

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOKLU CEVAP YÜZEYLERİNİN OPTİMİZASYONU İÇİN DOĞRUSAL
OLMAYAN BİR MODEL ÖNERİSİ VE EKMEK ÜRETİM SÜRECİNE
UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali İhsan BOYACI

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOKLU CEVAP YÜZEYLERİNİN OPTİMİZASYONU İÇİN DOĞRUSAL
OLMAYAN BİR MODEL ÖNERİSİ VE EKMEK ÜRETİM SÜRECİNE
UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali İhsan BOYACI
507131102**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ramazan EVREN

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507131102 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ali İhsan BOYACI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇOKLU CEVAP YÜZEYLERİNİN OPTİMİZASYONU İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN BİR MODEL ÖNERİSİ VE EKMEK ÜRETİM SÜRECİNE UYGULANMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ramazan EVREN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nilgün FIĞLALI**
Kocaeli Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. Erkan IŞIKLI
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **25 Mayıs 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Çoklu cevap yüzeyi yöntemi üzerine yapılan bu çalışma ile, birden fazla performans kriterini, istenen önem derecelerine ve ağırlıklarına göre eşanlı olarak optimize edecek sistem parametrelerini belirlemeye yönelik bir model önerilmiştir. Önerilen bu model günümüzde nüfus artışına paralel olarak gittikçe önemi artan ve insanoğlu var olduğu sürece önemini yitirmeyecek temel bir gıda maddesi olan ekmeğin üretim sürecine uygulanmıştır. Önerilen modelin ve uygulama çalışmasından elde edilen sonuçların, akademik bazda ve pratik hayatta faydalı olması ve yeni çalışmalara ufuk açması umulmaktadır.

Uzun çalışmalar sonucu ortaya çıkan bu yüksek lisans tez çalışmamın yürütücülüğünü üstlenen, fikir aşamasından uygulamaya kadar çalışmamın her aşamasında maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen, bilgi ve tecrübelerini aktaran, yakın ilgi ve alaka gösteren tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ramazan EVREN hocama en içten şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca, her türlü konuda fikirlerini ve maddi, manevi yardımlarını eksik etmeyen, bana her konuda yardımcı olan, hoşgörü ve sevgi ile yaklaşan çok değerli hocalarım, Prof. Dr. Nilgün FIĞLALI, Öğr. Gör. Dr. Erkan IŞIKLI ve diğer bütün hocalarıma, eğitime yapmış oldukları akademik katkıdan dolayı teşekkür ederim.

Tezimin uygulama kısmında, fikirleri ve maddi, manevi her türlü destekleri ile katkıda bulunan, başta Ali İlker İLHAN, Murat SERBES ve Fatih AKYÜZ olmak üzere bütün EKSUN gıda çalışanlarına en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, beni bugünlere getiren, her türlü zorluklara rağmen benden sevgilerini ve desteklerini asla esirgemeyen annem Nazike BOYACI'ya, babam Ekrem BOYACI'ya ve kardeşlerime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2015

