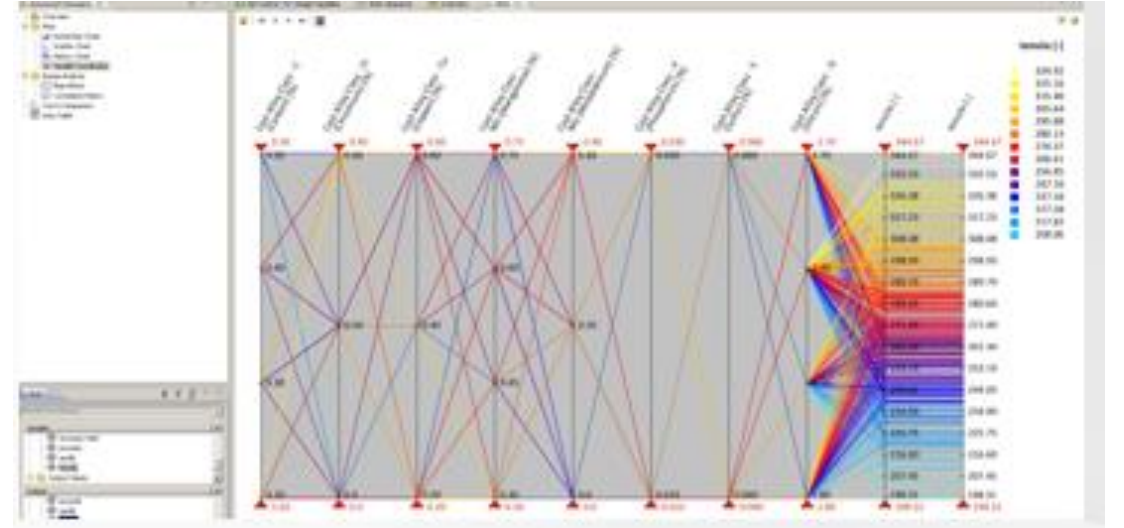
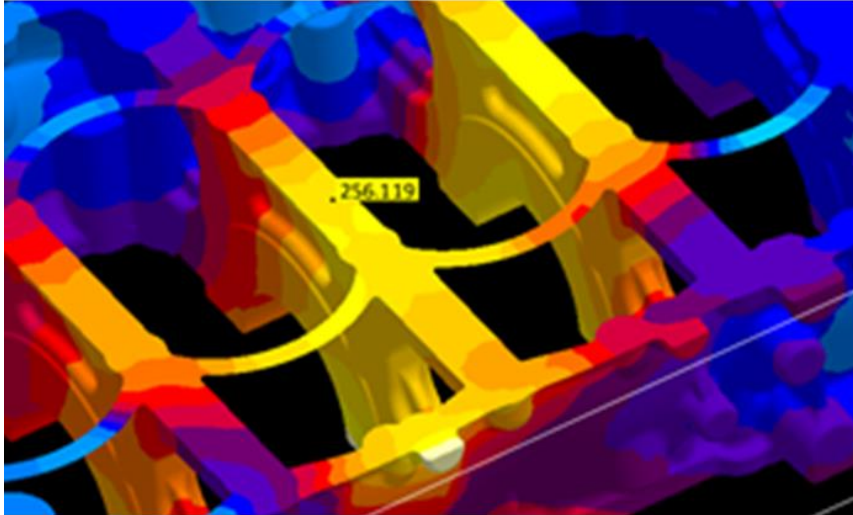


SİMÜLASYON VE DENEY TASARIMI KULLANARAK GRİ DÖKME DEMİR (GG) MALZEMELERDE KİMYASAL ANALİZ OPTİMİZASYONU



GİRİŞ

- Uluslararası EN:1561 Avrupa Standardı (İngiliz 1561 British Standard) Gri Dökme Demirleri 2 temel özelliğe göre sınıflandırmıştır [1] . Döküm malzemenin elde ettiği Çekme Mukavemeti (MPa) ve Sertlik (Brinell) değerleri.
- Çekme mukavemeti (MPa) bazlı sınıflandırma:
 - EN-GJL-100 / 150 / 200 / 250 / 300 / 350
- Brinell Sertlik (HB) bazlı sınıflandırma:
 - EN-GJL-HB155 / HB175 / HB195 / HB215 / HB235 / HB 255

GİRİŞ

- Gri dökme demir üreticileri ve kullanıcılarının da GG 25 / GG30 / GG35 malzemeler olarak tarif ettikleri bu çekme mukavemet sınıflandırmasıdır.
- Üreticiler istenen Gri demiri elde etmek için belirlenen çekme mukavemet limitlerini sağlamaya çalışırlar. Çekme mukavemeti test numunesinin nereden ve nasıl hazırlanacağı farklı yöntemler tanımlanarak aynı standartta verilmiştir [1]. Özel bir aralık belirtilmediği sürece 2.5mm-50mm kalınlık için malzemede elde edilmesi gereken minimum MPa değerleri basitçe aşağıdaki gibidir.

Malzeme Grade	U çubuktan UTS (Mpa)*	Döküm parçadan UTS (Mpa)*
GG 20	min. 200	min. 180
GG 25	min. 250	min. 225
GG 30	min. 300	min. 270
GG 35	min. 350	min. 320

*Et kalınlığı 2.5mm – 50mm arası için

Tablo1: EN 1561'e göre elde edilmesi gereken minimum çekme mukavemet (MPa) değerleri

1.ÇEKME MUKAVEMETİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

- Üretilen gri dökme demir parçaların geometri ve et kalınlıklarına göre standardı karşılama yeterlilikleri değişebilmektedir. Üreticinin kontrolü dışında olan bu durum ile sıklıkla karşılaşmakta dolayısı ile GG malzeme üretimi için proses parametrelerinde de farklılaşma ihtiyacı doğmaktadır. İstenen GG standardını elde etmek için dökümhanelerin kontrolünde olan temel proses parametreleri;

1. Soğuma/katılaşma koşulları (bozma zamanı, aşılama pratiği ve miktarı, vb...)
2. Metalin kimyasal kompozisyonu (alaşım elementleri, şarj malzemeleri).

1.1.Kimyasal Element Etkisi:

- Genel pratik C, Si oranlarının yanı sıra mikroyapıyı ve mekanik özellikleri etkileyen Sn, Cu, Mo, V, Cr, Mn, N, gibi elementlerin belirli aralıklarda kullanılmasıdır. Bu elementler matris yapısını değiştirir ve böylece elde edilen mekanik özellikler de değişir. Bu elementleri kullanmakta çok da özgür değiliz çünkü matrisini etkileyen bu elementlerin bazı istenmeyen sonuçları olabilir. Eksik veya fazlalığına göre iç çekintiler, işlemede zorluklar veya tokluk dayanımında düşüşün yanı sıra işin maliyet boyutu ise dökümhanelerin göz önünde bulundurması gereken sonuçlardır. İde edilmesidir.
- Literatürde kimyasal elementlerin sertlik ve çekme mukavemetine etkilerini inceleyen yayınlar bulunmaktadır [2, 3, 4]. Peki, bu elementlerin kombinasyonu ve etkileşimleri ne kadar çalışılabilmiştir? Elimizde elementlerin sonuca etkisini hesaplayan hazır bir formül bulunsaydı güzel olmaz mıydı?

