



# Kalıpcılıkta kullanılan soğuk iş takım çeliklerinin karşılaştırmalı performans analizi

## Comparative performance analysis of cold work tool steels used in mold industry

Aslan Ünal<sup>1,\*</sup> , Mehmet Masum Tünçay<sup>2</sup> , Mustafa Kelami Şeşen<sup>3</sup> , Oğuz Girit<sup>4</sup> 

<sup>1,4</sup> Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

### Öz

Çelik, metaller içerisinde en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. Birçok farklı türü olan çeliklerden soğuk iş takım çelikleri (SİTÇ) özellikle kalıp sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Son zamanlarda geleneksel SİTÇ'e ek olarak yeni nesil SİTÇ de kullanıma sunulmuştur. Bu çalışma, geleneksel ve iki adet yeni nesil SİTÇ'in zımba malzemesi olarak elektrik motorunda kullanılan rotor laminasyon silisli saclarının şekillendirilmesinde kullanımı incelenmiştir. Yeni nesil SİTÇ'in geleneksele göre daha uzun ömürlü bir kullanım imkanı sunduğu tespit edilmiştir. İlgili çeliklerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) yardımıyla incelenmiştir ve oluşturabilecekleri karbür yapıları da FactSage® 8.2 termodinamik yazılım programı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yeni nesil SİTÇ'de hem ince ve homojen dağılımlı hem de çoklu karbür yapılarının oluştuğu görülmüştür. Niobyum ve Molibden açısından da zengin karbür yapıları ile birlikte homojen yapıları ince karbür yapılarının yeni nesil SİTÇ'in sahip olduğu uzun kullanım ömrünün nedeni olduğu düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Soğuk iş takım çeliği, Malzeme seçimi, Zımba, Rotor, Karbür, FactSage

### 1 Giriş

Demir, tüm metallerin en önemlisidir. Çağımızın en popüler mühendislik malzemeleri olan çok çeşitli çeliklerin üretimi için kullanılan temel metaldir [1]. Demir önemli olsa da günlük hayatta demirden daha çok onun muhtelif farklı kompozisyonlarda alaşımları yani çelik şeklinde kullanılır [2]. Avrupa'da otomotiv endüstrisi çelik malzemelerden optimum düzeyde faydalanmak için; yeni ürünler geliştirilmesi, üretim proseslerinde yapılacak iyileştirmeler ve tasarım ile ilgili hedefler ilan etmişlerdir [3]. Otomotiv endüstrisindeki son trend, araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmak için gelişmiş yüksek dayanımlı çelik (AHSS) kullanımını arttırmaktır. Bu çeliklerin işlenmesi için, örneğin presle şekillendirme, delme, kesme gibi işlem süreçleri için kalıpcılığın ana malzemesi olan çeliklerin işlenen çeliklerden daha dayanıklı olmaları temel olarak eşzamanlı olarak gereklidir. Takım çelikleri hem çelikler,

### Abstract

Steel is one of the most widely used metals. Cold work tool steels (CWTS) are frequently preferred in the mold industry. Recently, in addition to traditional CWTS, new generation CWTS have been put into use. This study examines the use of traditional and two new generation CWTS as staple material in the pressing of rotors used in electric motors. It has been observed that the new generation CWTS offer a longer lifespan compared to the traditional ones. The microstructures were investigated using scanning electron microscope (SEM) and x-ray spectroscopy (EDS), and the carbide structures they could form were evaluated using FactSage® 8.2 thermodynamic software. It has been observed that both fine and evenly distributed and multiple carbide structures are formed in the new generation CWTS. The carbides in new generation CWTS were also rich in Niobium and Molybdenum. These were considered as the reasons for long service life of CWTS.

**Keywords:** Cold work tool steel, Material selection, Punch, Rotor, Carbide, FactSage

hem de demir dışı metaller ile plastikleri şekillendirme ve/veya kesme ve dilme işlemlerinde kullanılan alaşımlardır [4]. Genel bir kabul ile uzun yıllardır birçok uluslararası standartta yer alan, örneğin; AISI/ASTM A681: D2, TS BS EN ISO 4957: 1.2379/X153CrMo12, JIS G4404: SKD11, uygun soğuk iş takım çelikleri (SİTÇ) olarak kullanılmış ve halen yaygın olarak devam etmektedir. Alternatif olarak geliştirilen ve üreticisinin verdiği özel tanımlarla anılan yeni nesil SİTÇ ile daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bazı geleneksel ve yeni nesil SİTÇ sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Kalıp ömrü dolduktan sonra kullanılmaya devam edilirse üretilen parçalarda çapaklar oluşabilmektedir. ASTM standartına göre çapağın tanımı birbirine değen iki katı arasında özgün yüzeyde ortaya çıkan, makroskopik olarak ayırt edilebilen, genellikle yeri ve nitelikleri belli, malzeme taşınımını da içeren ve plastik şekil değiştirme ile ayırıcı özelliği tanımlanan pürüz ve çıkıntı şeklinde yüzey hasarı