Ali İhsan Boyacı
(Endüstri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Deney Tasarımı Çalışmaları ve Cevap Yüzeyi Yöntembilimi	1
1.2 Çalışmanın Kapsamı	4
2. CEVAP YÜZEYİ YÖNTEMİ.....	7
2.1 Cevap Yüzeyi Yönteminin Tarihi ve Literatür Araştırması	9
2.2 Cevap Yüzeyi Yönteminin Temel Elemanları	14
2.2.1 Bağımsız değişkenler	14
2.2.2 Cevap değişkenleri	15
2.2.3 Gerçek cevap fonksiyonu	15
2.2.4 Tahmini (kestrilen) cevap fonksiyonu	17
2.2.5 Cevap yüzeyi grafikleri	18
2.2.6 Deneysel ve işlevsel alanlar	20
2.3 Cevap Yüzeyi Yönteminde Ortagonallık ve Dönersellik Kavramları	20
2.4 Birinci Derece Cevap Yüzeyi Modelleri ve Deney Tasarımları	21
2.4.1 Birinci derece modeller	21
2.4.2 Birinci derece modeller için deney tasarımları	24
2.4.2.1 2^k tam faktöriyel deney tasarımları	24
2.4.3 Birinci derece modellerde hipotez testleri	26
2.4.3.1 Model ve katsayıların anlamlılığının sınanması	26
2.4.3.2 Model uygunluğunun test edilmesi	29
2.4.3.3 Artıkların analizi	29
2.4.3.4 Uyum eksikliği testi	30
2.5 İkinci Derece Cevap Yüzeyi Modelleri ve Deney Tasarımları	31
2.5.1 İkinci derece modeller.....	31
2.5.2 İkinci derece modeller için deney tasarımları	34
2.5.2.1 Merkezi bileşik tasarım	34
2.5.2.2 Box-Behnken tasarımları	37
3. ÇOK YANITLI CEVAP YÜZEYİ YÖNTEMLERİ	43
3.1 İstatistik Tabanlı Yöntemler	44
3.2 Yöneylem Araştırmasına Dayanan Yöntemler.....	44
3.3 İstenebilirlik Fonksiyonu Yaklaşımı	45
3.3.1 Tekil istenebilirlik	46
3.3.2 Bileşik İstenebilirlik	49
3.4 Doğrusal Olmayan Optimizasyon Modeli Yaklaşımı	49

4. EKMEK NİTELİKLİKLERİ VE ÜRETİM SÜRECİ	57
4.1 Ekmek ve Ekmek Bileşenleri	57
4.1.1 Unun nitelikleri ve ekmek kalitesine etkileri	59
4.1.1.1 Protein miktar ve niteliği.....	60
4.1.1.2 Alfa-amilaz enzimi etkinliği.....	61
4.1.2 Ekmeğin üretim aşamaları.....	62
4.1.3 Üretim parametreleri ve ekmek kalitesine etkileri	63
4.1.3.1 Su miktarı	63
4.1.3.2 Yoğurma süresi	64
4.1.3.3 Son fermantasyon süresi ve sıcaklığı	64
4.1.3.4 Pişirme sıcaklığı ve süresi	65
5. EKMEK ÜRETİMİ SÜRECİNE ÇOK YANITLI CEVAP YÜZEYİ METODUNUN UYGULANMASI.....	67
5.1 Materyal.....	67
5.2 Yöntem	67
5.3 Faktörlerin Belirlenmesi	69
5.4 Deney Desenin Seçimi ve Denemelerin Düzenlenmesi	72
5.5 Ekmek Analizleri.....	73
5.5.1 Özgül hacim	73
5.5.2 Şekil düzgünlüğü.....	74
5.5.3 Gözenek yapısı	76
5.5.4 Kabuk rengi ve yapısı.....	80
5.6 İstatistiksel Analizler ve Modelleme	81
5.7 Bulgular ve Tartışma	98
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR.....	113
EKLER.....	119
ÖZGEÇMİŞ.....	122