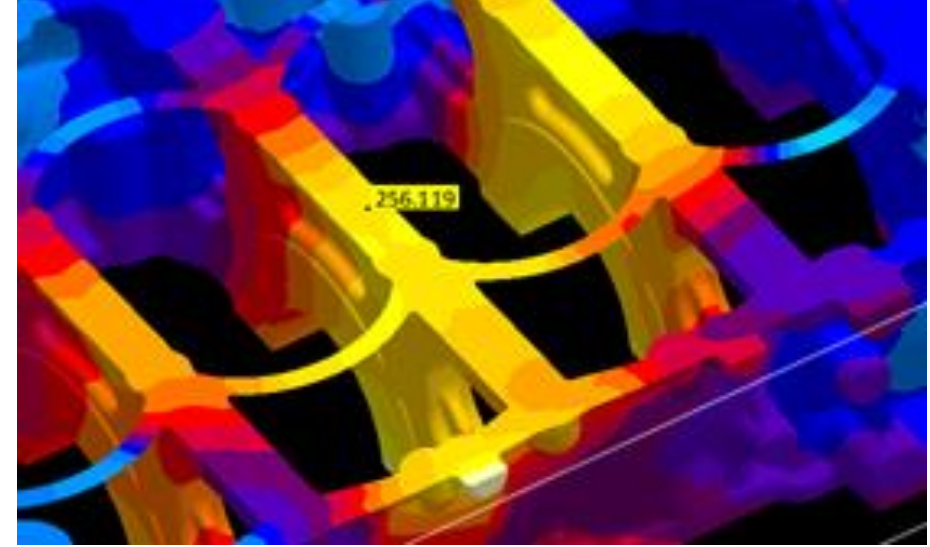
2.SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

- Kimyasal elementlerin çekme mukavemet sonucuna etkilerini incelemek için denemeler yapmadan önce simülasyon programlarından destek aldık. Bizim de işe başlarken yaptığımız ilk çalışma simülasyon programı ile elementlerin etkisini görmeye çalışmak oldu.
- Çekme mukavemetine etkisi olduğunu bildiğimiz yaygın kullanılan 6 elementin farklı düzeyinde (düşük/orta/yüksek) tüm kombinasyonlarını içeren bir deney seti oluşturulmuş ($3^6 = 729$ deney) ve simülasyon programı çalıştırılmıştır. Elementler dışındaki diğer tüm parametreler ve döküm parça sabittir. Yapılan simülasyonda mukavemet okunan bölge, gerçek dökümlerde mukavemet testi yapılan bölge ile aynıdır.

2.SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Element	Test Seviyesi		
C	d	o	y
S	d	o	y
Mn	d	o	y
Cr	d	o	y
Cu	d	o	y
Sn	d	o	y

Tablo2: Simülasyon yapılan 6 elementin deney seviyeleri



Şekil 1: Simülasyonda kullanılan döküm parça (Bedplate) ve mukavemet ölçümü

2.SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Simülasyon sonuçları bilgisayarda istatistik programı (Minitab) kullanarak analiz edilmiş (regresyon), elementlerin sonuçlara etkisi **%99 doğruluk ile formüle edilmiştir**. Aslında bu analiz ile simülasyon programının çekme mukavemet hesabı için arka planda çalıştırdığı algoritma ortaya çıkarılmıştır. Buna göre formül içine kullanılacak elementlerin % oranları yazılır ise elde edilecek mukavemet değeri hesaplanmaktadır. Amprik formül şu şekildedir;

The regression equation is
Avg-Mpa = 962 - 200 C (Carbon) + 89,7 Cr (Chromium) + 11,7 Cu (Copper)
- 84,0 Mn (Manganese) + 142 S (Sulfur) + 133 Sn (Tin)

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	961,736	1,310	734,26	0,000
C (Carbon)	-200,378	0,397	-504,71	0,000
Cr (Chromium)	89,7390	0,2647	339,05	0,000
Cu (Copper)	11,7497	0,1985	59,19	0,000
Mn (Manganese)	-84,0056	0,2647	-317,39	0,000
S (Sulfur)	142,225	0,993	143,30	0,000
Sn (Tin)	132,687	1,323	100,26	0,000

S = 0,875228 R-Sq = 99,9% R-Sq(adj) = 99,9%

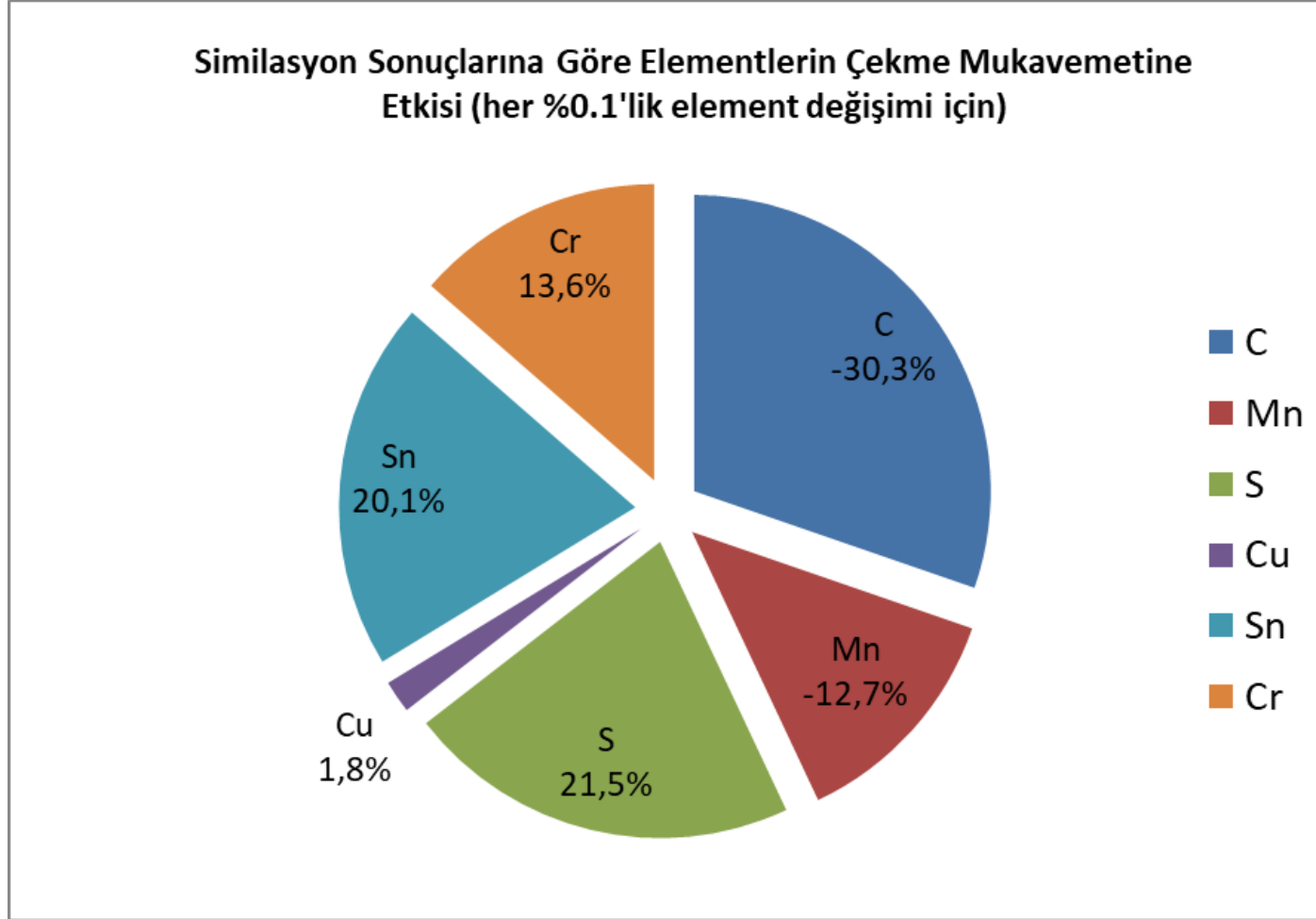
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	386477	64413	84087,10	0,000
Residual Error	722	553	1		
Total	728	387030			