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aslanunal@yandex.com (A. Ünal)

Geliş / Received: 24.02.2023 Kabul / Accepted: 29.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1255806

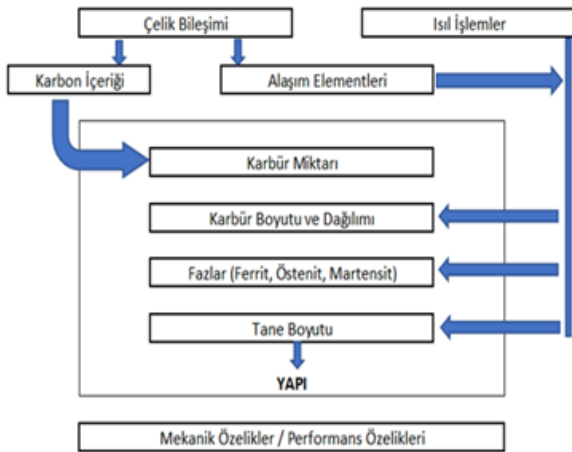
**Tablo 1.** Geleneksel Soğuk İş Takım Çelikleri (SİTÇ)

AISI A681	EN 4957	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% V	% W
D6	1.2436	2.00-2.30	0.10-0.40	0.30-0.60	11.00-13.00	-	-	0.60-0.80
D3	1.2080	1.90-2.20	0.10-0.60	0.20-0.60	11.00-13.00	-	-	-
D2	1.2379	1.45-1.60	0.10-0.60	0.20-0.60	11.00-13.00	0.70-1.00	0.70-1.00	-
O2	1.2842	0.85-0.95	0.10-0.40	1.80-2.20	0.20-0.50	-	0.05-0.20	-
S1	1.2550	0.55-0.65	0.70-1.00	0.15-0.45	0.90-1.20	-	0.10-0.20	1.70-2.20

**Tablo 2.** Yeni Nesil Soğuk İş Takım Çelikleri (SİTÇ)

KOD	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% V	Diğer %
S2	0.90	0.90	0.50	7.80	2.50	0.50	-
V2	0.50	0.90	0.45	7.20	1.40	1.20	Ni 0.30
C2	1.00	1.30	0.45	8.00	2.50	0.30	Ni 0.20
K2	1.10	1.00	0.50	8.00	2.10	0.50	Ni 0.20. Al 0.50. Nb 0.15

olarak tanımlanmaktadır [5]. Tribolojik sorunlar göz önüne alındığında takım-ış parçası etkileşimi, ürünün kalitesini, süreç performansını ve takım ömrünü etkileyen önemli bir özelliktir. İki katı yüzey arasındaki temas ve yapışma ile bir parçacığın aşındırıcılığı yüzeylerin yüksüz teması, uygulanan yükün plastik akma ve soğuk kaynağa neden olması, kayma hareketi ve uygulanan yükün gerinim sertleşmesi üretmesi ve kaynayan noktasındaki parçacıkların yer değiştirmesi ile açıklanabilir [6]. Örneğin, sac şekillendirme işlemlerinde aşınmış malzemelerin birikmesi sonucu takım temas yüzeyinde sac malzemelerin yapışma aşınmasına neden olabilir. “Çapak” olarak adlandırılan bu tribolojik problem genellikle tolerans kaybına neden olur ve ürün kalitesini etkiler. Yapışma aşınması eğiliminin çeliğin kalitesine, yani takım çeliğinin kimyasal ve faz yapısına doğrudan bağlı olduğu bilinmektedir. Kritik metal-metal teması nedeniyle birbirleri arasında matrise yapışmayı karbür fazı önler. Bununla birlikte, makro ölçekli testlerde her fazın aşınma mekanizmasına katkısını ayırmak zordur. Karbürler, karbonitrürler ve nitrürlerin boyut ve dağılımları, matrisin yapışma ve sürtünme özellikleri ile nihai performansa katkıda bulunarak tribolojik davranışları etkileyen önemli parametrelerdir [7]. Şekil 1’de çeliğin mekanik ve performans özelliklerine etki eden faktörler şematik olarak gösterilmiştir [8].



**Şekil 1.** Çeliğin mekanik ve performans özelliklerine etki eden faktörler [8]

Picas tarafından geleneksel ve yeni nesil çelikler üzerinde yapılan bir çalışmada; yorulma ve kırılma sonuçlarına ve fraktografik gözlemlere dayanarak, kırılma ile sonuçlanan malzeme yorulmasında tekrar eden yüklerde çatlak oluşum mekanizmalarının statik yük altındakilerden farklı olduğu, takım çeliklerinin her bir mikro yapısal bileşeninin rolü ve bunların çatlak başlamasındaki etkileri tanımlanmıştır. Statik yüklerde çatlaklar, uygulanan kuvvetin, karbürün kırılma dayanımından daha yüksek olduğunda başlar, daha küçük ve daha homojen dağılmış karbürlere sahip takım çelikleri daha yüksek dayanım gösterir. Tekrar eden yüklerde metalik matriste hasar oluşumu gözlemlenmiştir. Karbürlerin etrafındaki stres kırılmaları tetiklenebilir ve yorulmaya neden olan çatlaklara yol açar. Geleneksel ve yeni nesil her iki takım çeliği için de yorulmalardan metalik matris ve farklı karbür özellikleri ve morfolojileri sorumludur [9].

