



**AÇIK HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK METALLERİN
ÜRETİM PRAKTİKLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ VE 3 BOYUTLU
MODELENEBİLİRLİĞE UYGUNLUĞU**

Altuğ BAKIRCI



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK METALLERİN ÜRETİM
PRAKTİKLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE 3 BOYUTLU
MODELENEBİLİRLİĞE UYGUNLUĞU**

Altuğ BAKIRCI
ORCID: 0000-0003-0438-6337

Prof. Dr. Agah UĞUZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Altuğ BAKIRCI tarafından hazırlanan "Açık Hücreli Alüminyum Köpük Metallerin Üretim Praktikliğinin Deneysel Olarak İncelenmesi Ve 3 Boyutlu Modellenebilirliğe Uygunluğu" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Agah UĞUZ

Başkan : Prof. Dr. Agah UĞUZ
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Üye : Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR
ORCID: 0000-0003-0816-4029
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Üye : Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ
ORCID: 0000-0003-3350-1509
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
19/07/2019

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

19/07/2019


Altuğ BAKIRCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AÇIK HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK METALLERİN ÜRETİM PRAKTİKLİĞİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE 3 BOYUTLU MODELLENEBİLİRLİĞE UYGUNLUĞU

Altuğ BAKIRCI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Agah UĞUZ

Günümüz sorunlarından biri olan enerji verimliliği tükenen enerji kaynakları sebebiyle daha da önemli hale gelmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için ilk akla gelen yöntemlerden biri kullanılan materyallerin hafifletilmesidir. Köpük metaller yüksek hacimlere sahipken; bu geniş hacimlerine oranla göreceli yoğunlukları çok düşüktür. Bununla birlikte enerji, ses, radyasyon ve titreşim sönümlenme; susturucu, filtrasyon ve ısı eşanjörü gibi çok çeşitli alanlarda farklı amaçlar doğrultusunda kullanılan bir malzeme olarak da ilgi çekici bir konudur. Bu amaç doğrultusunda tez içerisinde köpük metallerin tarihçesi ve açık hücreli köpük metallerin üretim yöntemlerine literatür kısmında değinilmiştir. Bilgisayar ortamında üretim proseslerine uygun bir tasarım yapılmış ve analizlenmiştir. Bu tasarıma da uygun olarak üretim yöntemlerinden sıvı hal prosesi ile açık hücreli köpük metal üretimi seçilerek polimer köpüklerle hassas döküm ve yer tutan malzeme etrafına döküm yöntemleri tatbik edilmiştir.

Polimer köpüklerle hassas döküm yönteminde poliüretan retiküle bir süngerin replikalama işlemi yapılmıştır. Poliüretan retiküle sünger seramik çamur içerisine batırılmış ve kuruması beklenerek polimerin negatifinden kalıp yapılmak istenmiştir. İkinci üretim yönteminde polimer köpük yer tutucu etrafına döküm yapılmıştır. Poliüretan köpüğün cidarları seramik çamur ile kalınlaştırılmıştır. Bu yapı mukavemet kazandırılmak üzere pişirilmiştir. Boşluk yerlere alüminyum dökülerek açık hücreli köpük metal üretmek amaçlanmıştır. Üçüncü yöntemde küresel boşluk tutucu kullanılmıştır. Küreler bir kabın içerisine doldurulmuştur. Bu kaba döküm yapılarak kürelerden arta kalan alanın geometrisinden açık hücreli köpük metal elde edilmek istenmiştir. Dördüncü yöntem olarak ise fiber boşluk tutucular kullanılmıştır. En uygun üretim prosesi küresel boşluk tutucuların kullanıldığı yöntem olarak görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Açık hücre, köpük metal üretim yöntemleri, köpük metal, 3B köpük metal tasarımı

2019, x + 77 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

AN EXPERIMENTAL RESEARCH ON PRODUCTION PRACTICABILITY OF OPEN CELL ALUMINUM METAL FOAMS AND APPLICABILITY FOR 3D MODELLING

Altuğ BAKIRCI

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Agah UĞUZ

Energy efficiency gaining more importance because of depleting energy resources at the present day. One of the most efficient methods to overcome that problem is lightening the materials. Foam metals have high volumes but very low relative densities. These are interesting subjects because their use in various fields for different purposes such as filtration, heat exchanger or energy, sound, radiation and vibration damping etc. In this study, production methods of open cell foam metals classified and explained, the history of foam metals referred, and a 3D foam metal was designed and analyzed as suitable for production processes. In accordance with this 3D design, liquid state process selected which includes investment casting with polymer foams and casting methods with space-holding fillers.

Replication of a polyurethane reticulated sponge was performed by the investment casting method with polymer foams. Secondly, polymer foam space-holder used to aim to produce open-cell foam metal by casting aluminum into cavities. In the third method, spherical spacers were used. The spheres were filled into a mold. It was desired to obtain open cell foam metal from the geometry of the area remaining from the spheres by casting aluminum into this mold. Fiber holders were used as the fourth method. The most suitable production process was seen casting around spherical space-holders.

Key words: Open cell, production methods for metallic foams, metal foam, 3D metal foam model

2019, x + 77 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgileri, alakaları ve engin tecrübeleriyle yol göstermiş, her daim açık olan kapısı, hoşgörüsü, sabrı, güler yüzü, samimiyeti ve destekleyici tavrıyla da bir hayat görüşü aşıl原因 saygı değer hocam Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR'a ve tabi ki tez konumun belirlenmesinden bitimine kadar bilgisini esirgemeyen, tecrübesiyle yanımda olmuş saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Agah UĞUZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Üretim süreçlerinde bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hüseyin KÖLÜK ve ALUPAM A.Ş.'ye ve model malzemesinin tedarikinin sağlanmasında GS SÜNGER'e teşekkürlerimi sunarım.

Değerli kişiliği ve manen katkıları yanında seramik çamurunun tedarikinin sağlanmasında desteklerini esirgemeyen Turgut TUNA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince maddi, manevi desteklerini ve kaynaklarını esirgemeyen Bursa Uludağ Üniversitesi Elektromobil Topluluğu ailesine ve laboratuvar imkânlarıyla rahat çalışma ortamı sunan Bursa Uludağ Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım.

Bilgisi, kontakları ve üretim imkânlarıyla desteğini esirgemeyen Mehmet Emin ÇELİK'e ve çeşitli işgücü gerektiren çalışmalarda zora düştüğümde değerli vaktini ayıran ve elim kolum olan değerli arkadaşım Ayhan VIŞNE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Zorlu ve yoğun çalışmalarım sırasında iyi ve kötü günlerinde yanımda bulunamasam bile hoşgörülerini ve sabırlarıyla yanımda bulunan, maddi, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve akrabalarımın sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Altuğ BAKIRCI
19/07/2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Köpük Metal Nedir?.....	3
2.2. Köpük Metallerin Tarihçesi	4
2.3. Köpük Metallerin Seçim Kriterleri	10
2.4. Köpük Metallerin Sektörlere Göre Kullanımı.....	12
2.4.1. Otomobil sektörü.....	12
2.4.2. Havacılık ve uzay	13
2.4.3. Gemi imalatı.....	14
2.4.4. Demiryolu sektörü.....	15
2.4.5. İnşaat sektörü	15
2.4.6. Makine imalatı	16
2.4.7. Spor ekipmanları	16
2.4.8. Biyomedikal	17
2.5. Köpük Metallerin Kullanıldığı Materyaller	17
2.5.1. Filtrasyon, akış kontrolü, hazneleme, püskürtücüler	18
2.5.2. Evaporatörler ve eşanjörler	19
2.5.3. Katalitik konvertör ve su artımı	20
2.5.4. Susturucular ve ses kontrolü	20
2.5.5. Elektrokimyasal ve membranlı reaktörler, bataryalar, yakıt pilleri ve güneş enerji sistemleri.....	21
2.5.6. Ateş duvarları uygulamaları	22
2.5.7. Dekoratif uygulamalar	22
2.6. Açık Hücreli Köpük Metallerin Üretim Yöntemleri.....	23
2.6.1. Sıvı hal prosesleri ile açık hücreli köpük metal üretim yöntemleri	23
2.6.1.1. Döküm prosesleri	24
2.6.1.2. Sıvı halden sprey ile köpükleme	28
2.6.2. Katı hal prosesleri ile açık hücreli köpük metal üretim yöntemleri	29
2.6.2.1. Metalik içi boş küre yöntemi.....	30
2.6.2.2. Yer tutan malzeme etrafına toz kaplama metodu.....	32
2.6.2.3. Köpürtücü ajan ile köpük metal üretimi.....	34
2.6.2.4. Polimer emdirme ile köpük metal üretimi	35
2.6.2.5. Tel sinterleme metodu.....	37
2.6.3. Buhar fazından açık hücreli köpük metal üretimi	38
2.6.4. Elektro-kimyasal biriktirme ile açık hücreli köpük metal üretimi	39
2.7. Doğada Karşımıza Çıkan Köpük Yapılar	41
2.8. Matematiksel Yaklaşımlar	44
3. MATERYAL VE YÖNTEM	48

3.1. Malzeme Seçimi.....	48
3.1.1. Elementlerin alüminyum alaşımındaki etkileri	49
3.2. Seçilen Üretim Yöntemleri	51
3.2.1. Polimer retiküle sünger model ile hassas döküm.....	51
3.2.2. Polimer köpüğün boşluk tutucu olarak kullanılması.....	55
3.2.3. Küresel yer tutan eleman üzerine döküm.....	56
3.2.4. Fiber yer tutan elemanlar üzerine döküm.....	58
3.3. Köpük Metalin Bilgisayar Modelinin Oluşturulması.....	58
3.4. Seramik Döküm Kalıbı Oluşturma Denemeleri.....	62
4. BULGULAR	64
4.1. Polimer Retiküle Sünger Model ile Hassas Döküm.....	64
4.2. Polimer Köpüğün Boşluk Tutucu Olarak Kullanılması	65
4.3. Küresel Yer Tutan Eleman Üzerine Döküm	66
4.4. Fiber Yer Tutan Elemanlar Üzerine Döküm.....	67
4.5. Tasarlanan Köpük Metalin Analiz Sonuçları.....	67
4.6. Seramik Döküm Kalıbı Oluşturma Denemeleri.....	68
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	70
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
c	İç sınır çember
f	Dış sınır çember
g	Gram
mj	Mili joule
mm	Mili metre
MPa	Mega Pascal
N	Newton
t	Mutlak uzaklık

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitrin Butadin Stiren
BRL	Bjorksten Araştırma Laboratuvarları
CVD	Chemical Vapor Deposition
HR-pQCT	High Resolution peripheral Quantitative Computed Tomography
LAMMPS	Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator
LVT	Laguerre-Voronoi Tessellations
MetFoam	International Conference on Porous Metals and Metallic Foams
MMC	Metal Matrisli Kompozit
MURI	Multidisciplinary University Research Initiative
PCM	Phase-Change Material
PLA	Polilaktik asit
ppi	İnç başına düşen gözeneklilik sayısı
ppm	Milyonda bir
PVT	Poisson-Voronoi Tessellations
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Köpük metallerin iki ana tipi: Sol: Kapalı hücreli köpük metal; sağ: Açık hücreli köpük metal.....	4
Şekil 2.2. 8 cm genişliğine sahip çinko kapalı hücre köpüğü ve ekmek kesiti	8
Şekil 2.3. Metalik köpükler üzerine yıllık yayın sayısının gelişimi.....	9
Şekil 2.4. Metal köpüklerdeki gözeneklerin açıklık yapışana bağlı olarak tercih edilen uygulama alanları	11
Şekil 2.5. Mühendislik malzemelerini kapsayan elastisite modülü ve yoğunluk grafiği	12
Şekil 2.6. Otomobil sektöründe yapısal nedenlerle kullanılan köpük metallere istenen işlevler	13
Şekil 2.7. Metal köpüklerin üretim yöntemleri	23
Şekil 2.8. Polimer köpüklerle hassas döküm metodunun akış şeması	25
Şekil 2.9. Poliüretan retiküle sünger örnekleri.....	25
Şekil 2.10. Polimer retiküle süngerlerden replika usulü üretilmiş açık hücreli alüminyum köpük metaller	25
Şekil 2.11. Duocel TEM görüntüsü ve 40mm çaplı silindir numune örnekleri	26
Şekil 2.12. Kafes sistemine sahip köpük metaller.....	26
Şekil 2.13. Sintaktik köpük metal oluşturma prosesi.....	27
Şekil 2.14. Boşluk tutucu etrafına döküm yöntemi.....	28
Şekil 2.15. Yer tutan malzeme yerine tuz kullanılmış numune; ilk görsel tuzdan arındırılmamış haline aittir	28
Şekil 2.16. Sprey köpükleme prosesi	29
Şekil 2.17. Toz parçacıklarının sinter sırasında boyun vermeleri.....	30
Şekil 2.18. Georgia Tech yöntemi: koaksiyel nozul ile içi boş metal küre üretimi	31
Şekil 2.19. İçi boş küre tekniğiyle köpük metal üretimi	32
Şekil 2.20. Yer tutan malzeme etrafına toz kaplama metodu	32
Şekil 2.21. Toz metalürjisiyle yer tutan eleman kullanılarak köpük metal üretimi	34
Şekil 2.22. Çamur köpüklendirme metodu	35
Şekil 2.23. Polimer emdirme metodu ile köpük metal üretimi; çamura bulama, kurutma modelin giderilmesi, ve son resim sinterlenmiş ürün	36
Şekil 2.24. Tel sinterleme uygulanmış ürünler: Solda, ağsı tüp şeklinde örülmüş çelik halattan sinterlenmiş malzeme; sağ altta çelik halatların rastgele şekilde kalıba yığılmasıyla sinterlenmiş numune	37
Şekil 2.25. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile açık hücreli köpük metal (Incofoam).....	39
Şekil 2.26. Elektro-kimyasal biriktirme prosesi ile köpük metal üretimi	40
Şekil 2.27. Solda elektoliz ile kaplama yönteminin illüstrasyonu; sağ da Elektro-Kimyasal biriktirme ile yapılmış Recemat numunesi	40
Şekil 2.28. Doğadaki gözenekli yapılara örnekler: a, kuş tüğü sapı; b, havalandırma parankimasına sahip olan su sümbülüne (eichornia crassipes) ait kesit; c, çimen sapı; d, kirpi diken; e, deniz kestanesi iğnesi; f, distal tibia kemiğinin tipik bir HR-pQCT taramasından bir kesit; g, Taxodioxydon heichengziense fosil ağacından kesit; h, boynuz kesiti; i, pomza taşı.....	42

Şekil 2.29. Doğadaki gözenekli yapılarda hücreler arasındaki sınır dolgu bölgesi: plateau borders sırasıyla; hegzagonal doğal bal peteği; sabun köpüğü alt ıslak ve küresel, üst taraf kısmi kuru ve polyhedral; pentagonal dodecahedron yapıdaki bir köpük hücresi çizimi; el çizimi sınır dolgu bölgesi gösterimi .	43
Şekil 2.30. Geometrik şekiller sırasıyla: Kelvin hücresi; beşgen ve altıgen prizmatik yapı; scutoid geometriye sahip hücresel yapı.....	43
Şekil 2.31. En basit gösterimiyle eş büyümeyle cidar düzleşmesinin gösterildiği mitozik voronoi deseni ve çokgenin kenarlarının oluşumu.....	45
Şekil 2.32. Solda rastgele dağıtılmış noktalar; sağda belirli bir ilişki içerisinde dağıtılmış noktalar ile ortaya çıkan voronoi deseni.....	46
Şekil 3.1. 3B yazıcıdan PLA malzemesi ile çıkarılmış bir çeşit latis blok	52
Şekil 3.2. 7-8 ppi poliüretan numuneleri: Soldaki ince kesit; sağdaki blok halde.....	52
Şekil 3.3. Poliüretan köpüğün seramik çamur içerisine batırılması ve ezilerek havasının alındığı hali.....	53
Şekil 3.4. Kullanılan ekipmanlar: Soldaki kalıbın kurutulmasında kullanılan kurutma fırını; Sağdaki Protherm'in PLF 130/9 modeli 3600 watt 1300°C çıkabilen fırını	53
Şekil 3.5. Kurumuş kalıptan polimer köpüğün uçlarının çıkarılması	54
Şekil 3.6. Çentik atılmış pişirilmeyi bekleyen numune	54
Şekil 3.7. Çeşitli cidar kalınlıklarında çamura bulanıp kurutulmuş numunelerin bir kısmı	55
Şekil 3.8. Döküm için hazırlanan ayrılıp birleşebilen kalıp.....	56
Şekil 3.9. Kullanılan küresel yer tutan elemanlar sırasıyla; poligonal straför topları, straförden tamamen küresel kar topları ve çamura kaplanmış halleri, seramik toplar.....	57
Şekil 3.10. Dökümde kullanılacak içi dolu seramik yer tutucu bilyelerin hacim hesabının yapılması.....	57
Şekil 3.11. U şekline getirilmiş örgü tel ve kullanılan fiber cam elyaf ve karbon elyaf iplikler.....	58
Şekil 3.12. Küresel elemanların CATIA makrosu ile prizmadan çıkarılması.....	59
Şekil 3.13. MATLAB kodunun akış şeması	60
Şekil 3.14. Yeni oluşturulan dairenin cidarı taralı alandan geçmelidir.....	61
Şekil 3.15. Karşılaştırmalı analiz için seçilen geometrik yapılar; sırasıyla: Düzgün beşgen prizma, düzgün altıgen prizma, komşu beşgen ve altıgen prizmalar, Scutoid, Tetrakaidcahedrons, yatay ilişkili pentagonal dodecahedron, dikey ilişkili pentagonal dodecahedron, bilgisayar desteğiyle oluşturulmuş sandviç stokastik metal köpük tasarımı	62
Şekil 3.16. Toprak kalıp oluşturma denemeleri	63
Şekil 4.1. İlk numunede gözlemlenen üç durum: Çökme, hava alma ve çok ince gözeneklilik	64
Şekil 4.2. Çentik açılmış numunenin pişmiş hali.....	65
Şekil 4.3. Cidarları seramik kaplanmış ve pişirilmiş numunelerin birkaçı	65
Şekil 4.4. Sırasıyla yanına dökülmüş, ergimiş metale daldırılmış ve üzerine alüminyum külçe bırakılmış numuneler	65
Şekil 4.5. Yer tutucular üzerine katı alüminyum bırakılarak yapılan deney.....	66
Şekil 4.6. Üzerine ergimiş alüminyum dökülmüş küresel boşluk tutucular	66
Şekil 4.7. Karbon fiber ve cam elyaf boşluk tutucular üzerine yapılmış döküm	67
Şekil 4.8. Stokastik köpük tasarımının analiz sonuçları.....	67

Şekil 4.9. Elle şekil verilmiş seramik kabın pişmiş hali69



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Etial-160 alüminyum alaşımının kimyasal içeriği	49
Çizelge 3.2. 6063 Alüminyum Alaşımının kimyasal içeriği.....	49
Çizelge 4.1. 3B modellerin ANSYS'teki analiz sonuçları.....	68



1. GİRİŞ

Doğada ki yapılara baktığımızda bu yapıların çoğunun gözenekli yapılardan oluştuğunu görmekteyiz. Yüzeysel olarak değinilecek olursak biyolojik yapılarda; ağaç gövde kesiti, yaprak ve deri hücreleri, bitki sapları, kuş tüyü sapı, kirpi diken, denizkestanesi diken, trabeküler kemik, boynuz, deniz süngeri, bal petekleri, su sümbülündeki gibi havalandırma ve sünger parankimasına sahip bitki kökleri, sapları ve yaprakları köpük tabiri kullanılabilecek geometrilere örnek verilebilir. Bunlarla birlikte, biyolojik olmayıp doğal yapılarda aşınmalar ve dış kuvvetlere karşı gösterdikleri etki tepki prensibi sebebiyle oluşan yapılar da mevcuttur. Ponza ve scoria gibi volkanik kayalar ve üzerinde geniş çalışmalar bulunan sabun köpüğü bu yapılara örnek olarak gösterilebilir (Gibson 2005). Tüm bu doğadaki yapılara baktığımızda varlıklarını en verimli şekilde sürdürmeye çalıştıklarını görmekteyiz. Bu gözenekli yapılar genel itibari ile sahip oldukları bireylere daha az yapıtaşıyla çok daha fazla hacim kaplayabilmelerine ve hüküm alanlarını genişletip rakiplerini alt etmelerini sağlamıştır. Zedelendiklerinde daha düşük tadilat kaynağına ve içi dolu yapılara kıyasla düşük yoğunlukları dolayısıyla hafiflikleri sebebiyle hareketleri sırasında daha az enerji ile yaşamlarını idare ettirecek kaynaklara ulaşabilmelerine olanak tanımıştır. Aynı zamanda bu gözenekler ısıl davranışları, enerji, darbe, ses ve titreşim absorbe etme yetenekleri, yüksek kesme ve kırılma mukavemetleri radyasyona karşı koruyuculuk gibi çok farklı faydaları beraberinde getirmektedir (Ashby ve ark. 2000).

Küresel ısınma ve dünya kaynaklarının hızla tükenmesi enerji verimliliği ve malzeme kullanımının optimumuna indirilmesi gerekliliğini beraberinde getirmiştir. Doğadaki uzun evrim süreçleriyle bu halini alan ve varlıklarını koruyan yapılara bu sebeplerle insanoğlu dikkatini vermek zorunda kalmış ve üzerinde çalışmalara başlamıştır. Araştırmaların yapılmaya başlanmasıyla bu tarz doğada karşımıza çıkan gözenekli yapılara hücresel, gözenekli, köpük veyahut sünger olarak adlandırma yapılmıştır. Dayanımları ve avantajları sebebiyle doğadan alınan gözenekli yapı tipi metallere uygulanmasıyla hücresel metal, gözenekli metal, köpük metal, sünger metal veya metalik köpük adlarıyla tanınan malzeme grubu ortaya çıkmıştır.

Metalin genel itibariyle köpürtülmesinin temel amacı hafifliğinden ve ham malzeme ihtiyacını azaltarak ekonomikliğinden yararlanmaktır. Alüminyumun diğer metallere kıyasla ulaşılabilirliği, hafifliği, korozyon direnci, esnekliği ve üretim kolaylığı gibi avantajları sebebiyle bu çalışmanın ham malzemesi olarak seçilmiştir.

Kararlaştırılan üretim yönteminin bilgisayar ortamında tasarlanabiliyor olması önem teşkil etmektedir. Daha açıklamak gerekirse 3B tasarım sayesinde köpük metalin kullanılmak istenen yerde istenilen mekanik özellikleri verip vermeyeceğini veya hangi parametrelerde vereceği önceden kestirilebilecek ve üretim parametreleri bu bilgilere göre ayarlanabilecektir. Günümüzde çevre hassasiyeti, azalan doğal kaynaklar ve enerji verimliliği gibi konulara olan duyarlılığın ve gerekliliğin artmasıyla malzeme, zaman ve ekonomik israfın önüne geçecek bu durum tezin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Metal köpüklerin üretimi karmaşık prosesler ve hassas parametreleri içeren üretim yöntemlerine sahiptir. Aynı zamanda bilgisayar ortamında tasarlanıp analizlenmeleri zor ve karmaşık algoritmalar içermektedir. Bilgisayar ortamında tasarlanan köpük metalin üretilen malzemeyle uyumu ve analiz sonuçlarının doğru olabilmesi için üretim prosesine uygun şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Bu çalışmada açık hücreli köpük metal üretim yöntemleri incelenecek belirli prosesler seçilerek üretimi gerçekleştirilmeye çalışılacak ve bilgisayar ortamında tasarlanacak olan model ile karşılaştırılma yapılacaktır. Tasarım için MATLAB programında seçilen proseslere uygun bir algoritma geliştirilecektir. MATLAB verileri CATIA makrosuna aktarılarak bir 3B tasarım gerçekleştirilecektir. Üretilen köpük metalle uygunluğu irdelenebilmesi için ANSYS programı yardımıyla statik basma analizi yapılacak ve sonuçlarından yararlanılacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

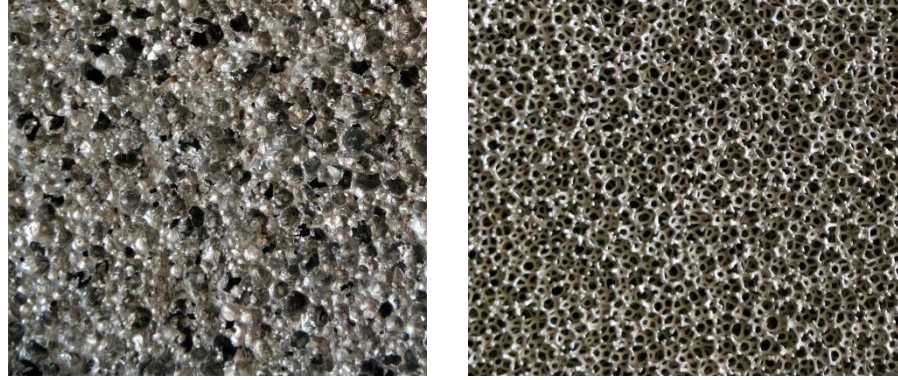
2.1. Köpük Metal Nedir?

Metal köpük veya hücreli metal isimlendirmesi kasıtlı olarak içerisinde gözenek yerleştirilmiş bir metal üründen bahsedilirken kullanılır. Hücreli metal veya gözenekli metal terimleri genel anlamda bir metalin yüksek hacimde gözeneğe sahip olduğu manasına gelirken köpük metal veya metalik köpük tanımı gözenekleri bulunan metalden ürünü ve bununla birlikte köpük oluşumunun vuku bulduğu üretim sürecini anlatmak için kullanılır. Bunların yanında metal sünger terimi yüksek gözenek yapısına sahip gözenekleri tam bölünemeyen veya hücre yapısı tam anlamıyla tanımlanamayan karmaşık ve iç içe geçmiş gözenek yapısını anlatmak için kullanılır. Başka bir tanıma göre kendi içerisinde belirli bir düzen içerisinde ayırt edilebilir gözeneklere sahip yapılar köpük veya hücreli metal olarak adlandırılabilirken diğer içinde boşluk bulunduran yapılar gözenekli veya sünger olarak nitelendirilebilir. Köpük metaller genel itibari ile %5 ile %99 arasında nispi yoğunluğa sahip gözenekli metalleri kapsamaktadır (Banhart 2001, Lefebvre ve ark. 2008, Ozan ve Katı 2011).

Gözenekli metaller ve metalik köpükler, yoğun polimerler, metaller ve seramikler veya polimer ve seramik köpüklerle elde edilemeyen özelliklerin kombinasyonlarına sahiptir. Örneğin, metalik köpüklerin mekanik mukavemeti, sertliği ve enerji emilimi polimer köpüklerinkinden çok daha yüksektir. Termik ve elektriksel olarak iletkenler ve mekanik özelliklerini polimerlerden çok daha yüksek sıcaklıklarda tutarlar. Ayrıca, zorlu ortamlarda genellikle polimer köpüklerden daha kararlıdır. Seramiklerin aksine, plastik olarak deforme olma ve enerjiyi emme yetenekleri vardır. Açık gözenekliliğe sahiplerse, geçirgendirler ve çok yüksek spesifik yüzey alanlarına sahip oldukları için sürekli akışlarda ve yüksek yüzeye ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılabilirler.(Lefebvre ve ark. 2008)

Bu metalik yapılar gözenek yapısına göre açık veya kapalı olarak iki ana başlık altında kategorize edilmiştir. Kapalı hücreli tanımı: boşlukların cidarının malzeme ile kaplandığı yani gözeneklerin birbiri ile temasta olmadığı tipi tanımlarken; açık hücreli tanımı

gözeneklerin birbiri ile temas halinde bulunduğu boşluğun kesintisiz devam ettiği tipi tanımlamaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Köpük metallerin iki ana tipi: Sol: Kapalı hücreli köpük metal; sağ: Açık hücreli köpük metal

2.2. Köpük Metallerin Tarihçesi

Literatürdeki insan yapımı gözenekli metallere ilk rastlanan kaynaklardan biri Yaşlı Plinius'un *Naturalis Historia* adlı eserinde bahsettiği (MS 77) Etrüsk kuyumcuları tarafından ince mücevher parçaları üretmek için kullanılan granülasyon (taneleme) adı verilen işlemdir. Bazı medeniyetler gözenekli metaller üretmek için yenilikçi süreçler geliştirirken, bu teknikler yakın zamana kadar çoğunlukla yüzey işlemlerine yönelikti ve genellikle estetik amaçlar için mücevherlerde ve dini eserlerde kullanıldı (Lefebvre ve ark. 2008).

