



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



KALİTELİ ÇİMENTO ÜRETİMİ İÇİN DENEY
TASARIMINA AİT OPTİMİZASYON
UYGULAMASI

MÜSLÜM AKASLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Müslüm AKASLAN tarafından hazırlanan “Kaliteli Çimento Üretimi İçin Deneysel Tasarımına ait Optimizasyon Uygulaması” adlı tez çalışması 31/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Orhan BAYTAR

Danışman

Doç. Dr. A. Abdullah CEYHAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şerife PARLAYICI

İmza

.....
.....
.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 18201116 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Müslüm AKASLAN

31.07.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KALİTELİ ÇİMENTO ÜRETİMİ İÇİN DENEY TASARIMINA AİT OPTİMİZASYON UYGULAMASI

Müslüm AKASLAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

1. Danışman: Doç.Dr. A. Abdullah CEYHAN

2. Danışman: Doç.Dr. M. Emin BAYSAL

2019, 61 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. A. Abdullah CEYHAN

Doç. Dr. Orhan BAYTAR

Dr. Öğr. Üyesi Şerife PARLAYICI

Çimento, temel olarak silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri içeren hammaddelerin 1250-1450 °C aralığında değişen sinterleşme sıcaklıklarına kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul madde olan klinkerin, alçı taşı, tras, kalker, cüruf gibi bir veya daha çok katkı maddesi katılarak öğütülmesi sonucu üretilen hidrolik bağlayıcı maddelere denilmektedir. Çimentonun talep edilen kalitede üretimi için, üretimin farklı aşamalarında numuneler alınarak analizler yapılmaktadır. Yapılan analiz sonuçlarına sahip çimento kullanılarak hazırlanan standart numuneler üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik davranış testleri ile kalite kontrolü takip edilmektedir. Bir çimento fabrikasında yapılan analizler, her bir faktörün bireysel etkisinin ortaya konulması açısından oldukça önemli ve anlamlı olmakla birlikte, diğer faktörler ile birlikte ikili, üçlü, ve çoklu etkiler hakkında bir bilgi verememektedir. Yapılan bu çalışmada çimento ürününü etkileyen faktörlerin farklı seviyelerde oluşması nedeniyle çok seviyeli deney tasarımına ait yöntemler kullanılarak deney tasarımı optimizasyon uygulaması ele alınmıştır. Bu sayede, her bir faktörün olası değişim aralıkları da dikkate alınarak tüm faktörlerin olası bireysel ve toplu etkileri birlikte değerlendirilebilir hale getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento, deney tasarımı, kalite, optimizasyon metot

ABSTRACT

MS THESIS

APPLICATION OF OPTIMIZATION DESIGN OF EXPERIMENT FOR QUALITY CEMENT PRODUCTION

Müslüm AKASLAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Chemical Engineering**

1st Advisor: Assoc. Prof. Dr. A. Abdullah CEYHAN

2nd Advisor: Assoc. Prof. Dr. M. Emin BAYSAL

2019, 61 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. A. Abdullah CEYHAN

Assoc. Prof. Dr. Orhan BAYTAR

Asst. Prof. Dr. Şerife PARLAYICI

Cement is produced by adding one or more additives such as clinker, gypsum, trass, limestone, slag, which is the semi-finished material obtained by baking the raw materials containing silicon, calcium, aluminum and iron oxides to the 1250-1450 °C range until the changing sintering temperatures, produced hydraulic binder materials. For the quality production of the cement, the samples are taken at different stages of the production and analyzed. Physical and mechanical behavior tests are performed on standard samples prepared using cement with the results of the analysis made and quality control is followed. Analyzes made in a cement plant are very important and meaningful to reveal the individual effect of each factor but they can not give information about the effects of other factors as well as binary, triple and multiple effects. In this study, many factors affecting the cement product occur at different levels Experimental design optimization methods using the methods of level experiment design were discussed. In this way, possible individual and aggregate effects of all factors were evaluated together, taking into account the possible change intervals of each factor.

Keywords: Cement, experimental design, optimization methods, quality

ÖNSÖZ

Bu tezin her aşamasında beni destekleyen, bilgi ve tecrübelerini esirgemedi sunan, çalışma motivasyonumu kaybettiğimde ve zorlanmalarında kişisel koçluğumu yapan kıymetli danışman hocam Doç. Dr. A. Abdullah CEYHAN'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Farklı disiplinlerle çalışma konusunda yeni bir ufuk açtığı için ve tezin hazırlanması sürecinde yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocalarım Doç. Dr. M.Emin BAYSAL ve Dr. Abdulkadir ATALAN'a, tez jürimde bulunma nezaketi gösteren değerli jüri üyelerine, hayatlarından fedakarlık yaparak beni bu günlere getiren aileme, hayatımın en keyifli ve sevgi dolu kısmının sahipleri eşim Gülhan'a, kızım Sare'ye bana kattıkları herşey için, beni destekledikleri için ve bana inandıkları için en kalbi duygularıyla teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Ayrıca laboratuvar ve malzeme desteği ile birlikte tecrübeleriyle de yardım etmekten kaçınmayan Sayın Ahmet YİĞİT'e ve tüm laboratuvar ekibine desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmaya sağladıkları finansal destek sebebiyle Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Müslüm AKASLAN
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
1 GİRİŞ ve AMAÇ	1
2 KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Çimentonun Tanımı ve Hakkında Genel Bilgiler	3
2.1.1 Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	3
2.1.2 Çimentonun kullanım alanları	4
2.2 Dünyada ve Türkiye’de Çimento Sektörünün Genel Görünümü.....	4
2.3 Çimentonun Ana Hammaddeleri.....	6
2.3.1 Kalker.....	7
2.3.2 Kil	7
2.3.3 Marn.....	8
2.3.4 Demir Cevheri.....	8
2.3.5 Boksit	8
2.3.6 Alçıtaşı	9
2.3.7 Tras (Puzolan).....	9
2.3.8 Uçucu kül	9
2.3.9 Cüruf	9
2.4 Çimento üretimi	10
2.4.1 Klinker oluşum reaksiyonları.....	10
2.5 Çimento Türleri.....	11
2.6 Çimento Testleri.....	12
2.7 Deney Tasarımı	12
2.7.1 Deney tasarım prensipleri	14
2.7.2 Deney tasarımı nasıl yapılır?	15
2.7.3 Deney tasarım çeşitleri.....	16
2.8 Çimento Üzerine Yapılan Çalışmalar	20
3 MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1 Materyal	22
3.2 Yöntem.....	23
3.2.1 Çözünmeyen kalıntı	23
3.2.2 Prizbaşı süresi	24

3.2.3	Serbest kalsiyum oksit (S.CaO)	24
3.2.4	CO ₂	24
3.2.5	Kızdırma kaybı	24
3.2.6	Blain.....	25
3.2.7	45 µm ve 32 µm elek üzerinde kalan.....	25
3.2.8	Basınç dayanım deneyleri.....	25
3.2.9	Yoğunluk	26
3.2.10	Hacim genişmesi	26
3.3	Deney Tasarımı Optimizasyonu (DOE).....	26
3.3.1	Çimento üretiminde faktörlerin belirlenmesi.....	27
3.3.2	Faktörlere ait notasyonların belirlenmesi	32
3.3.3	Tam faktöriyel deney tasarımı (Full-Factorial Design)	33
3.3.4	Yanıt yüzey tasarımı (RSM - BBD)	34
3.3.5	Deney tasarımına ait matematiksel modellemelerin oluşturulması	38
3.3.6	Optimizasyon modelinin oluşturulması	41
4	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	47
4.1	Tam Faktöriyel Deney Tasarımına Ait İstatiksel Optimizasyon Sonuçları	47
4.2	Box-Behnken Deney Tasarımına Ait İstatiksel Optimizasyon Sonuçlar	49
4.3	Sonuçların Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	53
	KAYNAKLAR	56
	ÖZGEÇMİŞ	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$: Derece santigrat
K	: Ekipman sabiti
ρ	: Çimentonun yoğunluğu (g.cm^{-3})
η	: Deneysel sıcaklıktaki havanın viskozitesi (Pa.s)
t	: Süre (s)
V	: Sarf edilen çözelti hacmi (ml)
f	: Çözelti faktörü
Q1	: Birinci çeyreklik
Q3	: Üçüncü çeyreklik
\hat{w}	: Varyans için amaç fonksiyonu
$\hat{\mu}$: İstenilen ortalama
τ	: Hedef değer
τ_{σ}	: Hedeflenen standart sapma
$\hat{\sigma}$: Standart sapma
$\hat{\sigma}^2$: Varyans
Ω	: Tanım bölgesi

Kısaltmalar

A	: Alüminyum oksit (Al_2O_3)
B	: Blain
BBD	: Box-Behnken Tasarımı
C	: Kalsiyum oksit (CaO)
C_2S	: Dikalsiyum sülfat
C_3A	: Trikalsiyum alüminat
C_3S	: Trikalsiyum sülfat
C_4AF	: Tetrakalsiyum alüminoferrit
CCD	: Merkezi Kompozit Tasarımı
ÇK	: Çözünmeyen kalıntı
d	: Yoğunluk
DF	: Serbestlik derecesi
DOE	: Deneysel Tasarım
F	: Demir oksit (Fe_2O_3)
FFD	: Tam Faktöriyel Tasarım
HG	: Hacim genişmesi
K	: Potasyum oksit (K_2O)
KK	: Kızdırma kaybı
M	: Magnezyum oksit (MgO)
Maks	: Maksimum
Min	: Minimum
MS	: Hata karelerinin ortalaması
N	: Sodyum oksit (Na_2O)
OVC	: Otomatik vicat cihazı
PB	: Priz başı
RSM	: Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methods)
S	: Silisyum dioksit (SiO_2)
SCaO	: Serbest kalsiyum oksit
SS	: Hata karelerinin toplamı
StDev	: Standart sapma
32	: 32 mikron
45	: 45 mikron

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yıllara göre dünya çimento üretimi ve tüketimi (milyon ton).....	5
Şekil 2.2 Türkiye çimento sektörü temel göstergeleri (bin ton).	5
Şekil 2.3 2017 yılı çimento müşterileri istatistikleri.....	6
Şekil 2.4 Çimento üretimi akış şeması.....	10
Şekil 2.5 Klinker faz diyagramı	11
Şekil 2.6 Bir sistemin genel modeli.	14
Şekil 2.7 Deney tasarımının uygulanması süreci.....	16
Şekil 2.8 Tek yüzeyli CCD (a) ve üç faktör için BBD (b).....	19
Şekil 4.1 Tam faktöriyel Tasarımına göre Y(2) Optimum Eğrileri	47
Şekil 4.2 Tam faktöriyel tasarımına göre Y(7) optimum eğrileri.....	48
Şekil 4.3 Tam faktöriyel tasarımına göre Y(28) optimum eğrileri.....	48
Şekil 4.4 Tam faktöriyel tasarımına göre Y(2,7,28) optimum eğrileri.....	48
Şekil 4.5 Box-Behnken L-Tip tasarımına göre Y (2) optimum eğrileri	50
Şekil 4.6 Box-Behnken N-Tip tasarımına göre Y (2) optimum eğrileri.....	50
Şekil 4.7 Box-Behnken L-Tip tasarımına göre Y(7) optimum eğrileri	51
Şekil 4.8 Box-Behnken N-Tip tasarımına göre Y(7) optimum eğrileri.....	51
Şekil 4.9 Box-Behnken L-Type Tasarımına göre Y (28) Optimum Eğrileri.....	52
Şekil 4.10 Box-Behnken N-Tip Tasarımına göre Y (28) Optimum Eğrileri	53

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Çimentonun Ana Bileşenleri	4
Çizelge 2.2 Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları.....	7
Çizelge 2.3 Üç faktöriyel Box-Behnken Tasarımı.....	18
Çizelge 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan hammadde ve kimyasallar	22
Çizelge 3.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz/ekipmanlar.....	23
Çizelge 3.3 Çimento üretimi için belirlenen faktörlere ait tanımlayıcı istatistiksel veriler	28
Çizelge 3.4 Çimentoların 2 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait varyans analizi	28
Çizelge 3.5 Çimentoların 7 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait varyans analizi	30
Çizelge 3.6 Çimentoların 28 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait varyans analizi	31
Çizelge 3.7 Çimentoların 2 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait kırpma (truncated) varyans analizi	31
Çizelge 3.8 Çimentoların 7 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait kırpma (truncated) varyans analizi	32
Çizelge 3.9 Çimentoların 28 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait kırpma (truncated) varyans analizi	32
Çizelge 3.10 Çimento ürünü için etki ettiği düşünülen faktörler ve Simgeleri	32
Çizelge 3.11 Tam faktöriyel deney tasarımı için faktörlerin seviyeleri	33
Çizelge 3.12 Tam faktöriyel deney tasarımına göre verilerin dizilimi	34
Çizelge 3.13 Box-Behnken Tasarımına göre faktörlere ait seviyeler	35
Çizelge 3.14 Box-Behnken Tasarımına göre Verilerin Dizilimi	37
Çizelge 3.15 Box-Behnken Deney Tasarımı veri dizilimi.....	39
Çizelge 4.1 Yanıt fonksiyonları için tam faktöriyel tasarımına göre optimum değerler	47
Çizelge 4.2 Y (2) yanıtı için kalite karakteristiklerine göre optimum değerler	49
Çizelge 4.3 Y (7) yanıtı için kalite karakteristiklerine göre optimum değerler	49
Çizelge 4.4 Y (28) yanıtı için kalite karakteristiklerine göre optimum değerler	52
Çizelge 4.5 Uygulanan tasarımlarına ait sonuçların uygulanması.....	55

1 GİRİŞ ve AMAÇ

Barınma, insanoğlunun en temel ihtiyaçlarından birisidir. İlk çağlarda bu ihtiyaç doğada bulunan mağaraları kullanarak daha sonraları taş, toprak ve ahşap malzemeler kullanarak oluşturulan yapılar ile giderilmiştir. Günümüzde bu ihtiyaç büyük ölçüde çimento ve çimento ile yapılan yapılar kullanılarak sağlanmaktadır.

Çimento, başlıca kalsiyum, silisyum, alüminyum ile demir oksitleri içeren hammaddelerin sinterleşme sıcaklıklarına kadar pişirilmesiyle ara ürün olan klinkerin, alçı taşı, tras, kalker, cüruf gibi bir veya daha çok katkı maddesi katılarak öğütülmesi sonucu üretilen hidrolik bağlayıcı maddelere denilmektedir (Kuru, 2008).

Çimentonun tarihsel sürecine bakıldığında, modern anlamda çimento kullanımının başlangıcı 1800'lü yıllara dayanmaktadır. Çimento olarak bilinen malzemenin ilk üretimi 1824 yılında İngiltere'de Joseph Aspdin tarafından ince taneli kalker ve kil karışımının pişirilmesi ve sonrasında öğütülerek elde edilmiştir. Üretilen çimentonun özellikleri ve rengi, Portland adındaki adadan getirilen doğal yapı taşına benzer olmasından dolayı Portland çimentosu olarak isimlendirilmiştir. Üretimine başlandığı yıldan günümüze kadar farklı katkı maddeleri ile üretilen çimentolar, temel hammadde ve üretim prensiplerinin aynı olması açısından portland çimento olarak adlandırılmaktadır (Yeğınobalı, 2004).

Teknolojinin gelişimi ve artan nüfus yoğunluğunun gerektirdiği alt yapı ve üst yapı faaliyetleri başta olmak üzere, deprem, sel ve olası doğal afetler/savaşlarda ihtiyaç duyulan dayanıklı yapılar, çimentonun çok geniş bir yelpazede vazgeçilmez bir malzeme olmasını sağlamıştır. Bu durum, farklı özelliklerde ve belirli kalite standartlarına sahip çimento tiplerinin üretilmesini zorunlu kılmıştır.

Çimento üretiminin her aşamasında üretimin arzu edilen şekilde sağlanabilmesi için kimyasal, fiziksel ve mekanik testler uygulanarak üretimi etkileyen her bir parametrenin etkileri kontrol edilmektedir. Bir çimento fabrikasında yapılan testler her bir faktörün bireysel etkisinin ortaya konulması açısından önemli olmakla birlikte, diğer parametreler ile birlikte ikili, üçlü ve çoklu etkiler hakkında herhangi bir bilgi vermemektedir.

Bilindiği üzere bir olayı etkileyen parametrelerin birlikte değişimi, söz konusu olayın farklı ölçekte değişimine yol açmaktadır. Bu bakımdan incelenen olay üzerine etki eden parametrelerin birlikte etkilerinin de göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Deney Tasarımı (DOE) Tekniği, giriş (input) değişkenlerine (faktörlerine) sahip sistemlerin performansını ya da çıktılarını (response or output) hızlı ve kolay bir şekilde optimize etmek için kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir tekniktir. Sisteme ait çıktıları etkilemesi düşünölen bütün faktörlerin seviyelerini kapsayan bir deney tasarımının test planını oluşturur. Deney tasarımındaki ilk amaç faktör sayıları çok olan sistemlerde ölçülebilir ya da yönetilebilir bir sayıya indirmektir. Sisteme ait oluşturulan deney tasarımın düzenlenmesi ile verilerin istatistiksel analiz kısmı başlar. Optimizasyon kısmında sistem performansına etki etmesi muhtemel faktörlerin katkısı dikkate alınarak deney tasarımı takip edilir. Denemenin en yaygın başlangıç ve nihai optimizasyon tasarımlarına Tarama Tasarımı ve Yanıt Yüzey Metodu (RSM) denir. Ancak, zamanla deney tasarımını oluşturan tam faktör ve çok seviyeli tasarım yöntemlerinde optimizasyon kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada çimento dayanımını etkileyen faktörlerin farklı seviyelerde oluşması nedeniyle çok seviyeli deney tasarımına ait tam faktöriyel ile Box-Behnken (RSM'ye ait bir yöntem) tasarımlarının optimizasyon uygulaması ele alınmıştır. Bu sayede, her bir faktörün olası değişim aralıkları da dikkate alınarak tüm faktörlerin olası bireysel ve toplu etkileri birlikte değerlendirilebilir hale getirilmesi amaçlanmıştır.

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Çimentonun Tanımı ve Hakkında Genel Bilgiler

Çimento, su ile karıştırıldığında, hidrasyon reaksiyonları sonucu priz alarak sertleşen bir yapı oluşturarak, dayanımını ve kararlılığını koruyan ince öğütülmüş inorganik hidrolik bağlayıcıdır (TSE, 2012).

Çimento; temel olarak CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oksitlerini içerir. Üretiminde kullanılacak hammaddelerin uygunluk dereceleri, sahip oldukları kimyasal bileşimleri ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin, üretime verilecek hammadde karışımı içerisinde CaCO_3 içeriğinin, kullanılan CaO kaynağına bağlı olarak, %65-80 arasında kalması istenilir. CaCO_3 içeriğindeki küçük bir değişiklik, klinkerdeki dikalsiyum silikat (C_2S) ile trikalsiyum silikat (C_3S) yüzdelerinin değişmesine ve çimento mukavemetinin önemli derecede sapmasına yol açmaktadır. Bu sebeple her bir hammadde için tanımlanmış modüller takip edilerek üretim yapılır (Atar, 2006).

2.1.1 Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Yaygın olarak kullanılan çimento tipi koyu gri renktedir. Hammaddelerin özellikleri, içerdiği katkı türleri veya alternatif enerji kaynağı olarak kullanılan atıklar çimento renginin farklı tonlarda olmasına sebep olabilmektedir. Yaygın kullanılan çimento tipleri 6 μm ile 90 μm aralığında taneciklere sahiptir. Yoğunluğu çimento tipine göre değişmekte olup 2,90 ile 3,15 g.cm^{-3} arasındadır, 1 gram çimento taneciklerinin spesifik yüzey alanı olarak ifade edilen blain değeri ise 3500 ile 5000 $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$ aralığında değişmektedir.

Çimento bileşiminin yaklaşık %90'ı kalsiyum alüminatlar ve kalsiyum silikatlar olarak bilinen dört tür oksitten oluşmaktadır (Çizelge 2.1).

Çimentonun hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidrasyonu sonucu gerçekleşmektedir. Alüminatlar gibi diğer kimyasal bileşenler de, sertleşme işlemine dahil olmaktadır. CEM çimentosu (TS EN 197-1 standardına uygun olarak üretilen) içeriğinde, TS EN 196-2'ye göre, reaktif kalsiyum oksit (CaO) ve reaktif silisyum dioksit (SiO_2), oranlarının toplamı kütlece en az % 50 olmalıdır (TSE, 2012).