Malzeme ve malzeme seçimi, mühendislik tasarım sürecinde önemli bir rol oynar. Belirli bir ürün için uygun malzeme seçimi, tasarımcılar için önemli görevlerden biridir. Ürünün nihai gereksinimlerini karşılamak için tasarımcıların çeşitli malzemelerin performansını analiz etmesi ve kesin işlemlerle uygun malzemeleri belirlemesi gerekir [10]. Elektrik-Elektronik, beyaz eşya, otomotiv vb. endüstrilerde yaygın olarak kullanılmakta olan özdeş parçaların çeşitli farklı profillerde imalatı sırasında kesme/delme işlemleri için “zımba” kullanılmaktadır. Bu çalışmada elektrik motoru üretiminde kullanılmakta olan “rotor” ve “stator” laminasyon imalatında kalıp zımbası olarak geleneksel (AISI A681; D2) ve yeni nesil SİTÇ (C2 ve K2) kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır.

## 2 Materyal ve metod

Bu çalışmada elektrik motorlarında “rotor” ve “stator” laminasyon paketlerinin Sac Metal Şekillendirme yoluyla (TS EN 10341) silisli sac malzemeden üretimi için kullanılmakta kalıplara ait Takım Çelikleri incelenmiştir. Zımba kalıp malzemesi olarak çok amaçlı ve yaygın kullanımı nedeniyle geleneksel D2 (1.2379) ile yeni nesil SİTÇ’in özellikleri karşılaştırılmıştır. Zımba kalıp malzemeleri Mebsan Kalıp & Tel Erozyon firmasından sağlanmıştır. Performans testleri Mebsan Kalıp & Tel Erozyon firmasının pres makinalarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan her bir çelikten üçer adet malzemeye ait kimyasal analiz değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

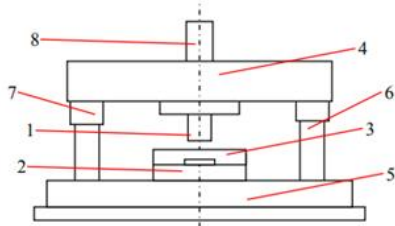
**Tablo 3.** Çalışmada Kullanılan Soğuk İş Takım Çeliklerine Ait Alaşım Elementleri Kimyasal Analizleri

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Mo	%Cr	%V	%Al	%Nb
<b>D2 (1.2379)</b>	1.42	0.29	0.23	0.26	0.66	11.40	0.92	0.03	0.02
	1.41	0.44	0.23	0.39	0.62	10.86	0.63	0.02	0.03
	<u>1.33</u>	<u>0.24</u>	<u>0.24</u>	<u>0.19</u>	<u>0.67</u>	<u>11.13</u>	<u>0.68</u>	<u>0.01</u>	<u>0.02</u>
<b>C2</b>	0.79	0.25	0.93	0.17	1.86	7.30	0.21	0.02	0.01
	0.89	0.25	0.92	0.16	2.08	7.75	0.24	0.02	0.02
	<u>0.95</u>	<u>0.26</u>	<u>0.95</u>	<u>0.15</u>	<u>2.31</u>	<u>7.97</u>	<u>0.27</u>	<u>0.02</u>	<u>0.02</u>
<b>K2</b>	0.96	0.38	0.77	0.30	1.85	7.88	0.41	0.83	0.11
	1.08	0.41	0.86	0.18	2.07	8.28	0.46	0.30	0.11
	1.02	0.48	0.98	0.19	2.08	8.02	0.49	0.85	0.16

Çeliklerin tümünde Manganez (Mn) ve Nikel (Ni) oranları benzer olmakla birlikte, yeni nesil SİTÇ'lerde Karbon (C), Krom (Cr) ve Vanadyum (V) oranları daha düşük, Silisyum (Si) ve Molibden (Mo) oranları daha yüksektir. Yeni nesil K2 SİTÇ'de ise Alüminyum (Al) ve Niobyum (Nb) ilavesi bulunmaktadır.

