısı $\theta=90-120^\circ$ arasında olan ve üretilmek istenen geometri açılara karşılık gelen farklı zımba darbeleriyle üç nokta bükme deneyine tabi tutulmuştur. Geri esneme miktarları, minimum okuma hassasiyeti 5 olan Mitutoyo 187- 907 universal konik iletke ile ölçülmüştür (Timurkutluk vd., 2018).



Şekil 3.5. Geri esneme için üç noktalı bükme deneyi kurulumu



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.6. Deney sonuçları; L=50 mm (a), L=100 mm (b), $\theta=90^\circ$ takım açısı için deney sonrası deney numuneleri (sol taraftaki fotoğraf L=50mm ve sağ taraftaki fotoğraf L=100mm) (c)

Şekil 3.6'da hazırlanan deney numunelerinin $\theta=90-120^\circ$ arasındaki farklı eğme açıları ve L=50mm ve L=100mm takım omuz mesafesi için deney sonuçları verilmiştir. Şekil 3.6 (a) ve (b) destek silindrilerinin merkezleri arasındaki mesafe sırasıyla L=50mm ve L=100mm ve farklı sac kalınlıkları için deney sonuçları karşılaştırılırken Şekil 3.6 (c)'de

$\theta=90^\circ$ eğme açısında deney sonrası deney numuneleri verilmiştir. Şekil 3.6 (a) incelendiğinde, malzemenin tüm kalınlıklarda $L=50\text{mm}$ için içe doğru geri esneme gösterdiği belirlenmiştir. Buna ek olarak, geri esneme miktarının ayarlanan açı arttıkça düşme eğiliminde olduğu görülmüştür. En düşük geri esneme $L=50\text{ mm}$ için $0,2\text{ mm}$ kalınlıktaki sac için $\theta=90^\circ$ eğme açısında $\Delta\theta = -14^\circ$ olarak gerçekleşirken, en yüksek geri esnemenin aynı eğme açısında ve 1 mm sac kalınlığında $\Delta\theta = -39^\circ$ olduğu belirlenmiştir. Destek silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafe $L=100\text{ mm}$ 'ye yükseltildiğindeyse sadece 1 mm sac kalınlığına sahip numuneler için içe doğru geri esneme gösterirken diğer kalınlıklar için $\Delta\theta$ 'nın pozitif olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde $L=100\text{ mm}$ için de geri esneme miktarının ayarlanan açı arttıkça düşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Fakat geri esneme miktarının $L=50\text{ mm}$ için elde edilen sonuçlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. En düşük geri esneme $L=100\text{ mm}$ iken $0,5\text{ mm}$ kalınlıktaki sac için $\theta=90^\circ$ eğme açısında $\Delta\theta = 8^\circ$ olarak gerçekleşirken, en yüksek geri esneme ise $\theta=120^\circ$ eğme açısında $0,2\text{ mm}$ sac kalınlığı için $\Delta\theta = 30^\circ$ olarak belirlenmiştir (Timurkutluk vd., 2018).

3.1.3 Erichsen ve derin çekme deneyi

İki eksenli deformasyon durumlarında şekillenebilirlik özelliklerini belirlemek için Erichsen ve silindirik derin çekme deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.7. (a)'da görüldüğü gibi, 33 mm 'lik küresel zımba farklı kalınlıklara sahip saclar üzerinde kubbe şeklinde çıkıntı oluşturmak için kullanılmıştır. Ayrıca deneylerde numunelere 25 kN baskı plakası kuvveti uygulanmıştır. Şekil 3.7. (b)'de gösterilen derin çekme deneylerinde 1 kN ile 45 kN arasında farklı baskı plakası kuvvetleri uygulanmıştır.

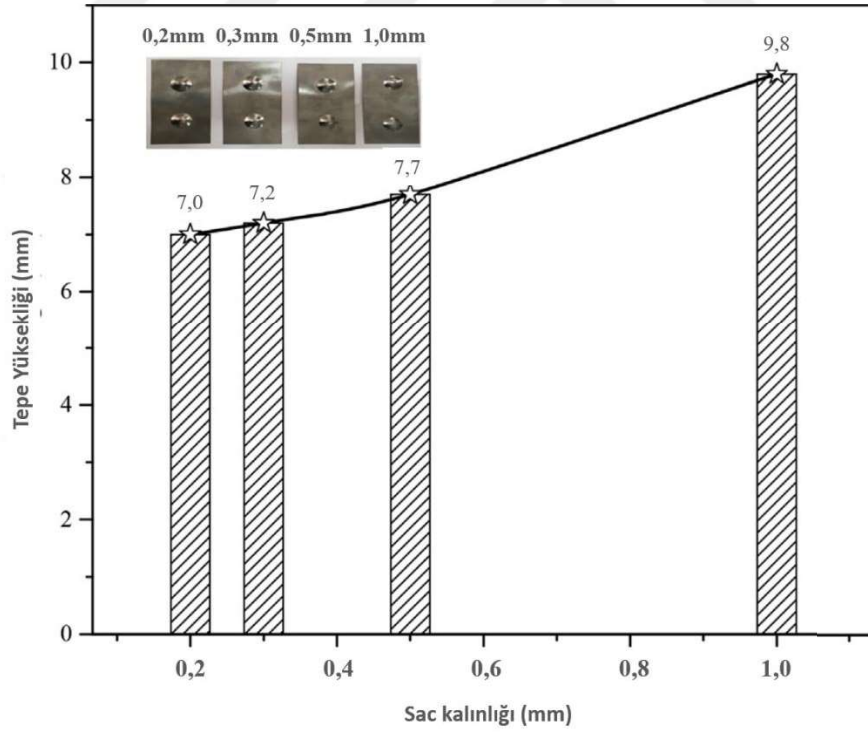


(a)

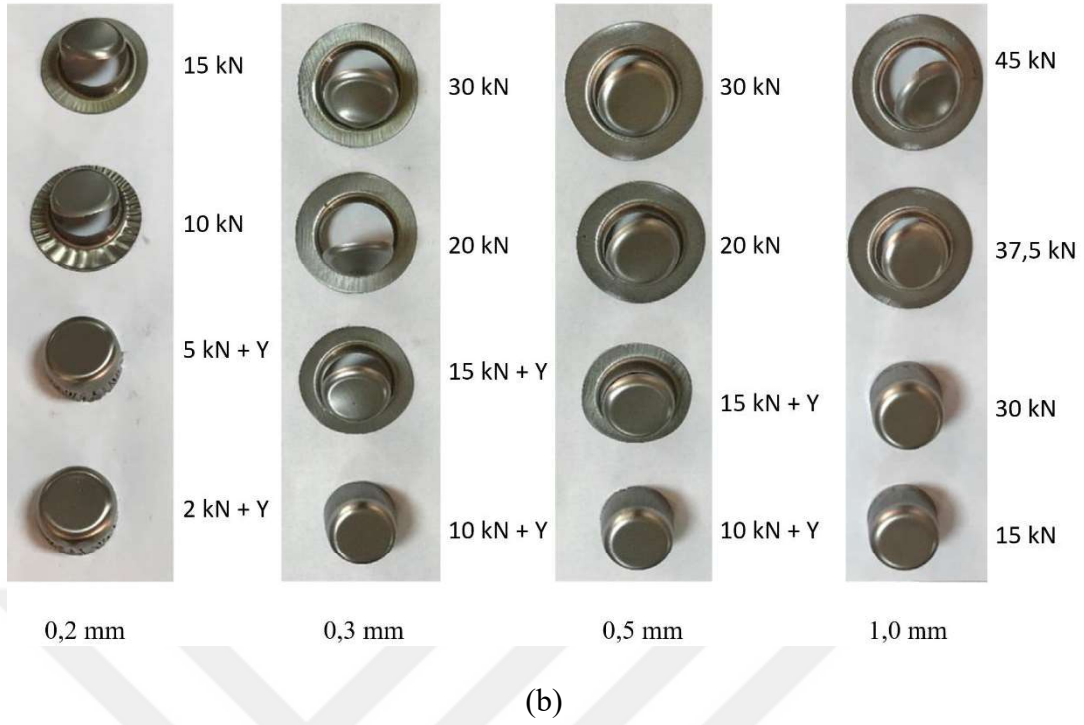


(b)

Şekil 3.7. Erichsen (a) ve derin çekme deneyleri (b)



(a)



Şekil 3.8. Deney sonuçları; Erichsen (a) ve derin çekme (b)

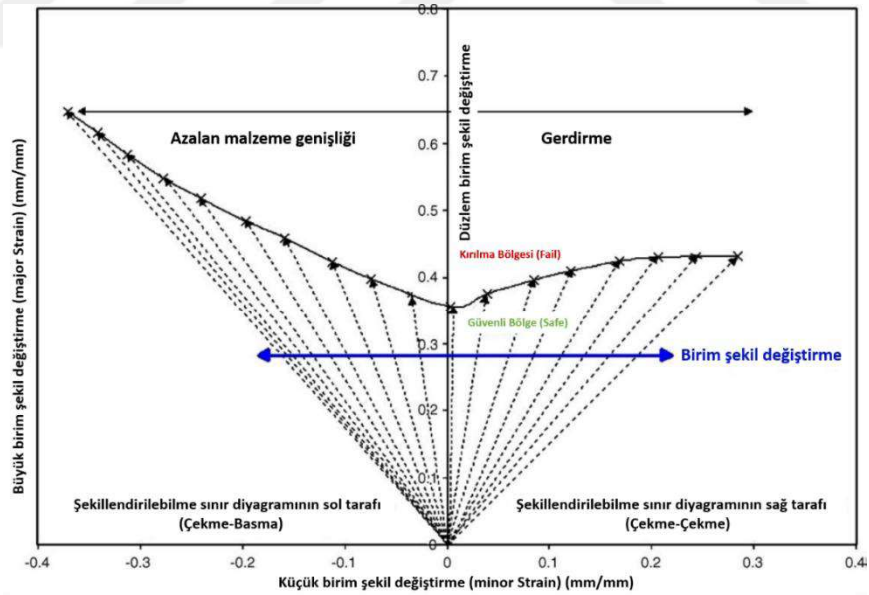
Şekil 3.8. (a) ve Şekil 3.8. (b)'de sırasıyla Erichsen ve derin çekme deney sonuçları verilmiştir. Şekil 3.8. (a)'da görülebileceği gibi deney numuneleri üzerinde oluşturulan kubbenin tepe yüksekliğinin, beklendiği gibi sac kalınlığı arttıkça artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan kubbenin tepe yüksekliği 0,2, 0,3, 0,5 ve 1,0 mm sac kalınlıkları için sırasıyla 7,0, 7,2, 7,7 ve 9,8 mm olarak elde edilmiştir. Şekil 3.8. (b) incelendiğinde; uygulanan farklı baskı plakası kuvvetleri grafiğın sağında verilmiştir. Ayrıca yüzeylerine yağlama yapılan deney numuneler uygulanan baskı plakası kuvvetinin yanına “Y” eklenerek belirtilmiştir. 1,0 mm sac kalınlığı için numune yüzeyine yağlama uygulanmadan yapılan deneyde sacın kolayca şekillendiği görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, şekillenebilirliğin beklendiği gibi sac kalınlığı azaldıkça azaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, 1,0 mm'den daha düşük sac kalınlıkları için numune yüzeyine yağlama yapılarak küçük baskı plakası kuvvetleriyle deneyler gerçekleştirilmiştir. 0,2 mm kalınlığa sahip sacı tam olarak şekillendirebilmek için numune yüzeyine yağlama yapılarak baskı plakası kuvvetinin 2 kN'a düşürülmesi gerektiği tespit edilmiştir. 0,3 mm ve 0,5 mm sac kalınlığı içinse numune yüzeyine yağlama yapılarak ve 10 kN baskı plakası kuvveti uygulanarak tam olarak şekillendirebilmenin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Daha ince kalınlıklarının aksine 1,0 mm kalınlığa sahip sac için numune yüzeyine hiçbir yağlama yapılmadan 30 kN baskı

plakası kuvveti uygulanarak tam olarak şekillendirebilmenin mümkün olduğu görülmüştür. Ayrıca 1,0 mm kalınlığa sahip sac için deney sonunda şekillenen numune yüzeyinde kırışıklıkların daha az olduğu gözlemlenmiştir (Timurkutluk vd., 2018).

3.1.4 Crofer 22 APU sacının şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesi

Sac malzemelerin şekillendirme operasyonları sırasında kalınlıklarında ortaya çıkan boyun verme hatası, malzemenin belirli bölgelerinde bir genişlik ve derinlikte oluşmaktadır. Kullanılan malzeme sünek özelliklere sahip olması durumunda şekillendirme işlemi kırılma ile sonlanmaktadır. Bu hatalar atık malzeme oluşmasına ve üretim maliyetlerinin artmasına neden olabilmektedir.