Çizelge 2.1Çimentonun Ana Bileşenleri (Özkan, 2009)

Bileşen Adı	Formülü	Kısaltılmış Adı
Trikalsiyum Silikat	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Dikalsiyum Silikat	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiyum Alüminat	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiyum Alüminoferrit	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

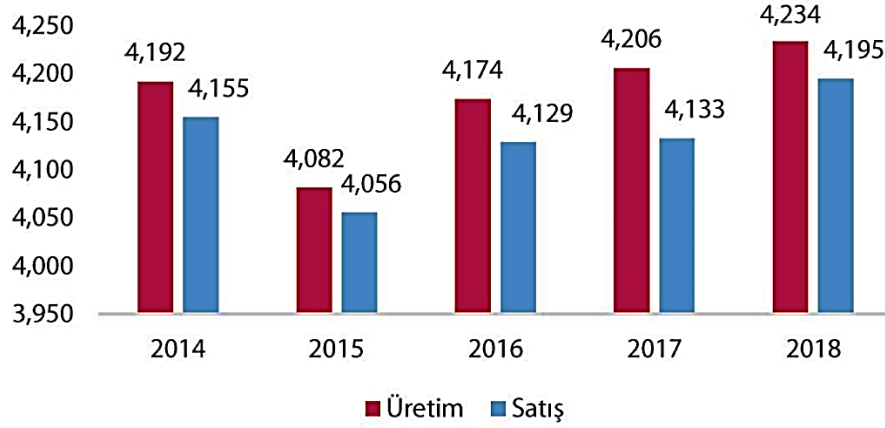
2.1.2 Çimentonun kullanım alanları

Herkes tarafından kullanılabilen uygun maliyetli bir yapı malzemesi olan çimento, kullanım amacına göre farklı tiplerde üretilebilmektedir. Beton veya farklı biçimlerde kullanılan portland çimentosu; genel amaçlı kullanım, her türlü betonarme yapı, beton yollar, prefabrik betonarme elemanlar, köprüler, su depoları, briket üretimi ve tünel kalıp uygulamaları olmak üzere farklı alanlarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bazı çimento türlerinin kullanım alanları aşağıda verildiği şekildedir (Bolu Çimento A.Ş., 2019).

- Portland çimento, genel amaçlı kullanılmaktadır.
- Portland kompoze çimento, özel proje betonları, menfez boruları ve yapı kimyasalı üretiminde kullanılmaktadır.
- Sülfata dayanıklı çimento, köprü, baraj ve liman temeli inşaatlarında, atık su arıtma tesisleri, istinat duvarlarında kullanılmaktadır.
- Puzzolanik çimento, sıva ve duvar harcı, yol kaplama betonları, yapı kimyasalları ve su kanaletlerinde kullanılmaktadır.
- Kuyu çimentosu, petrol sondaj kuyularında kullanılmaktadır.

2.2 Dünyada ve Türkiye’de Çimento Sektörünün Genel Görünümü

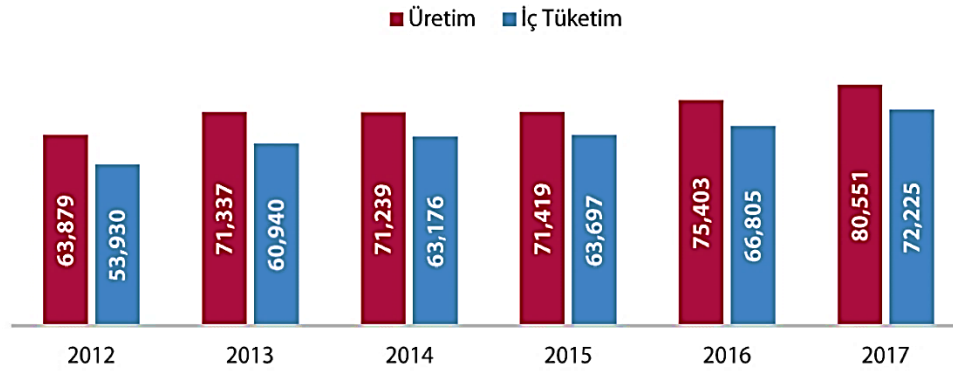
Ülkelerine ekonomik gelişmişlik düzeylerine ve nüfus artış oranlarına bağlı olarak kişi başına düşen çimento tüketimi değişiklik göstermektedir. Günümüzde dünya çapında yıllık çimento tüketimi 4-4.2 milyar ton civarındadır. Dünyada çimento üretimi ve satışının yıllara göre değişimi Şekil 2.1’de verildiği gibidir (TSKB A.Ş., 2018).



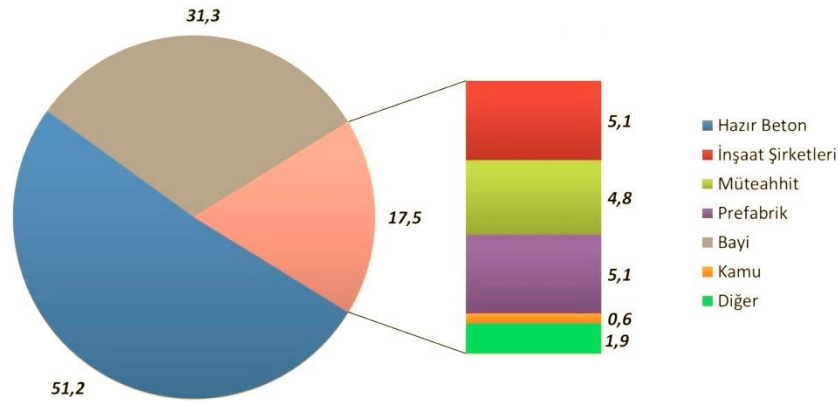
Şekil 2.1 Yıllara göre dünya çimento üretimi ve tüketimi(milyon ton) (TSKB A.Ş., 2018).

Ülkemizde çimento üretimi Eskişehir – Darıca’da 1911 yılında kurulan fabrika ile başlamıştır. 1960’lı yıllardan itibaren sanayi bölgelerinin konumlarına bağlı olarak başta Marmara, Akdeniz ve İç Anadolu bölgelerinde üretim yaygınlaşmıştır.

Günümüzde kurulu kapasite ve üretim hacmiyle Türk çimento sanayisi Avrupa’nın en büyük, dünyanın ise beşinci büyük üreticisi konumundadır. Ülkemizde çimento üretim ve iç tüketiminin yıllara göre dağılımı Şekil 2.2’de; çimento sektörü müşteri istatistikleri ise Şekil 2.3’te verildiği gibidir (TSKB A.Ş., 2018).



Şekil 2.2 Türkiye çimento sektörü temel göstergeleri (bin ton) (TSKB A.Ş., 2018).



Şekil 2.3 2017 yılı çimento müşterileri istatistikleri (Engin, 2018)

2.3 Çimentonun Ana Hammaddeleri

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler, kalker (kireçtaşı), kil ve/veya marndır. Portland çimentosu üretiminin ilk aşamasında kalkerli ve killi malzemelerden oluşan hammadde karışımı, yüksek sıcaklıklarda pişirilerek klinker adı verilen ara ürün elde edilir. Klinkerin ana bileşenleri olan CaO için kireçtaşı; SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ için ise kaynak olarak kil mineralleri kullanılmaktadır. Fe₂O₃ ve Al₂O₃ oranının istenilen oranı sağlamadığı durumlarda ise demir cevheri ve boksit cevheri ilave edilmektedir. Bunun yanı sıra dört oksidi bünyesinde bulunduran marn gibi malzemeler de çimento üretimi için uygun hammaddelerdir (Sosyal Güvenlik Özel İhtisas Komisyonu, 2001; Koçak, 2008).

Yukarıda verilen çimento ana bileşenleri istenilen oranlarda tek bir hammadde içerisinde nadir olarak bulunmaktadır. Bu sebeple, genel olarak kireç içeren bir bileşen (kalker) ile silis, alüminyum ve demir oksit içeren bir bileşenin (kil, marn) uygun karışım kullanılır (Atar, 2006).

Çimento üretiminde kullanılan ana bileşenlerin kimyasal içeriği onların uygunluk derecelerini belirlemektedir. CaCO₃ içeriği %75-79 aralığında olacak şekilde sabit tutulur. Kullanılan CaCO₃ kaynağının yapısına bağlı olarak, klinkerdeki dikalsiyum silikat (C₂S) ile trikalsiyum silikat (C₃S) yüzdeleri değişmekte ve çimento mukavemetinde önemli değişiklikler ortaya çıkmaktadır (Atar, 2006; Alpaslan, 2012). Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve yaklaşık miktarları Çizelge 2.2’de verildiği gibidir.

Çizelge 2.2 Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları (Erdoğan, 1995).

Oksit	Sembol	Çimento Kimyasında Sembolü	Çimento İçerisindeki Miktarı (%)
Kireç	CaO	C	60 – 67
Silis	SiO ₂	S	17 – 25
Alüminyum Oksit	Al ₂ O ₃	A	3 – 8
Demir Oksit	Fe ₂ O ₃	F	0,5 – 6
Kükürt Trioksit	SO ₃	S	1 – 3
Magnezyum Oksit	MgO	M	0,1 – 4
Alkaliler	Na ₂ O+K ₂ O	N+K	0,2 – 1,3

2.3.1 Kalker

Kimyasal bileşiminde en az %90 CaCO₃ bulunan kayaçlar kalker veya kireç taşı olarak adlandırılmakta ve çimento üretiminde CaO kaynağı olarak kullanılmaktadır (Dayı, 2006). Üretimde kullanılan kalkerler yüksek oranda kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve düşük oranda kuvars (SiO₂), magnezyum karbonat (MgCO₃), demir oksit, alüminyum oksit, kükürt ve alkali minerallerden oluşmaktadır (Akkaş, 2009). Kalker içerisinde yer alan en önemli safsızlık çakmak taşı(sileks), opal, kalsedon ve kuvars gibi silisyum dioksit bileşikleridir. Öğütme işlemini zorlaştırdığı ve klinker yapısına katılmadığı için kalker yapısında silisyum dioksit bileşikleri bulunması istenmez (Korçak, 2015).

2.3.2 Kil

Kayaçların hava, su ve erozyon etkisi ile parçalanması sonucu oluşan çökeltiler kil olarak adlandırılmaktadır. Minerolojik özelliklerine göre üç temel çeşidi bulunmaktadır (illit, montmorillonit, kaolinit). Belirgin yatakları yoktur. Doğada kuvars, kalsit, alçı, limonit, pirit, feldspar gibi diğer mineraller ile birlikte bulunmaktadır. Su tutma kapasitesi yüksek olup nemlendiğinde plastik yapı oluşturmaktadır. Çimento üretiminde silisyum, alüminyum, demir oksitlerin ve alkalilerin kaynağı olarak kullanılmaktadır (Kuleli, 2009).

2.3.3 Marn

Yapısında %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaçlar marn olarak adlandırılmaktadır. Sahip olduğu bu bileşim klinker üretiminde kullanılan hammadde bileşimi ile yüksek oranda benzerlik gösterdiğinden dolayı ideal çimento hammaddesi olarak kabul edilmektedir. Kalkere kıyasla daha yumuşak olduğundan kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimini düşürmektedir (Yalçın ve Gürü, 2006).

2.3.4 Demir Cevheri

Demir cevheri doğada, daha çok hematit (%69.94 Fe ve %30.06 O₂) şeklinde bulunmaktadır. Mohs sertlik değeri 5-6, yoğunluğu 4.6-5.3 g.cm⁻³ aralığında değişmektedir. Çimento sanayinde kullanılan hematit ve limonit içinde bulunan istenmeyen safsızlık sınırları aşağıda verildiği şekildedir;

Kükürt : %0.25-1.00

Arsenik : %0.5

Serbest silis asiti: %1.0

Fosfor : %0.5

Cevher içerisinde, aynı kökenli metalik cevherlerin yansıra krom, bakır, nikel, kurşun, manganez ve kobalt elementlerinin farklı bileşikleri de bulunabilmektedir. Demir cevheri klinker hammaddesinin kimyasal olarak silikat ve alüminyum modüllerinin ayarlanmasına yardımcı olduğundan, klinkerin ısıl işlem sürecinde sinterleşmesini kolaylaştırmaktadır (Karahan, 2016).

2.3.5 Boksit

Boksit, yoğunluğu 2.55-3.50 g.cm⁻³ ve mohs sertlik değeri 1-3 arasında değişen, alüminyum oksit ve hidroksitlerin bir karışımıdır. Genel olarak SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve H₂O'dan oluşmaktadır. İçerisinde %3 oranına kadar TiO₂ ve eser miktarda da V₂O₅ bulunabilmektedir. Çimento sektöründe kullanılacak boksitin içeriğinin Al₂O₃ %45-%55, SiO₂ maksimum %6, Fe₂O₃ %20-30 ve TiO₂ %3 olması istenmektedir. Boksit, klinkerin demir oksit ile birlikte sinterlenmesini ve klinkerin sıvı faza geçişini kolaylaştırmaktadır (Karahan, 2016).

2.3.6 Alçıtaşı

Alçı taşı doğada, jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve kalsiyum sülfat anhidrit minerali halinde bulunmaktadır. Çimento üretiminde harcın priz süresini ayarlamak için klinker ile birlikte öğütülerek kullanılmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006; Koçak, 2008).

Klinker içerisindeki C_3A minerali (alüminat) su ile çok hızlı tepkimeye girmekte ve harcın/betonun hızlı şekilde sertleşmesine sebep olmaktadır. Klinkere %3-5 oranında eklenen alçıtaşı, sulu ortamda C_3A ile birleşerek etrenjit oluşturur. Bu sayede genel hidrasyon tepkimeleri harca/betona son şekil verilinceye kadar yavaşlatılmış ve işleme sürecinin kontrol altına alınmış olur.

2.3.7 Tras (Puzolan)

TS 25'e göre kendisi hidrolik bağlayıcı olmadığı halde ince öğütüldüğünde kireç ya da çimento gibi bağlayıcı maddeler ile sulu ortamda bağlayıcı maddeler oluşturan volkanik kayalar tras (puzolan) olarak tanımlanmaktadır. Katkı olarak kullanılacak malzemenin puzolanik aktivitesinin yüksek olması, SO_3 içeriğinin ise düşük olması istenmektedir. CEM II, IV ve V tipi Portland çimentolarının uzun dönem dayanımını artırmak amacıyla öğütme sırasında klinkere katılmaktadır (Kuleli, 2009)

2.3.8 Uçucu kül

Puzolanik özelliğe sahip ince, inorganik bir malzemeler olup termik santrallarda kömürün yakılması sonucu oluşan atık malzemedir. Kalsiyum, demir, magnezyum oksit, yanmamış karbon ve yüksek miktarda silika ve alümina içeriğine sahiptir. Çok ince taneli (Blaine > 4000) ve yığın yoğunluğu çok düşük (0.4 t.m^{-3}) olduğundan çimento öğütüldükten sonra eklenmektedir. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireç ile tepkimeye girerek bağlayıcı jel oluşumunu sağlamaktadır (Kuleli, 2009).

2.3.9 Cüruf

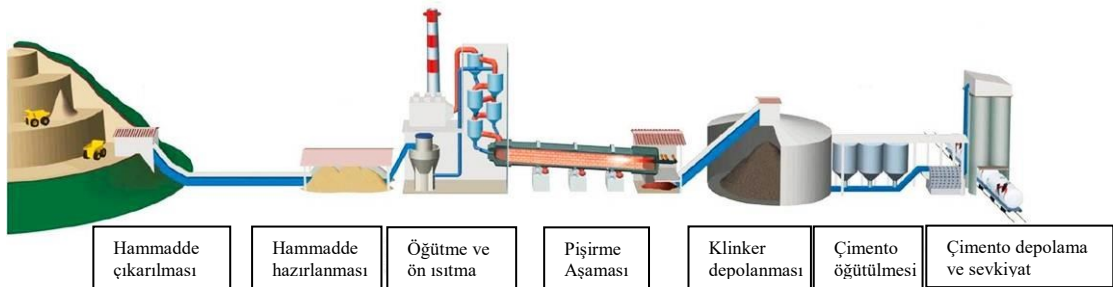
Yüksek fırın atığı olan cüruf, yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden dolayı öğütüldüğünde puzolanik aktivite göstermektedir. Ne kadar ince taneli öğütülürse

puzolonik özelliği de o kadar yüksek olmaktadır. CEM II, III ve V tip çimentolarda katkı olarak kullanılan curuf, çimentonun uzun dönem dayanımını artırmaktadır (Kuleli, 2009).

2.4 Çimento üretimi

Çimento üretimi temel olarak, hammadde temini, kırma, eleme, öğütme, sınıflandırma, ısıl işlem ve ara ürün olan klinkerin alçı taşı, tras gibi farklı maddelerle öğütülerek sınıflandırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir (Karahana, 2016).

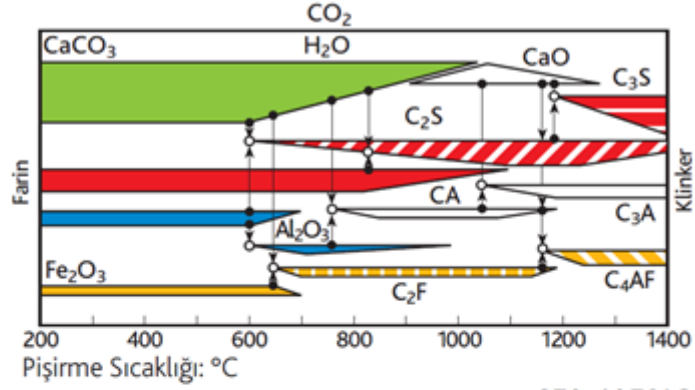
İstenilen kimyasal bileşimi oluşturmak üzere orantılı şekilde harmanlanıp öğütülen hammadde karışımı (farin), sıcaklığı yaklaşık 1450 °C'ye varan döner fırına verilmektedir. Farin yığını öncelikle ergime sonucu sıvı faza geçmekte, sonrasında ise bir dizi reaksiyonlar geçirerek fırını terk etmektedir. Soğutma bölümünde klinker adı verilen granüle formda ara ürün haline almaktadır. Klinker alçı taşı ile birlikte öğütülerek nihai ürün olan çimento elde edilmektedir. Çimento üretimi genel akış şeması Şekil 2.4'te verilmiştir.



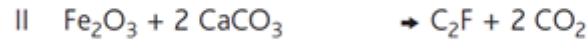
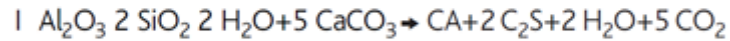
Şekil 2.4 Çimento üretimi akış şeması (Alnawfleh ve ark., 2015)

2.4.1 Klinker oluşum reaksiyonları

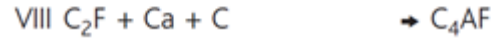
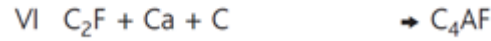
Döner fırına giren hammadde karışımı içerisindeki kireç, silis ve alümina öncelikle serbest hale geçmekte, sonrasında ise bir araya gelerek yeni bileşikler oluştururlar. Ön ısıtma kısmında ve fırının girişinde karışım içerisindeki serbest ve kristal suyu buharlaşmakta, killi malzemeler ayrışmakta ve CO₂ uzaklaşmaya başlamaktadır. Fırının içerisinde ilerledikçe kalsinasyon işlemi tamamlanmakta ve serbest kalan CaO kilden ayrılan SiO₂ ve Al₂O₃ ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatları oluşturmaktadır. Fırın içerisinde meydana gelen temel kimyasal reaksiyonlar ve meydana geldiği sıcaklık aralıkları Şekil 2.5'te verildiği gibidir (Yeğinoğlu, 2004; Güllü, 2006).



650-1050°C



1250-1450°C



Şekil 2.5 Klinker faz diyagramı (Yeğinoğlu, 2004)

2.5 Çimento Türleri

Günümüzde farklı amaçlarla yaygın biçimde kullanılan çimento türleri, TS EN 197-1 standartında 5 ana başlık altında tanımlanmaktadır. Bunlar;

- CEM I : Portland Çimentosu
- CEM II : Portland-Kompoze Çimento
- CEM III : Yüksek Fırın Cürufllu Çimento
- CEM IV : Puzolanlı Çimento
- CEM V : Kompoze Çimento

Bunların dışında, farklı amaçlarla üretilen özel üretim çimento tipleri de bulunmaktadır (Korçak, 2015).

2.6 Çimento Testleri

Üretilen çimentonun talep edilen standartlara uygunluğu standartlarda belirtilen testler yardımıyla takip edilmektedir. Bir çimento üretim tesisinde kalite takibi için yapılan testlerden bazıları aşağıdaki gibidir.

- Dayanım tayini (TSE, 2016)
- Çimentonun kimyasal analizi (TSE, 2014)
 - Kızdırma kaybı
 - Sülfat tayini
 - Çözünmeyen kalıntı tayini
 - CaO tayini
- Priz süreleri ve genleşme tayini (TSE, 2017)
- İncelik tayini (TSE, 2010)

Tez kapsamında CEM II A-M (P-L) 42.5 R tip çimento ile çalışma yapılmıştır. Çalışılan parametreler çözünmeyen kalıntı (ÇK), kızdırma kaybı (KK), blain değeri (B), basınç dayanımı (2, 7 ve 28 günlük), 45 µm ve 32 µm elek bakiyesi, yoğunluk, CO₂, Serbest CaO, priz başı süresi (PB) ve hacim genleşmesi (HG) değerleridir.

2.7 Deney Tasarımı

Günümüzde her türden üretim ve hizmet sektörlerinin büyümesi, uygulama alanlarının genişlemesi, teknolojik yenilikler, ürün ve hizmet kalitesinin artırılması çalışmaları, rekabet ortamı ve ekonomik koşullar işletmelerin bütün bunlara adapte olmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle mühendislik çalışmalarında düşük maliyet ve yüksek kaliteli ürünler elde etmeye çalışılması iç ve dış pazarlarda yer edinebilmek için önem arz etmektedir. Bir ürün ortaya çıkarmak için yapılan ürün maliyetine ve kalitesine yansıtacak deneysel çalışmalar, önemli bir mali gidere sebep olmaktadır. Çalışmalarda kullanılan kaynakların ekonomik kullanılabilmesi, sonuca kısa yoldan ulaşılması, elde edilen verilerin doğru anlamlandırılması ve doğru bir şekilde uygulaması işletmeleri rekabet ortamında öne çıkaracaktır.