Şekil 2'de sac metal kesme kalıbına ait temel parçalar şematik olarak gösterilmektedir. Üretimi yapılan "rotor" ve "stator" parçaların kalıp, zımba ve numune örneklerine ait gerçek parçalar Şekil 3'de verilmiştir. Zımba malzemesi olarak kullanılan 3 farklı SİTÇ'in çapak oluşumuna yol açmadan üretebildikleri maksimum parça sayısı ömürlerini belirlemede kullanılmıştır. Bununla birlikte söz konusu zımba malzemelerinden Rockwell (HRC) sertlik ölçümleri alınıp karşılaştırılmıştır. Değerler 3 ölçümün ortalamasıdır. Bunlara ilaveten zımba malzemelerinin mikroyapıları da standart metalografik numune hazırlama prosedürlerinden geçirilerek taramalı elektron mikroskopu (SEM)/ enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDS) (Zeiss Sigma 300 Gemini FEG SEM) yardımıyla incelenmiştir. SİTÇ'de oluşabilecek karbür yapıları FactSage® 8.2 termodinamik analiz programı ile incelenmiştir.

1.Zımba 2.Alt kalıp 3.Sıyırıcı plaka 4.Kalıp üst plakası



5.Kalıp alt plakası 6.Kılavuz sütun 7.Kılavuz burç 8.Kalıp sapı

**Şekil 2.** Sac metal kesme kalıbına ait temel parçalar [11]

### 3 Bulgular ve tartışma

Elektrik motorlarında kullanılan ve silisli sacdan yapılan aynı rotor parçalarının basımında D2, C2 ve K2 takım çelikleri kullanılmıştır. Zımba ömrünü belirleyen en önemli bulgu belli bir basım sayısından sonra zımbada meydana gelen bozulma ve bunun neticesinde üretilen parçalarda çapaklanma başlamasıdır. Kullanılan zımba malzemelerine göre çapak problemi yaşamadan basılabilen parça sayıları yaklaşık olarak Tablo 4'de verilmiştir. En kısa kullanım ömrüne sahip olan geleneksel takım çeliği D2'dir. Bununla birlikte en uzun süreli kullanım ömrü sunan ise yeni nesil K2 takım çeliğidir.

**Tablo 4.** Zımba malzemesine göre basılabilen ürün sayısı

Zımba Malzemesi	Basılabilen ürün sayısı
D2 (1.2379)	112 500
C2	203 000
K2	224 000

Şekil 4'de temsili olarak maksimum basım sayısına ulaştıktan sonra kullanılmaya devam eden zımbalar ile elde edilen parçanın makro görüntüsü verilmektedir. Zımbalar bu noktadan sonra kullanıldığında üründe çapak oluşumu başlamaktadır ve ürün kalitesi bozulmaktadır. Bu durum, sürtünme yapışması ya da yapışma aşınması (adhesion wear) olarak da adlandırılmaktadır [12].

Zımba malzemelerinin sertlik değerleri ortalama olarak Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 5.** Zımba malzemesine göre ölçülen sertlik değerleri

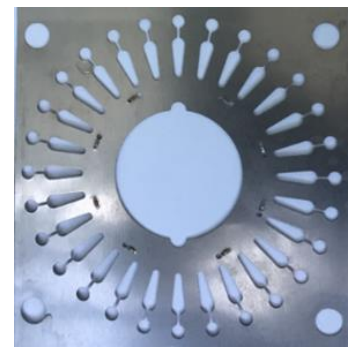
Zımba Malzemesi	Sertlik (HRC)
D2 (1.2379)	60.4
C2	61.2
K2	61.7



(a)

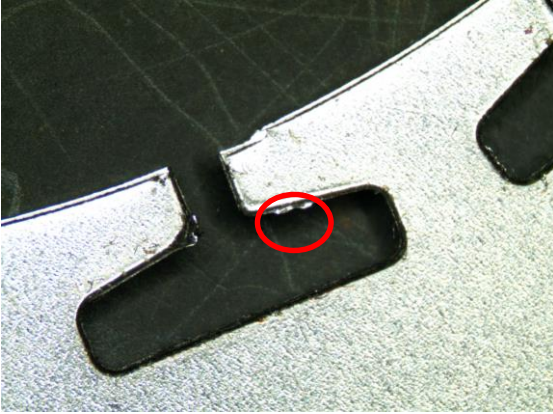


(b)



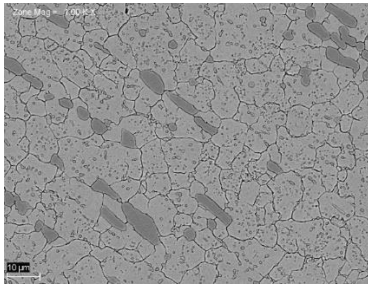
(c)

**Şekil 3.** Çalışmada kullanılan (a) Sac metal kesme kalıbı, (b) Kullanılan zımba ve (c) Basılan örnek parça

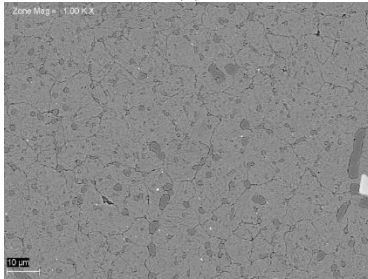


Şekil 4. Kullanım ömrü dolan zimbalar ile basılan parçanın makro görüntüsü (çapak oluşumu kırmızı yuvarlak içine alınmıştır)

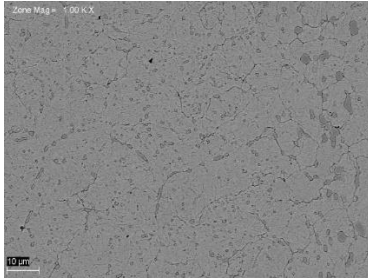
SİTÇ'e ait SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir.



