



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Geçmişten günümüze kütleli metalik camlar ve yenilikçi uygulamaları

Historical development of bulk metallic glasses and their innovative applications

Yazar(lar) (Author(s)): Esra Burcu YARAR TAUSCHER¹, Nil TOPLAN²,

ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0002-4105-055X>

ORCID²: <http://orcid.org/0000-0003-4130-0002>

To cite to this article: Yazar Tauscher E. B., and Toplan N., “Geçmişten Günümüze Kütleli Metalik Camlar Ve Yenilikçi Uygulamaları”, *Journal of Polytechnic*, 29(4):290411:1-14 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Yazar Tauscher E. B. ve Toplan N., “Geçmişten Günümüze Kütleli Metalik Camlar Ve Yenilikçi Uygulamaları”, *Politeknik Dergisi*, 29(4):290411:1-14 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1652973

Geçmişten Günümüze Kütlesel Metalik Camlar ve Yenilikçi Uygulamaları

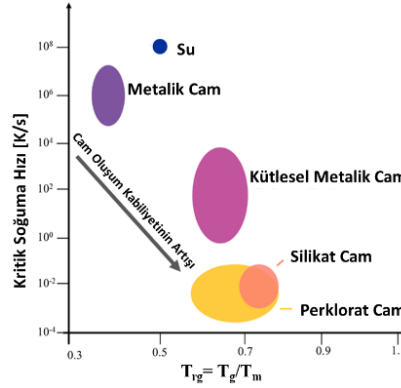
Historical Development of Bulk Metallic Glasses and their Innovative Applications

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Kütlesel metalik camların (KMC'lerin) amorf yapıları ve camlaşma kabiliyetleri (The amorphous structures of bulk metallic glasses (BMG) and their glass-forming abilities)
- ❖ KMC'lerin tarihsel gelişim süreçleri kronolojik olarak aktarılmıştır. (The historical development of BMGs is explained chronologically.)
- ❖ KMC'lerin aktüel uygulama alanları. (Current applications of BMGs)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

KMC'ler bilim dünyasında genel olarak camsı geçiş özelliği gösteren amorf malzemeler olarak tanımlanır. (BMGs are generally defined in the scientific community as amorphous materials that exhibit a glass transition.)



Şekil. Farklı malzemelerin Kritik soğutma hızları (Critical cooling rates of different materials)

Amaç (Aim)

Bu çalışma, KMC'lerin üretiminden günümüze kadar olan gelişimini, karşılaşılan zorlukları ve mevcut uygulama alanlarını inceleyerek, gelecekteki potansiyel kullanımlarına dair öngörüler sunmaktadır. (This study provides a comprehensive overview of the development of BMGs from their initial production to the present, highlighting the challenges encountered, current applications, and future prospects.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada, KMC'lerin üretimi ve temel özellikleriyle başlayan girişin ardından, camlaşma kabiliyetine odaklanılarak gelişim süreci ve güncel uygulamalar bütüncül biçimde sunulmuştur. (The study begins with the production and fundamental properties of BMGs, followed by a comprehensive presentation of their development process and current applications, with a focus on their glass-forming ability.)

Özgünlük (Originality)

KMC'lerin gelişim süreçleri ve uygulama alanları üzerine yayınlanmış çalışmaların genel bir derlemesidir. (It is a general review of the studies on the development processes and application areas of BMGs.)

Bulgular (Findings)

KMC'ler, geleneksel kristal metallere kıyasla üstün özellik ve performansları sayesinde birçok alanda ileri malzeme ihtiyacını başarılarıyla karşılamaktadırlar. (BMGs successfully meet the demand for advanced materials in various fields thanks to their superior properties and performance compared to conventional crystalline metals.)

Sonuç (Conclusion)

KMC'ler, kristal alaşımlara göre daha yüksek üretim maliyetine sahip olsalar da, 1990'lardan bu yana süren yoğun araştırmalar sayesinde ticari değer kazanmışlardır. Although BMGs have higher production costs compared to crystalline alloys, they have gained commercial value through intensive research conducted since the 1990s.)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar (lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Geçmişten Günümüze Kütlesel Metalik Camlar ve Yenilikçi Uygulamaları

Derleme Makalesi / Review Article

Esra Burcu YARAR TAUSCHER^{1*}, Nil TOPLAN¹

¹Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 06.03.2025 ; Kabul/Accepted : 26.05.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 07.07.2025)

ÖZ

Bu çalışma, yenilikçi malzemeler arasında önemli bir yere sahip olan Kütlesel Metalik Camlar (KMC'ler) üzerine odaklanmaktadır. Makalede bu malzemelerin camlaşma kabiliyeti, tarihsel gelişim süreçleri ve kullanılan alaşımların çeşitliliği hakkında bilgi verilmiştir. Üretim sürecinde karşılaşılan temel sorunlar ve bu sorunlara yönelik geliştirilen çözümlere değinilmiş, KMC'lerin günümüzdeki yenilikçi uygulama alanları üzerinde durularak özellikle son yıllarda yapılan dikkate değer çalışmalar vurgulanmıştır. Mevcut araştırma okuyucuya, KMC'ler hakkında genel bir bakış açısı sağlamayı, son yıllarda yapılan dikkate değer çalışmalarını öne çıkararak alanın mevcut durumu hakkında bilgi vermeyi hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Metalik Cam Teknolojisi, Camlaşma kabiliyeti, Yenilikçi Uygulamalar.

Historical Development of Bulk Metallic Glasses and their Innovative Applications

ABSTRACT

This article presents an overview of Bulk Metallic Glasses (BMGs), highlighting their significance as advanced materials. It outlines their glass-forming ability, historical development, and the variety of alloy systems used in their production. The paper also addresses the main challenges encountered during manufacturing and the strategies developed to overcome them. Recent research efforts and emerging application areas are discussed to illustrate the current state and future potential of BMGs. The aim is to provide a concise yet comprehensive summary of key developments in this field.

Keywords: Metallic Glass Technology, Glass forming ability, Innovative Application Areas.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üretim tarihi MÖ. 3500 yıllarına dayanan ve en çok bilinen amorf malzemeler olan camlara karşın metallerin amorf yapıya sahip alaşımlarının üretilmesi 20. yüzyılın ortalarını bulmuştur [1]. Katı hal fiziği ve malzeme bilimcileri için düzenli kristal yapının malzeme özellikleri üzerindeki etkileri; o dönemdeki bilimsel tartışmaların temel konusuydu. Bu bağlamda, amorflik kavramının yalnızca sıvı ya da cam gibi geleneksel malzemelerle sınırlı kalmayıp, metaller için de uygulanabilirliğinin araştırılması, teorik olduğu kadar deneysel olarak da önem kazanmıştı. Camların sıvı halden soğutulurken katı hale geçerken gösterdiği düzensiz atomik dizilime benzer 'camsı' amorf yapıyı metaller üzerinde deneme fikri 1940'larda öne sürülerek araştırılmaya başlanmış, fakat hızlı soğutma tekniklerinin yetersizliği bu konudaki gelişmelerin önündeki en büyük sorunu oluşturmuştur. Geleneksel camlarda kritik soğuma hızı o kadar düşüktür ki; sıvı halden soğutulurken kristalleşme olmadan uzun mesafe düzeni olmayan atom gruplarının görüldüğü amorf yapıya kolaylıkla ulaşılabilir. Buna karşın genel olarak sıvı metallerin hem kritik soğuma hızı çok yüksek hem de viskoziteleri oldukça düşüktür, öyleki metalik bir sıvının düzenli kristal yapıya geçmeden amorf halde katılaşması için çok hızlı bir

şekilde soğutulması gerekmektedir. Bunu ilk kez 1960 yılında Au₈₀Si₂₀ alaşımı ile başaran Duwez ve arkadaşları [2] olmuştur. Duwez ve ekibi, 10 µm kalınlığında bir sıvı Au₈₀Si₂₀ tabakasını saniyede 106 K'den daha hızlı soğutmak için sıçratmalı su verme (splat quenching) yöntemini kullanmış ve böylelikle kristal olmayan katı bir metal elde edilebildiğini doğrulamıştır. Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde keşfedilen bu metalik camlar, çelik ve diğer yüksek mukavemetli alaşımlara kıyasla nispeten daha düşük yoğunlukta, çok yüksek çekme mukavemeti, sertlik, elastik gerilme sınırı [3-6], mükemmel korozyon direnci, üstün yumuşak manyetik özellikler, iyi bir aşınma direnci ve etkileyici elektro katalitik performans yanında yüksek akma mukavemeti de sergileyen tamamen yeni bir malzeme olarak sınıflandırılmıştır [7-19]. Tablo 1'de metalik camların özellikleri kısaca özetlenmiştir.

Duwez ve ekibinin bu önemli araştırmasından birkaç yıl sonra Chen ve Turnbull Pd-Si-(Ag, Cu veya Au) içeren üçlü alaşımdan amorf metaller üretmeyi başarmışlardır [21]. Büyüklüğü 0.5 mm çapında olan Pd_{77.5}Cu₆Si_{16.5} alaşımı camsı hale getirilerek bir camsı geçiş sıcaklığının varlığı gösterilmiştir. Bazı üçlü Pd-Cu-Si ve Pd-Ag-Si alaşımlarında ilk kristalleşme sıcaklığı ile camsı geçiş sıcaklığı arasındaki fark 40 K'ye ulaşmış ve bu durum metalik camlarda kristalleşme üzerine detaylı çalışma yapılmasının önünü açmıştır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta:burcu.tauscher@ogr.sakarya.edu.tr

Tablo 1. Metalik camların özellikleri [20]. (Table 1. Properties of metallic glasses [20].)

Genel	Tane ve faz sınırları gibi mikroyapısal özelliklerin olmaması, atomik ölçeğe yakın özelliklere sahip bileşenlere izin verir.
Mekanik	Yüksek sertlik, iyi aşınma direnci, yüksek akma dayanımı, çok yüksek kırılma tokluğu, düşük mekanik sönümlenme (düşük dağılım kayıpları)
Termal	Bazı metalik camlar için $T_g \ll T_c$, süper soğutulmuş sıvı olarak işlemeye izin verir (termo-plastik şekillendirme: enjeksiyon kalıplama, sıcak presleme, vb.). T_g : camı geçiş sıcaklığı, T_c : kristalleşme sıcaklığı
Elektriksel	Direnç neredeyse sıcaklıktan bağımsızdır
Manyetik	Yüksek manyetik geçirgenlik
Kimyasal	Yüksek korozyon direnci ve işlenebilirlik, düşük katılaşma büzülmesi ve tanesiz yapı sayesinde dökümlerde yüksek hassasiyetli bitmiş ürün eldesi
Estetik	Mikroyapı eksikliği (tane, tane sınırı olmaması) nedeniyle çok yüksek yüzey kalitesi
Dayanıklılık	Yüksek sertlik ve korozyon direnci

Milimetre boyutunda üretilen ilk metalik cam Chen ve arkadaşlarının 1974 yılında Pd-Cu-Si dan oluşan üçlü alaşımdan elde edilmiştir. Bu boyut “kütlesel” olarak adlandırılan ilk metalik cam olarak tarihe geçmiştir. Bir milimetre çapındaki Pd-Cu-Si alaşımdan elde edilen çubuk şeklindeki kütlesel metalik camlar (KMC’ler) üretmek için 103 K/s gibi düşük bir soğutma hızı uygulanmıştır [22].