Klasik ya da geleneksel olarak adlandırabileceğimiz deney tasarımlarında her seferinde bir değişkenin sistem performansı üzerine etkisi incelenirken diğer değişkenler

sabit tutulur ve çalışılan değişken belirli düzey aralıklarında değiştirilir. Bu şekilde çalışma yapıldığında, aynı anda sisteme etki eden tüm faktörlerin farklı düzeylerde sisteme etkisinin gözlenmesi mümkün değildir. Deneme miktarının azaltılması, girdilerin etkili kullanılması, araştırma-geliştirme çalışmalarının hızlandırılması, süreçlerin kısa zamanda ve mali açıdan tasarruflu yapılması için sistemde incelenen yanıtının ölçülmesini sağlayacak deney tasarımı yapılması zorunlu hale gelmiştir. Bu duruma çözüm olarak çeşitli deney tasarım yöntemleri geliştirilmiştir (Özbay, 2014).

Deney tasarımı (DOE) fikri ilk olarak istatistik bilimine büyük katkılar sağlamış olan Dr. Ranold Fisher tarafından 1935 yılında öne sürülmüştür. Dr. Fisher aynı zamanda laboratuvar çalışmaları ve araştırmacılar için istatistik metotlar içeren kitap yayınlamış, incelenen veri gruplarının ortalamaları arasında farklılıkların olup olmadığının tespitinde kullanılan varyans analizi (ANOVA) tekniğini de geliştirmiştir. Bununla birlikte, istatistiksel varyans analizi (ANOVA) gibi yeni metotlar DOE ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Dr. Fisher ilk baskısı 1935 yılında yapılan deney tasarımı üzerine yazdığı kitabı, son baskısını 1971 yılında bir yayınevi tarafından düzenlenerek yapmıştır (Atalan, 2019).

DOE metotları ilk olarak tarım ve biyoloji çalışmalarında uygulamaya başlanmıştır. Tarımsal çalışmalarda, gübre ve dozları ile mevsim şartlarına bağlı sulama seviyelerinin seçilen ürünlere etkilerini tespit etmek üzere kullanılmıştır. Endüstriyel olarak ilk uygulama 1930'lu yıllarda İngiltere tekstil ve yün sanayisinde görülmüştür. DOE kimya ve ilaç endüstrisinde de uygulanmış olmasına rağmen imalat sanayinde yaygın olarak uygulamaları 1970'li yıllara kadar sınırlı olmuştur (Montgomery, 2012).

Deney tasarımı kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, DOE istatistiksel metot olarak özellikle laboratuvar çalışmalarında kullanılmış olup bu metot araştırmacılara çok büyük kolaylıklar sağlamıştır.

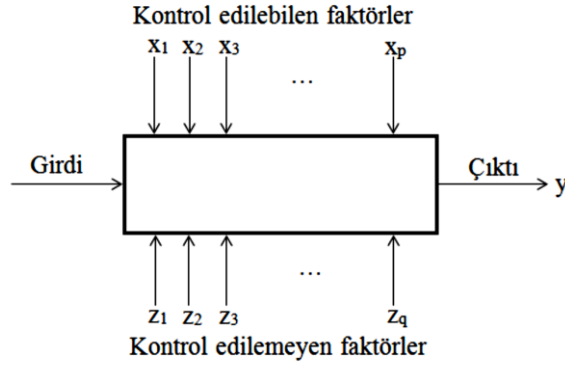
DOE genellikle süreç performansını veya ürün kalitesini iyileştirmek için kullanılan etkili bir istatistiksel yöntemdir. DOE dört adımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Planlama,
- Tasarlama,
- Yürütme,
- Analiz etme

DOE' de doğru verileri elde ederek ve bu adımları uygulayarak, bir ürünün süreç performansı veya kalitesinin iyileştirilmesi sağlanır. Ancak, her ürünün üretiminde farklı

faktörler ve her faktör için farklı seviyeler vardır. Bu gibi durumlarda, DOE içindeki farklı yöntemler uygulanır (Atalan, 2019).

DOE, bir süreçte yer alan ve hedef doğrultusunda seçilen bağımlı değişkene etki eden bağımsız değişkenlerin değerlerinin bulunmasında ve yorumlanması için birçok matematiksel ve istatistiksel metot içerir (Ceyhan ve ark., 2013).



Şekil 2.6 Bir sistemin genel modeli (Montgomery, 2012).

2.7.1 Deney tasarım prensipleri

Deney tasarımında, tasarımı yapan kişi prosesi etkileyen faktörleri değiştirerek, proses sonunda elde ettiği yanıtlardaki farklılığı analiz etmeye çalışmaktadır. Deneylerin planlanmasında/uygulanmasında bilimsel yaklaşım kullanması ve verilerin analizinde istatistiksel metotların kullanması, elde edilen çıkarımları anlamlandırmak için gereklidir (Montgomery, 2012).

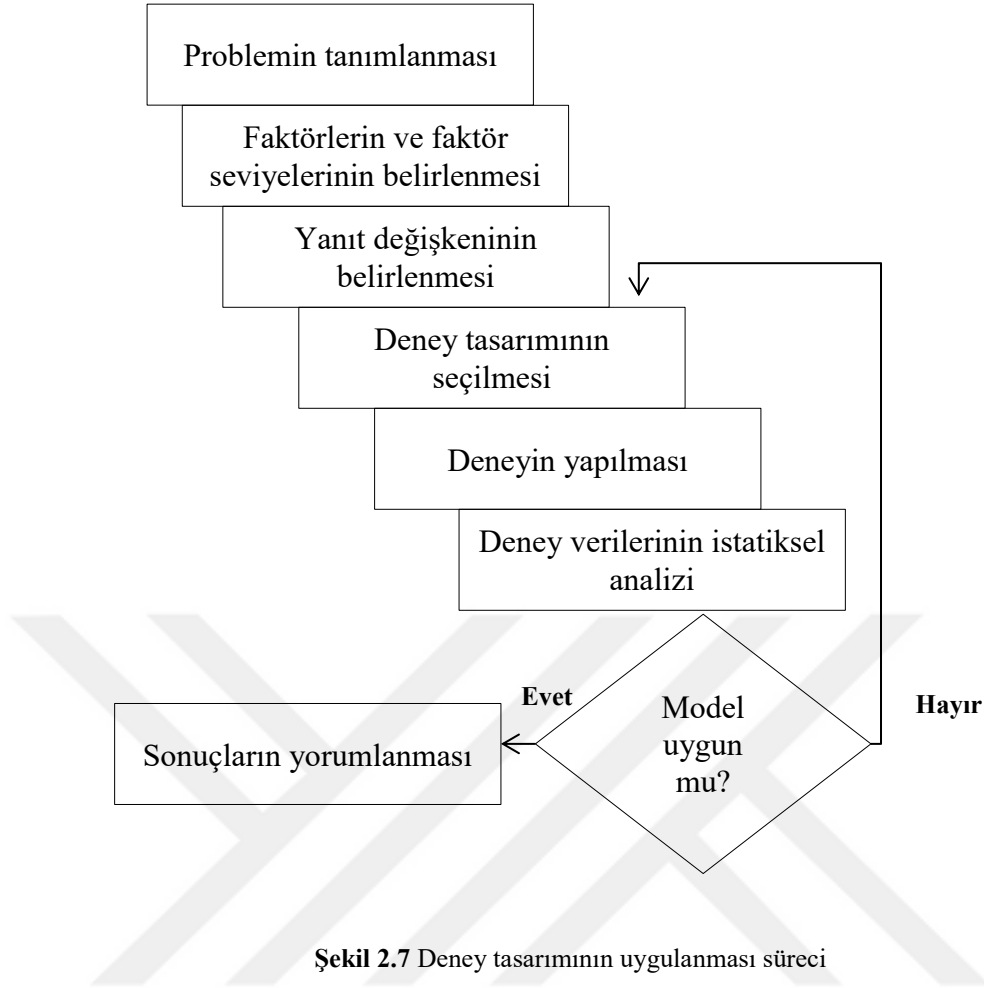
Elde edilen veriler birbirinden bağımsız olması ve istatistiksel analizlerde kullanılabilmesi için yeterli sayıda olmalıdır. Bu şartların sağlanmasında yararlanılan üç temel prensip vardır: rassallık, tekrarlama ve bloklama.

- a- Rassallık;** deney için kullanılacak ekipmanların, malzemelerin ve deney süreçlerinin rastgele belirlenmesi yöntemi rassallık olarak tanımlanır. Rassallıkta amaç, çalışılan değişken(ler) dışında sisteme etki eden başka değişken(ler) varsa bunların etkisini olabildiğince minimuma indirmeye çalışmaktır. Deneylerin rassal olarak ele alınması, elde edilen verilerin birbirinden bağımsız olmasını sağlamaktadır (Montgomery, 2012; Çiçek, 2018).

- b- Tekrarlama;** Tekrarlama, elde edilecek bir veri için deneyi birden fazla sayıda gerçekleştirmektir. Tekrarlama deney hatasının tespiti için gereklidir. Hatanın kaynağı, deneme içerisine dahil edilmeyen aynı zamanda kontrol edilemeyen etkenlerdir. Tekrarlamanın önemli iki özelliği vardır. İlk olarak tasarımcıya deneysel hataların giderilmesi fırsatını verir. İkincisi ise, eğer örnek kümenin ortalaması, deneyde herhangi bir değişkenin etkisini bulmak için kullanılıyorsa, tekrarlama deneyi yapan araştırmacının bu etkiyi doğru bir şekilde elde etmesini sağlamaktadır (Demir, 2004; Montgomery, 2012).
- c- Bloklama;** Deneyin kesinliğini artırmak için, deneylerde etkili olabilecek ilgisiz faktörlerden kaynaklanacak değişkenliği azaltmak ya da elimine etmek için kullanılır. Bloklamada ilke, benzer deneysel birimlerin gruplara bölünmesidir. Bu şekilde yapılmış olan deneylerin sonuçlarındaki değişkenlik, her bir blok içindeki faktör ve seviyelerinin etkilerinin farklılığını ortaya koymaktadır. Kontrol edilemeyen diğer değişkenlerin etkisi minimize edilmektedir (Montgomery, 2012).

2.7.2 Deney tasarımı nasıl yapılır?

Deney tasarımı yapılırken ilk aşama problemin tanımlanmasıdır. Denemelerin amacını belirtecek tüm bilgiler toplanarak amaç açık bir şekilde belirtilir. Daha sonra faktörler ve faktörlerin seviyeleri kararlaştırılır. Bu aşamada çalışılacak olan faktörler seviyeleri ve bu faktörlerin nasıl kontrol edileceği kararlaştırılmalıdır. Daha sonra süreç hakkında bilgi verecek yanıt faktörleri belirlenmelidir. Problemin amacı göz önüne alınarak uygulanacak DOE tekniği belirlenir. Bu aşama örnek büyüklüğünün (tekrar sayısı) seçimi, deneylerin yapılış sıralarının seçimi, bloklama yapılıp yapılmayacağı ve diğer rassallık kısıtlarını içerir. DOE tekniğinin kararlaştırılmasındaki dikkat edilecek husus deneyin amacıdır. Deney amacına yönelik deney tasarımı tekniği seçilir (Demir, 2004).



Şekil 2.7 Deney tasarımının uygulanması süreci

DOE tekniği seçildikten sonra seçilen deney tasarımına göre denemeler gerçekleştirilir. Deneyin yapılması aşamasında planlanan çerçevede yürütülmesine dikkat edilmelidir. Bu aşamada yapılan deney hataları deneyin geçerliliğini sorgulanmasına sebep olur.

Deney sonuçlarından elde edilen veriler çeşitli paket programlar (SAS, SPSS, MINITAB vb.) kullanılarak değerlendirilir. Varyans analizi (ANOVA) Verilerin anlamlandırılmasında tercih edilen önemli tekniklerden biridir. ANOVA sonucunda seçilen faktörlerin yanıt fonksiyonu üzerinde etkili olup olmadığı gözlemlenir.

2.7.3 Deney tasarım çeşitleri

Deney tasarımı incelendiğinde Tam Faktöriyel, Kesirli Faktöriyel, Taramalı Deney, Yanıt Yüzey Yöntemi, Taguchi yöntemleri DOE çeşitleridir.

2.7.3.1 Tam faktöriyel deney tasarımı (FFD)

En çok kullanılan deney tasarım metodu tekniğidir. Birden çok faktörün farklı seviyelerde alınarak etkilerinin incelendiği tasarımlardır. Minimum iki veya daha çok faktör ve bu faktörlere ait minimum iki veya daha fazla seviyelerin bulunduğu deneylerde seviyelerin birbirleri ile çarpımları ile oluşan kombinasyondur(Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

Bu yöntemle göre deney sayısı $N=nk$ (N: deney sayısı, n: seviye sayısı, k: faktör sayısı) şeklindedir.

FFD; çok boyutlu bir metot olması, fonksiyonların lineerliğinin araştırılması, değişkenlerin karşılıklı etkileşimlerinin bağımlı değişkene olan etkisinin tespiti yapılarak sistem üzerinde değerlendirme yapma olanağı sağlaması yönünden avantajlı bir tasarım yöntemidir. Bu sayede süreçlerin maliyetlerinin azaltılması, kalitenin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi sağlanabilmektedir (Zümrüt, 2009).

FFD'de, her bir faktörün, yapılan deneye etkisinin bulunması amacıyla regresyon analizi ve varyasyon analizi (ANOVA)'nden yararlanılmaktadır. Bu şekilde deney esnasında herhangi bir değişiklik yapılmadan farklılıkların kaynağının bulunmasına yardımcı olur (Pesen, 2018).

2.7.3.2 Kesirli faktöriyel tasarım

Tam faktöriyel tasarımda yüksek düzeyli etkileşimler tercih edilmediği zaman veya yalnızca düşük düzey etkileşimler ve temel etkiler araştırılmak istendiğinde daha az sayıda deney yapılmak istendiğinde kesirli faktöriyel tasarım kullanılabilir (Zümrüt, 2009).

2.7.3.3 Yanıt yüzey yöntemi (RSM)

Yanıt yüzey yöntemi bir optimizasyon aracıdır. Optimizasyon, faktörlerin ve seviyelerin bilindiği bir deneyde en iyi faktör seviyelerini belirlemek için yapılır. RSM'nin bir başka tanımı matematiksel ve istatistiksel teknikleri kullanarak ampirik bir model oluşturmaktır. Kısacası, deneyde mevcut olan faktörlerin optimum seviye değerlerinin yanıt fonksiyonu üzerindeki etkisini araştırmak ve hesaplamak için

kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir. Yöntem, yanıt fonksiyonunun yüzeyi nasıl etkileyeceğinin gözlenmesine olanak verir (Atalan, 2019).

RSM, ilk defa Box-Wilson tarafından 1951 yılında ileri sürülmüş bir metottur. Yüzey yanıt metodu, proseslerin geliştirilmesi ve optimizasyonu için gerekli istatistiksel ve matematiksel tekniklerin birlikte kullanıldığı bir yöntem olarak tanımlanabilir (Özbay, 2014).

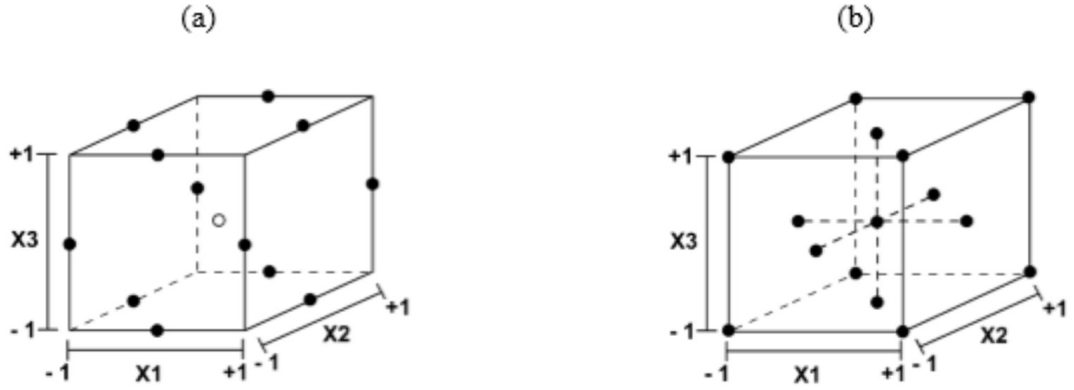
RSM ayrıca iki farklı şekilde incelenmiştir. Bunlar Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) ve Box-Behnken Tasarımlarıdır (BBD).

a- Box-Behnken tasarımı

Bu metotta yanıt yüzeylerini uygun hale getirmek için üç seviyeli tasarımlar benimsenmiştir. Bu tasarımlar, 2^k faktöriyelleri tamamlanmamış blok tasarımlarıyla birleştirilerek oluşturulmuştur. Bu tasarımlar, yeterli çalışma sayısı açısından çok etkilidir. Aynı zamanda ya rotasyon kabiliyetine sahip veya rotasyon kabiliyetine yakın tasarımlardır. Box-Behnken tasarımının tüm noktalarla birlikte küresel bir tasarım olduğu görülmektedir (Montgomery, 2012).

Çizelge 2.3 Üç faktöriyel Box-Behnken Tasarımı (Montgomery, 2012).

Deney Sayısı	X1	X2	X3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



Şekil 2.8 Tek yüzeyli CCD (a) ve üç faktör için BBD (b)

b- Merkezi Kompozit Tasarım (CCD)

Merkezi kompozit tasarım, RSM araçlarından biridir. Ardışık deneysel çalışmalar için ideal olan etkili bir tasarım metodudur. Çok fazla sayıda deneysel çalışma yapmaya gerek kalmadan deneylerin uygunluğunu hakkında yeterli miktarda bilgi sağlamaktadır (Acar, 2018).

2.7.3.4 Tarama tasarımı yöntemi

Tarama Tasarımı yöntemi, deneyde kullanılacak faktörlerden hangisinin yanıt fonksiyonunu etkilediğini belirler. Bu tasarım, faktörler arasında yanıt fonksiyonuna en çok etki eden temel faktörleri bulmaya çalışmaktadır. Bu nedenle bu yöntem, etkili faktörlerin sayısını belirleyerek bu faktörlerin etkilerinin araştırılmasını sağlar. Bu yöntem aynı zamanda kesirli faktöriyel tasarım yaklaşımı olarak da ekonomiktir (Atalan, 2019).

2.7.3.5 Taguchi deney tasarımı

Taguchi Yöntemi, parametre tasarımı, sistem tasarımı ve tolerans tasarımı üzerine kurulmuş bir deney tasarım ve optimizasyon yöntemidir. En yaygın olarak, kalite güvence sistemleri kapsamında toplanan verilerin, istatistiksel analizinde kullanılmaktadır. Taguchi'nin deney tasarım yöntemi, farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasından optimum kombinasyonu saptamak adına oldukça yararlı bir yöntemdir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

2.8 Çimento Üzerine Yapılan Çalışmalar

Artan dünya nüfusu ve endüstriyel ilerlemeler; yerleşim yerlerinin ve endüstriyel amaçlı yapıların yenilenmesi/kurulması ihtiyaçlarını her geçen gün artırmaktadır. Bu ihtiyaç farklı özelliklere sahip yapılaşmayı zorunlu hale getirmektedir. Bu sebeple yapılarda kullanılan ve temel malzemelerden biri olan çimento üzerine yapılan çalışmalar da gelişime bağlı olarak artış göstermektedir. Çimento üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle çimento mukavemetinin iyileştirilmesi ve katkılı çimento üretimi üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla birlikte çimentonun farklı özelliklerine etki eden parametrelerin optimizasyonu ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Gür (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, çimento öğütme sistemleri eşit beton mukavemetine göre karşılaştırılmış ve proses optimizasyonu yapılmıştır. Öğütme sistemlerinin karşılaştırılması sabit kimyasal mineralojik ve morfolojik yapıdaki klinker (%90), alçı taşı (%5), kalker (%5) ve 3200-3500 blain değerinde 31.5-36.5 kW/ton olan malzemeden üretilen ürünün 2-28 günlük sonuçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çimento performansı üzerine klinkerin kimyasal ve mineralojik etkisi Markov Zincir Teorisi kullanılarak simule edilmiştir. Öğütücü sıralamasının çimento performansı üzerine etkili olduğu ileri sürülmüştür.

Binici ve arkadaşları (2000) tarafından yapılan çalışmada çimento ve agrega türü, granülometre, sıkıştırma, kür ve beton üretim tekniğinin beton mukavemetine etkisi incelenmiştir. Granülometrinin basınç dayanımına etkisinin %18, çimento türünün %15, beton kür ve bakımının ilk günlerde %50, 90 gün sonunda ise %40, kompaksiyonun seçimine bağlı olarak %44 değerine kadar etkili olduğu ileri sürülmüştür.

López-Carrasquillo ve Hwang (2017) yaptıkları çalışmada uçucu kül ve nanomateryaller içeren geçirimli betonun basınç dayanımı, durabilitesi, geçirgenliği, kullanılan suyun kalitesi ve maliyetlerinin kıyaslamasını yapmışlardır. Hem nano SiO₂ eklenmiş PC_{NS} hem de nano Fe eklenmiş PC_{NI} geçirimli betonlarının, diğer betonlara kıyasla, yüksek basınç dayanımına (~17 mPa), yüksek aşınma direncine (%30'dan az), su kalitesi iyileştirilmesi (<12 Su Kalitesi İndeksi) ve yüzey akış miktarı kontrolüne sahip olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte nanomateryal eklenmiş PC_s üretiminin PC_{ct} kıyasla daha maliyetli olduğu da bulunmuştur.