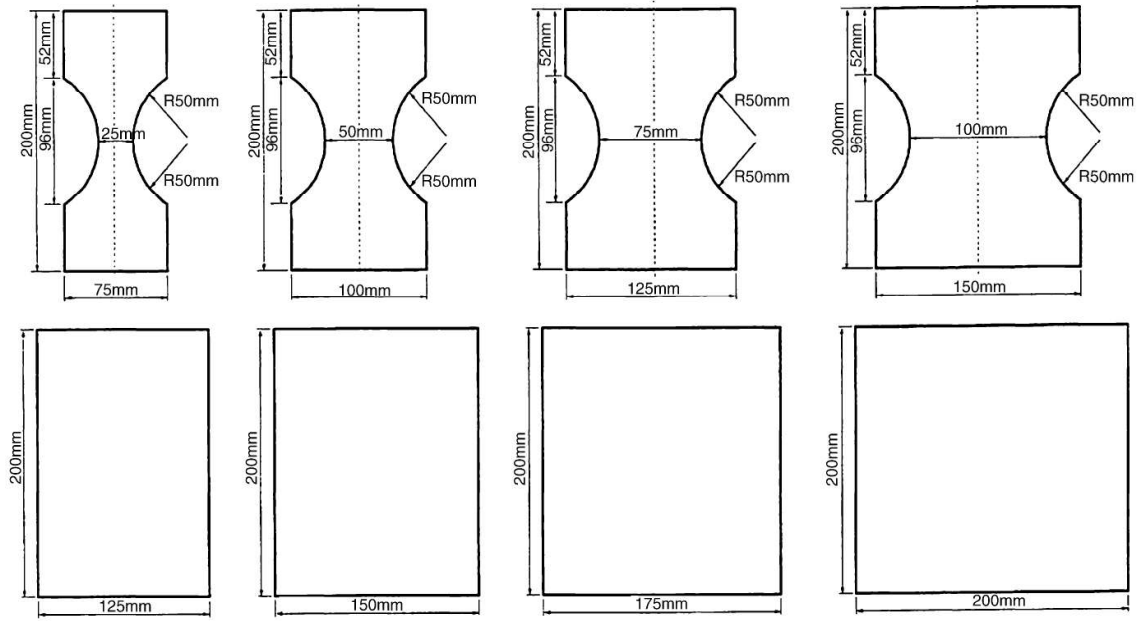
Farklı kalınlıklara sahip sac malzemelerin şekillendirilmesini hatasız bir şekilde gerçekleştirilebilmek amacıyla, sac yüzeyinde oluşan deformasyon tipleri ve miktarına göre güvenli, kritik ve kırılma bölgelerini gösteren şekillendirme sınır diyagramları kullanılmaktadır. Şekil 3.9’da tipik bir şekillendirme sınır diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Şekillendirme sınır diyagramı (Ozturk ve Lee, 2005)

Şekil 3.9’da gösterilen örnek şekillendirme sınır diyagramı incelendiğinde x ve y eksenleri sırasıyla küçük ve büyük birim şekil değiştirme (BŞD) olarak iki eksen üzerinde çizilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramları, kullanılacak olan malzemenin üretim

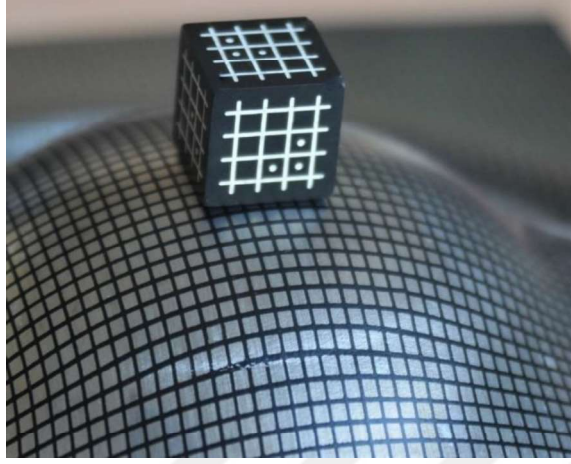
operasyonları sırasında farklı yönlerde gerçekleşen birim deformasyonların hangi durumlarında malzeme üzerinde boyun verme hatasının oluşacağını gösteren diyagramlardır. İş parçası üzerinde belirlenen deformasyonların işareti pozitifse malzeme üzerinde iki eksenli gerdirme, negatif ise malzeme üzerinde tek eksenli gerdirme tipinde bir deformasyon tespit edilmiş anlamına gelmektedir.



Şekil 3.10. Şekillendirme sınır diyagramı oluşturmak için kullanılan deney numunelerinin teknik resimleri (Ozturk ve Lee, 2005)

Şekil 3.10'da deneylerde kullanılan farklı kalınlıklardaki sac malzemelerin teknik resimleri görülmektedir. Deney numuneleri 25 mm'den başlayarak 200 mm kalınlığa kadar yükseltilmiştir. Bu sayede tek ve iki eksenli sırasıyla çekme ve gerdirme tipi deformasyonların belirlenmesi mümkün olmaktadır. Teknik resimleri hazırlanan numunelerin her bir kalınlık için belirlenen sayıda numune, sac levhadan kesilmiştir. Kesme işleminin ardından ipek baskı yöntemi ile 2,5x2,5 mm boyuta sahip kare motifler elektrokimyasal yöntemlerle numuneler üzerine uygulanmıştır. Elde edilen her bir numuneye küresel zımba ile şekillendirme işlemi uygulanmış ve numune üzerine uygulanan motifler deformasyona uğratılmıştır. Deneyler sonrasında malzeme üzerinde boyun veren bölgelerdeki kare motifler ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment) teknolojisi olan Target Model yöntemi ile incelenmiştir. Fotoğraf 3.2.'de deney sonrası boyun vermiş bir sac malzeme görüntüsü verilmiştir. Malzemelerin FLD'leri belirlenirken deneyi gerçekleştirilen numunenin tamamının değil

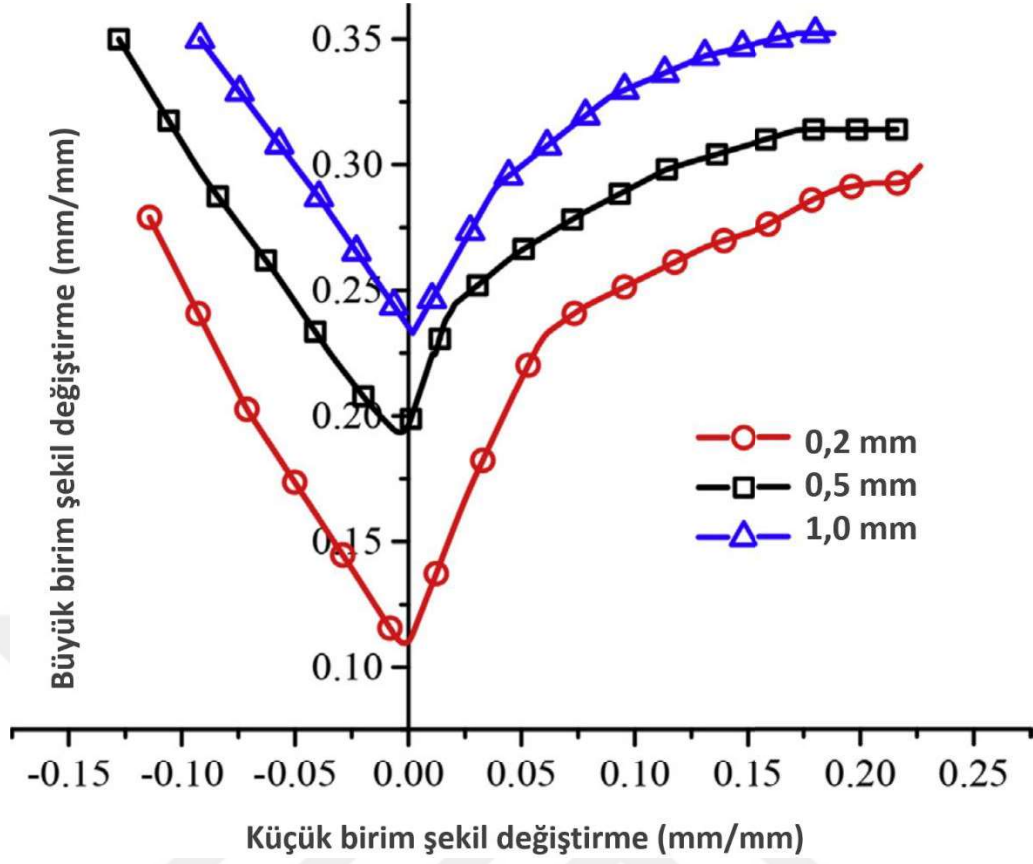
kırılma veya boyun vermenin olduğu bölgenin veya karşısındaki bölgede bulunan kare motiflerin deformasyon miktarlarının ölçümü yapılmaktadır.



Fotoğraf 3.2. Şekillendirilmiş malzeme ve referans küp



Fotoğraf 3.3. Şekillendirilmiş deney numuneleri (Yukarıdan aşağı doğru sırasıyla 0,2; 0,5 ve 1,0 mm sac kalınlıkları)



Şekil 3.11. Crofer 22 APU sacının farklı kalınlıkları için elde edilmiş şekillendirme sınır diyagramları

Crofer 22 APU sacının farklı kalınlıkları için şekillendirilebilirlik sonuçları Şekil 3.11’de verilmiştir. 1,0 mm kalınlığa sahip sacın şekillendirilebilirliğinin beklendiği gibi yüksek olduğu görülmüştür. 0,2 mm kalınlığa sahip sacın şekillendirilebilirlik limiti %10 civarında olduğu tespit edilmiştir (Timurkutluk vd., 2018). Belirlenen bu değerin, üretimi gerçekleştirilecek olan interkonnektör tasarımının imalatı için yeterli olacağı düşünülmüştür. Tezin amacı yüksek hacimsel (W/m^3) ve kütleli güç yoğunluğuna (W/kg) sahip stak tasarımı olduğu için sac kalınlığı olarak sayısal ve deneysel çalışmalara 0,2 mm sac kalınlığı ile devam edilmesine karar verilmiştir.

BÖLÜM IV

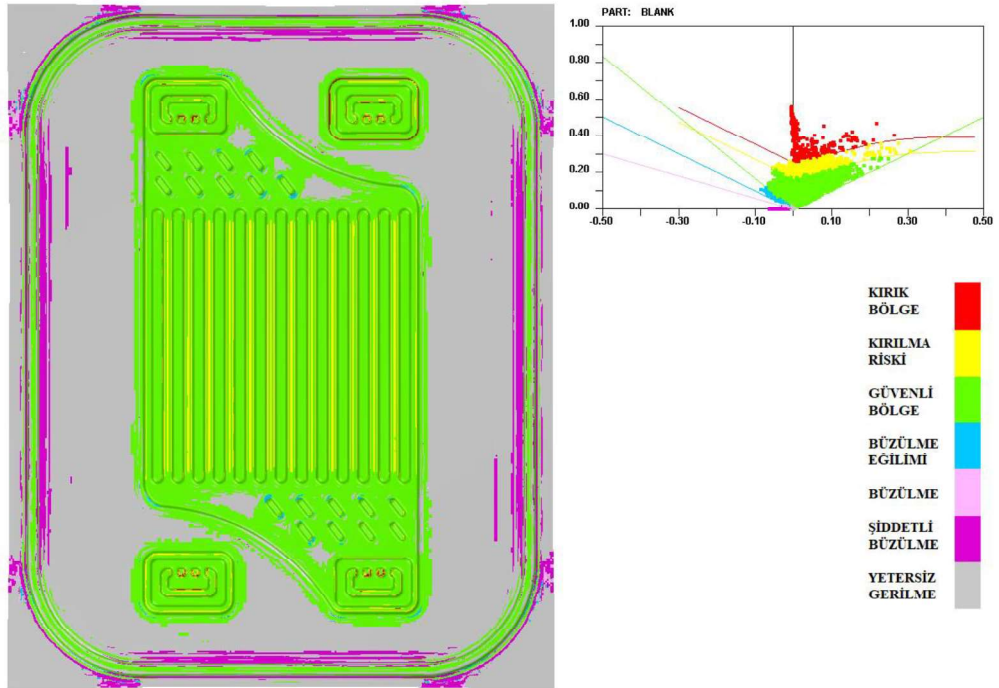
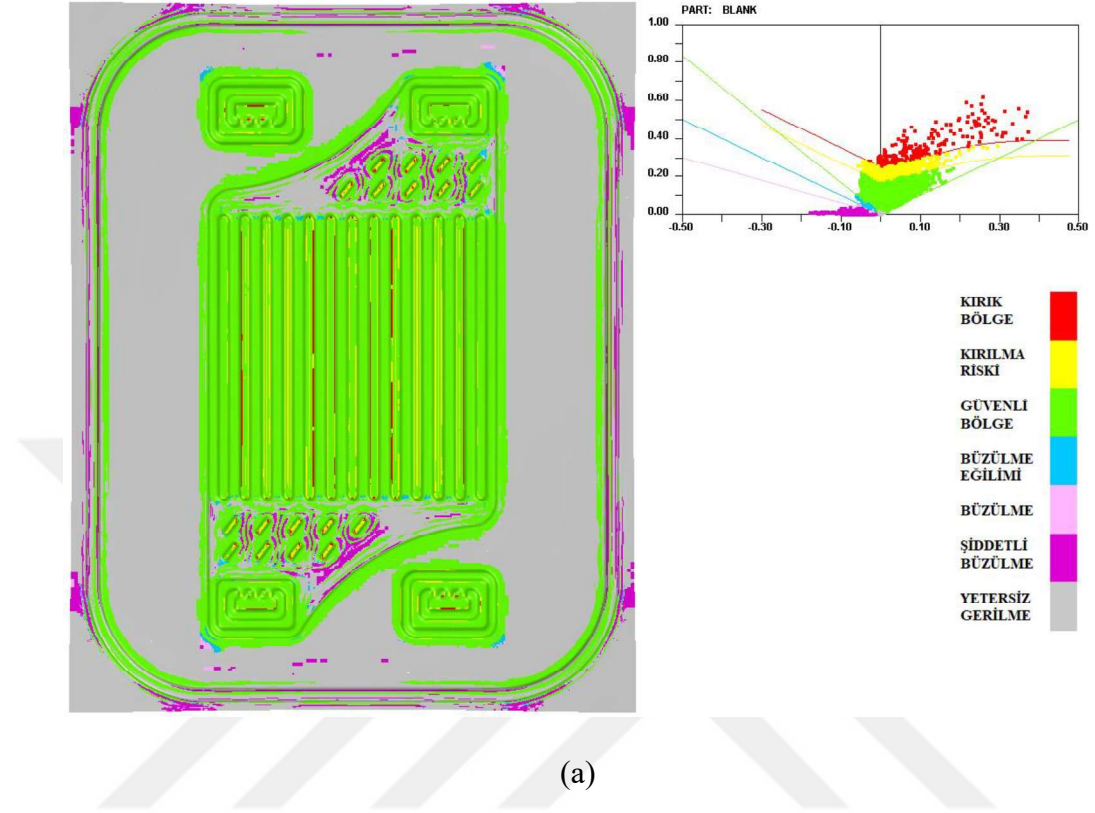
ŞEKİLLENDİRME VE AKIŞ ANALİZLERİ