Tablo 3: Simülasyon programı sonuçlarından hesaplanan amprik çekme formülü ve analizin doğruluk oranı

The regression equation is
Avg-Mpa = 962 - 200 C (Carbon) + 89,7 Cr (Chromium) + 11,7 Cu (Copper)
- 84,0 Mn (Manganese) + 142 S (Sulfur) + 133 Sn (Tin)

2.SİMÜLASYON ÇALIŞMASI



Formül tüm elementlerin sonuca etkisinin 1.dereceden lineer olduğunu göstermektedir. Yani element miktarının azlığına veya çokluğuna doğru orantılı olarak çekme sonuçları aynı paralellikte azalmakta veya artmaktadır. Normal şartlarda bu formül test edilen aralıklar için geçerli olur ve aralık dışındaki değerler için yeni testlerin yapılması gerekir.

- **Şekil 2:** Simülasyon Sonuçlarına Göre Elementlerin Çekme Mukavemetine Etkisi

2.1 SİMÜLASYON AYARLARI

Material	MatID	Database/File name	Initial Temperature (°C)	Feeding Effectivity (%)	Iron Composition		
⊕ Cast Alloy		MAGMA/GJL-300	1400.0	100.0	C (Carbon)	3.2	%
					Ce (Cerium)	0.0	%
					Cr (Chromium)	0.0	%
					Cu (Copper)	0.0	%
					Mg (Magnesium)	0.0	%
					Mn (Manganese)	0.8	%
					Mo (Molybdenum)	0.0	%
					N (Nitrogen)	0.0	ppm
					Ni (Nickel)	0.0	%
					P (Phosphorus)	0.1	%
					S (Sulfur)	0.1	%
					Sb (Antimony)	0.0	%
					Si (Silicon)	1.6	%
					Sn (Tin)	0.0	%

2.1 SİMÜLASYON AYARLARI

Optimization Navigator

Job Control Overview Plots Design Variables Casting Process Material Definitions

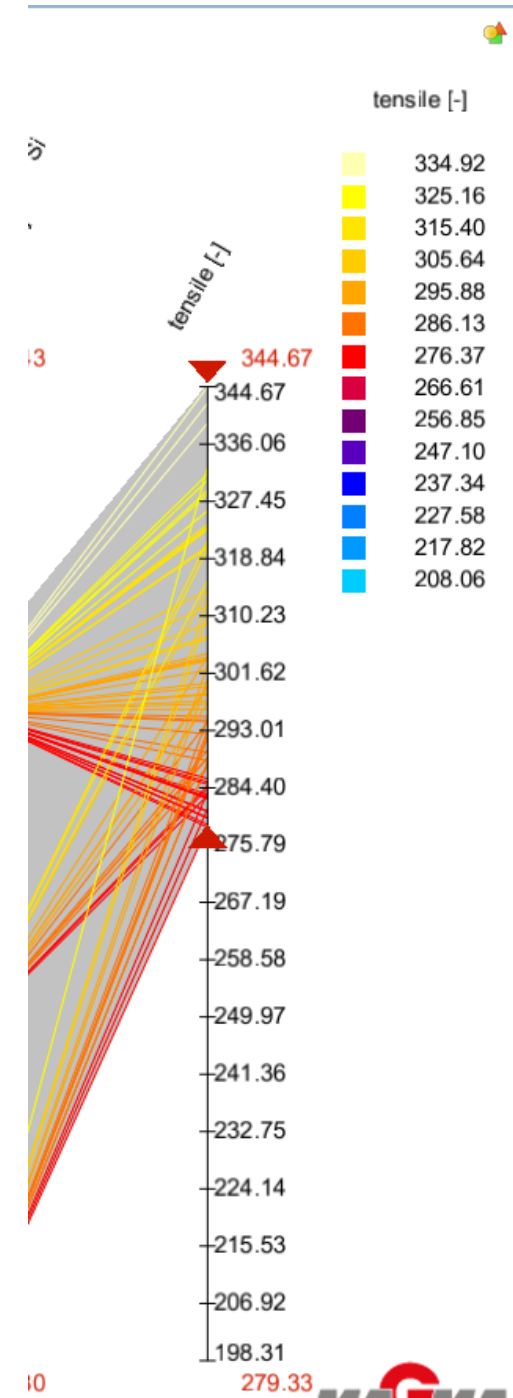
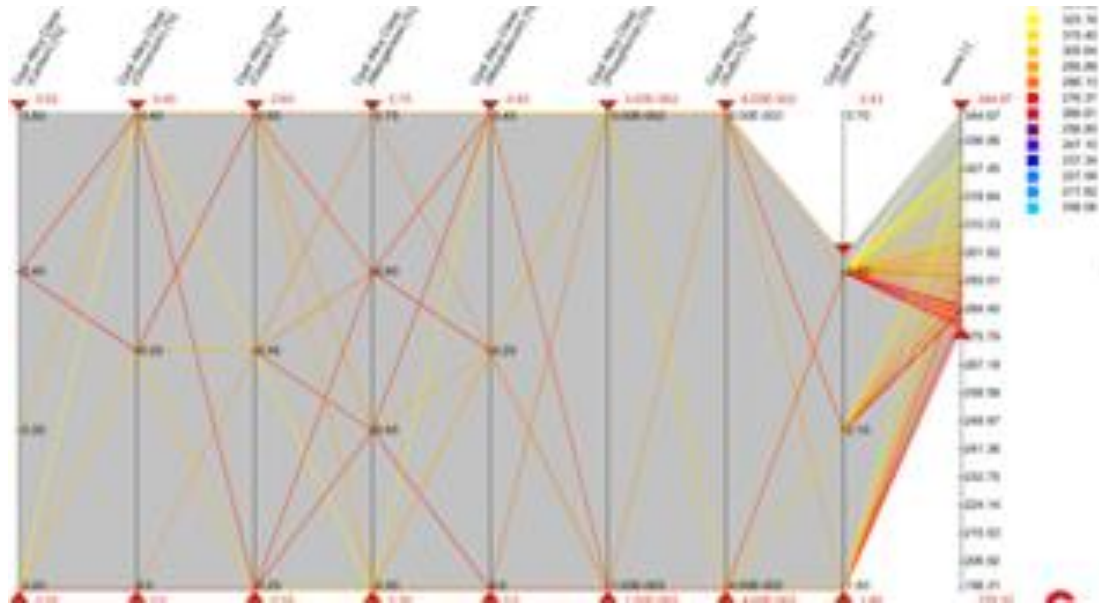
Definition Overview

