



## Damarlaşma Hatalarının Sistemik Yaklaşımla Önlenmesi

\*S. Harmon, L. Horvath, E. Lawson, R. Showman (Ashland Performance Materials, Dublin, OH)  
\*J. Wedell (ThyssenKrupp Waupaca, Tell City, IN), AFS Proceedings 2011, Paper 11-005.pdf

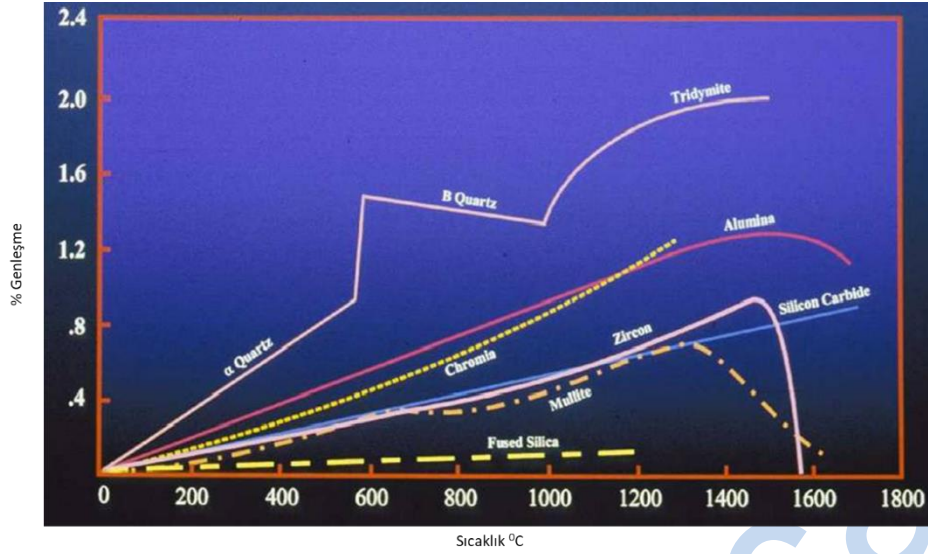
Kimyasal bağlı kalıp ve maçalarla demir döküm parça üretiminde sıklıkla karşılaşılan damarlaşma hatasını kontrol etmek amacıyla birçok farklı strateji izleniyor. Bunların başında özel kumlar, farklı kum katkıları, boyalar ve proses parametrelerindeki değişiklikler geliyor. Yapılan bir çalışmada yeni geliştirilen ve patent süreci devam eden özel tasarlanmış kum katkısı ESA'nın oldukça düşük oranlarda dahi yüksek verim sağladığı görüldü. Laboratuvar süreçlerinden ve saha denemelerinden elde edilen veriler de bunu doğruladı. Katkının verimliliği; boya malzemesi, boya kalınlığı, bağlayıcı malzemesi, bağlayıcı oranı ve kullanılan kumun özellikleri baz alınarak oluşturulan sistemik yaklaşım sayesinde daha da artırılabilir. Yapılan Deneysel Analiz çalışmasında da bu parametrelerin birbirlerini nasıl etkilediklerine dair önemli veriler ortaya çıktı.

### Giriş

Damarlaşma problemi, demir grubu dökümlerin kimyasal bağlı maçalarla üretiminde dökümhanelerin en çok karşılaştığı problemlerden biri. Motor blokları ve silindir kafalarının su ve yağ kanallarında oluşan ve giderilmesi oldukça zor damarlaşmalar motor arızalarına kadar varan sorunlara neden olabiliyor. Fren disklerinin havalandırma kanallarında oluşan damarlaşma hataları ise düzensiz ısınmalara ve kullanım esnasında çarpılmalara neden oluyor. Damarlaşma kusurlarının başlıca sebepleri arasında parçanın kum metal oranı, tasarımın zorlayıcılığı ve maça yapısı öne çıkıyor.

Damarlaşma oluşumunu inceleyecek olursak; ergimiş metalin temas etmesiye oldukça yüksek sıcaklıklara maruz kalan ve lineer olmayan şekilde genleşen silis kumunun yapısındaki değişimler göze çarpıyor. Silis kumunun kristal yapısı ilk önce düşük yada alfa kuvars kristal yapıdan yüksek yada beta kuvar yapısına geçiyor ve hızlıca genleşiyor. Sonrasında büzülen ve tekrar genleşen kuvars yapısı tridimite ve takip eden süreçte kristobalite dönüşüyor. Yapıda meydana gelen bu heterojen değişimler ve büzölmeler, Şekil 1'de görüldüğü gibi, diğer katkıların düşük genleşmeye sahip uniform karakterlerini de etkiliyor.

Yukarıda belirtildiği gibi metal dökümcülerinin damarlaşma hatalarını engellemek amacıyla izlediği farklı yöntemler bulunuyor. Yüksek saflıktaki silis kumu tamamen yada belirli bir oranda zirkon, olivin, kromit, kaynaşık silis kumu, dişli kum, göl kumu yada farklı sentetik katkılarla ikame edilebiliyor. Daha düşük oranda ve uniform şekilde genleşen bu tip malzemeler damarlanma hatalarını büyük oranda önlerken; silis kumuna göre daha maliyetli olmaları ve kalıp yada maça üretiminde farklı kusurları sebep olabilmeleri onları dezavantajlı konuma getiriyor



Şekil 1. Farklı katkıların termal genişleme eğrileri

Damarlaşma hatalarının önlenmesinde bir diğer yöntem farklı katkı malzemelerinin ilavesi olarak biliniyor. Bu malzemeler kimyasal yapılarına göre farklı gruplara ayrılıyor. İlk grup demir oksit katkıları; yapılarındaki oksijen ayrıştığında hacimde küçük düşüşler sağlarken kum tanelerinin yüzeylerini yumuşatan ve eritken bir karaktere (flaks) de sahip. Genellikle  $Fe_2O_3$  ilavesi %1-2 civarında uygulanırken ince yapıları kalıp ve maça mukavemetini etkileyebiliyor. Daha kaba yapıdaki  $Fe_3O_4$  ilavesi ise %1- 4 arasında uygulanıyor.  $Fe_2O_3$  ilavesi diğer katkı malzemeleriyle birlikte daha verimli sonuçlar verebiliyor. Ancak, demir oksitler sahip oldukları yüksek asidite dolayısıyla her bağlayıcı sisteminde kullanılamıyor.

Dekstrinler ve nişasta katkıları da %0,5 - 2 gibi düşük aralıklarda uygulanıyor ve sıcaklık yükseldikçe hacimleri azalarak tampon vazifesi görüyor. Nişasta katkıları, demir oksitlere benzer şekilde, ince yapıları dolayısıyla reçine gereksinimini arttırarak mukavemet üzerinde negatif etkiler oluşturabiliyor.

Özel tasarlanan ESA (Engineering Special Additives) kum katkıları, demir oksitlerin ve nişasta türevlerinin söz konusu negatif etkilerini ortadan kaldırmak için geliştirildi. Bu malzemelerin kalıp yada maça mukavemetleri üzerinde bir etkisi bulunmazken tane boyutları da silis kumuna oldukça yakın seviyelerde. Damarlaşma hatalarının engellenebilmesi için oldukça yüksek miktarlarda ilave edilmesi gerekiyor. İçi boş küre yapısına sahip bir grup ESA katkısı yapı içerisinde ezilerek hacimde bir düşüş sağlarken basma gerilmeleri maruziyetinde ise yastık görevi görüyor. Diğer ESA katkıları ise düşük genişleme katsayılarına sahip ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal açıdan eritken (flaks) davranışlar sergiliyor.

Bunun haricinde, kalıp ve maçalara uygulanan boyalar yüzeylerde düşük genişlemeye sahip bir tabaka oluşturarak damarlaşma azaltıcı etki yapabiliyor ve yalıtım özellikleri sayesinde de kum taneciklerine nüfuz eden ısı iletimi yavaşlatabiliyor. Maça üretiminde daha köşeli kum tercih edilmesi ise yoğunluğu düşürerek genişleme için ekstra boşluklar oluşturabiliyor. Daha düşük yoğunluğa sahip maçalar için ayrıca kumun düşük basınçlarda üflenmesi de genişleme payı bırakacak elverişli yapılar meydana getiriyor.