(a)



(b)



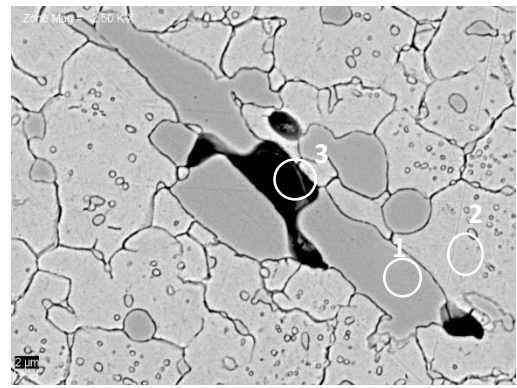
(c)

Şekil 5. SİTÇ taramalı elektron mikroskopu mikroyapı görüntüleri (a) D2, (b) C2, (c) K2

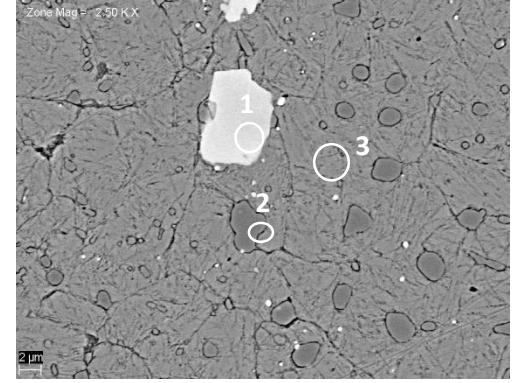
D2 geleneksel çeliğinin sahip olduğu ana karbür yapılarının iri taneli ve daha az homojen dağılım gösterdiği gözlemlenirken, yeni nesil SİTÇ olan C2 ve K2 çeliklerinde karbür yapılarının daha ince olduğu ve homojen bir şekilde

dağıldığı görülmektedir. Karbür yapılarının daha ince ve homojen dağılım göstermesi aşınma direnci ve mekanik özelliklerde olumlu yönde etki ettiği farklı çalışmalarda tespit edilmiştir [13, 14]. İnce ve eş aralıklarla dağılmış karbür yapıları tokluk direncini de artırmaktadır [15]. Bu bağlamda düşünüldüğünde C2 ve K2 çeliklerinin D2'ye göre daha uzun kullanım ömrü sunması karbürlerin daha ince ve homojen dağılımı ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, Tablo 5'de verildiği üzere yeni nesil SİTÇ'in sertlik değerlerinin geleneksel D2'ye göre % 1,32 ve % 2,15 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir.

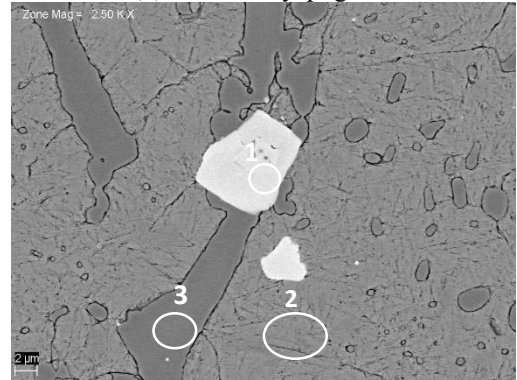
Bunlara ilave olarak bu çalışmadaki D2, C2 ve K2 çeliklerine ait mikroyapılarda gerçekleştirilen SEM-EDS elemental analizlerine ait mikroyapı ve analiz sonuçları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.