Sanaev ve arkadaşları (2016) ahşap-çimento kompozitinin kalitesine etki eden orjinal bileşenlerin (organik malzemenin kalitesi, mineralin çeşidi, çimentonun aktivitesi ve türü), başlangıç bileşenlerinin kompozisyonunun, teknolojik faktörlerin (ahşap-

çimento karışımının hazırlanma şartları, kalıplama metodu, yerleştirme ve priz alma metodu) ve tasarım şeklinin etkilerini incelemiştir. Yüksek kalitede ahşap-çimento kompoziti üretimi için özellikle suda az çözünen ladin, köknar, çam gibi ağaçlardan elde edilen dolgu malzemelerinin kullanılmasının gerekli olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ahşap-çimento kompozitinin kalitesi üzerine etki eden en önemli parametrelerin, karışım içindeki su/çimento oranı ve ahşap çimento oranı olduğu tespit edilmiştir. Su çimento oranının azaltılmasının veya yüksek dayanımlı çimento kullanımının ahşap-çimento kompozitinin dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca partiküllerin ortalama şekil faktörlerinin 8'in üzerine çıkmaması gerektiği de bulunmuştur.

Sharma ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada kaplama betonun kalitesi üzerine polipropilen fiberlerin puzzolanik materyaller (uçucu kül ve silis dumanı) ile birlikte etkisini incelemiştir. Puzzolanik materyallerle nanofiberlerin birlikte kullanımının (toplam fiber hacmi içerisinde %35 puzzolan bulunması halinde) büzülme %0.6'ya kadar azalttığı tespit edilmiştir.

Baran ve Pichniarczyk (2017), Polonya'da üretim yapan dokuz çimento fabrikasında PN EN 197-1 standardında üretilen yaklaşık 200 çimento numunesinin hidratasyon ısıları ve 28 günlük basınç dayanımları arasında, herhangi bir mineral katkısı olmadan üretilen CEM I çimentoları için, güçlü bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Üç günlük hidratasyon ısı testi dikkate alınarak düşük bir hata payı ile 28 günlük sonuçların tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir.

Soto-Perez ve Hwang (2016) yaptıkları çalışmada geçirimli betonun basınç dayanımını ve geçirgenliğini, su-bağlayıcı, nano demir-bağlayıcı, uçucu kül-bağlayıcı ve su tutucu-bağlayıcı oranlarının değişimine bağlı olarak sabit 7 mm.s^{-1} değerini dikkate alarak incelemiştir. Katkı maddelerinin düşük ve yüksek olması durumlarında üretilen geçirimli betonların basınç dayanımları ölçülmüştür. Yüksek oranda katkı maddesi varlığında fosfor giderimi %72.4 ve koliform giderimi %49.8; düşük oranda katkı maddesi varlığında ise fosfor giderimi %77.9 ve koliform giderimi %40.5 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar herhangi bir katkı kullanılmadan üretilen geçirimli betonlarla kıyaslanmıştır.

Sanjuán ve arkadaşları (2015) silis dumanı inceliğinin portland çimentosu basınç dayanımına etkisini incelemiştir. Kaba silis dumanının ($45 \mu\text{m}$, %32.11 elek üstü), düşük puzzolanik reaksiyon gösterdiği, silis dumanı inceliği artırıldığında ($45 \mu\text{m}$, %4.13 - %0.98 elek üstü) ise, CEM I 52.5N-SR 3 tipi çimentonun aktivitesini artırdığı tespit edilmiştir.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Kaliteli çimento üretimine etki eden temel parametrelerden; çözünmeyen kalıntı (%), serbest kalsiyum oksit (%), kızdırma kaybı (%), blaine ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$), basınç dayanımı testi, 45 μm elek üzerinde kalan (%) ve 32 μm elek üzerinde kalan (%) parametrelerin etkilerinin incelendiği bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler hakkında bilgiler aşağıda verildiği şekildedir.

3.1 Materyal

Çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda kullanılan hammadde ve kimyasallar Çizelge 3.1’de, cihaz/ekipmanlar ise Çizelge 3.2’de verildiği gibidir.

Çizelge 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan hammadde ve kimyasallar

Kimyasal Adı	Markası	Üretim yeri	Kullanım amacı
De-iyonize su	-	Laboratuvar	Deneysel çalışmalarda çözme ve yıkama işlemlerinde
HCl	Merck	Almanya	ÇK
Na_2CO_3	Merck	Almanya	ÇK
Etilen glikol	Merck	Almanya	S.CaO
Metanol	Merck	Almanya	S.CaO
Bromtimol	Merck	Almanya	S.CaO

Çizelge 3.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz/ekipmanlar

Cihaz/Ekipman adı	Markası	Kullanım amacı
Etüv	Nüve	Nem giderilmesi
Le Chatelier kalıbı	Atom Teknik	Hacim genişmesi
Hassas terazi	Mettler Toledo	Tartım işlemleri
Kül fırını	Protherm	Kızdırma işlemi
Elektrik ocağı	Robax	Isıtma ve yakma işlemleri
Manyetik karıştırıcı	Labinco	Karıştırma işlemleri
Alpin Cihazı	Hosokawa Alpine	Eleme işlemleri
Alpin Elekleri (45 ve 32 µm)	Haver Boecker	Eleme işlemleri
Üç gözlü çelik beton kalıp	Atom Teknik	Beton numunesi hazırlama
Eğilme dayanımı cihazı	Atom Teknik	Prizma numuneleri bölme
Test pres ve kırma başlıkları	Toni Teknik	Basınç dayanımı tayini
Beton kür dolabı	Astek Kimya	24 saatlik kürlenme işlemi
Otomatik vicat cihazı	Toni Teknik	Priz başı süresi tayini
Yoğunluk ölçüm cihazı	Micrometrics	Yoğunluk ölçümü
Blain ölçüm cihazı	AtomTeknik	Blain ölçümü

3.2 Yöntem

İncelenen ürün CEM II/A-M (P,L) 42,5 R tipi çimentodur. Deneysel çalışmalar kapsamında incelenen parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla uygulanan yöntemler aşağıda verildiği şekildedir.

3.2.1 Çözünmeyen kalıntı

1,00±0,005 g olacak şekilde tartılan(m_1) numunenin üzerine sırasıyla, saf su ve derişik HCl eklenir. Kaynama sıcaklığına kadar ısıtılan numune beyaz bant süzgeç kağıdından süzülerek ele geçen katı, sıcak saf su ile 8-10 kez yıkanır. Yıkama işleminden sonra katı, %5'lik Na_2CO_3 çözeltisi içerisine alınarak kaynatılır. Süzme işleminin ardından, sırasıyla, sıcak HCl çözeltisi ve sıcak saf su ile yıkanır. 950 ± 25 °C'deki fırına alınan katı numune 30 dk süreyle kızdırma işlemine tabi tutulur. Soğutma işleminin ardından numune tartımı yapılarak(m_2) Eşitlik (3.1) yardımıyla % çözünmeyen kalıntı (%ÇK) hesaplanır.

$$\text{ÇK} = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.2 Priz başı süresi

Çimento numunesinden 500 ± 1 gr numune tartılır karıştırma kabına konulur ve orta kısmı çukurlaştırılır. Bu çukurlaştırılan kısma bir miktar su konur. Mekanik karıştırıcıda çimento ve su karışımı karıştırılır. Karıştırılarak yapılan çimento pastası, yağlanmış cam levha üzerine yerleştirilen Vikat kalıbı içine yerleştirilir. Vicat ekipmanı üzerinde gerekli işlemler yapılarak priz başı süresi tayin edilir (TSE, 2017).

3.2.3 Serbest kalsiyum oksit (S.CaO)

0.5 ± 0.0001 g hassasiyetle tartılan (m) numune üzerine etilen glikol + metanol çözeltisi eklenir ve karıştırılarak $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılır. Mavi bant süzgeç kağıdından süzülen karışımın katı kısmı ayrılır. Ele geçen süzüntü, bromtimol mavisi indikatörü varlığında 0.1 M HCl çözeltisi ile titre edilir (V). Eşitlik (3.2) yardımıyla serbest kalsiyum oksit (S.CaO) miktarı tayin edilir. F değeri, 0.1 M HCl 'nin faktör değeridir.

$$\%S.CaO = \frac{F \times V \times 0.28}{m} \quad (3.2)$$

3.2.4 CO₂

TS EN 196-2 standardı esas alınarak, hassas terazide 1.00 ± 0.005 hassasiyetle tartılan numune, $550 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 dakika kızdırılır. Desikatöre alınan numune tartılır (m_1). Daha sonra $950 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 20 dakika kızdırılır ve soğutulduktan sonra tartım alınır (m_2). İki ölçüm arasındaki farka dayanarak CO₂ yüzdesi tayin edilir.

3.2.5 Kızdırma kaybı

TS EN 196-2 standardı esas alınarak, hassas terazide 1.00 ± 0.005 hassasiyetle tartılan numune (m_1), $950 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 20-30 dakika kızdırılır. Desikatöre alınan numune tartılır (m_2). Eşitlik (3.3) kullanılarak % kızdırma kaybı (%KK) tayin edilir.

$$\%KK = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (3.3)$$

3.2.6 Blain

Deneyin başlangıcında blain ekipmanı kalibrasyon talimatları dikkate alınarak referans kum numuneleri için K değerleri hesaplanarak ortalamaları alınır. Blain değeri hesaplanacak numuneden belirli bir miktar alınarak silindir hücrenin tabanındaki delikli disk üzerine yerleştirilir. Üzeri bir filtre kağıdı yardımıyla kapatılır ve silindir hücre blain ekipmanındaki yerine takılır. Pistonun dikkatlice çıkartılmasının ardından ölçüm işlemi otomatik olarak başlatılır. Ölçümün tamamlanma süresi dikkate alınarak Eşitlik (3.4) yardımıyla blain değeri hesaplanır.

$$Blaine = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{\sqrt{1-e}} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \frac{cm^2}{g} \quad (3.4)$$

K: Ekipman sabiti, ρ : Çimentonun yoğunluğu

η : Deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi, t: Süre

3.2.7 45 μ m ve 32 μ m elek üzerinde kalan

10 mm elek altına geçirilen numuneden yaklaşık 10 g tartılır (m). Elek cihazına alınan numune 3 dakika hava ile sürüklemeli şekilde eleme işlemine tabi tutulur. 32 μ m elek üstü kalan miktar (m_1) tayin edilir (R_{32}). Numunenin elek üstünde kalan kısmı ile 45 μ m elek üstü kalan miktar tayin edilir (R_{45}). Eşitlik (3.5) ve Eşitlik (3.6) yardımıyla gerekli hesaplamalar yapılır.

$$R_{32} = \frac{m_1}{m} \times 100 \quad (3.5)$$

$$R_{45} = \frac{m_1}{m} \times 100 \quad (3.6)$$

3.2.8 Basınç dayanım deneyleri

Harç karıştırma makinasına, hazırlanacak beton pastası için TS EN 196-1 standardında belirtilen miktarlar dikkate alınarak çimento numunesi ve su konularak

karıştırılır. Karışım üzerine standart kum ilave edilerek karıştırmaya devam edilir. Elde edilen homojen karışım çelik beton kalıplara yerleştirilir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 2, 7 ve 28 gün dayanım testlerine tabi tutulmak üzere kür havuzuna konulur. Basınç dayanım testi için günü gelen (2, 7 ve 28 gün) beton numunesi basınç dayanım testi yapılarak sonuçları kaydedilir. Basınç dayanım testlerinde uygulanan her adım, TS EN 196-1 standardı referans alınarak yapılmıştır (TSE, 2016).

3.2.9 Yoğunluk

Numune kabının yarısını geçecek şekilde alınan numune tartılarak kaba doldurulur. Numune kabı cihaz üzerindeki yerine yerleştirilir. İstenen bilgiler cihaza girildikten sonra ölçüm başlatılır. Alınan sonuç kayıt edilir.

3.2.10 Hacim genişmesi

Hazırlanan çimento pastası yağlanmış ve cam plaka üzerine yerleştirilmiş Le Chatelier kalıbının içine doldurulur ve 24 saat su içerisinde bekletilir. 24 saat sonunda gösterge uçları arasındaki mesafe ölçülür (A). Kalıp, su banyosu içine alınır ve 30 ± 5 dk. içinde kaynama sıcaklığına kadar ısıtılır. 3 saat kaynama sıcaklığında bekletilir. Su banyosu içinden çıkartılan kalıbın gösterge uçları arasındaki mesafe ölçülür (B). Kalıbın 20 ± 2 °C ye kadar soğuması beklenir. Gösterge uçları arasındaki mesafe ölçülür (C). Toplam hacim genişmesi C ile A arasındaki farka eşittir.

3.3 Deney Tasarımı Optimizasyonu (DOE)

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler MINITAB (18.1.0.0) içerisinde yer alan Yanıt Yüzey Tasarımı (Response Surface Design - Box-Behnken Design) ve Tam Faktöriyel Deney Tasarımı ile değerlendirilmiştir. Takip edilen adımlar aşağıda verildiği şekildedir;

- ✓ Çimento mukavemetini etkilediği düşünülen farklı faktörler seçilmiştir.
- ✓ Bu faktörlere ait deneysel sonuçlar takip edilerek kaydedilmiştir.
- ✓ Mukavemete etki eden faktör sayısı belirlenmiştir.
- ✓ Faktörlere ait seviyeler, tekrarlar ve deney sayıları belirlenmiştir.
- ✓ Kullanılacak deney tasarım tekniği belirlenmiştir.

- ✓ Deney tasarımına ait matematiksel modellemeler oluşturulmuştur.
- ✓ Kalite karakteristik özellikleri belirlenmiştir.
- ✓ Optimizasyon modeli oluşturulmuştur.
- ✓ Deney tasarımına ait istatistiksel optimizasyon sonuçları belirlenmiştir.
- ✓ Sonuçların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

Deney Tasarımı (DOE), giriş (input) değişkenlerine (faktörlerine) sahip sistemlerin performansını ya da çıktılarını (response or output) hızlı ve kolay bir şekilde optimize etmek için kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir tekniktir. DOE sisteme ait çıktıları etkilemesi düşünülen bütün faktörlerin seviyelerini kapsayan bir deney tasarımının test planını oluşturur. Deney tasarımındaki ilk amaç faktör sayıları çok olan sistemlerde faktörleri ölçülebilir ya da yönetilebilir bir sayıya indirmektir. Sisteme ait oluşturulan deney tasarımının düzenlenmesi ile verilerin istatistiksel analiz kısmı başlar. Optimizasyon kısmı ise sistemin performansına etki etmesi düşünülen faktörlerin katkısı ile deney tasarımı takip edilir. Denemenin en yaygın başlangıç ve nihai optimizasyon tasarımlarına Tarama Tasarımı ve Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) denir. Ancak zamanla deney tasarımını oluşturan tam faktör ve çok seviyeli tasarım yöntemlerinde optimizasyon kullanılmaya başlanmıştır.

3.3.1 Çimento üretiminde faktörlerin belirlenmesi

Bu çalışmada CEM II/A-M (P,L) 42,5 R tipi çimento ürününü etkileyen faktörlerin farklı seviyelerde oluşması nedeniyle çok seviyeli deney tasarımına ait tam faktöriyel deney tasarımı ile Box-Behnken (RSM'ye ait bir yöntem) deney tasarımının optimizasyon uygulaması ele alınmış ve kaliteli çimento üretimi için deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Üretim sisteminde çimentoyu etkilediği düşünülen 11 farklı faktör ele alınmış olup bu faktörlere ait tanımlayıcı istatistiksel veriler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Her bir faktörün minimum, maksimum ve ortalama değerleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda bu faktörlere ait varyasyon oranları tespit edilmiştir. İstatistiksel analizlerde elde edilen verilerin standart sapmaları ve varyans değerlerinin küçük olması arzu edilmektedir. Böylelikle, analizlerin bir sonraki aşaması için verilen kararlarda daha keskin ve doğru sonuçların elde edilmesi sağlanmış olmaktadır. Dikkate alınan 11 faktörden sadece 'B' faktörünün varyans değerleri yüksek çıkmaktadır. Ancak bu faktörlere ait önemlilik derecelerini belirlemek için varyans analizine ihtiyaç vardır. Bu

çalışmada 11 adet faktörün 3 farklı yanıt (reponse veya output) değişkenleri için önemlilik dereceleri Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da ifade edilmiştir. Üretilen çimentoların 2 günlük dayanım sonucuna göre elde edilen faktörlerin değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Çimento üretimi için belirlenen faktörlere ait tanımlayıcı istatistiksel veriler

Değişkenler	Ortalama	StDev	Varyans	Min	Q1	Medyan	Q3	Maks
Çözünmeyen kalıntı(ÇK)	8.38	1.063	1.1319	1.80	7.60	8.40	9.32	10.62
Tras(T)	9.08	1.180	1.3940	2.02	8.22	9.13	10.13	11.57
Serbets CaO(ScaO)	1.56	0.297	0.0884	0.12	1.34	1.52	1.79	2.80
Kızdırma kaybı(KK)	4.93	0.322	0.1042	3.70	4.74	4.97	5.14	6.07
Karbondiyoksit (CO ₂)	3.13	0.180	0.0325	1.88	3.01	3.14	3.25	3.69
Yoğunluk(d)	3.03	0.014	0.00021	3.00	3.02	3.03	3.04	3.08
Blain(B)	4381	148.9	22177	3999	4278	4376	4487	4740
45 Mikron(45)	0.72	0.587	0.3453	0.10	0.40	0.50	0.80	3.60
32 Mikron(32)	2.82	1.319	1.7397	0.70	1.80	2.50	3.50	7.40
Hacim genleşmesi(HG)	1.04	0.185	0.0345	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00
Priz başı(PB)	181	17.98	323.11	125	170	185	195	240

Çizelge 3.4 Çimentoların 2 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait varyans analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	11	334.38	30.398	20.58	0.000
ÇK	1	0.95	0.952	0.64	0.423
T	1	0.59	0.586	0.4	0.529
SCaO	1	0.14	0.144	0.1	0.755
KK	1	8.49	8.488	5.75	0.017
CO ₂	1	0.21	0.214	0.15	0.703
d	1	0.77	0.775	0.52	0.469
B	1	3.75	3.749	2.54	0.112
45	1	125.76	125.759	85.16	0.000
32	1	56.03	56.026	37.94	0.000
HG	1	1.92	1.919	1.3	0.255
PB	1	19.65	19.646	13.3	0.000
Hata	515	760.54	1.477	*	*
Toplam	526	1094.92	*	*	*

Çizelge 3.4'e göre 11 faktörden sadece 4 faktörün (KK, 45, 32 ve PB) önemli olduğu gözlemlenmiştir. Etkileşimsiz olarak önemsiz olan faktörlerin etkileşimli olarak incelenmesi için deney tasarımı analizine ihtiyaç vardır. Bu çalışma metodolojisine ait ikinci kısımda faktörlerin etkileşimli olarak analizi yer almaktadır. Çizelge 3.5'te çimento numunelerinin 7 günlük dayanım sonucuna karşılık elde edilen faktörlerin değerleri verilmektedir.



Çizelge 3.5 Çimentoların 7 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait varyans analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	11	344	31.273	17.01	0
ÇK	1	6.94	6.942	3.78	0.053
T	1	4.81	4.806	2.61	0.106
SCaO	1	5.88	5.878	3.2	0.074
KK	1	4.04	4.045	2.2	0.139
CO ₂	1	4.31	4.31	2.34	0.126
d	1	3.1	3.099	1.69	0.195
B	1	6.67	6.671	3.63	0.057
45	1	87.03	87.034	47.35	0.000
32	1	26.92	26.922	14.65	0.000
HG	1	4.18	4.175	2.27	0.132
PB	1	13.45	13.454	7.32	0.007
Hata	515	946.65	1.838	*	*
Toplam	526	1290.65	*	*	*

Not: ÇK, SCaO ve B faktörlerinin önemlilik dereceleri 45, PB ve 32 faktörlerine göre daha az etkilidir. Bunun sebebi bu faktörlerin istatistiksel olarak önemlilik dercesine ait değerlerin üstündeki değerlere sahip olmalarıdır. Bu faktörler geçici veya şartlı (provisional veya conditional) olarak önemli oldukları varsayılabilir.

Çizelge 3.5'e göre 11 faktörden 5 faktörün (T, KK, CO₂, d ve HG) önemsiz olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3.4 ile kıyaslama yapıldığında, sadece 3 faktörün (PB, 45, 32) her iki yanıt fonksiyonu için önemli görüldüğü anlaşılmaktadır. Çalışma için belirlenen 3. yanıt fonksiyonu ise üretilen çimentoların 28 günlük dayanım testinde elde edilen mukavemet değeridir. Bu yanıtı etkileyen faktörlerin değerleri Çizelge 3.6'da verilmektedir.