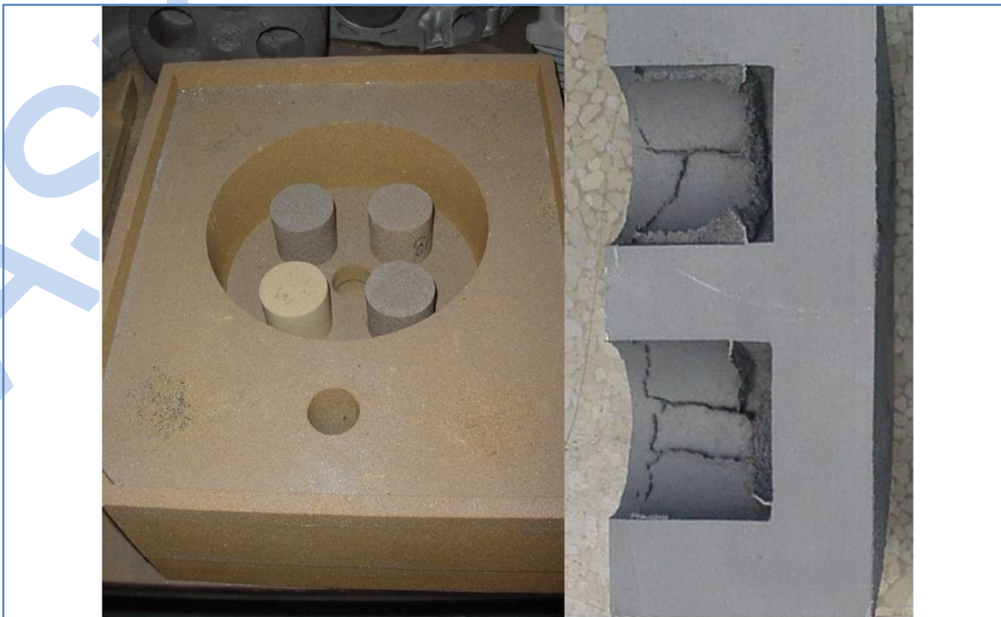
## Damarlaşma Seviyesinin Ölçülmesi

Farklı kum ve bağlayıcı sistemlerinin damarlaşma potansiyellerini incelemek amacıyla dökümhanelerde deneme dökümleri gerçekleştiriliyor. Deneme dökümlerinin gerçekleştirildiği iki yöntemin ilkinde basamaklı koni kullanılırken ikinci yöntemde 2x2 penetrasyon dökümü yapılıyor.

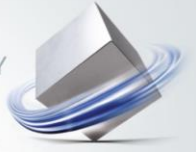
Görsel değerlendirmeye damarlaşma derecesi belirlenirken 1 - 5 arasında bir skala tercih ediliyor. Seviye 1 damarlaşma olmadığını ve Seviye 5 ise ciddi damarlaşma olduğunu ifade ediyor. Bu ölçüm metodunun bazı açılardan subjektif olabileceği düşünülse de, uzmanlar tarafından yapılan araştırmalarda maça kaynaklı döküm hatalarının önlenmesinde ve katkı malzemelerinin incelenmesinde basamaklı koni metodunun ciddi derecede kabul gördüğü vurgulanıyor.



Şekil 2. Basamaklı koni maça (sol), döküm parça (orta) ve kesiti (sağ)



Şekil 3. 2x2 penetrasyon maça ve kalıbı (sol), damarlanma hatalarının görüldüğü parça kesiti



## Düşük Oranlarda İlave Edilebilen Yeni Kum Katkısı

Farklı minerallerin flaks karakteristikleri incelenerek yeni ve düşük dozlarda ilavesi yeterli olan yeni bir katkı malzemesi geliştirildi. Günümüzde silis üzerinde flaks etkisi gösteren bir çok farklı mineraller ve bileşikler kullanılıyor. Geliştirilen yeni malzeme yüksek sıcaklıklarda etkisini gösteren eritken ajanlar içeren minerallerden oluşuyor. Mineraller yüksek sıcaklığa maruz kaldığında ayrışıyor ve gaz çıkışı gerçekleşiyor. Bu sayede hacim düşüyor ve oluşan yanma kaybı ile birlikte damarlaşma önleyici koşullar oluşmaya başlıyor. Yüksek sıcaklık seviyelerinde eritken özelliğın aktive olması damarlaşmaya karşı ekstra bir koruma sağlarken yeni geliştirilen bu malzemenin 2 tipi bulunuyor. ESA1 daha çok ılık kutu (warm box) proseslerinde, ESA2 fenolik üretan soğuk kutu (PUCB) proseslerinde kullanılırken bazı durumlarda çapraz uygulamalar da tercih ediliyor.

### Laboratuvar Sonuçları

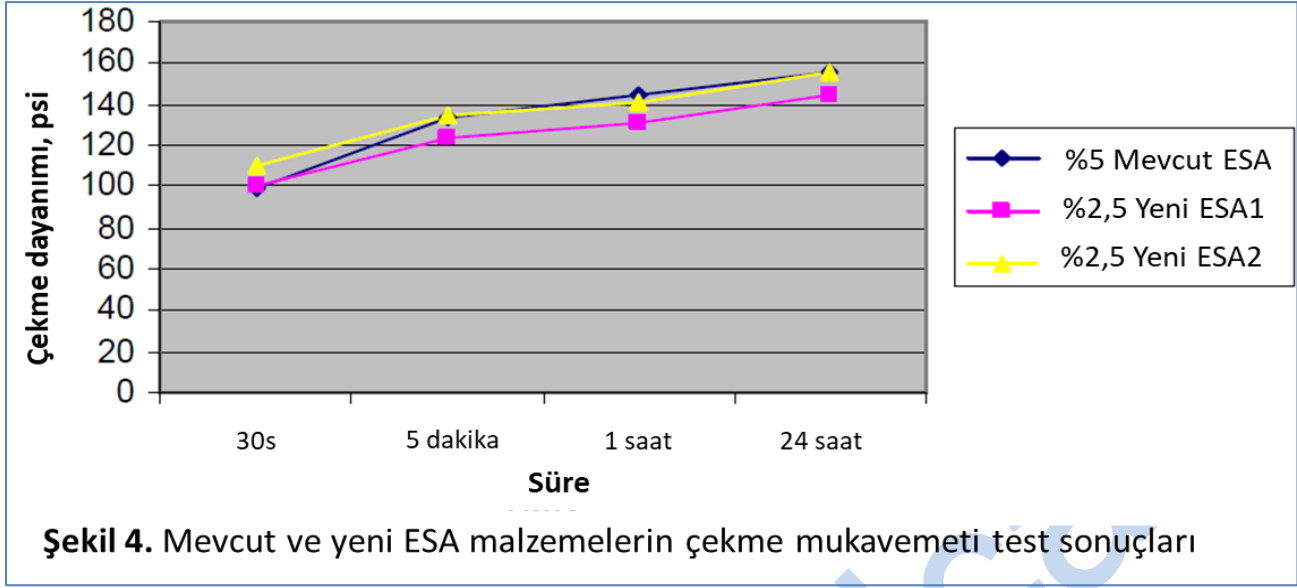
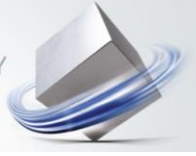
Yeni malzemelerin asidik kürlenmiş furan ılık kutu ve alkalik kürlenmiş poliüretan soğuk kutu sistemlerinde denendikten sonra maça mukavemeti ve proses veriminde oldukça düşük etkilere sahip oldukları ve damarlaşmaya karşı önemli katkılar sağladıkları görüldü.

Köpek kemiği test numuneleri %1,5 oranında poli üretan soğuk kutu reçine ilave edilen silis kumuyla hazırlandı. Mevcut katkı malzemesi kum baz alınarak %5 oranında eklenirken yeni geliştirilen ESA tipleri %2,5 oranında yada standart oranın yarısı kadar ilave edildi. Şekil 4'te verilen deney sonuçlarında çekme dayanımlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülüyor.

Çekme Testi Sonuçları	%5 Mevcut Katkı Malzemesi	%2,5 Yeni ESA1	%2,5 Yeni ESA2
30 saniye	99	101	110
5 dakika	133	124	135
1 saat	144	131	141
24 saat	156	145	156

Aynı karışımdan 2x2 penetrasyon testi için de maçalar üretilip 1.480°C'de (2.700F) ASTM Class 30 malzeme (GG20) pik döküm numuneler döküldü. Numuneler üzerinde yapılan incelemelerde, mevcut ESA ile yarısı kadar ilave edilen yeni ESA kullanımları arasında damarlaşma, penetrasyon ve yüzey özellikleri bakımından benzer sonuçlar elde edildiği görüldü. Parçanın fotoğrafları ve değerlendirme sonuçları Şekil 5'te görülüyor.