Gözenekli metaller ancak 20. yüzyılın başlarında mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlandı. Sinterlenmiş metal toz ve sinterlenmiş örgü teller, piyasada satılan ve mühendislik uygulamalarında kullanılan ilk gözenekli metallerdir. Sinterlenmiş toz, 1920'lerden bu yana filtrelerin, bataryaların ve kendinden yağlamalı yatağın imalatında başarı ile kullanılmıştır. Bu malzemeler günümüzde hala yüksek hacimli uygulamalarda kullanılmaktadır. Metalik köpüklere yapılan ilk referans kapalı hücreli metal köpüğün Meller tarafından, hafif metallerin, inert gaz enjeksiyonu veya şişirici madde ile köpükleştirildiği 1925'te yayınlanan bir Fransız patentinde bildirilmiştir. (Lefebvre ve ark. 2008, Anonim 2019b). 1935 civarında ilk sinterlenmiş gözenekli demir rulmanlar ve demirden makine parçaları üretildi (Cohrt ve Martin 1993).

1943'te Benjamin Sosnick cıva ile alüminyum köpürtmeye çalıştı. İlk önce yüksek basınç altında kapalı bir odada Al ve Hg karışımını eritti. Basıncı serbest bıraktı ve alüminyumun erime sıcaklığında cıvanın buharlaşmasını sağlayarak bir köpük oluşumuna yol açtı (Banhart ve Weaire 2002). Sosnick yaptığı çalışmalarla ilgili 1948 ve 1951 de iki patent almıştır (Sosnick 1948, Sosnick 1951). Daha sonra Elliot 1951 yılında aynı metodu tekrarlayarak metal köpük malzeme üretmeyi başarmıştır. Sonraki yıllarda metalik köpüklerin veya diğer gözenekli metalik yapıların üretim imkanları yeniden gözden geçirilmiştir (Doğan ve ark. 2015).

1950'lerde, viskoziteyi arttırmak için ön işleme tabi tutulursa, sıvı metallerin daha kolay köpüklenebileceği fark edildiğinde daha az tehlikeli prosesler geliştirildi. Bu, eriği oksitleyerek veya oksit parçacıkları ekleyerek yapılabilirdi. Elliott 1956'da Madison-Wisconsin'deki Bjorksten Araştırma Laboratuvarlarında (BRL) Sosnick'in tekniğini geliştirerek cıva yerine köpürme ajanları olarak tabir edilebilen termal ayrışma yoluyla gaz üreten hidrür, karbonat, sülfat, hidroksit v.b. gibi köpürtücü maddeleri sıvı metaller içerisinde ayrıştırarak kapalı hücre köpük üretmeyi başardı. Elliot yapmış olduğu çalışmada sıvı alüminyum ve magnezyumu belli oranlarda karıştırmış içerisine köpürtücü madde ajanı olarak TiH_2 veya ZrH_2 ilavesi ile ilk metalik köpük malzeme üretimini sağlamıştır. Elliott ve Stuart Fiedler, 1950'lerin sonlarında ABD Donanması için bir alüminyum köpürme prosesi geliştirdi. Ardından BRL, köpüklü alüminyum için ticari kullanımlar geliştirmek üzere LOR Şirketi ile bir anlaşmaya girdi. 4 'x 8' x 1" kalınlığında duvar panelleri üretmek için BRL'de bir pilot tesis inşa edildi. Otomobiller için ezilme tamponları gibi diğer potansiyel kullanımlar da araştırıldı. 1960'ların sonunda, tüm işlem Ethyl Corporation'a satıldı ve pilot tesis Baton Rouge'a taşındı, BRL kurşun ve çinko gibi diğer metalleri köpürtme yöntemlerini araştırmak için birkaç yıl devam etti. (Banhart ve Weaire 2002, Tan 2003, Çağlar 2009, Karakoç 2012, Tiryaki 2016)

1960 yılında ise Pahsak alternatif bir yol olarak 'katı köpük hali' adı altında ilave bir fikir geliştirmiştir. Pahsak alüminyum veya magnezyum metal tozunu, $MgCO_3$ veya $CdCO_3$ tozları ile ilk olarak karıştırmış daha sonra ise presleyip ekstrüze etmiş ve bu yapıyı ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta ısıtarak hücresel yapı malzemeyi üretmiştir (Karakoç 2012).

Açık hücreli köpük metaller ise ilk olarak 1950'lerde üretilmiştir. Kaya tuzuna erimiş alüminyum dökülerek bir yapı oluşturulmuştur. Oluşan yapıdan tuz uzaklaştırıldığında açık hücreli köpük elde edilmiştir. (Tiryaki 2016)

Retiküle edilmiş poliüretan köpükler kullanılarak yapılan açık hücreli köpükler on yıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Poliüretan köpükler, 1950'lerden bu yana ticari olarak üretilmiştir. Bunlar, %97 ila %98 arasında boşluğa sahip olarak pratikte ideal bir gözenekli organik yapıdır. Bu yapıların bir toz bulamacı replikasyon tekniği ile açık hücreli seramik köpük üretmek amacıyla ilk girişim 1961'de Schwartzwalder tarafından gerçekleştirilmiş ve patentlenmiştir. Günümüzde bu tür açık hücreli seramik köpükler dökümde filtre olarak kullanılmak üzere yılda 160 milyon civarında üretilmektedir (Schwartzwalder ve ark. 1963, Quadbeck ve ark. 2010).

1963 yılında ise Peisker William ve Hardy Wilson çalışmalarında, katı eriyik durumundaki alüminyum metale (610°C civarında), yapıda dağılan gazı yakalamak ve bu suretle akışkanlığı azaltmak amacıyla vermikülit (bir çeşit silit mineral $(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$) eklemiştirler. Önceki çalışmalardan farklı olarak da üretim sırasında köpürtme işlemi için metal hidritler yerine hidrat killeri kullanılmıştır. Toz yerine katı eriğin kullanılması prosesi daha ucuz hale getirmiştir (Hardy ve Peisker 1967, Tiryaki 2016).

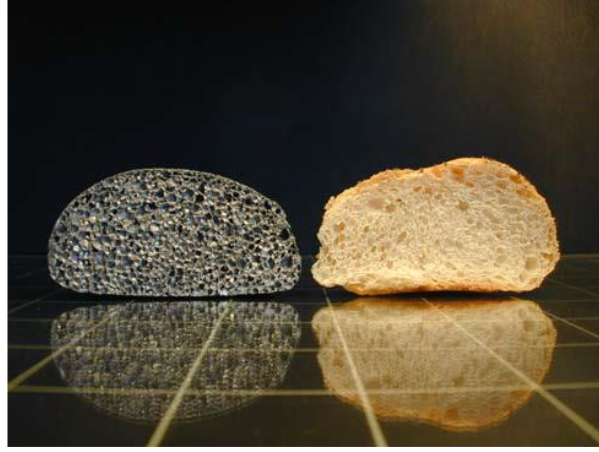
Retiküle poliüretan köpüğü kullanılarak Schwartzwalder'in yaptığı replikasyon tekniği, gözenekli batarya elektrotları olarak kullanılmak üzere ilk kez 1966 yılında metal köpüklerin imalatına aktarılmıştır.(Quadbeck ve ark. 2010)

1967 yılında Kaliforniya'da enerji üretim ve araştırma (ERG) şirketi kurulmuştur. 1968 de şirket tarafından Duocel ticari adıyla bilinen polimerik kalıp içerisinden süzme yoluyla açık hücreli metalik köpük üretiminin gerçekleşmesiyle konu hakkında çalışmalar çeşitlendirilmeye ve geliştirilmeye devam edilmiştir. Üretilen ürünler havacılık, ulusal savunma, yarı iletken malzemeler, biyoteknoloji ve diğer yüksek teknoloji endüstrileri için kullanılmaktadır (Ozan ve Katı 2011, Anonim 2019a).

1970'lerde, çoğaltma yöntemiyle yapılan metal köpüklerin ağırlıklı olarak kataliz veya filtrasyon uygulamalarında kullanıldığı Rus araştırma grupları tarafından önemli çalışmalar yapılmıştır. Yaklaşık on yıl boyunca, yöntem çeşitli gruplar tarafından yeniden icat edildi. Yüksek alaşımlı çelikler kullanılarak açık hücreli köpükler üretildi, fakat aynı zamanda kalıcı biyomedikal implant olarak kullanılmak üzere bakır veya titanyum alaşımları bazında köpükler veya parçalanabilir implantlar için düşük alaşımlı çelikler kullanıldı ve araştırıldı. Fraunhofer'de, replikasyon tekniği ile yapılan açık hücreli metal köpükler, 2000'li yılların başlarından beri incelenmiştir. Çeşitli çelikler SUS 316L, SUS 314, 4110, SUS 430L, FeCrAl, gibi, yumuşak çelikler ve temel malzemesi molibden tantal ve titanyum alaşımı (Ti6Al4V) olabilen demir dışı metaller ile köpük metal üretimleri geliştirilmiştir (Quadbeck ve ark. 2010, Tiryaki 2016).

2000'li yıllarda inco prosesi olarak geçen kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) gibi bileşiklerin düşük sıcaklıktaki ayrışmasından yararlanarak (150-200°C) metal tozlarının polimer köpüğü kaplaması ve kaplanmış süngerin sinterlenmesiyle replika usulü açık hücreli köpük metal üretimini kapsar.

Kapalı hücre köpük metallere tekrar dönüp özetlemek gerekirse metallerin köpüklenmesi için bugün hala geçerli iki yöntem kullanıldı. Bunlardan birincisinde, köpük oluşturmak için sürekli gaz enjekte edilmiştir. İkinci yöntemde, plastik köpük endüstrisinin veya güzel bir örnek olacaksa mayalı bir ekmeğin mayası sayesinde fırında kabarması gibi eriyik metale belirli sıcaklıkta kabaran ve çevresinde boşluk oluşturan köpürme ajanları ilave edilir (Şekil 2.2).

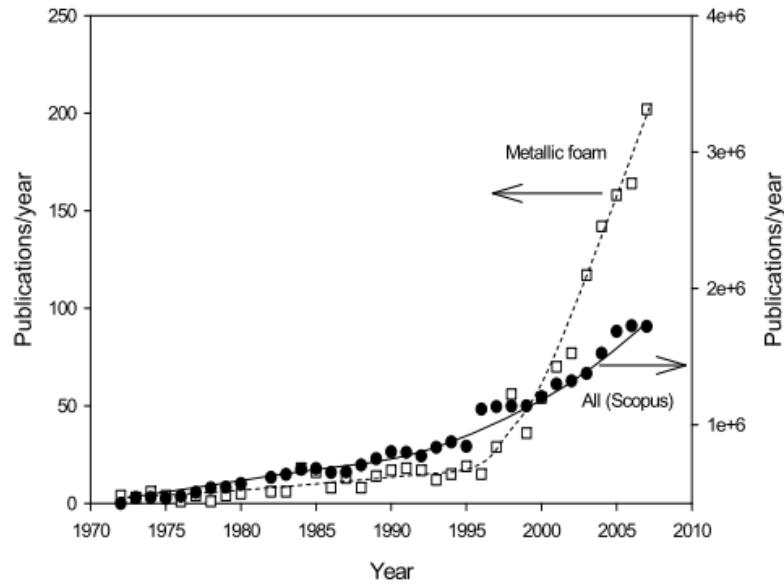


Şekil 2.2. 8 cm genişliğine sahip çinko kapalı hücre köpüğü ve ekmek kesiti (Banhart ve Weaire 2002)

Malzeme olarak alüminyumun köpük üretimine özellikle elverişli olduğu 1960'larda keşfedildi. Daha sonra Ethyl Corporation, değerlendirmeleri için Ford Motor Company'ye vermek üzere 1972 yılında oldukça yüksek kalitede malzeme üretti. Bu ilk gelişme önemli adım başarılı olamadı ve Ford köpük malzemeleri kullanmaktan vazgeçti. Görünüşe göre sınırsız enerji kullanılan o yıllarda hafif malzemelerin zamanı gelmemiş ve güvenlik, geri dönüşüm sorunları şu anki kadar önemli değildi. Belki de malzemenin düzensiz doğası, kalite kontrolde bazı sorunlara neden olmuştur olabilir. Sebep ne olursa olsun, köpük metal üzerindeki heyecan ve Ar-Ge faaliyetlerinin seviyesi 1975'ten sonra bir süreliğine azalmıştır. Seksenli yılların sonunda dünya genelinde tekrar metal köpük araştırmalarında bir canlanma oldu. 1986 yılında Shinko Wire şirketindeki Japon mühendisler şimdi Alporas süreci olarak bilinen prosesi geliştirdi. Ergimiş alüminyuma, akışkanlığı azaltmak için kalsiyum ve köpürtme işlemi için TiH_2 ilavesi yaparak köpük metal elde etmiş ve bu ürüne Alporas ismini vermişlerdir. 1950' li yıllarda kapalı hücreli köpük metallerin üretimi olmasına rağmen ticari anlamda üretim, Japon firması olan Shinko Wire tarafından 1990' lı yıllarda başlamıştır. Burada üretilen köpük metaller bisiklet kaskı için kullanılmış ve yüksek darbeleri absorbe etmesi amaçlanmıştır. Norveç'teki Norsk Hydro ve Kanada'daki Alcan Corp. (Şu an Cymat şirketi üretim hakkını almıştır) birbirinden bağımsız olarak stabilize edilmiş alüminyum köpük diye bilinen sürekli döküm veya direkt gaz enjeksiyonu yöntemi diye geçen yöntem ile bir köpükleme işlemi geliştirdi. 1990 yılında, 1950'lerin sonlarında Delaware'deki United Aircraft Corporation'daki Benjamin Allen tarafından geliştirilen eski bir toz kompakt

köpük rotası, Alman fizikçi Joachim Baumeister tarafından yeniden keşfedildi ve Almanya'nın Bremen kentinde bulunan Fraunhofer Laboratuvarı'nda kayda değer kapsamlı bir seviyeye getirildi. Vendra ve Rabiei, 2007 yılında farklı bir yöntem uygulayarak kompozit köpük metal elde etmiştir. Yapılan çalışmada, içi boş olan ve 2-4 mm arasındaki çaplara sahip çelik kürelerin üzerine alüminyum döküm yaparak alüminyum-çelik kompozit köpük metal üretmiştir. Üretilen malzemenin enerji absorpsiyonunun sadece alüminyum ile üretilen köpük metallerin 30 katı olduğu belirtilmektedir. (Miyoshi ve ark. 2000, Banhart ve Weaire 2002, Ozan ve Katı 2011, Karakoç 2012, Tiryaki 2016).

Bir dizi ulusal ve uluslararası araştırma ve geliştirme programı 1990'ların son yıllarında hücreli metallere odaklandı. 1996 yılında başlatılan Ultra-hafif Metaller üzerine ABD Çok Disiplinli Araştırma Girişimi (MURI), 4. ve 5. AB Çerçeve Programı kapsamında finanse edilen farklı Avrupa araştırma projeleri ve 1990'ların sonlarında Alman Araştırma Konseyi tarafından finanse edilen bir araştırma programı geliştirildi. 1990'ların sonlarından bu yana, MetFoam bu alandaki son gelişmeleri incelemeye devam eden yapılanmalardandır (Lefebvre ve ark. 2008). Kısacası 90'lı yılların sonuna doğru arz artmış araştırmalar ve geliştirmeler sürat kazanmış ve halen devam etmektedir (Şekil 2.3).



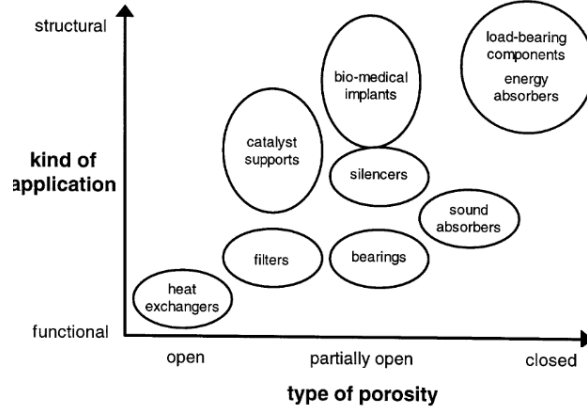
Şekil 2.3. Metalik köpükler üzerine yıllık yayın sayısının gelişimi (Lefebvre ve ark. 2008)

2.3. Köpük Metallerin Seçim Kriterleri

Hücresele metalik malzemeler hafiflik, malzeme israfının önüne geçmek, enerji, titreşim, ses absorpsiyonu ve filtrasyon gibi ileride daha detaylı bahsedilecek olan sebeplerden dolayı gittikçe artan sayıda uygulama alanı bulmaktadır. Belirli bir sorunu çözmek için uygun gözenekli metal veya metal köpüğün bulunup bulunmadığı, aşağıdaki koşullara bağlı olarak 4 anahtar kelimeyle özetlenir:

- Morfoloji: gereken gözeneklilik türü (açık veya kapalı), ihtiyaç duyulan gözenek miktarı, istenen gözenek büyüklüğü ölçeği, gerekli hücresele malzemenin toplam iç yüzey alanı;
- Metalürji: metal, alaşım veya gereken mikro yapı durumu;
- Proses: köpüğü veya hücresele yapıyı şekillendirme veya plakalar ve profiller arasında kompozit üretme olanakları;
- Ekonomi: maliyet sorunları, büyük hacimli üretime uygunluk.

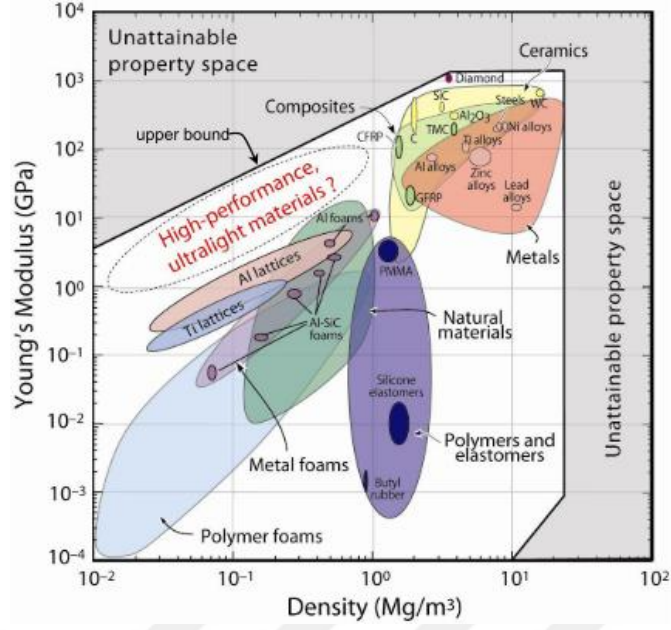
Özellikle ilk nokta, hücresele metal uygulamalarında kullanılma kriteri olarak çok önemlidir. Birçok uygulama sıvı ya da gazlı bir ortamın hücresele malzemeden geçebilmesini gerektirir. Yüksek hızdaki sıvı akışı ve yük taşıyan yapısal uygulamalar için “çok açık” ile “tamamen kapalı” arasında değişen çeşitli derecelerde gözeneklilik gerekebilir ve bu şartları sağlayan uygun malzemelere ihtiyaç duyulur. Şekil 2.4’te çeşitli uygulama alanlarının ne tür gözeneklilik gerektirdiğini göstermektedir. Normal olarak, bir uygulamanın "işlevsel" veya "yapısal" olarak adlandırılan birbirine zıt iki görüş olmasına rağmen bu iki kavram arasında gözenek yapısı tercihi ihtiyaca bağlı olarak kademeli olarak gerçekleşir. Belirli bir tür hücresele yapının hangi metallere veya alaşımlardan üretilebileceği sorusu da önemlidir. Yapısal, yük taşıyan parçaların hafif olması gerekir çünkü aksi takdirde geleneksel metallere veya alaşımlardan yapırlar (Banhart 2001).



Şekil 2.4. Metal köpüklerdeki gözeneklerin açıklık yapısına bağlı olarak tercih edilen uygulama alanları (Banhart 2001)

Hafiflik ve dayanım ve işlevsellik istenen uygulamalar için alüminyum, magnezyum veya titanyum köpükler veya gözenekli metaller tercih edilir. Tıbbi uygulamalar için, doku ile uyumluluğu nedeniyle titanyum tercih edilebilir. Agresif ortamların bulunduğu veya yüksek sıcaklıkların olduğu uygulamalar için paslanmaz çelik veya titanyum gerekir. Mühendislik malzemelerinin yoğunlukları ve elastisite modüllerini kapsayan tablo Şekil 2.5'te verilmiştir (Banhart 2001).

Son olarak, işleme ve maliyet sorunları dikkate alınmalıdır. Köpük metalin üretim maliyeti köpük metale ihtiyaçta önemli bir rol oynamaktadır. Köpük metala gerek olup olmadığıyla ilgili maliyet analizleri yapılmaktadır. Yakıt tasarrufunun ön plana çıktığı uçak ve uzay araçları gibi durumlarda köpük metal kullanımının analizde ağırlığı büyük olacaktır (Maine ve Ashby 2000). Seçilen hücresel metali gereken şekle sokmak ve işlevine uygun bir makine veya araca dahil etmek için uygun teknoloji mevcut olmalıdır. İstenilen bileşen makul bir fiyatta üretilmediğinde hücresel metal üretimi için geliştirilen teknoloji boşa olacaktır.



Şekil 2.5. Mühendislik malzemelerini kapsayan elastisite modülü ve yoğunluk grafiği (Moongkhamklang 2009)

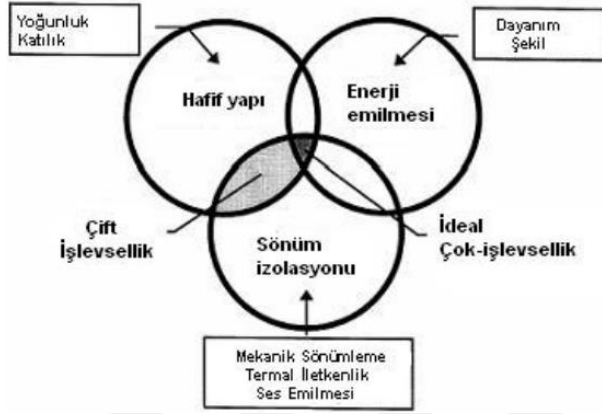
2.4. Köpük Metallerin Sektörlere Göre Kullanımı

Köpük metaller çok değişik alanlarda çok değişik amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Bu alanlar genel itibariyle otomotiv endüstrisi, havacılık ve uzay endüstrisi, gemi imalatı, demiryolu endüstrisi, inşaat endüstrisi, makine imalatı, spor malzemeleri ve biyomedikal endüstrisi olarak sayılabilir. İleriki kısımda her bir sektöre ayrı ayrı değinilecektir (Banhart 2001).

2.4.1. Otomobil sektörü

Otomobillerin güvenliği için artan talep, çoğu durumda daha yüksek bir araç ağırlığına yol açmıştır. Bu, düşük yakıt tüketimi için sorun teşkil etmektedir, bu durum da ağırlık azaltmak için ek önlemler gerektiğinin bir göstergesidir. Dahası, özellikle Avrupa ve Japonya'da, uzunlukları azaltılmış otomobiller istenmektedir. Bununla birlikte, bu azalma, yolcu bölmesinin büyüklüğü pahasına gerçekleşmemelidir. Bu nedenle, yolcu konforunu sağlamak için yeni kompakt motorlar çıkarmaya veya diğer yapıların ağırlıklarını azaltmaya çalışır. Bu, motor bölmesinde ısı dağılımı ile ilgili yeni sorunlar ortaya çıkarır, çünkü tüm ısınan kısım yaşam bölgesine çok yaklaşmıştır ve araçtaki

çarpma bölgelerinin kısılması nedeniyle çarpma güvenliği ile. Son olarak, otomobillerden gelen akustik emisyonları azaltma ihtiyacı, yeni ses emiciler için bir talebe yol açmıştır (Banhart 2001).



Şekil 2.6. Otomobil sektöründe yapısal nedenlerle kullanılan köpük metallere istenen işlevler (Moongkhamklang 2009)

Otomobil sektöründe köpük metallere beklenti özet olarak 3 temel başlığa indirgenebilir. Bunlar Şekil 2.6’da görülebileceği üzere: Hafiflik, darbe emici özellik, titreşim kesici, termal karakteristiği ve gürültü kontrolü olarak ana esaslar altında verilebilir. Bu temel birbirinden ayrı olayları bir arada da karşılayabilen köpük metaller benzerlerine kıyasla ön plana çıkmaktadır.

2.4.2. Havacılık ve uzay

Köpüklü metallerin hafif yapısal yönü, havacılık ve otomotiv sektöründe kullanım amacı olarak birbirine benzerdir. Havacılık uygulamalarında, pahalı petek yapılarının yerine köpüklü alüminyum levhalar veya metal köpük sandviç paneller kullanılması, düşük maliyetlerde daha yüksek performans alınacağı ön görülebilir. Bir yandan, daha yüksek bir burkulma ve kırılma direnci sağlarken, diğer yandan, köpüklerin önemli bir avantajı olarak mekanik özelliklerinin izotropik yapısı ve yapıştırma yapılmadan kompozit yapılar oluşturabilme olasılığıdır. Ayrıca yapının bütünlüğünü mümkün olduğu kadar uzun sürdürebilmesinin gerekli olduğu yangın durumunda daha iyi huylu bir davranış ortaya çıkarmaktadır. Boeing (ABD), gaz sıkıştırma tekniği ile büyük titanyum köpüklü sandviç

parçalarını üretmiş ve helikopterlerin kuyruk kısmında alüminyum köpük sandviçlerin kullanımını denemiştir. Bu tür sandviçlerin önemli bir avantajı, genellikle yassı bal peteği (honeycomb) yapılarının aksine eğriliklerle ve hatta 3D şekillerde üretilebilmeleridir. Bu nedenle, helikopter üreticileri şu anda kullanılan bazı petek bileşenlerinin yerine alüminyum köpük parçaları kullanmaya çalışmaktadır.

Diğer uygulamalar, artmış sönümlenme ile birlikte arttırılmış sertliğin değerli olduğu türbinlerdeki yapısal parçaları içerir. Türbin motorunun çeşitli aşamaları arasındaki sızdırmazlık parçaları da gözenekli metallere yapılmıştır.

Uzay teknolojisinde, alüminyum köpük, uzay aracı iniş pabuçları için bir enerji emici çarpma elemanı olarak ve uydulardaki yük taşıyıcı yapılar için takviye olarak, uzaydaki olumsuz çevre koşullarında sorunlara neden olan malzemelerin yerine (sıcaklık değişiklikleri, vakum ve radyasyon) değerlendirilmiştir. Alan uygulamaları için, Li-Mg köpükleri gibi yüksek oranda reaktif fakat çok hafif alaşım köpüklerin kullanılması düşünülmüştür. Bu alaşımlar, genellikle yüksek reaktifliklerinden dolayı uygulanamazlar, fakat vakumlu ortamlarda faydalı olabilirler (Banhart 2001).