Tablo 1’de aktarılan bu etkileyici özellikleri yanında metalik camların üretimi yalnızca Duwez ve ekibi tarafından gerçekleştirilen zor laboratuvar koşulları altında mümkün olsaydı, elbette kullanılabilirlikleri çok sınırlı olurdu. Bu ilk başarı, kristal yapının zorunlu olmadığını, atomların rastgele dizilimlerinin de katı bir fazda kararlı olabileceğini göstererek, termodinamik kararlılık, faz dönüşümleri ve yapısal düzenlilik gibi konuların yeniden değerlendirilmesine neden olmuştur. Bu motivasyon esasen, doğrudan uygulamalardan ziyade, malzeme fiziğine ilişkin temel bilimsel bir soruya deneysel yanıt bulma çabası olarak başlamıştır. Fakat amorf metallerin üretilebilmesi, beraberinde bu yapının sunduğu alışılmadık fiziksel ve mekanik özelliklerin keşfine olanak tanımış dislokasyon içermeyen bu yapılar, klasik kristal metallere kıyasla daha üstün özellikler sergilemişlerdir. Bu durum, o dönem hızla gelişen havacılık, elektronik ve nükleer teknoloji gibi stratejik sektörler için özel amaçlı malzeme arayışlarını da beslemiştir. Ancak bu ilk örnekler yalnızca mikron kalınlığında üretilebildiği için pratik uygulanabilirliği sınırlı kalmıştır. Bununla birlikte metalik camların ona rakip malzemelere kıyasla dezavantajlarından olan süneklik eksikliği ve doğal kırılma direnci, mühendislik malzemesi olarak kullanımlarını kısıtlayarak genel kabul görmelerini engellemiştir [4]. Buna rağmen iyi tasarlanmış bileşimlerle sıvı alaşımları mütevazı soğutma hızlarında ve nispeten büyük kesitlerde camı hale dökmek artık mümkün olmuştur.

Bu çalışmada KMC’lerin camlaşma kabiliyetleri ile tarihsel gelişim süreçleri malzeme ve üretimdeki sorunları da içerecek şekilde aktarılmış, bu alanda yapılan son çalışmaların ışığında güncel uygulama alanları da sunulmuştur. Ayrıca konu hakkında genel bir bakış açısı sunarak en çok ilgi çeken son araştırmaları derlemeyi amaçlamaktadır. Öncelikle KMC’lerin amorf

yapıları ve kronolojik gelişim süreçlerine kısaca değinilmiş, kullanılan alaşımların çeşitliliği buna bağlı olarak da malzeme özellikleri hakkında bilgi verilmiş, sonrasında kullanım alanları konusunda yapılan son çalışmalar incelenmiştir

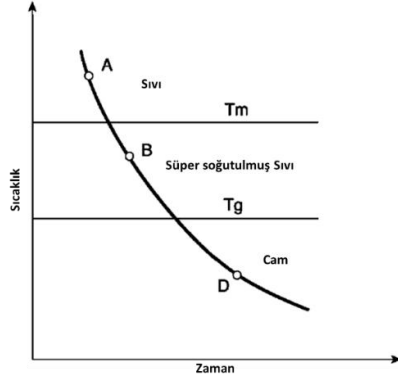
2. KÜTLESEL METALİK CAMLARIN CAMLAŞMA KABİLİYETLERİ (GLASS FORMING ABILITY OF BULK METALLIC GLASSES)

KMC’ler uzun mesafeli düzensizlikten kaynaklanan benzersiz bir dizi kimyasal ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra, düşük sıcaklıkta aşırı mukavemet ve yüksek sıcaklıkta yüksek akışkanlık gibi olağanüstü özelliklere sahip yeni bir yapısal ve işlevsel malzeme sınıfını temsil etmektedirler. Bu sebeple tarihsel gelişim süreçlerini ele almadan önce, KMC’lerin yapısal özellikleri, camlaşma kabiliyetleri, kullanılan alaşımların bileşen çeşitliliği ve bunların üretim aşamasındaki önemini açıklamak, gelişim basamaklarını anlamak açısından faydalı olacaktır.

Sıvı haldeki erimiş metalin katı bir malzemeye dönüşümü kristalleşme sürecinin tamamlanması ile mümkün olmakla birlikte; bu süreç soğutma hızı üzerinden değiştirilebilir, soğutma hızı ne kadar hızlı olursa, süre o kadar kısaldı ve katılaşmış metaldeki tane boyutu o kadar küçüldü. Bu sebeple soğutma hızının çok yüksek değerlere çıkarılması durumunda katılaşma çok kısa bir zaman aralığında gerçekleşmeli ve bu da sonsuz küçük tane boyutuna yol açmalıdır. Böylelikle kristalleşme bastırılabilir ve oluşması tamamen engellenebilir. Bu hızlı soğutma işleminin sonucu olarak sıvı metal kristalleşme yoluyla değil, vitrifikasyon (vitrifikasyon, kristalleşme olmadan katılaşma anlamına gelir) yoluyla katı bir cama dönüşmektedir. Oluşan camı yapı rastgele kümelerin paketlenmesine dayanan atomik düzenlemelere sahiptir ve çok atomlu alaşımlar veya yönlü atomik bağlar gibi özel koşullar sağlandığında vitrifikasyon nispeten yavaş soğutma hızlarında da gerçekleşebilir.

Kristal fazların çekirdeklenmesini bastırabilmek için çok yüksek soğutma hızlarına ihtiyaç duyan geleneksel amorf alaşımlardan farklı olarak, KMC’ler nispeten düşük

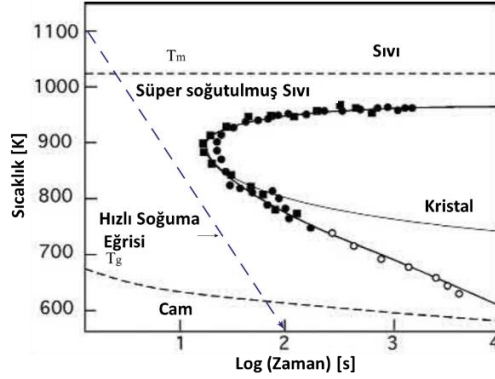
kritik soğutma hızlarında üretilebilirler. KMC'ler bilinen soda-kireç camları da dahil olmak üzere diğer camlar tarafından paylaşılan amorflik ve yüksek mukavemet gibi bir dizi özelliğe sahiptir. Bununla birlikte, diğer camlar gibi KMC'leri genel amorf malzemelerden ayıran en önemli özellik, aşırı (Süper) soğutulmuş sıvıları (SSS) yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa soğutulduğunda camsı yapıya dönüştüren cam geçişidir [23]. Hızlı



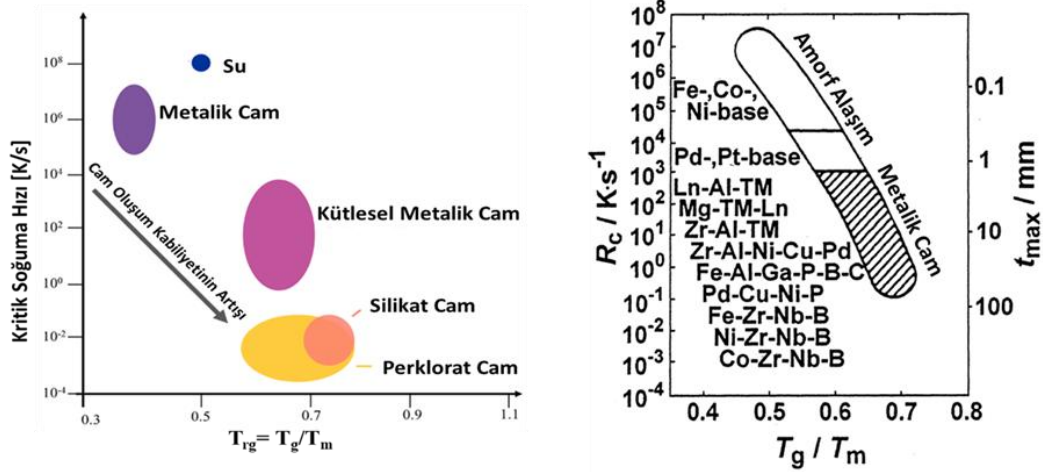
Şekil 1. (a). Katılaştırma sürecindeki bir sıvının şematik soğuma eğrisinin bir kısmı; Tm dengedeki ergime sıcaklığı, Tg camsı geçiş sıcaklığı (b). ZrTiCu-NiBe (Vitalloy I) KMC için deneysel olarak belirlenmiş bir TTT diyagramı [20]. (Figure 1. (a) Part of a schematic cooling curve of a liquid in the solidification process; Tm is the equilibrium melting temperature, Tg is the glass transition temperature (b) An experimentally determined TTT diagram for ZrTiCu-NiBe (Vitalloy I) KMC [20].

Vitrifikasyonun soğutma hızına bağlı olarak değişimini gösteren zaman-sıcaklık dönüşümü (Time temperature transformation TTT) diyagramı Şekil 1.b' de gösterilmiştir. Diyagramın sıvı, SSS, kristal ve cam olarak dört bölümden oluştuğunu ve her bir bölgenin farklı davranış ve özelliklere sahip olduğunu söyleyebiliriz. TTT diyagramında gösterilen önemli özelliklerden biri de SSS bölgesini kristal katı bölgesinden ayıran sağ taraftaki C-şekilli eğrilerdir. Sabit bir kristalleşme sıcaklığında kristalleşme sürecinin başlama ve tamamlanma zamanının tahmin edilmesini ve bununla birlikte kristalleşmeyi önlemek ve alaşımın vitrifikasyonunu sağlamak için minimum soğutma hızının bulunması için kullanılan TTT diyagramları birçok alaşım için türetilmiştir. Metalik camlar bilimsel olarak, düşük sıcaklıkta aşırı mukavemet ve yüksek sıcaklıkta yüksek esneklik gibi benzersiz özelliklerinin yanı sıra camsı geçiş sıcaklığında (Tg) aniden değişen termodinamik ve fiziksel özelliklerinden kaynaklanan bir cam geçişi sergileyen amorf alaşımlar olarak tanımlanır [23]. Metalik bir eriyik denge koşulları altında soğutulduğunda en düşük enerji durumunu benimser, bu da belirli bir derecede düşük soğutma sonrasında kristalleştiği anlamına gelir [24,25]. Şematik bir sürekli soğutma dönüşümü (continuous cooling transformation CCT) diyagramında kristalleşme, soğutma hızı eğrisinin kristal "burnu" ile kesişmesiyle gösterilir. Bir metalik eriyiğin kristalleşmesini önleyerek camsı yapıda olmasını sağlamak için eriyiğin daha hızlı, yani kritik değer olan Tg'yi aşan oranlarda soğutulması gerekir. Bunun yanında alaşımı oluşturan bileşenlerin

soğutma sırasında sıvının sıcaklığı Şekil 1.a'da gösterildiği gibi A → B → D yolunu izler. Burada Tm dengedeki ergime sıcaklığını Tg ise camsı geçiş sıcaklığını göstermektedir. Soğutma hızı yeterince hızlıysa, A-B-D yolunu izleyerek çekirdeklenme ve kristal büyümesinin gerçekleşmesi engellenir ve SSS'nin camsı bir katıya vitrifikasyonu gerçekleşir [20].



kristalleşme güçlerinin düşük olması [26] ile soğuma esnasında atomik yeniden düzenlemeleri engellemek için yapısal devitrifikasyon (Devitrifikasyon, cam / amorf bir katı fazın zamanla veya ısı etkisiyle kristal yapıya dönüşmesi sürecidir.) yavaşlatılmalıdır [24,27,28]. Kristalleşmenin itici gücü termodinamik bir özellikken, yapısal gevşeme sistemin kinetiğini temsil eder ve bu durum mikroskobik olarak aşırı soğutulmuş eriyiğin viskozitesine yansır [30, 31,32]. Hem termodinamik hem de kinetik parametreler eriyiğin kristalleşmeye karşı direncini etkiler ve CCT diyagramındaki kristalin faz alanını daha uzun sürelere kaydırır [29]. Bu da kritik soğuma hızının azaldığı ve sonuç olarak sistemin camlaşma kabiliyetinin, yani camsı olma eğiliminin arttığı anlamına gelmektedir. Inoue'nin kriterlerine göre [5] KMC'lerde yüksek cam oluşum kabiliyeti elde etmek için üç temel koşul karşılanmalıdır. Bunlardan ilki sistemin spesifik atomik uyumsuzluğa ve negatif karışım entalpisine sahip en az üç bileşen içermesini, ikincisi soğutma hızlarının düşük tutulması gerektiğini (<103 K/s) ve son olarak üçüncüsü ise elde edilen cam, camsı geçiş sıcaklığı (Tg) ile kristalleşme başlangıç sıcaklıkları arasında geniş bir aşırı soğutulmuş sıvı bölgeye (SSS) sahip olunması gerektiğidir. KMC'lerin üretimi camlaşma kabiliyetlerine bağlı olarak önce nispeten pahalı metalik esaslı Pd, Pt ve Au alaşımları ile başlamış sonra Zr, Ti, Ni ve Ln esaslı alaşımlar ile devam etmiştir. Sonrasında çok daha ucuz olan Fe ve Cu esaslı KMC'ler geliştirilmiş ve geniş uygulama alanları dolayısıyla yoğun ilgi görmüşlerdir. Yeni bileşimlerin araştırılması, farklı malzemelerin