KISALTMALAR

CYY	: Cevap Yüzeyi Yöntemi
ÇYCY	: Çok Yanıtlı Cevap Yüzeyi Yöntemi
EKKY	: En Küçük Kareler Yöntemi
MBT	: Merkezi Bileşik Tasarım
BBT	: Box-Behnken Tasarımı
ANOVA	: Varyans Analizi
EİDYK	: En İyi Doğrusal Yansız Kestireç
GA	: Genetik Algoritma
TB	: Tavlama Benzetimi
TA	: Tabu Arama
İF	: İstenebilirlik Fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : 2^3 faktöriyel tasarım için ana ve etkileşim etkilerinin sistematik bir şekilde elde edilmesi için işaret kolonları	26
Çizelge 2.2 : Varyans analizi tablosu	28
Çizelge 2.3 : k faktörlü merkezi bileşik deney deseninin parçaları	35
Çizelge 2.4 : Tamamlanmamış blok tasarım	38
Çizelge 2.5 : 2^2 tam faktöriyel tasarım.....	39
Çizelge 2.6 : 4 değişkenli bir Box-Behnken tasarımı	39
Çizelge 2.7 : Tamamlanmamış blok tasarım	40
Çizelge 2.8 : Üç değişkenli bir Box-Behnken tasarım	40
Çizelge 5.1 : Özgül hacim cevap değişkeni için ANOVA tablosu.....	85
Çizelge 5.2 : Özgül hacim cevap değişkeni için katsayılar tablosu.....	86
Çizelge 5.3 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için ANOVA tablosu	87
Çizelge 5.4 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için katsayılar tablosu.....	88
Çizelge 5.5 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için ANOVA tablosu	89
Çizelge 5.6 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için katsayılar tablosu	90
Çizelge 5.7 : Gözenek yapısı cevap değişkeni için ANOVA tablosu.....	91
Çizelge 5.8 : Gözenek yapısı cevap değişkeni için katsayılar tablosu	92
Çizelge 5.9 : Modelin çözülmesi sonucu elde edilen optimum faktör değerleri	97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir sistem veya sürecin genel gösterimi.....	7
Şekil 2.2 : Tepki yüzeyi yönteminin adımları	8
Şekil 2.3 : Birinci dereceden modelin tek faktöre göre cevap değişkeni grafiği.....	18
Şekil 2.4 : Birinci dereceden modelin iki faktöre göre cevap değişkeni grafiği.....	19
Şekil 2.5 : İkinci dereceden modelin tek faktöre göre cevap değişkeni grafiği.....	19
Şekil 2.6 : İkinci dereceden modelin iki faktöre göre cevap değişkeni grafiği	19
Şekil 2.7 : Bir cevap yüzeyi çalışmasında deneysel ve işlevsel bölgeler	20
Şekil 2.8 : 2^3 tam faktoriyel deney tasarımının geometrik gösterimi.....	25
Şekil 2.9 : Artıklar için normal olasılık grafiği.....	29
Şekil 2.10 : Merkezi bileşik deney tasarımında iki değişkenli bir sistem için deney noktaları örneği	35
Şekil 2.11 : Merkezi bileşik deney tasarımında üç değişkenli bir sistem için deney noktaları örneği	36
Şekil 2.12 : Merkezi bileşik deney tasarımında üç değişkenli bir sistem için deney noktaları örneği	41
Şekil 3.1 : s_t ağırlığının aldığı değerlere göre $\hat{Y}_t$ ile $d_t(\hat{Y}_t)$ arasındaki ilişki.....	47
Şekil 3.2 : l_t ağırlığının aldığı değerlere göre $\hat{Y}_t$ ile $d_t(\hat{Y}_t)$ arasındaki ilişki	48
Şekil 3.3 : a_t ve b_t ağırlığının aldığı değerlere göre $\hat{Y}_t$ ile $d_t(\hat{Y}_t)$ arasındaki ilişkinin grafiği.....	48
Şekil 5.1 : Ekmek üretimi aşamaları.....	68
Şekil 5.2 : Ekmek hacmini ölçmek için kullanılan ölçüm gereçleri	73
Şekil 5.3 : Ekmek hacmini ölçme işlemi	74
Şekil 5.4 : Ekmek eninin kumpas ile ölçülmesi.....	75
Şekil 5.5 : Ekmek yüksekliğinin kumpas yardımıyla ölçülmesi.....	75
Şekil 5.6 : Ekmeklerin gözenek yapılarının incelenebilmesi için taranması	76
Şekil 5.7 : Örnek ekmek tarama görüntüsü	77
Şekil 5.8 : Arka plan ve kabuklarından arındırılmış ekmek tarama görüntüsü	77
Şekil 5.9 : ImageJ yazılımının ekran görüntüsü ve sekmeleri	78
Şekil 5.10 : 8 bit gri skalaya çevrilmiş ekmek içi görüntüsü.....	78
Şekil 5.11 : Eşik değeri belirlenmiş ekmek içi görüntüsü	79
Şekil 5.12 : Ekmek içi gözeneklerinin analiz sonuçları tablosu	80
Şekil 5.13 : Farklı kombinasyonlarla üretilmiş ekmeklerin kabuk rengi ve yapısı ...	81
Şekil 5.14 : Cevap değişkenleri için normal olasılık grafikleri	82
Şekil 5.15 : Minitab cevap yüzeyi analiz penceresi.....	83
Şekil 5.16 : Minitab programında bütün terimlerin analize dahil edilmesi	83
Şekil 5.17 : Cevap yüzeyleri oluşturmak için aşamalı regresyonun seçilmesi.....	84
Şekil 5.18 : Özgül hacim cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri	86
Şekil 5.19 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri	88