- Template
 - Design Variables [Possible designs: 6912]
 - Cast Alloy Class - C (Carbon)
 - Cast Alloy Class - Si (Silicon)
 - Cast Alloy Class - Mn (Manganese)
 - Cast Alloy Class - P (Phosphorus)
 - Cast Alloy Class - S (Sulfur)
 - Cast Alloy Class - Cr (Chromium)
 - Cast Alloy Class - Cu (Copper)
 - Cast Alloy Class - Mo (Molybdenum)
 - Measured Data
 - Objectives
 - Increase Yield
 - porozite
 - sertlik
 - tensile
 - Constraints
- Settings Overview
 - Start Sequence [Number of designs: 64]
 - Keep Options

Design Variables

Design Variable	Lower Limit (%)	Upper Limit (%)	Step (%)	Dependency
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - C (Carbon)	3.2	3.5	0.1	<None>
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - Si (Silicon)			0.3	<None>
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - Mn (Manganese)			0.15	<None>
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - P (Phosphorus)			0.02	<None>
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - S (Sulfur)			0.02	<None>
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - Cr (Chromium)			0.2	<None>
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - Cu (Copper)			0.2	<None>
<input checked="" type="checkbox"/> Cast Alloy Class - Mo (Molybdenum)			0.2	<None>

2.1 SİMÜLASYON AYARLARI

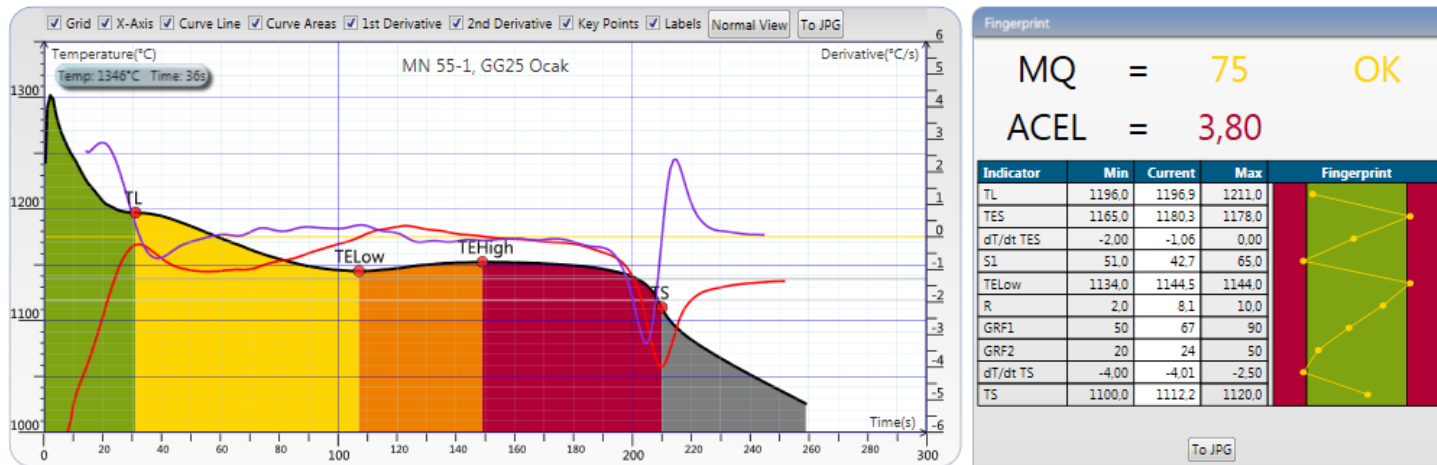


3.DÖKÜMHANE DENEYLERİ

- Her simülasyon çalışmasında yapılması gereken, sonuçların dökümhane deneyleri ile doğrulanmasıdır. Burada kritik nokta simülasyon programının dökümhane şartlarına göre kalibre edilmesidir ki simülasyon döküm sonuçlarına yakın değerler verebilsin. Bu kalibrasyon her dökümhanenin kendi pratik ve şartlarına bakarak simülasyon programı içindeki katsayıların ayarlanması ile yapılır.
- Dökümhanedeki çalışmamızda 6 element için bazı kritik seviyeler belirlenip 7 döküm deneyi yapılmış ve çekme mukavemet sonuçları incelenmiştir.

3.DÖKÜMHANE DENEYLERİ

- Deneyleer aşağıda sıralanan ortak şartlar altında yapılmış ve değerlendirilmiştir.
-
- Kimyasal element dışında tüm diğer döküm parametreleri sabit tutulmuştur (şarj oranları, aşı miktarı, bozma süresi, döküm sıcaklığı, vb.).
- Döküm esnasında termal analiz cihazı ile takip yapılmış ve metal kalitelerinde sonuçları etkileyecek herhangi bir anormallik olmadığından emin olunmuştur.