Şekil 2. (a). Farklı malzemelerin Kritik soğutma hızları (R_c), azaltılmış camı geçiş sıcaklıkları ($T_{rg} = T_g/T_m$, T_g camı geçiş sıcaklığı ve T_m metalin ergime sıcaklığıdır) ve buna bağlı olarak cam oluşum kabiliyetleri [33]. **(b).** R_c , T_{rg} ve cam oluşumu için maksimum numune kalınlığı (t_{max}) arasındaki ilişki [27]. (Figure 2 (a). Critical cooling rates (R_c), reduced glass transition temperatures ($T_{rg} = T_g/T_m$, T_g is the glass transition temperature, T_m is the melting temperature of the metal) the glass-forming capabilities of different materials [33]. (b). The relationship between R_c , T_{rg} and the maximum sample thickness (t_{max}) [27].)

sentezi, atomik modelleme kullanılarak cam şekillendirilebilirliğinin bilimsel olarak desteklenmesi ve üç boyutlu atomik yapıların belirlenmesi yoluyla yeni dökme demir metalik camların geliştirilmesi için çalışılmaktadır. MgCuY, LaAlNi, ZrAlNiCu, ZrAlNiCu (Ti, Nb), ZrTiCuNiBe, TiNiCuSn, CuZrTiNi, NdFeCoAl, LaAlNi, FeCoNiZrNbB, FeAlGaPCB, PrCuNiAl, PdNiCuP, vb. dahil olmak üzere birçok KMC türü geliştirilmiştir. Şekil 2’de çeşitli malzemelerin cam oluşum kabiliyetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere KMC’lerin bazıları silikat camlara çok yakın camlaşma kabiliyetine sahiptirler.

Metalik camların camlaşma kabiliyetleri ve fiziksel metalürjisinin teorik arka planı hakkında daha ayrıntılı bilgiye artık birçok kaynaktan ulaşılabilir [1, 20, 34, 35,36]. KMC’lerin üretimine ilişkin deneysel verilerin çoğalması ile malzemelerin camlaşma kabiliyetindeki artışın değerlendirilmesi ve onu etkileyen faktörler konusunda çalışmalar devam edecek, farklı bilgisayar simülasyonları ve makine öğrenmesi yöntemlerinin de yardımı ile çok bileşenli alaşımların geliştirilmesi oluşum mekanizmasının derinlemesine anlaşılmasına ve hazırlama tekniklerinin geliştirilmesine bağlı olarak sürecektir [37].

3. KÜTLESEL METALİK CAMLARIN TARİHSEL GELİŞİM SÜREÇLERİ (HISTORICAL DEVELOPMENT OF BULK METALLIC GLASSES)

Çalışmanın başında da vurgulandığı gibi cam üretim tarihi çok eskilere dayanmasına rağmen; camların atomik yapıları hakkında bilimsel veriler ancak X-ışınlarının saçılma yöntemleri hakkında yetkin bilgiye ulaşıldığında anlaşılabilir [38]. Metallerin camı özellik gösterdiği alaşımlar hakkındaki ilk bilimsel çalışmanın yapılabilmesi ise 20. yüzyılın ortalarını bulmuştur. Birbirleri içinde çözünmeyen altın (Au) ve silisyum (Si),

sıvı halde karıştırıldığında, soğuma sırasında faz ayrışması gerçekleşir. Bu durumda alaşım, bileşim oranlarına bağlı olarak saf altın ve saf silisyum tanelerinden oluşan çok fazlı bir katı yapıya dönüşür. Ancak Au’nun 1337 K ve Si’nin 1687 K’lik erime noktalarına kıyasla 636 K’lik düşük bir erime noktası ile Au-Si alaşımı Si’nin yaklaşık %20 atom ağırlığında derin bir ötektik bileşim göstermiştir [20]. Bu alaşım dönen bir bakır çark (mandrel) üzerinde hızla katılaştırıldığında, katılaşmış ince şerit benzeri Au₈₀Si₂₀ alaşımının X-ışını analizinde kristalin olmadığı belirlenmiştir. Bilimsel literatüre ilk metalik amorf alaşım ya da metalik cam olarak geçen bu çalışma Duwez (Klement) ve arkadaşları [2] tarafından 1960 yılında gerçekleştirilmiştir.

Böylelikle KMC’lerin tarihsel gelişimi ilk metalik cam alaşımın elde edilmesiyle başlamış, Chen ve Turnbull’ın üçlü Pd-Si-(Ag, Cu veya Au) alaşımdan amorf yapı oluşturmayı başarımlarıyla süreç devam etmiştir [21]. Önce 1 mm kalınlığında numune üretilebilmiş ve bu ilk kütleli metalik cam olarak kabul edilebilerek literatüre geçmiştir [22]. Bundan birkaç yıl sonra da Au₅₅Pb_{22.5}Sb_{22.5} alaşımı kullanılarak biraz daha yüksek bir kritik döküm kalınlığı elde edilebilmiştir [32]. 5 mm çapında camı Pd₄₀Ni₄₀P₂₀ şeritleri elde etmek için numuneler yüzey aşındırma işlemine tabi tutularak bir dizi ısıtma-soğutma çevrimi uygulanmış ve heterojen çekirdeklenmenin azaltılması başarılmıştır. Deneyle, heterojen çekirdeklenme bastırıldığında $T_g \approx 2/3 T_m$ değerine ulaşıldığını göstermiştir. KMC, 10 K/s mertebesindeki soğutma hızlarında katılaştırılmıştır. Başlangıçta kullanılan çok yüksek soğutma hızlarına kıyasla nispeten düşük soğutma hızıyla Pd bazlı bir KMC oluşumu heyecan verici bir başarı olmasına rağmen Pd metalinin yüksek maliyeti üretim aşamasında bir dezavantaj yaratmış dolayısıyla üretim akademik çalışmaların dışına çıkamamıştır. 1984 yılında aynı grup

Pd-Ni-P eriyiğini bor oksit akısı içinde işleyerek kritik döküm kalınlığını 1 cm'ye çıkarabilmiştir [39].

Inoue ve grubu, Al ve demirli metaller ile nadir toprak malzemelerini araştırmış ve bu sistemlerde hızlı katılaşmayı incelerken, La-Al-Ni ve La-Al-Cu alaşımlarının olağanüstü camlaşma yeteneğini keşfetmişlerdir [40]. Çapı 5 mm'ye kadar olan silindirik numuneler veya benzer kalınlıktaki levhalar, Cu kalıplara dökülerek tamamen camı hale getirilebilmiştir. 1991 yılında aynı grup, Mg65Cu25Y10'dan elde edilen en büyük camlaşma kabiliyetine sahip camı Mg-Cu-Y ve Mg-Ni-Y alaşımlarını geliştirmiştir [41]. Aynı zamanda Inoue grubu, yüksek cam oluşturma kabiliyetine ve termal kararlılığa sahip Zr bazlı Zr-Al-Ni-Cu alaşımlarını da geliştirmiştir [42]. Bu alaşımlarda kritik döküm kalınlığı 15 mm'ye kadar değişmiş ve aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi Zr65Al17.5Ni10Cu17.5 alaşımı için 127 K'e kadar uzatılmıştır.

1990'ların başında dökme metalik cam bileşimlerini araştırmaya başlayan Peker ve Johnson 1993 yılında genellikle Vitreloy 1 (Vit1) [43] olarak adlandırılan ve kritik döküm kalınlığı birkaç santimetre olan $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}[(Zr_3Ti)_55(Be_9Cu_5Ni_4)]_45$ dördü alaşımı geliştirmiştir. 1997'de Inoue grubu Pd40Ni40P20 alaşımını yeniden inceleyerek %30 Ni yerine Cu kullanarak kritik döküm kalınlığı 72 mm olan bir alaşım geliştirmiştir [44].

KMC'lerin oluşumunu sağlayabilecek çok bileşenli alaşım sistemleri konusuna odaklanan araştırmacılar atom boyutlarındaki farklar ve karışım entalpisi sayesinde, hızlı soğuma sırasında kristal yapıların oluşumunu engelleyebilmiş [40,45], bu malzemelerin üstün mekanik dayanımlarının yanında kırılma ve sınırlı süneklik gibi yapısal sorunlarının farklı alaşım kompozisyonları üzerinde çalışarak kayma bantlarının oluşumu gibi deformasyon mekanizmalarını anlamaya çalışmışlardır [46].

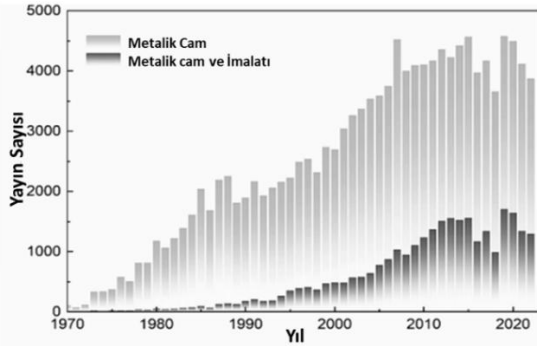
2000'li yılların başından itibaren, Pd, Cu, Ti ve Fe esaslı farklı KMC alaşım sistemleri keşfedilmiş, bu sistemler, yüksek korozyon direnci (Pd bazlı) ve manyetik özellikler (Fe bazlı) gösteren özel uygulamalar için uyarlanmış ve benzersiz özellikler sunmuştur [47-50]. KMC'lerin amorf matris yapılarına kristal fazlar veya ikincil parçacıklar farklı yöntemler kullanılarak eklenmiş, bu yolla süneklik ve toklukları artırılmaya çalışılmıştır [51]. Yapılan çalışmalarda üretilen KMC boyutları her ne kadar büyütüldüyse de bu durum kayma bandı sebebiyle yaşanan zorlukları daha belirgin hale gelmiştir [52-54]. Bu sorunu gidermek amacıyla KMC'lerin camı yapılarında plastisite oluşturup aynı zamanda mukavemetlerini koruyabilecekleri yeni yapılar araştırılmıştır [55-58]. Bunu gerçekleştirebilmek için camın çok küçük ölçekte (nano boyutta) plastisite sergileme kabiliyetinden faydalanılmış [59,60], kayma bandı oluşumu ve yayılımına harici kompozit malzemelerden engeller eklenmiş [61,62], kayma bantlarının kendiliğinden veya dışarıdan destek verilerek

çoğalması engellenmiştir [63,64]. Bunların dışında ya katılaşma sırasında kırılma camı matrisinde sünek fazların oluşumunun (in situ kompozitler) araştırılması yoluna gidilmiş [65-68] veya sünek bir kristal faz içerisinde dönüşüm gerçekleştirilmeye çalışılmıştır [69-72]. Sünek faza sahip KMC kompozitlerinin temel üretim yöntemi olarak ya yerinde katılaşma sırasında [73-79] ya da katılaşmış camı eriyiğin ısıtılması sırasında devitrifikasyon [80-84] gerçekleştirilmiştir.