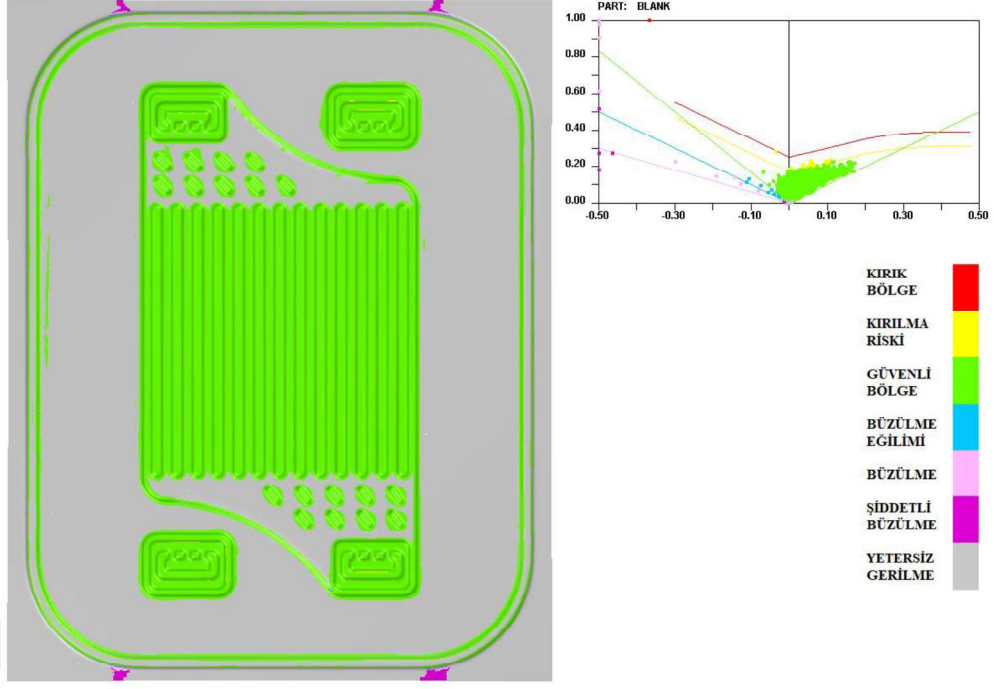
Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1’de daha önce belirlenen parametrelere göre yeni üretilecek olan interkonnektör ara plakaların her biri için kalıp üretilerek şekillendirilebilirliğinin incelemesi maliyet açısından mümkün olmadığı için kalıp tasarımı Solidworks programında yapılarak akış alanlarının malzemeye kazandırılıp kazandırılmayacağı ETA-Dynaform sonlu elemanlar programı yardımı ile belirlenmiştir. Ek olarak, sac şekillendirmede önemli parametrelerden baskı plakası kuvveti, üretilecek malzeme derinliği, baskı kalıbı kuvveti, hızı ve kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme gibi parametreler ETA-Dynaform programı ile belirlenmiştir. Aynı zamanda, belirlenen parametreler için analizler yapılırken, bir yandan da literatür incelenerek en iyi performans elde edilecek durum için parametrelerin optimizasyonu yapılmıştır. Programdan elde edilen sonuçlar incelendikten sonra, şekillendirilebilirlik açısından sorun olmayan tasarımlar için gaz akışlarının kanallar içerisindeki dağılımın homojenliği, akışkan hızı ve basıncı gibi özelliklerini belirlemek amacıyla Solidworks programı kullanılarak akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak; kanallar içerisindeki akış dağılımının homojenliği, akışkan hızı ve basıncı uygun değilse tasarımda gerekli iyileştirmeler gerçekleştirilerek adımlar tekrar edilmiştir.

4.1 İlk Tasarımın Şekillendirme ve Akış Analizi Sonuçları

Şekil 4.1’de analiz sonuçları verilen yeni ara interkonnektör plaka tasarımı için farklı parametrelerde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonucunda sac malzemeye istenilen formun verilebileceği belirlenmiştir. Şekil 4.1 (a)’da verilen analiz sonucunda 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm MEG kontak genişliği, 0,5 mm kanal derinliği ve 90° rib açısına sahip tasarım için analiz yapılmıştır. Elde edilen verilerde ara interkonnektör plakanın üzerinde akışın gerçekleştiği kanallarda ve gaz akış girişi ve çıkışı için tasarlanan bölgelerde yırtıklar olduğu görülmüştür. Ayrıca, şekillendirilen sac malzemenin kenarlarında ve gaz dağılımının homojen bir şekilde sağlanabilmesi amacıyla tasarlanan gaz giriş ve çıkış kısımlarının önündeki dağıtıcıların olduğu bölgelerde büzülmeler oluşmuştur. Bu sonuçlar değerlendirilerek MEG genişliği ve kanal derinliği sabit

tutularak rib açısı, baskı kalıbı kuvveti ve hızı üzerinde değişiklikler yapılarak yeni bir tasarım oluşturularak analizi yapılmıştır.





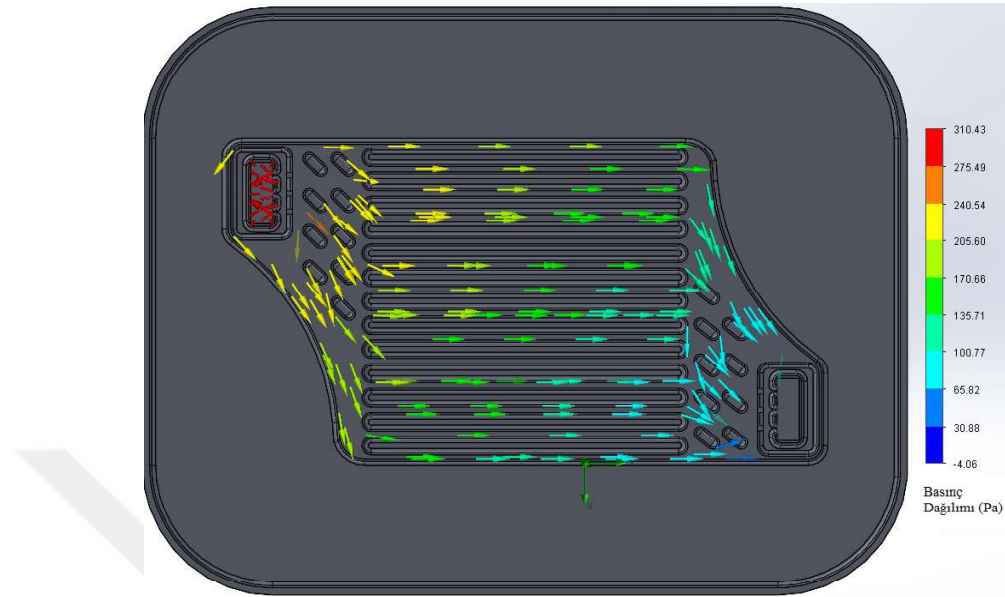
(c)

Şekil 4.1. 0,2 mm sac kalınlığına, 0,5 mm MEG kontak genişliği ve 0,5 mm kanal derinliğine sahip tasarım; rib açısı = 90° (a) ve rib açısı = 100° (b) ve rib açısı = 105°

Şekil 4.1 (b)'de verilen analizde Şekil 4.1 (a)'da belirlenen problemlerin aşılması amacıyla iyileştirmeler yapılmış ve 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm MEG kontak genişliği, 0,5 mm kanal derinliği ve 100° rib açısına sahip tasarım için analiz yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda gaz akış giriş ve çıkışı için tasarlanan bölgelerde yırtıklar olduğu görülmüştür. Rib açısının 100°'ye çıkarılması sonucunda akış kanallarının bulunduğu bölgelerde bir önceki analizde oluşan yırtılmaların oluşmadığı, fakat yırtık riskinin devam ettiği görülmüştür. Önceki analiz sonucunda gaz giriş ve çıkışının önündeki dağıtıcıların olduğu bölgedeki büzülmeler çözülsede bu sefer büzülmeler kenarlarda yoğunlaşmıştır. Sonuçlar değerlendirilerek MEG genişliği ve kanal derinliği sabit tutularak rib açısı, baskı kalıbı kuvveti ve hızı üzerinde değişiklikler yapılarak yeni bir tasarım oluşturularak analizlere devam edilmiştir.

Şekil 4.1 (c)'de verilen analizde Şekil 4.1 (a) ve Şekil 4.1 (b)'de belirlenen problemlerin aşılması amacıyla iyileştirmeler yapılmıştır. 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm MEG kontak genişliği, 0,5 mm kanal derinliği ve 105° rib açısına sahip tasarım için analiz yapılmıştır. Analiz sonucundan görüldüğü gibi sac üzerinde herhangi bir yırtılma oluşmadığı ve büzülme problemlerinin de çözüldüğü gözlemlenmiştir. Şekillendirme

analizleri ve optimizasyonu sonrasında bu nihai tasarım için akış analizi yapılmıştır. Yapılan akış analizi sonucu Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Ara interkonnektör plaka akış analizi

Şekil 4.2’de verilen analiz sonucu incelendiğinde akış bölgesindeki gazların, akış yüzeyine homojen bir şekilde dağılmadığı görülmüştür. Ayrıca şekillendirilen bölgeler dışında kalan kullanılmayan alanın çok olması hem yüksek çalışma sıcaklığı hem de çalışma esnasında uygulanacak olan sıkıştırma basıncına mukavemet gösteremeyeceği düşünülmüştür. Bundan dolayı optimizasyon çalışmaları sonlandırılıp yeni tasarıma geçme kararı alınmıştır.

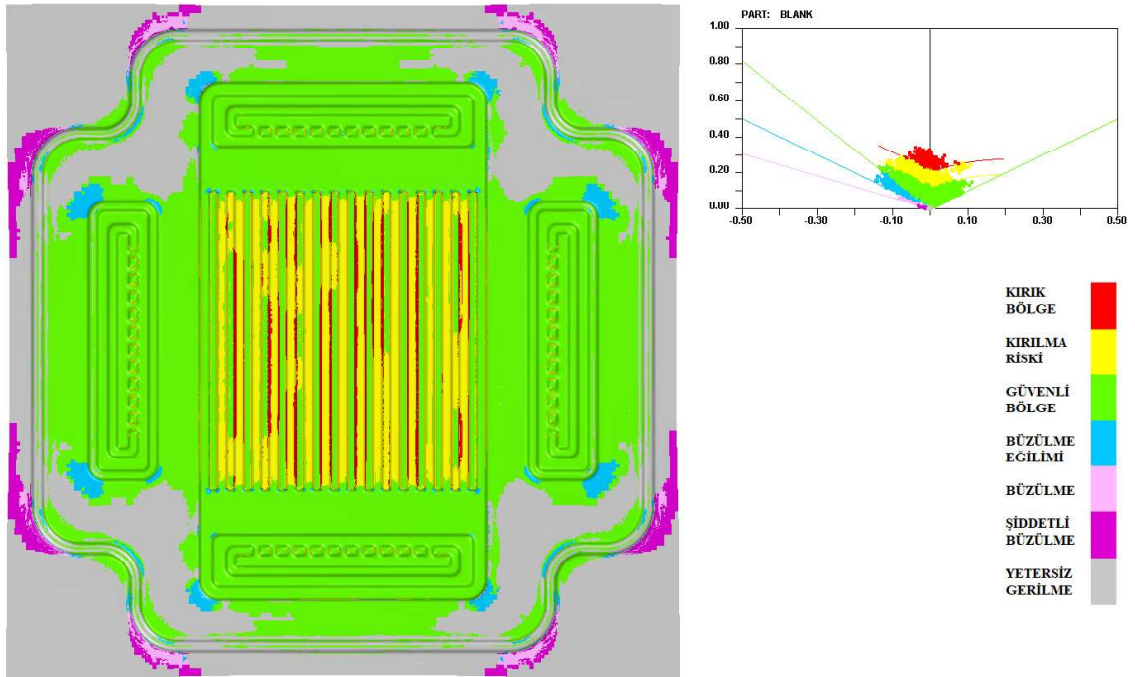
4.2 Yeni Tasarımın Şekillendirme ve Akış Analizi Sonuçları

Revize edilen yeni ara interkonnektör plakada akış alanı ve gaz dağıtıcısı dışında kullanılmayan alanın en aza indirilmesi ve gazın kanallara homojen dağılması için daha uygun gaz giriş ve çıkış kısmı amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan optimizasyon çalışmaları aşağıda verilmiştir.

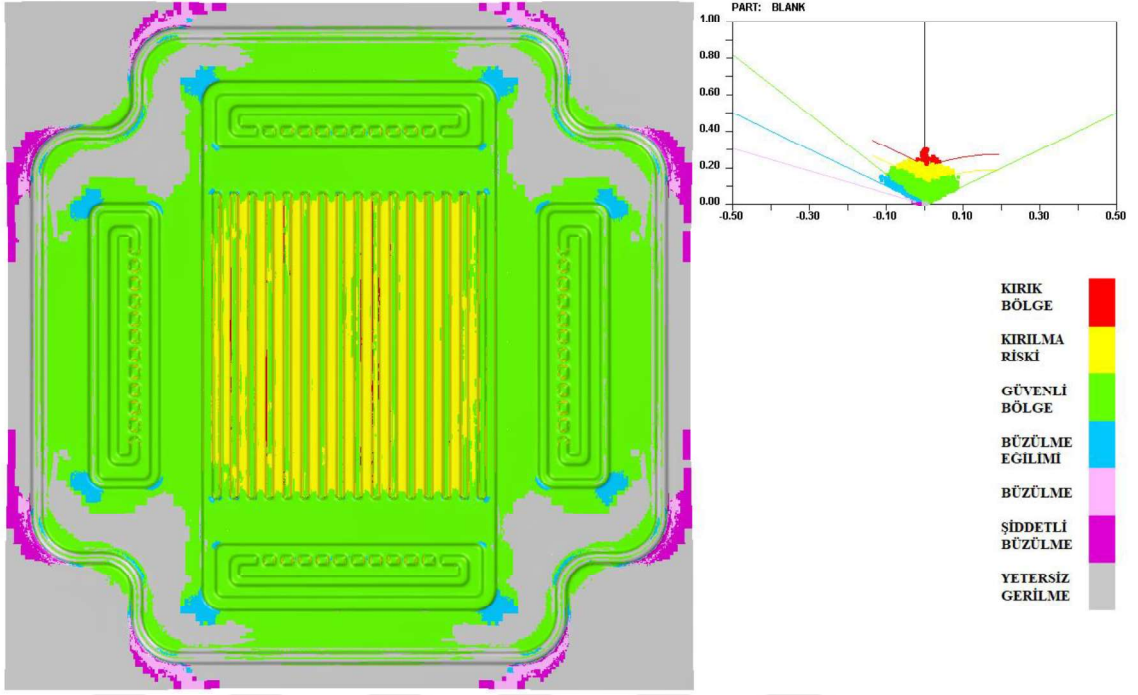
4.2.1 Yeni tasarımın rib açısı optimizasyonu

Şekil 4.3’ te yapılan optimizasyon çalışmasında 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm MEG kontak genişliği ve 0,5 mm kanal derinliği sabit tutularak sadece rib açısını Çizelge 3.1’de