2.4.3. Gemi imalatı

Hafif malzemeler gemi imalatında önemli bir konu haline gelmiştir. Modern yolcu gemileri tamamen alüminyum ekstrüzyondan, alüminyum levhalardan ve alüminyum petek yapılarından yapılabilir. Büyük alüminyum köpük panelleri, bu yapıların bazılarında önemli bir unsurdur. Yüzey tabakaları oldukça elastik poliüretan yapıştırıcılar ile göbek malzemesine yapıştırılırsa, gemilerde yaşanan düşük frekanslarda bile mükemmel sönümlenme davranışına sahip hafif ve sert yapılar elde edilir. Gemi yapımındaki uygulamalar için, köpük sandviç elemanlarının etkili bir şekilde birleştirilmesi ve gemi yapımı sırasında uygun sabitleme elemanlarının tanıtılması önemlidir. Asansör platformları, gemi bölmeleri, anten platformları ve güvenlik dolapları dahil olmak üzere hücresel malzemeler için denizcilik uygulamaları da belirlenmiştir (Banhart ve ark. 1998).

2.4.4. Demiryolu sektörü

Metal köpüklerin demiryolu ekipmanlarında kullanılması, otomotiv endüstrisi için geçerli olan üç ana uygulama alanıyla aynı kuralları takip eder. Enerji absorpsiyonu, özellikle kentsel alanlarda faaliyet gösteren ve arabalarla çarpışmaların yaşanabileceği hafif demiryolu setleri ve tramvaylar için bir sorundur. Japon trenleri kazada enerji emilimini arttırmak için 2,3 m³'lük bir "Alporas" köpüğü ile donatılmıştır. Hafif köpüklü elemanların avantajları, otomobillerde olduğu gibi aynıdır, ana fark demiryolu vagonları için yapıların çok daha büyük olmasıdır (Banhart 2001). Çin'de "Bir Kemer ve Bir Yol" stratejisinin geliştirilmesi, ülkedeki yüksek hızlı demiryollarının inşaatının artmasına neden oldu. Bu nedenle, bir demiryolu tünelinin sismik ve şok emme özellikleri, yüksek hızlı demiryolu sismik bir fay bölgesinden geçtiğinde çok önemlidir. Şu anda tüneller için kullanılan şok emici malzemelerin sınırlı uygulamaları vardır. Bu nedenle, yeni şok emici malzemeler keşfedilmelidir. Yeni bir şok emici malzeme olan kapalı hücreli alüminyum köpük, mühendislikte şok emilimi için uygulanmadı. Bu çalışma, yüksek hızlı demiryolu tüneli için şok emici bir tabaka tasarlarırken kapalı hücreli alüminyum köpüğü uygulayan ilk çalışmadır. Tünel astarının şok emici tabakasını tasarlamak ve üretmek için saf alüminyum bazlı kapalı hücreli alüminyum köpük kullanılmıştır (Su ve ark. 2019).

2.4.5. İnşaat sektörü

Yapı endüstrisinde çok çeşitli olası uygulamalar vardır. Modern ofis binaları betondan yapıldığından cepheleri betonu gizleyen ve binanın görünümünü iyileştiren panellerle dekore edilmiştir. Bu paneller hafif, sert ve yangına dayanıklı olmalıdır. Daha sonra binanın duvarlarına sabitlenmiş olan bir desteğe, mermer ya da diğer süs taşlarının dilimleri oldukça sık birleştirilir. Bu tür destekler, günümüzde kullanılan pahalı peteklerin bir kısmını değiştirerek alüminyum köpükten yapılabilir. Balkonların trabzanları, sıkı güvenlik yönetmeliklerine uymak zorundadır. Kullanılan malzemelerin bazıları çok ağırdır ve yangın durumunda sıkıntılı hale gelir. Alüminyum köpük numuneleri ile değiştirilebilselerdi, problemlerin bir kısmı çözülebilir. Alüminyum köpükler veya alüminyum köpük panellerin asansörlerin enerji tüketimini azaltmada çok yardımcı olabilir. Sık sık hızlanma ve yavaşlama yapan modern asansörlerin yüksek hızları nedeniyle hafiflik önemli bir kriterdir. Bununla birlikte, güvenlik yönetmelikleri

genellikle geleneksel hafif konstrüksiyon uygulamalarına engeldir. Alüminyum köpükler enerji emici olarak ve aynı zamanda sert yapısal malzeme olarak hareket edebildiğinden, bu uygulamalar oldukça ümit verici görünmektedir. Asansör damperleri olarak düşünülmesi olasıdır. Hafif yangın kapıları ve kapakları, nispeten düşük termal iletkenlikten ve bazı düşük yoğunluklu alüminyum köpüklerin ateşe dayanıklılığından yararlanır. Alüminyumun erime noktası oldukça düşük (<660°C) olmasına rağmen, alüminyum köpükler, bu koşullar altında güçlü oksidasyon sayesinde açık bir aleve maruz kaldıklarında şaşırtıcı bir şekilde kararlı bir yapı gösterirler. Beton tapalar etrafına lokal yerleştirilmiş köpük metallerde betona tutunmada çok güçlü bağlantı elamanları olarak iş görmektedir. (Banhart 2001).

2.4.6. Makine imalatı

Makine yapımında metalik köpükler için bazı ilginç uygulamalar vardır. Sert köpüklü parçalar veya azaltılmış ataletli ve geliştirilmiş sönümlemeli köpük dolgulu sütunlar, şu anda geleneksel metalden yapılmış aksları, ruloları veya platformların yerini alabilir. Bu bileşenler sabit delme veya freze makinelerinde ve ayrıca baskı makinelerinde kullanılabilir. Küçük el tipi delme veya taşlama makineleri için muhafazalar, geliştirilmiş içsel sönümleme gibi geleneksel muhafazalara göre bazı avantajlar sunar. Elektrikli makineler için metal köpüklü gövdeler, malzemenin performans spektrumuna elektromanyetik koruma ekleyecektir. Taşlama disklerinin yapısal gövdesi, alüminyum köpükten de yapılabilir. Diskin kendinden sönümlenmesi, zararlı titreşimlerden kaçınmaya yardımcı olacaktır, kısmen açık bir gözeneklilik malzeme taşlaması ve kesmesi sırasında sıçrayan talaşlar için bir hazne görevi de görebilir. Ayrıca teleskop aynalarda destek olarak alüminyum köpükler de kullanılmıştır (Banhart 2001).

2.4.7. Spor ekipmanları

Bu alanda ekipman fiyatları oldukça yüksektir. Bu sebeple yeni malzemelere oldukça açık bir alandır ve köpük metallere burada rahatlıkla denenebilir. Örneğin kaval kemiğini koruyucu bir ekipman geliştirilebilir.

2.4.8. Biyomedikal

Köpük metallerin yapısı biyolojik ortamlarda sürekli karşımıza çıkmaktadır. Trabeküler kemik, kuş tüylerinin sapları, kirpi diken, havalandırma parankimsine sahip bitkiler, ağaçlar gibi saymakla bitmeyecek bir çok gözenekli yapı örneğinin doğal yaşamda karşılaşmaktayız. Bu sebeple köpük metaller biyomedikalde ilgi çekici bir malzeme olmuştur. Biyo uyumlulukları nedeniyle protezlerde veya dental implantlarda titanyum veya kobalt kromlu alaşımlar kullanılır. Dokunun büyümesini sağlamak için, biri genellikle protez üzerinde termal püskürtme veya başka usullerle aynı veya başka bir biyo-uyumlu malzemenin gözenekli bir tabakasını üretir. Alternatif olarak, bu tür uygulamalar için gözenekli titanyum veya titanyum köpük metal kullanılabilir ve bu tür bileşenlerin dayanımlarını kullanılacağı yer ile gereklilikleri yerine getirebilmesi için yoğunluk ve gözenek dağılımı ayarlanabilir. Maksimum dayanıklılık ve işlevsellik sağlamak için implantların nasıl tasarlanması gerektiği konusunda bir fikir birliği yoktur. Bir görüşe göre, diş implantlarının modülü çene kemiğinin modülüyle eşleşmelidir. Metalik köpüklerin modülü ve yoğunluğu arasındaki ilişkiyi bilerek, uygun uyarlanmış modül ile kolayca implant üretilebilir, biyo-uyumluluk sağlanır ve (açık) gözeneklilikte kemik büyümesini uyarır. Magnezyum köpükleri, kemik büyümeye devam ettiği sürece yük taşıyıcı bir yapıya hizmet eden, ancak vücut tarafından yeniden keşfedilme aşamasında yavaş yavaş emilen, biyolojik olarak parçalanabilen implantlar olarak kullanılabilir (Banhart 2001, Gibson 2005, Li ve ark. 2014, M.Rúa ve ark. 2019).

2.5. Köpük Metallerin Kullanıldığı Materyaller

Yeni bir malzeme için uygulama alanı bulmak çoğu zaman zordur. Bu, hücrel metaller ve metal köpükler için de geçerlidir. Son yıllarda yapılan tartışmalar en umut verici uygulamaların birinin metal köpüklerinin çeşitli özelliklerinden faydalananlar olduğunu göstermiştir. Malzemenin sadece düşük ağırlığı ilgi çekiyorsa, muhtemelen daha önceden kullanılan, daha ucuz bir malzeme mevcut olacaktır. Bununla birlikte, iyi enerji emme özellikleri veya ısı direnci ile birlikte düşük ağırlık kullanılması durumunda, metal köpüklerin rekabet gücü önemli ölçüde artacaktır. Bu nedenle, her yeni uygulama fikri ilk önce ihtiyaç duyulan temel özellikleri tanımlayarak değerlendirilmelidir. Ardından, istenen özellik spektrumuna sahip hücrel bir metal olup olmadığı ve yerleşik

malzemelerin karşılaştırılabilir özelliklere sahip olup olmadığının belirlenmesi gerekir. Bu durumda, hangi çözümün tercih edileceğine karar vermek için maliyet gibi diğer kriterlerin dikkate alınması gerekecektir.

2.5.1. Filtrasyon, akış kontrolü, hazneleme, püskürtücüler

Gaz veya sıvı akışı bulunan ortamlarda açık hücreli köpük metallere çok fazla gözenek yapısıyla akış kontrolü amacıyla akışı düzleştirme veya belli bir alana ani bir geçiş yerine hassas bir şekilde dağıtarak geçişini sağlayabilmektedir. Kullanıldığı yerlere örnek vermek gerekirse rüzgar tünellerinde akış düzleştirici olarak ya da valflerde akış dağıtıcı olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda gözenekli yapısı sebebiyle hazne görevi görebilen köpük metallere mevcuttur. Bu haznelere içerisinde yağ hapsederek fazla yağı içerisinde tutar ve gerektiğinde yavaş bir şekilde yağı salarak eksilen veya kirlenen yağı otomatik olarak yeniler. Uygulama yağla sınırlı değildir: otomatik nem kontrolü için su tutulabilir ve yavaşça serbest bırakılabilir. Parfüm saklanabilir ve yavaşça buharlaşmaya bırakılabilir. Gözenekli metal rulolar su veya yapıştırıcıları içerisinde hapsederek uygulanacakları yüzeylere taşınmasını ve düzgünce dağılımını sağlayabilir. Ayrıca tek başına kılcal hareket veya rulo içindeki aşırı basınç ile sürülebilirliği artırabilir. Son olarak, kriyojenik koşullarda akışkanları sabit ve homojen bir sıcaklıkta depolamak için çok açık metalik yapılar kullanılabilir. Ayrıca, köpük, kısmen doldurulmuş transferi sırasında oluşabilecek kaymalara engelleyerek sıvının istenmeyen hareketlerini azaltabilir.

Filtrasyon olarak köpük metallere bir sıvı içerisindeki partikülleri gözenek büyüklüğü sayesinde keserek sıvının arındırılmasını sağlayabilir. Diğer bir kullanım da gaz akışı sırasında katı, sıvı ve duman veya sis gibi asıl akışın içerisinde istenmeyen parçaları filtrelemesidir. İnce filtreleme kapasitesi, iyi partikül tutma, temizlenebilirlik, mekanik özellikler, korozyon direnci, ısı şokları kesmek ve maliyetleri sebebiyle iyi bir filtrasyon, depolama ve akış kontrol elamanıdır.

Bazı püskürtücü uygulamaları bir gazın bir sıvıya homojen ve sabit bir oranda verilmesini gerektirir. Bu işlem, yeterince küçük gaz kabarcıkları yaratan ve aşınma, ısı veya şok

direnci gibi özellikleri bulunan gözenekli bir parça gerektirir. Gözenekli metaller, gözenekli seramikler gibi diğer malzemelere kıyasla süneklikleri sebebiyle daha üstün bir çözüm olabilir. (Banhart 2001).

2.5.2. Evaporatörler ve eşanjörler

Isı değiştirgeci olarak kanatçıkları kullanmamızdaki amaç yüzey alanını artırarak ısı alışverişini güçlendirmektir. Açık hücreli köpük metallere baktığımızda çok fazla yüzey alanı karşımıza çıkmaktadır ve ısı değişimi için ideal bir malzeme olarak görünmektedir. Isı eşanjörü olarak bakır veya alüminyum bazlı yüksek iletken köpükler kullanılabilir. Hem gazlar hemde sıvıların açık hücreli köpük metal içerisinden akması sağlanarak aynı mantıkla soğutma ve ısıtma aynı zamanda yapılabilir. Açık gözeneklilik nedeniyle, basınç düşüşleri en aza indirilebilir. Bu tür uygulamaların bir örneği, mikroelektronik cihazların, bilgisayar yongaları veya güç elektroniği gibi yüksek güç dağıtma yoğunluğuyla soğutulması için kompakt ısı alıcılarıdır. Günümüzde pin-fin dizileri bu gibi durumlarda standart çözümdür. Metal köpükler, akış dirençlerinin mümkün olduğu kadar düşük ve ısı iletkenliğinin mümkün olduğu kadar yüksek tutulacağı şekilde seçildiklerinde daha iyi performans gösterir. Köpük metaller ile ısı eşanjörü tasarım soruları ayrıntılı olarak araştırılmaktadır. Açık hücreli malzemeler için başka bir uygulama alanı, terleme soğutmasıdır. Yüksek yüzey alanı, düşük akış direnci ve kullanılan bazı malzemelerin iyi ısıl iletkenliği bu tür amaçlar için umut vericidir (Banhart 2001).

Açık hücreli köpük metaller son yıllarda Faz Değişim Metaryeli (PCM) olarak kullanılmaktadır. PCM'ler faz değişimi sırasındaki gizli ısıdan faydalanırlar, gizli ısı depolama sırasında neredeyse sabit bir sıcaklıkta katıdan sıvıya veya sıvıdan gaza veya tam tersine durumlarda ortamdaki ısıyı sabit tutmaya çalışırlar. Yüksek gözeneklilik, iyi termofiziksel özellikler ve mekanik dayanım metal köpüklerin belirgin özellikleridir. Metal köpüklerin, PCM'lerin termal iletkenliğini arttırmada uygun bir seçenek olduğu kanıtlanmıştır. (Buonomo ve ark. 2018)

2.5.3. Katalitik konvertör ve su artımı

Katalitik konvertör genellikle araçlarda bulunan ve gaz emisyonunu düşürmeye yarayan zehirli gazları içindeki katalizör elementleri sayesinde kendine bağlayarak dışarıya salınımını engelleyen yapılardır. Katalizin verimi katalizör ile reaksiyona girecek gazlar veya sıvılar arasındaki yüksek bir arayüz alanına bağlıdır. Bu nedenle, katalizör ya gözenekli bir yapıya işlenir ya da bu mümkün değilse, gözenekli bir seramik malzeme gibi başka bir gözenekli sisteme uygulanır. Hücresel metaller, yüzey alanı ile ilgili olarak rekabet edemeseler bile yüksek süneklik ve termal iletkenlik gibi diğer faydalı özellikleri sebebiyle bu tür seramiklerin yerini alabilirler. İnce bir korozyona dayanıklı açık hücreli metal köpük tabakası, katalitik maddeyi içeren bir bulamaca bulanması ve son olarak yüksek sıcaklıklarda kürlenmesiyle oluşturulan katalizör üretme çalışmaları mevcuttur. Elde edilen katalizör iyi mekanik bütünlüğe sahiptir, yani birçok sıcaklık döngüsünden sonra bile, katalizör metal köpük desteğini bırakmaz. Bu tür katalizörler için örnek verilebilecek uygulamalardan biri, azot oksitlerin (NO_x) enerji santrallerinin egzoz dumanından uzaklaştırılmasıdır.

Suda çözünen istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak için hücresel metalik malzemeler kullanılabilir. Bu uygulamada, kirli su açık bir yapıya sahip oldukça gözenekli bir hücresel metal içinden akar. İyonlar, bir redoks reaksiyonunda hücresel yapının matris metaliyle reaksiyona girer. Literatürde Cr(VI) iyonlarının dökme alüminyum köpüklerle elektriksiz bir şekilde azaltılması gibi çalışmalara rastlanılmaktadır (Banhart 2001).

2.5.4. Susturucular ve ses kontrolü

Açık hücreli bir köpük metal bir mercek veya prizma şeklinde bir parça şeklinde oluşturulabilirse bir ses dalgası kontrol cihazı elde edilebilir. Ses dalgaları daha sonra bu akustik cihaz tarafından yönetilebilir. Ayrıca, kapalı hücreli köpükler, ultrasonik sesleri ve rezonansı engelleyebilmek amacıyla empedans tüpleri olarak uygunlukları üzerinde durulmuştur.

Endüstriyel uygulamalarda sesin, basınç darbelerinin veya mekanik titreşimlerin sönümlenmesi için üretilmiş ürünler mevcuttur. Belirli bir derece açık gözenekliliğe sahip malzemeler, bazı frekans değerlerini geçirirken bazı frekans değerlerini sönümlenmekte için kullanılabilir. Kompresörlerde veya pnömatik cihazlarda meydana gelen ani basınç değişiklikleri gözenekli köpük metaller ile sönümlenebilir.

2.5.5. Elektrokimyasal ve membranlı reaktörler, bataryalar, yakıt pilleri ve güneş enerji sistemleri

Köpük metallerin kurşun ve bakır gibi metallerden üretilerek kurşun asit bataryalar gibi kimyasal pillerde kullanıldığında temas yüzeylerinin yüksek oluşuyla potansiyelleri çok yüksektir. Geleneksel kurşun-asit bataryalar nispeten ağırdır ve bu nedenle düşük bir spesifik enerjiye sahiptir. Bu nedenle, enerji yoğunluğunu iyileştirmek için daha hafif bir ızgara önem arz etmektedir. Keza seygar üniterlerde yakıt performansı ağırlıkla direkt olarak ilişkilidir. Çalışmalar köpük ızgaralarının direncinin kurşun ızgaralara göre daha düşük olduğunu ve köpük ızgaralarının spesifik yüzey alanının kurşun ızgaralardan çok daha büyük olduğunu göstermiştir. Köpük ızgaralı aküler, geleneksel kurşun-asit akülerden daha uzun çevrim ömrü göstermektedir. Köpük elektrotlu akülerin şarj / deşarj performansı geleneksel ızgaralı bataryalara kıyasla hayli gelişmiştir. Bir çalışmada köpük elektrotlu bataryaların performansları döküm ızgaralı bataryadan %19 ila 36 oranında arttırıldığını bildirilmiştir (Tabaatabaai ve ark. 2006, Ji ve ark. 2014).

Metal köpüğün özelliklerinden biri imalat aşamasında fiziksel yapısını rahatlıkla değiştirilebilir olmasıdır. Metal köpüklerin yakıt hücrelerinde ve güneş enerjisi sistemlerinde uygulanması araştırılan bir konudur. Ayrıca, metal köpüğün yakıt hücreleri ve güneş enerjisi sistemlerindeki performansı da tartışılmaktadır. Metal köpüğü, özellikle akım yoğunluğu ve akış dağılımı bakımından, performansı artırmak için elektrotlara, gaz difüzyon tabakasına ve yakıt hücrelerinin akış alanına uygulanabilmektedir. Ayrıca, metal köpük, güneş enerjisi toplama sisteminin verimliliğini arttırması için bir ısı eşanjörüdür. Deneysel testlerde üstün performans, metal köpük ürünlerinin yenilenebilir enerji alanında ticarileştirilmesine olanak tanımaktadır (Tan 2003, Weng ve ark. 2018).

Biyokimya, kimya, çevre ve petrokimya alanında kullanılan membran veya elektrokimyasal reaktörlerde köpük metal kullanımına rastlamak mümkündür. Burada katalitik malzeme, akış destekleyici, mikrobiyal hücreler kullanılarak elektrik üretme sırasında veya pil görevinde çeşitli amaçlar için kullanılabilir (Banhart 2001, Özel 2017).

2.5.6. Ateş duvarları uygulamaları

Malzemesinin ısı iletkenliği yüksek olan hücresel metaller yanıcı gazlarda alev yayılımını durdurmak için kullanılabilir. Açık hücreli köpüklerin, 550 m/s hızla ilerleyene bir yangının alevlerini bile durdurabildiği gösterilmiştir. Yanıcı gazları taşıyan uzun boru hatlarında olası tutuşma kaynaklarına yakın yerlere açık hücreli köpük metaller konulabilmektedir, eğer bir yanma meydana gelirse, basınçla parlayan alev yüksek hızlara çıkamayacaktır. Bununla birlikte otomobillerde herhangi bir patlama anında alevlerin yaşam alanına ulaşmasını engelleyici olarak köpük metallerin kullanılabilirliğine rastlanılmaktadır (Ashby ve ark. 2000, Banhart 2001).

2.5.7. Dekoratif uygulamalar

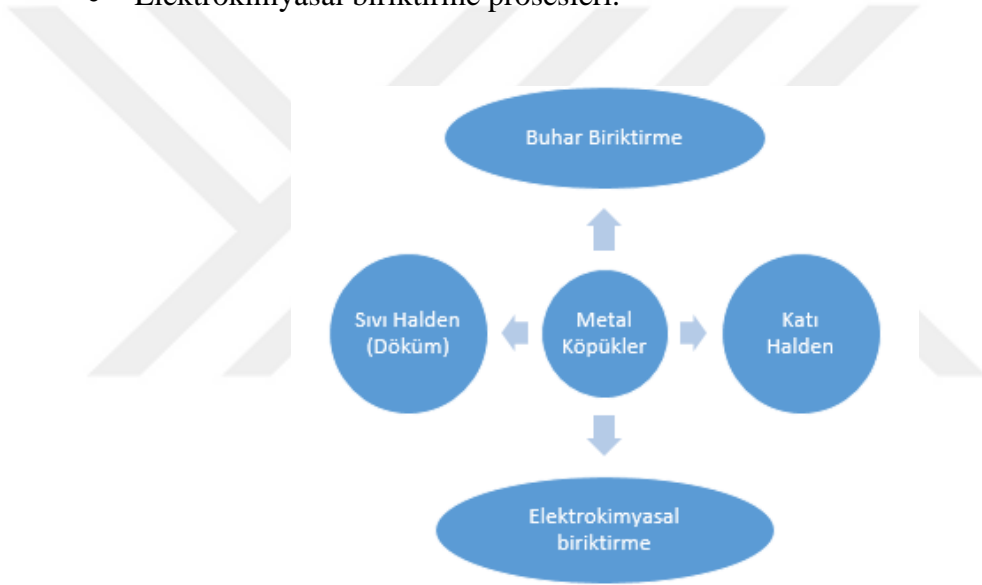
Metal köpükler bilindiğinden beri, bu yeni malzemeler tasarımcıların ve sanatçıların hayal gücünü harekete geçirdi. Dekoratif veya sanatsal uygulamaların temel amacı, geleneksel malzemelere kıyasla belirgin bir görsel veya dokunsal izlenim yaratmaktır. Altın veya gümüşü temel alan köpüklerin, mücevherler için benzeri görülmemiş bir görsel görünüm veya buna uygun olarak düşük ağırlıkta büyük bir hacim elde etmek için potansiyel bir yeni malzeme olduğu düşünülmektedir. Süslü mobilyalar, saatler, lambalar yapmak için alüminyum köpükler kullanılmıştır. Sandalyeler veya masalar alüminyum köpükle üretilmektedir; birçok uygulama için gerçek fiziksel veya mekanik özellikler çok önemlidir. Yüksek kaliteli hoparlör sistemleri alüminyum köpükten yapılmıştır. Köpük, sadece yüksek bir özgül sertlik ve orta derecede mekanik sönümlenme sağlamakla kalmaz, aynı zamanda geleneksel malzemelerden daha çekici görünebilecek bir "yüksek teknoloji" görüntü de sağlar. Malzeme bilimcisi için, bu tür uygulamalar pek tatmin edici olmayabilir, çünkü bunlar kısmen malzemenin "moda" olduğu gerçeğine dayanır, bu da malzemeye olan ilgiyi çabuk yıpratabilecek, önyargılar oluşturacak bir etkiye sahiptir.

Bununla birlikte, malzemenin fiyatı tasarım uygulamaları için çok önemli olmadığından, bu yeni üretim yöntemleri oluşturmak için iyi bir fırsat olabilir (Banhart 2001).

2.6. Açık Hücreli Köpük Metallerin Üretim Yöntemleri

Metal köpüklerin tarihçesinden daha önce bahsedildiği üzere 1920'lerden beri çok çeşitli üretim prosesleri geliştirilmiştir. Bu prosesleri 4 temel başlık altında toplayabiliriz:

- Katı hal prosesleri;
- Sıvı hal prosesleri;
- Buhar biriktirme prosesleri;
- Elektrokimyasal biriktirme prosesleri.



Şekil 2.7. Metal köpüklerin üretim yöntemleri

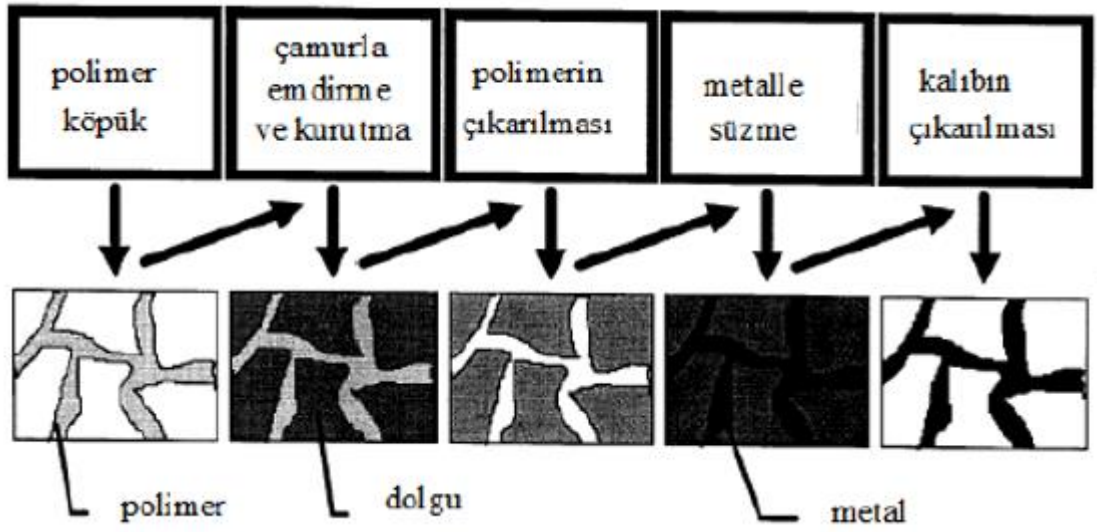
2.6.1. Sıvı hal prosesleri ile açık hücreli köpük metal üretim yöntemleri

Sıvı hal prosesleri köpük metal elde edebilmek için kullanılacak ham maddenin ergimiş hallinden yararlandığı prosesleri kapsar. Bunları döküm yöntemleri ve sprej köpüklendirme olarak iki temele düşürmek mümkündür.