Endüstriyel uygulamalar ve teknolojik atılımlar yeni işleme teknikleri gelişmesinin önünü açmış ve spark plazma sinterleme, enjeksiyon kalıplama ve seçici lazer eritme gibi tekniklerin geliştirilmesi, karmaşık şekiller ve yapılar için KMC'lerin üretimine olanak sağlamıştır. Bu gelişme, KMC'lerin araştırmadan endüstriyel uygulamalara taşınmasında kritik bir adım olmuştur. Her ne kadar geleneksel yöntemlerle Nishiyama ve arkadaşları tarafından 2012 yılında 80 mm çapında ve 85 mm uzunluğunda KMC'lerin üretimi mümkün olsa da bu maksimum çap ve uzunluk hala herhangi bir yapısal mühendislik uygulamasında kullanılabilecek memnuniyet sınırından uzaktır [85]. KMC'lerin uygulama alanlarını kısıtlayan bu durum özellikle büyük makine parçalarının yapımında kullanılmalarına yönelik uygulamaları ciddi ölçüde sınırlamaktadır. Döküm KMC'lerin sınırlı camı oluşum kabiliyetleri ve boyut kısıtlamalarının üstesinden gelmek için pratik ve umut verici bir yaklaşım olarak alaşım eriyiği yerine tozlar, şeritler, folyolar veya küçük boyutlu dökme numuneler gibi metalik cam malzemelerin kullanılmasını ve bunları istenen forma dönüştürmek için 3D baskı ve kaynak gibi çeşitli işleme tekniklerinin uygulanması öngörülmüştür. Mahbooba ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları yayında kritik döküm kalınlığından 15 kat daha büyük bir ölçekte amorf bir demir alaşımı üretmeyi başardıklarını duyurmuş ve bunun için 3 boyutlu baskı tekniği olan lazer tabanlı toz yatağı katkılı üretimi kullandıklarını belirtmişlerdir [86]. 3D baskı olarak da adlandırılan bu eklemeli üretim (aditive manufacturing), KMC bileşenlerinin üretimi için umut verici bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. Katman katman biriktirme işlemi, benzeri görülmemiş bir tasarım esnekliği ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip karmaşık yapılar üretme yeteneği de sunmaktadır. Lazer tabanlı eklemeli üretim ve ultrasonik eklemeli üretim gibi çeşitli eklemeli üretim yöntemleri bulunmaktadır.

Biçimlendirici üretim yaklaşımları, KMC'leri yüksek sıcaklıklardaki viskoz davranışları aracılığıyla şekillendirmeye odaklanmaktadır. Bunlar arasında termoplastik deformasyon ve toz sinterleme gibi karmaşık geometrilerin ve özel mikro yapıların üretilmesine olanak tanıyan teknikler yer almaktadır. Bu yaklaşımlara ek olarak, kaynak ve birleştirme teknikleri, mühendislik uygulamaları için KMC bileşenlerinin imalatında önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem sayesinde geleneksel döküm yöntemine kıyasla daha karmaşık şekillere sahip, daha büyük ve hatta sınırsız boyutlu KMC'ler elde etmek mümkün hale gelmektedir.

1970 yılından günümüze kadar olan süre boyunca KMC'lerin bilimsel olarak araştırmanın ötesine geçerek endüstriyel uygulamalarının da her geçen yıl arttığını Şekil 3 göstermektedir. Bu KMC'lerin geleneksel kristal metallere kıyasla önemli ölçüde gelişmiş özelliklere ve performansa sahip malzemeler olmalarına, yapılarında tane sınırları, dislokasyonlar ve segregasyon gibi yapısal kusurların bulunmaması sebebiyle pek çok alanda ihtiyaç duyulan üstün malzeme açığını kapatma konusundaki başarılarına bağlanabilir. Bunun yanında camsı yapıların anlaşılmasında oynadıkları önemli rol de bilim dünyasında yaygın bir araştırma motivasyonu uyandırmaktadır [31]. Malzeme biliminde son yıllarda sıkça kullanılmaya başlayan yapay zekâ uygulamaları KMC'lerin yeni alaşım bileşenlerinin keşfedilmesi için de kullanılmaktadır [87]. Bilgisayar destekli dizayn yöntemleri ve simülasyonlar kullanılarak atomik ve moleküler boyutta yaklaşımlar yapılmıştır [88-98].



Şekil 3. Yıllara göre metalik camlar ve üretimleri üzerine yapılan yayın sayısı [31]. (Figure 3. The number of publications on metallic glasses and their production by year [31].)

Bunların yanı sıra yapay zekâ (AI) ve makine öğrenimi (ML) teknikleri yardımıyla çeşitli bileşenlerden oluşan birçok amorf alaşım tasarlanmıştır. Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimiyle birlikte makine öğreniminin (ML) gelişmiş veri analizi yeteneği, amorf alaşımların araştırılması ve geliştirilmesi için yeni bir alan açarak alaşım bileşimi ve özellikleri arasındaki ilişkiyi kurmuş ve mükemmel cam oluşum kabiliyetine sahip yeni malzemeler öngörmüştür. [99-106]. Tahminlere göre 3 milyonu aşan ilgi çekici özelliklere sahip metalik cam kompozisyonu keşfedilebileceği ve yeni yapay zekâ algoritması geliştirmeye yönelik sağlam platformların artan kullanılabilirliği, malzeme biliminde yapay zekanın geliştirilmesini ve kullanımının önemini arttırmakta ve özellikle teori ile deneysel çalışmalar arasında uyumlu bağlantılar kurulması büyük umut vaat ettiğini göstermektedir [107]. Dolayısıyla makine öğrenmesi ve yapay zekâ ile camsı yapı karakterizasyonu ve farklı alaşım sistemlerinin keşfi üzerinde yapılan çalışmaların sayısı her geçen gün artarak çoğalmaktadır [108].

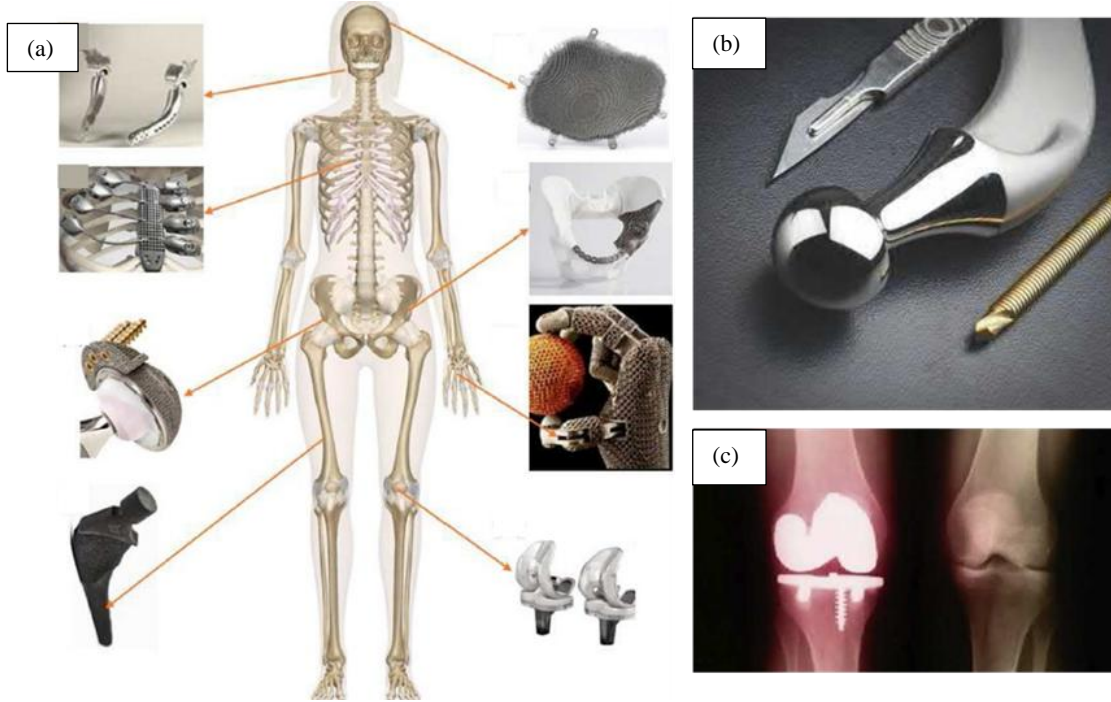
Özellikle son yıllarda birçok araştırmacı tarafından ilgi gören yüksek entropili alaşımların KMC'lerle birleştirilmesi, mükemmel termal ve mekanik özelliklere

sahip yeni malzemeler üretilmesine olanak sağlayarak dayanıklılık ve işlenebilirlik arasında bir denge kurulmasını mümkün kılmıştır [109-111]. Bunların dışında sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir KMC'ler çevresel kaygıları ve nadir ya da pahalı elementlere bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir malzemelerle KMC tasarımıya yönelik araştırmaları teşvik etmektedir [112].

4. KÜTLESEL METALİK CAMLARIN GÜNCEL UYGULAMA ALANLARI (CURRENT APPLICATION AREAS OF BULK METALLIC GLASSES)

Benzersiz özellikleri arasında yüksek akma dayanımı, elastikiyet, korozyon dayanımı, düşük elastik modül, mükemmel manyetik özellikleri ve polimer benzeri termoplastik şekillendirilebilirlikleri KMC'lerin uygulama alanlarını arttırmış, tüm diğer malzeme türlerinde olduğu gibi kolay ve başarılı bir şekilde üretilebilir ve ticarileştirilebilir olmalarına sağlamıştır. Üretim ve işlenebilirlikleri açısından çelik malzemelerle kıyaslandığında KMC'ler henüz yolun başında sayılır [113]. Her geçen gün ilerleyen ve gelişen teknoloji ve yapılan araştırmaların ışığında KMC'lerin yeni üretim ve birleşim tekniklerinin kullanılmaya başlanması farklı ve yeni uygulamalar için yaygın olarak benimsenmelerini kolaylaştırmada çok önemli bir rol oynamaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi temel olarak iki ana yaklaşımla KMC üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan ilki tipik üretim yöntemi olan döküm yoluyla doğrudan eriyikten üretim, ikincisi ise 3D baskı ve katmanlı üretiminde içinde olduğu genelde toz malzemeler kullanılarak yapılan üretimdir. Üretim aşamalarına genel bir bakış sunması açısından en çok kullanılan ve en yaygın olan yöntem olarak sıvı metal savurma metodu (Melt Spinning Method) ve düzlem akışlı döküm metodu (Planar Flow Casting Method) verilebilir. Bunların dışında termoplastik şekillendirme [114-118], toz konsolidasyonu [108], kaynak ile birleştirme [119,120] ve eklemeli üretim [121-124] yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemlerinin her biri, uygulama alanının gerektirdiği boyutlarda ve şekillerde KMC bileşenlerinin üretimini kolaylaştırarak benzersiz avantajlar sunmaktadır.

KMC'lerin araştırılmasında La, Mg ve Zr bazlı metal-metal alaşım sistemleri öncü rol oynarken; Zr, Ti ve Hf bazlı geçiş metallere dönüşen alaşım sistemleri, Lantanit metal alaşım sistemleri, Ca ve Mg gibi basit metallere dönüşen alaşım sistemleri, Pd ve Pt bazlı soy metallere dönüşen alaşım sistemleri üzerine yoğunlaşıldıktan sonra endüstriyel uygulamalardaki fiyat ve ulaşılabilirlik açısından çok daha avantajlı olan Fe, Co, Ni ve Cu bazlı alaşım sistemleri de geliştirilerek kullanım alanları genişletilmiştir [1]. Farklı alaşım sistemlerinin oluşturduğu gruplar sahip oldukları fiziksel, yapısal, manyetik, mekanik vb. özellikleriyle birbirlerinden ayrılarak kendilerine uygun kullanım alanları bulurlar. Bu alanlar arasında



Şekil 4. (a). Lazer tabanlı eklemeli üretim ile elde edilmiş KMC'lerden işlenen çeşitli implantlar: çene ve kranial implant, kaburgalar ve sternum, pelvik ve leğen kemiği implantı, el ve ayak parmakları implantları ile kalça ve diz implantları [134]. (b). Cerrahi ve dental ekipmanlar (c). Ortopedik implant [20]. (Figure 4. (a). Various implants from BMGs produced by laser beam additive manufacturing: jaw and cranial implant, ribs and sternum, pelvic implant and hip cup implant, hand and toes implants, hip and knee implant [134] (b). Surgical and dental equipment (c). Orthopaedic implant [20].