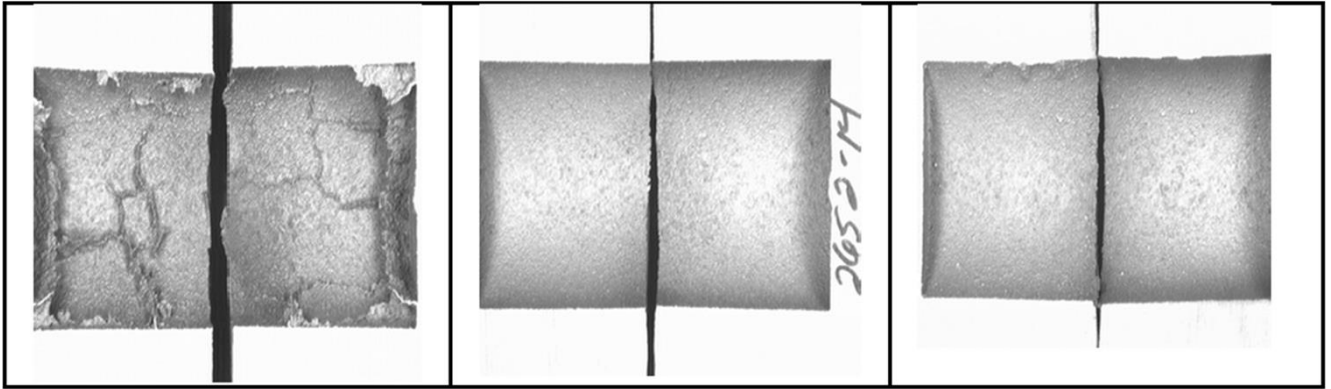
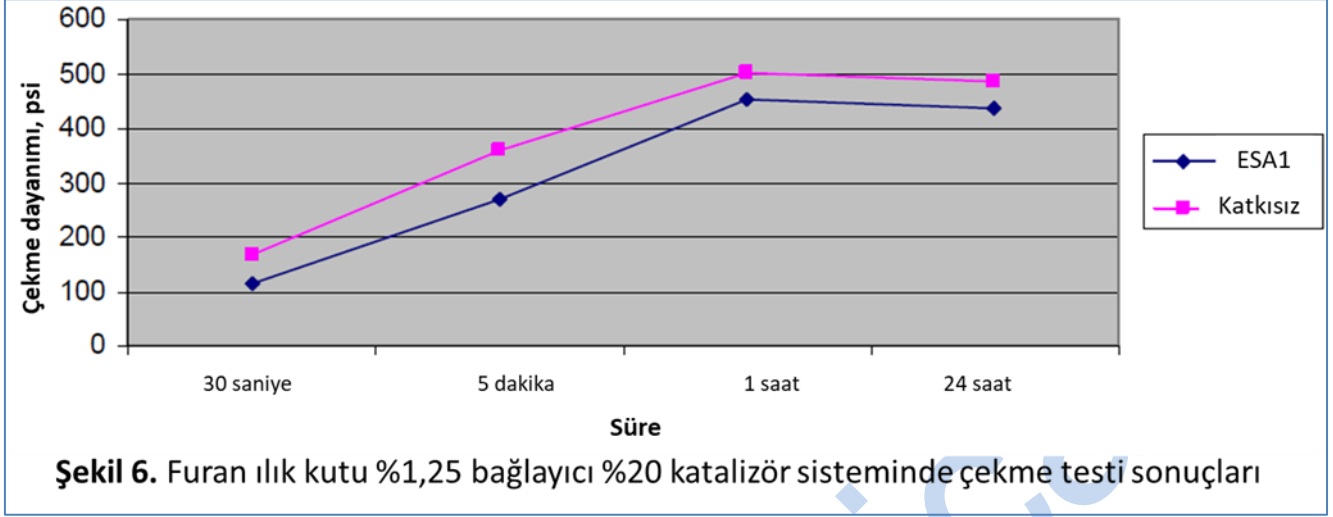
Furan ılık kutu sisteminde gerçekleştirilen çekme testinde, yeni ESA ilave edilen %1,25 reçine ve %20 katalizör karışımında yine mukavemet değerinde çok düşük bir azalma olduğu görülüyor. Şekil 6'da görüldüğü gibi, kürlenmenin daha yavaş ilerlemesine rağmen katalizör ilavesinin %1-2 oranında artırılması ile bu durumun da çözüldüğü görülüyor.



Yeni ESA malzemelerini hiç katkı kullanılmayan ve mevcut tipten daha yüksek oranlarda ilave edilen sistemlerle de karşılaştırmak için yapılan ek denemelerin detayları Şekil 7'de paylaşıyor.

Malzeme Tipi	CLASS-30 G.I.	CLASS-30 G.I.	CLASS-30 G.I.
Döküm sıcaklığı	2700F	2700F	2700F
<b>Penetrasyon dökümü</b>			
Penetrasyon	1.0	1.5	1.0
Damarlanma	1.5	1.0	1.5
Yüzey	2.5	2.5	2.5
<b>Penetrasyon dökümü</b>			
Penetrasyon	1.5	1.0	1.0
Damarlanma	1.5	1.5	1.5
Yüzey	2.5	2.5	2.5

**Şekil 5.** %5 mevcut tip ESA (sol) ve %2,5 yeni tip ESA (orta, sağ) ilaveli 2x2 maçaların test sonuçları



**Şekil 7.** Katkısız (sol), mevcut tip %4 ESA ilaveli (orta) ve %1,5 yeni tip ESA1 ilaveli (sağ) numunelerin parça kesitleri

Çekme Testi Sonuçları	%1,25 Yeni ESA	Katkısız Silis Kumu
30 saniye	113	168
5 dakika	270	360
1 saat	454	504
24 saat	436	484

## Saha Denemeleri

Yeni geliştirilen ESA katkılarının saha denemeleri Tell City'de (Indiana) bulunan ThyssenKrupp Waupaca 5. Fabrikasında gerçekleştirildi. Pik döküm fren diskleri üreten ve hem kalite hem de maliyet açısından rakipsiz olan işletme sürekli iyileştirme çalışmalarına verdiği önemle tanınıyor. Firma bu rakipsiz konumunu tedarikçileriyle geliştirdikleri verimli işbirliklerine, yeni teknolojilere açık olmalarına ve insan kaynağına verdikleri değere bağlıyor. Yeni geliştirilen ESA malzemelerinin deneme projesine büyük destek veren firma çalışanları



daha az katkı ilavesiyle kaliteden ödün vermeden üretime devam etme fikrinin kendilerini çok etkilediğini belirtti.

İlk faz denemelerin ılık kutu prosesinde gerçekleştirilmesine karar verildi. Fren diski parçasının kalıpları yaş kum kalıplamayla, maçaları furan ılık kutu reçine ve silis kumundan üretilmekteydi. Kum katkısı kullanılmadığında diskin havalandırma kanallarında oluşan damarlaşma hataları çok ciddi seviyelere varıyordu. Bunun üstesinden gelmek için işletmede halihazırda %2-4 arasında mevcut tip ESA ilavesi tercih edilmekte ve damarlaşmalar büyük ölçüde engellenebilmekteydi.

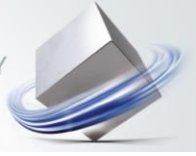
Laboratuvar verileri gözden geçirildikten ve işletme laboratuvarlarında maça özellikleriyle ilgili bazı testler yapıldıktan sonra bir yol haritası çıkarıldı. Deneme için yüksek serili, tek bir maça makinasında üretilen ve %2 oranında mevcut tip ESA ilave edilen bir döküm parçası seçildi. Yeni tip ESA1 malzemesini elle ve %1 oranında ilave edebilmek için maça makinasının otomatik besleme ünitesi devre dışı bırakıldı. (Karıştırma işlemine dair görseller için bkz. Şekil 8). Onun haricinde reçine ve katalizör seviyeleri ile karıştırma süresine dair herhangi bir değişiklik yapılmadı. Devrenin ilgili kısımları temizlendikten sonra üretime geçildi ve sonrasında numuneler alınarak çekme testleri gerçekleştirildi.

Maça üretim prosesinde herhangi bir farklılık görülmezken bir kaç çevrim sonrasında herhangi bir fire yaşanmadan üretilen maçalar ertesi günkü deneme dökümlerinde kullanılmak üzere askıda beklemeye alındı.

Maçalar kalıplara standart şekilde yerleştirildikten sonra yine aynı parametrelerde döküm işlemi gerçekleştirildi ve yaklaşık 100 döküm üretildi. İncelemelerde herhangi bir damarlanma hatasına rastlanmadı ve firma yetkilileri daha düşük oranlarda yeni tip ESA1 ilavesiyle döküm prosesinin sorunsuz bir şekilde devam ettiğini doğrulamış oldu (Maça ve dökümlere ilişkin görseller için bkz. Şekil 9).