28 günlük yanıt için faktörlerden sadece SCaO, KK, B, 45 faktörlerin önemli olduğu gözlemlenmiştir. Bu faktörlerin diğer yanıt fonksiyonu üzerindeki etkisi incelendiğinde, KK ve 45 faktörünün ilk yanıt fonksiyonuna etkisi varken ikinci yanıt fonksiyonu için KK faktörünün önemlilik derecesi bulunmamaktadır. Faktör 32'nin anlamlı bir öneminin olması için ön koşul gerekmektedir. Eğer önemlilik derecesi 0.05'ten 0.1'e yükseltirse, Faktör 32'nin yanıt 3 için önemli olduğu varsayılır.

Sonuç olarak bu çalışmada, faktörlerden ÇK, T, SCaO, CO₂, d ve HG faktörleri yanıt değerlerine katkısının bulunmaması ya da az olması (önemlilik değerlerinin düşük olması) sebebiyle elimine edilmiştir. Buna göre toplamda ele alınacak olan faktör sayısı

beş olarak belirlenmiştir. Bu faktörler ise KK, B, 45, 32 ve PB olarak analizlerde yer almaktadır. Bu faktörlerin kırpma (yanıt (bağımlı değişken) fonksiyonları üzerinde önem derecesinin olmadığı faktörlerin elimine edilerek yapılan tekrar analiz çeşidi) varyans analizlerine bakıldığında her üç yanıt fonksiyonu için önemli oldukları gözlemlenmektedir (Çizelge 3.7, Çizelge 3.8, Çizelge 3.9).

Çizelge 3.6 Çimentoların 28 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait varyans analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	11	295.39	26.8536	14.96	0.000
ÇK	1	2.29	2.29	1.28	0.259
T	1	0.2	0.1998	0.11	0.739
SCaO	1	11.7	11.7018	6.52	0.011
KK	1	24.18	24.1843	13.47	0.000
CO2	1	2.18	2.1808	1.21	0.271
d	1	2.21	2.2067	1.23	0.268
B	1	8.87	8.8722	4.94	0.027
45	1	13.09	13.0926	7.29	0.007
32	1	5.04	5.0356	2.8	0.095
HG	1	4.25	4.2525	2.37	0.124
PB	1	3.18	3.1794	1.77	0.184
Hata	515	924.75	1.7956	---	---
Toplam	526	1220.14	---	---	---

Çizelge 3.7 Çimentoların 2 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait kırpma (truncated) varyans analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	5	237.48	47.4968	54.62	0.000
KK	1	10.25	10.2518	11.79	0.001
B	1	10.44	10.4377	12	0.001
45	1	89.22	89.2245	102.61	0.000
32	1	55.63	55.6322	63.98	0.000
PB	1	20.59	20.5914	23.68	0.000
Hata	476	413.91	0.8696	---	---
Toplam	481	651.39	---	---	---

Çizelge 3.8 Çimentoların 7 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait kırpma (truncated) varyans analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	5	204.482	40.896	33.64	0.000
KK	1	39.157	39.157	32.21	0.000
B	1	4.532	4.532	3.73	0.054
45	1	57.97	57.97	47.69	0.000
32	1	32.709	32.709	26.91	0.000
PB	1	5.723	5.723	4.71	0.031
Hata	476	578.62	1.216	---	---
Toplam	481	783.102	---	---	---

Çizelge 3.9 Çimentoların 28 günlük dayanım sonucuna göre faktörlere ait kırpma (truncated) varyans analizi

Kaynak	DF	SS	MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	5	193.086	38.6171	25.14	0.000
KK	1	92.398	92.3976	60.15	0.000
B	1	9.3	9.2996	6.05	0.014
45	1	14.028	14.0283	9.13	0.003
32	1	12.882	12.8819	8.39	0.004
PB	1	0.024	0.0239	0.02	0.901
Hata	476	731.221	1.5362	---	---
Toplam	481	924.307	---	---	---

3.3.2 Faktörlere ait notasyonların belirlenmesi

Bu çalışmada iki farklı deney tasarımı tekniği uygulanacağından faktör seviyelerine ait limitler farklı olması ve bu özelliklerin belirlenmesinden önce faktörlere ait karar değişkenlerin tanımlanması Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 Çimento ürünü için etki ettiği düşünülen faktörler ve Simgeleri

Faktörler	Simge (Notation) ve Karar Değişkenleri
K. K	x_1
Blaine	x_2
45 Mik	x_3
32 Mik	x_4
Priz Başlangıç	x_5

3.3.3 Tam faktöriyel deney tasarımı (Full-Factorial Design)

Tam faktöriyel deney tasarımına göre faktörlerin en az iki seviyesi bulunmalıdır. Bu çalışmada kullanılan verilerin aralıkları (range) çok fazla olduğundan faktörler için iki seviyeli olarak belirlenmiştir. Genellikle, bu seviyeler düşük (Low, L) ve yüksek (High, H) olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada Low seviyesi için minimum- ortalama bir değer ve maksimum seviyesi için ise ortalama-maksimum değerler belirlenmiştir. Çizelge 3.11’de tam faktöriyel deney tasarımı için dikkate alınan 5 faktöre ait seviye değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.11 Tam faktöriyel deney tasarımı için faktörlerin seviyeleri

Faktörler	Seviye 1 (Low)	Seviye 2 (High)
x_1	3.7	6.07
x_2	3999	4740
x_3	0.1	3.6
x_4	0.7	7.4
x_5	125	240

Faktörlerin ve seviyelerine ait bütün kombinasyonlarının dikkate alınması ve 32 verinin 5 tekrar (replike) olması ile 160 veri kullanılmıştır. 2 seviyeli tam faktöriyel tasarımda kullanılacak veri sayısı Eşitlik (3.7) ile hesaplanmaktadır.

$$2^k \cdot n \quad (3.7)$$

k faktör sayısını ve n tekrar (replike) sayısını temsil etmektedir. Bu çalışmada 5 faktör ve her bir faktör için 2 seviye belirlenmiştir. Toplamda 32 veri dizilimi gerçekleşmesi sağlanmıştır. Her bir yanıt en az 5 tekrar yapılarak elde edilecek sonuçların keskin ve net olması sağlanmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı için kullanılan toplam veri sayısı 160 olarak belirlenmiştir. Çimento üretimi için faktörlerin ve yanıt fonksiyonlarının tam faktöriyel deney tasarımına göre dizilimi Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12 Tam faktöriyel deney tasarımına göre verilerin dizilimi

X 1	X 2	X 3	X 4	X 5	R1 (2)	R2 (2)	R3 (2)	R4 (2)	R5 (2)	R1 (2)	R2 (2)	R3 (2)	R4 (2)	R5 (2)	R1 (2)	R2 (2)	R3 (2)	R4 (2)	R5 (2)	
L	L	L	L	L	24.	25.	25.	25.	24.	37.	38.	38	37.	37.	46.	47.	47.	47.	47.	47.
H	L	L	L	L	24.	23.	23.	23.	23.	38.	36	37.	35.	36.	48.	46.	49.	47.	47.	46.
L	H	L	L	L	24	23.	23.	25.	25.	37.	35.	35.	37.	37.	46.	46.	46.	47.	47.	47.
H	H	L	L	L	23.	25.	24	24.	23.	36.	38	37	37.	36.	47.	49.	48	47.	47.	47.
L	L	H	L	L	26.	25.	26.	25.	25.	38.	37.	37.	38.	38	49	47.	46.	47.	47.	47.
H	L	H	L	L	23	23.	26.	24.	25.	35.	35.	38	35.	38.	47.	46.	48.	47.	46.	46.
L	H	H	L	L	25.	25.	26.	26.	26.	37.	36.	38.	38	37.	46.	47.	48.	48.	47.	47.
H	H	H	L	L	26.	26.	*	*	*	38.	38.	*	*	*	49.	47.	*	*	*	*
L	L	L	H	L	25	24	23.	24.	22	38.	37	36.	37.	35.	47.	47.	47.	48.	46.	46.
H	L	L	H	L	22.	23.	23.	22.	24.	35	36.	35.	35.	37.	46.	47.	46.	47.	47.	47.
L	H	L	H	L	22.	24.	*	*	*	36	36.	*	*	*	45.	46.	*	*	*	*
H	H	L	H	L	22	24.	25	23.	*	35.	37.	38	35.	*	45.	47	48.	46.	*	*
L	L	H	H	L	26.	25.	25.	25.	25.	38.	38.	39	37.	38.	45.	46.	46.	47.	49.	49.
H	L	H	H	L	22.	26.	25.	25.	26.	36.	39.	39.	38.	38.	46.	48.	49.	48.	48.	48.
L	H	H	H	L	23.	26.	26.	23.	25	36.	39.	38.	36.	37.	46.	48.	48.	46.	46.	46.
H	H	H	H	L	24.	23.	23.	26.	24	36.	35.	36.	40.	36.	47	47.	47.	49.	49.	47.
L	L	L	L	H	25	24.	24	25	26	36.	37.	36.	37	37.	48.	48.	47.	47.	47.	45
H	L	L	L	H	26.	24.	24.	24	24	38.	36.	36.	37.	37.	48.	46.	46	47.	47.	47.
L	H	L	L	H	23.	23.	26.	24.	25	35.	35.	38.	37	37.	47.	47.	45.	47.	48.	48.
H	H	L	L	H	26.	25.	22.	23.	23.	38.	37.	35.	36.	35.	48.	47.	44.	46.	47.	47.
L	L	H	L	H	24.	25.	25.	25.	24.	37.	37.	38.	38.	38.	43.	45.	48.	47	48.	48.
H	L	H	L	H	25.	25.	25.	*	*	37.	38	37.	*	*	48.	46.	48.	*	*	*
L	H	H	L	H	26.	26.	25.	*	*	39.	38.	37.	*	*	49.	47.	46.	*	*	*
H	H	H	L	H	24	*	*	*	*	39	*	*	*	*	45	*	*	*	*	*
L	L	L	H	H	23	*	*	*	*	36.	*	*	*	*	46.	*	*	*	*	*
H	L	L	H	H	22.	24.	25	23.	23.	35.	37.	37.	36.	36.	46.	48.	48.	46	46.	46.
L	H	L	H	H	24.	*	*	*	*	37.	*	*	*	*	47.	*	*	*	*	*
H	H	L	H	H	23.	*	*	*	*	36.	*	*	*	*	47.	*	*	*	*	*
L	L	H	H	H	23.	23.	25.	25.	25.	35.	37.	38	38.	38	45.	47.	47.	47.	47.	50
H	L	H	H	H	22.	22.	21.	22.	23.	35.	35.	34.	34.	35.	46	46.	45.	45.	45.	44.
L	H	H	H	H	25.	27	*	*	*	38.	39.	*	*	*	49.	50.	*	*	*	*
H	H	H	H	H	26	29.	*	*	*	39.	42.	*	*	*	50.	52.	*	*	*	*

3.3.4 Yanıt yüzey tasarımı (RSM - BBD)

Yanıt yüzey tasarımına ait Box-Behnken yönteminin kullanılması: bu yöntem ile faktörlerin önemlilik derecelerinin hem tekil hem de etkileşimli olarak ele alınmasını

sağlamaktadır. Aynı zamanda elde edilen yüzey grafikleri ile faktörlerin, yanıtları nasıl etkiledikleri açık olarak gösterilmektedir. Deneye ait matematiksel modellemenin oluşturulması ve optimum değerlerin elde edilmesi adına bu tasarımın kullanılması daha cazip olmaktadır. Yanıt Yüzey Tasarımının diğer yöntemi olan Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design, CCD) metodunun bu çalışmada kullanılmamasının sebebi faktör ve seviye sayılarının aynı olmasına rağmen daha fazla veri gereksinimine ihtiyaç duyulmasıdır (Ngatchou ve ark., 2005). Ayrıca bu yöntem faktörlere ait seviyelerin orta noktalarının kombinasyonlarını dikkate almaktadır.

Örnek: Yanıt Yüzey Tasarımı yöntemini kullanan bir çalışmaya ait bir örnek olarak:

Çalışmaya ait faktörler ve ilk seviyeleri:

- Sıcaklık: 190 °C ve 210 °C,
- Basınç: 50 MPa ve 100 MPa,
- Enjeksiyon hızı: 10 mm.s⁻¹ ve 50 mm.s⁻¹,

olarak belirlenmiştir. Bir Box-Behnken Tasarımı için tasarım noktaları, faktör düzeyleri, yüksek, düşük ve bunların orta noktalarının kombinasyonlarına denk gelir.

Faktör seviyeleri;

- Sıcaklık: 190 °C, 200 °C ve 210 °C,
- Basınç: 50MPa, 75MPa ve 100MPa,
- Enjeksiyon hızı: 10 mm.s⁻¹, 30 mm.s⁻¹ ve 50 mm.s⁻¹

olarak dikkate alınmıştır.

Faktörlere ait seviye sayıları Çizelge 3.13'te verilmiştir. Faktörler 3 seviyeli olarak dikkate alınmıştır. Bu seviyelerin limitleri ise düşük (Low, L), ortalama (Mean, M) ve yüksek (High, H) olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.13 Box-Behnken Tasarımına göre faktörlere ait seviyeler

<i>Faktörler</i>	<i>Seviye 1 (Low)</i>	<i>Seviye 2 (Mean)</i>	<i>Seviye 3 (High)</i>
x_1	3.7	4.9316	6.07
x_5	3999	4381	4740
x_6	0.1	0.7216	3.6
x_7	0.7	2.8234	7.4
x_9	125	180.74	240

Yanıt Yüzey Tasarımının bir yöntemi olan Box-Behnken Tasarımı için faktörlerin seviyelerine ait bütün kombinasyonlarının dikkate alınması ile 46 verinin 3 tekrar olması ile 138 veri kullanılmıştır. Verilerin dizilimi Çizelge 3.14’te gösterilmiştir.



Çizelge 3.14 Box-Behnken Tasarımına göre Verilerin Dizilimi

X 1	X 2	X 3	X 4	X 5	R1 (2)	R2 (2)	R3 (2)	R1 (7)	R2 (7)	R3 (7)	R1 (28)	R2 (28)	R3 (28)
L	L	M	M	M	22	23.1	24.5	35.1	37.3	35.3	46.8	48.2	45.7
H	L	M	M	M	24.4	24.7	24.5	37.3	37.5	36.5	46.9	48.3	46.5
L	H	M	M	M	25.4	27.1	25.7	37.9	38.1	37.2	47.5	48.8	47.7
H	H	M	M	M	25.2	25	*	39.3	39	*	50	49.7	*
M	M	L	L	M	24.1	25.6	25	37.1	37.8	36.1	45.9	47.7	48.2
M	M	H	L	M	25.1	25	*	37.7	37	*	48.2	48	*
M	M	L	H	M	24.4	24.3	*	36.8	37	*	46.8	47	*
M	M	H	H	M	22.9	23.4	25.7	36.8	35.2	37.8	46.8	45	47.4
M	L	M	M	L	23.9	24.8	25.1	37.6	37.3	37.7	47.9	46.9	48.5
M	H	M	M	L	25.8	24.8	25.7	37.6	35.9	39.2	46.5	48.9	49.3
M	L	M	M	H	23.3	24.6	24.2	35.1	37	36.4	46.1	47.2	46.9
M	H	M	M	H	25.6	25.8	23.7	37.7	38.4	36.3	47.7	48.6	48.6
L	M	L	M	M	25.4	23.5	24.5	39	35.6	37	51	46.9	48.2
H	M	L	M	M	23.3	25	24.8	35.5	36.8	36.1	47.3	47	45.3
L	M	H	M	M	25.5	25	*	38.6	39	*	47.4	47	*
H	M	H	M	M	25.7	26	*	38	37.8	*	47	46.9	*
M	M	M	L	L	24.9	24.5	*	37.3	37.4	*	47.9	48	*
M	M	M	H	L	22.3	23.3	24.5	34.9	36.6	37.4	46.6	47.4	47.1
M	M	M	L	H	24.6	25	*	36.7	36.5	*	46	46.1	*
M	M	M	H	H	22.6	23	*	37.7	37.6	*	48.2	48	*
M	L	L	M	M	22.8	25.2	*	34.8	37.8	*	46.7	48.8	*
M	H	L	M	M	24	24.8	23.3	35.5	36.9	36.2	47.5	47.2	45
M	L	H	M	M	24.9	25	*	37.5	37.6	*	47.6	47.5	*
M	H	H	M	M	26.4	26.3	27	38	38.9	39.8	48.6	49.5	49.5
L	M	M	L	M	25.2	26	*	37.3	37.2	*	48.7	48.6	*
H	M	M	L	M	24.3	24	*	35.1	35	*	47.8	48	*
L	M	M	H	M	24.5	25	*	37.7	28	*	47	47.1	*
H	M	M	H	M	23.5	23.5	23.9	36.6	36.1	36.2	47.8	45.3	46.6
M	M	L	M	L	24.7	25.1	25.2	38.5	38	37.1	49.3	49.7	47.9
M	M	H	M	L	25.7	26	*	38	37.9	*	47	46.1	*
M	M	L	M	H	25	23.5	23.2	37.8	36.4	35.1	48.6	46.2	45.9
M	M	H	M	H	23.4	24	*	35.1	35	*	47.8	47.7	*
L	M	M	M	L	24	24.2	24.9	37	37.6	37.9	47.6	48.2	47.8
H	M	M	M	L	23	23.5	24.2	35.3	36.3	37.1	47.1	47.2	47.4
L	M	M	M	H	25	24.4	24.8	37.6	37.2	37.4	48.1	47.9	48.8
H	M	M	M	H	24.3	24	24.6	36.3	36	35.8	46.2	45.7	46.2
M	L	M	L	M	26.1	24.5	24.9	38.5	36.6	36.3	49.5	45.5	45.3
M	H	M	L	M	24.3	25	*	36.9	37.8	*	48.1	48.3	*
M	L	M	H	M	24.1	24.4	23	36.7	37.3	36.1	46.4	47.2	46.6
M	H	M	H	M	26.4	27.3	25.8	39.8	39.7	40.2	48.9	49.2	49.8
M	M	M	M	M	24	23.8	24.9	37	36.3	37.3	47.9	47.4	48
M	M	M	M	M	23.7	23.6	24	36.9	36.4	36.1	47.4	47.9	47.6
M	M	M	M	M	23.9	24.2	24.7	35.7	36.3	36.3	45.4	46.2	45.8
M	M	M	M	M	26.1	24	24.2	38.6	35	36.5	46.1	46.1	48.5
M	M	M	M	M	23.6	23.4	25.2	35.7	35.1	38	47.7	47.8	46.6
M	M	M	M	M	23.8	24.8	25.2	36.3	36.8	37.4	47.8	47.6	47

3.3.5 Deney tasarımına ait matematiksel modellemelerin oluşturulması

3.3.5.1 Tam faktöriyel tasarıma göre matematiksel modelleme

Tam faktöriyel deney tasarımında iki tip yanıt fonksiyonu elde etmek mümkündür (Atalan, 2014). Birinci dereceden (first-order) yanıt yüzey denkleminde (doğrusal yapıda bir denklemdir) faktörlerin birbirleri ile etkileşimi vardır. Ancak kendileri ile etkileşimsiz olarak yanıt denkleminde yer almamaktadır. Bu durumda birinci dereceden denklemi Eşitlik (3.8)'de verilmiştir (Montgomery, 2012).

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{i < j} \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.8)$$

Bu çalışmaya ait tam faktöriyel deney tasarıma göre elde edilecek matematiksel denklem Eşitlik (3.9)'daki gibidir:

$$\begin{aligned} y = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \dots \\ & + \beta_{15} x_1 x_5 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{25} x_2 x_5 + \beta_{34} x_3 x_4 \\ & + \beta_{35} x_3 x_5 + \beta_{45} x_4 x_5 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \beta_{124} x_1 x_2 x_4 \\ & + \beta_{125} x_1 x_2 x_5 + \beta_{134} x_1 x_3 x_4 + \beta_{135} x_1 x_3 x_5 + \beta_{145} x_1 x_4 x_5 \\ & + \beta_{234} x_2 x_3 x_4 + \beta_{235} x_2 x_3 x_5 + \beta_{345} x_3 x_4 x_5 + \beta_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 \\ & + \beta_{1235} x_1 x_2 x_3 x_5 + \beta_{2345} x_2 x_3 x_4 x_5 + \beta_{12345} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Tam faktöriyel tasarıma göre elde edilen denklem doğrusal bir optimizasyon modelini oluşturacaktır. Bunun sebebi, faktörlerin kendileri ile etkileşiminin dikkate alınmamasıdır.

3.3.5.2 Box-Behnken tasarıma göre matematiksel modelleme

Deney tasarımında kullanılan RSM yöntemine ait CCD ve BBD'de oluşan denklemler en az ikinci dereceden polinomial (second order polynomial equations) denklemlerdir (Atalan, 2014). Bunun sebebi faktörlerin birbirleri ile olan etkileşimleridir. Bir Box-Behnken tasarıma ait ikinci derece denklem Eşitlik (3.10)'da verilmiştir (Montgomery ve ark., 2012; Myers ve ark., 2016).