havacılık ve uzay teknolojileri, endüstriyel otomasyon sistemleri, tıp teknolojisi, savunma sanayii, elektronik sensör ve aktörler, otomotiv ve enerji sistemleri yer almaktadır. Son yıllarda yüksek yüzey kaliteleri, sertlik dereceleri ve termoplastik şekillendirilebilirlikleri KMC'lerin lüks ürünler ve mücevherat üretiminde kullanılmalarında etkili bir rol oynamıştır [125]. Uygulama alanlarının belirlenmesindeki en önemli ve etken unsurlardan biri elbette endüstriyel ihtiyaç ve talep faktörüdür. Bu bağlamda artan enerji taleplerini karşılamak için elektrokimyasal cihazların yaygın olarak ticarileştirilmesi yönündeki çalışmalar örnek olarak verilebilir. Soy metal bazlı metalik camlar olağanüstü elektrokatalitik aktivite ve dayanıklılık sergileyerek yeni nesil enerji depolama ve dönüştürme cihazları için umut verici aday malzemeler haline gelmektedir [126-128]. Düzensiz atomik konfigürasyonları, gelişmiş katalitik özelliklere katkıda bulunan karmaşık bir elektronik yapı oluşturmada bu da KMC'lerin yüksek performanslı katalizörler olarak incelenmesine yönelik ilgiyi hızla arttırmaktadır. Elektro kataliz için özel KMC sistemlerinin tasarlanması piller, mikro reaktörler, sensörler ve yakıt hücreleri gibi pek çok alanda önemli gelişmeler sağlayabilme potansiyeli taşımaktadır [129]. KMC'lerin olağanüstü biyouyumlulukları, yüksek korozyon dirençleri, amorf yapılarından kaynaklanan tane sınırları ve çökelti gibi kimyasal ayrışmalara sebep olan tipik metalürjik kusurlardan yoksun homojen yapıları ve biyomekanik özellikleri sayesinde tıbbi teknolojinin zorlu taleplerini karşılamada son derece

avantajlı oldukları kanıtlanmış, özellikle iyi osseointegrasyon yani kemik dokusuna uyumlulukları ve mevcut Ti alaşımlarından daha iyi aşınma direncine sahip olmaları sebebiyle implantlar için, çok yüksek mukavemete sahip cerrahi aletler veya trombosit agregasyonuna neden olma eğilimi olmayan stentler için kullanılabilirlikleri ispatlanmıştır [130-132].

Tüm bu pozitif özelliklerin yanında son 34 yılda geçiş metallere dönüşen alaşım sistemleri üzerine yapılan sistematik çalışmalar sayesinde Au, Pd, Pt bazı biyomalzemelere kıyasla oldukça ekonomik ve ulaşılabilir olmaları da önemli bir avantajdır. Daha önce de vurgulandığı gibi üretim boyutu ve şekline bağlı olarak döküm veya kaplama malzemeleri kullanılarak ortopedik (eklem, kemik) ve diş implantları, tıbbi cihazlar ve demirbaşların yanı sıra cerrahi ve dişçilik aletlerinin üretiminde de kullanılmaktadırlar [132,133]. Korozyon direnci, yüksek dayanıklılık ve tanecik yapıları olmadığı için çok ince ve yüksek keskinlik seviyelerinde bileylenebilirlikleri sebebiyle cerrahi aletler ve diş cihazları için önemli rol oynamaktadırlar. Magnezyum vücudun doğal bir bileşeni olduğundan ve yeni kemik oluşumuna katkıda bulunduğu için magnezyum alaşımlarından oluşan metalik camların biyolojik olarak parçalanabilen implant malzemeleri olarak büyük bir potansiyele sahip oldukları düşünülmektedir [134, 135]. Şekil 4'de Lazer tabanlı eklemeli üretim yoluyla elde edilen KMC'lerin biyomedikal alanda kullanılmakta olan uygulamaları [136] ile döküm ve kaplama yoluyla üretilmiş ekipmanları gösterilmektedir [20].



Şekil 5. (a). Zr tabanlı KMC'lerden üretilen gitar pimleri **(b).** Kulaklık muhafazası [141] **(c)** Spor malzemeleri [27, 143]. (Figure 5. (a). Guitar pins made from Zr-based BMGs **(b).** Headphone housing [141] **(c)** Sports equipment [27, 143].)

Son yıllarda önem kazanan poroz malzemeler düşük yoğunluk ve yüksek enerji sönümlenme özelliklerinden dolayı otomotiv, uzay ve savunma sanayinde ön plana çıkmaktadır. Benzersiz özelliklere sahip olan metalik köpükler yüksek gözeneklilik oranına rağmen, yüksek mukavemet, düşük ısıl iletkenlik ve yüksek enerji sönümlenme kapasitesine sahip malzemelerdir [137]. Poroz KMC'ler de biyomedikal alanda sıkça kullanılan yeni nesil malzemelerdendir. Kemik dokusuna yakın mekanik özelliklere sahip gözenekli KMC'ler doğal kemikler için ideal bir ikame olarak büyük bir potansiyel sunmaktadır [138-140]. 2024 yılında Lebrun ve arkadaşları tarafından yapılan derlemede biyoyoumluluk ve bakteriyel kolonizasyon riskini azaltmaları nedeniyle KMC'lerin dental, ortopedik ve kardiyovasküler implantlar için son derece uygun oldukları gösterilmiştir. İnce film uygulamaları geleneksel biyomalzemelerin aşınma ve korozyon direncini artırmak için kaplama olarak önerilmekte, metalik camların antibakteriyel özellikleri, özellikle hastane ortamında enfeksiyona dirençli yüzeylerin artırılması için önemli bir potansiyel sunduğu vurgulanmaktadır [141].

KMC'lerin akustik özelliklerinin de çok iyi olduğu, kaotik ses dalga yansımalarını kontrol ederek arka plan sesleri bastırıp ses tabanını daha güçlü hale getirebildikleri, enerji ve sesi eşit ve etkili şekilde ileterek aynı genliği uzun süre koruyabildikleri ve bu performanslarının diğer metalik malzemelere kıyasla çok daha iyi olduğu kanıtlanmış, böylelikle gün geçtikçe kullanım alanlarını genişletmişlerdir [112, 142]. Şekil 5 (a). Zr tabanlı KMC'lerden 2015 yılında ilk kez üretilen gitar pimleri (b) de ise 2018 yılında Sony tarafından satışa sunulan yine Zr tabanlı KMC'lerden üretilen telefon kulaklık muhafazaları gösterilmiştir. KMC'lerin bu benzersiz özelliği, işitsel deneyimi yükselterek onları müzik enstrümanlarının yapımında ve

ses ekipmanlarının geliştirilmesinde tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir. Şekil 5.(c)' de gösterilen ve 1998 yılında Dunlop firması tarafından yine Zr tabanlı KMC'ler kullanılarak üretilen golf malzemeleri ilk kez piyasaya sürülmüş ve sonrasında KMC'lerin üstün mekanik özellikleri spor aletlerinde kullanımlarını hızlandırmaya başlamıştır [27, 143].

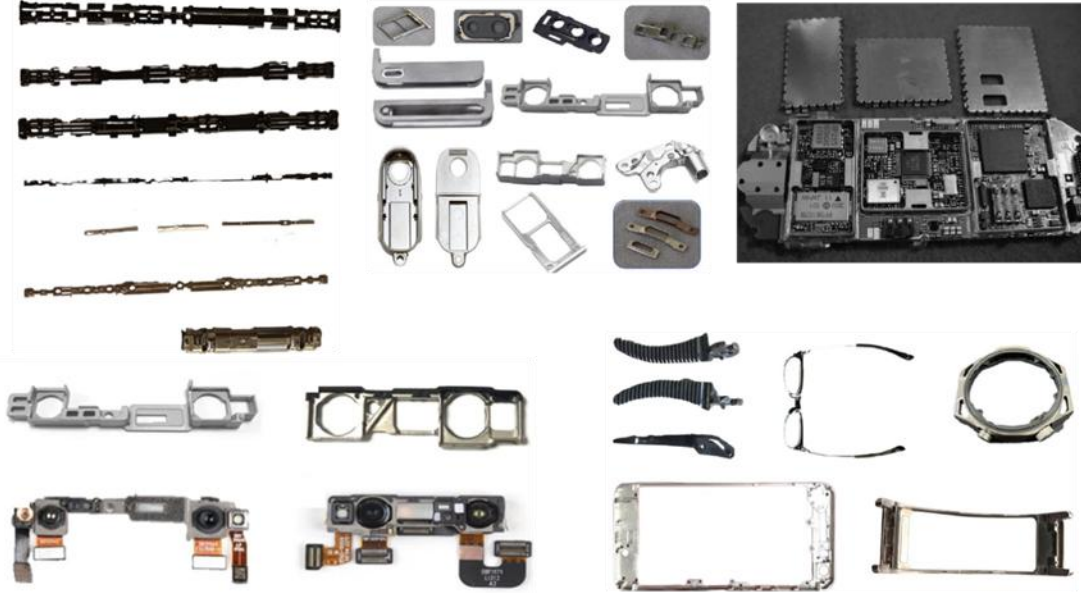
Yüksek hassasiyet, istikrarlı performans ve ince yapıyı aynı anda elde etmeyi mümkün kılan KMC'lerin birçok makine ve cihazda tork ve güç aktarımı için hayati bileşenler olarak hizmet veren dişlilerde ve sensörlerde kullanımı malzeme optimizasyonu yoluyla performans arttırmak için fırsatlar sunmaktadır [144,145].

Özellikle mikro dişliler, montaj sırasında hata payı olmadan ve yüksek tekrarlanabilirlik ve dayanıklılıkları ile saatler, mikro aktüatörler, mikro manipülatörler ve mikro harmonik sürücüler gibi kompakt uygulamalar için oldukça büyük avantajlar sunarken sergiledikleri üstün mekanik mukavemet ve aşınma direnci ile de kristal metallere yapılan mikro dişlilerden ayrılırlar [31].

Bunların dışında KMC'ler havacılık, savunma ve enerji sanayiinde olduğu kadar tüketici elektroniği, MEMS ve NEMS üretiminde, mikro ayna ve dijital ışık prosesörlerinde, otomobil sektöründe ve telekomünikasyon cihazlarında da kendine yer edinmiştir [112, 20, 31, 143]. Şekil 6' da farklı KMC'lerden üretilmiş bir çift cımbız kafası, gözlük çerçevesi, saat kalıbı ve akıllı telefon haznesi, dizüstü bilgisayarlar için manyetik koruma levhaları ve Zr-Al-Ni-Cu bazlı KMC ile yapılan akıllı saat muhafazaları ile katlanır akıllı telefonlara ait iki paneli katlamak için kullanılan bazı Zr-Al-Ni-Cu bazlı KMC parçaları gösterilmiştir [112, 143, 146]. Ayrıca KMC kompozitlerdeki son gelişmeler, malzeme bilimi araştırmalarının iki farklı alanı olan şekil hafızalı alaşımlar [147] ve metalik camların kesiştiği noktada yer almaktadır [148]. 2022'de yapılan bir

çalışmada şekil hafızalı KMC kompozitlerinin mekanik güvenilirliğini artırmak amacıyla mekanik çalışma yöntemi incelenmiştir. Araştırma uygun koşullarda yapılan mekanik çalışmanın, martensitik dönüşüm

kinetiğini optimize ederek plastik deformasyonun tekrarlanabilirliğini artırdığını ve mikroyapısal dengeyi geliştirdiğini göstermiştir [149].



Şekil 6. KMC'lerin elektronik, otomotiv ve teknik alanlardaki uygulamaları [112,146]. (Figure 6. Applications of BMGs in electronics, automotive and technical fields [112,146].)

5. SONUÇ YERİNE: GELECEK ARAŞTIRMALAR İÇİN KISA BİR ÖNGÖRÜ (SUMMARY AND OUTLOOKS FOR FUTURE RESEARCH)

KMC'ler üzerine yapılan yoğun ve sistematik araştırmalar, bu malzemelerin ticari değerini arttırsa da üretimlerinin kristal alaşımlara kıyasla daha yüksek maliyetli olması, geniş çapta ticarileşmelerinin önündeki en büyük engel olarak kalmaktadır. Ancak, üretim süreçlerinin gelişmesi ve kullanım alanlarının yaygınlaşmasıyla birlikte maliyetlerin düşmesi ve yeni pazarların açılması beklenmektedir.