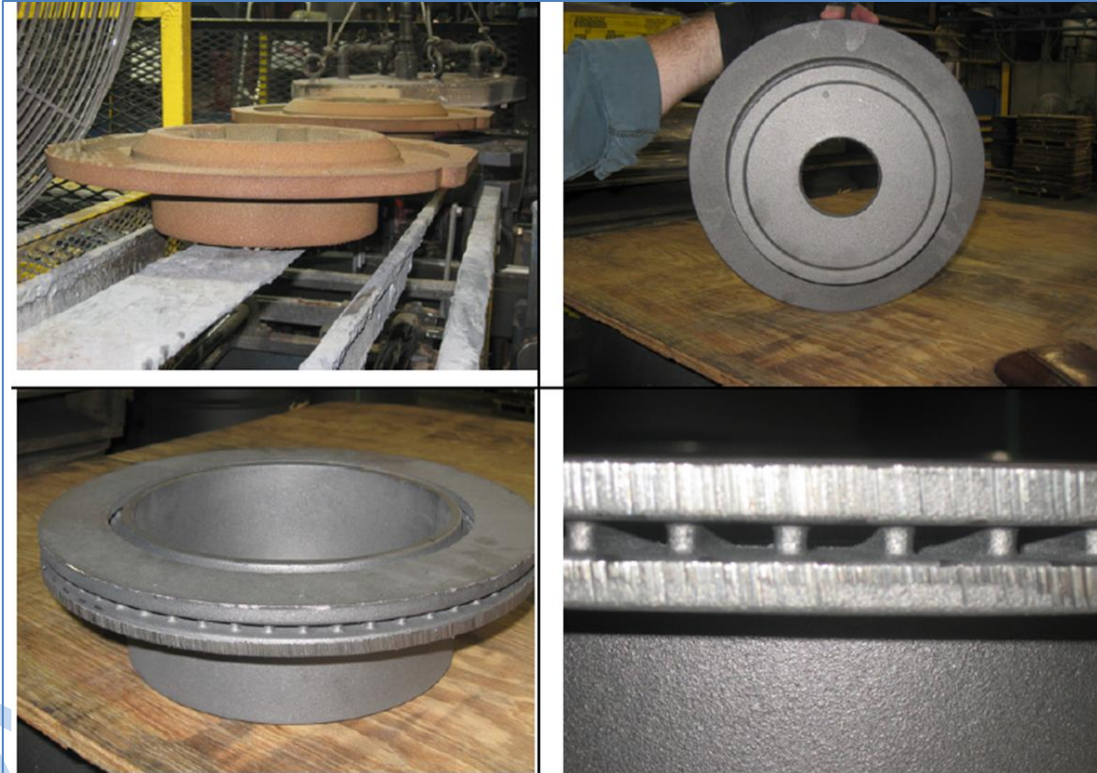


Şekil 8. Yeni tip ESA1 ilavesiyle gerçekleştirilen karıştırma denemeleri



İlk denemelerden sonra başka dökümlerde de yeni tip ESA1 testlerine devam edildi ve başarılı sonuçlar elde edildi. Proses kararlılığını görülmesi açısından belli bir rakama ulaşınca kadar deneme üretimlerine devam edildi. Denemelerin bir noktasında maçalarda hatalarla karşılaşıncaya süreç durduruldu ve hatalar üzerinde kök neden analizleri gerçekleştirildi. Hatanın kalıplama makinasındaki model aparatıyla ilgili olduğu tespit edildikten sonra sürece devam edildi.

Yeni tip ESA1 kullanımıyla ilgili soru işareti yaratan tek durum; besleme ünitesinde ilave oranıyla ilgili yeni bir ayar yapılması gerektiği için mikserlerde herhangi bir problem olup olmayacağıydı. Katkı malzemelerini besleyen üniteler belirlenen ağırlığın +/- 1 ons tolerans aralığında çalışmaktaydı. Mevcut ESA için belirlenen ağırlık 35.84 ons ve aralık da 34.8 - 36.8 ons olarak girilmekteydi. Yeni ESA1 için ise ağırlık 17.9 ons ve aralık ise 16.9 - 18.9 ons olarak hedeflendi. Yapılan testler sonrasında hedefin limitlerin dışında olduğu görülse de prosesin 1.42 ortalama Cp değerinde çalışabildiği tespit edildi (Şekil 10).



**Şekil 9.** Yeni tip ESA1 ilavesiyle üretilen ılık kutu maçalar (üst sol), deneme dökümleri (üst sağ ve alt sol), hatasız havalandırma pencereleri

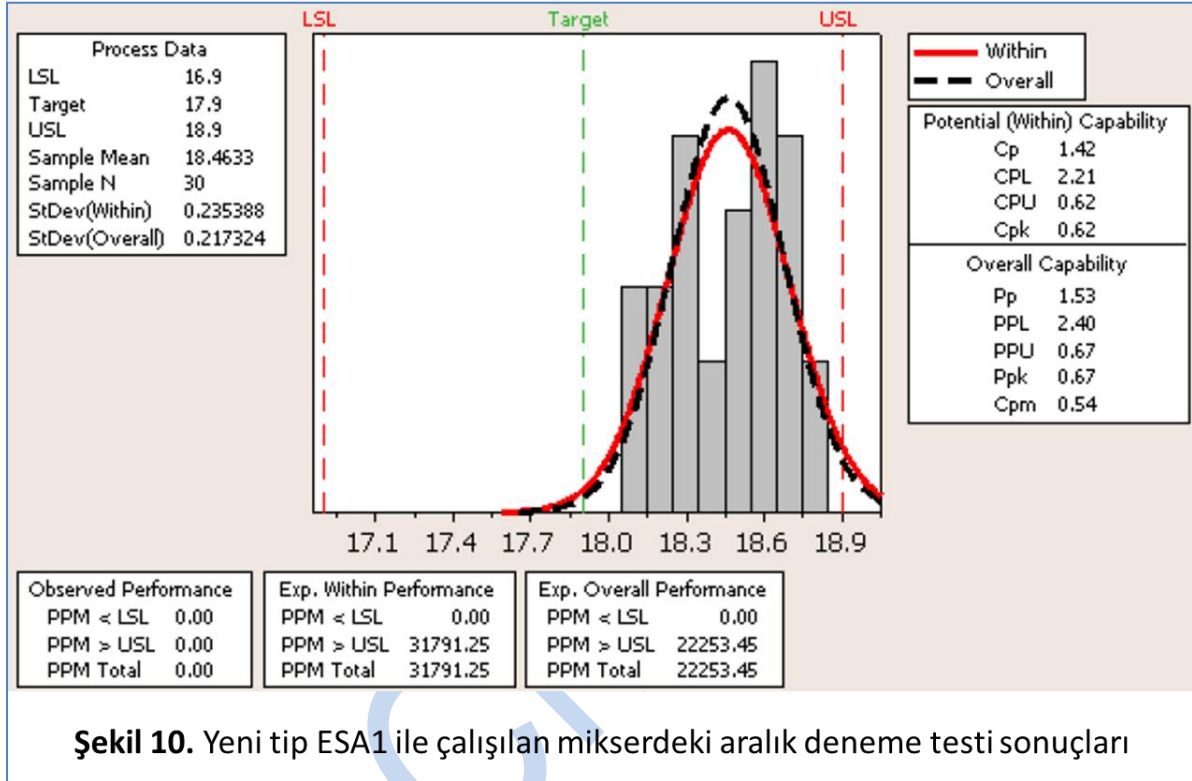
Waupaca çalışanlarıyla gerçekleştirilen deneme üretimleri sonucunda oldukça derin bir veri havuzu oluştu ve yeni geliştirilen ESA1 katkı malzemesiyle çalışmanın herhangi bir üretim yada kalite sorununa yol açmayacağından emin olunarak; tüm ılık kutu operasyonlarının ESA1 malzemesine göre düzenlenmesine karar verildi. Sonrasında ise soğuk kutu prosesleri için geliştirilen ESA2 malzemesiyle deneme üretimleri yapılmasına karar verildi.





## Damarlaşma Hatalarının Engellenmesinde Sistemik Yaklaşımın Önemi

Bir çok dökümhane damarlaşma hatalarıyla mücadelede genellikle lineer bir yaklaşım benimsiyor. İlk önce işe kumla başlanırken sonrasında kalıp veya maçaya bağlayıcı katılıyor. Parçalarda damarlaşmanın devam etmesi durumunda boyalara başvuruluyor. Sonraki aşamalarda kum katkıları ekleniyor ve hata kaybolana dek eklenmeye devam ediliyor. Bu



yaklaşım genellikle bir süre sonra tekrar hatalara sebebiyet verdiğinde ise en başa geri dönülerek tüm süreç baştan alınıyor. Karışım içerisindeki farklı malzemelerin birbiriyle etkileşimleri de göz ardı ediliyor ve karışımın optimizasyonuna dair herhangi bir aksiyon alınmıyor. Bu noktada esas yapılması gereken ise tüm malzemeleri bir sistemin bileşenleri olarak kabul etmek ve birbiriyle en iyi çalışan malzeme eşleşmelerini yakalamak olarak kabul edilir.