Şekil 5.20 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri	90
Şekil 5.21 : Gözenek yapısı cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri	92
Şekil 5.22 : Faktörlerin özgül hacim cevap değişkenine olan etkileri	99
Şekil 5.23 : Özgül hacim cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri ...	100
Şekil 5.24 : Faktörlerin kabuk rengi ve yapısı cevap değişkenine olan etkileri	101
Şekil 5.25 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri	102
Şekil 5.26 : Faktörlerin şekil düzgünlüğü cevap değişkenine olan etkileri	103
Şekil 5.27 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri	104
Şekil 5.28 : Faktörlerin gözenek yapısı cevap değişkenine olan etkileri	106
Şekil 5.29 : Gözenek yapısı cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri	107

ÇOKLU CEVAP YÜZEYLERİNİN OPTİMİZASYONU İÇİN DOĞRUSAL OLMAYAN BİR MODEL ÖNERİSİ VE EKMEK ÜRETİM SÜRECİNE UYGULANMASI

ÖZET

Cevap yüzeyi yöntemi, bir kaç girdi değişkeninin (faktörün) bir ürün veya sürecin cevabını etkilediği durumlarda ve amaç, bu cevabın optimizasyonu olduğunda, kullanılan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bütünüdür. Cevap yüzeyi yönteminde kullanılan teknikler, cevabın ölçülmesini sağlayacak etkin deneylerin tasarlanması, tasarlanan deneye göre toplanan verilere en iyi uyumu sağlayacak modelin kurulması ve optimum cevap değerini veren faktör seviyelerinin belirlenmesini kapsamaktadır.

Cevap yüzeyi yöntemi sanayi ve kimya başta olmak üzere bir çok alanda yeni bir ürünün formülasyonuna karar vermek, var olan ürün tasarımının iyileştirilmek ve süreç optimizasyonu amacıyla küresel çapta yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün ve süreç değişkenliğinin indirgenmesi ile sistemlerin daha robüst bir hale getirilmesini, dolayısıyla ürün ve süreç performansının iyileştirilmesini içeren kalite iyileştirmenin hedefleri, cevap yüzeyi yöntembiliminin kullanımı ile çoğu kez gerçekleştirilebilmektedir.

Cevap yüzeyi yöntemi uygulamaları genellikle bir ürünün, hizmetin veya komple bir sistemin kalitesini arttırmak, daha yüksek performanslı ve daha düşük maliyetli olmasını sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Bütün bu amaçlar göz önüne alındığında süreç veya ürün iyileştirme çalışmalarında tek bir performans kriterinin iyileştirilmesi yeterli görülmeyerek, kalite ve maliyet temelli birçok kriterin eş zamanlı olarak optimize edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle çok yanıtlı cevap yüzeyi problemleri ortaya çıkmış ve araştırmacılar bu problemlere çözüm üretecek yöntemler üzerinde çalışmışlardır.

Bu çalışmada öncelikle tek yanıtlı cevap yüzeyi yöntembilimi birinci derece modeller ve ikinci derece modeller başlıkları altında ayrı ayrı ele alınmış, bu modeller için geliştirilmiş farklı deney tasarımları incelenmiştir. Birinci derece modeller için hipotez testleri ve uyum eksikliği testlerine değinilerek, hangi durumlarda ikinci derece modellerin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Daha sonra çoklu cevap yüzeyleri ele alınmış ve geçmişten günümüze kadar bu problemlerin çözümü için önerilen yaklaşımlar literatür araştırması şeklinde ifade edilmiştir.