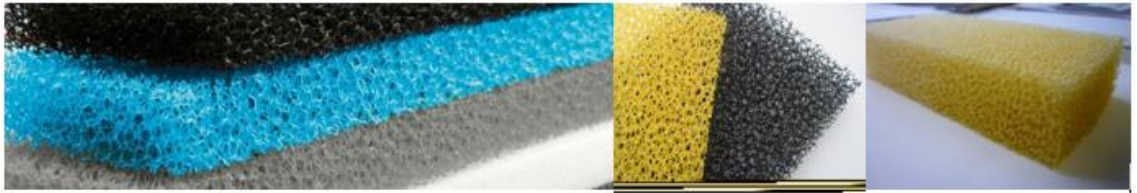
2.6.1.1. Döküm prosesleri

Döküm yöntemleri olarak genellikle hassas döküm teknikleri kullanılmaktadır. Bunlar var olan bir yapının, çoğu zaman bu retiküle bir süngerdir, metalden replikasını oluşturma işlemini kapsar. Bazı durumlarda da proses süresini ve maliyeti düşürme amacıyla daha sonradan ortamdan uzaklaştırılabilen bir yer tutucunun etrafına direkt döküm yapılma süreçlerinden ibarettir.

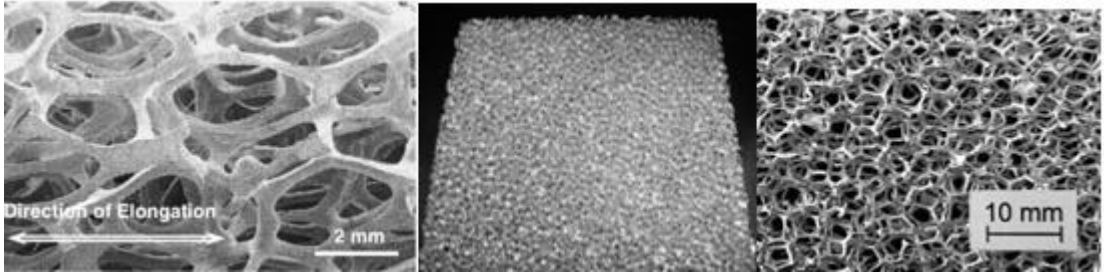
Polimer köpükler ile hassas döküm prosesi ticari adıyla Duocel, polimer retiküle bir köpüğün replikalama işlemine dayanmaktadır. Bu polimer genellikle poliüretan köpükler döküm kalıbı içerisinde maça görevi görmektedir. Prosesin kullanışlı tarafı istenilen kalıp şeklinde açık hücreli köpük metal üretimine izin vermesidir. Ayrıca yöntem neredeyse tüm metallerin bu şekilde üretimine izin vermektedir. Bu yöntemin esası replikası yapılacak malzemenin negatifini oluşturmayı amaçlamaktadır. Açık hücreli köpük metal üretim için replika yapılacak malzeme genellikle retiküle bir sünger olmaktadır. Bu sünger gerekli görüldüğü takdirde muhlama yapılarak cidar kalınlaştırılmasına gidilebilir. İlk olarak polimer köpük dağılabilen bir döküm bulamacına hapsedilir. Bu bulamaç seramik, kum veya döküm ısısına dayanıklı başka bir malzeme olabilir. Daha sonra bu bulamaç kurutulur. Kuruyan bulamaçtan polimer köpüğün tahliyesi için hazırlanan yapı belli dereceye ısıtılır ve polimer köpüğün buharlaşması beklenir veyahut eriyerek uzaklaşması sağlanır. Yapıdan uzaklaşan polimer köpüğün yerini artık boşluklar almıştır. Ve bu boşluklu yapı dökümü yapacağımız kalıbı oluşturmaktadır. Gerekli durumlarda kalıbın döküm sıcaklığına ve basıncına dayanabilmesi için kalıbın pişirilmesi işlemleri gerçekleştirilir. Bazı geliştirilen proseslerde bu üç işlem tek bir seferde gerçekleştirilebilir. Elde edilen kalıp boşluğuna istenilen metal vakum ortamında veya yüksek basınç ile enjekte edilir.



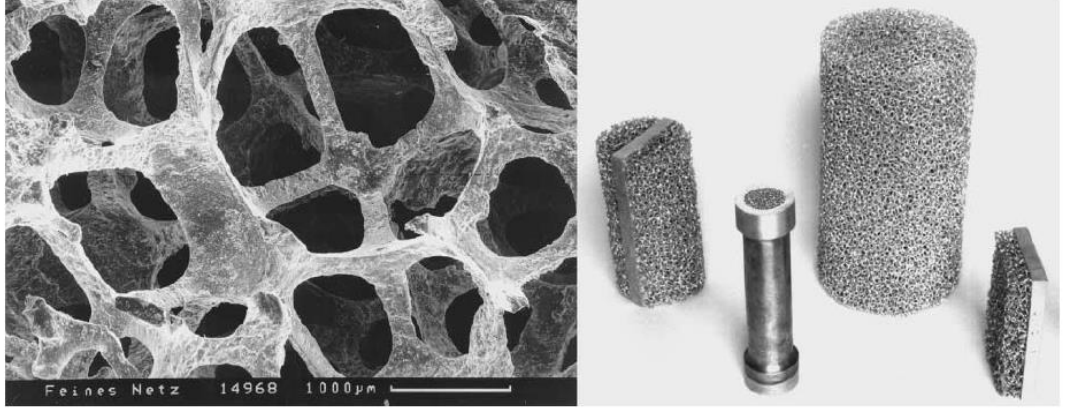
Şekil 2.8. Polimer köpüklerle hassas döküm metodunun akış şeması



Şekil 2.9. Poliüretan retiküle sünger örnekleri



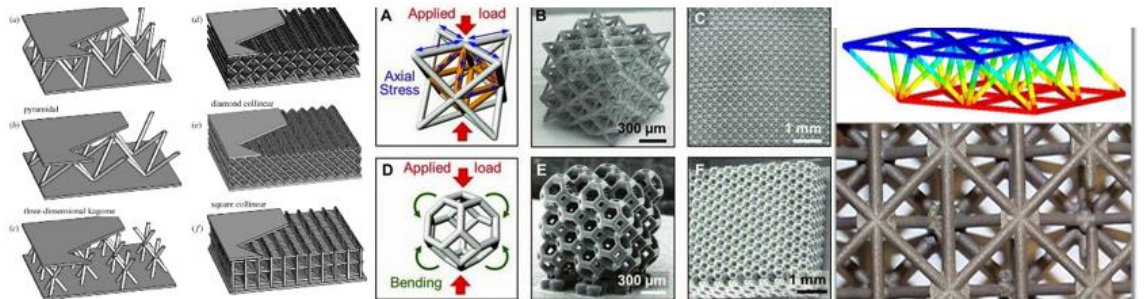
Şekil 2.10. Polimer retiküle süngerlerden replika usulü üretilmiş açık hürelü alüminyum köpük metalleri



Şekil 2.11. Duocel TEM görüntüsü ve 40mm çaplı silindir numune örnekleri (Banhart 2001)

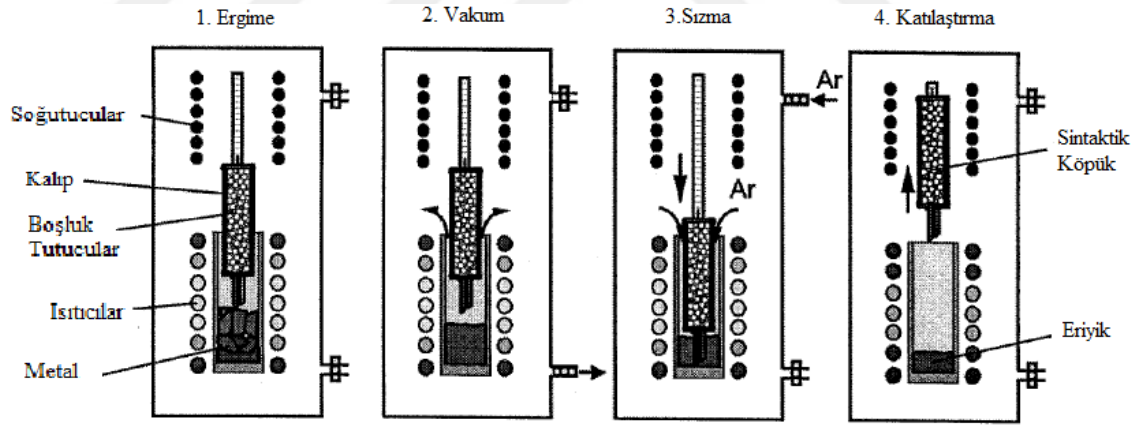
Diğer bir hassas döküm prosesi kafes blok malzeme ile açık hücreli köpük metal üretim yöntemidir. Bu yöntem polimer köpüklerle yapılan yöntemle hemen hemen aynıdır. Polimer retiküle köpük yerine düzenli kafes yapılar kullanılmaktadır. Literatürde bu kafes yapılar latis blok veya Kagome latis yapısı olarak geçmektedir. Bu şekilde düzenli bir kafes yapısına sahip köpük metaller, periyodik hücresel metal olarak da adlandırılmaktadır.

Kafes oluşturmak için polimer parçalar birbirine yapıştırılabilir; PLA, ABS gibi filamentlerle 3B yazıcılar tarafından inşa edilebilir. Bu yapılar düzgün kafes sistemlerine sahip oldukları için teorikteki verilere en yakın aynı mekanik özellikte köpük malzemeyi tekrar tekrar üretmek ve davranışlarını tahmin etmek oldukça kolaydır (Banhart 2001, Sezer 2009).



Şekil 2.12. Kafes sistemine sahip köpük metaller

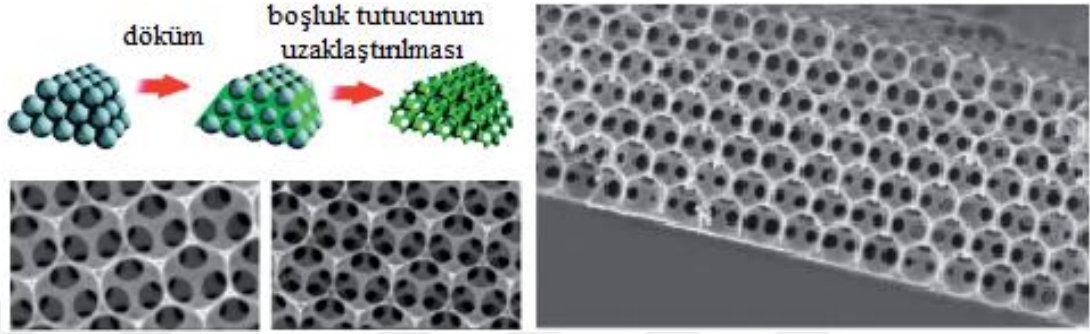
Üçüncü bir döküm yöntemi olarak yer tutan malzeme etrafına döküm metodu önceki hassas döküm yöntemlerinden daha az karmaşık bir prosese sahiptir. Bu proseste yoğunlukları genellikle düşük organik, inorganik veya farklı metaller; granül içi boş küre veya içi dolu küre halinde bir çerçeve yardımıyla sıralı veya gelişigüzel halde kalıba yerleştirilir. Üzerine istenilen metal ergimiş vaziyette dökülür. Bazı durumlarda ergimiş metalin üstüne yer tutan elemanlar eklenebilir. Açık hücreli köpük metal üretilmesi isteniyorsa boşluk tutucular yerine genellikle tuz kullanılır. Tuz daha sonra belirli bir çözelti içinde veya suda ortamdan rahatlıkla uzaklaştırılabilen bir boşluk tutucudur. Eğer yer tutucu elemanlar metal matrisinden uzaklaştırılamıyorsa veya bu şekilde kompozit bir yapı ortaya çıkarılması isteniyorsa bu yer tutucu ve kullanılan metalin sentezinden oluşmuş yapıya sintaktik köpük adı verilir. Bölüm 2.2’de bahsedildiği üzere çelik içi boş küre hapsedilmiş alüminyum matrisli bir sintaktik köpüğün alüminyum köpüğe göre 30 kat daha dayanım gösterdiği görülmüştür. Genel itibariyle bu yöntemlerde ergimiş metalin aralara tamamen sızabilmesi için kalıba belirli bir basınç, bu inert gaz olabilir, veya vakum uygulanır.



Şekil 2.13. Sintaktik köpük metal oluşturma prosesi (Gupta ve Rohatgi 2015)

Yer tutan malzeme etrafına döküm tekniğiyle sandviç yapılar yapmak mümkündür. Boşluk tutan elemanlar yüzeyi oluşturacak plakalar arasına yerleştirilir ve ergimiş metal ortama ilave edilir. Bu esnada sandviç plakalar döküm malzemesinle kaynak oluşturacak şekilde yüzeylerinin ergimiş olduğuna dikkat edilmelidir. Daha az hassas bir yöntem olarak boşluk tutucular bir düzeneğin içine konularak kalıba yerleştirilir ve düzeneğin dışında kalan kısım sandviç plakaları oluşturacak şekilde tek dökümde sandviç plakalı

köpük metal elde edilebilir. Yer tutan malzeme etrafına döküm tekniğiyle gözenek dağılımı büyüklüğü ve şekli üzerinde yüksek bir kontrole elde edilir (Kränzlin ve Niederberger 2015).



Şekil 2.14. Boşluk tutucu etrafına döküm yöntemi (Kränzlin ve Niederberger 2015)



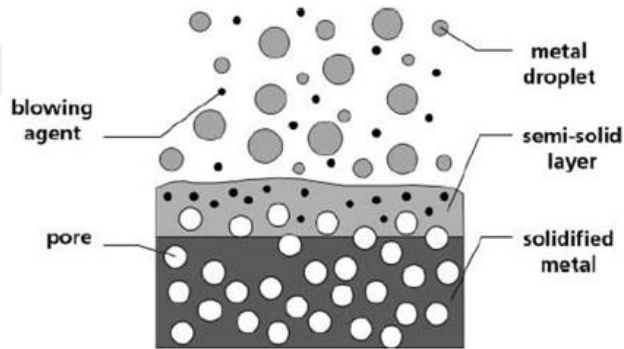
Şekil 2.15. Yer tutan malzeme yerine tuz kullanılmış numune; ilk görsel tuzdan arındırılmamış haline aittir (Varyoz ve ark. 2015)

2.6.1.2. Sıvı halden sprey ile köpikleme

Ergimiş metal bir nozul yardımıyla sürekli olarak püskürtülür uçuşan ergimiş metal taneleri damlacıklar oluşturur. Damlacıklar substrat olarak adlandırılan bir plaka üzerinde toplanır. Birikme boru levha ve biyet şeklini alabilirler. Sprey düşük oksit içeriği, ince tanecik boyutu veya yarı kararlı alaşım fazları içerebilir ve bu özellik kombinasyonu klasik döküm yöntemleriyle elde edilemez. Sprey içeriği isteğe göre değiştirilebilir. Bu özellik, püskürtme işleminin özellikle çekici görünmesini sağlar: oksitler, karbürler veya saf metaller gibi tozları sprey içine enjekte ederek birikintinin özelliklerini değiştirme ve sıvı metal ile ıslanmalarına veya ıslanmalarına izin verme imkânı sağlar. Damlacıklar

substrat üzerinde biriktirildiği gibi metal içine hapsolacaktır. Bu şekilde, eğer eklenen tozlar karbür ya da oksitse, metal matrisli kompozitler (MMC) yapılabilir. Enjekte edilen tozlar, erimiş metal ile temas ettiğinde ayrışan ve çok miktarda gaz açığa çıkaran maddeler ise, birikintide gözenekler oluşturabilirler. Bu sayede zorda olsa açık gözenekli köpük metal elde etmek mümkündür. Genel olarak bu yöntemle gözenek oluşturulmak istenmez.

Bir çalışmada CuSn6 alaşımına BaCO₃ tozu enjekte edilerek gözeneklilik oluşumu araştırılmıştır. Başka bir çalışmada bir karbon çeliği spreylene silikon oksit ya da mangan oksit enjekte edilerek gözenekli çelik oluşturmayı başarmışlardır. Böylece biriktirme bölgesinde SiO₂ + 2C => Si + 2CO tipinde bir kimyasal reaksiyonda büyük miktarda karbon monoksit açığa çıkardılar. Bu şekilde elde edilen gözeneklilik % 60 oranlarına çıkarılabilmıştır fakat bu malzemelerin gözenek morfolojilerinde uniformluk sağlanamamıştır (Banhart 2001).

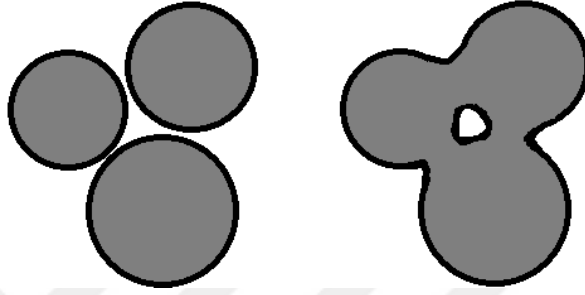


Şekil 2.16. Sprey köpükleme prosesi (Banhart 2001)

2.6.2. Katı hal prosesleri ile açık hücreli köpük metal üretim yöntemleri

Katı hal proseslerinde hücreli metalik yapılar yapmak için ergimiş bir metal yerine, toz halindeki katı metaller kullanılabilir. Toz, işlem boyunca katı kalır ve sadece sinterleme işlemi veya diğer katı hal işlemlerine maruz kalır. Bu, ortaya çıkan hücreli yapının morfolojisi için çok önemlidir; sıvı haldeki yüzey gerilimi, kapalı gözeneklerin oluşumuna doğru bir eğilime neden olurken, sinterlenmiş yapılar az çok küresel yapıları gereği sinter boyunlarıyla bağlanmış tipik açık gözenekli ürünlerin morfolojisini gösterir

(Şekil 2.15). Geleneksel toz metalürjisi yöntemleriyle gevşek toz yığınları ile porozitif yapılar elde edilebilir. Fakat bu kolay yöntemlerle gözenekler üzerinde yeterli kontrole sahip olamazlar. İleri teknoloji yöntemlerle toz metalürjisinde yüksek boşluğa ve gözeneklerin yapısal kontrolüne sahip hücresel metal oluşturmak için gazı basınçla toza hapsetmek, boşluk tutucu dolgu malzemeleri veya boşluklu küreler kullanarak ve metal tozu bulamaçlarını köpürtme yolu kullanılabilir (Banhart 2001).



Şekil 2.17. Toz parçacıklarının sinter sırasında boyun vermeleri

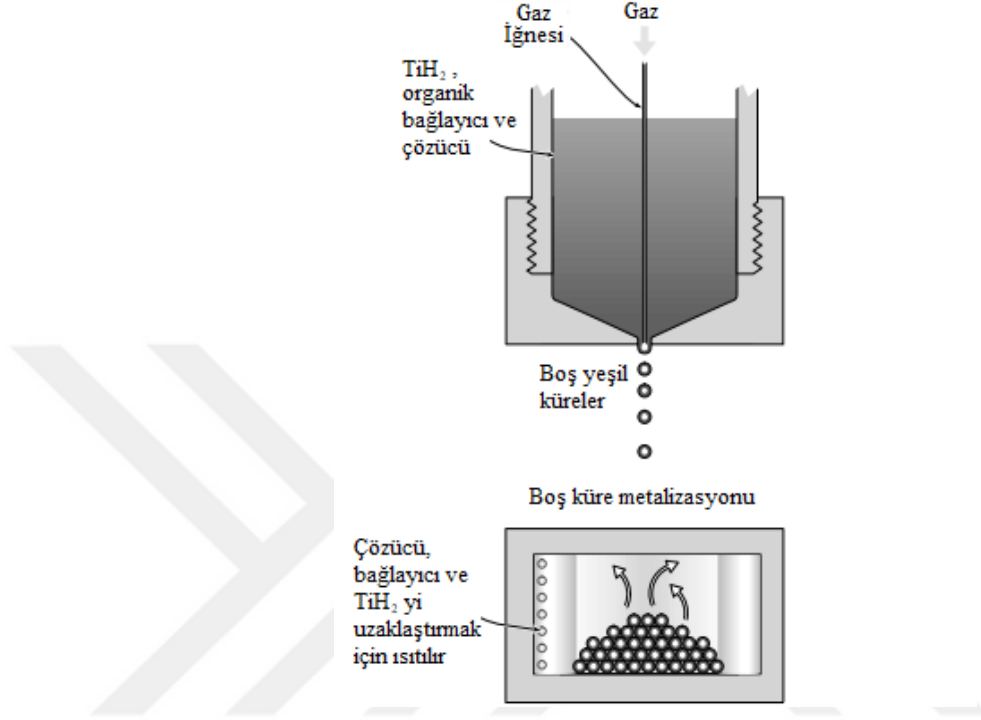
2.6.2.1. Metalik içi boş küre yöntemi

Metalik içi boş küre yöntemi metal kürelerin belirli bir kalıpta sinterlenerek birleştirilmesi işlemine dayanır. Bu yöntemle uygun düzenleme ve parametrelerle açık veya kapalı gözenek yapmak mümkündür. Bu metotta kürelerin oluşturulması bu prosesin zorluklarından biridir. Küreleri oluşturmanın belli başlı yöntemleri vardır. Bunlar:

- Küreleri oluşturmak için polimer kürelere ilgili metal elektriksel veya kimyasal biriktirilme yapılabilir. Eğer elektriksel biriktirilme yapılacaksa polimer küreler grafit gibi elektriklenebilen malzemeler ile kaplanır. Benzer durum kimyasal biriktirmede de geçerlidir. Kaplanan kürelerden yer tutucu uzaklaştırılarak metal küreler elde edilir.
- Polimer küreler veya strafor küre gibi malzemeler reçine-metal toz karışımına bulanırlar. Oluşturulan küreden polimer madde uzaklaştırılır. Elde edilen kabuğun sinterlenmesiyle köpük metal elde edilir.
- Çift cidarlı koaksiyel (eş merkezli) bir nozul yardımıyla metal, metal-oksit veya metal hidrür toz bulamaçları dış hattan serbest bırakılır nozulun iç kısmından

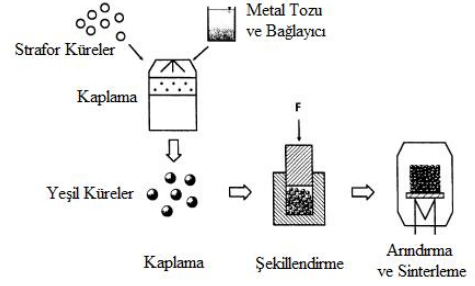
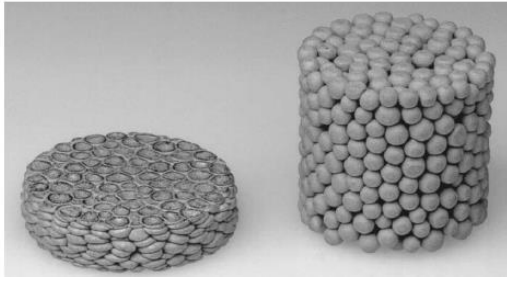
gelen gaz damlanın küre şeklini almasına yardımcı olur. Bu şekilde kurutulan metal küreler sinterlenerek köpük metal oluşturulur.

- Metal eriyiklerin atomizasyonu sırasında parametrelerin uygun ayarlanmasıyla içi boş kürelerin oluşturulması mümkündür.



Şekil 2.18. Georgia Tech yöntemi: koaksiyel nozul ile içi boş metal küre üretimi (Ashby ve ark. 2000)

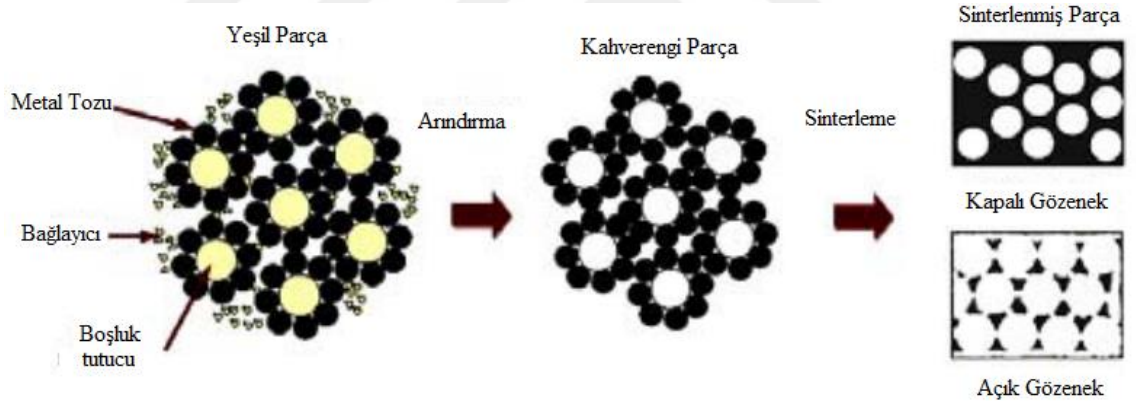
Bitişik küreler arasında sinter boyunları oluşturularak açık hücreler elde edilir. Küreler bir istifleme yardımcısı olarak balmumu petek kemerleri kullanılarak yani bir Bravais kafesiyle sinterlenmeden önce düzenlenmişse düzenli bir malzeme elde edilir. Sinterleme sırasında katmanlar arasında küreler kuvvete maruz kalırsa temas yüzeylerinde deformeler gerçekleşir bu da sinterleme kontaklarının artmasına ve açık gözeneklilik derecesinin de azalmasına neden olur. Reçineler yoluyla, bireysel küreler desteklenerek aralarındaki temas düzenlenebilir. Küre şekillerinin bozulmaması için kalın duvarlı küreler açık hücre üretimi için daha uygundur (Banhart 2001).



Şekil 2.19. İçi boş küre tekniğiyle köpük metal üretimi

2.6.2.2. Yer tutan malzeme etrafına toz kaplama metodu

Dolgu malzemeleri ve metal tozları kullanılarak gözenekli sünger benzeri malzemeler elde edilebilir. Bu yöntem daha önce sıvı hal proseslerinde bahsettiğimiz yer tutan malzeme etrafına döküm yöntemiyle benzerlik göstermektedir. Bu prosesin farkı, boşluk tutan malzemenin etrafına sıvı metal enjekte etmek yerine ince metal tozu ile doldurulmuş olmasıdır.