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} a_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j, \quad i < j \quad (3.10)$$

Bu çalışmaya ait Box-Behnken tasarımına göre elde edilecek matematiksel Eşitlik (3.11)'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
 y = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 \\
 & + \beta_9 x_9 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \beta_{55} x_5^2 \\
 & + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \dots + \beta_{15} x_1 x_5 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 \\
 & + \beta_{25} x_2 x_5 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_{35} x_3 x_5 + \beta_{45} x_4 x_5
 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'de y ; tahmin edilen sonuç, β_0 ; modele ait sabit sayı, x_1, \dots, x_5 ; bağımsız karar değişkenleri, β_1, \dots, β_5 ; doğrusal denklemin katsayıları, $\beta_{11}, \beta_{22}, \dots, \beta_{55}$; ikinci dereceden denklem katsayıları, $\beta_{12}, \beta_{13}, \dots, \beta_{45}$; çapraz ya da etkileşim faktör katsayıları olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.15 Box-Behnken Deney Tasarımı veri dizilimi

Deney Sayısı	X_1, X_2, \dots, X_n	Tekrarlar (Y)	\bar{y}	s
1		$y_{11} y_{12} \dots y_{1j} \dots y_{1m}$	\bar{y}_1	s_1
2		$y_{21} y_{22} \dots y_{2j} \dots y_{2m}$	\bar{y}_2	s_2
.		.	.	.
.	Kontrol Faktör Ayarları	.	.	.
.		.	.	.
n		$y_{n1} y_{n2} \dots y_{nj} \dots y_{nm}$	\bar{y}_n	s_n

Birinci dereceden (first-order) modellere göre deneylerde kullanılacak örnek verilerin ortalamasına (\widehat{w}_μ) ve standart sapması (\widehat{w}_σ) ilk olarak Vining and Myers tarafından Eşitlik (3.12) ve Eşitlik (3.13)'te verildiği gibi formüle edilmiştir (Ding ve ark., 2004).

$$w_\mu = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_\mu \quad i < j \quad (3.12)$$

$$w_\sigma = \gamma_0 + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \gamma_{ij} x_i x_j + \varepsilon_\sigma \quad i < j \quad (3.13)$$

Tasarımı yapılan bir deneyin ya da bir süreçte kullanılan verilere ait değişkenliği ve standart sapmayı en aza indirecek (bu istenilen bir durum) optimum faktör ayarlarını (optimum factor settings) belirlemek tercih edilen bir durumdur. Vining and Myers tarafından bu durum Eşitlik (3.14)'teki gibidir.

$$\begin{aligned} & \textit{Minimize } \hat{w}_\sigma \\ & \textit{Kısıt (Subject to)} \quad \hat{w}_\mu = \tau \end{aligned} \quad (3.14)$$

Üç çeşit kalite karakteristiği bulunmaktadır. Popülasyona ait ortalamanın minimize edilmesi ile popülasyona ait standart sapmanın örnek verideki standart sapmaya eşit olduğu durum S-Tipi (S-Type: The smaller-the better) yaklaşımı olarak ifade edilmektedir. S-tipi; Eşitlik (3.15)'te verildiği şekildedir.

$$\begin{aligned} & \textit{Minimize } \hat{\mu} \\ & \textit{Kısıt (Subject to)} \quad \hat{\sigma} = \tau_\sigma \\ & \quad X \in \Omega \end{aligned} \quad (3.15)$$

Sisteme ya da bir deneye ait performansının maksimum düzeye çıkarılması ve performansın değişkenliğinin ya da standart sapmasının sabit tutulmasını benimseyen yaklaşım ise L-Tipi (L-Type: The larger-the better) tekniğidir. Bu kalite karakteristiği Eşitlik (3.16) 'da verildiği şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} & \textit{Maksimize } \hat{\mu} \\ & \textit{Kısıt (Subject to)} \quad \hat{\sigma} = \tau_\sigma \\ & \quad X \in \Omega \end{aligned} \quad (3.16)$$

Bu teknik, çalışmada kullanılacak yöntemlerden bir tanesidir. Ancak en çok benimsenen kalite karakteristikleri arasında yer alan N-Tipi (N-Type: The nominal-the best) yaklaşımı ise değişkenliğin ya da standart sapmaların minimize edilerek hedef değerini sabit tutulmasını benimsemektedir. Bu kalite özelliği ise bu çalışmada kullanılacak ikinci yöntemdir (Eşitlik (3.17)).

$$\begin{aligned} & \textit{Minimize } \hat{\sigma} \textit{ or } \hat{\sigma}^2 \\ & \textit{Kısıt (Subject to)} \quad \hat{\mu} = \tau \\ & \quad X \in \Omega \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.3.6 Optimizasyon modelinin oluşturulması

Bu çalışmada iki tür kalite karakteristik özelliği taşıyan L-Tipi ve N-Tipi yöntemleri kullanılarak kaliteli çimento üretimi amaçlanmıştır. Bu yöntemler ayrı ayrı olarak Tam Faktöriyel ile Box-Behnken tasarımları için kullanılmıştır.

3.3.6.1 Tam faktöriyel deney tasarımına ait optimizasyon modelinin oluşturulması

Tam faktörel deney tasarımı için dikkate alınan 3 yanıt fonksiyonun regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Bu regresyon denklemleri, oluşturulacak optimizasyon modellerinin amaç fonksiyonu olarak tanımlanacaktır. Eşitlik (3.18), 2 günlük çimento mukavemetini etkileyen faktörler için alınan değerler dikkate alınarak oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
 MAX Y(2) = & 42.6 - 3.68 X1 - 0.00324 X2 + 5.52 X3 + 0.69 X4 \\
 & - 0.0594 X5 + 0.000646 X1 * X2 - 1.65 X1 * X3 - 0.137 X1 \\
 & * X4 + 0.0133 X1 * X5 - 0.00121 X2 * X3 - 0.000269 X2 * X4 \\
 & + 0.000011 X2 * X5 - 1.89 X3 * X4 - 0.0426 X3 * X5 \\
 & - 0.0133 X4 * X5 + 0.000383 X1 * X2 * X3 + 0.000049 X1 * X2 \\
 & * X4 - 0.000002 X1 * X2 * X5 + 0.612 X1 * X3 * X4 \\
 & + 0.01109 X1 * X3 * X5 + 0.00228 X1 * X4 * X5 + 0.000430 X2 \\
 & * X3 * X4 + 0.000010 X2 * X3 * X5 + 0.000003 X2 * X4 * X5 \\
 & + 0.01495 X3 * X4 * X5 - 0.000136 X1 * X2 * X3 * X4 \\
 & - 0.000003 X1 * X2 * X3 * X5 - 0.000001 X1 * X2 * X4 * X5 \\
 & - 0.00427 X1 * X3 * X4 * X5 - 0.000003 X2 * X3 * X4 * X5 \\
 & + 0.000001 X1 * X2 * X3 * X4 * X5
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Eşitlik (3.19), 7 günlük çimento mukavemetini etkileyen faktörler için alınan değerler dikkate alınarak oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
 MAX Y(7) = & 64.7 - 5.45 X1 - 0.00533 X2 + 1.65 X3 + 0.18 X4 \\
 & - 0.1333 X5 + 0.001060 X1 * X2 - 0.70 X1 * X3 - 0.062 X1 \\
 & * X4 + 0.0277 X1 * X5 - 0.00043 X2 * X3 - 0.000079 X2 * X4 \\
 & + 0.000025 X2 * X5 - 2.08 X3 * X4 + 0.0021 X3 * X5 \\
 & - 0.0041 X4 * X5 + 0.000162 X1 * X2 * X3 + 0.000015 X1 * X2 \\
 & * X4 - 0.000005 X1 * X2 * X5 + 0.646 X1 * X3 * X4 \\
 & + 0.00068 X1 * X3 * X5 + 0.00055 X1 * X4 * X5 + 0.000457 X2 \\
 & * X3 * X4 + 0.000000 X2 * X3 * X5 + 0.000001 X2 * X4 * X5 \\
 & + 0.01196 X3 * X4 * X5 - 0.000137 X1 * X2 * X3 * X4 \\
 & - 0.000000 X1 * X2 * X3 * X5 - 0.000000 X1 * X2 * X4 * X5 \\
 & - 0.00363 X1 * X3 * X4 * X5 - 0.000003 X2 * X3 * X4 * X5 \\
 & + 0.000001 X1 * X2 * X3 * X4 * X5
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Eşitlik (3.20), 28 günlük çimento mukavemetini etkileyen faktörler için alınan değerler dikkate alınarak oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
MAX Y(28) = & 48.5 - 0.11 X_1 - 0.00090 X_2 + 11.34 X_3 + 4.05 X_4 \\
& + 0.0098 X_5 + 0.000195 X_1 * X_2 - 2.88 X_1 * X_3 - 0.676 X_1 \\
& * X_4 - 0.0018 X_1 * X_5 - 0.00232 X_2 * X_3 - 0.000754 X_2 * X_4 \\
& + 0.000001 X_2 * X_5 - 3.48 X_3 * X_4 - 0.0813 X_3 * X_5 \\
& - 0.0237 X_4 * X_5 + 0.000600 X_1 * X_2 * X_3 + 0.000110 X_1 * X_2 \\
& * X_4 - 0.000000 X_1 * X_2 * X_5 + 0.853 X_1 * X_3 * X_4 \\
& + 0.01947 X_1 * X_3 * X_5 + 0.00379 X_1 * X_4 * X_5 + 0.000672 X_2 \\
& * X_3 * X_4 + 0.000017 X_2 * X_3 * X_5 + 0.000004 X_2 * X_4 * X_5 \\
& + 0.02203 X_3 * X_4 * X_5 - 0.000168 X_1 * X_2 * X_3 * X_4 \\
& - 0.000004 X_1 * X_2 * X_3 * X_5 - 0.000001 X_1 * X_2 * X_4 * X_5 \\
& - 0.00542 X_1 * X_3 * X_4 * X_5 - 0.000004 X_2 * X_3 * X_4 * X_5 \\
& + 0.000001 X_1 * X_2 * X_3 * X_4 * X_5
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned}
& \textit{kısıt(subject to)} \\
& l \leq x_i \leq u
\end{aligned} \tag{3.21}$$

3.3.6.2 Box-Behnken deney tasarımına ait optimizasyon modelinin oluşturulması

Box-Behnken Deney Tasarımı için geliştirilecek optimizasyon modellerinde 3 farklı parametre göz önüne alınacaktır. Bu parametrelerden ortalama, standart sapma ve varyans değerleri amaç fonksiyonunu şekillendirecektir. Her bir amaç fonksiyonunda bu parametreler hesaplanarak amaç optimizasyon modellerinin oluşması sağlanmıştır. Optimizasyon modelleri ise Box-Behnken Deney Tasarımının kalite karakteristikleri göz önüne alınması ile L-Tip ve N- Tip özellikleri dikkate alınmıştır (Eşitlik (3.22) - (3.39)).

- **Y (2) Yanıtı içi oluşturulan Optimizasyon modelleri:**

Parametreler	Hedef Değerler
$\hat{\mu}(x)$	24,584
$\hat{\sigma}(x)$	0,3921
$\hat{\sigma}^2(x)$	0,3724

✚ L-Tip:

$$\begin{aligned}
MAX \hat{\mu}(x) = & 38.6 + 1.34 X_1 - 0.00634 X_2 - 1.51 X_3 - 1.553 X_4 + 0.0098 X_5 \\
& + 0.115 X_1 * X_1 + 0.000001 X_2 * X_2 + 0.1155 X_3 * X_3 + 0.0019 X_4 \\
& * X_4 - 0.000045 X_5 * X_5 - 0.000657 X_1 * X_2 + 0.084 X_1 * X_3 \\
& + 0.0210 X_1 * X_4 + 0.00135 X_1 * X_5 + 0.000306 X_2 * X_3 \\
& + 0.000322 X_2 * X_4 + 0.000001 X_2 * X_5 - 0.0213 X_3 * X_4 \\
& - 0.00261 X_3 * X_5 - 0.00087 X_4 * X_5
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Kısıt (Subject to) } \hat{\sigma}(x) \\
& = 9.71 + 0.55 X_1 - 0.00376 X_2 - 1.316 X_3 - 0.109 X_4 \\
& + 0.0053 X_5 - 0.1091 X_1 * X_1 + 0.000000 X_2 * X_2 - 0.0050 X_3 \\
& * X_3 - 0.0094 X_4 * X_4 - 0.000032 X_5 * X_5 + 0.000095 X_1 * X_2 \\
& - 0.0145 X_1 * X_3 + 0.0145 X_1 * X_4 - 0.00050 X_1 * X_5 \\
& + 0.000243 X_2 * X_3 + 0.000036 X_2 * X_4 + 0.000003 X_2 * X_5 \\
& + 0.0898 X_3 * X_4 - 0.00121 X_3 * X_5 - 0.001063 X_4 * X_5 = 0.3921
\end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Kısıt (Subject to) } \hat{\sigma}^2(x) \\
& = 18.7 + 0.37 X_1 - 0.00679 X_2 - 2.66 X_3 - 0.108 X_4 + 0.0059 X_5 \\
& - 0.150 X_1 * X_1 + 0.000000 X_2 * X_2 + 0.0368 X_3 * X_3 - 0.0100 X_4 \\
& * X_4 - 0.000058 X_5 * X_5 + 0.000212 X_1 * X_2 - 0.005 X_1 * X_3 \\
& + 0.0128 X_1 * X_4 - 0.00053 X_1 * X_5 + 0.000475 X_2 * X_3 \\
& + 0.000048 X_2 * X_4 + 0.000006 X_2 * X_5 + 0.1190 X_3 * X_4 \\
& - 0.00180 X_3 * X_5 - 0.00147 X_4 * X_5 = 0.3724
\end{aligned} \tag{3.24}$$

N-Tip:


$$\begin{aligned}
\text{MIN } \hat{\sigma}(x) & = 9.71 + 0.55 X_1 - 0.00376 X_2 - 1.316 X_3 - 0.109 X_4 + 0.0053 X_5 \\
& - 0.1091 X_1 * X_1 + 0.000000 X_2 * X_2 - 0.0050 X_3 * X_3 \\
& - 0.0094 X_4 * X_4 - 0.000032 X_5 * X_5 + 0.000095 X_1 * X_2 \\
& - 0.0145 X_1 * X_3 + 0.0145 X_1 * X_4 - 0.00050 X_1 * X_5 \\
& + 0.000243 X_2 * X_3 + 0.000036 X_2 * X_4 + 0.000003 X_2 * X_5 \\
& + 0.0898 X_3 * X_4 - 0.00121 X_3 * X_5 - 0.001063 X_4 * X_5
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
\text{MIN } \hat{\sigma}^2(x) & = 18.7 + 0.37 X_1 - 0.00679 X_2 - 2.66 X_3 - 0.108 X_4 + 0.0059 X_5 \\
& - 0.150 X_1 * X_1 + 0.000000 X_2 * X_2 + 0.0368 X_3 * X_3 \\
& - 0.0100 X_4 * X_4 - 0.000058 X_5 * X_5 + 0.000212 X_1 * X_2 \\
& - 0.005 X_1 * X_3 + 0.0128 X_1 * X_4 - 0.00053 X_1 * X_5 \\
& + 0.000475 X_2 * X_3 + 0.000048 X_2 * X_4 + 0.000006 X_2 * X_5 \\
& + 0.1190 X_3 * X_4 - 0.00180 X_3 * X_5 - 0.00147 X_4 * X_5
\end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Kısıt (Subject to) } \hat{\mu}(x) \\
& = 38.6 + 1.34 X_1 - 0.00634 X_2 - 1.51 X_3 - 1.553 X_4 \\
& + 0.0098 X_5 + 0.115 X_1 * X_1 + 0.000001 X_2 * X_2 + 0.1155 X_3 \\
& * X_3 + 0.0019 X_4 * X_4 - 0.000045 X_5 * X_5 - 0.000657 X_1 * X_2 \\
& + 0.084 X_1 * X_3 + 0.0210 X_1 * X_4 + 0.00135 X_1 * X_5 \\
& + 0.000306 X_2 * X_3 + 0.000322 X_2 * X_4 + 0.000001 X_2 * X_5 \\
& - 0.0213 X_3 * X_4 - 0.00261 X_3 * X_5 - 0.00087 X_4 * X_5 = 24.584
\end{aligned} \tag{3.27}$$

• **Y (7) Yanıtı için oluşturulan Optimizasyon modelleri:**

Parametreler	Hedef Değerler
$\hat{\mu}(x)$	36.947
$\hat{\sigma}(x)$	1.065
$\hat{\sigma}^2(x)$	0.3724

 **L-Tip:**

$$\begin{aligned}
 MAX \hat{\mu}(x) = & 89.9 - 1.29 X_1 - 0.01607 X_2 - 0.92 X_3 - 3.59 X_4 - 0.0602 X_5 \\
 & - 0.047 X_1 * X_1 + 0.000001 X_2 * X_2 + 0.131 X_3 * X_3 - 0.0077 X_4 \\
 & * X_4 + 0.000045 X_5 * X_5 + 0.000062 X_1 * X_2 + 0.020 X_1 * X_3 \\
 & + 0.356 X_1 * X_4 - 0.00037 X_1 * X_5 + 0.000280 X_2 * X_3 \\
 & + 0.000301 X_2 * X_4 + 0.000007 X_2 * X_5 - 0.0277 X_3 * X_4 \\
 & - 0.00364 X_3 * X_5 + 0.00273 X_4 * X_5
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned}
 Kısıt \hat{\sigma}(x) = & -7.7 - 0.04 X_1 + 0.00008 X_2 - 2.61 X_3 + 2.16 X_4 + 0.0850 X_5 \\
 & + 0.079 X_1 * X_1 - 0.000000 X_2 * X_2 - 0.038 X_3 * X_3 + 0.0101 X_4 \\
 & * X_4 - 0.000088 X_5 * X_5 + 0.000122 X_1 * X_2 + 0.111 X_1 * X_3 \\
 & - 0.415 X_1 * X_4 - 0.00144 X_1 * X_5 + 0.000435 X_2 * X_3 \\
 & + 0.000022 X_2 * X_4 - 0.000008 X_2 * X_5 + 0.0652 X_3 * X_4 \\
 & - 0.00159 X_3 * X_5 - 0.00166 X_4 * X_5 = 1.065
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
 Kısıt \hat{\sigma}^2(x) = & 18.7 + 0.37 X_1 - 0.00679 X_2 - 2.66 X_3 - 0.108 X_4 + 0.0059 X_5 \\
 & - 0.150 X_1 * X_1 + 0.000000 X_2 * X_2 + 0.0368 X_3 * X_3 - 0.0100 X_4 \\
 & * X_4 - 0.000058 X_5 * X_5 + 0.000212 X_1 * X_2 - 0.005 X_1 * X_3 \\
 & + 0.0128 X_1 * X_4 - 0.00053 X_1 * X_5 + 0.000475 X_2 * X_3 \\
 & + 0.000048 X_2 * X_4 + 0.000006 X_2 * X_5 + 0.1190 X_3 * X_4 \\
 & - 0.00180 X_3 * X_5 - 0.00147 X_4 * X_5 = 0.3724
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

 **N-Tip:**

$$\begin{aligned}
 MIN \hat{\sigma}(x) = & -7.7 - 0.04 X_1 + 0.00008 X_2 - 2.61 X_3 + 2.16 X_4 + 0.0850 X_5 \\
 & + 0.079 X_1 * X_1 - 0.000000 X_2 * X_2 - 0.038 X_3 * X_3 + 0.0101 X_4 \\
 & * X_4 - 0.000088 X_5 * X_5 + 0.000122 X_1 * X_2 + 0.111 X_1 * X_3 \\
 & - 0.415 X_1 * X_4 - 0.00144 X_1 * X_5 + 0.000435 X_2 * X_3 \\
 & + 0.000022 X_2 * X_4 - 0.000008 X_2 * X_5 + 0.0652 X_3 * X_4 \\
 & - 0.00159 X_3 * X_5 - 0.00166 X_4 * X_5
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
 MIN \hat{\sigma}^2(x) = & 18.7 + 0.37 X_1 - 0.00679 X_2 - 2.66 X_3 - 0.108 X_4 + 0.0059 X_5 \\
 & - 0.150 X_1 * X_1 + 0.000000 X_2 * X_2 + 0.0368 X_3 * X_3 - 0.0100 X_4 \\
 & * X_4 - 0.000058 X_5 * X_5 + 0.000212 X_1 * X_2 - 0.005 X_1 * X_3 \\
 & + 0.0128 X_1 * X_4 - 0.00053 X_1 * X_5 + 0.000475 X_2 * X_3 \\
 & + 0.000048 X_2 * X_4 + 0.000006 X_2 * X_5 + 0.1190 X_3 * X_4 \\
 & - 0.00180 X_3 * X_5 - 0.00147 X_4 * X_5
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}
 Kısıt \hat{\mu}(x) = & 89.9 - 1.29 X_1 - 0.01607 X_2 - 0.92 X_3 - 3.59 X_4 - 0.0602 X_5 \\
 & - 0.047 X_1 * X_1 + 0.000001 X_2 * X_2 + 0.131 X_3 * X_3 - 0.0077 X_4 \\
 & * X_4 + 0.000045 X_5 * X_5 + 0.000062 X_1 * X_2 + 0.020 X_1 * X_3 \\
 & + 0.356 X_1 * X_4 - 0.00037 X_1 * X_5 + 0.000280 X_2 * X_3 \\
 & + 0.000301 X_2 * X_4 + 0.000007 X_2 * X_5 - 0.0277 X_3 * X_4 \\
 & - 0.00364 X_3 * X_5 + 0.00273 X_4 * X_5 = 36.947
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

- **Y (28) Yanıtı için oluşturulan Optimizasyon modelleri:**

Paramereler	Hedef Değerler
$\hat{\mu}(x)$	47,499
$\hat{\sigma}(x)$	0,5789
$\hat{\sigma}^2(x)$	1,365