## DeneySEL Analiz Çalışmaları

Waupaca işletmesindeki ılık kutu prosesinde ESA1 ilavesiyle elde edilen başarılı sonuçlar sonrasında soğuk kutu proseslerinde ESA2 malzemesinin denenmesine geçildi. Bu denemelerde malzemenin sistemin diğer bileşenleriyle etkileşimleri de incelenerek maçanın damarlaşmaya karşı tüm özelliklerinin optimize edilmesine karar verildi.

İlk etkilerin incelenmesi ve malzemenin farklı ilave oranlarında farklı tür kumlarla (mevcut silis kumu ve farklı bir Brezilya kumu), farklı poliüretan reçine oranlarıyla, farklı boya tipleriyle, tek yada çift daldırma sonrası oluşan farklı boya kalınlıklarıyla etkileşimlerinin kaydedilmesi için bir deneysel analiz çalışması planlandı. Deneysel analiz çalışmanın



verimliliğini sağlamak için 2 seviyede beşer değişkenin faktöriyelidir kadar yani 32 kombinasyon test edilecek şekilde tasarlandı (Tablo 1).

**Tablo 1.** Deneysel Analiz Tasarımı

<u>Parametreler</u>	<u>Seviye 1</u>	<u>Seviye 2</u>
Kum	Kum 1	Kum 2
Reçine %	1,8	1,3
Yeni tip ESA2 %	1	2
Boya Tipi	Boya 1	Boya 2
Boya Kalınlığı	Tek kat	Çift kat

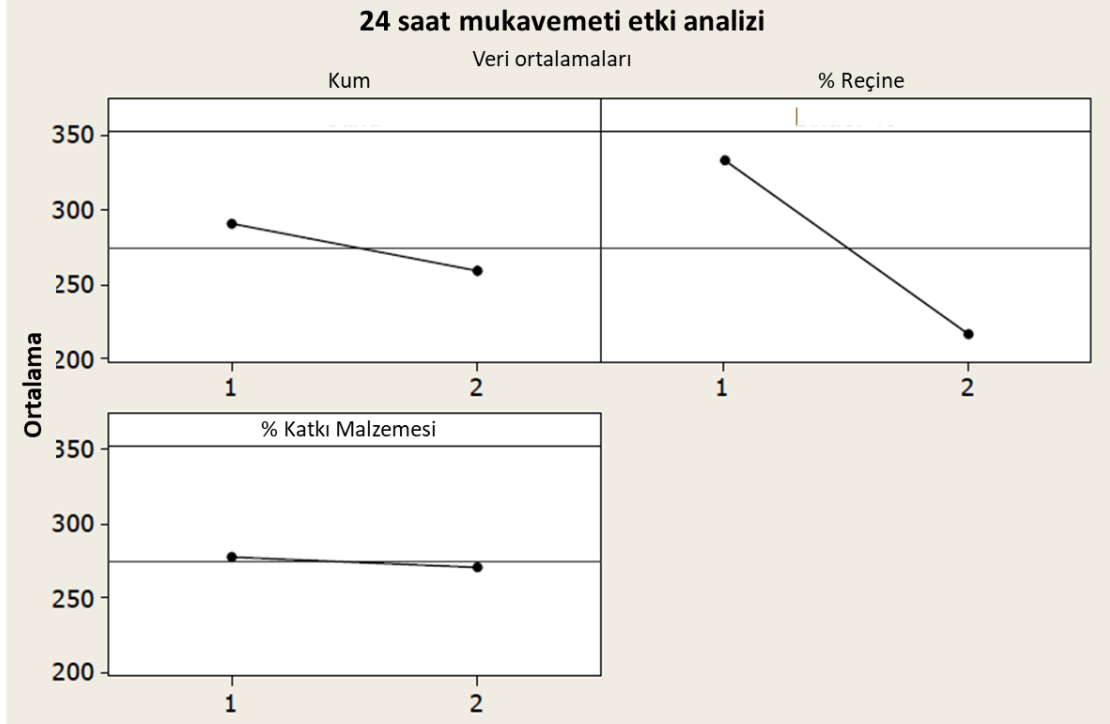
Çekme testi için toplamda farklı kum, reçine ve katkı oranlarından oluşan 8 farklı karışımdan standart prosedürlere göre numuneler hazırlandı. Çekme testi sonuçları ise Tablo 2.'deki gibi ortaya çıktı.

**Tablo 2.** Deneysel Analizdeki Kum Karışımlarının Çekme Testi Sonuçları

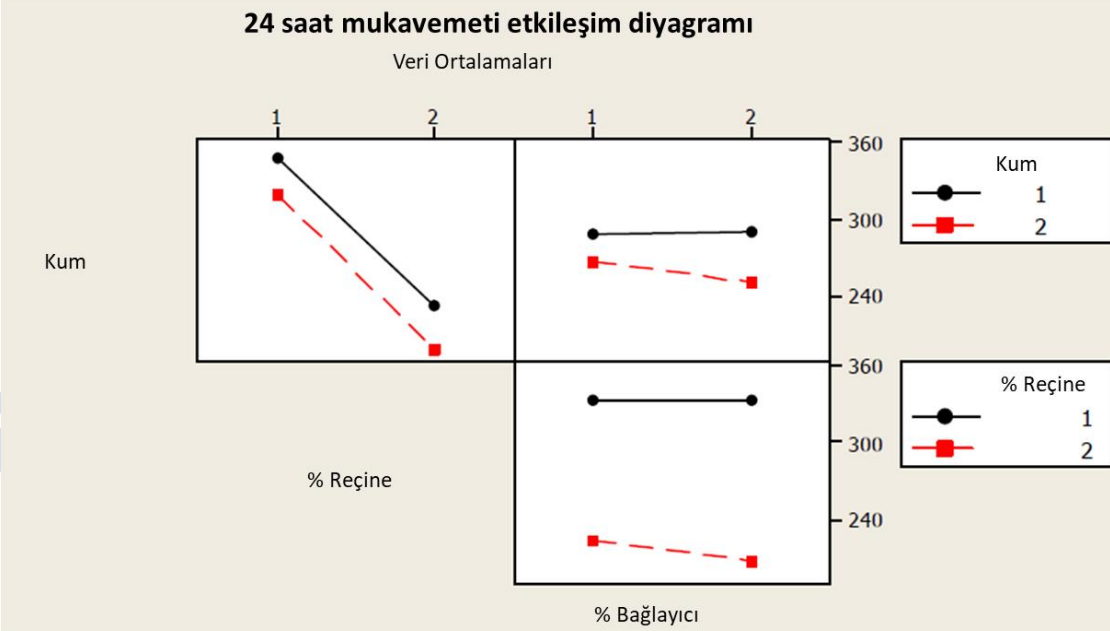
Karışım	Kum Tipi	Reçine %	Katkı %	Başlangıç	1 saat	24 saat
1	1	1	1	203	272	342
2	1	1	2	204	256	354
3	1	2	1	147	174	237
4	1	2	2	136	154	228
5	2	1	1	195	244	325
6	2	1	2	184	233	314
7	2	2	1	121	152	209
8	2	2	2	111	136	187

Sonuçlar öngörülene benzer şekilde oluşurken, çekme mukavemetinin reçine oranıyla doğru orantılı olduğu, kumun mukavemetinin daha az oranda etkilendiği, yeni tip ESA ilavesinin %1'den %2'ye çıkarılmasının ise Şekil 11'de görüldüğü gibi hafif bir etkiye neden olduğu gözlemlendi. Bileşenler arasındaki etkileşimin minimum seviyede olduğu ve en fazla etkileşimin kum ile katkı malzemesi arasında olduğu da bir diğer önemli nokta olarak kaydedildi (Şekil 12).

Çekme testi sonrasında 8 farklı karışımdan 2x2 penetrasyon testi için maça numuneleri üretildi. Üretilen maçalara deneysel analiz tasarımına uyularak iki farklı boya tipinde tek kat ve çift kat olacak şekilde boya uygulandı. Her iki boya tipi de grafit bazlı olup, 1 nolu boya tipi daha yüksek mika içeriğinden dolayı daha yalıtkan bir karaktere sahipti. Diğer yandan her iki boya benzer viskozite özellikleri sağlayan 30 Baume değerinde uygulanırken 2 nolu boya tipi daha yüksek katkı oranına sahipti.



Şekil 11. 8 farklı karışımda sistem bileşenlerinin 24 saat çekme mukavemetine etkileri



Şekil 12. 8 farklı karışımda sistem bileşenlerinin 24 saat çekme mukavemeti etkileşim diyagramı



Daldırma metoduyla boyaya tabi tutulan maçalar; tek kat boya için havuz içerisinde 3 saniye tutulurken, çift kat boya için ise deneysel analiz tasarımına göre, 3 saniyelik ilk kat uygulamasından sonra biraz beklenip 3 saniyelik ikinci bir daldırma daha uygulandı. Tek ve çift kat boya uygulaması arasındaki kalınlık farkı ise 0,07 - 1 mm arasında ölçüldü. 1 nolu boya ile tek kat boyada ortalama kalınlık 0,28 mm iken çift kat boyada 0,36 olarak ortaya çıktı. 2 nolu boyada ise tek kat 0,2 mm çift kat ise 0,3 mm olarak belirlendi (Tablo 3).