Şekil 2.20. Yer tutan malzeme etrafına toz kaplama metodu (Manonukul ve ark. 2010)

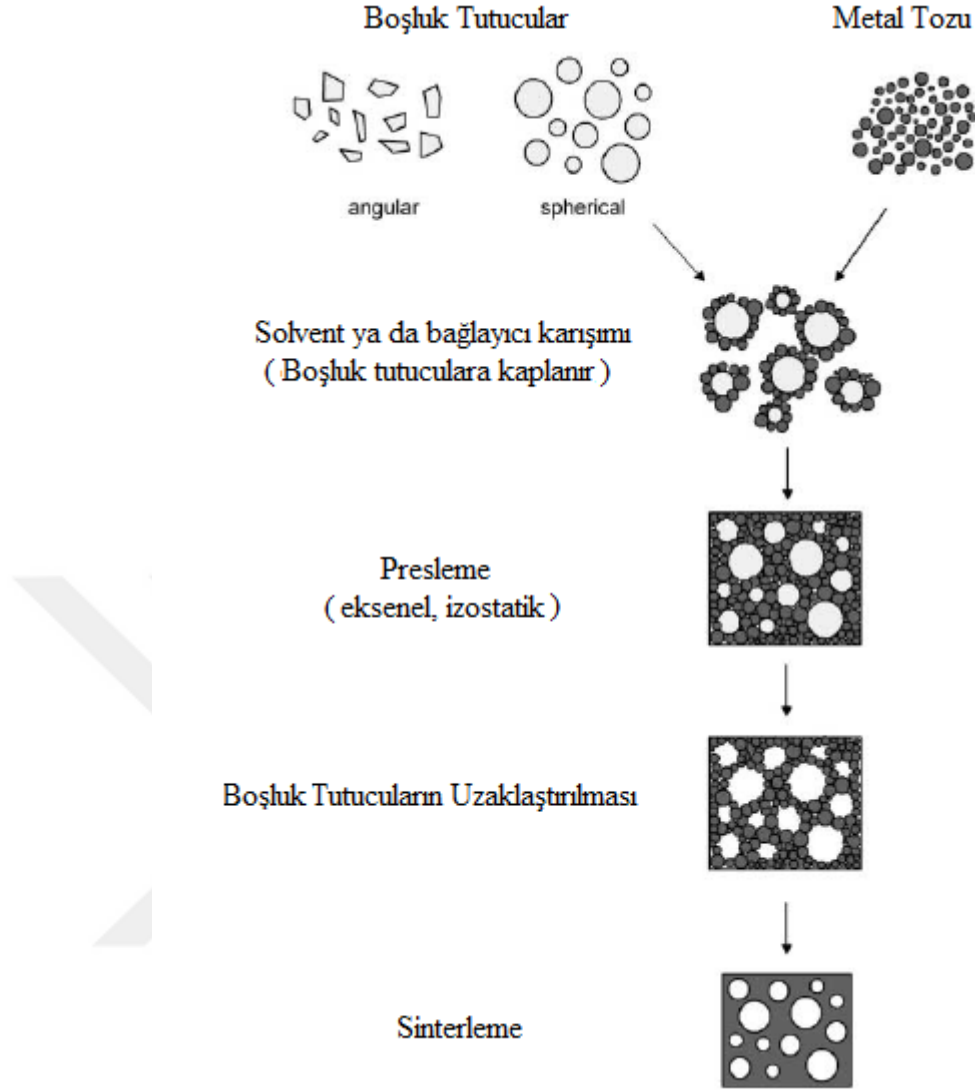
Metal tozu kuru bir dolgu maddesi veya uygun bir çözücü ile ya da yer tutucuları ve metal tozlarını karıştırmak için bir organik bağlayıcı kullanılarak kalıba doldurulabilir. Seramik parçacıklar, içi boş küreler, polimer taneleri, içi boş polimer küreler, tuzlar ve hatta metaller boşluk tutucular olarak kullanılabilir. Doldurulmuş kütle daha sonra basitçe oda sıcaklığında sıkıştırılır veya yer tutucular ısıya dirençli ise, sıkıştırmayı geliştirmek ve metal tozu parçacıkları arasında sinterleme işlemlerine başlayabilmek için yüksek sıcaklıklarda preslenir. Her iki durumda da gömülü dolgu granüllerine sahip metal

matristen oluşan bir bileşik elde edilir. Metal içeriği yeterince düşükse yani açık gözenekli bir yapı oluşturuluyorsa, boşluk tutucu malzemeyi bir başka işlem adımında neredeyse tamamen çıkarmak mümkündür, çünkü dolgu malzemesi tarafında oluşturulan yapı ağsıdır ve birbirine bağlıdır. Bu, ısıtma işlemi, sızdırma veya sulu bir çözücü kullanılarak yapılabilir. Gözenekli metalik ağı daha da yoğunlaştırmak için son bir sinterleme adımı uygulanabilir. İyi bir örnek olarak Titanyum köpükleri, aşağıdaki üç yoldan biriyle üretilir:

Birinci yol, polimer kürelerin boşluk tutucular olarak kullanılmasıdır. Bir miktar polimer küresinin titanyum tozu ile titreşimli olarak yüklenmesini takiben soğuk presleme, polimerin ısıtma işlemi ile çıkarılması ve son olarak sinterleme ile nihai ürüne ulaşılması.

İkinci yol, alternatif olarak, magnezyum metal granülleri dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Bu işlemde, bu tür granüllerin bir kısmı titanyum tozu ile doldurulur, bundan sonra karışım magnezyumun erime noktasının altındaki sıcaklıklarda sıcak olarak preslenir. Magnezyum granüllerinin ortamdan uzaklaştırılması, titanyum partiküllerinin sinterleme işlemiyle eşzamanlı olarak gerçekleştiği, 1400 ° C'ye kadar olan sıcaklıklarda buharlaşma yoluyla olur. Magnezyumun avantajı düşük kaynama noktasına sahip olması (1107° C) ve titanyum ile tamamen karışmasıdır.

Üçüncü yol, karbamitin (CH_4N_2O) petrol eteri ile nemlendirilmesinden sonra, 45 mm'den daha küçük tanecikli ince titanyum tozunun eklendiği, yer tutucu olarak 0.4 ila 2.5 mm'lik tane büyüklüğüne sahip olan karbamid parçacıkları kullanılarak oldukça gözenekli titanyum üretilmiştir. Karışımlar 166 MPa'da preslenerek önce 170 ° C'de, sonra da 1400 derece C'de ısıtma işlemi tabii tutulmuştur. Gözeneklilik oranı olarak % 70'e ulaşılmıştır. Paslanmaz çelik (316L) ve bazı nikel bazlı süper alaşımlar da bu yöntemle gözenekleri % 60 ila 80 arasında değişen hücreli katılara işlenmiştir (Banhart 2001).



Şekil 2.21. Toz metalürjisiyle yer tutan eleman kullanılarak köpük metal üretimi (Banhart 2001)

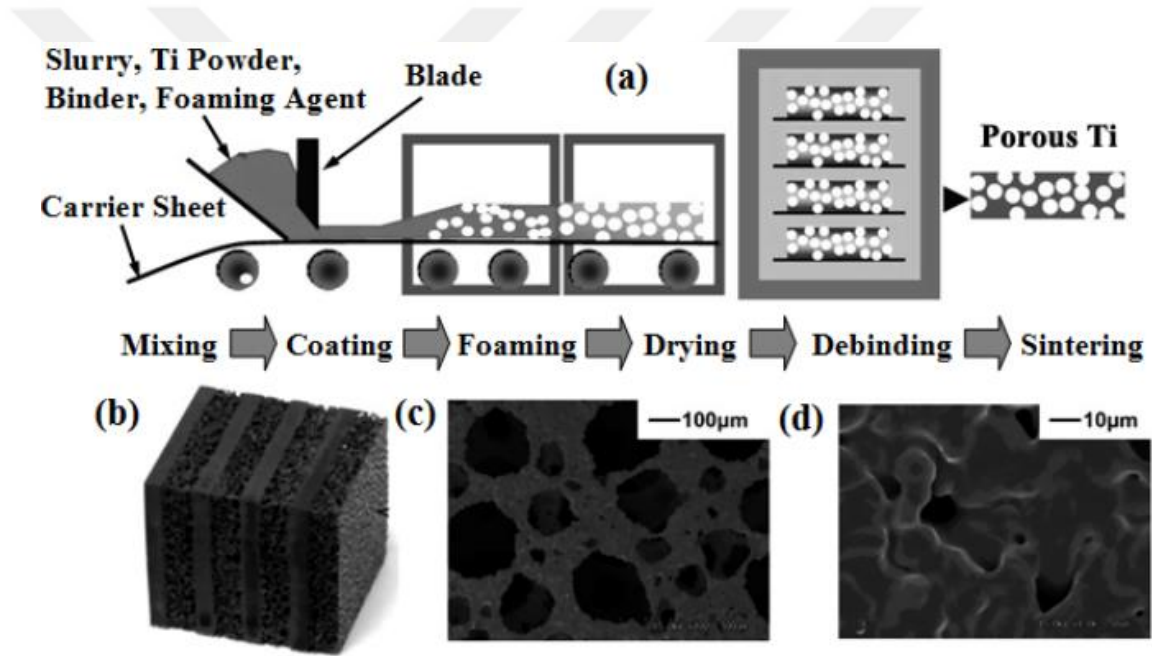
2.6.2.3. Köpürtücü ajan ile köpük metal üretimi

Bu metot sinterleme sırasında genişleyen katkı maddeleri sayesinde köpük metal üretmeyi hedefler. Genleşen köpürme ajanları belirli bir zamanda soğutulurak yapıya hapsedilir. Eğer gözeneklerin birleşme fırsatı olursa açık hücreli köpük metal üretmek mümkündür. Bu yöntem hassas parametreleri beraberinde getirir. Prosesin ayrıntıları aşağıdaki gibidir:

Metal tozlarından, köpürtücü maddelerden ve bazı reaktif katkı maddelerinden oluşan toz bulamacı veya çamuru denilen karışım oluşturulur. Bulamaç karıştırılıp bir kalıba dökülür ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılır. Katkı maddeleri ve köpürtücü ajanın etkisi altında,

bulamaç viskozitesini artırır aynı zamanda gazlar açığa çıkar ve yavaş yavaş köpürtücü ajanlar homejenliğe bağlı olarak genişlemeye başlar. Yeterli stabilize edici tedbirler alınır, genişletilmiş bulamaç bu şekilde kurumaması sağlanır ve istenilen şekil elde edilmiş olur. Uygun mukavemete sahip bir metal köpük elde etmek üzere sinterlenir (Banhart 2001).

Yapılan bir çalışmada köpürtme ajanı; alüminyum hidroksit veya hidroklorik asit içeren ortofosforik asit kullanılarak alüminyum tozlardan üretilmiştir. Bu şekilde bağlı yoğunluk % 7'ye düşürülsede üretilen köpük metalde yetersiz mukavemet ve çatlaklar gibi sorunlar oluşmuştur (Banhart 2001).

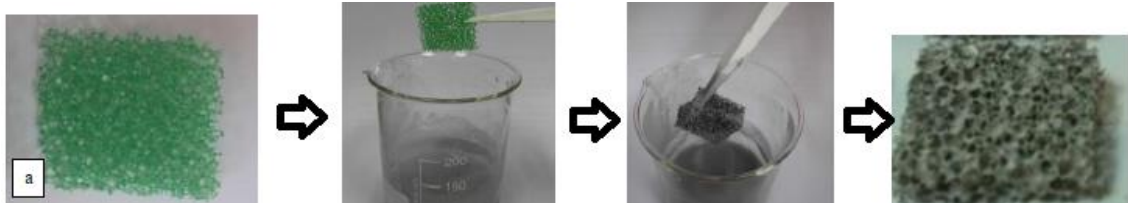


Şekil 2.22. Çamur köpüklendirme metodu (Li ve ark. 2014)

2.6.2.4. Polimer emdirme ile köpük metal üretimi

Bu metot retiküle bir polimer süngerin metalden bir replikasını oluşturma işlemine dayanır. Metal toza belirli bağlayıcı ve çözücüler eklenerek bir çamur oluşturulur. Çözücü olarak genellikle saf su kullanmak çamuru istenmeyen maddelerden arındırmayı sağlar. Eğer karışım susuz yapılması isteniyorsa etanol ve trikloreten çözücü olarak kullanılabilir. Bu karışımda viskozite değerlerinde çok hassas olmak gerekir. Hazırlanan çamur modeli eşit bir şekilde kaplamalıdır. Viskozitesi düşük karışımlar

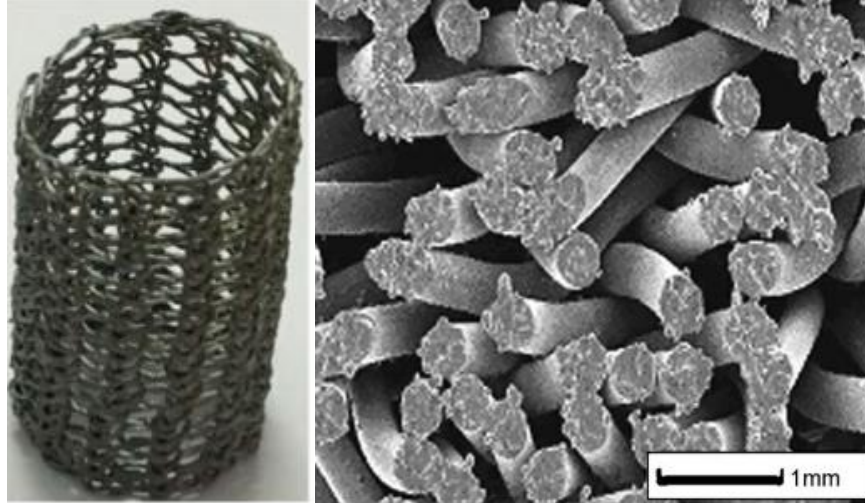
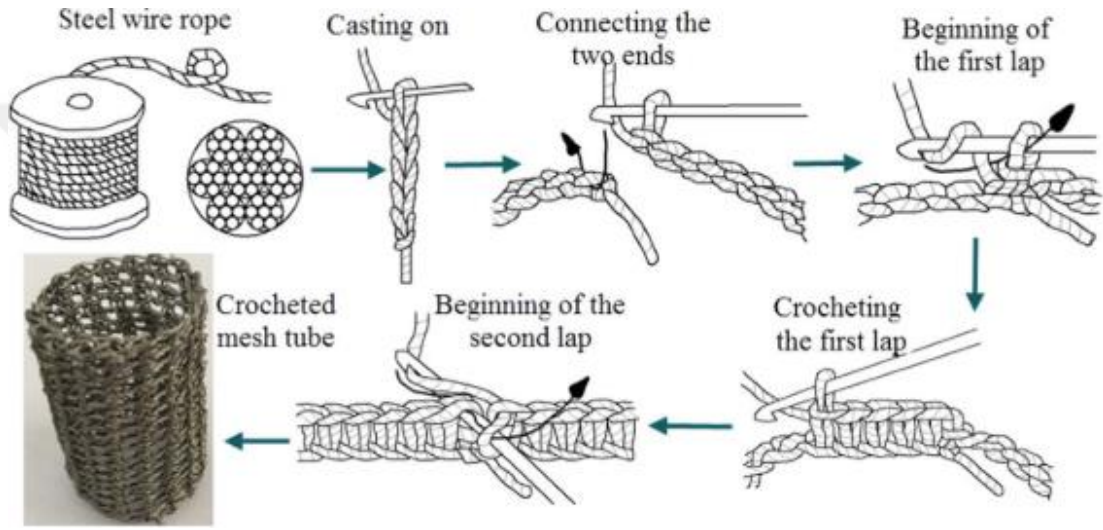
yüzeve tutunamayacak viskozitesi yüksek karışımlar modeli eşit bir şekilde bulamakta güçlük yaşanmasına neden olacaktır. Karışım için %50 – 70 oranlarında katı ihtiva eden çamurlar yöntem için kullanışlıdır. Metal ve seramik tozların boyutu sinterleme sırasında iyi bir bağlantı oluşturabilmeleri için eşekslenli 45µm'den daha küçük olmaları gerekir. Kullanılan polimer model malzemeler selüloz, poliüretan, polivinil, polistiren, lateks ve klorit olabilir. Erişim kolaylığı ve çamura bulanma özellikleri gereği poliüretan köpükler işlem için daha yatkındır. Çamur gözenkliliği ve malzemesi seçilmiş modele bulanır. Bulama işlemi iyice emdirilerek yapılır ve çamura daldırılmış vaziyette sıkılarak havası alınmış şekilde belirli bir süre beklenir (10-15dk). Dışarı alınan bulanmış köpük yine ezilerek veya merdanelerle üzerinden geçilerek çamur fazlası ihraç edilir. İşlem gerekli görülürse tekrarlanır. Kurutma işlemi kademeli olarak gerçekleştirilmelidir. Aksi takdirde çatlaklar oluşabilir. Oda sıcaklığında bir süre kuruyan model kurutma fırınında 100°C sıcaklığı civarında tamamen sudan arındırılır. Daha sonraki aşama modelin uzaklaştırılması işlemidir. Bu işlem sırasında modelin erime ve buharlaşma sıcaklıklarında hassas davranılmalıdır. Hızla ısınan ortam yüzünden model ani buharlaşma göstererek kurumuş çamuru deforme edebilir. Çok yavaş ergime durumunda da yapıda çökmeler gerçekleşebilir. Son aşama olarak metal tozlarının birleşmesi için yapı sinterlenmelidir. Bu yöntemin tabiatı gereği tozların preslenememesi sebebiyle sinterleme işlemi sırasında yapının bütünlük kazanması beklenir. Bu yöntemde açık veya kapalı hücreli köpük metal elde etmek mümkündür. Seramik veya metalik köpük üretilebilir. Model malzemeyle beraber gözenek yapısı değiştirilebilir. Pahalı ekipman ve cihazlara gerek yoktur. Fakat uygun çamur karışımını elde etmek zordur ve presleme yapılamadığından dolayı oluşan yapının mekanik özellikleri düşük olacaktır (Zaman 2011).



Şekil 2.23. Polimer emdirme metodu ile köpük metal üretimi; çamura bulama, kurutma modelin giderilmesi, ve son resim sinterlenmiş ürün (Zaman 2011)

2.6.2.5. Tel sinterleme metodu

Bu yöntem tellerin üst üste yığılması veya düzgün bir şekilde örülmesi ardından sinterlenerek bağlarını güçlendirmesiyle yapılır. Örgülerde tel kafes yapılar oluşturulabilir. Bu şekilde kompozit yapılar elde edilebilir. Yöntemde değişik metalleri sinterlemek mümkündür. Üzerlerine gelen basınç ve sinterleme sıcaklığı parametreleriyle gözeneklilik yapısı ve mukavemet değerleri belirlenir. Yöntem pratik bir yöntemdir (Liu ve ark. 2008, Liu ve ark. 2009, Li ve ark. 2014, Wu ve ark. 2018).



Şekil 2.24. Tel sinterleme uygulanmış ürünler: Solda, ağsı tüp şeklinde örülmüş çelik halattan sinterlenmiş malzeme; sağ altta çelik halatların rastgele şekilde kalıba yığılmasıyla sinterlenmiş numune (Liu ve ark. 2008, Wu ve ark. 2018)

2.6.3. Buhar fazından açık hücreli köpük metal üretimi

Üretilecek olan köpüğün veya hücre malzemenin geometrisini tanımlayan katı bir öncü yapı gereklidir. Ağsı poliüretan köpükler veya kafes blok (latis) polimer öncülleri olarak kullanılabilir. Bir vakum haznesinde metal buhar üretilebilir. Bu buhar soğuk substrat üzerine yoğunlaştırılır. Birçok metal buharlaştırma tekniği mevcuttur. Bunlar: Fiziksel buharlaştırma, rezistans ile, endüktif ile, ark ile, elektron demeti ile, lazer ile ve kimyasal buharlaştırma olarak sayılabilir.

Temel esas buhar fazındaki metal tozlarının, kalıp olarak kullanılan polimer yüzeyini kaplamasıdır. Metal buharının yoğunluğu ve maruz kalma süresi filmin kalınlığının belirlenmesini sağlar. Bunlarla birlikte nikel köpüklerin substratı oldukça düşük sıcaklıklarda çok verimli bir şekilde Nikel tetrakarbonil bileşiği yardımıyla kaplamak mümkündür.

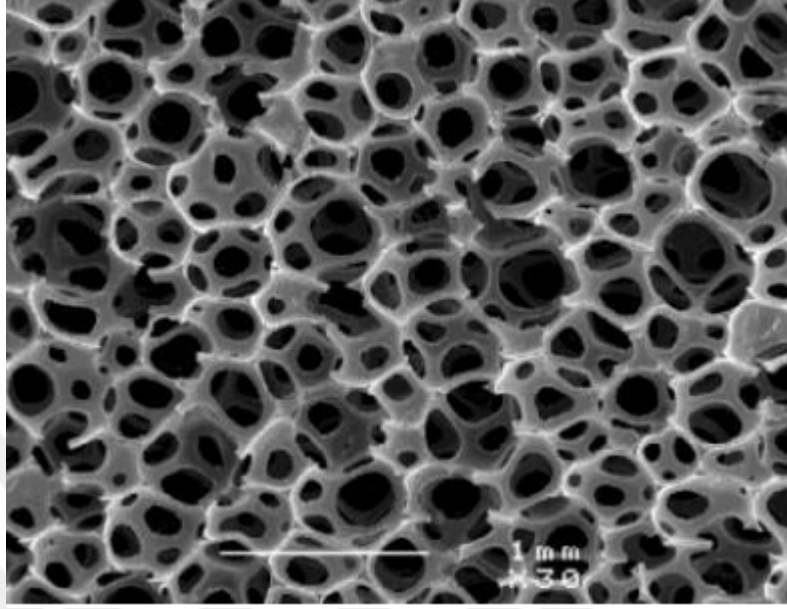


Nikel tetrakarbonil, 120° C'nin üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldığında nikel ve karbon monoksit'e dönüşen bir gazdır. Dolayısıyla, bu sıcaklıklarda nikel karbonil gazı akışı yardımıyla polimer modeli kaplamak mümkündür. Ni(CO)₄ kaynama noktası 43°C iken Fe(CO)₅ Kaynama Noktası 102.7° C'dir.

Polimerin erimemesi için sadece kızılötesi ısıtma kullanılarak karbonilin gerekli ayrışma sıcaklığında tutulabilir. Kaplama işlemi gerçekleştirildikten sonra polimer termal veya kimyasal arıtma ile çıkarılabilir. Daha sonra Nikelin temperleme sıcaklığına çıkılarak yapının sağlamlaşması sağlanır. (1000° C) (Inco prosesinde polimerin uzaklaştırılması ve temperleme işlemi tek adımda gerçekleşir.)

Bu şekilde üretilen nikel köpükler ticari olarak "Incofoam" olarak bilinir. 0.4-6 mm çapında hücreler oluşturmak mümkündür. Yoğunluklar 0.2 ila 0.6 g / cm³ arasında değişir, malzeme saflığı çok yüksektir (% 99.97 Ni) ve çekme mukavemetleri orta

yoğunluk için yaklaşık 0.6 MPa'dır. Mikroskobik görünümü elektro çökeltme ile yapılan köpüklere çok benzer (Banhart 2001, Poserin ve ark. 2004)



Şekil 2.25. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile açık hücreli köpük metal (Incofoam) (Poserin ve ark. 2004)

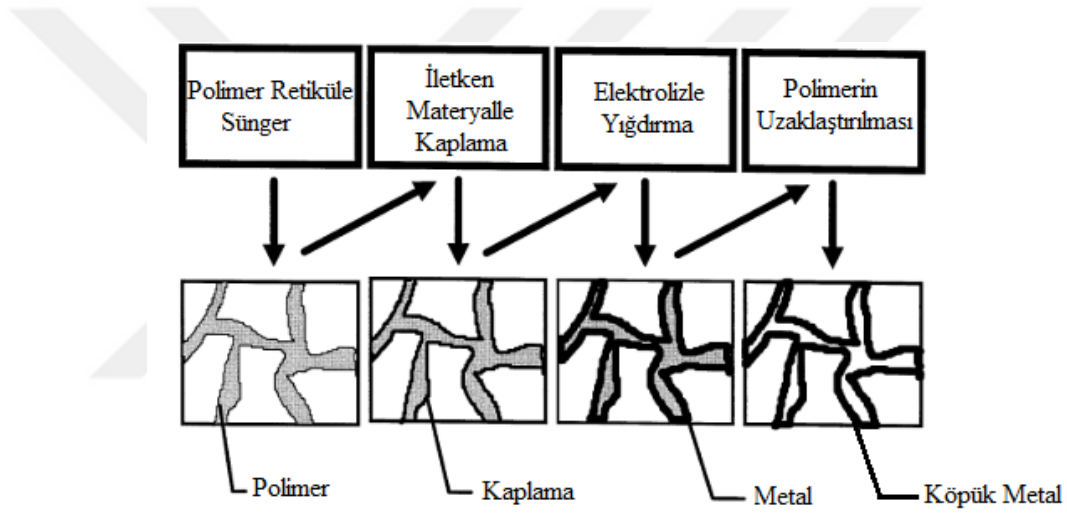
2.6.4. Elektro-kimyasal biriktirme ile açık hücreli köpük metal üretimi

Teknik, elektrolit bir çözelti içindeki metal iyonların, açık hücreli bir polimerik köpüğün üzerine kutuplanma yapılarak yığılması sonucunda gerçekleşir. Bu işlem polimer köpüklerle hassas döküm tekniğiyle benzerlik gösterir. Yöntem polimer köpüğün çöktürülecek metalle yer değiştirmesine esas alır.

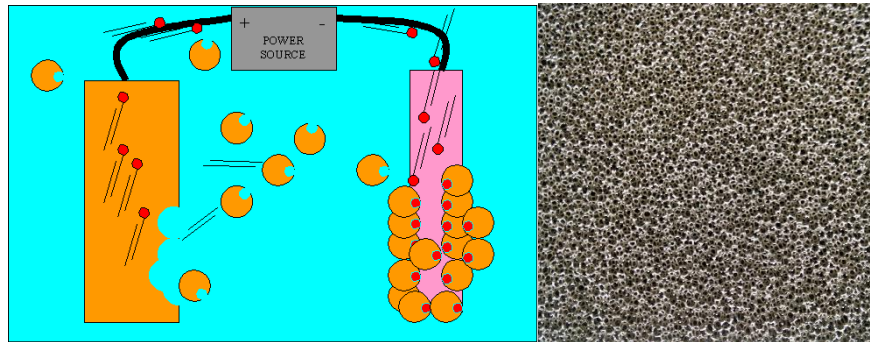
Polimer köpük üzerine elektro-çökeltme işlemi yapılabilmesi için köpük yüzeyi iletken olmalıdır. İnce iletken bir tabaka elde etmek için köpük grafit veya karbon karası içeren bulamaca daldırılır. İletkenliği sağlamak için diğer bir yöntem bulamacın polimerin üzerine püskürtülmesidir. Bu şekilde köpük elektroliz ile kaplanacak metalin katotu haline getirilmiş olur. Elektroliz işlemi başlatılır ve istenilen metal katota yığılma yapar. Son işlem olarak polimer nihai üründen uzaklaştırılır.

Bu yöntemle 2,5 ila 30 hücre / cm (yaklaşık 6-70 ppi) aralığındaki çeşitli gözenek tiplerinde köpükler üretilebilir. Hücre boyutu 3.2 ila 0.5 mm, yüzey alanları 500 ila 7500 m² / m³ arasında değişmektedir.

Tercih edilen metaller nikel veya nikel-krom alaşımlarıdır, ancak bakır köpükler de yapılabilir. Nikel-krom gibi çift metalin kaplanması söz konusuysa elektroliz sonrası ısıtılma işlemine tabi tutulur. Böylece iki metalin termal olarak indüklenmesi ve inter difüzyonuyla bir alaşım oluşturması sağlanır. Bu yöntemle üretilen köpükler (Dunlop, GB), Celmet (Sumitomo Electric, Japonya) ve Recemat (SEAC, Hollanda) adı altında ticari olarak sunulmaktadır.