KMC'ler, diğer ticari malzemelerle kıyaslandığında çok daha yüksek sertlik seviyelerine sahiptir. Bu özellik, üretim sonrası işlemleri (kesme, delme, parlatma vb.) zorlaştırarak zaman ve maliyet açısından ek yük getirmektedir. Dolayısıyla, işlenebilirliği artırmak için KMC'lerin sertliğinin belirli sınırlar içinde optimize edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, yapay zekâ tabanlı modeller, malzeme mühendisliğinde devrim niteliğinde çözümler sunarak KMC'lerin mekanik özelliklerini daha etkin bir şekilde kontrol etmeye olanak tanıyabilir.

Yapay zekâ destekli modelleme, deneylerin yeniden üretilmesini kolaylaştırarak yeni bileşimlerin tahmin edilmesini sağlayabilir. Özellikle amorf alaşım havuzlarının genişletilmesi, maliyetleri düşürecek ve üretim süreçlerini optimize edecek bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bu alanda tahmin doğruluğunun iyileştirilmesi, büyük veri bağımlılığının azaltılması, parametre optimizasyonunun geliştirilmesi

ve hedeflenen malzeme özellikleriyle doğrudan ilişkili güvenilir tanımlayıcıların belirlenmesi gibi çözülmesi gereken önemli zorluklar bulunmaktadır.

Bilimsel araştırmalardaki ilerlemelere ve artan uygulama alanlarına rağmen, KMC'lerin üretim maliyetleri hâlâ alüminyum alaşımları ve çelik gibi geleneksel ticari malzemelerden en az bir kat daha yüksektir [31]. Bu nedenle, yenilikçi ve maliyet etkin üretim yöntemlerinin keşfedilmesi, daha ekonomik KMC kompozitlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmaların teşvik edilmesi büyük önem taşımaktadır. Maliyetleri düşürmeye yönelik bu tür stratejiler, ileri mühendislik malzemeleri arasında KMC'lerin rekabet gücünü artırarak endüstride daha yaygın hale gelmelerini sağlayacaktır.

KMC'ler her ne kadar yüksek maliyetli, üretimi zor ve ticari ölçek için henüz sınırlı uygulamaya sahip olsa da bu alandaki araştırmaların devam etmesinin birkaç güçlü bilimsel, teknolojik ve stratejik gerekçesi vardır. Olağanüstü malzeme özellikleri geleneksel metallere kıyasla çarpıcı biçimde üstündür. Bu özellikler, ileri teknolojilerde (uzay, savunma, nükleer, biyomedikal) ciddi avantaj sağlar. Yüksek üretim maliyetlerine rağmen, KMC'ler yüksek performans gerektiren ve stratejik öneme sahip uygulamalarda sundukları eşsiz özellikler nedeniyle alternatifsiz kalabilmektedirler. Aynı zamanda yoğun madde fiziği ve malzeme bilimi açısından çok ilgi çekici sistemlerdir. Çünkü amorf-kristal geçişleri, cam geçişi dinamiği, süper soğutulmuş sıvı fazların kararlılığı, termodinamik olarak kararsız faz yapıları gibi temel fiziksel süreçler bu sistemler üzerinde

incelenebilir. Yani, yalnızca uygulama için değil, bilimsel bilgi üretimi için de kritik sistemlerdir. Her ne kadar bazı mühendislik uygulamalarında çelik, alüminyum alaşımları veya titanyum gibi alternatifler daha uygun görünse de özellikle korozyon dayanım üstünlükleri ile KMC'ler, daha küçük hacimlerde çok daha fazla işlev sunabilirler. Amorf yapıdaki KMC'ler işlenebilirlik açısından net kontur, yüksek yüzey kalitesi sağlamaktadır. Mikro-ölçekli parça üretiminde, kalıpta cam gibi şekil alabilmesi sayesinde yüksek hassasiyetli üretim yapılabilir (medikal implantlar, hassas dişliler, mikro motor parçaları).

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Esra Burcu YARAR TAUSCHER: Makalenin araştırma ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Nil TOPLAN: Makalenin araştırma ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Miller, M., & Liaw, P. (Eds.). "Bulk metallic glasses: an overview." *Springer Science+Business Media, LLC*, 978-0-387-48920-9, (2008).
- [2] Klement, W., Willens, R. H., & Duwez, P. "Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys." *Nature*, 187(4740):869-870, (1960).
- [3] Telford, M. "The case for bulk metallic glass." *Materials Today*, 7(3):36-43, (2004).
- [4] Schuh, C. A., Hufnagel, T. C., & Ramamurty, U. "Mechanical behavior of amorphous alloys." *Acta Materialia*, 55(12):4067-4109, (2007).
- [5] Inoue, A., & Takeuchi, A. "Recent development and application products of bulk glassy alloys." *Acta Materialia*, 59(6):2243-2267, (2011).
- [6] Wang, W. H. "The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses." *Progress in Materials Science*, 57:487-656, (2012).
- [7] Demetriou, M. D., Launey, M. E., Garrett, G., Schramm, J. P., Hofmann, D. C., Johnson, W. L., et al. "A damage-tolerant glass." *Nature Materials*, 10:123-128, (2011).
- [8] Pampillo, C. A. "Flow and fracture in amorphous alloys." *Journal of Materials Science*, 10:1194-1227, (1975).
- [9] Jiang, L., Bao, M., Dong, Y., Yuan, Y., Zhou, X., & Meng, X. "Processing, production and anticorrosion behavior of metallic glasses: a critical review." *Journal of Non-Crystalline Solids*, 612:122355, (2023).
- [10] McHenry, M. E., Willard, M. A., & Laughlin, D. E. "Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets." *Progress in Materials Science*, 44:291-433, (1999).
- [11] Silveyra, J. M., Ferrara, E., Huber, D. L., & Monson, T. C. "Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world." *Science*, 362:eaa0195, (2018).
- [12] Li, H. X., Lu, Z. C., Wang, S. L., Wu, Y., & Lu, Z. P. "Fe-based bulk metallic glasses: glass formation, fabrication, properties and applications." *Progress in Materials Science*, 103:235-318, (2019).
- [13] Li, X., Zhou, J., Shen, L., Sun, B., Bai, H., & Wang, W. "Exceptionally high saturation magnetic flux density and ultra-low coercivity via an amorphous-nanocrystalline transitional microstructure in a FeCo-based alloy." *Advanced Materials*, 2205863, (2022).
- [14] Ma, M. Z., Liu, R. P., Xiao, Y., Lou, D. C., Liu, L., Wang, Q., et al. "Wear resistance of Zr-based bulk metallic glass applied in bearing rollers." *Materials Science and Engineering A*, 386:326-330, (2004).
- [15] Sun, F., Deng, S., Fu, J., Zhu, J., Liang, D., Wang, P., et al. "Superior high-temperature wear resistance of an Ir-Ta-Ni-Nb bulk metallic glass." *Journal of Materials Science and Technology*, 158:121-132, (2023).
- [16] Sun, C., Hu, Y. C., & Sun, C. "Functional applications of metallic glasses in electrocatalysis." *ChemCatChem*, n/a, (2019).
- [17] Jiang, R., Da, Y., Chen, Z., Cui, X., Han, X., Ke, H., et al. "Progress and perspective of metallic glasses for energy conversion and storage." *Advanced Energy Materials*, 12:2101092, (2022).
- [18] Wang, Z. J., Li, M. X., Yu, J. H., Ge, X. B., Liu, Y. H., & Wang, W. H. "Low-iridium-content IrNiTa metallic glass films as intrinsically active catalysts for hydrogen evolution reaction." *Advanced Materials*, 32:1906384, (2020).
- [19] Yan, Y., Wang, C., Huang, Z., Fu, J., Lin, Z., Zhang, X., et al. "Highly efficient and robust catalysts for the hydrogen evolution reaction by surface nano engineering of metallic glass." *Journal of Materials Chemistry A*, n/a, (2021).
- [20] Stachurski, Z. H., Wang, G., & Tan, X. "An introduction to metallic glasses and amorphous metals." *Elsevier*, 978-0-12-819418-8, (2021).
- [21] Chen, H. S., & Turnbull, D. "Formation, stability and structure of palladium-silicon based alloy glasses." *Acta Metallurgica*, 17:1021, (1969).
- [22] Chen, H. S. "Thermodynamic considerations on the formation and stability of metallic glasses." *Acta Metallurgica*, 22:1505-1511, (1974).
- [23] Chen, M. "A brief overview of bulk metallic glasses." *NPG Asia Materials*, 3:82-90, (2011).
- [24] Turnbull, D. "Under what conditions can a glass be formed?" *Contemporary Physics*, 10(5):473-488, (1969).
- [25] Johnson, W. L. "Thermodynamic and kinetic aspects of the crystal to glass transformation in metallic materials." *Progress in Materials Science*, 30(2):81-134, (1986).
- [26] Greer, A. L., & Ma, E. "Bulk metallic glasses: at the cutting edge of metals research." *MRS Bulletin*, 32:611-619, (2007).