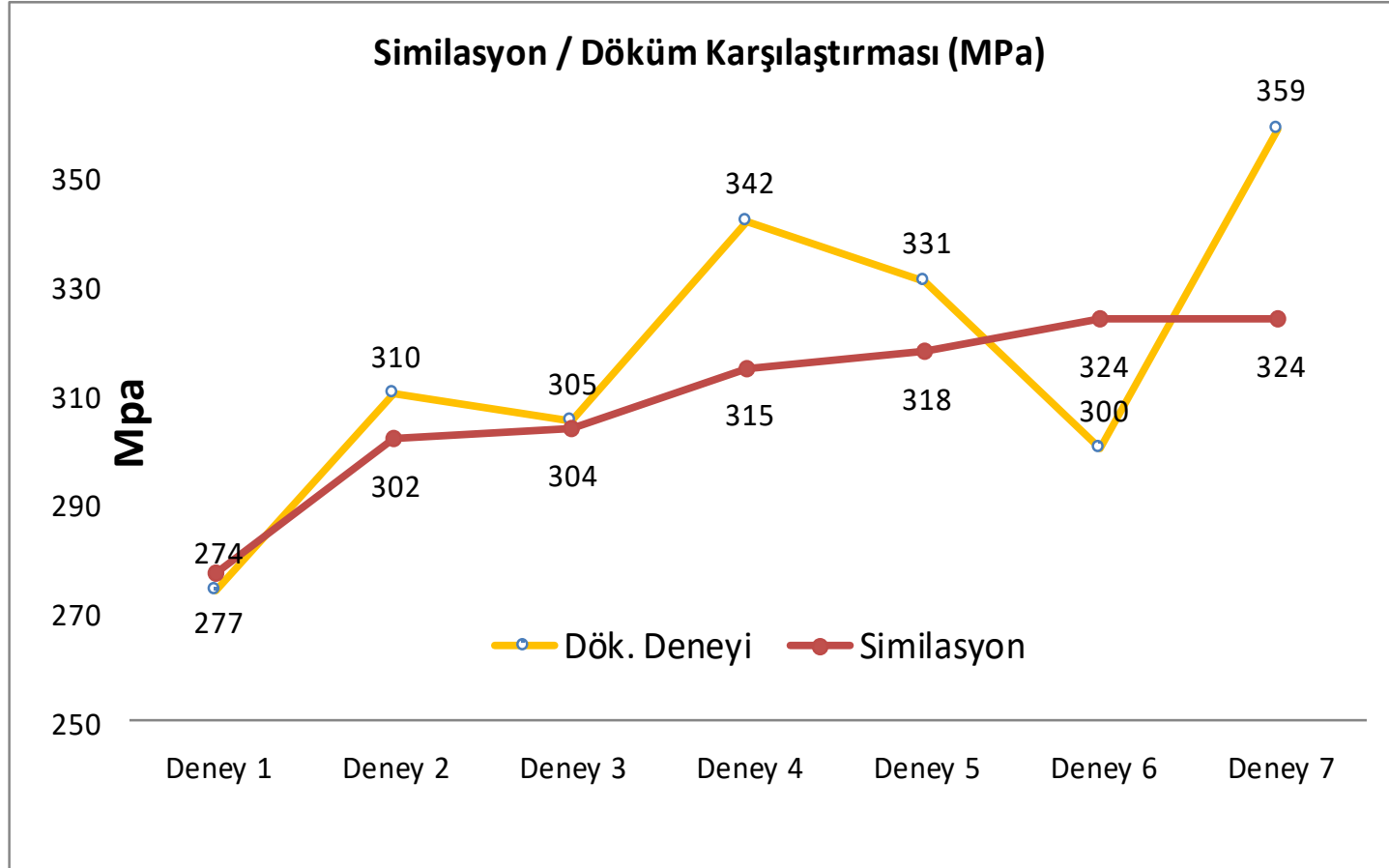
Sekil 3: Termal analiz cihazı ile metal kalitesi takibi

3.DÖKÜMHANE DENEYLERİ

- Denemeler ve simülasyon aynı döküm parçadan ve aynı test noktasından sonuçlandırılmıştır.
- Test çubukları aynı laborant tarafından hazırlanmış ve test edilmiştir.
- Her test çubuğunun mikroyapısı incelenmiş ve istenen grafit yapısı ve matris özelliklerinin sağlandığı emin olunduktan sonra değerlendirmeye alınmıştır.
- Döküm parçalar rutin CNC işleme operasyonundan geçirilmiş ve işlenebilirlik, uç ömürleri yönünden bir olumsuzluk olup olmadığı takip edilmiştir.

4. ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Elde edilen döküm deney sonuçlarının, simülasyon formülünden hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırması aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 4: Simülasyon ve döküm mukavemet (MPa) sonuçlarının karşılaştırması

Grafikten görüleceği üzere bazı döküm denemeleri simülasyon sonuçlarına çok yakın değerler vermiş ancak diğer denemelerde ise bariz fark olmuştur.

4.1.Sonuçların Değerlendirmesi

- Elde edilen sonuçlara ve göre yapılabilecek bazı çıkarımlar şu şekildedir;
1. Simülasyon sonuçlarındaki artış trendi Deney1/ Deney2/ Deney3 ile yakın sonuçlar vermiş içerikteki element miktarı zenginleştikçe korelasyon kaybolmuştur. Özellikle Deney4'den Deney6'ya ilerlerken simülasyonun gösterdiği artış trendi döküm deneylerinde azalış olarak ortaya çıkmıştır. Bu kırılımı simülasyon programının kalibrasyonu ile açıklamak mümkün görünmemektedir.
 2. Deney6 ve Deney7'de simülasyona göre aynı mukavemet sonucu beklenirken (324MPa) döküm deneylerinde biri düşük (Deney6/ 300MPa) diğeri yüksek (Deney7/ 359MPa) sonuç vererek simülasyondakinden çok farklı bir sistemin çalıştığını göstermiştir.
 3. Deney6 simülasyonda yüksek değer bulurken deneyde düşük sonuç vermiştir. Elementlerin birbiri ile etkileşimleri negatif sonuç doğuruyor olabilir. Bu olasılık doğru ise hangi elementlerin birbiri ile negatif etkileştiği veya hangi %seviyelerinde negatif etkileşim başlattığı yeni bir deney tasarımı ile çözülmesi gerekmektedir.