✚ L-Tip:

$$\begin{aligned}
 MAX \hat{\mu}(x) = & 97.6 - 3.15 X1 - 0.01354 X2 - 5.06 X3 - 1.306 X4 - 0.0483 X5 \\
 & + 0.148 X1 * X1 + 0.000001 X2 * X2 + 0.0231 X3 * X3 + 0.0040 X4 \\
 & * X4 + 0.000033 X5 * X5 + 0.000433 X1 * X2 + 0.231 X1 * X3 \\
 & + 0.0168 X1 * X4 - 0.00587 X1 * X5 + 0.000548 X2 * X3 \\
 & + 0.000115 X2 * X4 + 0.000006 X2 * X5 - 0.0569 X3 * X4 \\
 & + 0.00812 X3 * X5 + 0.00385 X4 * X5
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned}
 Kısıt \hat{\sigma}(x) = & 14.0 + 0.09 X1 - 0.00514 X2 - 1.40 X3 - 1.440 X4 + 0.0409 X5 \\
 & - 0.035 X1 * X1 + 0.000001 X2 * X2 + 0.0776 X3 * X3 - 0.0122 X4 \\
 & * X4 - 0.000039 X5 * X5 - 0.000051 X1 * X2 + 0.097 X1 * X3 \\
 & + 0.0698 X1 * X4 - 0.00011 X1 * X5 + 0.000110 X2 * X3 \\
 & + 0.000229 X2 * X4 - 0.000004 X2 * X5 + 0.0928 X3 * X4 \\
 & - 0.00273 X3 * X5 - 0.00034 X4 * X5 = 0.5789
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

$$\begin{aligned}
 Kısıt \hat{\sigma}^2(x) = & 33.6 - 1.50 X1 - 0.01052 X2 - 3.17 X3 - 3.45 X4 + 0.0835 X5 \\
 & - 0.002 X1 * X1 + 0.000001 X2 * X2 + 0.159 X3 * X3 + 0.0013 X4 \\
 & * X4 - 0.000077 X5 * X5 + 0.000066 X1 * X2 + 0.380 X1 * X3 \\
 & + 0.097 X1 * X4 - 0.00026 X1 * X5 + 0.000117 X2 * X3 \\
 & + 0.000569 X2 * X4 - 0.000010 X2 * X5 + 0.1272 X3 * X4 \\
 & - 0.00422 X3 * X5 - 0.00019 X4 * X5 = 1.365
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

✚ N-Tip:

$$\begin{aligned}
 MIN \hat{\sigma}(x) = & 14.0 + 0.09 X1 - 0.00514 X2 - 1.40 X3 - 1.440 X4 + 0.0409 X5 \\
 & - 0.035 X1 * X1 + 0.000001 X2 * X2 + 0.0776 X3 * X3 - 0.0122 X4 \\
 & * X4 - 0.000039 X5 * X5 - 0.000051 X1 * X2 + 0.097 X1 * X3 \\
 & + 0.0698 X1 * X4 - 0.00011 X1 * X5 + 0.000110 X2 * X3 \\
 & + 0.000229 X2 * X4 - 0.000004 X2 * X5 + 0.0928 X3 * X4 \\
 & - 0.00273 X3 * X5 - 0.00034 X4 * X5
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{aligned}
MIN \hat{\sigma}^2(x) = & 33.6 - 1.50 X_1 - 0.01052 X_2 - 3.17 X_3 - 3.45 X_4 + 0.0835 X_5 \\
& - 0.002 X_1 * X_1 + 0.000001 X_2 * X_2 + 0.159 X_3 * X_3 + 0.0013 X_4 \\
& * X_4 - 0.000077 X_5 * X_5 + 0.000066 X_1 * X_2 + 0.380 X_1 * X_3 \\
& + 0.097 X_1 * X_4 - 0.00026 X_1 * X_5 + 0.000117 X_2 * X_3 \\
& + 0.000569 X_2 * X_4 - 0.000010 X_2 * X_5 + 0.1272 X_3 * X_4 \\
& - 0.00422 X_3 * X_5 - 0.00019 X_4 * X_5
\end{aligned} \tag{3.38}$$

$$\begin{aligned}
Kısıt \hat{\mu}(x) = & 97.6 - 3.15 X_1 - 0.01354 X_2 - 5.06 X_3 - 1.306 X_4 - 0.0483 X_5 \\
& + 0.148 X_1 * X_1 + 0.000001 X_2 * X_2 + 0.0231 X_3 * X_3 + 0.0040 X_4 \\
& * X_4 + 0.000033 X_5 * X_5 + 0.000433 X_1 * X_2 + 0.231 X_1 * X_3 \\
& + 0.0168 X_1 * X_4 - 0.00587 X_1 * X_5 + 0.000548 X_2 * X_3 \\
& + 0.000115 X_2 * X_4 + 0.000006 X_2 * X_5 - 0.0569 X_3 * X_4 \\
& + 0.00812 X_3 * X_5 + 0.00385 X_4 * X_5 = 47.499
\end{aligned} \tag{3.39}$$



4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

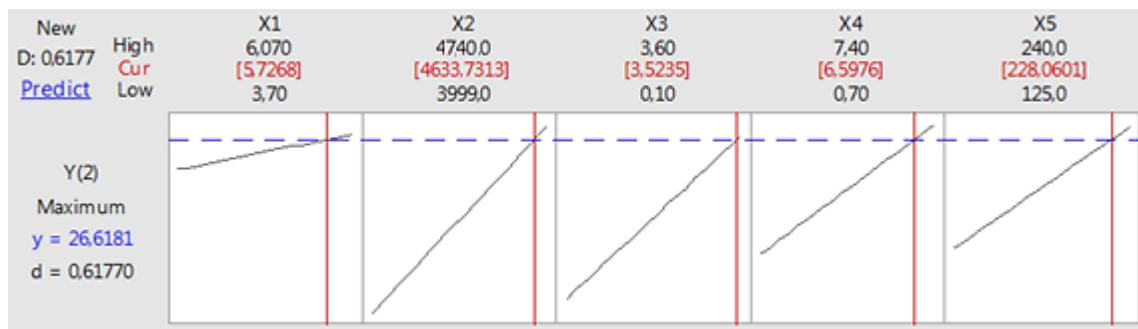
4.1 Tam Faktöriyel Deney Tasarımına Ait İstatiksel Optimizasyon Sonuçları

Tam faktöriyel deney tasarımı ile oluşturulan amaç fonksiyonlarına ait sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmektedir. Her bir amaç fonksiyonuna ait hedef değerler dikkate alınmıştır. Bu hedef değerlerin istatistiksel olarak ölçümü arzu edilebilirlik (desirability) değerleri ile ölçülmektedir. Arzu edilebilirlik değeri 0 ile 1 arasında yer almaktadır. 1 değerine yaklaştıkça elde edilen sonuç daha keskin ve net olarak ifade edilmektedir. Her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı sonuçlar elde edilirken aynı zamanda 3 amaç fonksiyonun bir arada olduğu ve çok amaçlı optimizasyon modeli (Atalan, 2018) olarak tanımlanan bir model ile de çözüm elde edilmiştir. Ancak bu sonuçlar arasında farklılıklar bulunmaktadır. Bunun başlıca sebebi ortak olan kısıtların her bir amaç fonksiyonu için tatmin edici sonuçları vermesidir.

Çizelge 4.1 Yanıt fonksiyonları için tam faktöriyel tasarımına göre optimum değerler

Faktörler s	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Hedef	Hedef	Hedef	Arzu edilebilirlik Derecesi
Y(2)	5.726	4633.731	3.523	6.597	228.060	26.618	*	*	0.6177
Y(7)	5.834	4549.658	3.600	6.902	225.441	*	39.938	*	0.6635
Y(28)	5.807	4499.214	3.600	6.445	225.441	*	*	49.108	0.7548
Y(2,7,28)	5.643	4611.864	3.047	6.690	214.916	25.972	39.240	49.006	0.6138

Her bir amaç fonksiyonu için aşağıdaki optimum değerler Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te görsel olarak sunulmuştur. Amaç fonksiyonlarının faktörlere göre alacakları değerlerin doğrultusunda birer eğrinin olduğu gözlemlenmektedir.



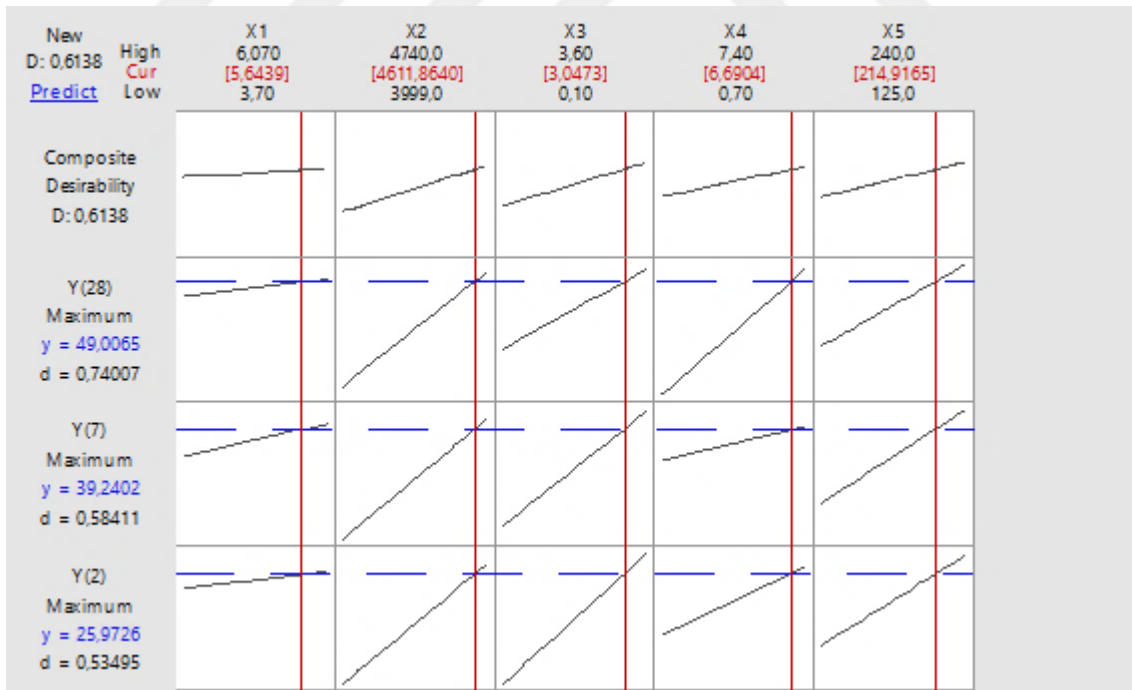
Şekil 4.1 Tam faktöriyel Tasarımına göre Y(2) Optimum Eğrileri



Şekil 4.2 Tam faktöriyel tasarımına göre Y(7) optimum eğrileri



Şekil 4.3 Tam faktöriyel tasarımına göre Y(28) optimum eğrileri



Şekil 4.4 Tam faktöriyel tasarımına göre Y(2,7,28) optimum eğrileri

4.2 Box-Behnken Deneş Tasarımına Ait İstatistiksel Optimizasyon Sonuçlar

Box-Behnken Deneş Tasarımına ait istatistiksel optimizasyon sonuçları iki kısımda ele alınmıştır. Bu alışma için geliştirilen kalite karakteristiklerinden L-Tip ve N-Tip yöntemlerine göre sonuçlar elde edilmiş olup, her bir optimizasyon modeli için sonuçlar hesaplanmıştır. 2 günlük imento mukavemetleri için faktörlere ait veriler neticesinde kurulan optimizasyon modeline ait sonuçlar izelge 4.2’de verilmiştir. Sonuçlara göre L-Tipi verileri N-Tipi verilerine yakın olup, ancak daha iyi bir sonucun elde edilmesi sağlanmıştır.

Çizelge 4.2 Y (2) yanıtı için kalite karakteristiklerine göre optimum değerler

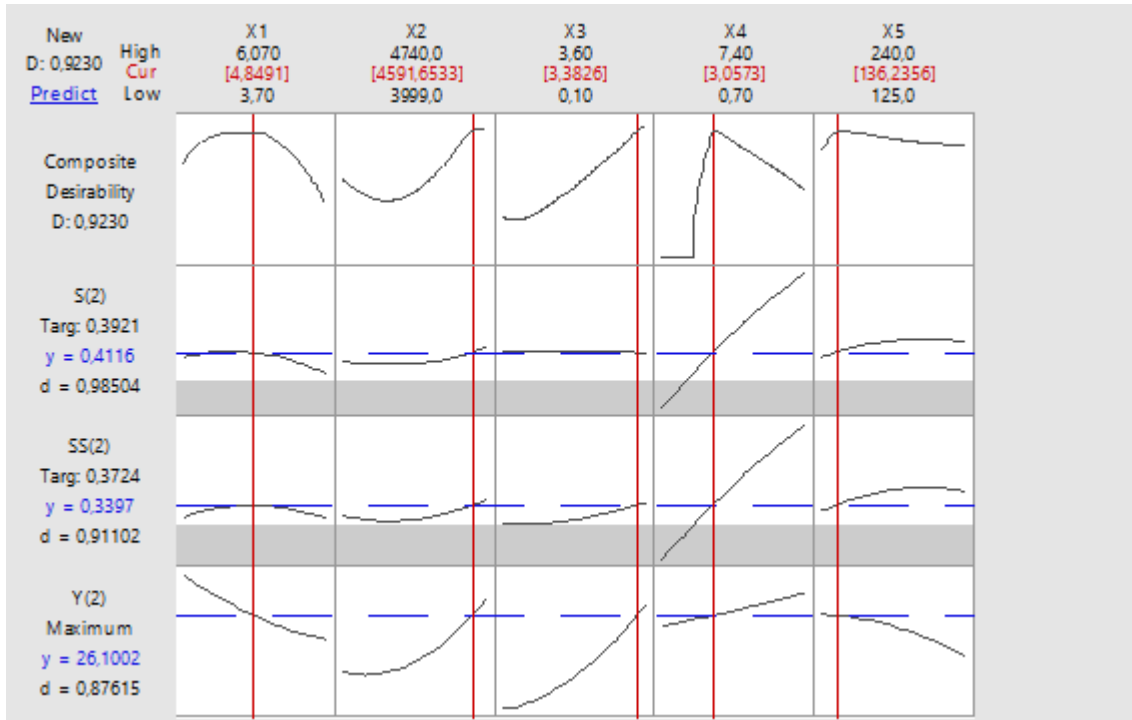
Tasarım	Box-Behnken								
Faktörler	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$\hat{\mu}(x)$	$\hat{\sigma}(x)$	$\hat{\sigma}^2(x)$	Arzu edilirlik
L-Tip	4.8491	4591.6533	3.3826	3.0573	136.2356	26.1002	0.4116	0.3397	0.9230
N-Tip	5.7412	4470.3889	0.3653	6.3237	227.5055	24.2403	0.2969	0.0893	0.8771

Box-Behnken Deneş tasarımında optimizasyon modelleri sonuçları Y (2) yanıtı için görsel olarak Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sunulmuştur. Bu görsele göre tam faktöriyel deneş tasarımında eğriler doğrusal bir eğilim gösterirken, bu tasarımda eğrilerin parabolik olması, kullanılan tasarımın stokastik olduğunu göstermektedir (Atalan, 2014).

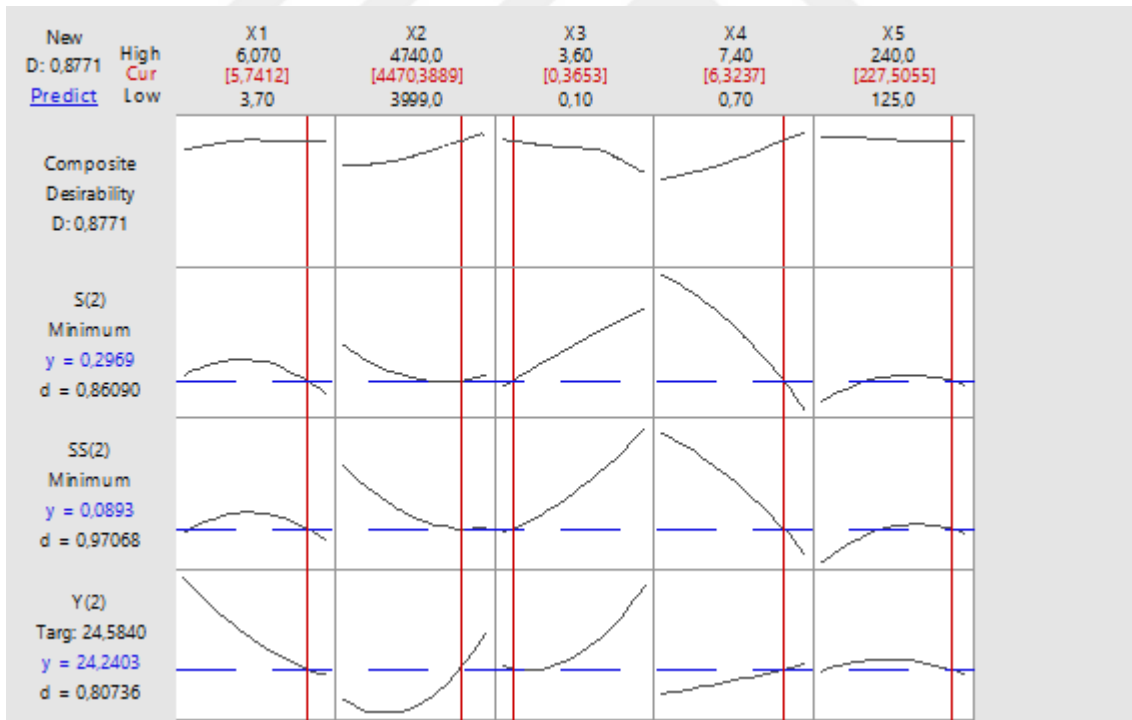
7 günlük imento mukavemetleri için faktörlere ait veriler neticesinde kurulan optimizasyon modeline ait sonuçlar izelge 4.3’te verilmiştir. Sonuçlara göre L-Tipi verileri N-Tipi verilerine yakın olup, ancak daha iyi bir sonucun elde edilmesi sağlanmıştır.

Çizelge 4.3 Y (7) yanıtı için kalite karakteristiklerine göre optimum değerler

Tasarım	Box-Behnken								
Faktörler	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$\hat{\mu}(x)$	$\hat{\sigma}(x)$	$\hat{\sigma}^2(x)$	Arzu edilirlik
L-Tip	3.9251	4632.0747	3.2868	3.9400	140.9565	38.7683	1.1959	0.5249	0.9866
N-Tipi	5.7412	4216.0632	1.9953	5.4069	222.7846	36.3338	0.0199	0.1477	0.9315

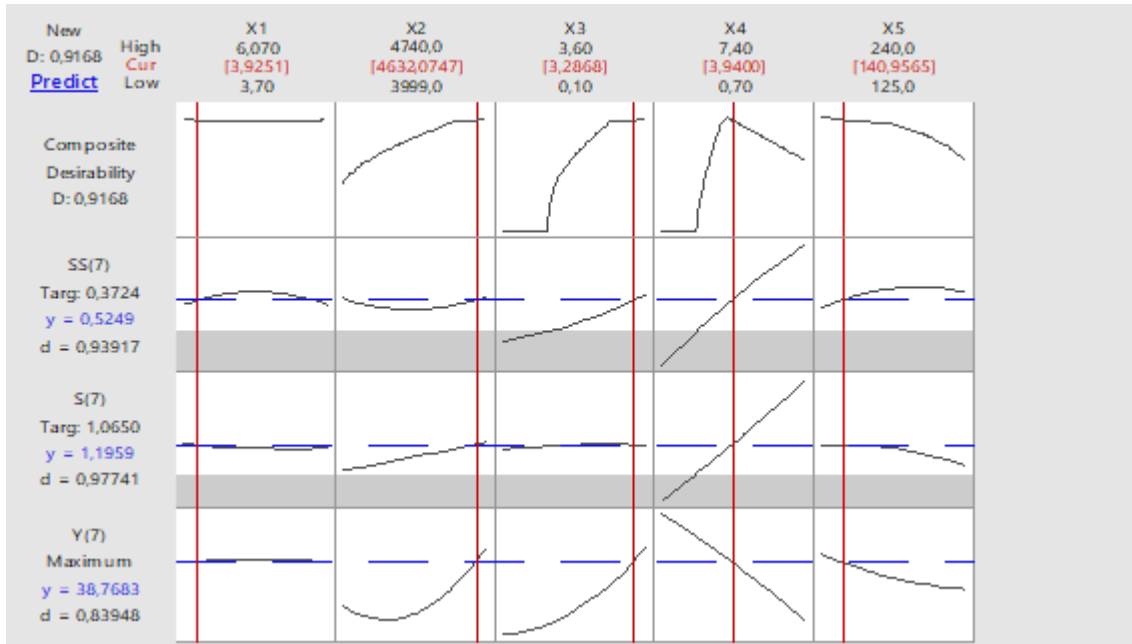


Şekil 4.5 Box-Behnken L-Tip tasarımına göre Y (2) optimum eğrileri

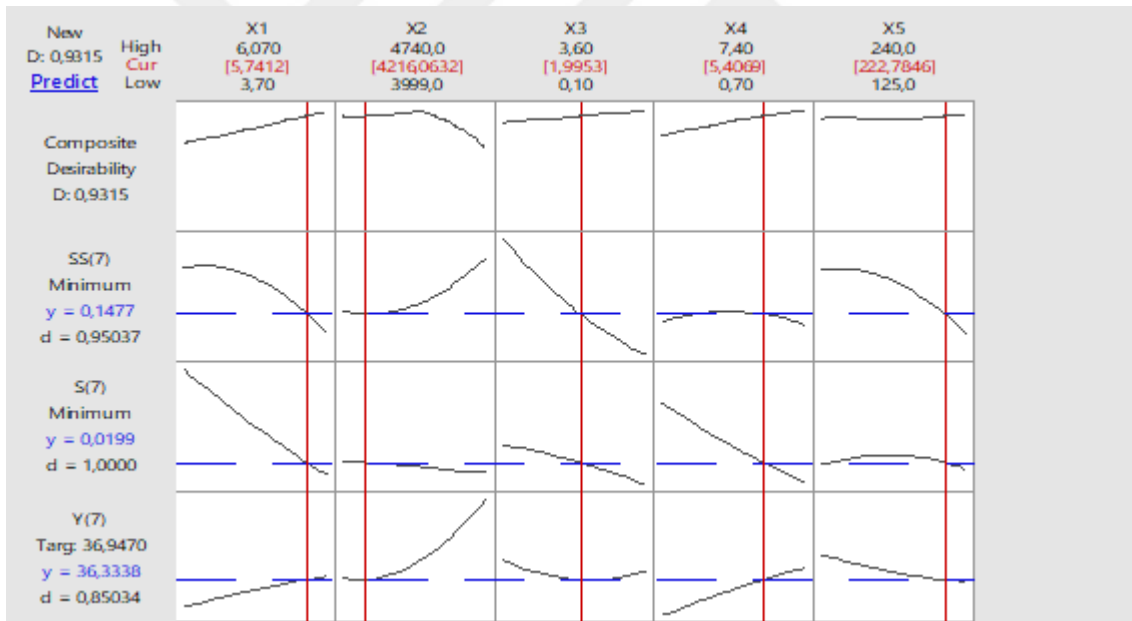


Şekil 4.6 Box-Behnken N-Tip tasarımına göre Y (2) optimum eğrileri

Box-Behnken deney tasarımında optimizasyon modelleri sonuçları Y (7) yanıtı için görsel olarak Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.7 Box-Behnken L-Tip tasarımına göre Y(7) optimum eğrileri