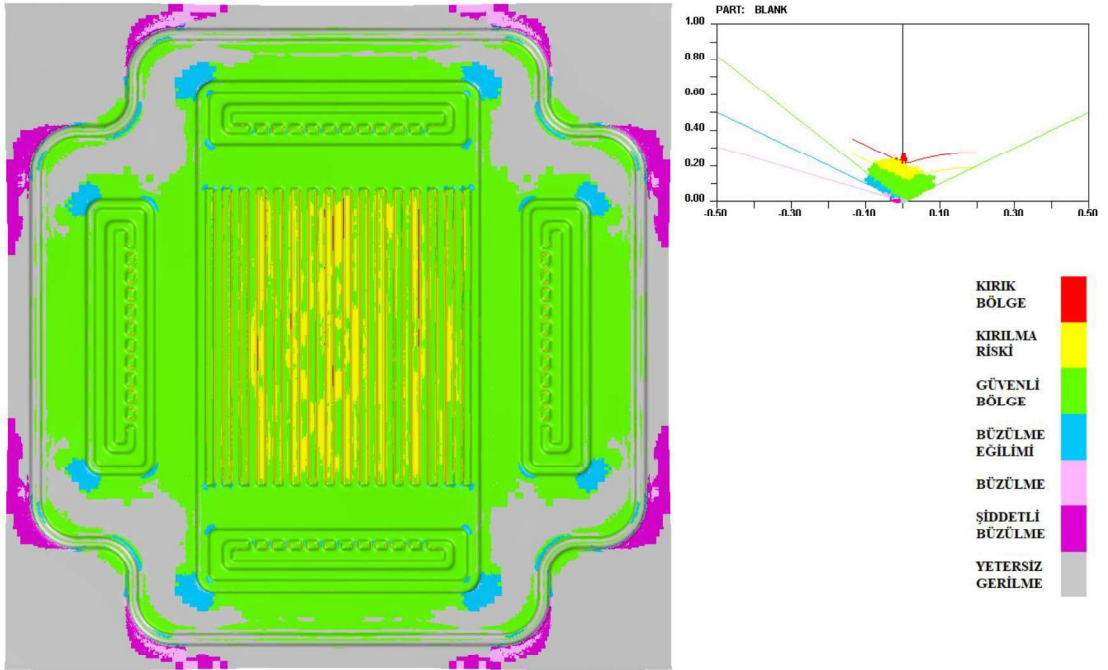
önceden belirlenen parametrelere uygun olacak şekilde 90 ve 120° arasındaki rib açılarında analizler yapılarak optimum değeri belirlenmiştir. Şekil 4.3 (a)'da verilen analiz sonucunda 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm MEG kontak genişliği, 0,5 mm kanal derinliği ve 90° rib açısına sahip tasarım için analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda akış kanallarında ciddi yırtıklar oluştuğu görülmüştür. Bunun yanında, şekillendirilen sac malzemenin kenarlarında büzülme meydana gelmiştir. Bu sonuçlar değerlendirilerek MEG kontak genişliği ve kanal derinliği sabit tutularak rib açısı üzerinde değişiklikler gerçekleştirilerek yeni bir tasarım yapıp analiz yapılmıştır.



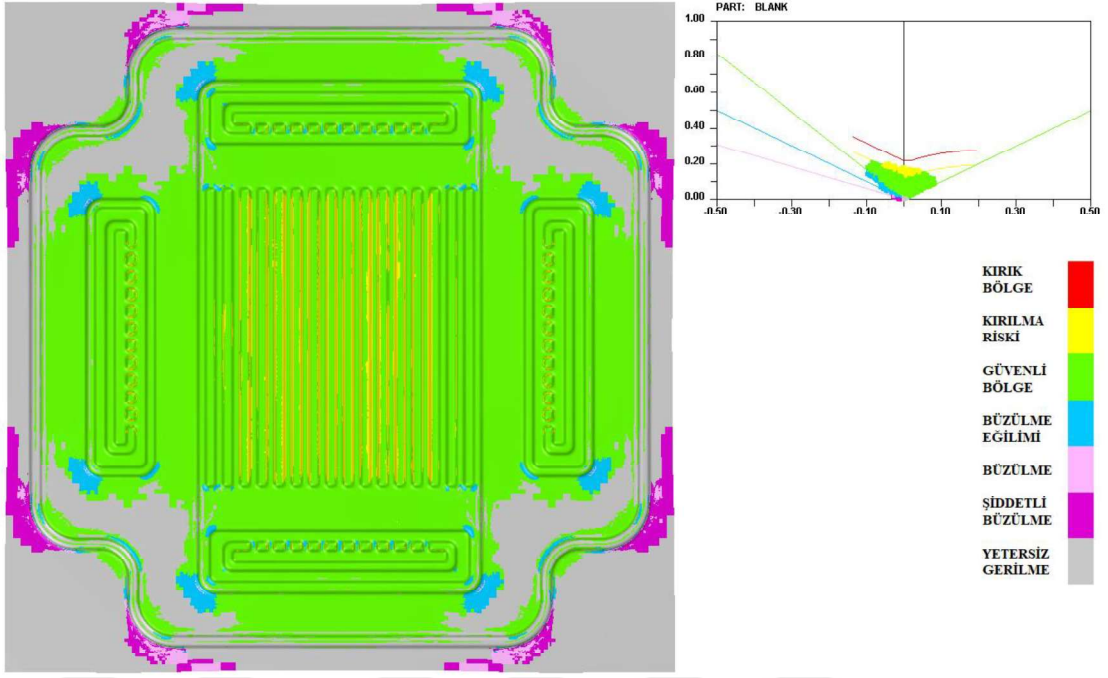
(a)



(b)



(c)



(d)

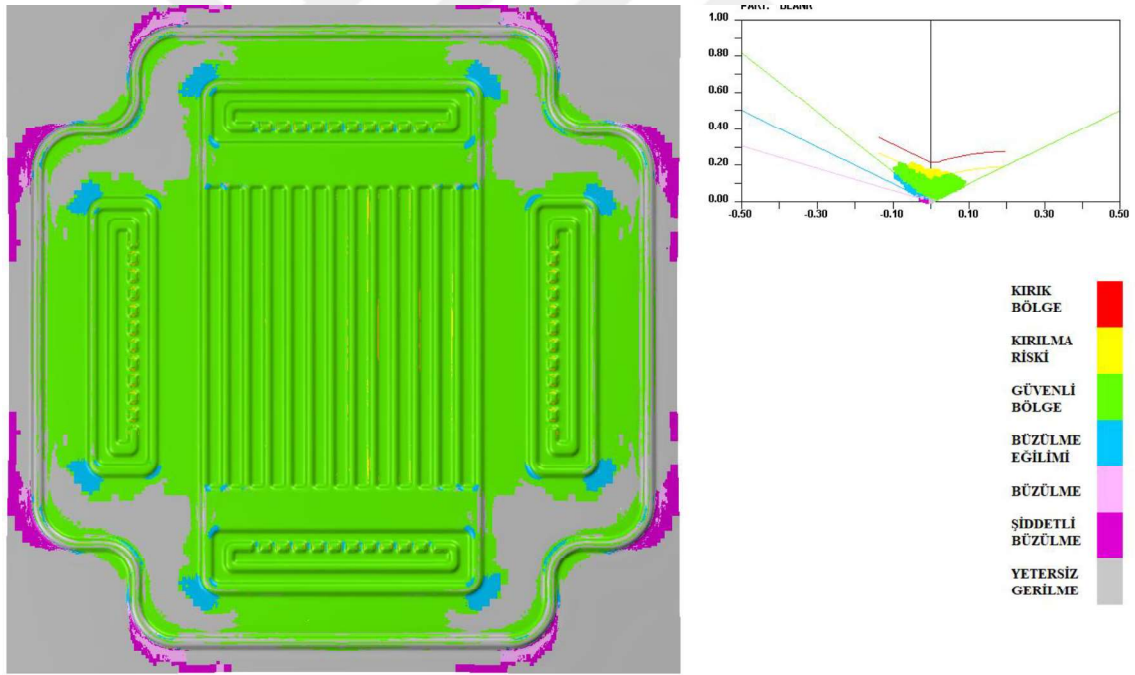
Şekil 4.3. Yeni tasarım için rib optimizasyonu şekillendirme analizi sonuçları; rib açısı =90° (a), rib açısı =100° (b), rib açısı =110° (c) ve rib açısı =120° (d)

Şekil 4.3 (b)'de verilen analiz sonucunda 100° rib açısına sahip tasarım için analiz yapılmıştır. Elde edilen verilerde sac üzerindeki akış kanallarında yırtıkların azaldığı, fakat ortadan kalkmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar değerlendirilerek MEG kontak genişliği ve kanal derinliği sabit tutularak rib açısı üzerinde değişiklikler gerçekleştirilerek yeni bir tasarım yapıp analizi yapılmıştır.

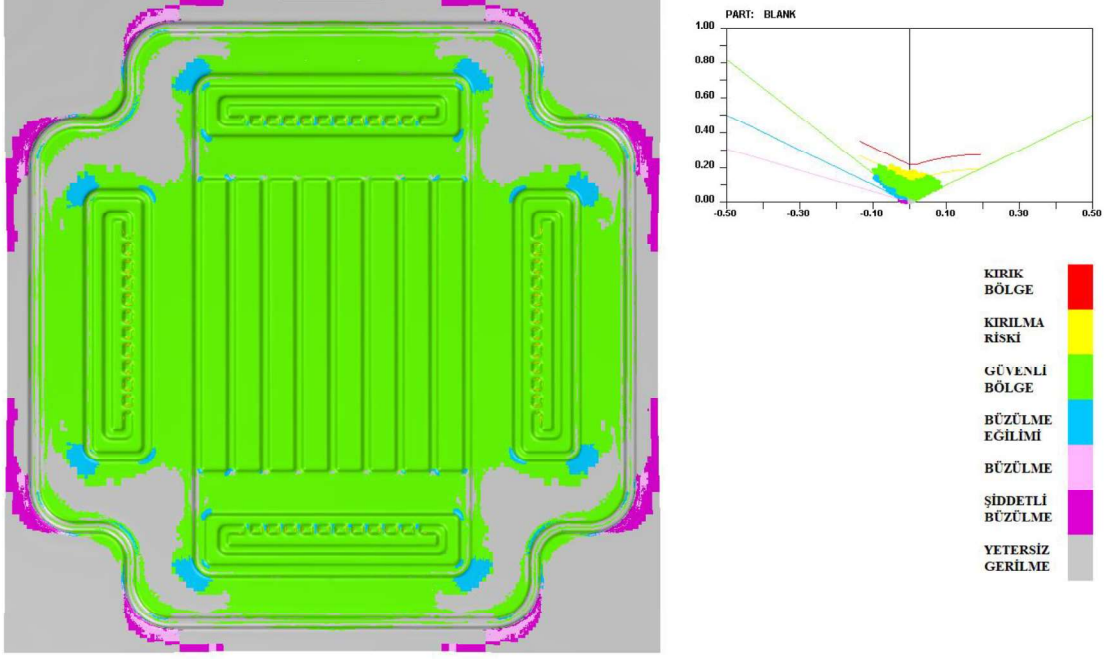
Şekil 4.3 (c)'de verilen analizde 110° rib açısına sahip tasarım için analiz yapılmıştır. Elde edilen verilerde sac üzerindeki akış kanallarında yırtıklarda ve yırtık riski olan bölgelerde azalma olduğu görülmüştür. Kanal açıları belirlenen parametrelere göre optimize edilmeye devam edilmiştir. Şekil 4.3 (d)'de verilen analizde ise 120° rib açısına sahip tasarım için analiz yapılmıştır. Elde edilen verilerde sac üzerindeki herhangi bir yırtık tespit edilmemiştir. Bunun yanında, yırtık riski olan bölgelerde azalma olduğu görülmüştür. Çizelge 3.1'de belirlenen parametrelere bağlı kalmak amacıyla kanal rib açısı optimizasyonu 120° olarak sonuçlandırılmış ve MEG kontak genişliği optimizasyonu için analizlere geçilmiştir.

4.2.2 Yeni tasarımın MEG kontak genişliği optimizasyonu

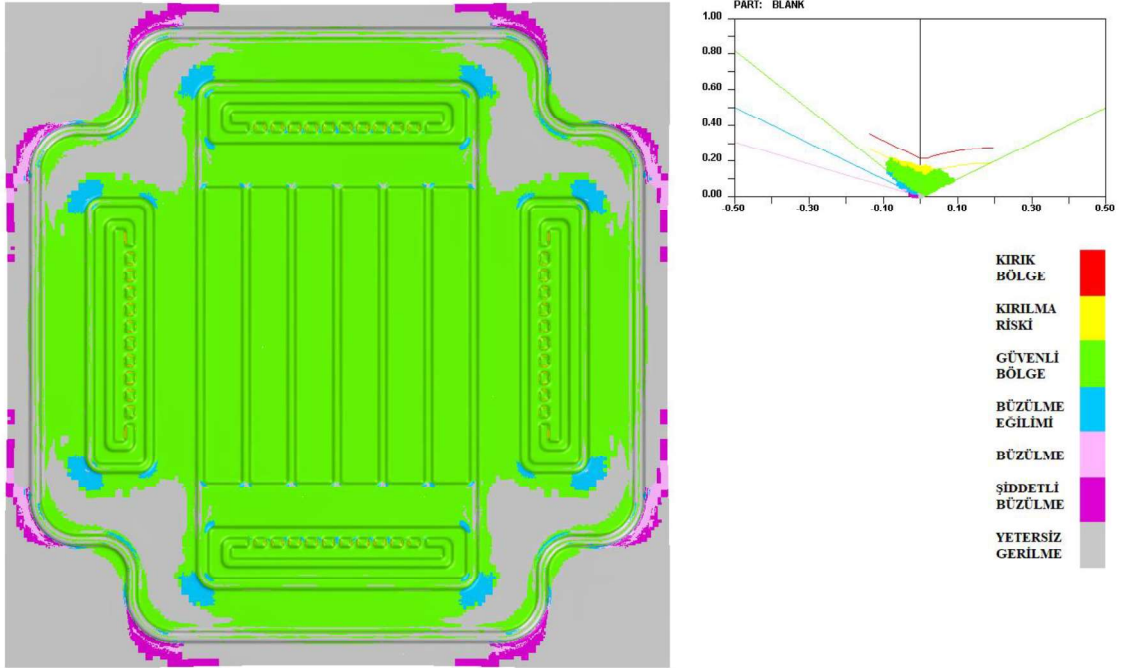
Şekil 4.4' te yapılan optimizasyon çalışmasında 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm kanal derinliği ve rib açısı = 120° sabit tutularak sadece MEG kontak genişliği Çizelge 3.1'de önceden belirlenen parametrelere uygun olacak şekilde 0,5 ve 4 mm arasında değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekil 4.4 (a), Şekil 4.4 (b) ve Şekil 4.4 (c) incelendiğinde 1 mm kontak genişliğine sahip tasarım için kırılma riski bölgesinde olan kısımların azaldığı tespit edilmiştir. 3 ve 4 mm MEG kontak genişliği için inceleme yapıldığında şekillendirilecek bölgelerin neredeyse tamamının güvenli bölge içerisinde yer aldığı görülmüştür. Fakat elektriksel performans açısından kanal ve kontak genişliklerinin yakın olması gerekliliği göz önüne alınarak MEG kontak genişliği optimizasyonu 0,5 mm olarak sonuçlandırılmış ve kanal derinliği optimizasyonu için yapılacak olan analizlere geçilmiştir.