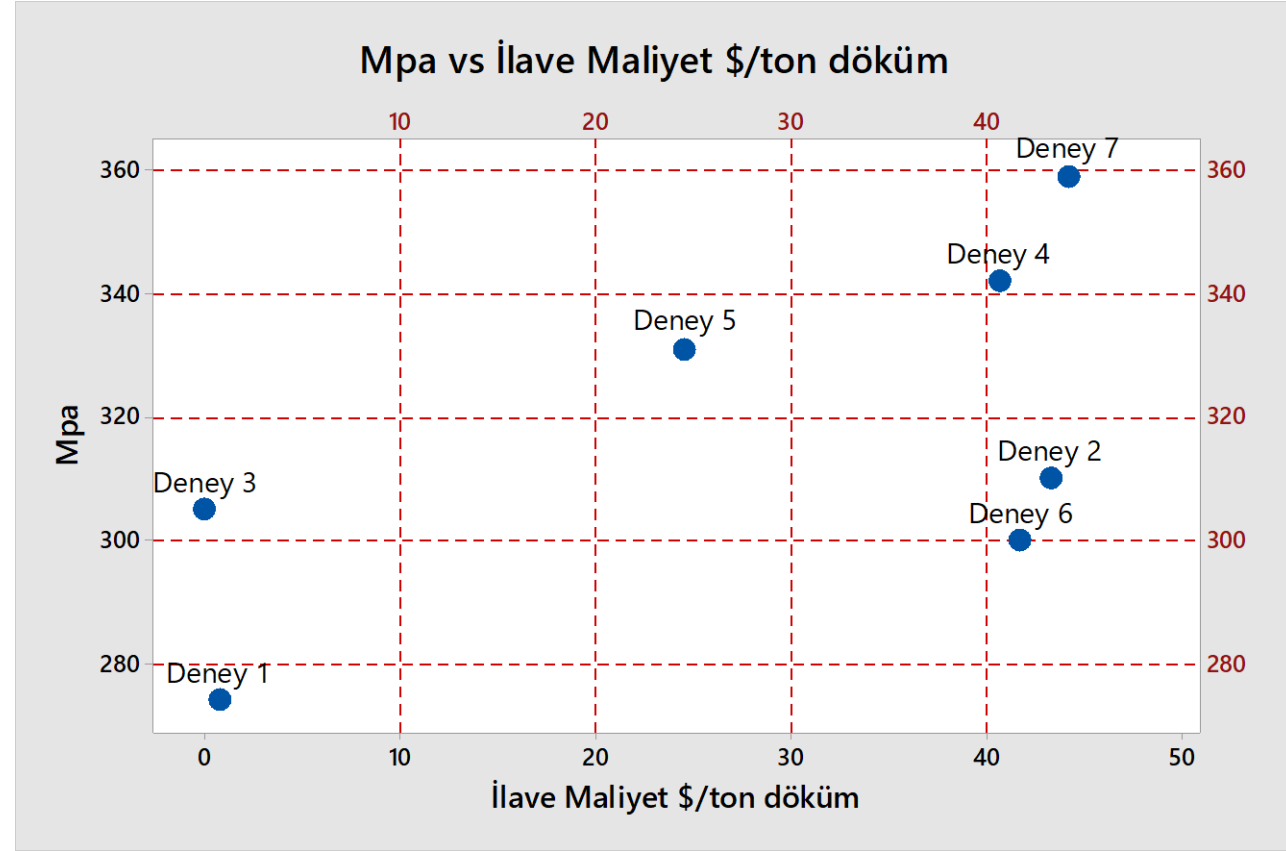
4.1.Sonuçların Değerlendirmesi

4. Elementlerin etkileşimleri lineer artış/azalış formülü yerine üstsel artış/azalış formülü ile çalışıyor olabilir. Deney4 ve Deney7 simülasyon değerinin çok üstünde sonuç elde ederek bu olasılığı desteklemektedir.
5. Deney 2, Deney 3 ve Deney 6 ile elde edilen yakın sonuçların (310-305-300MPa) çok farklı element kombinasyonları ile yakalanabileceğini göstermektedir. Burada diğer mekanik özelliklerin (sertlik, mikroyapı, işlenebilirlik, vb) sağlanması koşulu ile minimum maliyetli malzeme seçimi yapılabilecektir.
6. Deneylerin maliyet incelemesi aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Her deney için hesaplanan maliyet referans analizden farklılaşan elementlerin piyasa fiyatları ile hesaplanmıştır. Buna göre, hedeflenen çekme değeri için kullanılacak en düşük maliyetli kimyasal kompozisyon tespit edilmiştir. Benzer maliyetler farklı mukavemet sonuçları verebilmektedir.

4.1.Sonuçların Değerlendirmesi

		İlave Maliyet \$/ton döküm	Mpa Parçadan
Referans Analiz ve Maliyet	Deney 3	0,0	305
	Deney 1	0,7	274
	Deney 5	24,6	331
	Deney 4	40,7	342
	Deney 6	41,7	300
	Deney 2	43,3	310
	Deney 7	44,2	359

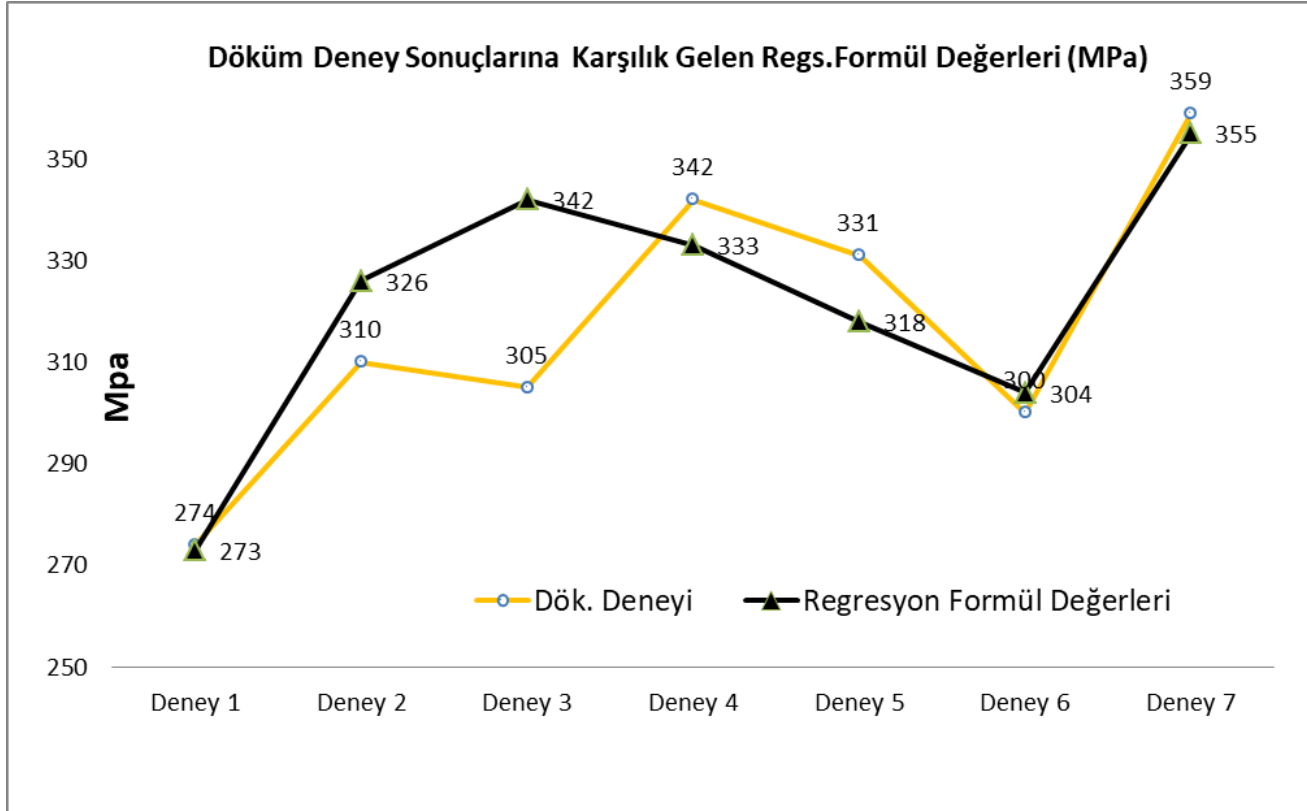
Tablo 4: Döküm deneylerinin maliyet ve çekme mukavemet (MPa) karşılaştırması