(a) D2 mikroyapı görüntüsü

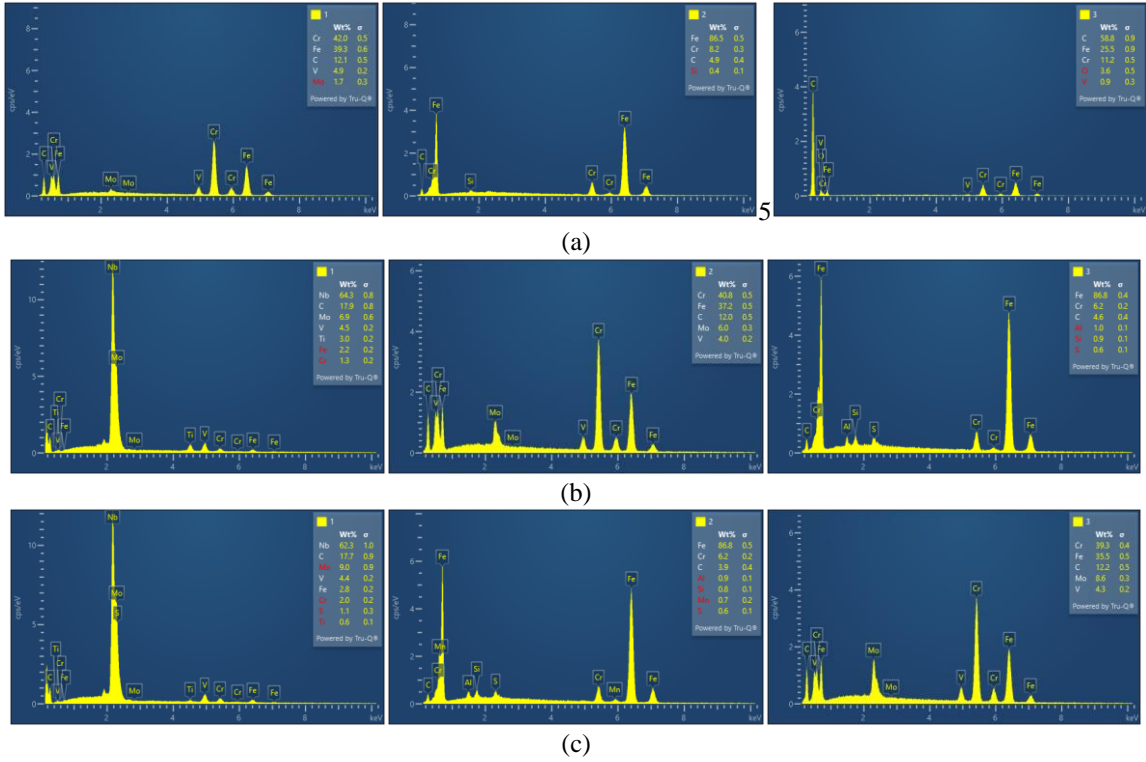


(b) C2 mikroyapı görüntüsü



(c) K2 mikroyapı görüntüsü

Şekil 6. SİTÇ taramalı elektron mikroskopu elemental analiz (EDS) için mikroyapı görüntüleri



Şekil 7. SİTÇ'e ait Şekil 7'de verilen SEM mikro yapılarından alınan 1,2,3 numaralı alanların EDS analiz sonuçları (a) D2, (b) C2, (c) K2

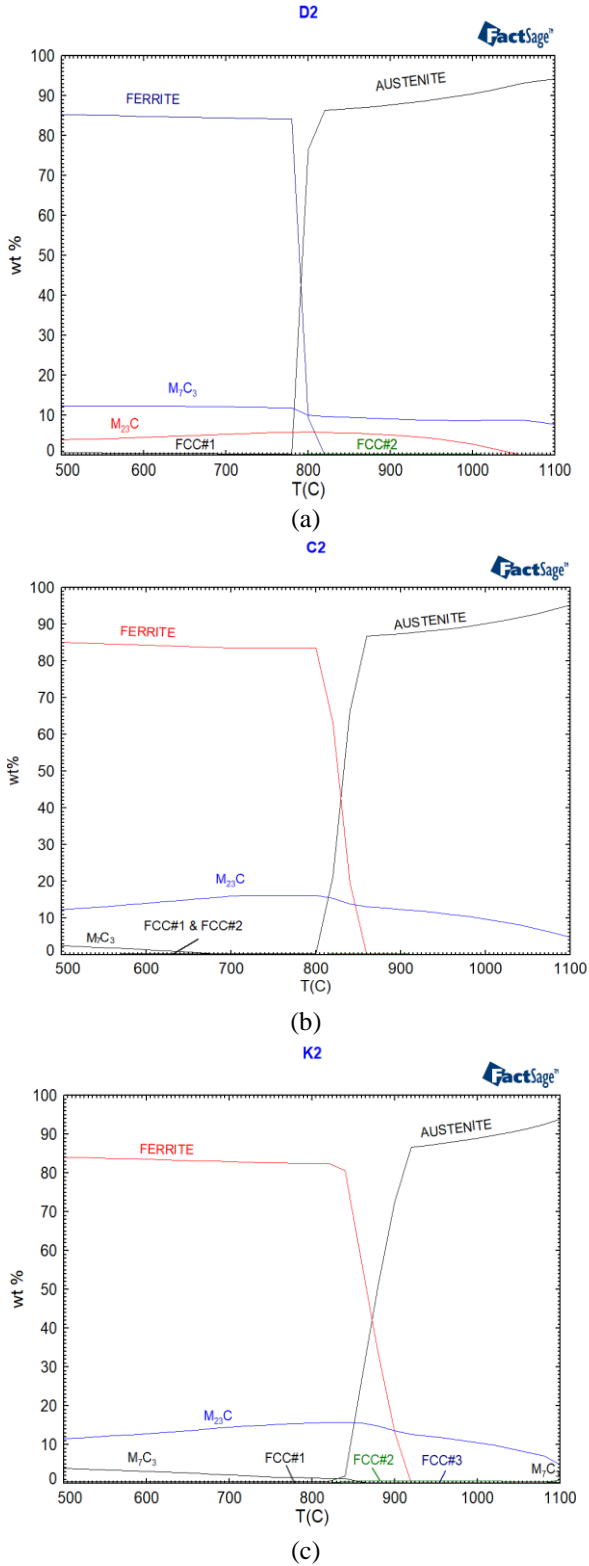
Şekil 6'da EDS elemental analiz için seçilen bölgeler beyaz yuvarlak içerisinde alınarak gösterilmiştir. Geleneksel D2 çeliğinde ana karbür yapıları  $M_7C_3$  sisteminden oluşmaktadır. Bunlar krom ağırlıklı, vanadyum destekli karbür yapıları olabilmektedir [16]. Şekil 7(a) 1 numaralı elemental analiz sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Geleneksel SİTÇ olan D2'den farklı olarak, yeni nesil SİTÇ'den olan C2 ve K2'de Şekil 6 (b) ve (c)'de 1 numara ile gösterilen parlak yapıları iri taneli karbürlerin Şekil 7(b) ve (c)'de görüleceği üzere Niobiyum katkılı karbür yapıları olduğu görülmektedir ve bu tür sert karbür yapıları aşınma direnci gibi mekanik özelliklere olumlu yönde katkı yapmaktadır [17]. Bununla birlikte ana karbür yapıları incelendiğinde (Şekil 6(a) 1 numara, Şekil 6(b) 2 numara ve Şekil 6(c) 3 numara), Şekil 7'de verilen elemental analizlerden yeni nesil SİTÇ karbürlerinin Molibden açısından zenginleşmiş oldukları görülmektedir.