(a)



(b)

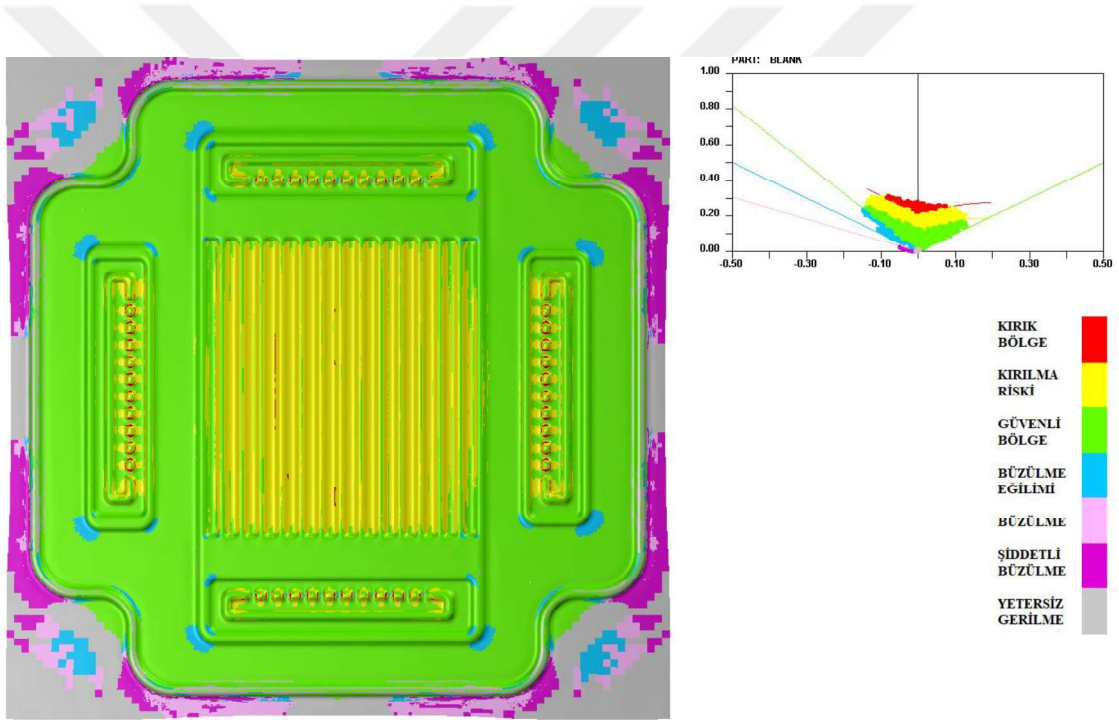


(c)

Şekil 4.4. Yeni tasarım için MEG kontak genişliği optimizasyonu şekillendirme analizi sonuçları; 1 mm (a), 3 mm (b) ve 4 mm (c)

4.2.3 Yeni tasarımın kanal derinliği optimizasyonu

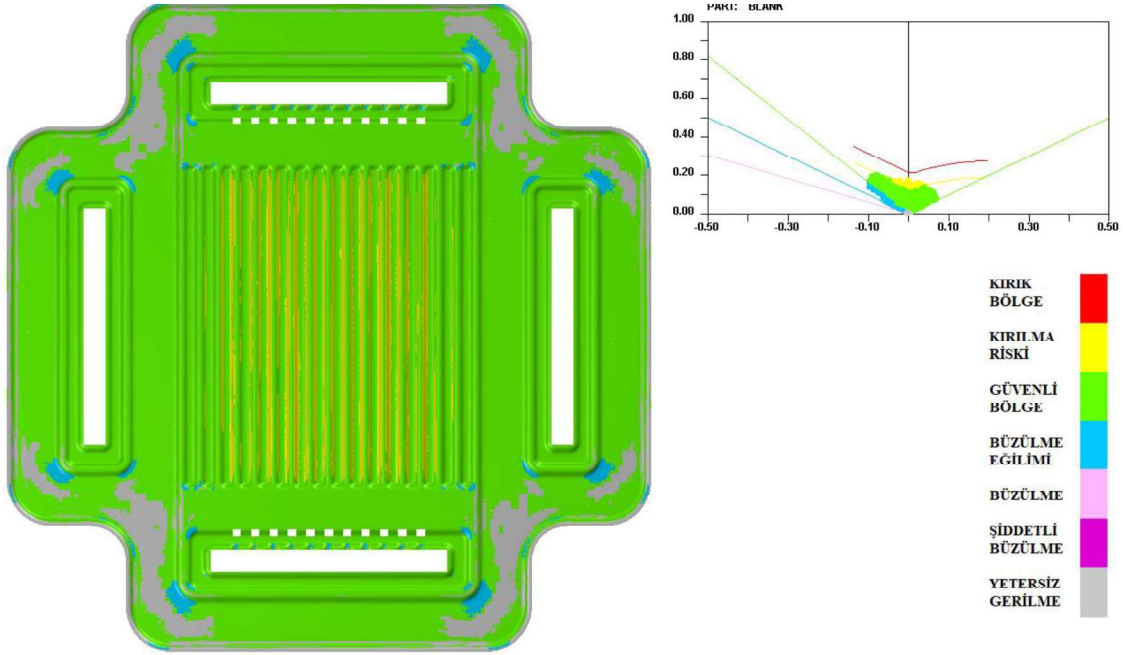
Şekil 4.5’de verilen analiz sonucunda 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm MEG kontak genişliği ve 120° rib açısı sabit tutularak kanal derinliğinin optimum değerine belirlemek amacıyla 0,5 ve 2 mm arasında değişen kanal derinlikleri için tasarlanan kalıpta analiz yapılmıştır. 0,75 mm kanal derinliğine sahip tasarım için yapılan analiz sonucunda sac üzerindeki akış kanallarında ve gaz giriş ve çıkış kısımlarında yırtıklar oluştuğu görülmüştür. Bunun yanında, şekillendirilen sac malzemenin kenarlarında büzülmeler meydana gelmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde 0,75 mm kanal derinliğinde sacda meydana gelen yırtılmalardan dolayı kanal derinliği optimizasyonu için yapılan analizler sonlandırılarak kanal derinliği olarak 0,5 mm kullanılmaya karar verilmiştir.



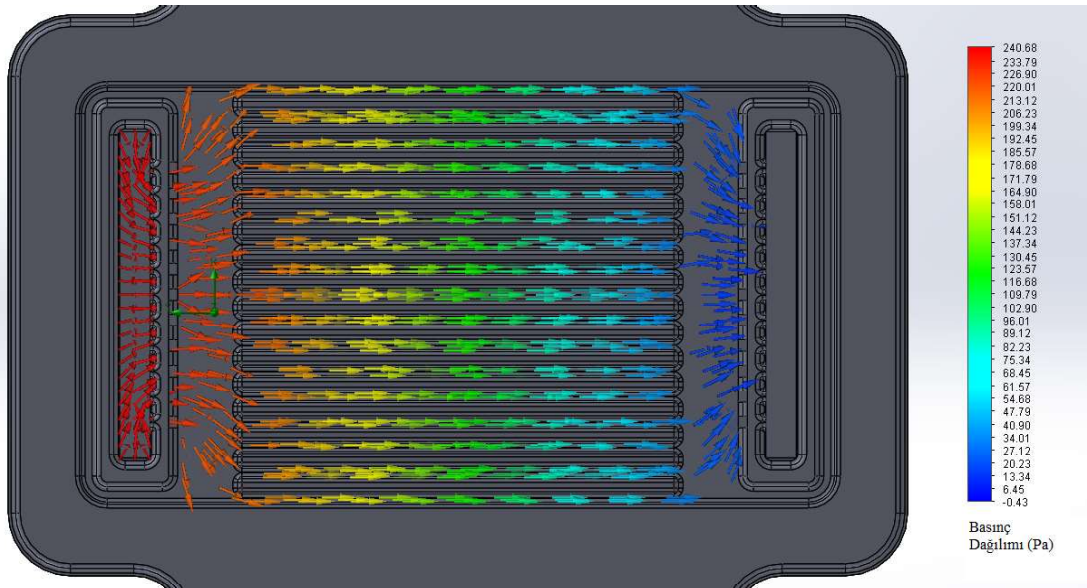
Şekil 4.5. Yeni tasarım için 0,75 mm kanal derinliği şekillendirme analizi sonucu

Optimizasyon çalışmaları ve literatür incelendiğinde; 0,2 mm sac kalınlığı için 0,5 mm MEG kontak genişliği, 0,5 mm kanal derinliği ve 120° rib açısına karar verilmiştir. Bu optimizasyon sonuçlarına göre ETA-Dynaform programında şekillendirme işlemine ek olarak, kesme, delme ve geri esneme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Nihai halde üretimi düşünülen ara plaka tasarımı Şekil 4.6’da verilmiştir. Üretim parametreleri belirlenen ara interkonnektör plakanın akış analizleri de gerçekleştirilmiş ve sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir.

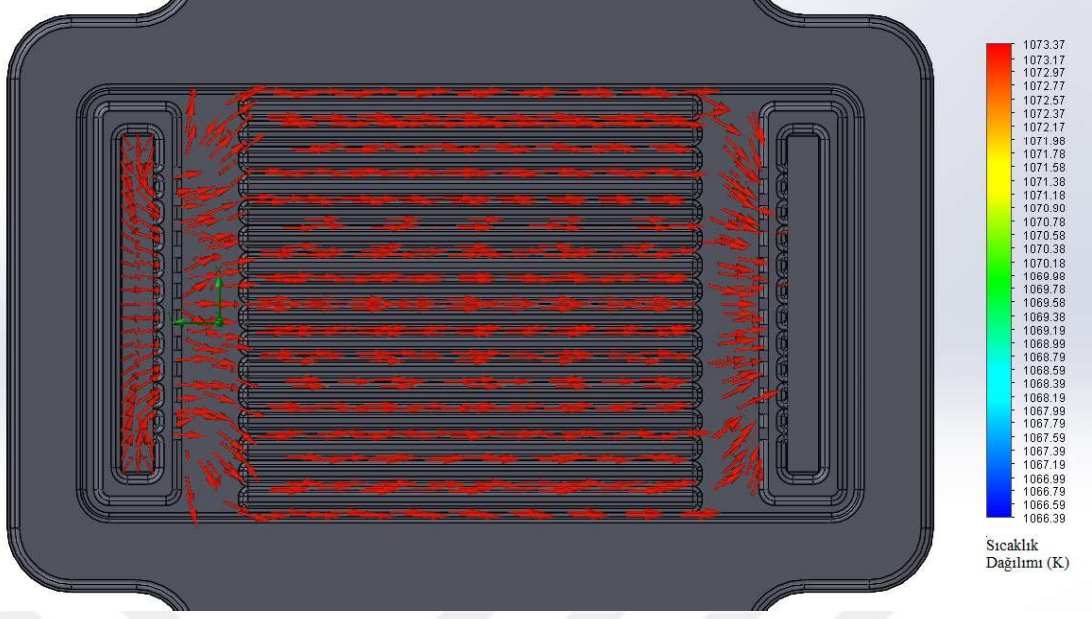
Şekil 4.6’da üretilecek olan parçanın optimizasyonlar sonucunda elde edilen tasarımı incelendiğinde; sac üzerinde herhangi bir yırtık tespit edilmemiştir. Bunun yanında, yapılan analizlerde şekillenen bölgeler dışında kalan kısımlarda oluşan büzülmeler üretim sonrasındaki kesme sonucunda ortadan kalkmıştır. Sonuç olarak, belirlenen tasarımın uygulanabilir olduğu tespit edilmiş ve akış analizleri gerçekleştirilmiştir.



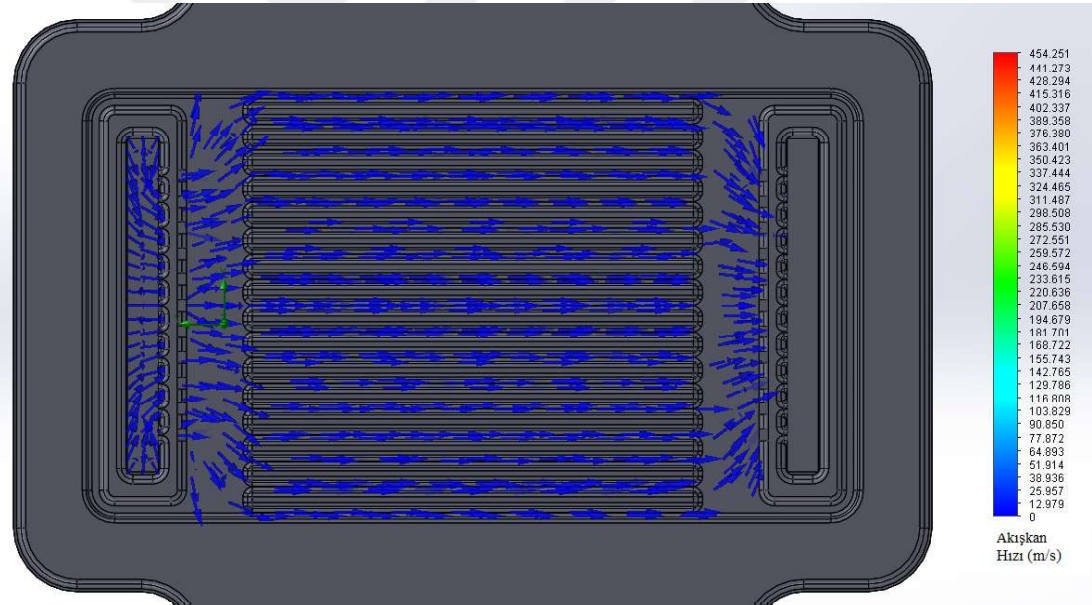
Şekil 4.6. Analizler sonucunda üretimi düşünülen ara interkonnektör plaka



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.7. Nihai tasarımın akış analizi basınç dağılımı (a), sıcaklık dağılımı (b) ve akışkana ait hız dağılımı (c)

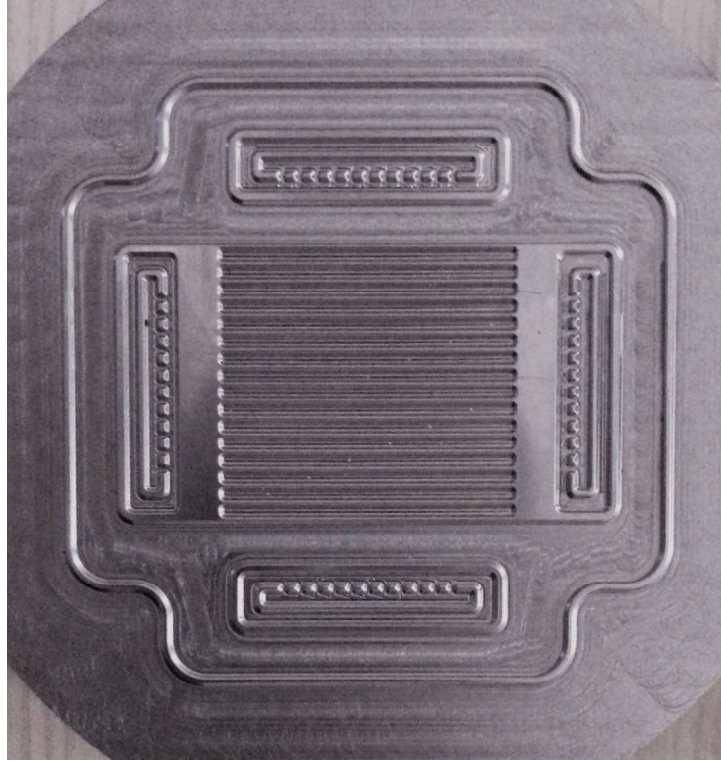
Şekil 4.7'deki nihai tasarımın akış analizi incelendiğinde; akışkanın kanallar içerisinde homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Şekil 4.7 (a), Şekil 4.7 (b) ve Şekil 4.7 (c)'de verilen sonuçlarda giriş ve çıkış basınç, sıcaklık ve akışkan hızı dağılımlarında yüksek bir fark olmadığı ve tasarımın uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir.