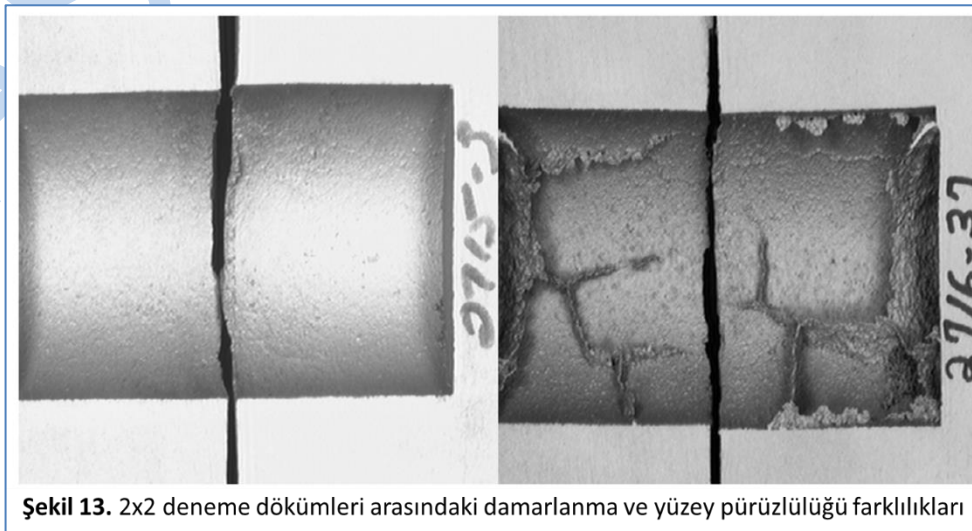
**Tablo 3.** Boya Özellikleri ve Kalınlıkları

<b>Özellikler</b>	<b>Boya 1</b>	<b>Boya 2</b>
Viskozite (100 rpm)	60	51
Viskozite (20 rpm)	140	135
Viskozite (10 rpm)	310	270
Baume	30p	30p
Katı oranı %	27,71	32,93
<b>3 s daldırma sonrası kalınlıklar</b>		
Tek kat	0,28	0,20
Çift kat	0,36	0,30

Üretilen maçaların boya sonrasında ve kuruduktan sonra ağırlıkları ölçüldü. 1 nolu boyada tek daldırma için (%75 tutma) ortalama ağırlık 9,84 gr, çift daldırma için (%74 tutma) 11,44 gr ölçüldü. Aynı koşullarda 2 nolu boyada tek daldırmada (%69 tutma) 5,19 gr, çift daldırmada (%71 tutma) 7,09 gr ölçüldü.

Kurutulan maçalar kalıba yerleştirildi. Döküm işlemi 1.480°C'de (2.700F<sup>0</sup>) ASTM Class 30 malzeme (GG20) pik analizde gerçekleştirildi. Sarsak sonrasında bilyalı temizleme uygulandı ve maça boşlukları üzerinden kesitler fotoğraflanarak damarlaşıma, metal penetrasyonu ve yüzey pürüzlülüğü bazında 1 - 5 arasında derecelendirme yapıldı (Tablo 4). Şekil 13'te de görüldüğü gibi döküm parçaları arasında önemli farklılıklar tespit edildi.

Elde edilen verilerin etki analizinde numuneler üzerinde metal penetrasyonu açısından büyük farklılıklar olmadığı görüldü (Şekil 14). Diyagramda 1.3 - 1.6 aralığı arasına denk düşen veriler esas alındı.

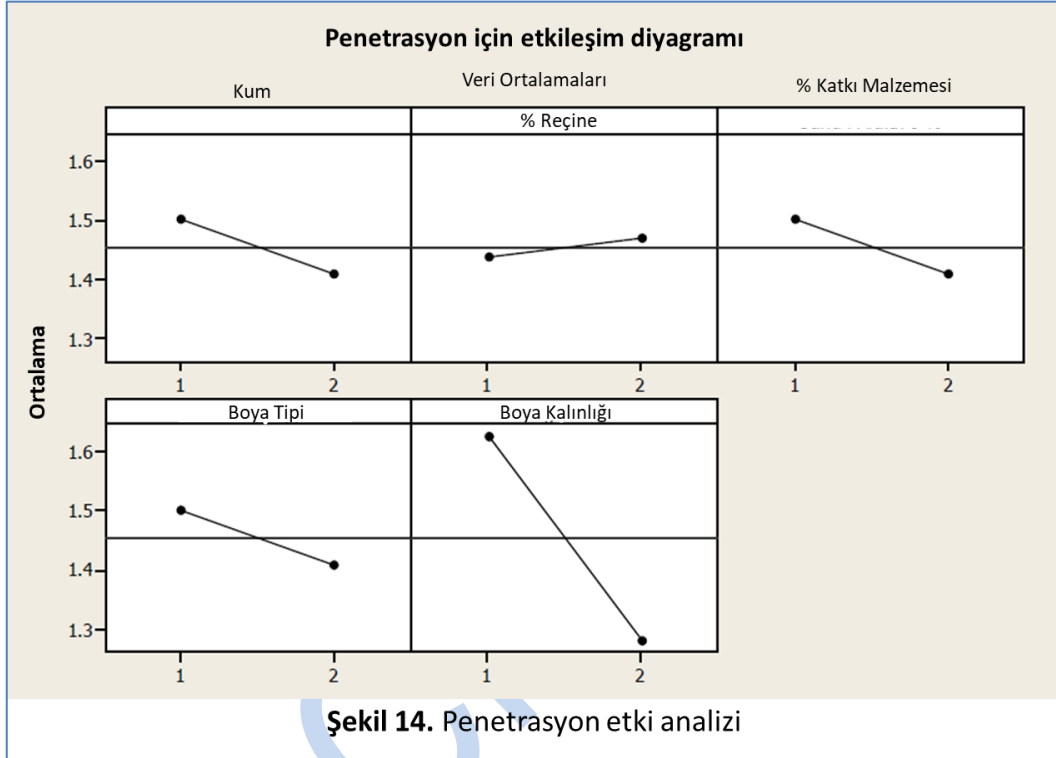


**Şekil 13.** 2x2 deneme dökümleri arasındaki damarlanma ve yüzey pürüzlülüğü farklılıkları



ANOVA varyasyon analizi hesaplamalarında ise sadece boya kalınlığının penetrasyon üzerinde bir etkisi olmadığı tespit edildi.