Kimyasal termodinamik alanında dünyadaki en büyük tam entegre veritabanı bilgi işlem sistemlerinden biri olan FactSage® 8.2 yazılım programı ile üzerinde çalışma yapılan D2, C2 ve K2 SİTÇ'e ait fazlar aşağıda verilmiştir. Buna göre temper sıcaklıklarında etkin faz geleneksel D2 çeliğinde  $M_7C_3$ , yeni nesil C2 ve K2 çeliklerinde ise  $M_{23}C_6$ 'dır. Yeni nesil SİTÇ'de ise etkin karbür fazları için molibdenin etkisi görülmektedir (Tablo 6). Liu Y. vd. [18]  $M_{23}C_6$  tipi çok bileşenli karbürlerin mekanik özellikleri ile elektron ve bağ yapılarını sistematik olarak incelenmişler ve sonuçları, mevcut teorik ve deneysel verilerle karşılaştırılarak analiz etmişlerdir. Buna göre  $M_{23}C_6$  ( $M = Fe, Cr, Mn$ ) çok bileşenli karbürler termodinamik olarak karardır. Genel olarak,

çeliklerdeki  $M_{23}C_6$  tipi karbürlerin genellikle karışık çökeltiler olarak çeşitli başka metalik elementler kullanılarak yapılandırıldığı ve  $M_{23}C_6$  bileşiklerinin metalik ve kovalent bağların kombinasyonları ile oluşması sonucu yüksek erime noktasına ve yüksek sertliğe sahip oldukları belirtilmiştir. Sertliğin, malzemenin aşınma direncini karakterize etmek için önemli bir parametre olduğu gözönüne alındığında bu gruptan  $Fe_{21}Mo_2C_6$ 'nın diğer karbürlerden daha sert ve kırılğan olduğu sonucuna varılarak bu nedenle aşınmaya dayanıklı ideal bir malzeme olduğu ve sonuç olarak Molibden (Mo) veya Demir (Fe) içeren  $M_{23}C_6$  bileşiklerinin mekanik özelliklerinin,  $Cr_{23}C_6$ ,  $Mn_{23}C_6$  ve  $Fe_{23}C_6$ 'nın saf fazlarından üstün olduğunu ortaya koymaktadır [18]. Bu bağlamda düşünüldüğünde bu çalışmadaki yeni nesil SİTÇ'lerinde elde edilen daha yüksek performans sahip oldukları  $M_{23}C_6$  ( $M = Fe, Cr, Mn$ ) çok bileşenli karbürler ile ilişkilendirilebilir.

Tablo 6. FactSage Analizlerine Göre SİTÇ'de Oluşabilecek Karbürler

D2		C2		K2	
Karbür	%	Karbür	%	Karbür	%
$Cr_7C_3$	77.1	$Cr_{20}Mo_3C_6$	39.6	$Cr_{20}Mo_3C_6$	43.9
$Fe_7C_3$	18.6	$Fe_{20}Mo_3C_6$	34.7	$Fe_{20}Mo_3C_6$	37.5
$V_7C_3$	2.9	$Cr_{20}Fe_3C_6$	6.5	$Cr_{20}Fe_3C_6$	4.4
$Mn_7C_3$	1.4	$Fe_{23}C_6$	5.8	$Fe_{23}C_6$	3.8
		$Cr_{23}C_6$	6.5	$Cr_{23}C_6$	4.7
		$Fe_{20}Cr_3C_6$	5.7	$Fe_{20}Cr_3C_6$	4.0
		Diğer (V,Mn, Ni)	1.2	$Cr_{20}Mn_3C_6$	0.9
				$Fe_{20}Mn_3C_6$	0.8