Şekil 2.26. Elektro-kimyasal biriktirme prosesi ile köpük metal üretimi (Banhart 2001)



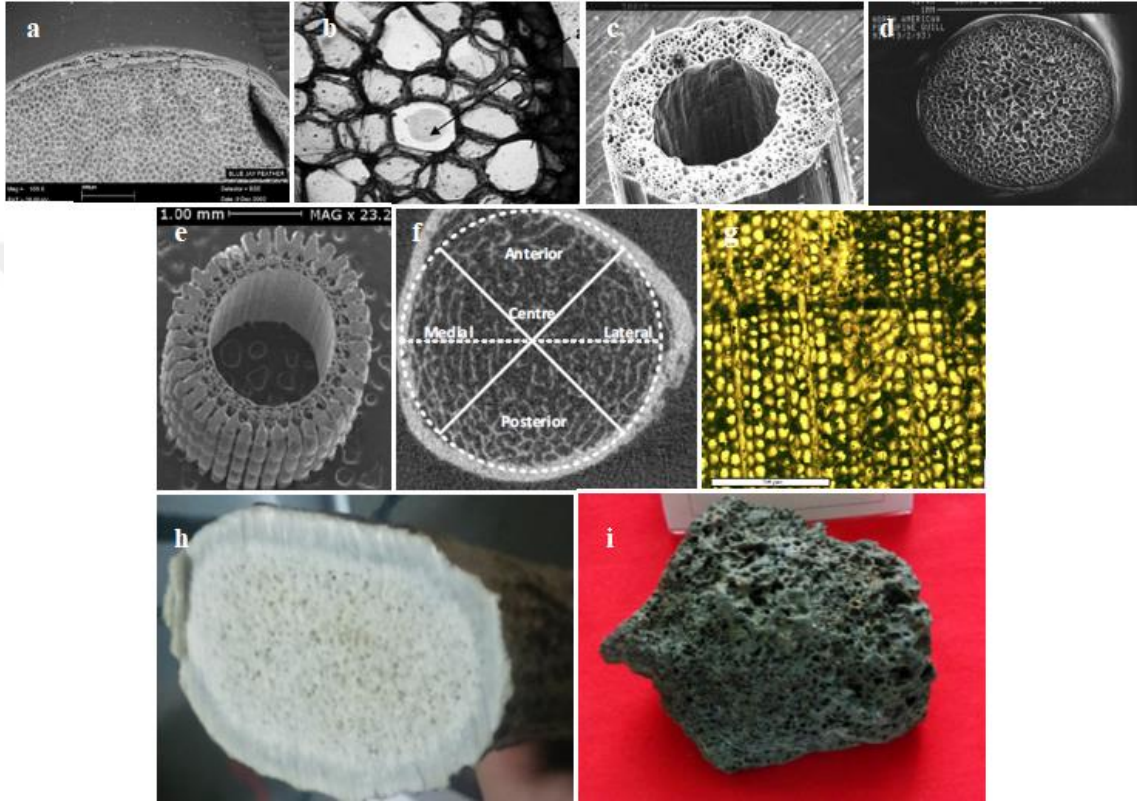
Şekil 2.27. Solda elektoliz ile kaplama yönteminin illüstrasyonu; sağ da Elektro-Kimyasal biriktirme ile yapılmış Recemat numunesi

2.7. Doğada Karşımıza Çıkan Köpük Yapılar

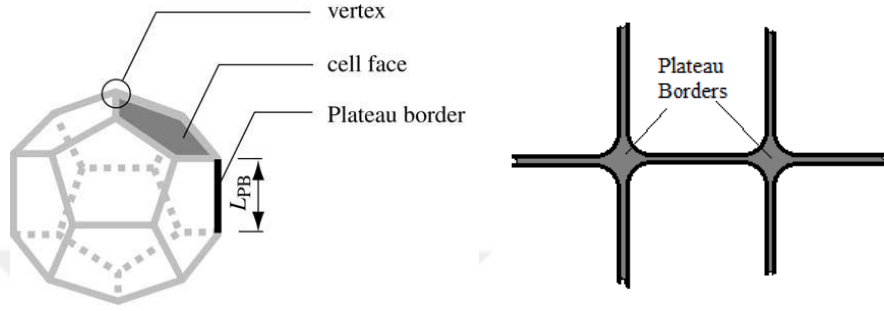
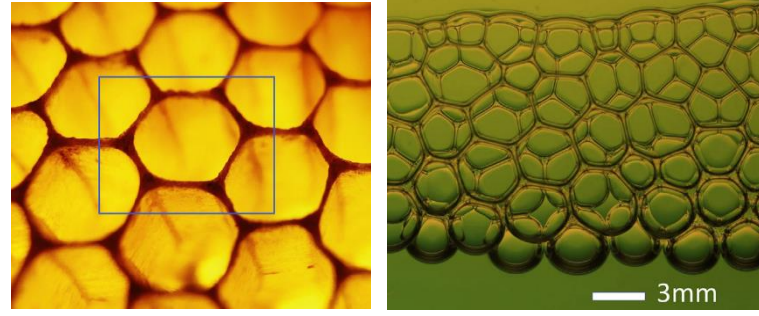
İnsanoğlunun doğayı ve yabani yaşamda gördüklerini taklit etmesinin teknolojinin ilerlemesinde büyük bir etkisi olmuştur. Bunun örneklerinden biri olan köpük metaller; kemik, boynuz gibi biyolojik yapıların incelenmesi ile ortaya çıkmış ve hafiflik ve dayanımlarıyla ilgi odağı olmuşlardır. Bu taklit yapılar enerji absorpsiyonu ve ses yalıtımı gibi sebeplerle, çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Köpük metalin kullanılmaya başlanması beraberinde mükemmel geometri arayışını doğurmuştur. Bu amaç doğrultusunda birçok biyolojik ve doğal oluşumlar incelenmiştir. Ayrıca, Voronoi algoritması gibi matematiksel yaklaşımlar da köpük metal olarak düşünülerek gözlemlere tâbi tutulmuşlardır.

Köpük yapılar çoğunlukla hafiflik ve dayanım avantajları sebebiyle biyolojik yapılarda sıklıkla rastlanmaktadır. Yüzeysel olarak değinilecek olursa; ağaç gövde kesiti, yaprak ve deri hücreleri, bitki sapları, kuş tüyü sapı, kirpi diken, denizkestanesi diken, trabeküler kemik, boynuz, deniz süngeri, bal petekleri, su sümbülü gibi havalandırma ve sünger parankimasına sahip bitki kökleri, sapları ve yaprakları örnek verilebilir (Şekil 2.26). Bunlarla birlikte, biyolojik olmayıp doğal yapılarda aşınmalar ve dış kuvvetlere karşı gösterdikleri etki tepki prensibi sebebiyle oluşan yapılar da mevcuttur. Ponza ve scoria gibi volkanik kayalar ve üzerinde geniş çalışmalar bulunan sabun köpüğü bu yapılara örnek olarak gösterilebilir. Sabun köpüğü geometrisinden bahsedilecek olursa; sabun köpüğü toplam enerjisini minimize etmek amacıyla geometrisini kelvin problemi tabiri ile literatürde yer etmiş uygun geometriyi elde etmeye çalıştığı düşünülmektedir. Bu geometri dış yüzey alanının minimuma indirildiği başka bir deyişle birim hacmini minimum hacmi oluşturmak üzere minimize etmeye çalıştığı söylenebilir (Bitsche ve ark. 2005). Kelvin problemi çerçevesinde pentagonal dodecahedron (düzgün 12 tane beşgen), tetrakaidecahedron (kelvin cell: 8 altıgen, 4 kare yüz), Weaire–Phelan (12 adet, beşgen, 2 tane altıgen) ve Wigner–Seitz (Voronoi cell) gibi matematiksel yaklaşımlarda bulunulmuştur (Ross ve Prest 1986, Zhu ve ark. 1997, Hilgenfeldt 2002, Bitsche ve ark. 2005, Siegkas ve ark. 2014). Doğal oluşmuş yapılara baktığımızda, bu tarz geometrilere ulaşabilmek için hücreler arasındaki açıkta kalan açığı dolduran plateau borders (Şekil 3) denen bölgeler mevcuttur (Zhang ve ark. 2016). Bu mükemmel geometriye ulaşmaya

çalışarak kendini geliştiren yapılar hücre çeperleri gibi organik yapılarda da gözlemlenmektedir. Gözenekli olan trabeküler kemik gözeneklerini gelen kuvvetlere göre optimal geometriye yaklaşacak şekilde geliştirmektedir (Frame ve ark. 2018). Canlı organizmalar bu anlamda çeşitli sebeplere karşı olarak optimal geometriye ulaşmaya çalışmaktadırlar.

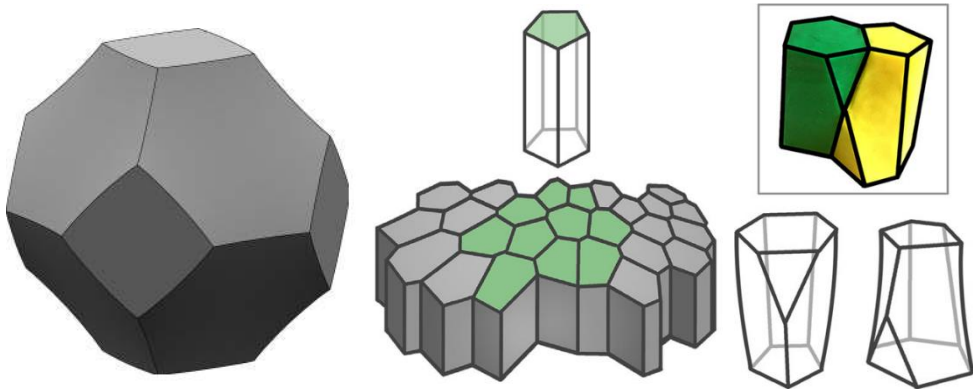


Şekil 2.28. Doğadaki gözenekli yapılara örnekler: a, kuş tüğü sapı (Gibson 2005); b, havalandırma parankimasına sahip olan su sümbülüne (*eichornia crassipes*) ait kesit (Lopes ve ark. 2009); c, çimen sapı (Gibson 2005); d, kirpi dikenini (Gibson 2005); e, deniz kestanesi iğnesi (Tsafnat ve ark. 2012); f, distal tibia kemiğinin tipik bir HR-pQCT taramasından bir kesit (Du ve ark. 2019); g, *Taxodioxydon heichengziense* fosil ağacından kesit (Ding ve ark. 2016); h, boynuz kesiti; i, pomza taşı (Özşahin 2019)



Şekil 2.29. Doğadaki gözenekli yapılarda hücreler arasındaki sınır dolgu bölgesi: plateau borders sırasıyla; hegzagonal doğal bal peteği (Zhang ve ark. 2016); sabun köpüğü alt ıslak ve küresel, üst taraf kısmi kuru ve polyhedral (Höhler ve Weaire 2019); pentagonal dodecahedron yapıdaki bir köpük hücresi çizimi (Gergely ve Clyne 2004); el çizimi sınır dolgu bölgesi gösterimi

Organik yapılardaki bu ortama göre şekil değiştirebilen yapılar mühendislik alanına; üretilecek bir parçaya gelen kuvvetler tahmin edilip malzeme özellikleriyle hesaplanıp en uygun geometriyi kullanmak biçiminde sirayet etmiştir. Bu uygun geometri konusunda insanoğlu doğadaki benzerlerinden örnekler almıştır.



Şekil 2.30. Geometrik şekiller sırasıyla: Kelvin hücresi (Hilgenfeldt 2002); beşgen ve altıgen prizmatik yapı (Gómez-Gálvez ve ark. 2018); scutoid geometriye sahip hücresel yapı (Gómez-Gálvez ve ark. 2018)

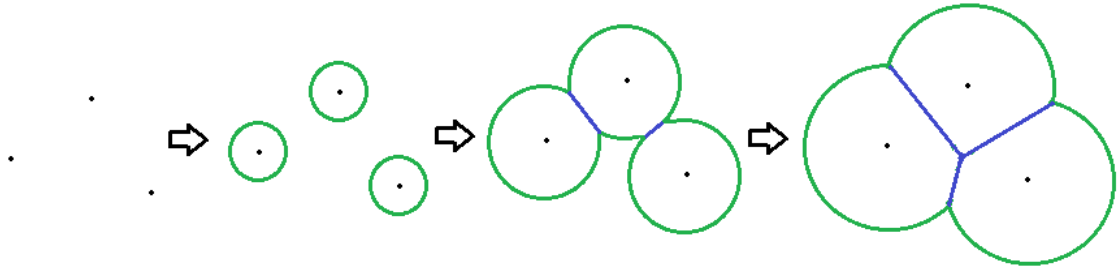
Bal peteği, sabun köpüğü gibi araştırmaların yoğun ilgi odağı olan yapılardan biride deri hücreleridir. Esnekliği ve dayanımları sayesinde deri hücresinin geometrisi gizemini korumaktaydı. Son yapılan çalışmalarda epidermis yapısındaki beşgen ve altıgen görünümlerin aslında scutoid şekline sahip olduğu görülmüştür (şekil 2.28).

2.8. Matematiksel Yaklaşımlar

Voronoi diyagramlarının ilk karşımıza çıkışı, 1644'te René Descartes tarafından düşünümesi ve Dirichlet (1850) tarafından pozitif kuadratik formları araştırırken kullanılmasıyla olmuştur. Voronoi diyagramının özellikle kayda değer bir kullanımı, Londra'daki 1854 kolera salgınının doktoru olan John Snow, Broad Street'teki belirli bir (virüslü) su pompasını güçlü bir korelasyon ile çok yakın olarak tespit ettiği analizdi. Voronoi diyagramlarının, Voronoi (1907) tarafından incelenmesiyle uyarlanan boyut sayısı genişletilmiş ve Voronoi bu sayede konuya kendi ismiyle anılacak geliştirmelerde bulunmuştur. Voronoi diyagramları günümüze kadar bilgisayar grafikleri, epidemiyoloji, jeofizik ve meteoroloji gibi alanlarda kullanılmış ve yaygın uygulama alanı bulmuştur. (Boicea ve ark. 2010).

Voronoi diyagramları, 1908'de genel n-boyutlu konusu üzerinde alışan Rus matematikçi Georgy Fedosievych Voronoy'dan sonra adlandırılmıştır. Mekansal olarak dağıtılmış verileri analiz etmek için jeofizik ve meteorolojide kullanılan Voronoi diyagramlarına (yağış ölçümleri gibi) Amerikalı meteorolog Alfred H. Thiessen'den sonra Thiessen poligonları da denmiştir. Yoğun madde fiziğinde, bu tür mozaikler aynı zamanda Wigner-Seitz birim hücreleri olarak da bilinir. Momenta'nın karşılıklı kafesinin Voronoi mozaiklerine Brillouin bölgeleri denir. Lie gruplarındaki genel kafesler için, hücelere basitçe temel bölgeler denir. Genel metrik boşluklar söz konusu olduğunda, hücelere genellikle metrik temel çokgenler denir. Bu kavram için diğer eşdeğer veya buna özel durumlar: Voronoi polyhedra, Voronoi okgenleri, etki alanı, Voronoi ayrışımı, Voronoi mozaikleme, Dirichlet mozaikleme, power diagram, Laguerre-Voronoi deseni ve Poisson-Voronoi deseni olarak isimlendirilmektedir (Aurenhammer 1991).

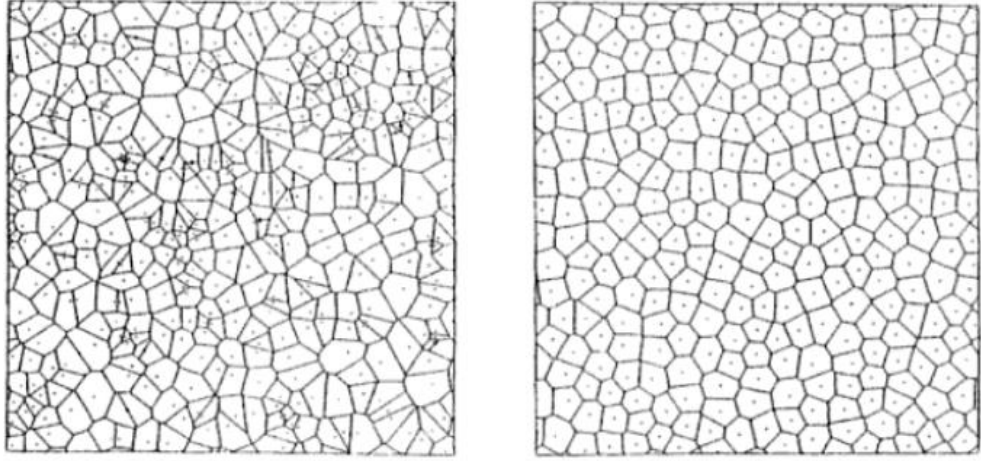
Genel itibariyle Voronoi deseni mitoz bölünmeye çok benzer bir şekilde gerçekleşir. Farklı olarak Voronoi desenlerinde noktalar hücre çekirdeklerin yeri daha önceden belirlidir. Bu noktaların çevresinde eş olarak büyüyen daireler kesiştiklerinde düz bir çizgi halini alır. Tüm noktaların kesiştiğinde ortaya çokgenlerden oluşan bir desen ortaya çıkar bu noktaları eğer uzay içerisinde 3 boyutlu olarak dağıtırsak ortaya üç boyutlu birbirine belirli bir bağ bulunan çok yüzlüler elde edilecektir. Bu yapı köpük metalin bilgisayar ortamında tasarlanmasında ve analizlenmesinde öncü olabilir. Bölüm 2.6.2.3’ te bahsedilen köpürtücü ajan kullanılmış durumlarda bu metal yapıya dağıtılmış köpüren ajan tanelerinin küresel bir şekilde düzgün bir sıcaklık kontrolü ile köpürme sıcaklığına aynı anda gelen bu noktalar aynı zamanda benzer hızlarda şişerek birbirlerinin cıdarlarında son bulacağı şekilde oluşturacağı yapıya çok benzemektedir. Ayrıca bu kuru sabun köpüğünün aldığı şekli tahmin etmek için kullanıldığı durumlar olmuştur.



Şekil 2.31. En basit gösterimiyle eş büyümeyle cıdar düzleşmesinin gösterildiği voronoi deseni ve çokgenin kenarlarının oluşumu

Voronoi noktalarını random olarak dağıtmak yerine belirli bir uzaklık ilişkisi içerisinde kısıtlamalı bir şekilde ele aldığımızda daha düzenli bir yapı elde ederiz (Gibson ve Ashby 1999).

Noktaların belirli bir şekilde dağıtılması ve şekillendirilmesi için Sandia Ulusal Laboratuvarlarında geliştirilmiş Moleküler Dinamik Similatörü olan açık kaynaklı LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) programını kullanmak gerçekçi bir tasarım için uygun yöntemlerden biri olabilir.



Şekil 2.32. Solda rastgele dağıtılmış noktalar; sağda belirli bir ilişki içerisinde dağıtılmış noktalar ile ortaya çıkan voronoi deseni (Gibson ve Ashby 1999).

Voronoi desen oluşumlarına değişik yaklaşımlar mevcuttur. Genel itibari ile bilgisayar ortamında modellenmek istenen köpük metal için bunlardan en uygunu seçilmesi veya uygun denklemlerle geliştirilmesi gerekir.

Gerçek köpük/tane yapılarının ilgili özelliklerini yakalamak için önerilen birçok geometrik model vardır. Bu modellerin çoğu, asgari özgül yüzeyli bir polihedronun Kelvin sorunu ile ilgili olarak küpten daha karmaşık geometrilere (örneğin, tetradecahedral) değişen şekilleriyle eşit gözenek hacmi varsaymaktadır. Bununla birlikte, köpüklerin deneysel gözlemleri, çok kristalli metallerde gözlenenlere benzer şekilde gözenek boyutlarının dağılımını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, tek tip bir polihedronun çoğaltılmasıyla elde edilen yapılar, genellikle gerçek köpüklerde bulunmayan ve varsa farklı bir yapıya sahip olan anizotropi sergiler. Köpük üretim yöntemiyle ilişkili büyüme süreci istatistiksel bir yapıya sahip olduğundan, Poisson-Voronoi nokta bazlı mozaikleme (PVT) algoritması, temsili hücresel yapıları elde etmek için sıklıkla kullanılır. Bununla birlikte, gerçek köpüklerin geometrik parametrelerinin PVT tarafından elde edilenlerden farklı olduğu bulunmuştur. Spesifik olarak, PVT için hücre başına ortalama yüz sayısı, gerçek köpüklerden daha yüksektir (14'ten az). PVT'nin bir başka dezavantajı, hücre boyutlarının istatistiksel olarak sabit değişkenliği ile yapılar üretmesidir. Henüz analitik olarak hesaplanmayan PVT hücre hacmi dağılımı, 0,424'lük bir sapma ile log-normal bir dağılım izleyen sayısal montaj yoluyla bulunur. PVT'nin örneğin tohumların tesadüfi olmayan bir şekilde yerleştirilmesi veya tohumlamadan önce

tohumların yeniden düzenlenmesi gibi bazı modifikasyonları mevcuttur. Ne yazık ki, bu yöntemler kullanılarak hücre büyüklüğünün son dağılımını şekillendirme yeteneği çok sınırlıdır. Gerçek köpüklerin geometrisine daha iyi bir yaklaşım, önceden belirlenmiş boyut dağılımına sahip küreler kümesi üzerinde mozaiklemelerin yapıldığı Laguerre-Voronoi algoritmasını sunar. Küreler yoğun bir şekilde paklendiğinden, Laguerre-Voronoi deseni (LVT) tarafından elde edilen hücreler kürenin boyut dağılımına çok benzer. Bununla birlikte, randomize mozaikleme ile elde edilen yapıların doğası gereği istatistiksel olduğudur. Bu da aynı modelleme koşullarında elde edilen her iki yapının da geometrilerinde yerel olarak farklı olduğu anlamına gelir (Wejrzanowski ve ark. 2013).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması dahilinde açık hücreli köpük metal üretim prosesleri denenerek hangi yöntemin daha kolay uygulanabilir olduğu irdelenecektir. Parametrelerinin az olduğu, pratikte kolay ve pahalı ekipmana üretim sırasında ihtiyaç duyulmayan sıvı hal prosesleri bu çalışmanın inceleme konusu olacaktır.

3.1. Malzeme Seçimi

Mühendislik alanında çelikten sonra en çok kullanılan malzemelerden biri alüminyumdur. Alüminyum, silisyum ve oksijenden sonra doğada en fazla bulunan üçüncü elementtir. +3 değerlikli periyodik tabloda 3A grubuna mensup 13 proton numarasına sahip 26,89 g/mol atom ağırlığında bir zayıf metaldir. Alüminyumun 20° C deki yoğunluğu 2,7 g/cm³'tür. Erime sıcaklığı 659,8° C, kaynama noktası 2450° C'dir. Genel itibariyle üretiminde boksit cevheri kullanılır. Boksit ismi alüminyum hidratlarından (Al₂O₃.nH₂O) bahsederken kullanılan gene bir tanımdır. İçerik olarak boksit kayacı %58 Al₂O₃, %30 H₂O, %5 SiO₂, %5 Fe₂O₃ ve %2 TiO₂ ihtiva eden yabancı minerallerden oluşmuştur. Alüminyum geri dönüşüm kolaylığı sayesinde cevherden (birincil) ve hurdadan (ikincil) olarak iki kaynaktan üretimi gerçekleştirilmektedir. Yılda cevherden yaklaşık olarak yirmi beş milyon ton üretilmekte; hurdadan ise geri kazanım ise beş milyon ton civarını bulmaktadır. Bakır (14,7 milyon ton), kurşun (6 milyon ton), çinko (8,6 milyon ton) ve kalay gibi metallerin üretiminden ve ihtiyacından fazladır (Akbaba 2016).

Alüminyum diğer metaller ile güçlü mukavim alaşımlar oluşturabilir. Defalarca kullanılabilir, kolay şekil alabilir, yüksek korozyon dirençlerine sahiptir, kolayca dövülebilir, sertlik oranı sayesinde makinalarda işlenebilir. Manyetik değildir, elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliği yüksektir. Işığı ve ısıyı yansıtma özelliği iyidir ve zehirleyici değildir. Genel itibari olarak çeliğin (7,83 g/cm³) muadili olarak görülen alüminyum (2,7 g/cm³) çeliğin üçte biri kadar hafif sayılabilir. Dayanım olarak ise bazı alüminyum alaşımları 500MPa geçmektedir. (Eker 2008, Akbaba 2016).

Alüminyumun uzun süredir kullanılan bir malzeme olması, mekanik davranışlarının ve karakterinin neredeyse her yönüyle bilinmesi ve bugüne kadar köpük metal üzerine yapılan çalışmalarda alüminyumun köpük üretimine özellikle elverişli olduğunu keşfedilmesinden kaynaklı çalışmamızda metal olarak alüminyum seçilmiştir (Banhart ve Weaire 2002).

Dayanımı ve ulaşılabilirliği sebebiyle üretim için Alüminyum 6063 serisi alaşım kullanılacaktır. Nüfuziyet konusunda sıkıntı çıkması durumunda akışkanlığını artırmak için silisyum değeri fazla Etial-160 döküm alaşımına geçiş yapılacaktır.

Çizelge 3.1. Etial-160 alüminyum alaşımının kimyasal içeriği

	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn
Etial-160	1	7,50-9,00	3,00-4,00	0,5	0,3	1	0,2	0,2	0,1	0,1

Çizelge 3.2. 6063 Alüminyum Alaşımının kimyasal içeriği

	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Zi	Diğer
Al-6063	0,35	0,2-0,6	0,1	0,1	0,45-0,9	0,1	0,1	0,15	0,15

3.1.1. Elementlerin alüminyum alaşımındaki etkileri

Si: Silisyumun etkisi alaşıma akışkanlık kazandırmasıdır. Eğer silisyum, sodyum, Stronsiyum, fosfor gibi elementlerle birleşirse iğnesel kırılma yapısından küresel tipe yakın küçük tanelere döner. Silisyum içeriğinin %18 den sonrası akışkanlığı bozmaktadır.

Fe: Demir elementi iğneli doku şeklinde kristalleşir ve mekanik özellikleri düşürür. Basınçlı döküm yapılırsa kalıba yapışma durumunu azaltır. Demir $FeMnAl_6$, $\alpha AlFeSi$ ve $FeAl_3$ gibi arametal fazları oluşturur. Yüksek sıcaklıklarda bu fazlar dayanımı artırır fakat mikro yapı bu sebeple kırılma hale gelir. % 1,1 üzeri demir içeriği iğnesel Al_5FeSi - β fazı oluşumuna neden olur ve bu faz kırılma eğilimine yatkın olduğundan işleme sırasında sorunlara neden olur. Tüm bu sebeplerden demir içeriğinin % 0,8 - % 1 arasında olması istenmektedir.

Cu: Bakır işlemeyi kolaylaştırır, sertliği ve mekanik özellikleri güçlendirir. Bakır dezavantajlarından biri korozyona karşı direnci düşürmesidir, Ayrıca sıcak yırtılma oluşumuna sebep olabilir ve interdentritik çekintiyi artırabilir. Al₂Cu oluşumu akma değerlerine ve çökeltme sertleşmesine olumlu yönde etkiler. % 4 ve daha fazla Cu oranları korozyona olan dayanımı logaritmik olarak düşürmektedir.

Mn: Az bir etki olsa da dökülebilirliği artırır. Fe elementi gibi kalıba yapışmayı azaltır. Yüksek konsantrasyonda olan Mangan elementi demir, silisyum ve alüminyumla birleşerek ergime sıcaklığı yüksek metaller arasında bileşik (intermetalik) oluşturarak dibe çökmelere sebebiyet verir.

Mg: Genel itibari ile Magnezyum elementi ısıtılma işlemi tabii olmuş alaşımlarda, nikel ve bakır ihtiva eden alüminyum-silisyum alaşımında sertlik ve dayanım için eklenebilir. Mg₂Si eriyik içerisinde çökeltme sertleşmesine katkı sağlar. Bu durum mukavemetin iyileşmesine olanak tanır. Mg'nin alüminyum-silisyum alaşımları içerisinde kullanılan ideal oranı % 0,05 - 0,45'tir.

Zn: Çinko akma noktasını etkileyen bir empüredir. Zn eriyik içerisinde % 0,50'den daha fazla bulunursa korozyon direncini düşürür. Çinkonun alaşıma eklenmesinin bireysel olarak ölçülebilen bir etkisi tam olarak saptanmamıştır.