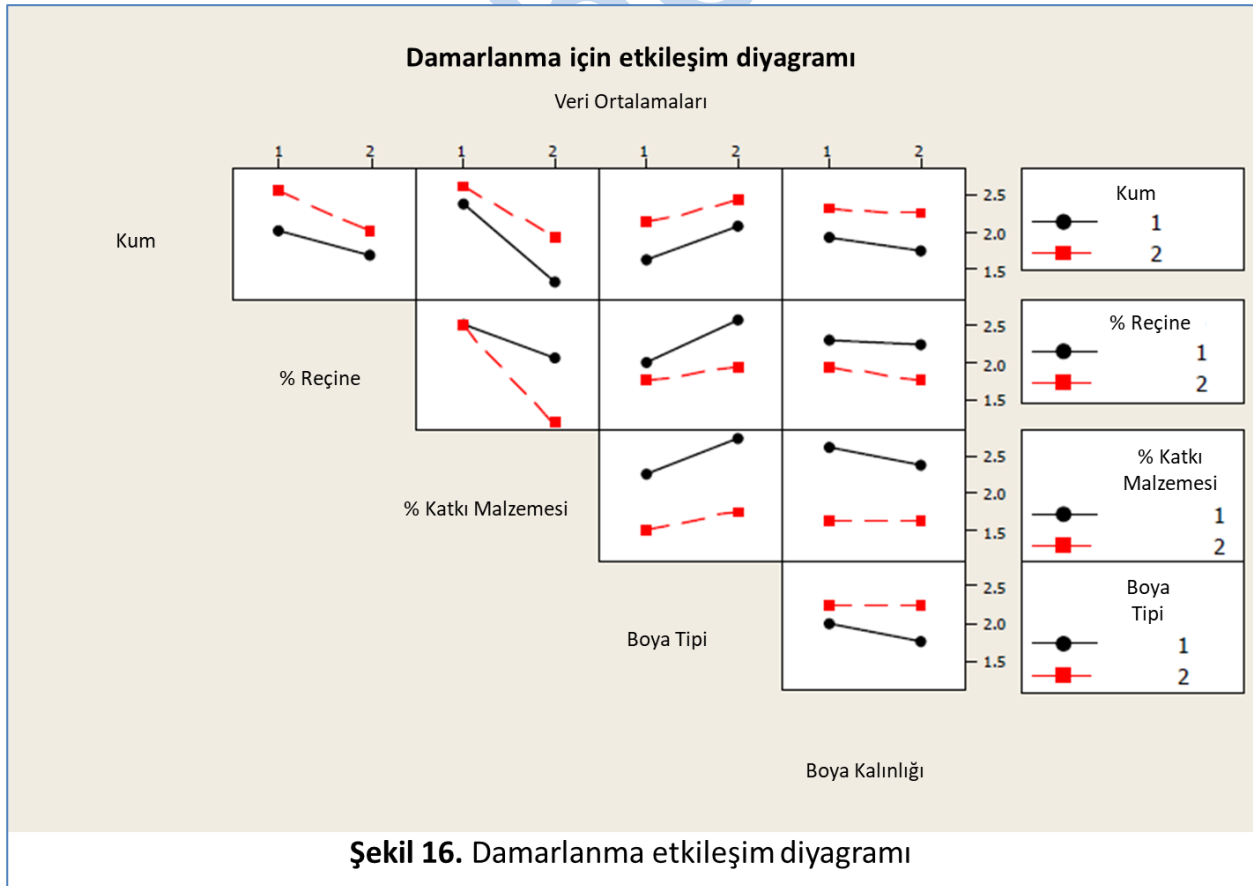
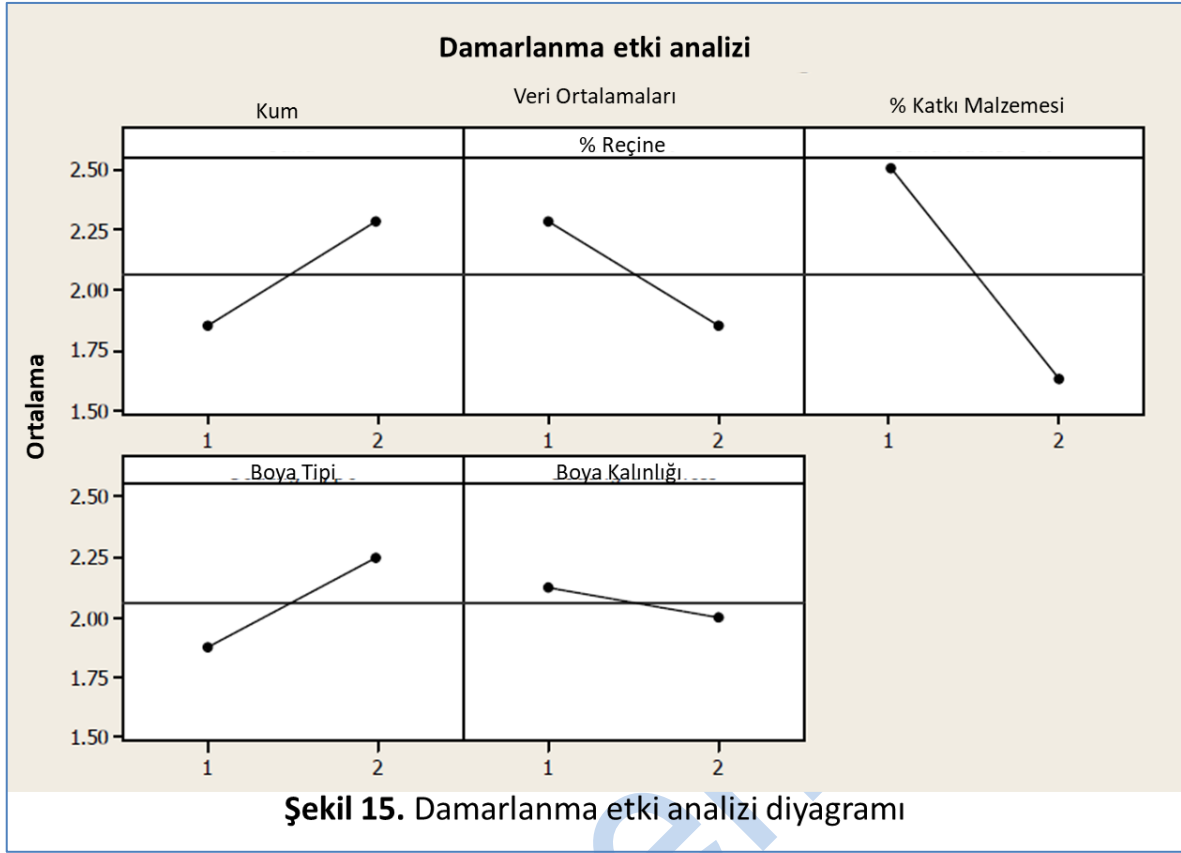
Damarlaşma analizlerinde ise büyük farklılıkların olduğu tespit edildi. Etkileşim diyagramında görüldüğü gibi (Şekil 15), 1 nolu kum tipinde daha düşük reçine oranı, %2 yeni tip ESA ve 1 nolu boya kullanımında damarlanmaların oldukça azaldığı öne çıktı.

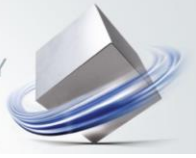


Boya kalınlığının ise nispeten düşük bir etkisinin olduğu ve boya kalınlığı arttıkça damarlanmanın az da olsa düşüş gösterdiği gözlemlendi.

Şekil 16'da ise başka farklı etkiler ortaya çıktı. Yeni ESA oranı ile kum, reçine oranı, reçine ve boya tipleri arasındaki etkileşimlerin de düşük fakat yine de farkedilir etkileri olduğu ifade edildi.

ANOVA analizinde (Tablo 5) ise damarlaşmayı en çok etkileyen faktörün yeni tip ESA ilavesi olduğu görüldü.