- [27] Inoue, A. "Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys." *Acta Materialia*, 48(1):279–306, (2000).
- [28] Wang, W. H., Dong, C., & Shek, C. H. "Bulk metallic glasses." *Materials Science and Engineering R: Reports*, 44(2–3):45–89, (2004).
- [29] Johnson, W. L. "Bulk glass-forming metallic alloys: science and technology." *MRS Bulletin*, 24(10):42–56, (1999).
- [30] Pauly, S., et al. "Processing metallic glasses by selective laser melting." *Materials Today*, 16(1–2):37–41, (2013).
- [31] Sohrabi, S., Fu, J., Li, L., Zhang, Y., Li, X., Sun, F., et al. "Manufacturing of metallic glass components: processes, structures and properties." *Progress in Materials Science*, 101283, (2024).
- [32] Lee, M. C., Kendall, J. M., & Johnson, W. L. "Spheres of the metallic glass Au₅₅Pb_{22.5}Sb_{22.5} and their surface characteristics." *Applied Physics Letters*, 40:382–384, (1982).
- [33] Bravenec, A. D., & Catling, D. C. "Effect of concentration, cooling, and warming rates on glass transition temperatures for NaClO₄, Ca(ClO₄)₂, and Mg(ClO₄)₂ brines with relevance to Mars and other cold bodies." *ACS Earth and Space Chemistry*, 7(7):1433–1445, (2023).
- [34] George, T. F., Letfullin, R. R., & Zhang, G. "Bulk metallic glasses." *Nova Science Publishers*, n/a, (2011).
- [35] Gong, P., Li, M., Han, G., & Wang, X. "Physical metallurgy of metals and alloys II." *n/a*, n/a, (2024).
- [36] Rafique, M. M. A. "Bulk metallic glasses and their composites: additive manufacturing and modeling and simulation." *Walter de Gruyter GmbH & Co KG*, n/a, (2021).
- [37] Graeve, O. A., García-Vázquez, M. S., Ramírez-Acosta, A. A., & Cadieux, Z. "Latest advances in manufacturing and machine learning of bulk metallic glasses." *Advanced Engineering Materials*, 25(9):2201493, (2023).
- [38] Warren, B. E. "X-ray determination of the structure of glass." *Journal of the American Ceramic Society*, 75(1):5–10, (1992).
- [39] Kui, H. W., Greer, A. L., & Turnbull, D. "Formation of bulk metallic glass by fluxing." *Applied Physics Letters*, 45:615–616, (1984).
- [40] Inoue, A., Zhang, T., & Masumoto, T. "Al–La–Ni amorphous alloys with a wide supercooled liquid region." *Materials Transactions JIM*, 30:965–972, (1989).
- [41] Inoue, A., Kato, A., Zhang, T., Kim, S. G., & Masumoto, T. "Mg–Cu–Y amorphous alloys with high mechanical strengths produced by a metallic mold casting method." *Materials Transactions JIM*, 32:609–616, (1991).
- [42] Zhang, T., Inoue, A., & Masumoto, T. "Amorphous Zr–Al–Tm (Tm = Co, Ni, Cu) alloys with significant supercooled liquid region of over 100 K." *Materials Transactions JIM*, 32:1005–1010, (1991).
- [43] Peker, A., & Johnson, W. L. "A highly processable metallic glass–Zr₄₁Ti₁₃Cu₁₂Ni₁₀Be_{22.5}." *Applied Physics Letters*, 63:2342–2344, (1993).
- [44] Inoue, A., Nishiyama, N., & Kimura, H. "Preparation and thermal stability of bulk amorphous Pd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀ alloy cylinder of 72 mm in diameter." *Materials Transactions JIM*, 38:179–183, (1997).
- [45] Schroers, J., Johnson, W. L., & Busch, R. "Crystallization kinetics of the bulk-glass-forming Pd₄₃Ni₁₀Cu₂₇P₂₀ melt." *Applied Physics Letters*, 77(8):1158–1160, (2000).
- [46] Greer, A. L. "Metallic glasses." *Science*, 267(5206):1947–1953, (1995).
- [47] Inoue, A., Makino, A., & Mizushima, T. "Ferromagnetic bulk glassy alloys." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215:246–252, (2000).
- [48] Shen, B. L., Koshihara, H., Mizushima, T., & Inoue, A. "Bulk amorphous Fe–Ga–P–B–C alloys with a large supercooled liquid region." *Materials Transactions JIM*, 41(7):873–876, (2000).
- [49] Shen, B., Koshihara, H., Inoue, A., Kimura, H., & Mizushima, T. "Bulk glassy Co₄₃Fe₂₀Ta_{5.5}B_{31.5} alloy with high glass-forming ability and good soft magnetic properties." *Materials Transactions*, 42(10):2136–2139, (2001).
- [50] Fukumura, H., Inoue, A., Koshihara, H., & Mizushima, T. "(Fe, Co)-(Hf, Nb)-B glassy thick sheet alloys prepared by a melt clamp forging method." *Materials Transactions*, 42(8):1820–1822, (2001).
- [51] Hays, C. C., Kim, C. P., & Johnson, W. L. "Microstructure-controlled toughness in bulk metallic glasses." *Physical Review Letters*, 84(13):2901, (2000).
- [52] Trexler, M. M., & Thadhani, N. N. "Mechanical properties of bulk metallic glasses." *Progress in Materials Science*, 55(8):759–839, (2010).
- [53] Cheng, Y. Q., & Ma, E. "Atomic-level structure and structure–property relationship in metallic glasses." *Progress in Materials Science*, 56(4):379–473, (2011).
- [54] Qiao, J., Jia, H., & Liaw, P. K. "Metallic glass matrix composites." *Materials Science and Engineering R: Reports*, 100:1–69, (2016).
- [55] Hays, C. C., Kim, C. P., & Johnson, W. L. "Microstructure controlled shear band pattern formation and enhanced plasticity of bulk metallic glasses containing in situ formed ductile phase dendrite dispersions." *Physical Review Letters*, 84(13):2901–2904, (2000).
- [56] Hofmann, D. C., Suh, J. Y., Wiest, A., Duan, G., Lind, M. L., Demetriou, M. D., & Johnson, W. L. "Designing metallic glass matrix composites with high toughness and tensile ductility." *Nature*, 451(7182):1085–1089, (2008).
- [57] Hofmann, D. C. "Shape memory bulk metallic glass composites." *Science*, 329(5997):1294–1295, (2010).
- [58] Wu, Y., Wang, H., Liu, X. J., Chen, X. H., Hui, X. D., Zhang, Y., & Lu, Z. P. "Designing bulk metallic glass composites with enhanced formability and plasticity." *Journal of Materials Science and Technology*, 30(6):566–575, (2014).
- [59] Guo, H., Yan, P. F., Wang, Y. B., Tan, J., Zhang, Z. F., Sui, M. L., & Ma, E. "Tensile ductility and necking of metallic glass." *Nature Materials*, 6(10):735–739, (2007).
- [60] Jang, D., & Greer, J. R. "Transition from a strong-yet-brittle to a stronger-and-ductile state by size reduction of metallic glasses." *Nature Materials*, 9(3):215–219, (2010).

- [61] Choi-Yim H. "Synthesis and characterization of bulk metallic glass matrix composites." *California Institute of Technology*, Pasadena, CA, (1998).
- [62] Choi-Yim H., Conner R.D., Szuecs F., Johnson W.L. "Processing, microstructure and properties of ductile metal particulate reinforced Zr₅₇Nb₅Al₁₀Cu_{15.4}Ni_{12.6} bulk metallic glass composites." *Acta Materialia*, 50(10):2737–2745,(2002).
- [63] Lee J.C., Kim Y.C., Ahn J.P., Lee S., Lee B.J. "Strain hardening of an amorphous matrix composite due to deformation-induced nanocrystallization during quasistatic compression." *Applied Physics Letters*, 84(15):2781–2783, (2004).
- [64] Trexler M.M., Thadhani N.N. "Mechanical properties of bulk metallic glasses." *Progress in Materials Science*, 55(8):759–839,(2010).
- [65] Pauly S., Gorantla S., Wang G., Kuhn U., Eckert J. "Transformation-mediated ductility in CuZr-based bulk metallic glasses." *Nature Materials*, 9(6):473–477, (2010).
- [66] Song K.K., Pauly S., Zhang Y., Li R., Gorantla S., Narayanan N., Kuhn U., Gemming T., Eckert J. "Triple yielding and deformation mechanisms in metastable Cu_{47.5}Zr_{47.5}Al₅ composites." *Acta Materialia*, 60(17):6000–6012,(2012).
- [67] Wu Y., Xiao Y., Chen G., Liu C.T., Lu Z. "Bulk metallic glass composites with transformation-mediated work-hardening and ductility." *Advanced Materials*, 22(25):2770–2773,(2010).
- [68] Wu D.Y., Song K.K., Gargarella P., Cao C.D., Li R., Kaban I., Eckert J. "Glass-forming ability, thermal stability of B2 CuZr phase, and crystallization kinetics for rapidly solidified Cu-Zr-Zn alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, 664:99–108,(2016).
- [69] Kim C.P., Oh Y.S., Lee S., Kim N.J. "Realization of high tensile ductility in a bulk metallic glass composite by the utilization of deformation-induced martensitic transformation." *ScriptaMaterialia*, 65(4):304–307,(2011).
- [70] Gao W.H., Meng X.L., Cai W., Zhao L.C. "Effects of Co and Al addition on martensitic transformation and microstructure in ZrCu-based shape memory alloys." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(3):850–855,(2015).
- [71] Song H., Shi R., Wang Y., Hoyt J.J. "Simulation study of heterogeneous nucleation at grain boundaries during the austenite-ferrite phase transformation: comparing the classical model with the multi-phase field nudged elastic band method." *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1–9, (2016).
- [72] Zhai H., Wang H., Liu F. "A strategy for designing bulk metallic glass composites with excellent work-hardening and large tensile ductility." *Journal of Alloys and Compounds*, 685:322–330,(2016).
- [73] Pekarskaya E., Kim C.P., Johnson W.L. "In situ transmission electron microscopy studies of shear bands in a bulk metallic glass based composite." *Journal of Materials Research*, 16(9):2513–2518,(2001).
- [74] Fan C., Ott R.T., Hufnagel T.C. "Metallic glass matrix composite with precipitated ductile reinforcement." *Applied Physics Letters*, 81(6):1020–1022, (2002).
- [75] Hu X., Ng S.C., Feng Y.P., Li Y. "Glass forming ability and in-situ composite formation in Pd-based bulk metallic glasses." *Acta Materialia*, 51(2):561–572, (2003).
- [76] Zhang Q., Zhang H., Zhu Z., Hu Z. "Formation of high strength in-situ bulk metallic glass composite with enhanced plasticity in Cu₅₀Zr_{47.5}Ti_{2.5} alloy." *Materials Transactions*, 46:n/a, (2005).
- [77] Wu F.F., Zhang Z.F., Mao X.S., Peker A., Eckert J. "Effect of annealing on the mechanical properties and fracture mechanisms of a Zr_{56.2}Ti_{13.8}Nb_{5.0}Cu_{6.9}Ni_{5.6}Be_{12.5} bulk-metallic-glass composite." *Physical Review B*, 75(13):134201, (2007).
- [78] Zhu Z., Zhang H., Hu Z., Zhang W., Inoue A. "Ta-particulate reinforced Zr-based bulk metallic glass matrix composite with tensile plasticity." *Scripta Materialia*, 62(5):278–281, (2010).
- [79] Cheng J.L., Chen G. "Glass formation of Zr–Cu–Ni–Al bulk metallic glasses correlated with L → Zr₂Cu + ZrCu pseudo binary eutectic reaction." *Journal of Alloys and Compounds*, 577:451–455,(2013).
- [80] Chen H.S. "Ductile-brittle transition in metallic glasses." *Materials Science and Engineering*, 26(1):79–82, (1976).
- [81] Antonione, C., Spriano, S., Rizzi, P., Baricco, M., & Battezzati, L. "Phase separation in multicomponent amorphous alloys." *Journal of Non-Crystalline Solids*, 232:127–132, (1998).
- [82] Fan, C., & Inoue, A. "Ductility of bulk nanocrystalline composites and metallic glasses at room temperature." *Applied Physics Letters*, 77(1):46–48, (2000).
- [83] Gu, J., Song, M., Ni, S., Guo, S., & He, Y. "Effects of annealing on the hardness and elastic modulus of a Cu₃₆Zr₄₈Al₈Ag₈ bulk metallic glass." *Materials & Design*, 47:706–710, (2013).
- [84] Krämer, L., Kormout, K. S., Setman, D., Champion, Y., & Pippin, R. "Production of bulk metallic glasses by severe plastic deformation." *Metals*, 5(2):720–729, (2015).
- [85] Nishiyama, N., Takenaka, K., Miura, H., Saidoh, N., Zeng, Y., & Inoue, A. "The world's biggest glassy alloy ever made." *Intermetallics*, 30:19–24, (2012).
- [86] Mahbooba, Z., Thorsson, L., Unosson, M., Skoglund, P., West, H., Horn, T., et al. "Additive manufacturing of an iron-based bulk metallic glass larger than the critical casting thickness." *Applied Materials Today*, 11:264–269, (2018).
- [87] Liu, C., Wang, X., Cai, W., He, Y., & Su, H. "Machine learning aided prediction of glass-forming ability of metallic glass." *Processes*, 11(9):2806, (2023).
- [88] Cheng, J. L., & Chen, G. "Glass formation of Zr–Cu–Ni–Al bulk metallic glasses correlated with L → Zr₂Cu + ZrCu pseudo binary eutectic reaction." *Journal of Alloys and Compounds*, 577:451–455, (2013).
- [89] Perim, E., Lee, D., Liu, Y., Toher, C., Gong, P., Li, Y., et al. "Spectral descriptors for bulk metallic glasses based on the thermodynamics of competing crystalline phases." *Nature Communications*, 7:12315, (2016).
- [90] Nicholson, D. M. C., Stocks, G. M., Shelton, W. A., Wang, Y., & Swihart, J. C. "Ab initio studies of the electronic structure and energetics of bulk amorphous