Çalışmada, çoklu cevap yüzeylerinin optimizasyonu için Derringer ve Suich tarafından önerilen istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı da kullanılarak doğrusal olmayan bir matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Oluşturulan bu model farklı birimlere, büyüklüklere ve hedeflere (minimizasyon, maksimizasyon veya istenen bir hedef değer) sahip cevap değişkenlerini eş zamanlı olarak optimize etme imkanı sağlamaktadır. Ayrıca cevap değişkenlerinin ağırlıklandırılabilir olması ve herhangi bir çok yanıtlı cevap yüzeyi problemine rahatlıkla uygulanabilme esnekliğine sahip olması modelin önemli avantajlarından.

Son olarak, önerilen model ekmek üretimi sürecine uygulanarak, daha kaliteli ekmek üretimi için un özellikleri ve üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Tekirdağ'da bulunan EKSUN gıda işletmesinde gerçekleştirilen bu uygulama çalışması, kullanılan unun gluten oranı (24%, 32%), alfa amilaz enzim ilavesi (0 ppm, 40 ppm), kullanılan su miktarı (60%, 65%), yoğurma süresi (7 dakika, 11 dakika), fermantasyon sıcaklığı (28°C, 38°C) ve fermantasyon süresi (45 dakika, 75 dakika) olmak üzere altı adet bağımsız değişken (faktör) içermektedir. Ekmek kalitesini belirlemek için seçilen kriterler ise, ekmeğin özgül hacmi, kabuk rengi ve yapısı, şekil düzgünlüğü ve iç gözenek yapısı olmak üzere dört tanedir.

Çalışmada incelenen cevap değişkenlerinden özgül hacim, ekmeğin hacmine kütlesi oranlanarak elde edilmiştir. Hacim ölçümü ise, Amerikan Tahıl Kimyagerleri Derneği'nin onaylı metotlarından tohumla ölçme metodu (seed displacement metot) baz alınarak ölçülmüştür. Ekmeklerin kabuk rengi ve yapısı, uzmanlar tarafından incelenmiş ve 1-10 arası bir skala kullanılarak değerlendirilmiştir. Ekmeklerin şekil düzgünlüklerine ise yükseklikleri enlerine oranlanarak karar verilmiştir. Ekmeklerin ne yassı ne de oval olmaması için bu oranın 0,62 olması hedeflenmiştir. Cevap değişkenlerinden gözenek yapısının değerlendirilebilmesi için görüntü işleme tekniğinden yararlanılmıştır. Bunun için öncelikle ekmekler tam ortasından kesilerek gözenek yapılarının bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için Hp marka bir tarayıcı da yüksek çözünürlükte (4800 dpi) taranmıştır. Daha sonra bu ekmek resimleri görüntü işleme programı ImageJ 1.48v yazılımında incelenerek ekmeklerin gözeneklerinin dağılımı değerlendirilmiştir.

Çalışmada doğrusal etkilerin yanında kareli etkileri de inceleyebilmek için ikinci derece bir model kullanılmıştır. Oldukça ekonomik olan ve ikinci derece modeller için yaygın şekilde kullanılan Box-Behnken deney tasarımı tercih edilmiş ve veriler bu deney desenine göre toplanmıştır. Rassallığın etkisini ortadan kaldırmak ve daha sağlıklı sonuçlar elde etmek amacıyla deneyler rassal bir sıra ile gerçekleştirilmiş ve her bir deneme kombinasyonu için üç adet tekrar yapılmıştır.

Deney desenine göre veriler elde edildikten sonra her bir cevap değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade eden ikinci derece denklemler aşamalı regresyon analizi kullanılarak elde edilmiştir. Kurulan modeller ve tahmin edilen katsayılar için anlamlılık testleri yapılarak istatistiksel olarak anlamsız terimler modelden çıkarılmıştır. Bu analizler için Minitab® paket programının 17.1.0 versiyonundan yararlanılmıştır.