BÖLÜM V

ARA İTERKONNEKTÖR ÜRETİMİ VE STAK TASARIMI

5.1. Ara İterkonnektör Üretimi

Önceki bölümde sunulduğu gibi bu tez kapsamında incelenen akış alanı tasarımları için öncelikle, Solidworks programı kullanılarak üç boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin şekillendirilebilirlik analizleri ETA-Dynaform sonlu elemanlar programı yardımı ile belirlenmiştir. Programdan elde edilen sonuçlar incelendikten sonra, şekillendirilebilirlik açısından sorun olmayan tasarımlar için gaz akışlarının kanallar içerisindeki dağılımın homojenliği, akışkan hızı ve basıncı gibi özelliklerini belirlemek amacıyla Solidworks programı kullanılarak akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda interkonnektörün tüm uzunluk ve ölçüleri belirlenerek kalıp oluşturulmuştur. CNC tezgâh yüksek hassasiyette kalıp üretimi yapılmıştır. Üretimi yapılan kalıbın yüzeyi Fotoğraf 5.1’de verilmiştir.



Fotoğraf 5.1. Kalıp yüzeyi

Üretilen kalıp Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi alt yapısında bulunan hidrolik preste kullanılarak akış kanallarının Crofer sac plakaya aktarımı gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 5.2’de kullanılan hidrolik pres verilmiştir. Stak tasarımında çapraz akış tasarımına sahip olacak şekilde iki plaka Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi alt yapısında bulunan punta kaynak makinesi ile birbirine kaynatılıp ara plaka üretimi tamamlanmıştır. Fotoğraf 5.3’te kullanılan punta kaynak makinesi verilmiştir.

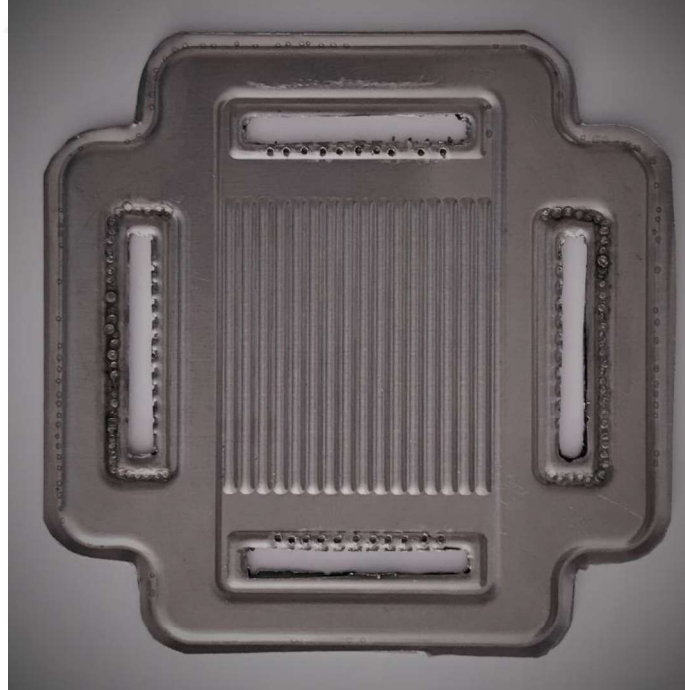


Fotoğraf 5.2. Hidrolik pres



Fotoğraf 5.3. Punta kaynak makinesi

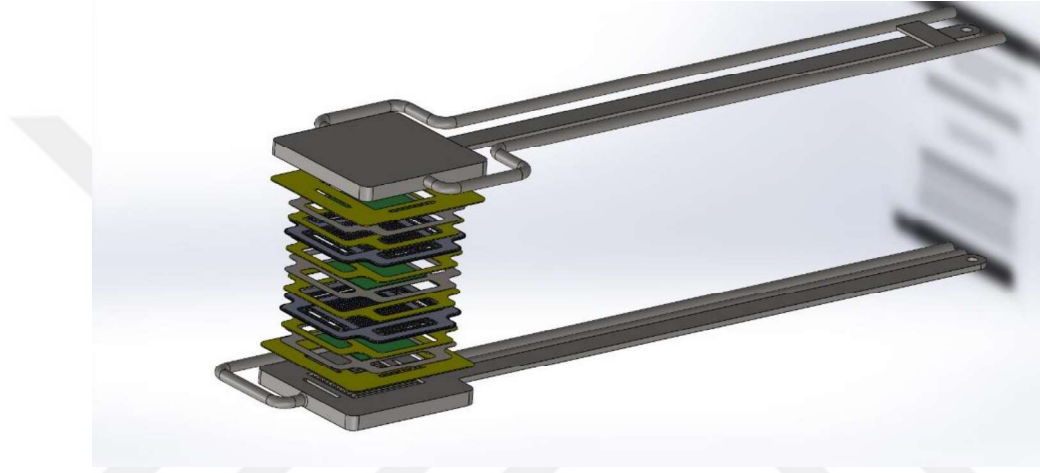
Üretimi tamamlanan ara interkonnektörlerin üzerine akışı sağlayacak gaz giriş ve çıkış kollektörleri açılmıştır. Kullanıma hazır olan ara interkonnektör plaka Fotoğraf 5.4'te verilmiştir.



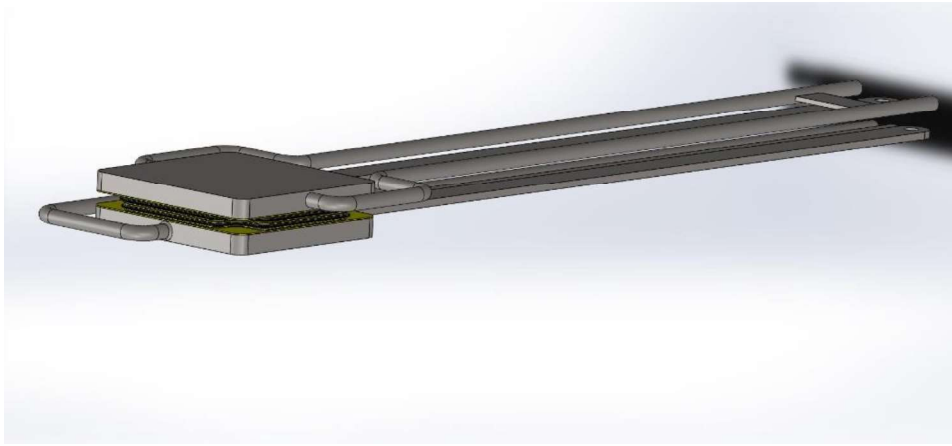
Fotoğraf 5.4. 0,2 mm Crofer sacdan üretilen ara interkonnektör

5.2. Stak Tasarımı

Düzlemsel KOYP mobil sistemlerden ziyade evsel ve yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulan cihaz ve araçlarda kullanılabilir. Bu kullanım alanları için tek hücreden elde edilen güç çıktısı yeterli olmamaktadır. Bu yüzden, istenilen akım ve voltaj değerlerini elde etmek amacıyla birden çok hücre seri ve paralel olarak istenilen şekilde bir araya getirilerek stak oluşturulmaktadır. Tez kapsamında oluşturulan iki hücreli stak tasarımı Şekil 5.5’de verilmiştir.



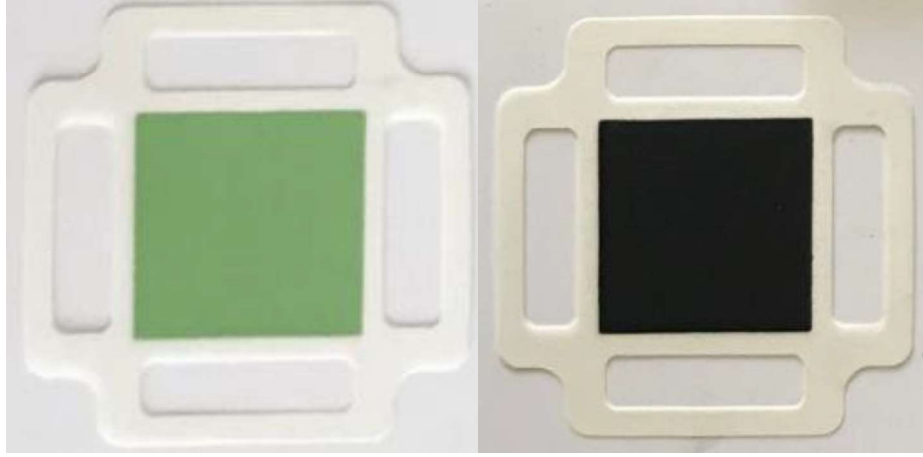
(a)



(b)

Şekil 5.1. Stak tasarımının; açık (a) ve kapalı hali (b)

Stak tasarımında kullanılmak üzere yakıt ve oksijenin taşınması için kollektörler bulunan özel tasarıma sahip hücre üretimi yapılmış ve Fotoğraf 5.5’te verilmiştir.



Fotoğraf 5.5. Yeni hücre tasarımı

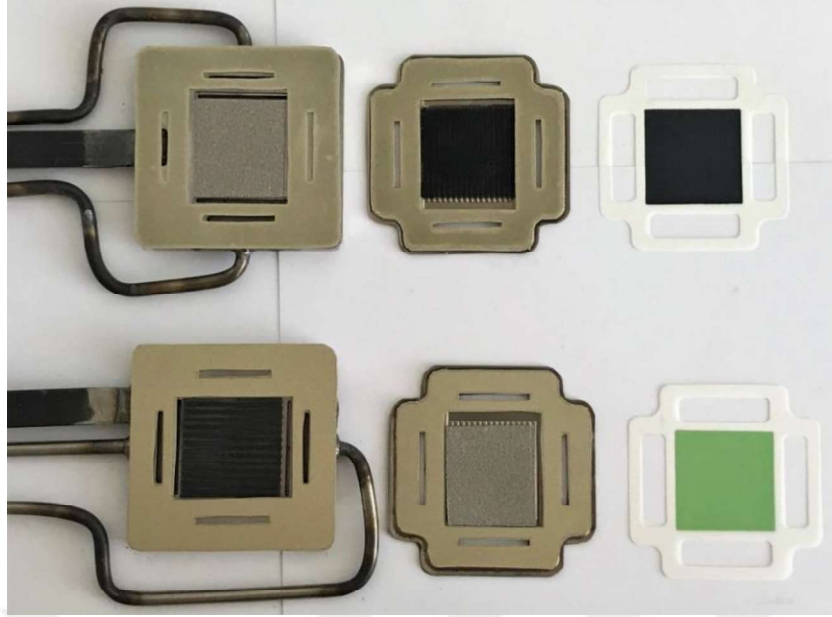
Stak tasarımında kullanılmak üzere yakıt ve oksijenin stak içerisine sağlanmasını ve dağılmasını sağlayan özel tasarıma sahip son (alt ve üst) interkonnektör plaka üretilmiş ve Fotoğraf 5.6’da verilmiştir.



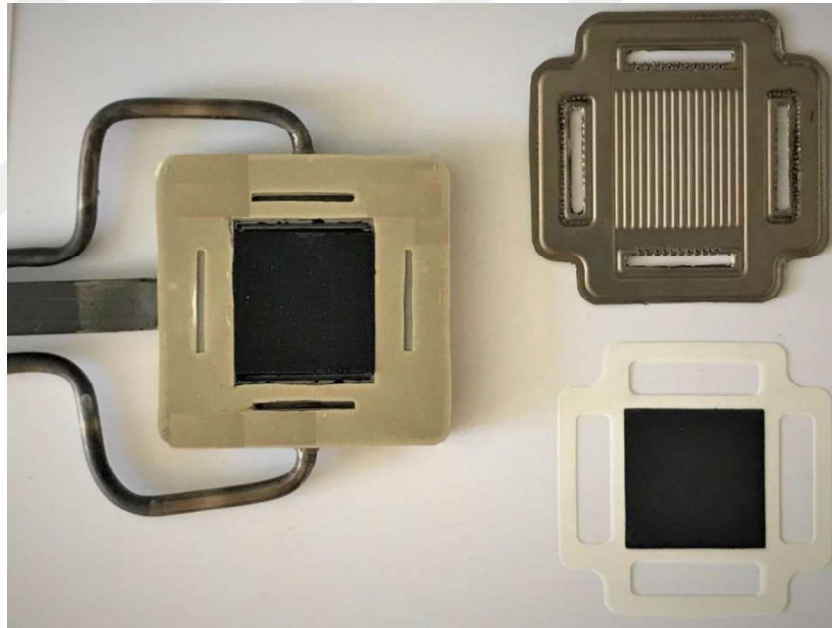
Fotoğraf 5.6. Son interkonnektör plakalar

5.3. Deneysel Kurulum

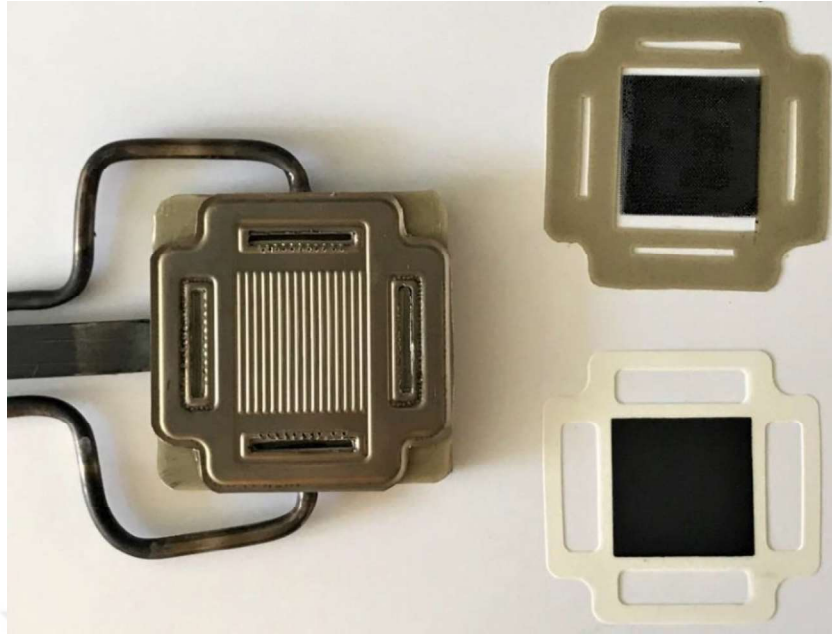
Fotoğraf 5.7’da stak oluşturulurken kullanılan elemanlar verilmiştir. Ayrıca stak hazırlanması ve test sırasında izlenen aşamalar Fotoğraf 5.8’da verilmiştir.