Şekil 5: Döküm deneylerinin maliyet ve çekme mukavemet (MPa) karşılaştırması

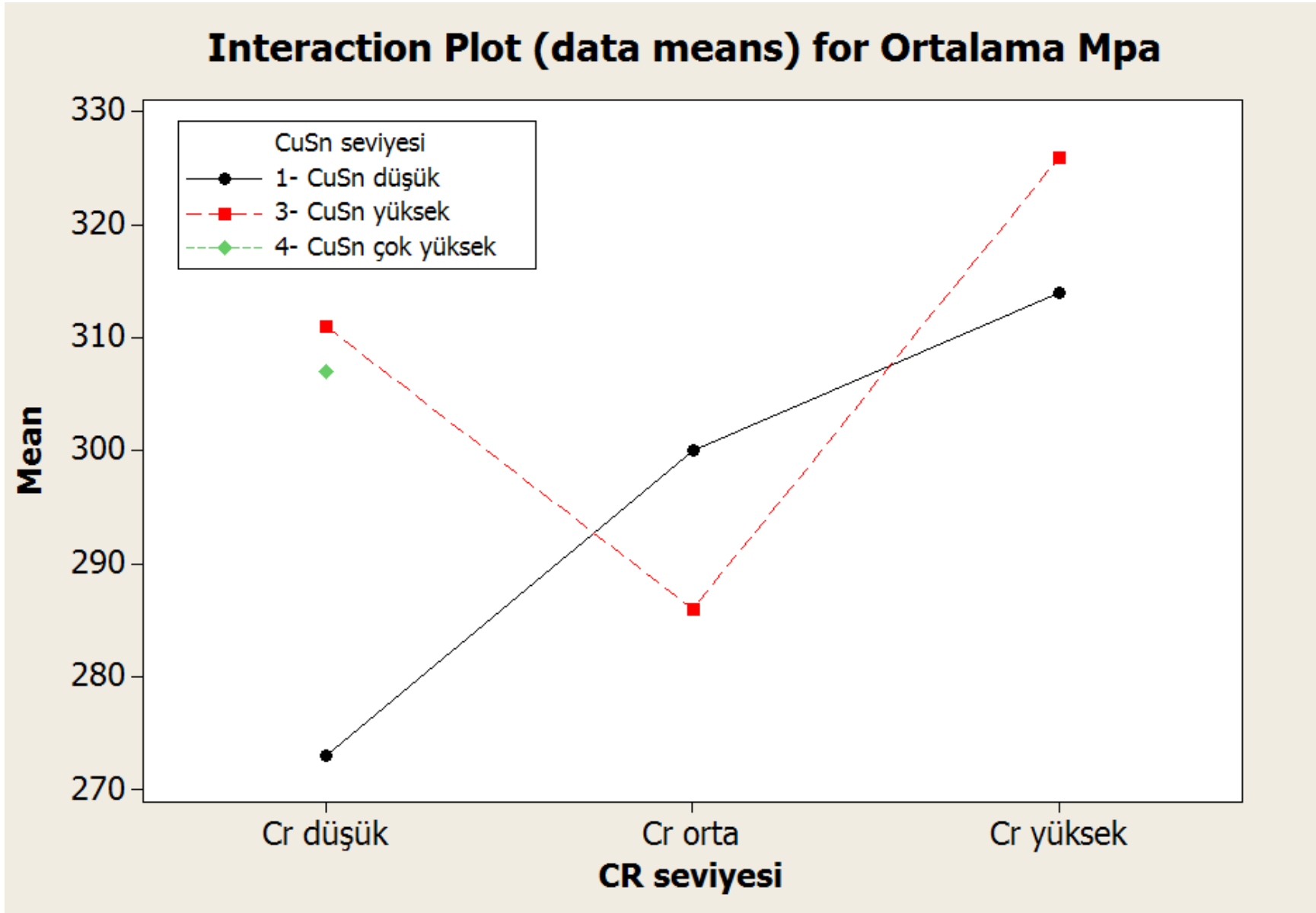
4.1.Sonuçların Değerlendirmesi

7. Deneysel sonuçların Regresyon ile analizi sonunda bir formül tespit edilmiş ancak formülün mukavemete etkisini bildiğimiz C elementini dışarda bıraktığı görüldüğünden eksik bir formül olduğu kanısındayız. Bunda sebep deneylerin azlığı veya deney seti seçimidir. Yine de formül sonuçlarının gerçek deney sonuçlarına uyumu aşağıdaki grafikte verilmiştir. Elde edilen bu formül bir etkileşim de içermektedir.



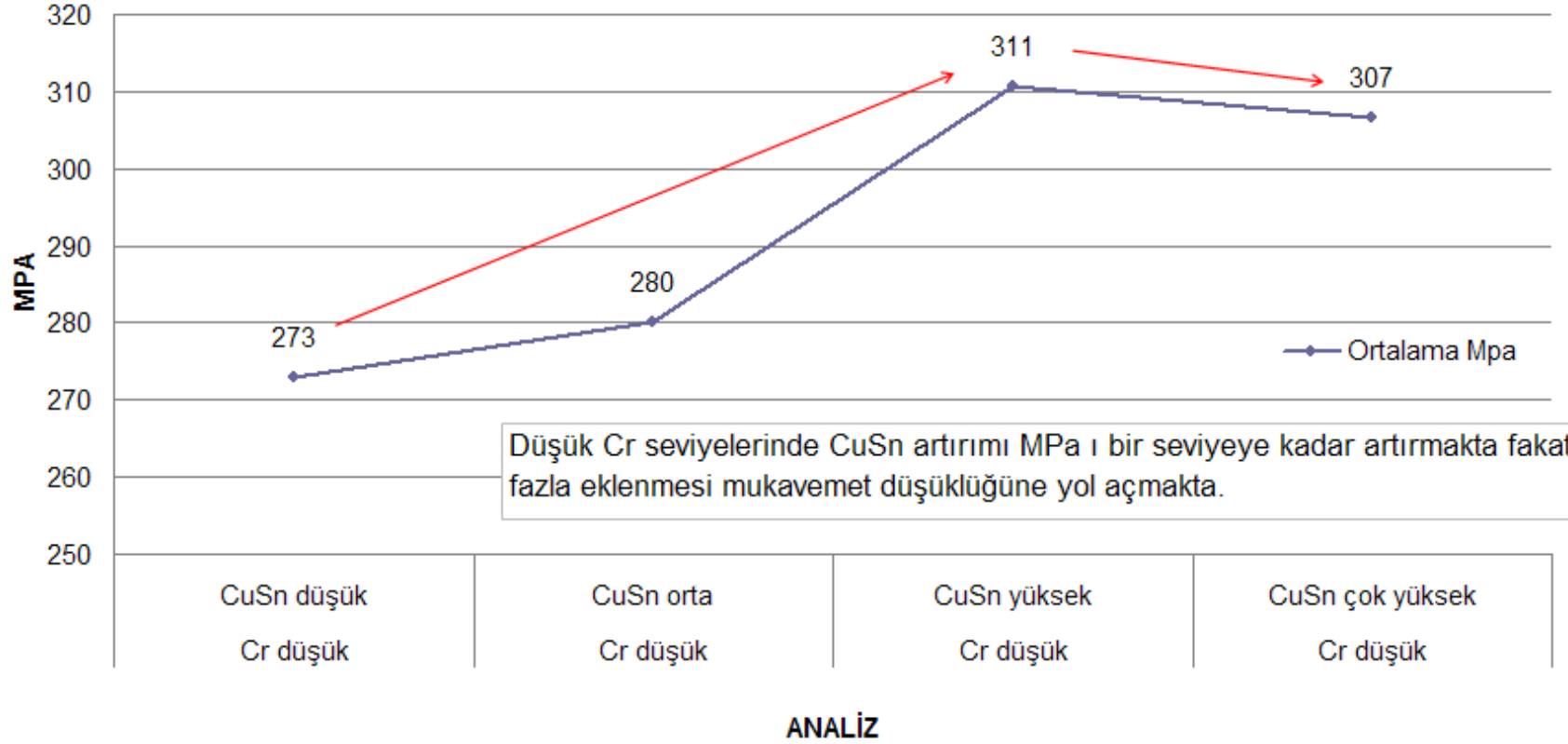
Şekil 6: Deneysel sonuçları ile çıkarılan formülün sonuçlarının karşılaştırması (MPa)