Ni: Yüksek sıcaklık dayanımlarını bakır ile birlikte artırır. Nikel alaşımında termal genişleme katsayısını düşürür. Korozyona karşı dayanımını güçlendirir ve parlaklığın kalıcı olmasını sağlar.

Pb: % 0,1'den fazla kurşun konsantrasyonları işlenebilirliği artırmak için kullanılır.

Co: Alüminyum alaşımlarında sıklıkla rastlanan bir malzeme değildir. Alüminyum-silisyum alaşımında bulunan kobalt alüminyum-demir-silisyum fazını yuvarlaklığı daha iyi olan alüminyum-kobalt-demir fazına çevirir, kobalt alaşımında dayanımı ve sünekliği arttırmaktadır.

Na: Ötektik sıcaklığı 12°C düşürebilmektedir. Bu özelliğiyle hızlı soğuma sayesinde hızlı çekirdekleşme sağlar ve bu da mikro yapıyı ince taneli haline gelmesine yardım eder. Sodyumun alüminyum-silisyum alaşımının ötektik sınırını değiştirmesi önemli bir özelliğidir. Na ergimiş alüminyumda hızlı bir şekilde kaybolur. Fosforun bulunmadığı bileşimlerde % 0,01 oranlarında bulunması etkilidir.

Sr: Stronsiyum alüminyum-silisyum ötektikliğini modifiye eder. Etkin olduğu seviyeler ağırlıkça çok düşük kullanıldığı durumlardır. Genelde % 0,008 - %0,04 oranları arasında kullanılır. Yüksek katılma hızlarında düşük konsantrasyonları etkilidir. Yüksek miktarda bulunması dökümde porozitelere sebep olur.

Ca: Kalsiyum, 30 ppm'den az seviyelerde olmadır; yüksek seviyeleri ergimiş alüminyum içerisinde hidrojen çözünürlüğünü yükseltir. Kalsiyum tane yapısını modifiye edici bir elementtir.

Sb: Antimon alüminyum-silisyum alaşımını eğer % 0,10'dan daha fazla ilave edilirse ötektikliğe gelişmesine yardım eder. Fakat antimon stronsiyum ve sodyum ile reaksiyona girebilir. Bu durum intermetaliklerin oluşmasına sebep olur ve yapı olumsuz yönde etkilenir.

Ti: Bor ve titanyum alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak görev yapmaktadır (Yapıcı 2012).

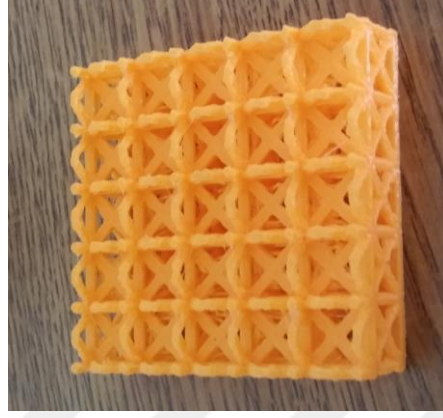
3.2. Seçilen Üretim Yöntemleri

Pahalı ekipmanlara ve çok fazla karmaşık proseslere ihtiyaç duyulmaması sebebiyle üretim kolaylığı düşünülerek irdelenecek üretim yöntemleri olarak sıvı hal prosesleri seçilmiştir.

3.2.1. Polimer retiküle sünger model ile hassas döküm

Bu yöntem bir çeşit hassas döküm yöntemidir. Bölüm 2.6.1.1 de verilen döküm yöntemlerinden replikalama yolu ile üretim olarak verilmiştir. Model belirli bir seramik

çamuruna hapsedilecektir. Seramik çamurun yüzde altmışı sudur. İçerik olarak seramik çamurunda %2,5 CaO, %2,5 MgO, %2,5 Na₂, %12,5 Al₂O₃ ve %80 oranında SiO₂ bulunmaktadır.



Şekil 3.1. 3B yazıcıdan PLA malzemesi ile çıkarılmış bir çeşit latis blok

Şekil 3.1’de verilen PLA latis blok model olarak düşünülmüştür. Fakat 3B yazıcı çıktısı olan bu veya benzer parçaların üretim yavaşlığı sebebiyle gerçekçi bir yaklaşım olmayacakları için vaz geçilmiştir. Bunun yerine model olarak retiküle poliüretan sünger kullanılmıştır. Süngerin gözenek açıklığı 7-8 ppi (inç başına düşen gözenek sayısı) olarak seçilmiştir.



Şekil 3.2. 7-8 ppi poliüretan numuneleri: Soldaki ince kesit; sağdaki blok halde

Blok haldeki retiküle poliüretan köpükten 160x70x40mm bir parça kesilmiştir. Kesilen parça seramik çamur içerisine alınmıştır. Üzerine örtecek seviyedeki çamur içerisinde gömülü olan köpük hava kalmayacak şekilde ezilir ve tüm gözeneklerin çamurun nüfuz ettiğinden emin olunur.



Şekil 3.3. Poliüretan köpüğün seramik çamur içerisine batırılması ve ezilerek havasının alındığı hali

Kurumaya bırakılan seramik çamur belirli bir kıvam aldıktan sonra kurutma fırınında kurutulmuştur. Çatlamayı önlemek için yüksek değerlere çıkılmamış 35-45°C sıcaklıkta hafif hava verilerek kurutuma işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 3.4. Kullanılan ekipmanlar: Soldaki kalıbın kurutulmasında kullanılan kurutma fırını; Sağdaki Protherm'in PLF 130/9 modelli 3600 watt 1300°C çıkabilen fırını

Kuruyan numune 6 tarafından da yontularak polimer modelin uçlarının çıkarılması sağlanmıştır. Bu sayede kalıp ısıtıldığında poliüretan köpüğün bu açıklardan uzaklaşması sağlanacaktır. Aynı zamanda döküm sırasında bu açılan gözeneklerden içeri ergimiş metalin sızması beklenmektedir.



Şekil 3.5. Kurumuş kalıptan polimer köpüğün uçlarının çıkarılması

Tüm yüzeyleri açılan kalıp 70x40x40mm olacak şekilde farklı sıcaklıklarda pişirilmek üzere üç parçaya bölünmüştür. Seramik üzerine yapılan çalışmalarda fırınlanma ısıları; yüksek ısı (1300°C-1370°C), orta ısı (1100°C-1260°C), düşük ısı (850°C-1100°C), ultra-düşük ısı (650°C-850°C) olarak sınıflandırılmıştır (Gündoğdu 2014). İlk numune çok düşük sıcaklıkta pişirilmiştir ve Numune 400°C'den sonra dışarıda (24°C) soğumaya bırakılmıştır. İkinci numuneye çekme oranını görmek üzere 40 mm bir çentik atılarak düşük sıcaklıklarda pişirilmiş ve fırında soğuması beklenmiştir. Numunenin 38°C gelmesi 12 saat 38 dakika sürmüştür.



Şekil 3.6. Çentik atılmış pişirilmeyi bekleyen numune

Poliüretan kalıptan uzaklaştırıldıktan sonra geriye kalan boşluğa alüminyum metal dökülecektir. Kalıbın metalden uzaklaştırılması için ultrasonik kırıcı veya temizleme cihazıyla seramik kalıp malzemesinin uzaklaştırılması hedeflenmektedir.

3.2.2. Polimer köpüğün boşluk tutucu olarak kullanılması

Bu yöntemde polimer bir köpük boşluk tutucu olarak kullanılarak bir kalıba yerleştirilecek ve etrafına döküm yapılacaktır. Bu doğrultuda poliüretan retiküle bir sünger belirli boyutlarda kesilmiş ve cidarları kaplanacak şekilde seramik çamura bulanmıştır. Amaç burada süngerden arta kalan boşluklara alüminyumun girmesi ve süngerin negatif kopyasının ürün olarak kullanılmasıdır.

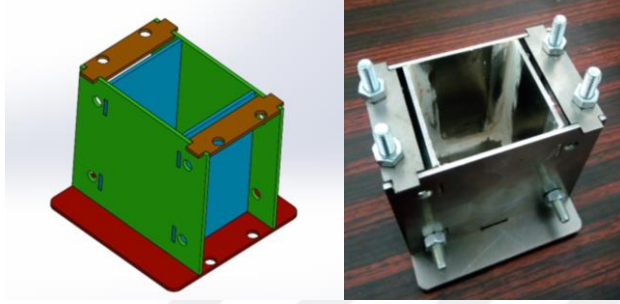


Şekil 3.7. Çeşitli cidar kalınlıklarında çamura bulanıp kurutulmuş numunelerin bir kısmı

Bu yöntemde cidar kalınlıkları ne kadar fazla olursa ortaya çıkacak alüminyum köpüğün göreceli yoğunluğu o kadar düşük ve gözeneklilik yapısı da fazla olacaktır. Buradaki sıkıntı alüminyumun dar gözeneklere sızma yapmama olasılığıdır.

Numuneler fırına alınmadan önce içerideki poliüretan süngerin uzaklaşabilmesi için uçlarından zımparalanarak seramik dışına bir miktar polimerin çıkması sağlanmıştır. Seramik yapı fırına alındığında 100°C civarında beklenecek suyun tamamıyla uzaklaşması sağlanmıştır. Yine belli sıcaklık noktalarında bekleme daha önce seramik üzerine yapılmış çalışmalarda dilatometre eğrilerinden yararlanılarak yapılmıştır (Coşkun ve ark. 2016). Seramiklerin pişirilme işlemi düşük sıcaklıklarda yapılmıştır.

Hazırlanan numunelerin içerisinde oturabileceği, dökümün yapılabilmesi ve rahatça parçanın çıkarılabilmesi için bozulup birleştirilebilen bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıbın sızdırmazlığını sağlamak için birleşim noktalarına alçı çekilmiştir.



Şekil 3.8. Döküm için hazırlanan ayrılıp birleşebilen kalıp

Döküm şekli olarak birkaç yöntem kullanılmıştır. İlk yöntem kalıp içerisine yerleştirilen seramik köpüğün üzerine yeterli miktar alüminyum blok konulmuş ve ergimeyle içine sızması beklenmiştir. İkinci yöntem olarak ısıl şoktan etkilenmemesi için kalıpla birlikte seramik ısıtılmış ve ergimiş metal üzerine dökülmüştür. Diğer bir yöntemde ergimiş metalin içine bir telle bağlanmış seramik köpük daldırılmaya çalışılmıştır.

3.2.3. Küresel yer tutan eleman üzerine döküm

Bu yöntem bir önceki yöntemin neredeyse aynısıdır. Tek farkları boşluk tutucular yerine bu yöntemde seramik bilyeler kullanılmaktadır. Bilyelerden arta kalan geometri oluşturulmak istenilen açık hücreli köpük metalin kendisi olacaktır. Bilyeler ultrasonik kırıcı ile kırılabilirse açık hücreli köpük metal elde edilecektir. Eğer bilyelerin pişirilme sıcaklıklarından dolayı cihaz kullanımını işe yaramazsa sintatik köpük metal elde edilmiş olacaktır. Bu yöntem için birbirinden farklı içi boş ve dolu bilyeler kullanılacaktır. İçi boş bilyeler için strafor küre üzerine seramik çamuru kaplanarak pişirilecektir.



Şekil 3.9. Kullanılan küresel yer tutan elemanlar sırasıyla; poligonol strafor topları, strafordan tamamen küresel kar topları ve çamura kaplanmış halleri, seramik toplar

Bilyelerin belirli bir çap üstündeki değerleri ayrılarak prosten çıkarılmıştır. Bunun amacı absürt döküm kusuru sayılabilecek büyük boşlukların önüne geçmektir. Bilyelerin ağırlıkları hassas bir elektronik tartıyla yapılmaktadır. Tartının hata payı artı eksi 0,01 gramdır. Dara ölçümlenmiş ve brüt ağırlıktan çıkarılarak bilyelerin ağırlığı saptanmıştır. Döküme gidecek bilyelerin hacimleri beher ve su aracılığıyla ölçümlenmiştir. Bu ölçüm sonucunda kalıba eklenmesi gereken alüminyum miktarı elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Dökümde kullanılacak içi dolu seramik yer tutucu bilyelerin hacim hesabının yapılması

Yuvarlak değerler kullanılacak olursa dara 64 gram gelmiş ve bürüt ağırlık 164 gram olarak ede edilmiştir. Hacim olarak 50 cm^3 ayarlama yapılmış ve bu ölçümler sonucunda $2,0046 \text{ gr/cm}^3$ gibi bir yoğunluk değeri saptanmıştır. Konulan $5 \times 5 \text{ cm}^2$ kalıpta bilya yüksekliği 2,5 cm gelmiştir. Tüm hesaplamalar sonucunda döküme girecek alüminyum 33,75 gram olarak tespit edilmiştir.

Döküm iki şekilde gerçekleşmiştir. Birinci yöntemde kürelerin üzerine bırakılan alüminyum külçesinin üzerine 5kg'lık bir ağırlık konup ve konmayıp yer çekimi etkisiyle

sızma yapması beklenmiştir. İkinci yöntem olarak kalıp ile birlikte ısıtılan topların üzerine ergimiş metal dökülmek suretiyle gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Fiber yer tutan elemanlar üzerine döküm

Bu yöntemde yer tutan eleman yerine cam elyaf ve karbon elyaf iplikleri kullanılmıştır. Çelik örgü tel U şekline getirilerek bir çeşit kafes yapılmış ve fiber iplikler sırayla örgüler arasından geçirilerek bir düzen elde edilmiştir. Bu yapı ergimiş metala daldırılacak veya bu yapının üzerine döküm yapılacaktır. Fiber ipliklerin yapışmamasından yararlanılarak katılaştan numuneden iplikler çekilecek ve belirli bir kafes yapısında boşluğa sahip açık hücreli köpük metal üretilecektir.

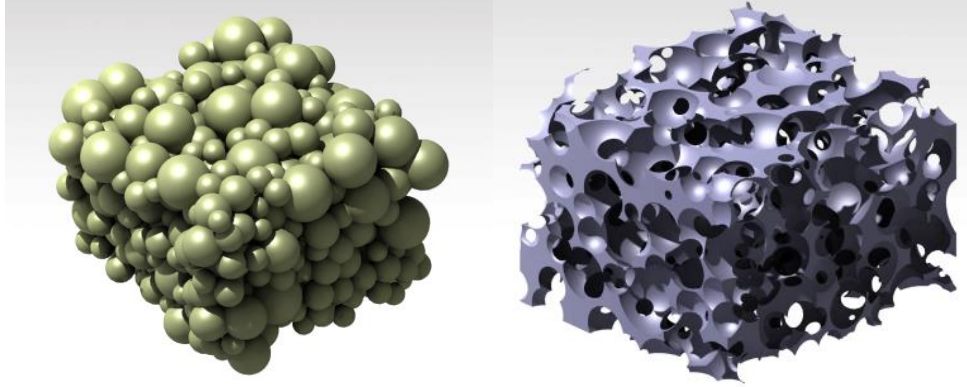


Şekil 3.11. U şekline getirilmiş örgü tel ve kullanılan fiber cam elyaf ve karbon elyaf iplikler

3.3. Köpük Metalin Bilgisayar Modelinin Oluşturulması

Doğal yaşamda karşımıza sıklıkla çıkan bir diğer köpük yapı stokastik oluşumlu köpük yapılarıdır. Bu yapıları temsilen bilgisayar desteğiyle CatiaV5 ve Matlab programı yardımıyla bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Catia’da bir makro oluşturuldu ve Matlab çıktıları tasarımın gerçekleştirilebilmesi için burada kullanıldı. Tasarımın mantığı açık hücreli köpük metal oluşturmak için stokastik yayılmış köpürücü ajanların dikdörtgensel prizma şekline sahip malzeme içerisinde patlaması ve küresel boşluklar oluşturması işlemine dayanmaktadır. Benzer şekilde değişik çaplardaki küresel boşluklardan oluşan

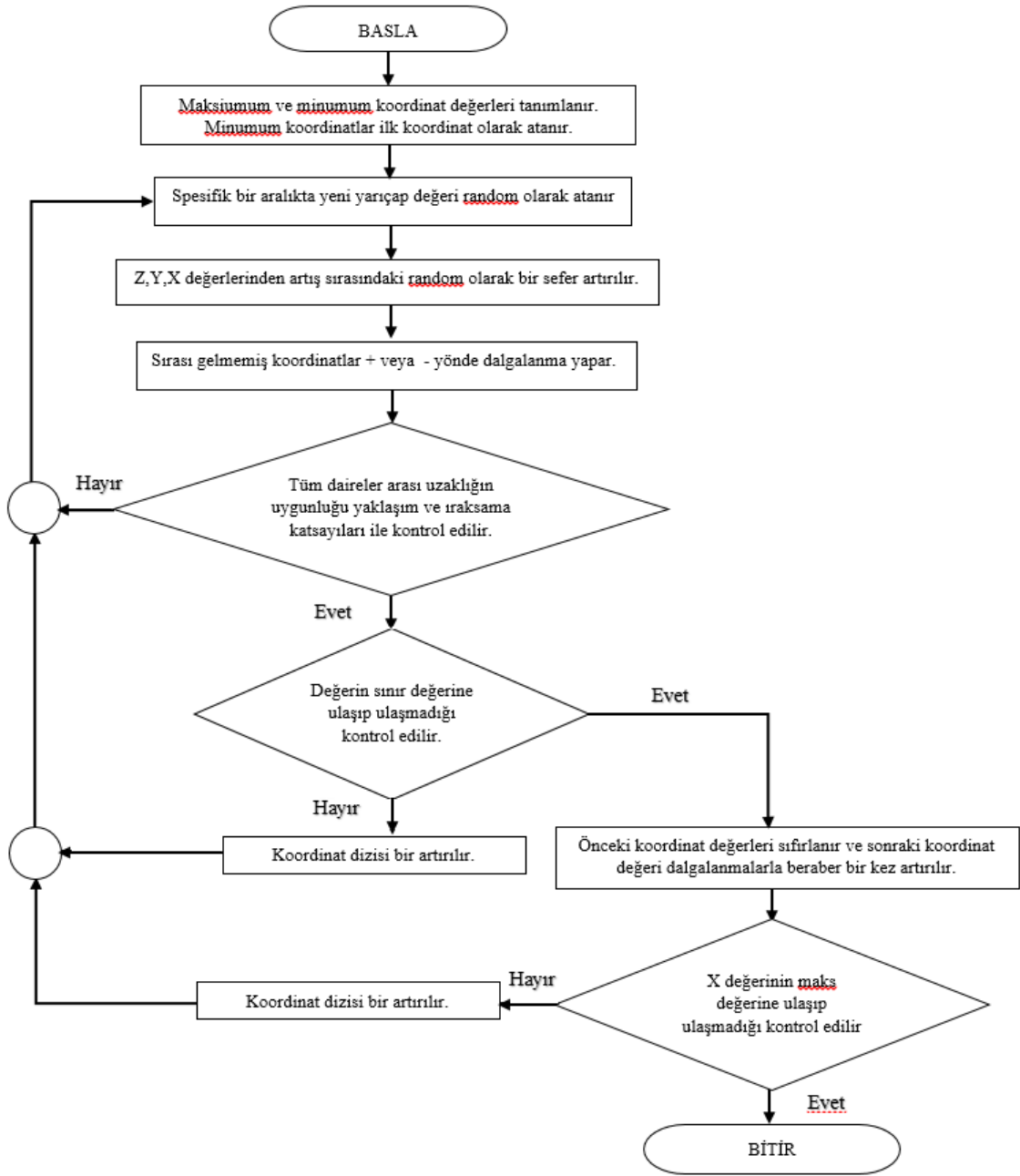
sistemde aynı etkiyi oluşturacaktır. Tasarım için köpürme ajanlarının veya küresel yer tutucuların konumunun tespiti Matlab programında bir dizi kod ile yapılmıştır.



Şekil 3.12. Küresel elemanların CATIA makrosu ile prizmadan çıkarılması

Kodun algoritma mantığı bir dikdörtgensel prizmanın X, Y ve Z eksenlerinde boyutlarının belirlenmesiyle başlamaktadır. Program başlangıç noktasının konumunu tüm eksenlerin en küçük değeri aldığı nokta, bu nokta orjin olabilir, olarak seçer. Her bir nokta için kendisine ait bir yarıçap değeri tanımlanır. Yarıçap değerlerinin kullanılmasının amacı Catia programında küre tanımlamasında yarıçap değerlerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Yarıçap değerleri istenilen belirli bir aralıkta random olarak seçilmektedir. Noktalar ilk olarak Z ekseninde belirli bir maksimum artış mesafesi içerisinde random olarak ilerler. Program, bu ilerleme esnasında yeni noktaların X ve Y eksenlerinde belirli aralık içerisinde + veya - yönde oynamalara izin verir. Her yeni Z değeri için X ve Y koordinatları temel koordinatına dönüş yapar. Bu oynama stokastik oluşum için önemlidir. Yapılan ön çalışmalarda bu oynama olmadığı takdirde sıralı bir yapı oluştuğu gözlenmiştir. Bu ilerleyiş dikdörtgensel prizmanın Z eksenindeki maksimum değerine ulaşıncaya kadar devam eder. Ulaştığında yeni atanacak noktanın Z eksenini sıfırlanır ve daha önce Z eksenindeki artışlar sırasında + veya - yöndeki artışlardan etkilenmeyen Y ve X değerine dönlür. Ve Y ekseninde belirli maksimum değer aralığında random olacak şekilde tek seferlik bir artış gerçekleşir. Bu artış esnasında yeni noktanın X ve Z eksenlerinde + veya - yönünde random ufak oynamalara müsaade edilir. Ve bu artıştan sonra bu yeni Y koordinatı temel alınarak sıfırlanan Z koordinatı, tekrar ulaşması gereken boyuta kadar aynı mantıkla ilerlemesini sürdürür. Noktaların Y

koordinatı tanımlanan boyuta ulaştığında, bu boy dikdörtgensel prizmanın Y deki tepe noktasıdır, yeni nokta için Z ve Y koordinatları sıfırlanır ve X koordinatında diğerlerinde olduğu gibi tek seferlik bir artış yapılır. Daha sonra bu yeni X koordinatı için önceki adımlar tekrarlanır. Yani Z ve Y maksimum değerlerine tekrar ulaşmaya çalışır. Ulaştığında sıfırlanırlar ve X'te rastgele olarak belirli bir miktar artış gerçekleşir. Bu tekrarların sonucunda X maksimum noktasına ulaştığında program sonlandırılır.



Şekil 3.13. MATLAB kodunun akış şeması

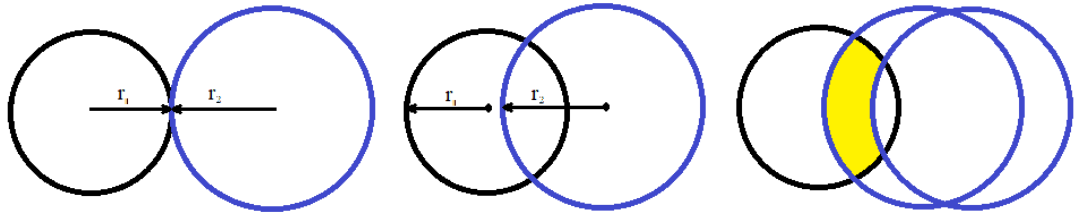
Noktaların belirlenmesinde koordinatlar arasındaki uzaklık ve yarıçap değerlerinden oluşan bir kural mevcuttur. Açık hücreli bir modelin oluşturulabilmesi için dairelerin kesişmiş olması gerekir. İki koordinat arasındaki uzaklığı belirleyen denklem

$$t = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3.1)$$

şeklindedir. Bu uzaklığın karşılaştırmadaki iki kürenin yarıçapları toplamından ufak belirli bir değer aralığında bulunması gerekir. Daire boyutları değiştiği için sabit bir aralık yerine, iki yarıçap değerinin toplamı arasında yakınsama ve ıraksama katsayıları bulunan ve bu katsayılar sayesinde daire büyüklüklerine göre her karşılaştırmada değişen bir aralık tercih edilmiştir.

$$f = (r_1 + r_2) \cdot k_{\text{ıraksama}} \quad (3.2)$$

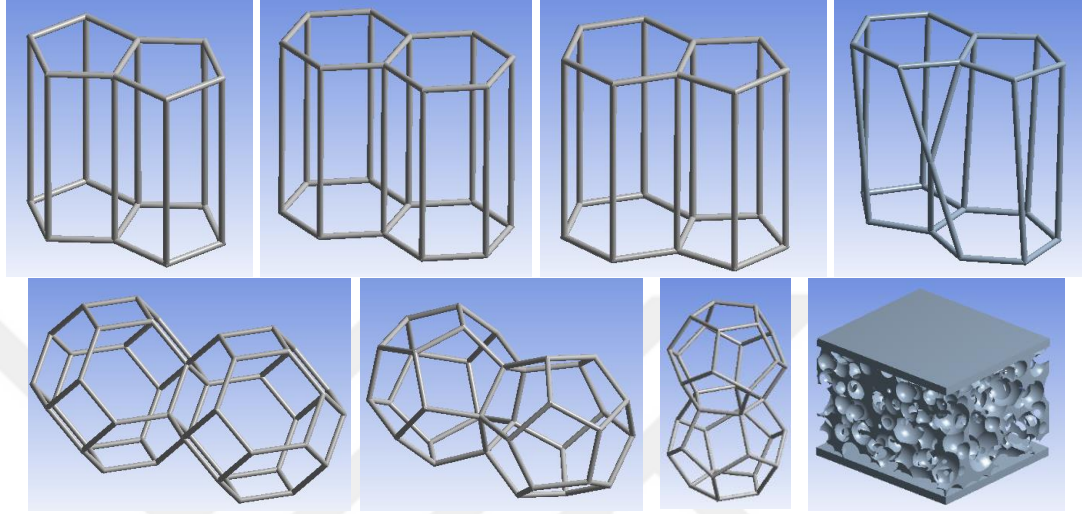
$$c = f - f \cdot k_{\text{yakınsama}} \quad (3.3)$$



Şekil 3.14. Yeni oluşturulan dairenin cidarı taralı alandan geçmelidir.

Yeni bir nokta değeri atandığında bu atanmış noktanın tüm noktalarla bu kural dahilinde kontrolü yapılır. Hiçbir nokta kurala uymuyorsa veyahut herhangi bir nokta üzerinde yutma mevcut ise bu atanmış noktanın koordinatları random olarak tekrar belirlenir ve tekrar tüm noktalar arasında kontrolü yapılır. O koordinat değerleri içerisinde nokta bulunamıyorsa o anki değer terk edilir ve olağan artım devam eder ve o anki mevcut değerler daha sonra müdahale gerekip gerekmediğini gözlemlemek üzere kayıt altına alınır. Daha sonra bu noktalar Catia'nın içerisine çekilir. Bulunan yarıçaplar Catia macrosuna verilir ve daha önceden belirlenmiş olan dikdörtgen prizmanın içerisinden boşaltma işlemine başlanır. Tüm küreler prizma içerisinden çekildiğinde istenilen stokastik köpük metal yapısı elde edilmiş olur.

Oluşturulan tasarım daha sonra ANSYS programı aracılığıyla karşılaştırılmalı olarak analizlenecektir. ANSYS programında Static Structure modülü kullanılacak olup parçalar Al-6061 alaşımı seçilerek analiz yapılmıştır. Basma analizine sokulan parçaların görselleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.15. Karşılaştırmalı analiz için seçilen geometrik yapılar; sırasıyla: Düzgün beşgen prizma, düzgün altıgen prizma, komşu beşgen ve altıgen prizmalar, Scutoid, Tetrakaidekahedrons, yatay ilişkili pentagonal dodecahedron, dikey ilişkili pentagonal dodecahedron, bilgisayar desteğiyle oluşturulmuş sandviç stokastik metal köpük tasarımı

Şekil 3.13'te verilen yapılara belirli değerlerde basma kuvveti verilerek karşılaştırmaya dahil edilmiştir.