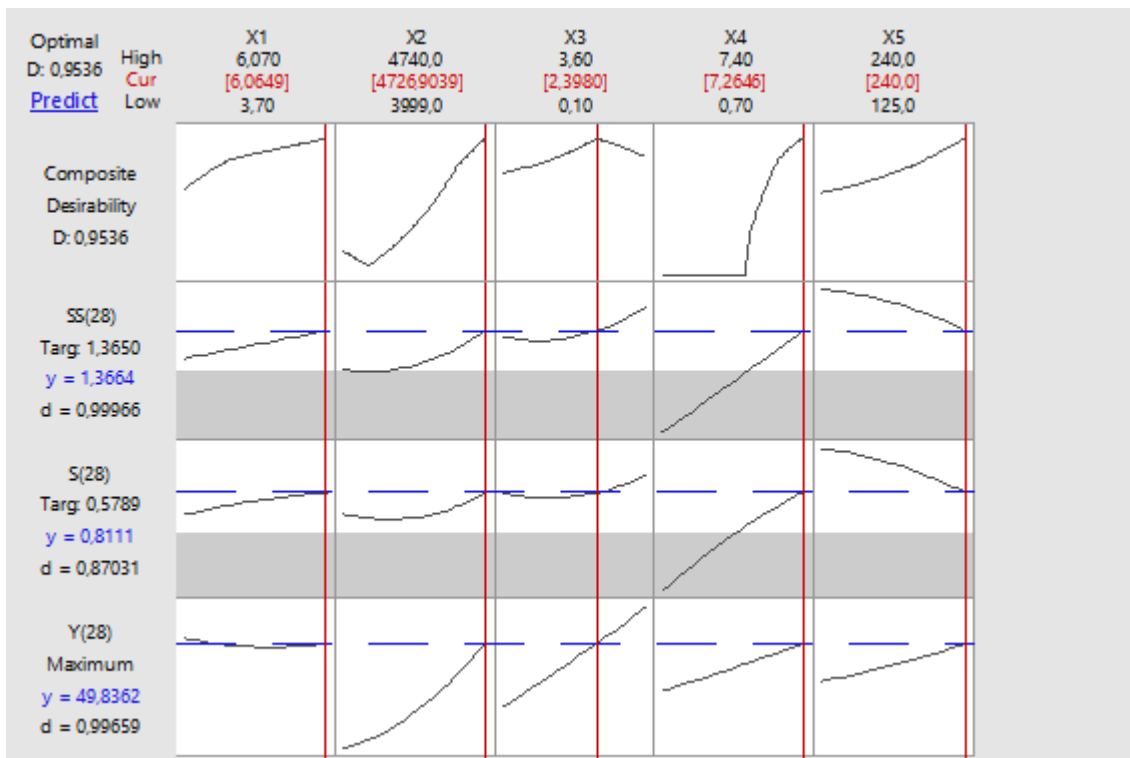
Şekil 4.8 Box-Behnken N-Tip tasarımına göre Y(7) optimum eğrileri

28 günlük çimento mukavemetleri için faktörlere ait verilerin neticesinde kurulan optimizasyon modeline ait sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmiştir. Sonuçlara göre L-Tip verileri N-Tip verilerine yakın olup, ancak daha iyi bir sonucun elde edilmesi sağlanmıştır.

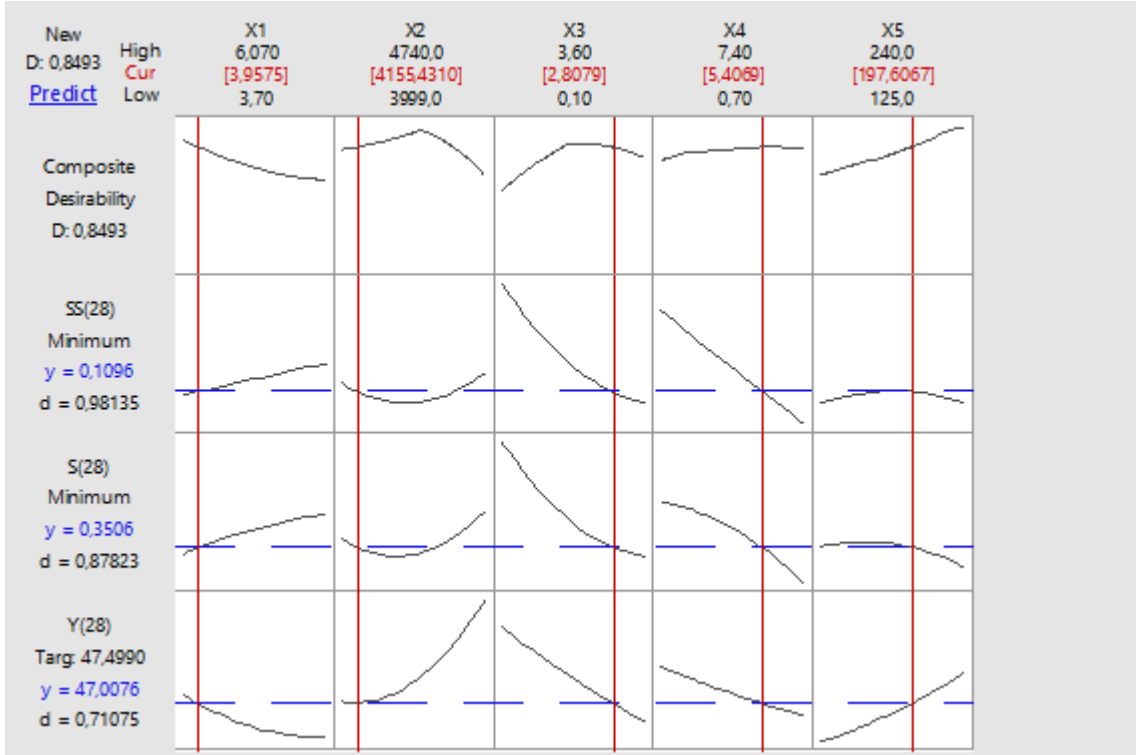
Çizelge 4.4 Y (28) yanıtı için kalite karakteristiklerine göre optimum değerler

Tasarım	Box-Behnken					$\hat{\mu}(x)$	$\hat{\sigma}(x)$	$\hat{\sigma}^2(x)$	Arzu edilirlik
Faktörler	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5				
L-Tip	6.0649	4725.9039	2.3980	7.2646	240.0000	49.8362	0.8111	1.3664	0.9536
N-Tip	3.9575	4155.4310	2.8079	5.4069	197.6065	47.0076	0.3506	0.1096	0.8493

Box-Behnken Deney Tasarımında optimizasyon modelleri sonuçları Y (28) yanıtı için görsel olarak Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Box-Behnken L-Type Tasarımına göre Y (28) Optimum Eğrileri



Şekil 4.10 Box-Behnken N-Tip Tasarımına göre Y (28) Optimum Eğrileri

4.3 Sonuçların Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Kaliteli çimento üretimi için deney tasarımı uygulanarak optimizasyon modelleri geliştirilmiştir. Deney tasarımında yer alan tam faktöriyel ile yanıt yüzey tasarımları dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır (Çizelge 4.5). Tam faktöriyel deney tasarımında elde edilen sonuçlarda yaklaşık olarak %5 oranında hedeften sapma yaşanırken, yanıt yüzey tasarımında ise hedefin üzerinde sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır. Aynı zamanda yapılan optimizasyonun matematiksel çözümlerinde yanıt yüzey tasarımına ait arzu edilebilirlik değeri tam faktöriyel tasarımına göre fazla bulunmaktadır. Bu durum üretim süreçleri için istenilen bir durumdur. Ancak yanıt yüzey tasarımında yer alan L-Tip ve N-Tip kalite karakteristiklerinde elde sonuçların birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. Sadece Y (2) yanıtı için elde edilen sonuçların hedef değerlerinin altında kaldığı söylenebilir. Hem verilere ait popülasyon ortalamasının hem de popülasyon değişkenlik sapmalarının istenilen hedeften uzak kaldığı görülmektedir. Yanıt yüzey tasarımında seçilen kalite karakteristiğine göre elde edilen değerlerde şu sonuca varabiliriz; Y (2) yanıtı için N-Tip, Y (7) ve Y (28) yanıtları için L-Tip kalite karakteristikleri önerilmelidir. Tam faktöriyel deney tasarımında ise Y (28) yanıtının diğer yanıtlara göre hedef değerlere yaklaştığını söylenebilir. Aynı zamanda, bu yanıt

ait optimizasyon arzu edilebilirlik değeri diğer değerlerden daha yüksektir. Bunun durum, çözümde elde edilen sonuçların optimum değerlere daha yakın olduğunu göstermektedir.



Çizelge 4.5 Uygulanan tasarımlarına ait sonuçların uygulanması

DOE Metot	Kalite Tipi	Yanıt Tipi	Hedef $\hat{\mu}(x)$	Hedef $\hat{\sigma}(x)$	Hedef $\hat{\sigma}^2(x)$	Gerçek $\hat{\mu}(x)$	Gerçek $\hat{\sigma}(x)$	Gerçek $\hat{\sigma}^2(x)$	Fark $\hat{\mu}(x)$	Fark $\hat{\sigma}(x)$	Fark $\hat{\sigma}^2(x)$	Arzu edilirlilik
Tam Faktöriyel		Y (2)	29,600	1,325	1,755	26,6181	*	*	-10,07%	*	*	0,6177
		Y (7)	42,900	1,371	1,879	39,9388	*	*	-6,90%	*	*	0,6635
		Y (28)	50,800	1,235	1,525	49,1088	*	*	-3,33%	*	*	0,7548
		Y (2,7,28)	29,600	*	*	25,9726	*	*	-12,25%	*	*	0,6138
			42,900	*	*	39,2402	*	*	-8,53%	*	*	
			50,800	*	*	40,0065	*	*	-21,25%	*	*	
Yanıt Yüzey (Box- Behnken)	N-Tip	Y (2)	24,584	*	*	24,2403	0,2969	0,0893	-1,40%	*	*	0,9230
	L-Tip	Y (2)	*	0,3724	0,3724	26,1002	0,4116	0,3397	*	10,53%	-8,78%	0,8771
	N-Tip	Y (7)	36,947	*	*	36,3338	0,0199	0,1477	-1,66%	*	*	0,9866
	L-Tip	Y (7)	*	1,065	0,3724	38,7683	1,1959	0,5249	*	12,29%	40,95%	0,9315
	N-Tip	Y (28)	47,499	*	*	47,0076	0,3506	0,1096	-1,03%	*	*	0,9536
	L-Tip	Y (28)	*	0,5789	1,365	49,8362	0,8111	1,3664	*	40,11%	0,10%	0,8493

KAYNAKLAR

- Acar, B. Ç., 2018, Endüstriyel Atık Sulardan Biyoremediasyon ile Kromun Detoksifikasyonu, Doğal ve Kimyasal/Biyolojik Yöntemlerle Modifiye Edilmiş Kil Üzerine Krom Adsorpsiyonunun Merkezi kompozit Tasarım Kullanılarak İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi*.
- Akkaş, M., 2009, Çimento Hammaddelerinin Yüzey Özelliklerinin Klinkerleşmeye Etkisi, Yüksek Lisans, *Dumlupınar Üniversitesi*.
- Alnawfleh, H., Mohsen, M. ve Al-Farayh, A. Y., 2015, Cement Manufacturing Relationship Between Mining and Cement Manufacturing.
- Alpaslan, L., 2012, Atık Lastik ve Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yüzey Özelliklerinin Çimento Harçlarının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans, *Düzce Üniversitesi*.
- Atalan, A., 2014, Central Composite Design Optimization Using Computer Simulation Approach, <https://www.flexsim.com/wp-content/uploads/2014/07/July2014.pdf>:
- Atalan, A., 2018, Türkiye Sağlık Ekonomisi için İstatistiksel çok Amaçlı Optimizasyon Modelinin Uygulanması, *İşletme Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 1 (1), 34-51.
- Atalan, A., 2019, Development of Heuristic Optimization Methods and Experimental Simulation Design For The Components and Resources of Healthcare, PhD, *Marmara University*.
- Atar, N., 2006, Suda Çözünen Polimerlerin Çimento ve Beton Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans, *Dumlupınar Üniversitesi*.
- Baran, T. ve Pichniarczyk, P., 2017, Correlation Factor Between Heat of Hydration and Compressive Strength of Common Cement, *Construction and Building Materials*, 150, 321-332.
- Binici, H., Çağatay, İ. H. ve Kaplan, H., 2000, Değişik Faktörlerin Beton Mukevemetine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (3), 203-209.
- Bolu Çimento A.Ş., 2019, Çimento Kullanım Alanları, <http://www.bolucimento.com.tr/tr/faaliyet-alanlari/cimento>; [15/04/2019].
- Ceyhan, A., Özbay, E., Baytar, O. ve Akaslan, M., 2013, The Analysis of Methylene Blue Adsorption With Using Factorial Design, *3rd International Conference of Ecosystems (ICE2013)*, Tirana, Albania
- Çiçek, Y. Z., 2018, Deney Tasarımı Yöntemleri ile Kalite Hatalarının Minimizasyonu, *Erciyes Üniversitesi*.

- Dayı, M., 2006, Doğal ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi*.
- Demir, L., 2004, İstatistiksel Deney Tasarımı Yöntemi ve Bir tekstil İşletmesinde Uygulanması, M.Sc., *Pamukkale Üniversitesi*.
- Ding, R., Lin, D. K. ve Wei, D., 2004, Dual-Response Surface Optimization: A Weighted MSE Approach, *Quality engineering*, 16 (3), 377-385.
- Engin, Y., 2018, 2017 Türkiye Çimento İstatistikleri, <http://www.betonvecimento.com/sektorel/2017-turkiye-cimento-istatistikleri>: [15/04/2019].
- Erdoğan, T., 1995, Türkiye’de Üretilen Çimentolar, Özellikleri ve Kullanımları, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, İnşaat Mühendisleri Odası Çimento Sempozyumu*, 16-27.
- Gökçe, B. ve Taşgetiren, S., 2009, Kalite için Deney Tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (1), 71-83.
- Güllü, D., 2006, Çimento Klinker Fazlarının Mikro Yapısı ve Öğütme Parametreleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Gür, O., 2016, Çimento ve Beton Dünyası, Çimento Öğütme Sistemlerinin Eşit Beton Mukavemetine Göre Karşılaştırılması ve Proses Optimizasyonu 96-106.
- Karahan, V., 2016, Çimento Üretim Prosesinde Risk Analizi ve Değerlendirmesi, Yüksek Lisans, *Fırat Üniversitesi*.
- Koçak, Y., 2008, Çimento–Puzolan Etkileşiminde Moleküler ve Elektrokinetik Davranışların Araştırılması, Doktora, *Gazi Üniversitesi*.
- Korçak, Ö., 2015, Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Kullanılması Ve Çimentonun Performans Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora, *Gazi Üniversitesi*.
- Kuleli, Ö., 2009, Çimento Mühendisliği El Kitabı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, p.
- Kuru, Ö., 2008, Çimento Sektöründe Üretim Maliyetleri ve Kars Çimento Fabrikası’nda Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *Kafkas Üniversitesi*.
- López-Carrasquillo, V. ve Hwang, S., 2017, Comparative Assessment of Pervious Concrete Mixtures Containing Fly Ash and Nanomaterials for Compressive Strength, Physical Durability, Permeability, Water Quality Performance and Production Cost, *Construction and Building Materials*, 139, 148-158.
- Montgomery, D. C., 2012, Design and Analysis of Experiments(8th ed.), John Wiley & Sons Inc., p.

- Montgomery, D. C., Peck, E. A. ve Vining, G. G., 2012, Introduction to Linear Regression Analysis (5th ed.), John Wiley & Sons Inc., p.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. ve Anderson-Cook, C. M., 2016, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments (4th ed.), John Wiley & Sons Inc., p.
- Ngatchou, P., Zarei, A. ve El-Sharkawi, A., 2005, Pareto Multi Objective Optimization, *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*, 84-91.
- Özbay, E., 2014, Çinko Oksit Nanopartiküllerinin Üretimi, Karakterizasyonu ve Fotokatalitik Uygulamaları, Yüksek Lisans, *Selçuk Üniversitesi*.
- Özkan, Ş., 2009, Kimyasal Etkilere Dayanıklı Çimento Üretimi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans, *Süleyman Demirel Üniversitesi*.
- Pesen, S., 2018, Trafik Kazalarını Etkileyen Yol Faktörlerinin Deney Tasarımı ile İncelenmesi, Yüksek Lisans, *Yalova Üniversitesi*.
- Sanaev, V. G., Zaprudnov, V. I., Gorbacheva, G. A. ve Oblivin, A. N., 2016, Factors Affecting The Quality of Wood-Cement Composites, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II*, 9 (2), 63.
- Sanjuán, M. Á., Argiz, C., Gálvez, J. C. ve Moragues, A., 2015, Effect of Silica Fume Fineness on The Improvement of Portland Cement Strength Performance, *Construction and Building Materials*, 96, 55-64.
- Sharma, S. K., Chopadekar, A. D. ve Bhatia, S. Y., 2017, Improvement in Pavement Quality Concrete By Using Pozzolonic Materials With Polypropylene Fiber, *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering.*, 36 (4).
- Sosyal Güvenlik Özel İhtisas Komisyonu, 2001, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, *DPT, Ankara*.
- Soto-Pérez, L. ve Hwang, S., 2016, Mix Design And Pollution Control Potential Of Pervious Concrete With Non-Compliant Waste Fly Ash, *Journal of environmental management*, 176, 112-118.
- TSE, 2010, TS EN 196-6:2010 Çimento deney yöntemleri-Bölüm 6: İncelik tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 2012, TS EN 197-1:2012 Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 2014, TS EN 196-2:2014 Çimento deney metotları-Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, TSE Ankara, Turkey.

- TSE, 2016, TS EN 196-1:2016 Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 2017, TS EN 196-3:2017 Çimento deney metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara: 196-193.
- TSKB A.Ş., 2018, Sektörel Görünüm: İnşaat, Çimento ve Seramik Mayıs 2018, http://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/sektorel-gorunum_ins-cimento-seramik-mayis.pdf: [14/04/2019].
- Yalçın, H. ve Gürü, M., 2006, Malzeme Bilgisi, Palme Yayıncılık, Ankara, p. 371-417.
- Yeğınobalı, A., 2004, Çimento: Yeni Bir Çağın Malzemesi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, p.
- Zümrüt, Z., 2009, Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Tekniğı ile Hidroksiapatit Kaplı Titanyum İmplant Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Parametrelerin Etkisi, Yüksek Lisans, *İstanbul Teknik Üniversitesi*.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : MÜSLÜM AKASLAN
Uyruğu : TC
e-mail : muslumakaslan@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	2013
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi	2019

YAYINLAR

Ceyhan, A., Özbay, E., Baytar, O. ve **Akaslan, M.**, 2013, The Analysis of Methylene Blue Adsorption With Using Factorial Design, *3rd International Conference of Ecosystems (ICE2013)*, Tirana, Albania

Akaslan, M., Atalan A., Ceyhan, A.A., Baysal M. E., 2019 Yüksek Kalitede Bir Çimento Üretimi İçin Deney Tasarımı ile Optimizasyon Uygulaması, *International Science and Academic Congress 2019*, Konya, Türkiye