4.1.Sonuçların Değerlendirmesi



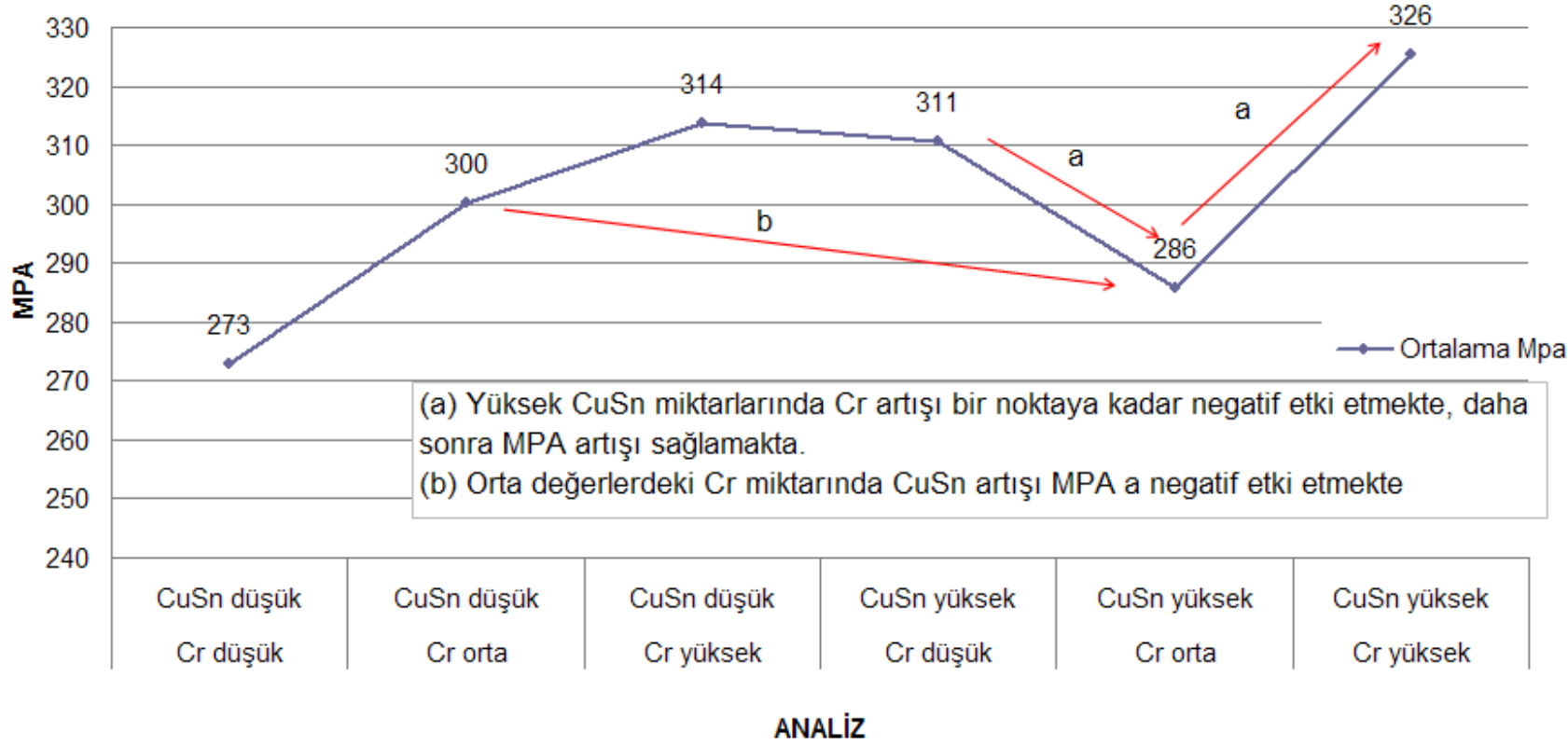
4.1.Sonuçların Değerlendirmesi

Çekme Mukavemeti MPa vs Analiz



4.1.Sonuçların Değerlendirmesi

Çekme Mukavemeti MPa vs Analiz



5.SONUÇ

Bu çalışma ile hedeflenen Gri Dökme Demirlerin çekme mukavemetinin kimyasal element içeriğine bağlı olarak nasıl davrandığını tespit etmek ve mümkün ise amprik bir formül oluşturmaktır. Bu sayede istenen mukavemet değerlerinin en düşük maliyet ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sırasında simülasyon programından destek alınmış ve istatistiksel program kullanarak deney çözümlenmeleri yapılmıştır.

Yapılan çalışma ile çekme mukavemet değerlerini sağlayabilecek en uygun malzeme kompozisyonu tespit edilmiştir. Ancak hedeflenen amprik formül tespit edilememiştir. 6 elementli (C, S, Mn, Cr, Cu, Sn) sistemi anlamak (kurallı bir sistem var ise) belirtilen 6 elementin tüm kombinasyonlarını sınamak ile olabilir ancak bu çalışma uzun süreler alabilir ve uzun deney süreleri sistemdeki değişkenliği artırır. Sağlıklı analiz yapmak için ihtiyaç duyulan daha fazla veri kısaltılmış deney tasarımları ile mümkün olabilecektir. Bu sayede hedeflenen amprik formül türetebilir.

TEŞEKKÜRLER