Şekil 8. SİTÇ'e ait sıcaklık-ağırlık yüzdesi FactSage faz diyagramları (a) D2, (b) C2, (c) K2

Sonuç olarak, yeni nesil SİTÇ'de oluşan çoklu karbür yapılarının ve ince ve homojen dağılımlı karbürlerin zımba malzemesinin ömrünü uzatıcı bir etkide bulunduğu düşünülmektedir.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada geleneksel ve yeni nesil SİTÇ'in zımba malzemesi olarak elektrik motorlarında kullanılan rotor parçalarının üretiminde kullanımı karşılaştırılmıştır. Yeni nesil SİTÇ'in geleneksel olana göre daha yüksek baskı sayılarına ulaşarak daha uzun kullanım ömrü sunduğu görülmüştür. Zımba malzemelerinin mikroyapıları SEM/EDS yardımıyla incelenmiş ve yeni nesil SİTÇ'lerde geleneksel olana göre ana karbürlerin daha ince ve homojen dağıldığı görülmüştür. Ayrıca, yeni nesil çeliklerde Niobyum (Nb) ve Molibden (Mo) açısından zenginleşmiş karbür yapılarının olduğu görülmüştür. Karbür yapılarındaki bu farklılıkların yeni nesil SİTÇ'in daha uzun ömürlü kullanım sunmasına imkan sağladığı değerlendirilmektedir.

#### Teşekkür

Çalışmalarında destek olan ve Ar-Ge katkısı yapan MATİL A.Ş.'ye teşekkür ederim. SEM görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Borçelik A.Ş. Sn. Ömer Yıldırım'a teşekkür ederim.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): % 19

#### Kaynaklar

- [1] K. H. Prabhudev, Handbook of Heat Treatment of Steels. McGraw-Hill, New Delhi, 1988.
- [2] R. C. G. H. N. Gupta and A. Mittal, Manufacturing Processes. New Age International, New Delhi, 2009.
- [3] M. Jeanneau and P. Pichant, The trends of steel products in the European automotive industry. Metallurgical Research and Technology, 97, 1399-1408, 2002. <https://doi.org/10.1051/metal:2000118>
- [4] G. A. Roberts, R. Kennedy and G. Krauss, Tool Steels, 5th Edition. ASM International, 1998.
- [5] ASTM G40-22a, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, ASTM International, 2022.
- [6] J. A. Collins, Failure of Materials in Mechanical Design Analysis, Prediction, Prevention, 2nd ed. John Wiley, New York, 1993.
- [7] A. Norrby, Nanotribological characterization of advanced tool steels, M.Sc. Thesis, Karlstads University, Sweden, 2010.
- [8] J. B. D. Viale, F. Chenou and G. Baron, Optimizing microstructure for high toughness cold-work tool steels, 6th International Tooling Conference, pp. 299-318, Karlstads, Sweden, 2002.
- [9] I. Picas, Mechanical behaviour of tools, microstructure on fatigue, fracture and damage, Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2012.
- [10] M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design. Elsevier Science, 2016.
- [11] F. Mendi, Kesme kalıplarının bilgisayar yardımıyla tasarımı ve tasarım süresinin etüdü. Teknoloji, 127-137, 2001.
- [12] L. Kirkhorn, V. Bushlya, M. Andersson and J. E. Ståhl, The influence of tool steel microstructure on friction in

- sheet metal forming. *Wear*, 302, 1268-1278, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.050>
- [13] D. A. Porter and K. E. Easterling, *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Third Edition (Revised Reprint). Taylor & Francis, Cheltenham, 1992.
- [14] K. Miao, Y. He, N. Zhu, J. Wang, X. Lu and L. Li, Coarsening of carbides during different heat treatment conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 622, 513-523, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.115>
- [15] S. Farahany, M. Ziaie and N. A. Nordin, Effect of triple tempering temperature on microstructure, mechanical, and wear properties of K340 cold work tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07791-4>
- [16] D. Casellas, J. Caro, S. Molas, J. M. Prado and I. Valls, Fracture toughness of carbides in tool steels evaluated by nanoindentation. *Acta Materialia*, 55, 4277-4286, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.03.028>
- [17] G. Z. S. Wilmes, Effect of niobium and vanadium as alloying element in tool steels with high chromium content. 6th International Tooling Conference, pp. 269-287, Karlstadt, Sweden, 2002.
- [18] Y. Liu, Y. Jiang, J. Xing, R. Zhou and J. Feng, Mechanical properties and electronic structures of M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (M = Fe, Cr, Mn)-type multicomponent carbides. *Journal of Alloys and Compounds*, 648, 874-880, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.048>