- metals.” *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29:1845–1851, (1998).
- [91] Păduraru, A., Kenoufi, A., Bailey, N. P., & Schiøtz, J. “An interatomic potential for studying CuZr bulk metallic glasses.” *Advanced Engineering Materials*, 9(6):505–508, (2007).
- [92] Reyes-Retana, J. A., & Naumis, G. G. “Ab initio study of Si doping effects in Pd–Ni–P bulk metallic glass.” *Journal of Non-Crystalline Solids*, 409:49–53, (2015).
- [93] Hui, X., Fang, H. Z., Chen, G. L., Shang, S. L., Wang, Y., Qin, J. Y., & Liu, Z. K. “Atomic structure of Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5} bulk metallic glass alloy.” *Acta Materialia*, 57(2):376–391, (2009).
- [94] Ju, S. P., Huang, H. H., & Huang, J. C. C. “Predicted atomic arrangement of Mg₆₇Zn₂₈Ca₅ and Ca₅₀Zn₃₀Mg₂₀ bulk metallic glasses by atomic simulation.” *Journal of Non-Crystalline Solids*, 388:23–31, (2014).
- [95] Atta-Fynn, R., Drabold, D. A., & Biswas, P. “First principles modeling of the structural, electronic, and vibrational properties of Ni₄₀Pd₄₀P₂₀ bulk metallic glass.” *Journal of Non-Crystalline Solids: X*, 1:100004, (2019).
- [96] Weber, T. A., & Stillinger, F. H. “Local order and structural transitions in amorphous metal-metalloid alloys.” *Physical Review B*, 31(4):1954, (1985).
- [97] Tarumi, R., Ogura, A., Shimojo, M., Takashima, K., & Higo, Y. “Molecular dynamics simulation of crystallization in an amorphous metal during shear deformation.” *Japanese Journal of Applied Physics*, 39(6B):L611, (2000).
- [98] Rodríguez de La Fuente, O., & Soler, J. M. “Structure and stability of an amorphous metal.” *Physical Review Letters*, 81(15):3159–3162, (1998).
- [99] Qi, Y., Çağın, T., Kimura, Y., & Goddard, W. A. III. “Molecular-dynamics simulations of glass formation and crystallization in binary liquid metals: Cu–Ag and Cu–Ni.” *Physical Review B*, 59(5):3527, (1999).
- [100] Ren, F., Ward, L., Williams, T., Laws, K. J., Wolverton, C., Hatrick-Simpers, J., & Mehta, A. “Accelerated discovery of metallic glasses through iteration of machine learning and high-throughput experiments.” *Science Advances*, 4:eaq1566, (2018).
- [101] Xiong, J., Shi, S. Q., & Zhang, T. Y. “A machine-learning approach to predicting and understanding the properties of amorphous metallic alloys.” *Materials & Design*, 187:108378, (2020).
- [102] Lu, Z., Chen, X., Liu, X., Lin, D., Wu, Y., Zhang, Y., et al. “Interpretable machine-learning strategy for soft-magnetic property and thermal stability in Fe-based metallic glasses.” *npj Computational Materials*, 6:187, (2020).
- [103] Mastropietro, D. G., & Moya, J. A. “Design of Fe-based bulk metallic glasses for maximum amorphous diameter (D_{max}) using machine learning models.” *Computational Materials Science*, 188:110230, (2021).
- [104] Ward, L., O’Keeffe, S. C., Stevick, J., Jelbert, G. R., Aykol, M., & Wolverton, C. “A machine learning approach for engineering bulk metallic glass alloys.” *Acta Materialia*, 159:102–111, (2018).
- [105] Ward, L., Agrawal, A., Choudhary, A., & Wolverton, C. “A general-purpose machine learning framework for predicting properties of inorganic materials.” *npj Computational Materials*, 2:16028, (2016).
- [106] Liu, X., Long, Z., Yang, L., Zhang, W., & Li, Z. “Prediction of glass forming ability in amorphous alloys based on different machine learning algorithms.” *Journal of Non-Crystalline Solids*, 570:121000, (2021).
- [107] Li, Z., Long, Z., Lei, S., Zhang, T., Liu, X., & Kuang, D. “Predicting the glass formation of metallic glasses using machine learning approaches.” *Computational Materials Science*, 197:110656, (2021).
- [108] Graeve, O. A., García-Vázquez, M. S., Ramírez-Acosta, A. A., & Cadieux, Z. “Latest advances in manufacturing and machine learning of bulk metallic glasses.” *Advanced Engineering Materials*, 25(9):2201493, (2023).
- [109] Ding, H. Y., & Yao, K. F. “High entropy Ti₂₀Zr₂₀Cu₂₀Ni₂₀Be₂₀ bulk metallic glass.” *Journal of Non-Crystalline Solids*, 364:9–12, (2013).
- [110] Biswas, K., Yeh, J. W., Bhattacharjee, P. P., & DeHosson, J. T. M. “High entropy alloys: Key issues under passionate debate.” *Scripta Materialia*, 188:54–58, (2020).
- [111] Li, X. “Additive manufacturing of advanced multi-component alloys: bulk metallic glasses and high entropy alloys.” *Advanced Engineering Materials*, 20(5):1700874, (2018).
- [112] Inoue, A., Kong, F., Zhu, X., Chen, J., Men, H., & Botta, W. J. “Development and industrialization of Zr- and Fe-based bulk metallic glasses and light metal-based metastable alloys.” *Journal of Alloys and Compounds*, 979:173546, (2024).
- [113] Özçatalbaş, Y. “Çeliklerin işlenebilirliği: kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler ve işlenebilirlik ilişkisi.” *Politeknik Dergisi*, 23(2):457–482, (2020).
- [114] Schroers, J. “Processing of bulk metallic glass.” *Advanced Materials*, 22(14):1566–1597, (2010).
- [115] Sarac, B., & Eckert, J. “Thermoplasticity of metallic glasses: Processing and applications.” *Progress in Materials Science*, 127:100941, (2022).
- [116] Fu, J., & Ma, J. “Nanoengineering of metallic glasses.” *Advanced Engineering Materials*, 25(5):2200659, (2023).
- [117] Liu, Z., Liu, N., & Schroers, J. “Nanofabrication through molding.” *Progress in Materials Science*, 125:100891, (2022).
- [118] Savaedi, Z., Motallebi, R., Mirzadeh, H., & Malekan, M. “Superplasticity of bulk metallic glasses (BMGs): A review.” *Journal of Non-Crystalline Solids*, 583:121503, (2022).
- [119] Kawamura, Y. “Liquid phase and supercooled liquid phase welding of bulk metallic glasses.” *Materials Science and Engineering A*, 375:112–119, (2004).
- [120] Qiao, J., Yu, P., Wu, Y., Chen, T., Du, Y., & Yang, J. “A compact review of laser welding technologies for amorphous alloys.” *Metals*, 10(12):1690, (2020).
- [121] Zhang, C., Ouyang, D., Pauly, S., & Liu, L. “3D printing of bulk metallic glasses.” *Materials Science and Engineering R: Reports*, 145:100625, (2021).
- [122] Sohrabi, N., Jhabvala, J., & Loge, R. E. “Additive manufacturing of bulk metallic glasses—process,

- challenges and properties: a review.” *Metals*, 11(8):1279, (2021).
- [123] Lashgari, H. R., Ferry, M., & Li, S. “Additive manufacturing of bulk metallic glasses: Fundamental principle, current/future developments and applications.” *Journal of Materials Science & Technology*, 119:131–149, (2022).
- [124] Liu, H., Yang, D., Jiang, Q., Jiang, Y., Yang, W., Liu, L., & Zhang, L. C. “Additive manufacturing of metallic glasses and high-entropy alloys: Significance, unsettled issues, and future directions.” *Journal of Materials Science & Technology*, 140:79–120, (2023).
- [125] Houghton, O. S., Schmitt, L. Y., Klotz, U. E., Costa, M. B., & Greer, A. L. “Pd-and Zr-based bulk metallic glasses for jewellery applications: Scratch, wear and tarnish behaviour.” *Materials Science and Engineering A*, 924:147791, (2025).
- [126] Sekol, R. C., Kumar, G., Carmo, M., Gittleson, F., Hardesty-Dyck, N., Mukherjee, S., et al. “Bulk metallic glass micro fuel cell.” *Small*, 9(12):2081–2085, (2013).
- [127] Das, S., Santos-Ortiz, R., Arora, H. S., Mridha, S., Shepherd, N. D., & Mukherjee, S. “Electromechanical behavior of pulsed laser deposited platinum-based metallic glass thin films.” *Physica Status Solidi (A)*, 213(2):399–404, (2016).
- [128] Mukherjee, S., Sekol, R. C., Carmo, M., Altman, E. I., Taylor, A. D., & Schroers, J. “Tunable hierarchical metallic-glass nanostructures.” *Advanced Functional Materials*, 23(21):2708–2713, (2013).
- [129] Khan, M. M., Nemati, A., Rahman, Z. U., Shah, U. H., Asgar, H., & Haider, W. “Recent advancements in bulk metallic glasses and their applications: A review.” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43(3):233–268, (2018).
- [130] Bialy, M., Hasiak, M., & Łaszcz, A. “Review on biocompatibility and prospect biomedical applications of novel functional metallic glasses.” *Journal of Functional Biomaterials*, 13(4):245, (2022).
- [131] Schroers, J., Kumar, G., Hodges, T. M., Chan, S., & Kyriakides, T. R. “Bulk metallic glasses for biomedical applications.” *JOM*, 61:21–29, (2009).
- [132] Li, H. F., & Zheng, Y. F. “Recent advances in bulk metallic glasses for biomedical applications.” *Acta Biomaterialia*, 36:1–20, (2016).
- [133] Li, J., Shi, L. L., Zhu, Z. D., He, Q., Ai, H. J., & Xu, J. “Zr₆₁Ti₂Cu₂₅Al₁₂ metallic glass for potential use in dental implants: Biocompatibility assessment by in vitro cellular responses.” *Materials Science and Engineering C*, 33(4):2113–2121, (2013).
- [134] Riaz, U., Shabib, I., & Haider, W. “The current trends of Mg alloys in biomedical applications—A review.” *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 107(6):1970–1996, (2019).
- [135] Bin, S. J. B., Fong, K. S., Chua, B. W., & Gupta, M. “Mg-based bulk metallic glasses: A review of recent developments.” *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(4):899–914, (2022).
- [136] Aliyu, A. A. A., Panwisawas, C., Shinjo, J., Puncreobutr, C., Reed, R. C., Pongsiri, K., et al. “Laser-based additive manufacturing of bulk metallic glasses: Recent advances and future perspectives for biomedical applications.” *Journal of Materials Research and Technology*, 23:2956–2990, (2023).
- [137] Türker, M. “Toz metal al köpükler: üretimi, çeşitleri ve kullanım alanları.” *Politeknik Dergisi*, 27(6):2335–2356, (2024).
- [138] Zhang, C., Li, X. M., Liu, S. Q., Liu, H., Yu, L. J., & Liu, L. “3D printing of Zr-based bulk metallic glasses and components for potential biomedical applications.” *Journal of Alloys and Compounds*, 790:963–973, (2019).
- [139] Du, P., Xiang, T., Cai, Z., & Xie, G. “The influence of porous structure on the corrosion behavior and biocompatibility of bulk Ti-based metallic glass.” *Journal of Alloys and Compounds*, 906:164326, (2022).
- [140] Cai, Z., Du, P., Li, K., Chen, L., & Xie, G. “A review of the development of titanium-based and magnesium-based metallic glasses in the field of biomedical materials.” *Materials*, 17(18):4587, (2024).
- [141] Lebrun, N., Dupla, F., Bruhier, H., Prudent, M., Borroto, A., Der Loughian, C., et al. “Metallic glasses for biological applications and opportunities opened by laser surface texturing: A review.” *Applied Surface Science*, 160617, (2024).
- [142] Gao, K., Zhu, X. G., Chen, L., Li, W. H., Xu, X., Pan, B. T., et al. “Recent development in the application of bulk metallic glasses.” *Journal of Materials Science & Technology*, 131:115–121, (2022).
- [143] Suryanarayana, C., & Inoue, A. *Bulk metallic glasses*. CRC Press, (2017).
- [144] Hofmann, D. C., Polit-Casillas, R., Roberts, S. N., Borgonia, J. P., Dillon, R. P., Hilgeman, E., et al. “Castable bulk metallic glass strain wave gears: Towards decreasing the cost of high-performance robotics.” *Scientific Reports*, 6:37773, (2016).
- [145] Lu, W., Ma, J., Wang, C., & Liu, Y. “A promising application of bulk metallic glasses in torque sensor.” *Science China Technological Sciences*, 67(8):2505–2514, (2024).
- [146] Qiao, J., Jia, H., & Liaw, P. K. “Metallic glass matrix composites.” *Materials Science and Engineering R: Reports*, 100:1–69, (2016).
- [147] Acar, E., & Aydın, M. “Şekil hafıza davranışlarının termodinamiği.” *Politeknik Dergisi*, 21(1):201–211, (2018).
- [148] Hofmann, D. C. “Shape memory bulk metallic glass composites.” *Science*, 329(5997):1294–1295, (2010).
- [149] Zhao, Z., Yan, Z., Mu, J., Zhang, H., & Wang, Y. “Improving the mechanical reliability of shape memory bulk metallic glass composites by mechanical training.” *Materials Science and Engineering A*, 833:142564, (2022).