**Tablo 4. Deneysel Analiz Tasarımı & Test Değerleri**

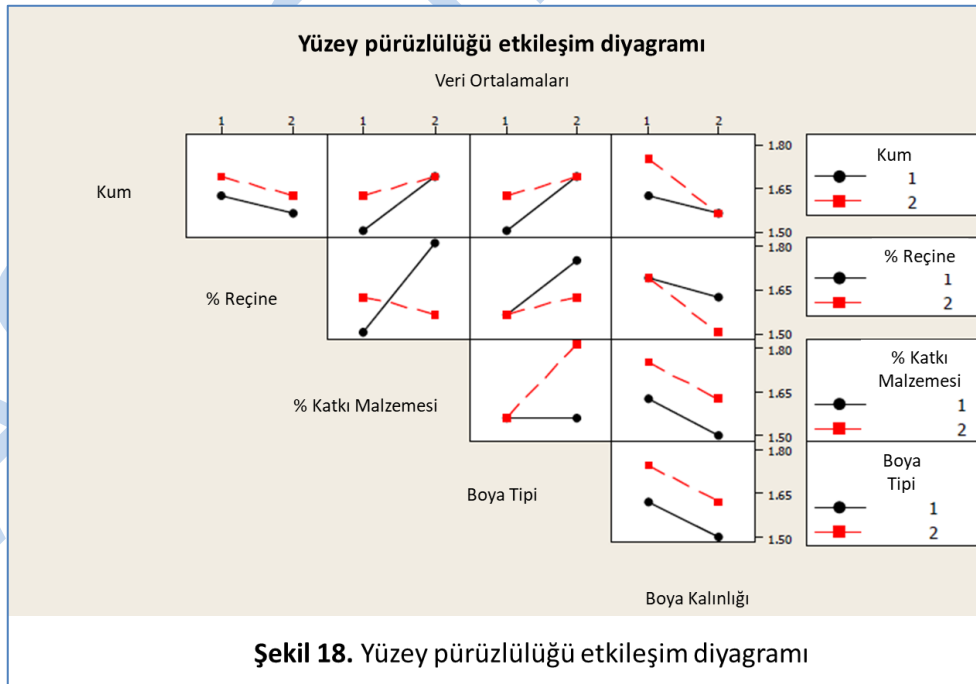
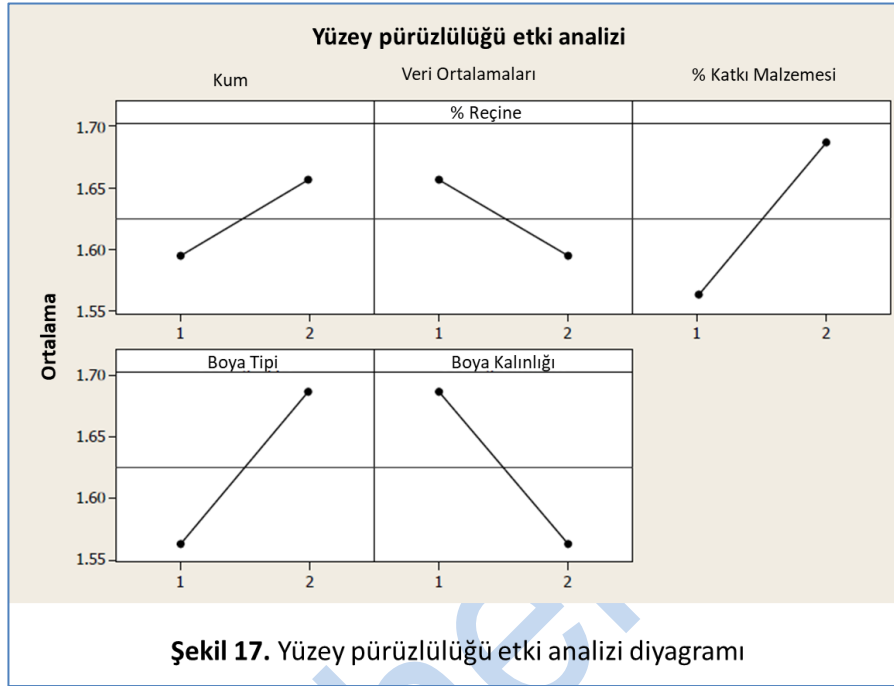
StdOrder	RunOrder	Kum	%Reçine	%Katkı Malzemesi	Boya Tipi	Boya Kalınlığı	Penetrasyon	Damarlanma	Yüzey Pürüzlülüğü
1	1	1	1	1	1	1	2	2,5	1,5
15	2	1	2	2	2	1	1,5	1	2
6	3	1	1	2	1	2	1	1	1,5
27	4	2	2	1	2	1	1,5	3	2
19	5	2	1	1	2	1	1,5	3	1,5
30	6	2	2	2	1	2	1	1,5	1,5
7	7	1	1	2	2	1	1	2	2
16	8	1	2	2	2	2	1,5	1	1,5
11	9	1	2	1	2	1	1,5	3	1,5
26	10	2	2	1	1	2	1	2	1,5
13	11	1	2	2	1	1	1,5	1	1,5
24	12	2	1	2	2	2	1,5	3,5	2
23	13	2	1	2	2	1	1,5	2,5	2
25	14	2	2	1	1	1	1,5	2,5	2
18	15	2	1	1	1	2	1	2,5	1,5
5	16	1	1	2	1	1	1,5	1,5	1,5
21	17	2	1	2	1	1	1,5	2	2
28	18	2	2	1	2	2	1	3	1,5
8	19	1	1	2	2	2	1	2	2
14	20	1	2	2	1	2	1,5	1	1,5
31	21	2	2	2	2	1	2	1	1,5
3	22	1	1	1	2	1	1,5	2,5	1,5
17	23	2	1	1	1	1	1,5	2,5	1,5
20	24	2	1	1	2	2	1,5	2,5	1,5
22	25	2	1	2	1	2	2	2	1,5
10	26	1	2	1	1	2	1,5	2	1,5
2	27	1	1	1	1	2	1	2	1,5
4	28	1	1	1	2	2	2	2,5	1,5
9	29	1	2	1	1	1	3	2	1,5
32	30	2	2	2	2	2	1	1	1,5
12	31	1	2	1	2	2	1	2,5	1,5
29	32	2	2	2	1	1	1,5	2	1,5

**Tablo 5. Damarlanma ANOVA Analizi**

Kaynak	DF	SeqSS	AdjSS	AdjMS	F	P
Kum	1	1.5312	1.5312	1.5312	10.53	0.004
% Reçine	1	1.5313	1.5313	1.5313	10.53	0.004
Yeni ESA	1	6.1250	6.1250	6.1250	42.13	0.000
Boya	1	1.1250	1.1250	1.1250	7.74	0.011
Kalınlık	1	0.1250	0.1250	0.1250	0.86	0.363
AC	1	0.2813	0.2813	0.2813	1.93	0.178
BC	1	1.5312	1.5312	1.5312	10.53	0.004
BD	1	0.2813	0.2813	0.2813	1.93	0.178
Hata	23	3.3437	3.3437	0.1454		
Toplam	31	15.875				



Ana etki diyagramı Şekil 17 ve etkileşim diyagramı Şekil 18’de görüldüğü gibi, numunelerin yüzey özellikleri arasında düşük seviyede farklılıklar gözlemlendi. ANOVA analizi ise yeni ESA oranı, boya tipi ve kalınlığı ile reçine ve yeni ESA oranı arasındaki etkileşimleri ortaya çıkardı.






**Tablo 6.** Yüzey pürüzlülüğü ANOVA Analizi

Kaynak	DF	SeqSS	AdjSS	AdjMS	F	P
Kum	1	0.0312	0.0312	0.0312	1.14	0.296
% Reçine	1	0.0312	0.0312	0.0312	1.14	0.296
Yeni ESA	1	0.1250	0.1250	0.1250	4.58	0.043
Boya	1	0.1250	0.1250	0.1250	4.58	0.043
Kalınlık	1	0.1250	0.1250	0.1250	4.58	0.043
BC	1	0.2812	0.2812	0.2812	10.29	0.004
CD	1	0.1250	0.1250	0.1250	4.58	0.043
Hata	24	0.6562	0.6562	0.0273		
Toplam	31	1.500				

Tüm denemeler içerisinde en iyi sonuçların penetrasyon için 1, damarlanma için 1 ve yüzey pürüzlülüğü için 1,5 değerinde görüldüğü belirlendi. Ancak bu sonuçlar birden fazla kombinasyonda oluşabilmekteydi. Örneğin, deneme 6 (std order) kum 1, reçine oranı 1 (%1,8), katkı malzemesi oranı 2 (%2), boya 1 ve boya kalınlığı 2 (çift daldırma) sisteminde iyi sonuçlar alınırken, deneme 32 (std order) kum 2, reçine oranı 2 (%1,3), katkı malzemesi oranı 2 (%2), boya 2, boya kalınlığı çift daldırma koşullarında da aynı sonuçları sağlayabiliyordu.

Bu sonuçlardan yola çıkıldığında penetrasyon, damarlanma ve yüzey pürüzlülüğü kriterlerinden herhangi bir ödün verilmeden maliyetleri azaltmanın ve kalite özelliklerini geliştirmenin mümkün olduğu görülüyor. Sistemin ve bileşenlerinin tam olarak anlaşılması ve esneklik potansiyelinin bulunması proses üzerinde geliştirmeler yapmak için hala potansiyel bulunduğuna işaret ediyor.



## Sonuç

Yeni ESA katkılarının mevcut ESA'nın yarısı kadar ilave edilmesine karşın damarlanmayı engellemede oldukça verimli olduğu, maça üretimi ve üretilen maçaların özellikleri açısından herhangi bir olumsuz duruma yol açmadığı kanıtlanmış oldu.

Yüksek seri fren diski üretiminin ılık kutu proseslerinde yapılan denemeler gayet başarılı sonuçlar verdi. Ortaya çıkan bir diğer önemli sonuç; başarının anahtarının nitelikli ve motive bir ekiple iyi çalışılmış bir test planı üzerinde hareket etmenin elzem olduğuydu. Bu olgu aynı zamanda işletme ve malzeme tedarikçisi arasındaki güven ve işbirliğinin de kalıcı olmasını sağlamakta.

Deneysel analiz metoduyla yeni ESA2 malzemenin soğuk kutu denemelerinde; optimum kum, reçine oranı, uygun boya sistemi yakalandığında 2x2 penetrasyon testinin zorlu koşullarında dahi verimli sonuçlar alındığı tespit edildi. Burada sistematik yaklaşımla çalışmaya devam edilmesi halinde hem maliyet hem de kalite açısından ek geliştirmeler yapılabileceği de gözlemlendi.

## Teşekkür

Saha denemelerindeki değerli işbirlikleri ve katkıları için Fabrika 5'in tüm değerli personeline, denemelerin planlanması aşamasındaki teknik destekleri için Ashland ekibinden Keith Thomas ve Randy Sandstrom'a teşekkürlerimizi sunuyoruz.

## Kaynakça

1. Monroe, R.W., „Use of Iron Oxide in Mold and Core Mixes for Ferrous Castings. AFS Transactions 1988.
2. Baker, S.G., Werling, J.M., „Expansion Control Method for Sand Cores“, AFS Transactions 2003
3. Gilbreath, T.J., Zajac, P.L., Bruce, J., „New Sand Additive Alternative for Veining and Penetration Defects in Thin-Walled Castings“, AFS Transactions 1999.
4. Tordoff, W.L., Tenaglia, R.D., „Test Casting Evaluation of Chemical Binder Systems“, AFS Transactions 1980.
5. Giese, S.R., Thiel, J., „Numeric Ranking of Step Cone Test Castings“, AFS Transactions 2007.