Fotoğraf 5.7. Stak tasarımında kullanılan elemanlar



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

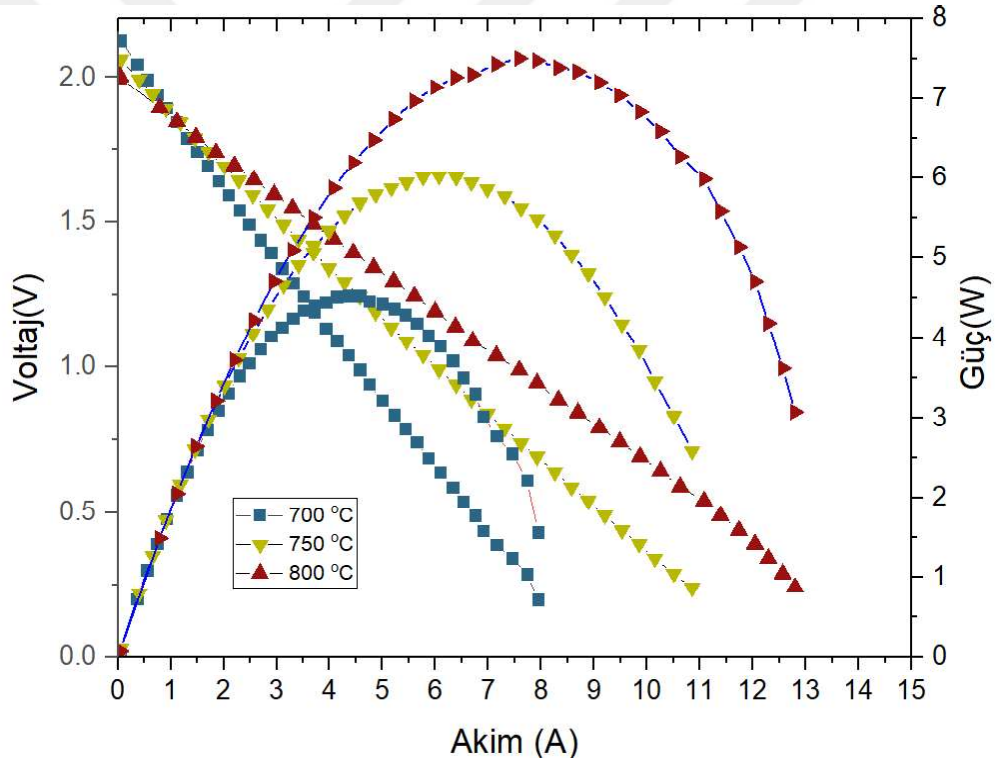
Fotoğraf 5.8. Stak hazırlanırken izlenen aşamalar: stak elemanlarının bir araya getirilmesi (a-d) ve stağın fırına koyulması (e-f)

Fotoğraf 5.8 (a-d)'de görüldüğü gibi yeni stak için geleneksel yöntemlerin aksine pres yöntemiyle ara interkonnektör plakalar üretilmiştir. CNC torna tezgâhı yardımıyla ilk ve son interkonnektör plakaların üretimi yapılmıştır. Aynı zamanda, stak tasarımına uygun hava ve yakıtın akması için boşlukların bulunduğu ve stak şekline uygun bir tasarıma sahip hücrelerin üretimi yapılmıştır. Sızdırmazlık ve elektriksel izolasyonu sağlayan contalar hidrolik pres yardımıyla istenilen kalınlığa getirilmiştir. Stak hazırlanırken hücre, ara interkonnektör ve son interkonnektör plakaların yüzeyleri ve akış kanalları katot taraf için LSM pasta ve anot taraf için NiO pasta ile boyanmıştır. Hücre ve interkonnektör plakalar arasındaki kontak artırmak amacıyla katot tarafında Crofer elek, anot tarafında ise gözenekli nikel elek kullanılmıştır. Hazırlanan elemanlar uygun şekilde bir araya getirilerek stak tamamlanmıştır. Hazır hale getirilen stak Fotoğraf 5.8 (e)'de

görülen ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi alt yapısında bulunan Protherm marka yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilerek Fotoğraf 5.8 (f)'de görüldüğü gibi izole edilmiştir. 700, 750 ve 800 °C sıcaklıklarda stakların performans ölçümleri yapılmıştır.

5.4. Stak Performans Sonuçları

Tasarımı gerçekleştirilen ve 0,2 mm Crofer sacdan imal edilen ara interkonnektör içeren yeni nesil stağın 700-800 °C arası çalışma sıcaklıklarında performans testleri yapılmıştır. Karşılaştırma amaçlı geleneksel talaşlı imalat ile üretilen ara interkonnektörlerin kullanıldığı ikili stak da test edilmiş ve sonucu Şekil 5.2'de verilmiştir.

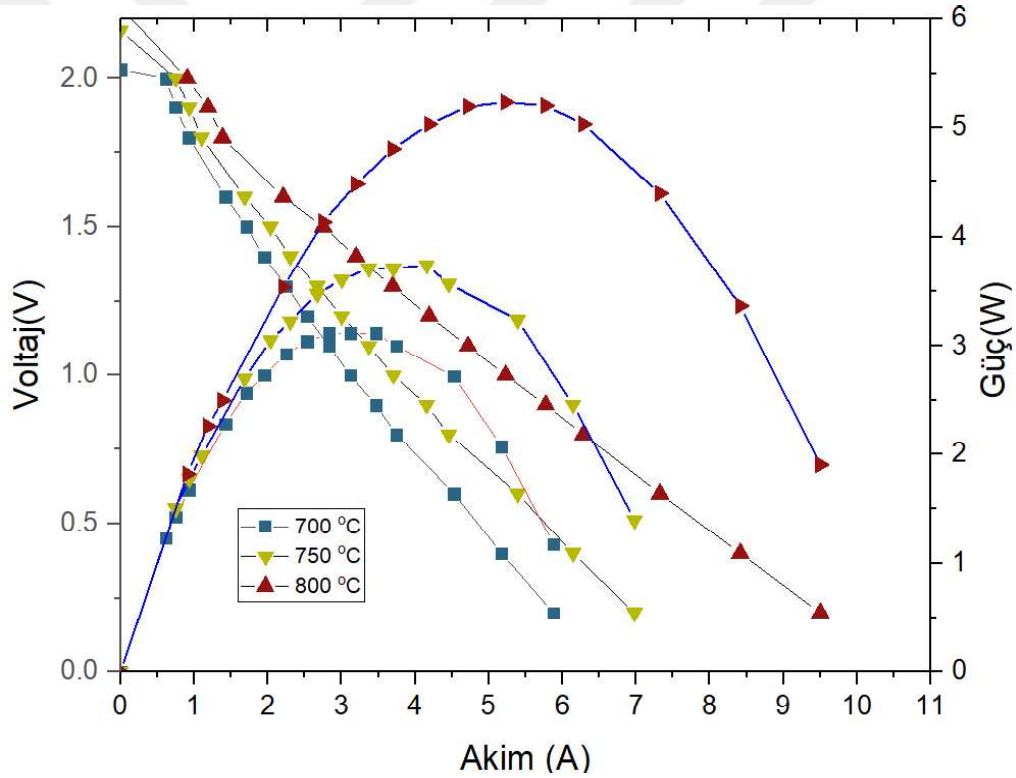


Şekil 5.2. Geleneksel stak deney sonuçları

Ardından aynı özellikteki tekli hücrelerle iki hücreli yeni nesil stak oluşturulmuş ve geleneksel stak performansı ile karşılaştırılarak stak performansı incelenmiştir. Deneylerde Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Vestel Savunma Sanayi ortaklığında geliştirilen 16 cm² aktif alana sahip YSZ elektrolit destekli MEG'ler kullanılmıştır. NiO-YSZ anot ve LSM-YSZ katot içeren MEG'lerin YSZ elektrolit desteği şerit döküm ile

anot ve katot tabakaları ise ipek baskı yöntemi ile imal edilmiştir. Şekil 5.2'den görüleceği üzere geleneksel stak testlerinde 700, 750, 800°C sıcaklıklarda sırası ile yaklaşık 4,35; 6 ve 7,5 W güç elde edilmiştir.

Yeni nesil stakla ilgili 700, 750 ve 800°C'deki güç değerleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Bu sıcaklıklardaki maksimum güç değerleri sırası ile 3,12; 3,74 ve 5,25 W olarak tespit edilmiştir. Bu değerler toplam hücrelerin aktif alanı olan 16cm²'ye bölünerek elde edilen en yüksek güç yoğunlukları da sırası ile 97,5; 117 ve 164 mW/cm² olarak hesaplanmıştır. Geleneksel stağa oranla bir miktar daha düşük olan bu güç değerlerinin özellikle ara plaka ve elektrotlar arasındaki kontakın iyileştirilmesi ile beklenen değerlere çekilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 5.3. Yeni nesil stak deney sonuçları

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde ticari boyutlara sahip (81 cm² aktif alan) tipik YSZ elektrolit destekli MEG içeren staklardaki mevcut ara interkonnektör plakalar talaşlı imalat ile kanal işlenmesi gerektiği için yaklaşık olarak 5 mm kalınlıkta ve yaklaşık 420 g ağırlığındadır. Bu tez çalışması kapsamında 16 cm² aktif alan için geliştirilen ara interkonnektörler ise sadece 1 mm kalınlıkta olup ağırlıkları yaklaşık 18 g olarak

ölçülmüştür. 81 cm² aktif alan için bu değerler güncellendiğinde, kalınlığın değişmediği kabulü ile yeni nesil ara interkonnektör plakanın hacim ve kütesinin geleneksel talaşlı imalat ile üretilen ara interkonnektörlerin yaklaşık % 20'si civarında olacağı hesaplanmıştır. Geleneksel ve yeni nesil ara plaka içeren KOYP staklarının evsel uygulamalar için uygun farklı kapasitelerdeki güç çıktısı değerleri için hacimsel ve kütleli güç yoğunluğu karşılaştırması Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu hesaplamalarda son plakalar aynı kabul edilmiş olup MEG sayısı dolayısı ile ara plaka sayısı göz önüne alınan KOYP stak kapasitesi ve elde edilen gerçek performans datalarına göre belirlenmiştir. Fakat MEG ve akım toplayıcı elemanların ağırlıkları ihmal edilmiştir. Öte yandan, pres yöntemi ile imal edilmiş ara plaka içeren staklardan gerçekleştirilecek optimizasyon çalışmaları neticesinde klasik tasarımla aynı güç değerlerinin elde edilmesi durumu da hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Hacimsel ve kütleli güç yoğunluğu karşılaştırması

Stak	Klasik Stak				Yeni Nesil Stak			
	0,5	1	1,5	2	0,5	1	1,5	2
Stak Gücü (kW)	0,5	1	1,5	2	0,5	1	1,5	2
Hacimsel Güç Yoğunluğu (W/L)	495	538	564	570	1220	1539	1705	1786
Kütleli Güç Yoğunluğu (W/Kg)	33	45	52	56	49	80	104	121

Her ne kadar yeni nesil iki hücreli stak deneylerinde, klasik tasarıma sahip stağa nazaran daha düşük güç değerleri elde edilmiş olsa da, yeni nesil ara plaka içeren stağın 500-2000 W arasında değişen farklı sistem kapasiteleri için gerek hacimsel gerekse de kütleli güç yoğunluğunun daha yüksek olduğu görülmektedir. Hacimsel ve kütleli güç yoğunluğu değerlerindeki iyileşmenin ise artan sistem kapasite ile orantılı olarak arttığı dikkat çekmektedir. 1 kW gücündeki bir KOYP stak için geleneksel tasarım 538 W/L hacimsel ve 45 W/kg kütleli güç yoğunluğuna sahipken, bu çalışma kapsamında geliştirilen stak için bu değerler sırası ile 1539 W/L ve 80 W/kg olarak hesaplanmıştır. 2 kW gücündeki bir KOYP stak için ise geleneksel tasarım için 570 W/L hacimsel ve 56 W/kg kütleli güç yoğunluğu, yeni nesil stak için 1786 W/L hacimsel ve 121 W/kg kütleli güç yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Öte yandan bir dizi optimizasyon sonrasında yeni tasarımın klasik tasarımla aynı güç değerlerine ulaştırılması durumunda

ise 1 kW ve 2 kW stak kapasitesi için bu değerlerin sırası ile 2000 W/L ve 91 W/kg ile 2410 W/L ve 143 W/kg'lara yükselebileceği görülmektedir.

Ara interkonnektör plakalarının talaşlı imalat yerine pres yöntemi ile üretilmesi, kalın malzeme kullanımı gereksinimini ortadan kaldırdığı için malzeme maliyetini önemli ölçüde düşürmektedir. Öte yandan pres ile üretim yöntemi, CNC tezgahlarında hassas ve uzun süren imalat aşamalarını ortadan kaldırdığı için üretim maliyetini de azaltmaktadır. Maliyette sağlanan bu iyileşmelerin yanında incelenen ara plaka kalınlığı KOYP stağın hacimsel ve kütleli güç yoğunluğunu da önemli derecede artırmıştır. Sonuç olarak; pres yöntemi ile ince sac malzemedен üretilen ara plakalı KOYP stak tasarımının; yüksek hacimsel ve kütleli güç yoğunluğuna sahip, düşük maliyetli ve kompakt KOYP stak üretimi için son derece etkili olduğu görülmüştür.