3.4. Seramik Döküm Kalıbı Oluşturma Denemeleri

Yapılan modellerin içerisinde döküm yapılacağı parçanın çıkmama durumunda kırılıp atılabilecek seramik kap üretilmek istenmiştir. Kapları üretmek için değişik yöntemler denenmiştir. İlk yöntemde kabın boş kısmını tutacak bir strafor model bir kalıba yerleştirilerek donması beklenmiştir.

İkinci yöntem olarak cam elyaftan iç ve dış olmak üzere iki kalıp yapılarak arasına döküm denenmiştir.

Üçüncü yöntem olarak cam elyaf kalıbın iç kısmına diğer kalıptan yararlanılarak seramik çamur yerleştirilmiş ve kurumaya bırakılmıştır.

Dördüncü yöntem olarak cam elyaf kalıbın dışına koyu çamur sıvanmış ve kurumaya bırakılmıştır.

Beşinci yöntem olarak koyu seramik çamur elle şekillendirilmiş ve kendi yoğunluğuyla ayakta tutularak kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.16. Toprak kalıp oluşturma denemeleri

4. BULGULAR

4.1. Polimer Retiküle Sünger Model ile Hassas Döküm

İlk numune çok düşük sıcaklıkta pişirildiği için dağılmaya meyilli bir yapısı mevcuttur. 400°C'den sonra dışarıda (24°C) soğumaya alındığından numunede çökmeler meydana gelmiştir. İç yapısı gözlemlenmek üzere numune kırılmıştır. Kırılan numunede süngerin bulunduğu alanların ve deliklerin sürekli olduğu görülmüştür. Fakat çok ince et kalınlığına sahip bu yapıya eldeki ekipmanlarla alüminyum sızdırabilmek olası görülmemiştir. Ayrıca numunenin ortasının hava aldığı görülmüştür. Hava alan kısımda cidarların seramikle kaplandığı ve boşlukların bulunduğu bir görünüm ile karşılaşılmıştır. Bu görselden yola çıkarak polimer köpüğün replikasını üretmeye çalışmak yerine negatifinin ürün olarak kullanılabileceği bir köpük metal üretim modeli düşünülmüş ve bu durum ikinci üretim yöntemine kapı açmıştır.



Şekil 4.1. İlk numunede gözlemlenen üç durum: Çökme, hava alma ve çok ince gözeneklilik

İkinci pişirilen numunenin amacı çekme oranını ve fırında soğuma yapıldığında çökme olup olmadığını görebilmek üzere olmuştur. 40 mm açılan çentiğin pişme sonucunda 39,53 mm ye indiği gözlenmiştir. Bu değerler üzerinden seramiğin pişirme esnasında yaklaşık %1,18 çekme gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4.2. Çentik açılmış numunenin pişmiş hali

4.2. Polimer Köpüğün Boşluk Tutucu Olarak Kullanılması

İnce cidarlı numuneler dayanıksız olup taşınma sırasında dağılmışlardır. Çift katman ve daha fazla bulunan numuneler döküm için uygun mukavemeti göstermiştir.



Şekil 4.3. Cidarları seramik kaplanmış ve pişirilmiş numunelerin birkaçı



Şekil 4.4. Sırasıyla yanına dökülmüş, ergimiş metale daldırılmış ve üzerine alüminyum külçe bırakılmış numuneler

Üç farklı şekilde Al-6063 ergimiş metali ile buluşturulan seramik köpük içerisine alüminyum nüfuz etmemiştir. Yanına alüminyum dökülmüş numunenin gözenek yapılarının genişliği sebebiyle bir miktar gözeneklerin arasında yükselme görülebilmektedir. Üzerine külçe bırakılan numunede alüminyumun bir kısmı seramiğin gözeneklerine

nüfuz etmeden yandan sızarak alt tabakaya inmiş ve diğer kısmı üstte kalarak sandviç bir yapı oluşturmuştur.

4.3. Küresel Yer Tutan Eleman Üzerine Döküm

Küresel boşluk tutucuların üzerine ilk denemede Al-6063 alaşımını hurda bırakılmış ve aralara nüfuz etmesi beklenmiştir. 750°C’de bir saate yakın bir süre beklenmiştir. Şekil 4.5’te görüldüğü üzere alüminyum aralara tam olarak girememiştir. Fakat diğer deneylere oranla iyi sonuç vermesi küresel boşluk tutucuların iyi bir üretim yöntemi olabileceğini göstermiştir. 5kg ağırlık bırakılan numunede sızma oranının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.5. Yer tutucular üzerine katı alüminyum bırakılarak yapılan deney

İkinci denemede fırında boşluk tutucular ile beraber bırakılmış kalıp üzerine ergimiş Al-6063 alaşımını dökülmüştür. Alüminyumun dibine çöküp birikme yapması ile beraber boşluk tutucuların arasına da belirli bir derece nüfuz etmiştir.



Şekil 4.6. Üzerine ergimiş alüminyum dökülmüş küresel boşluk tutucular

4.4. Fiber Yer Tutan Elemanlar Üzerine Döküm

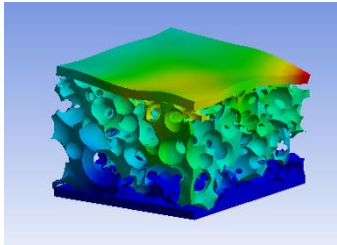
Karbon fiber ve cam elyaf lifleri Şekil 4.7’de de görüldüğü üzere boşluk tutucu olarak iyi sonuç vermişlerdir. İplikler bazı kopmalar haricinde rahatlıkla parçadan çekilip alınabilmektedir.



Şekil 4.7. Karbon fiber ve cam elyaf boşluk tutucular üzerine yapılmış döküm

4.5. Tasarlanan Köpük Metalin Analiz Sonuçları

Şekil 3.13’te verilen geometrik şekillere uygulanan analizin sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği üzere sabun köpüğü geometrisi olarak düşünülen pentagonal dodecahedron ve tetracaidecahedron gibi yapıların gelen kuvvetlere karşı dayanıksız olduğu görülmüştür. Scutoid geometrisinden de elde ettiğimiz sonuçlara baktığımızda benzer sonuçlarla karşılaşılmıştır. Epitel hücrelerin almış olduğu scutoid geometrisi sabunun köpüğüne göre daha dayanıklı olsa da altıgen ve beşgen prizmalara bakıldığında dayanımı düşüktür.



Şekil 4.8. Stokastik köpük tasarımın analiz sonuçları

Sabun köpüğü, bal peteği, epitel hücre gibi tanımlanabilen geometrik şekillere sahip latis blokların yanında trabeküler kemik gibi stokastik gözeneklere sahip biyolojik yapılarda

mevcuttur. Bu yapıları temsilen yapılan tasarımın analizleri sonucunda genel anlamda açık hücreli stokastik köpük yapısının sağlam olduğu fakat sonuçlardan da açıkça görülebilecek üzere bazı ince kısımlara gelen yükler sebebiyle buralarda kırılmalara yol açtığı görülmüştür.

Çizelge 4.1. 3B modellerin ANSYS'teki analiz sonuçları

	En Büyük Eşdeğer Gerilme (MPa)	En Büyük Eşdeğer Birim Uzaması $\times 10^3$	Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi $\times 10^3$ (mJ)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)	Hacim (mm ³)	Kütle (g)	Kuvvet(N)
Scutoid	80,572	1,2002	0,092382	0,17293	10138	27,373	100
Beşgen-altıgen Prizma	15,68	0,25858	0,012941	0,016424	9708,1	26,212	100
Bal Peteği	12,009	0,19516	0,012659	0,014	10808	29,182	100
Beşgen Prizma	17,278	0,29231	0,018224	0,017032	8665,3	23,396	100
Tetracai - dodecahedron	117,19	1,9795	0,74649	0,23671	13925	37,598	100
Yatay ilişkili Pentagonal dodecahedron	165,22	2,6708	1,8089	0,40517	11268	30,424	100
Dikey ilişkili Pentagonal Dodecahedron	139,09	2,0953	2,31	0,36448	11268	30,424	100
Stokastik Köpük	894,04	13,1	0,0021238	0,0013879	203,13	0,54846	15

4.6. Seramik Döküm Kalıbı Oluşturma Denemeleri

İlk denemede kalın cidarlar olduğundan dolayı çatlamlar onarılabilecek düzeyde olmuş fakat kalıp kenarları düzeltilirken parçalanmıştır. Uzun bekleme sürelerinden sonra kalıbın kuruması sağlanmıştır.

İkinci üçüncü ve dördüncü denemelerde kuruma sırasında çamurun çekme yapmasından ve keskin dönüşlerden dolayı çatlaklar oluşmuş ve tamir edilemeyecek seviyede ayrılmalar görülmüştür.

Beşinci deneme olan el ile şekil vermede her hangi bir yüzeye tutunmayan veya kendisinden başka dış baskıya maruz kalmayan seramik başarılı bir şekilde kurutulmuş ve fırınlanmıştır.



Şekil 4.9. Elle şekil verilmiş seramik kabın pişmiş hali

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Polimerik retiküle sünger model ile hassas döküm deneylerinde kullanılan süngerin cidarları yaklaşık 0,2 mm civarındadır ve döküm için bu değer çok incedir. Süngerin seramik çamura hapsedilmeden önce mum gibi başka bir cidar artırıcı malzeme kullanılabilirdi. Böyle bir durumda proses süresini uzatan mumun sünger üzerinde eşit ve düzgün kaplanması gibi zorlayıcı parametreler yönteme dahil olmaktadır. Ayrıca bu yöntem de alüminyumun sızabilmesi için vakumlu veya basınçlı bir kaba ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla pratik bir yöntem arıyor oluşumuz sebebiyle bu yöntemden vazgeçilmiştir.

Boşluk tutucu olarak polimer retiküle sünger kullanılması tekniğinde cidarların çamurla eşit bir şekilde ve istenilen kalınlıkta kaplanması zorlu bir süreçtir. Santrifüj ile fazla çamurun köpük üzerinden alınması gerekmektedir. Ayrıca döküm sırasında en geniş gözeneklerden bile ergimiş metalin sızma yapmakta zorlanması, vakumun gerekli olduğu kanısını doğurmuştur. Pahalı karmaşık ekipmanlar ve hassas parametreler içeren bu yöntemden de vaz geçilmiştir.

Küresel yer tutan eleman üzerine döküm tekniği umut vaat eden bir yöntem olarak görünmektedir. Üzerine hurda alüminyum bırakılarak beklenen deneyde azda olsa sızma yapan alüminyum bu yöntemin üzerine gidilmesi gerektiğini göstermiştir. İlk yapılan deneyde deney süresinin kısıtlı tutulması sızmanın önüne geçtiğini düşündürmektedir. Bu deney süresinin biraz daha uzatılarak tekrarlanmasına yol açmış fakat aynı görselle karşılaşılmayısıyla son bulmuştur. Ergimiş metalin kalıba döküldüğü durumda metal küresel modellerin çevrelerine kayda değer bir şekilde sızma yapmıştır. Bu durum alüminyumun kohezyonunu yenerek akışkan bir eriyik elde edilmesi gerektiğini düşündürmüştür. Bu sebeple silisyumu fazla döküm alaşımlarına yönelmek olumlu sonuçlar vereceği kanısını oluşturmuştur. Proseste hassas parametrelerin olmayışı vakum veya basınçlı döküm tekniklerine gerek olmayış gibi pratik sebeplerden dolayı yöntem diğer üretim yöntemlerine göre uygun görülmektedir. Bu yöntemde sıkıntı olacak bir husus seramik topların yapıdan uzaklaştırma işlemi olacağı görülmüştür. Ergimiş metalin döküldüğü durumda keski ve çekiç yardımıyla seramik topların uzaklaştırılmaya

çalışılmış ve olumlu sonuç alınmamıştır. Kürelerin daha düşük sıcaklıklarda pişirilmesi halinde ultrasonik kırma temizleme cihazlarıyla bu sorunun üstesinden gelinebilir. Veyahut bu sağlam kürelerin parça içerisinde bırakılmasıyla sintaktik bir metal köpük elde edilerek sağlam bir kompozit yapı elde edilebilir.

Fiber boşluk tutuculardan alınan sonuç umut vaat etmiştir. Fakat fiberlerin örgü kafese dizilmesi hatta bir kafes olacak şekilde örülmesi gibi zorlayıcı hususlar sebebiyle yöntemden vaz geçilmiştir.

Bilgisayar ortamında yapılan çalışmalarda sabun köpüğü gibi yapıların aldıkları geometrik şekillerin amacı gelen kuvvetlere karşı direnmek değil hızlı bir şekilde şekillerini değiştirerek ortama adaptasyon sağlamak üzere kurgu geliştirdiği söylenebilir. Aynı şekilde benzerlerine kıyasla dayanıksız çıkan scutoid yapısı gelen kuvvete hızlı tepki gösterebilecek noktasal mafsallı birleşimlerle ortama adaptasyon sağlayarak bütünlüğünü bozmadan ve kırılmadan varlığını uzun süre koruyabilecek geometrik şekle bezenmiştir demek yanlış olmayacaktır. Galvez ve diğ. (2018)'de prizmatik yapıların aksine bu yapının eptitel hücrelerinin birbirinden ayrılmasını engellediklerini ve beraber hareket kabiliyeti kazandırdığını ileri sürmüştür. Scutoid geometrisinin en benzeri olan pentagonal-hegzagonal prizmaya kıyasla daha yüksek hacim ve ağırlığa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum bu yapıların hem ağır hem de dayanıksız yapılar olduğunu düşündürse de bu geometrilerin biyolojik ve esnek yapılarda bulunması hacim ve ağırlıklarına göre hantal yapılar olmadıklarının daha fazla kütleleri olmasına rağmen ortama hızlı adapte olabilecek geometriler olduğunun bir diğer göstergesi niteliğindedir. Sonuçlardan görülen değerler scutoid geometrisinin yeni oluşan ortama adaptasyon sırasında aşırı direnç göstererek yapılarını zorlamaktan ziyade şekil değişimlerine müsaade edecek geometriyi tercih ederek hareketleri sırasında fazla enerji harcamayarak enerjilerini korumasına yardımcı olduğunu gösterir. Bununla birlikte scutoid geometri sabun köpüğü gibi dışarıdan gelen etkilere fazlasıyla açık olup şekillerini değiştiren bu yapılara kıyasla varlıkları ve şekillerini koruyacak dirençli yapılardır.

Yapılan stokastik köpük tasarımında gözeneklerin homojen ve eş büyüklükte dağıtılmaması sebebiyle bazı cidarların ince kaldığı görülmüştür. Bu ince kısımlar gelen yük ile birlikte kırılarak bölgesel çökmeleri beraberinde getirmiştir. Buna rağmen stokastik köpük metal genel itibari ile sağlam bir duruş sergilemiştir.

Sonuç olarak küresel boşluk tutucu kullanılan yöntemin bazı parametreleri değiştirilerek pahalı ekipmanlara gerek duyulmadan pratik bir şekilde açık veya sintaktik yapılı köpük metal üretimi yapılabilir. Aynı zamanda bu yöntemle üretilen köpük metallerin daha önceden bilgisayar ortamında tasarlanabileceği görülmüştür. Bu durum üretilen köpük metalin, boşluk tutucu büyüklüklerinin ve diğer parametrelerinin belirlenmesinde yardımcı olacaktır. Bilgisayara aktarılan model sayesinde malzeme, zaman, ekonomi ve iş gücü israfının önüne geçilecek, elde edilen veriler daha üretim yapılmadan malzemenin konulacağı ortamda davranışlarının ölçümlenmesine olanak tanıyacaktır.

KAYNAKLAR

- Akbaba, B. 2016.** Alüminyum Köpüklerde İki Boyutlu Sıcaklık Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, SÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Anonim 2019a.** ERG Duocel. <http://ergaerospace.com>-(Erişim Tarihi: 25.06.2019).
- Anonim 2019b.** Metal Foam. https://everipedia.org/wiki/lang_en/Metal_foam-(Erişim Tarihi: 29.06.2019).
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G. 2000.** Metal Foams : A Design Guide. Butterworth-Heinemann, USA, 251 pp.
- Aurenhammer, F. 1991.** Voronoi diagrams - A survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys*, 23(3): 345–405.
- Banhart, J. 2001.** Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46: 559–632.
- Banhart, J., Schmoll, C., Neumann, U. 1998.** Light-weight aluminium foam structures for ships. *Proc. Conf. Materials in Oceanic Environment*, 1: 55–63.
- Banhart, J., Weaire, D. 2002.** On the road again : metal foams find favor. *Physics Today*, 55: 37–42.
- Bitsche, R., Daxner, T., Böhm, H. J. 2005.** Space-Filling Polyhedra as Mechanical Models for Solidified Dry Foams. *MSc Thesis*, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Technische Universität Wien, Vienna.
- Boicea, A., Grigore, E. M., Ghita, V., Bentu, S. A., Trifan, I., Popa, G. D. 2010.** Database Encryption Algorithm : New Scytale. *Annals of DAAAM International*, 21(1): 4-5.
- Buonomo, B., Ercole, D., Manca, O., Menale, F. 2018.** Thermal cooling behaviors of lithium-ion batteries by metal foam with phase change materials. *Energy Procedia*, 148: 1175–1182.
- Çağlar, S. İ. 2009.** Alüminyum Esaslı Kompozit Köpük Üretimi Ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, TÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne.
- Cohrt, H., Martin, E. 1993.** Sintered Steel and Iron. *Wiley-VCH*, 24: 185-208.
- Coşkun, N. D., Işık, E., Şahin, A. S., Börekçiöğlü, Ç., UZ, V. 2016.** Yüksek Poroziteli Beyaz Pişen Seramik Çamurunun Karakterizasyonu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3): 14–20.
- Ding, Q., Tian, N., Wang, Y., Jiang, Z., Chen, S., Wang, D., Zhang, W., Zheng, S., Xie, A., Zhang, G., Liu, Z. 2016.** Fossil coniferous wood from the Early Cretaceous Jehol Biota in western Liaoning. NE China: New material and palaeoclimate implications. *Cretaceous Research*, 61: 57–70.
- Doğan, A., Atmaca, İ., Özbalcı, O. 2015.** Metal köpük malzemeler ve yüzey soğutmada kullanımı. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 8-11 Nisan 2015, İzmir
- Du, J., Brooke-wavell, K., Paggiosi, M. A., Hartley, C., Walsh, J. S. 2019.** Characterising variability and regional correlations of microstructure and mechanical competence of human tibial trabecular bone : An in-vivo HR- pQCT study. *Bone*, 121: 139–148.
- Eker, A. 2008.** Al ve Alaşimleri. http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum_ve_Aluminyum_Alaşimleri.pdf-(Erişim Tarihi: 02.07.2019).

- Frame, J. C., Rohan, P., Corté, L., Allena, R. 2018.** Optimal bone structure is dependent on the interplay between mechanics and cellular activities. *Mechanics Research Communications*, 92: 43–48.
- Gergely, V., Clyne, T. W. 2004.** Drainage in standing liquid metal foams : modelling and experimental observations. *Acta Materialia*, 52: 3047–3058.
- Gibson, L. J. 2005.** Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics*, 38: 377–399.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F. 1999.** Cellular solids: Structure and properties, Cambridge University Press., Cambridge, UK, 502 pp.
- Gómez-Gálvez, P., Vicente-Munuera, P., Tagua, A., Forja, C., Castro, A. M., Letrán, M., Valencia-expósito, A., Grima, C., Bermúdez-gallardo, M., Serrano-pérez-higueras, Ó., Cavodeassi, F., Sotillos, S., Martín-bermudo, M. D., Márquez, A., Buceta, J., Escudero, L. M. 2018.** Scutoids Are A Geometrical Solution To Threedimensional Packing Of Epithelia. *Nature Communications*, 9(2960): 1-14.
- Gündoğdu, M. 2014.** Seramik Alt Yapı Materyallerinin Mine ve Dentine Bağlanma Dayanımı Üzerine Adeziv Rezin Simanların Etkisi. *Doktora Tezi*, AÜ Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Erzurum.
- Gupta, N., Rohatgi, P. K. 2015.** Metal Matrix Syntactic Foam : Processing, Microstructure, Properties and Application. Destech Publications Inc., Lancaster USA, 352 pp.
- Hardy, P. W., Peisker, G. W. 1967.** U.S. Patent No: 3,300,296, USA, <https://patents.google.com/patent/US3300296A/en>-(Erişim Tarihi: 22.06.2019)
- Hilgenfeldt, S. 2002.** Bubble geometry. *Nieuw Archief voor Wiskunde (NAW)*, 3: 224–230.
- Höhler, R., Weaire, D. 2019.** Can liquid foams and emulsions be modeled as packings of soft elastic particles ?. *Advances in Colloid and Interface Science*, 263: 19–37.
- Ji, K., Xu, C., Zhao, H., Dai, Z. 2014.** Electrodeposited lead-foam grids on copper-foam substrates as positive current collectors for lead-acid batteries. *Journal of Power Sources*, 248: 307–316.
- Karakoç, H. 2012.** Sıcak Presleme Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Köpük Malzeme Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Kränzlin, N., Niederberger, M. 2015.** Controlled fabrication of porous metals from the nanometer to the macroscopic scale. *Materials Horizons*, 2(4): 359–377.
- Lefebvre, L. P., Banhart, J., Dunand, D. C. 2008.** Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments. *Advanced Engineering Materials*, 10(9): 775–787.
- Li, Y., Yang, C., Zhao, H., Qu, S., Li, X., Li, Y. 2014.** New developments of ti-based alloys for biomedical applications. *Materials*, 7(3): 1709–1800.
- Liu, P., He, G., Wu, L. H. 2008.** Fabrication of sintered steel wire mesh and its compressive properties. *Materials Science and Engineering A*, 489: 21–28.
- Liu, P., He, G., Wu, L. 2009.** Structure deformation and failure of sintered steel wire mesh under torsion loading. *Materials and Design*, 30(6): 2264–2268.
- Lopes, A., Rosa-Osman, S. M., Piedade, M. T. F. 2009.** Effects of crude oil on survival, morphology, and anatomy of two aquatic macrophytes from the Amazon floodplains. *Hydrobiologia*, 636: 295–305.

- Rúa, J. M., Zuleta, A. A., Ramírez, J., Fernández-Morales, P. 2019.** Micro-arc oxidation coating on porous magnesium foam and its potential biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 360: 213–221.
- Maine, E., Ashby, M. F. 2000.** Cost Estimation and the Viability of Metal Foams. *Advanced Engineering Materials*, 2(4): 205–209.
- Manonukul, A., Muenya, N., Léaux, F., Amaranan, S. 2010.** Effects of replacing metal powder with powder space holder on metal foam produced by metal injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3): 529–535.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A. 2000.** Aluminum Foam, "ALPORAS": The Production Process, Properties and Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2(4): 179–183.
- Moongkhamklang, P. 2009.** Titanium-Silicon Carbide Composite Lattice Structures. *Ph.D. Thesis*, Faculty of Materials Science and Engineering, University of Virginia, USA.
- Ozan, S., Katı, N. 2011.** Metal Köpükler. 6th International Advanced Technologies Symposium, 16–18 Mayıs 2011, Elazığ
- Özel, S. 2017.** Membran Reaktörler. <https://slideplayer.biz.tr/slide/14202465/>-(Erişim Tarihi: 27.06.2019)
- Özşahin, E. 2019.** Yerkabuğunu Anlamak: Mineral ve Kayaç Örnekleri Sergisi. TNKÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Fuaye Alanı, 27 Şubat 2019, Tekirdağ.
- Poserin, V., Marcuson, S., Shu, J., Wilkinson, D. S. 2004.** CVD technique for Inco nickel foam production. *Advanced Engineering Materials*, 6(6): 454–459.
- Quadbeck, P., Kümmel, K., Hauser, R., Standke, G., Adler, J., Stephani, G. 2010.** Open Cell Metal Foams – Application-oriented Structure and Material Selection. International Conference on Cellular Materials (CellMat), 27-29 Kasım 2010, Dresden.
- Ross, S., Prest, H. F. 1986.** On the Morphology of Bubble Clusters and Polyhedral Foams. *Colloids and Surfaces*, 21: 179–192.
- Schwartzwalder, K., Somers, H., Somers, A. W. 1963.** U.S. Patent No: 3,090,094. <https://patents.google.com/patent/US3090094A/en>-(Erişim Tarihi: 22.06.2019)
- Sezer, Ş. D. 2009.** Kompakt Toz Ergitme Tekniği ile Alüminyum Köpük Üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Sieghas, P., Tagarielli, V., Petrinic, N. 2014.** Modelling stochastic foam geometries for FE simulations using 3D Voronoi cells. *Procedia Materials Science*, 4: 221–226.
- Sosnick, B. 1948.** U.S. Patent No: 2,434,775. <https://patents.google.com/patent/US2434775>-(Erişim Tarihi: 22.06.2019)
- Sosnick, B. 1951.** U.S. Patent No: 2,553,016. <https://patents.google.com/patent/US2553016>-(Erişim Tarihi: 22.06.2019)
- Su, L., Liu, H., Yao, G., Zhang, J. 2019.** Experimental study on the closed-cell aluminum foam shock absorption layer of a high-speed railway tunnel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119: 331–345.
- Tabaatabaai, S. M., Rahmanifar, M. S., Mousavi, S. A., Shekofteh, S., Khonsari, J., Oweisi, A., Hejabi, M., Tabrizi, H., Shirzadi, S., Cheraghi, B. 2006.** Lead-acid batteries with foam grids. *Journal of Power Sources*, 158: 879–884.
- Tan, Weng, C., Saw, Huat, L., Hui, San, H., Xuan, J., Cai, Z., Yew, Chian, M. 2018.** Overview of porous media / metal foam application in fuel cells and solar power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96: 181–197.

- Tan, S. 2003.** Optimization Of Macrostructure In Aluminium Foams. *Msc Thesis*, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Middle East Technical University, Ankara.
- Tiryaki, M. 2016.** Köpük Metal Üretimi Ve Mekaniksel Özelliklerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, KDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- Tsafnat, N., Fitz Gerald, J. D., Le, H. N., Stachurski, Z. H. 2012.** Micromechanics of Sea Urchin Spines. *PLoS ONE*, 7(9): 1-10, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044140>.
- Varyoz, H., Dikdere, O., Dinç, A. M., Tiryaki, M., Aygahoğlu, A. 2015.** Metal Köpükler. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Özel Sayı(18): 195–200.
- Wejrzanowski, T., Skibinski, J., Szumbariski, J., Kurzydowski, K. J. 2013.** Structure of foams modeled by Laguerre-Voronoi tessellations. *Computational Materials Science*, 67: 216–221, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.08.046>.
- Wu, F., Xiao, X., Yang, J., Gao, X. 2018.** Quasi-static axial crushing behaviour and energy absorption of novel metal rope crochet-sintered mesh tubes. *Thin Walled Structures*, 127: 120–134, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.02.004>.
- Yapıcı, C. 2012.** AlTi5B1 Master Alaşımının Alüminyum Basınçlı Döküm Yönteminde Tane İnceltici Olarak Kullanımının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Zaman, E. 2011.** Açık Hücreli Alüminyum Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul
- Zhang, K., Deng, Z. C., Meng, J. M., Xu, X. J. 2016.** Wave propagation in hexagonal lattices with plateau borders. *Composite Structures*, 140: 525–533.
- Zhu, H. X., Knott, J. F., Mills, N. J. 1997.** Analysis Of The Elastic Properties Of Open-Cell Foams With Tetrakaidecahedral Cells. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(3): 319–343.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Altuğ BAKIRCI
Doğum Yeri ve Tarihi : Tekirdağ 17.01.1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Tekirdağ Anadolu Lisesi 2012

Lisans : K.Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği
Bölümü, 2016

İletişim (e-posta) : altugbakirci@gmail.com

Yayınları :