BÖLÜM VI

SONUÇ

Bu tez kapsamında katı oksit yakıt pili stak tasarımları için pres baskı tekniği kullanılarak geleneksel interkonnektör üretim tekniklerine göre çok kısa bir sürede ve aynı zamanda literatürden farklı olarak yüksek hacimsel (W/m^3) ve kütleli güç yoğunluğuna (W/kg) sahip interkonnektör üretimi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle interkonnektör malzemesi olarak kullanılan Crofer 22 APU sac malzemesinin özelliklerini belirlemek amacıyla farklı kalınlıklarda tek eksenli çekme, anizotropi, Erichsen, derin çekme, geri esneme ve şekillendirme sınır diyagramı (FLD) deneyleri yapılmıştır. Belirlenen malzeme özellikleri ETA-Dynaform programında kullanılarak farklı tasarımlar için şekillendirilebilirlik analizleri yapılmıştır. Şekillendirme analizlerinin yanında yeni akış alanı tasarımlarının üzerinde gerçekleşecek olan gaz akışlarının kanallar içerisindeki dağılımın homojenliği, akışkan hızı ve basıncı gibi özellikleri incelemek amacıyla Solidworks programında akış analizleri de gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- ✓ Tek eksenli çekme ve anizotropik deneylerinde, 0,2 mm kalınlığındaki sac için pekleşme üssü $n=0,2$ olarak belirlenmiştir. 0,5 ve 1 mm kalınlığında sırasıyla pekleşme üssü $n=0,17$ ve $n=0,18$ olarak bulunmuştur. Holloman denkleminde, mukavemet katsayısını gösteren K en yüksek 1,0 mm sac kalınlığı için 702,20 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca şekillendirilebilirlik açısından 1,0 mm sac kalınlığına ve hadde yönünde (0°) en yüksek mühendislik BŞD değeri 0,315 mm/mm olarak elde edilmiştir.
- ✓ Geri esneme deneylerinde, destek silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafe $L=50$ mm için en düşük geri esneme 0,2 mm kalınlıktaki sac için $\theta=90^\circ$ eğme açısında $\Delta\theta = -14^\circ$ olarak gerçekleşirken, en yüksek gerisnemenin aynı eğme açısında ve 1 mm sac kalınlığında $\Delta\theta = -39^\circ$ olduğu belirlenmiştir. Destek silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafe $L=100$ mm için 0,5 mm kalınlıktaki sac için $\theta=90^\circ$ eğme açısında $\Delta\theta = 8^\circ$ olarak gerçekleşirken, en yüksek geri

esnemenin $\theta=120^\circ$ eğme açısında 0,2 mm sac kalınlığı için $\Delta\theta = 30^\circ$ olduğu belirlenmiştir.

- ✓ Erichsen deneylerinde, oluşturulan kubbenin tepe yüksekliği 0,2; 0,3; 0,5 ve 1,0 mm sac kalınlıkları için sırasıyla 7,0; 7,2; 7,7 ve 9,8 mm olarak elde edilmiştir.
- ✓ Derin çekme deneylerinde, 0,2 mm kalınlığa sahip sacı tam olarak şekillendirebilmek için numunenin, yüzeyine yağlama yapılarak baskı plakası kuvvetinin 2 kN'a düşürülmesi gerektiği tespit edilmiştir. 0,3 mm ve 0,5 mm sac kalınlığı içinse numune yüzeyine yağlama yapılarak ve 10 kN baskı plakası kuvveti uygulanarak tam olarak şekillendirebilmenin mümkün olduğu tespit edilmiştir. Sacların daha ince kalınlıklarının aksine 1,0 mm kalınlığa sahip sac için numune yüzeyine hiçbir yağlama yapılmadan 30 kN baskı plakası kuvveti uygulanarak tam olarak şekillendirebilmenin mümkün olduğu tespit edilmiştir. 1,0 mm kalınlığa sahip sacın şekillendirilebilirliğinin beklendiği gibi daha yüksek olduğu görülmüştür. 0,2 mm kalınlığa sahip sacın şekillendirilebilirlik limiti %10 civarında olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen değer, üretimi gerçekleştirilecek olan interkonnektör tasarımının imalatı için yeterli olacağı düşünülmüştür.
- ✓ ETA-Dynaform programında yapılarana analizler sonucunda 0,2 mm sac kalınlığı için MEG kontak genişliği 0,5 mm, rib açısı 120° ve kanal derinliği 0,5 mm olarak optimize edilmiştir. Solidworks programında gerçekleştirilen akış analizlerinde, denenen son tasarım için giriş ve çıkış basınç, sıcaklık ve akışkan hızı dağılımlarında yüksek bir fark olmadığı ve tasarımın uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir.
- ✓ Geleneksel ikili stak testlerinde 700, 750, 800°C sıcaklıklarda sırası ile yaklaşık 4,35; 6 ve 7,5 W güç elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen iki hücreli stakla ilgili ise aynı şekilde 700, 750 ve 800°C sıcaklıklarda güç değerleri elde edilmiştir. Bu sıcaklıklardaki maksimum güç değerleri sırası ile 3,12; 3,74 ve 5,25 W olarak tespit edilmiştir. Aradaki küçük performans farklarının bir dizi stak optimizasyon çalışması ile giderilebileceği düşünülmektedir.

- ✓ 1 kW gücündeki bir KOYP stak için yeni nesil tasarımın, geleneksel tasarıma oranla hacimsel olarak %286 ve kütleli olarak %177 daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. 2 kW gücündeki bir KOYP stak içinse yeni nesil tasarımın, geleneksel tasarıma oranla hacimsel olarak %313 ve kütleli olarak %216 daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, ara intenkonnektör imalatı için önerilen pres işlemleri ile büyük ölçüde azaltılan plaka kalınlığından kaynaklanmaktadır. Öte yandan önerilen metot yüksek hacimsel ve kütleli güç yoğunluğunun yanı sıra aynı zamanda düşük malzeme ve üretim maliyeti de sunmaktadır. Bu sayede yüksek hacimsel ve kütleli güç yoğunluğuna sahip, düşük maliyetli ve kompakt KOYP stak üretimi mümkün görünmektedir.



KAYNAKLAR

Arshad, A., Ali, H. M., Habib, A., Bashir, M. A. and Jabbal, M., "Energy and Exergy analysis of Fuel Cells: A Review", *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018.

Bhattacharya, D., Mukhopadhyay, J., Biswas, N., Basu, R. N. and Das, P. K., "Performance evaluation of different bipolar plate designs of 3D planar anode-supported SOFCs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123(382-396), 2018.

Blum, L., Meulenberg, W. A., Nabielek, H. and Steinberger-Wilckens, R., "Worldwide SOFC technology overview and benchmark", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2(6), 482-492, 2005.

Celik, S., "Kati Oksit Yakit Pillerinde Elektrot/Elektrolit Arayüzey Dinamiğinin İncelenmesi ", Doktora Tezi, (*Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*), Ankara, 2013.

Celik, S., "Influential parameters and performance of a glass-ceramic sealant for solid oxide fuel cells", *Ceramics International*, 41(2), 2744-2751, 2015.

Chen, Q., Wang, Q., Zhang, J. and Yuan, J., "Effect of bi-layer interconnector design on mass transfer performance in porous anode of solid oxide fuel cells", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(9-10), 1994-2003, 2011.

Dicks, A. and Rand, D. A. J., Fuel cell systems explained, *Wiley Online Library*, 2018.

Fergus, J. W., "Sealants for solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 147(1-2), 46-57, 2005

Ghadikolaee, H. T., Elyasi, M., Khatir, F. A. and Hosseinzadeh, M., "Experimental investigation of Fracture in rubber pad forming of bipolar plate's micro channels", *Procedia Engineering*, 207(1647-1652), 2017.

Gong, L., Duan, Q., Liu, J., Li, M., Li, P., Jin, K. and Sun, J., "Spontaneous ignition of high-pressure hydrogen during its sudden release into hydrogen/air mixtures", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23558-23567, 2018.

Hattalli, V. L. and Srivatsa, S. R., "Sheet metal forming processes—recent technological advances", *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2564-2574, 2018.

Howe, K. S., Thompson, G. J. and Kendall, K., "Micro-tubular solid oxide fuel cells and stacks", *Journal of Power Sources*, 196(4), 1677-1686, 2011.

Huang, C., Shy, S. and Lee, C., "On flow uniformity in various interconnects and its influence to cell performance of planar SOFC", *Journal of Power Sources*, 183(1), 205-213, 2008.

Jin, C. K., Jeong, M. G. and Kang, C. G., "Effect of rubber forming process parameters on micro-patterning of thin metallic plates", *Procedia Engineering*, 81(1439-1444), 2014.

Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A. and Zhou, X. Y., "A review of numerical modeling of solid oxide fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(7), 761-786, 2007.

Khazaei, I. and Rava, A., "Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries", *Energy*, 119(235-244), 2017.

Kornely, M., Leonide, A., Weber, A. and Ivers-Tiffée, E., "Performance limiting factors in anode-supported cells originating from metallic interconnector design", *Journal of Power Sources*, 196(17), 7209-7216, 2011.

Kwok, Y., Wang, Y., Wu, M., Li, F., Zhang, Y., Zhang, H. and Leung, D., "A dual fuel microfluidic fuel cell utilizing solar energy and methanol", *Journal of Power Sources*, 409(5)8-65, 2019.

Lee, S., Kim, H., Yoon, K. J., Son, J.-W., Lee, J.-H., Kim, B.-K., Choi, W. and Hong, J., "The effect of fuel utilization on heat and mass transfer within solid oxide fuel cells examined by three-dimensional numerical simulations", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97(77-93), 2016.

Lin, C.-K., Chen, J.-Y., Tian, J.-W., Chiang, L.-K. and Wu, S.-H., "Joint strength of a solid oxide fuel cell glass–ceramic sealant with metallic interconnect", *Journal of Power Sources*, 205(307-317), 2012.

Liu, Y. and Hua, L., "Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming", *Journal of Power Sources*, 195(11), 3529-3535, 2010.

Lucia, U., "Overview on fuel cells", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30(164-169), 2014.

Lumelskyj, D., Rojek, J., Banabic, D. and Lazarescu, L., "Detection of strain localization in Nakazima formability test-experimental research and numerical simulation", *Procedia Engineering*, 183(89-94), 2017.

Lumelskyj, D., Rojek, J., Pe, R., Grosman, F. and Tkocz, M., "Numerical simulation of formability tests of pre-deformed steel blanks", *Archives of Civil And Mechanical Engineering*, 12(2), 133-141, 2012.

Mahamud, R., Khan, M. M. K., Rasul, M. and Leinster, M., Thermal Power Plants-Advanced Applications, (*Intechopen*), 2013.

Manglik, R. M. and Magar, Y. N., "Heat and mass transfer in planar anode-supported solid oxide fuel cells: effects of interconnect fuel/oxidant channel flow cross section", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 7(4), 041003, 2015.

Minh, N. Q. and Takahashi, T., Science and technology of ceramic fuel cells, *Elsevier*, 1995.

Moka, S., Pande, M., Rani, M., Gakhar, R., Sharma, M., Rani, J. and Bhaskarwar, A. N., "Alternative fuels: an overview of current trends and scope for future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32(697-712), 2014.

Najjar, Y. S., "Hydrogen safety: The road toward green technology", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 10716-10728, 2013.

Nakanishi, A., Hattori, M., Sakaki, Y., Miyamoto, H., Aiki, H., Takenobu, K. and Nishiura, M., "Development of MOLB type SOFC", *ECS Proceedings Volumes*, 2003(53-59), 2003.

Nikolaidis, P. and Poullikkas, A., "A comparative overview of hydrogen production processes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67(5)97-611, 2017.

Ozturk, F. and Lee, D., "Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test", *Journal of Materials Processing Technology*, 170(1-2), 247-253, 2005.

Penner, S., "Steps toward the hydrogen economy", *Energy*, 31(1), 33-43, 2006.

Pettersson, L. J. and Westerholm, R., "State of the art of multi-fuel reformers for fuel cell vehicles: problem identification and research needs", *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(3), 243-264, 2001.

Pulagam, K. C., "Optimization of solid oxide fuel cell interconnect design", Master's Thesis, (*University of Nevada*), Las Vegas 2009.

Qu, Z., Aravind, P., Boksteen, S., Dekker, N., Janssen, A., Woudstra, N. and Verkooijen, A., "Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of anode-supported planar SOFC", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(16), 10209-10220, 2011.

Schmidt, M., "The Hexis Project: Decentralised electricity generation with waste heat utilisation in the household", *Fuel Cells Bulletin*, 1(1), 9-11, 1998.

Sharaf, O. Z. and Orhan, M. F., "An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32(810-853), 2014.

Timurkutluk, B., "Performance analysis of an intermediate temperature solid oxide fuel cell", Yüksek Lisans Tezi, (*Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*), Ankara, 2007.

Timurkutluk, B., Toros, S., Onbilgin, S. and Korkmaz, H. G., "Determination of formability characteristics of Crofer 22 APU sheets as interconnector for solid oxide fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14638-14647, 2018.

Ye, X., Yuan, C., Chen, Y., Zhong, C., Zhan, Z. and Wang, S., "Micro-tubular solid oxide fuel cells and their stacks running on direct ethanol fuels", *Journal of The Electrochemical Society*, 161(9), F894-F898, 2014.

Zeng, S., Zhang, X., Chen, J. S., Li, T. and Andersson, M., "Modeling of solid oxide fuel cells with optimized interconnect designs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125(506-514, 2018.

Zhang, J., Shen, G. Z., Du, Y. and Hu, P., "Modal Analysis of a Lightweight Engine Hood Design Considering Stamping Effects", *Applied Mechanics and Materials*, s. 364-369, 2013.



ÖZ GEÇMİŞ

Sezer ÖNBİLGİN 23.04.1992 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Niğde’de tamamladı. 2011 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2016’da mezun oldu. 2018 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak akademik hayatına başladı. 2013 yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarını sürdürmektedir.



TEZ ÇALIŞMASINDA ÜRETİLEN YAYINLAR

Bu tez çalışmasından, 1 (iki) adet uluslararası makale üretilmiştir. Bu üretilen çalışma aşağıda sunulmuştur.

Timurkutluk, B., Toros, S., Onbilgin, S. and Korkmaz, H. G., "Determination of formability characteristics of Crofer 22 APU sheets as interconnector for solid oxide fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14638-14647, 2018.