Analizler yapıp her bir cevap değişkeni için bağımsız değişkenlere (faktörlere) bağlı anlamlı birer regresyon denklemi elde edildikten sonra, cevap değişkenleri için istenebilirlik fonksiyonları tanımlanmış ve nihayetinde toplam istenebilirlik değerini en büyüleyecek doğrusal olmayan bir programlama modeli kurulmuştur. Kurulan bu model GAMS adlı paket programın 24.1.3 versiyonu kullanılarak çözülmüş ve böylelikle faktörlerin optimum seviyeleri elde edilmiştir. Çalışma sonunda gluten oranı için 28.748%, alfa amilaz enzimi ilavesi için 34.018 ppm, su yüzdesi için 62.471%, yoğurma süresi için 9.714 dakika, fermantasyon sıcaklığı için 34.988 °C ve fermantasyon süresi için 65.273 dakika seviyeleri optimum seviyeler olarak elde edilmiştir.

A NON-LINEAR MODEL PROPOSAL FOR MULTI-RESPONSE SURFACE OPTIMIZATION AND APPLICATION TO BREAD MAKING PROCESS

SUMMARY

Response surface methodology is a bunch of mathematical and statistical techniques used when multiple factors affect the outcome of a product or process and the aim is to optimize that outcome. The techniques in the response surface methodology are comprised of designing experiments to measure the outcome, development of a model that fits best to the data collected in the experiments and determination of the optimum factor levels that give the optimum outcome.

Response surface methodology is used widely around the world especially in production and chemical industry to improve the design of a product, to decide on the formulation of a new product and for process optimization. By using the response surface methodology which makes the systems more robust by decreasing product and process variability, the purposes of quality improvement are satisfied for products and processes.

In our country, experimental design and response surface methodology, a special branch of experimental design, are not widely used yet. This is because many industrial organizations don't have sufficient laboratories to apply these techniques and also they are not known well in the industrial organizations. The aim of this study is to support the users as well as making a contribution to the scientific environment of our country.

In response surface methodology models are built by the help of the regression analyze. Regression coefficients are used to find out main and interaction effects of factors on response. In these methods, first step is to determine factors and its levels affect response. To decide most suitable experimental design these two criteria are used.

Response surface methodology is generally applied to increase the quality of a product, service or whole system and to increase its performance while decreasing its costs. When all these purposes are considered together, optimizing one performance criterion is not enough; many criteria derived from quality and cost should be simultaneously optimized. Response surface methodology emerged to satisfy that need and researchers have been working to solve these kinds of problems.

Several techniques based on statistics and operations research are used for multi response surface problems; desirability function approach, loss function approach, basic component analysis, distance function approach, multi regression model, linear programming approach, restricted optimization and heuristics.

In the study, single response surface methodology is divided into two sections; first degree and second degree models. Several commonly used experimental designs developed for these techniques are investigated. For first degree models, hypothesis testing and lack of fitness tests are mentioned and the situations in which second

degree models should be used are expressed. Then, multi-response surfaces are considered and the proposed approaches in the literature for these problems are given as a review.

In the study, a non-linear programming model is also proposed by using desirability function approach recommended by Derringer and Suich for multi-response surface optimization. The developed model enables to simultaneously optimize the response variables that have different units, amounts and objectives (minimization, maximization or a goal value). Additionally, the model has big advantages as the flexibility of being able to modified for different multi-response surface problems easily and allowing to weight different response variables.

Lastly, by applying the proposed model into the bread production process, flour characteristics and production parameters are determined for a better-quality bread production. The application is made in EKSUN food organization located in Tekirdag. There are six independent variables in the study; gluten ratio of the flour (24%, 32%), alfa amilaz enzyme addition (0 ppm, 40 ppm), water amount used (60%, 65%), knead duration (7 minute, 11 minute), fermentation temperature (28°C, 38°C) and fermentation duration (45 minute, 75 minute). The four selected criteria for bread quality are; specific volume of bread, peel color and structure, shape uniformity calculated by height and width and inner pore structure.

Spesific volume is calculated by dividing the volume of the bread with its weight. Volume measurement is done based on seed displacement method, one of the certified methods of American Grain Chemists Association. The peel color and structures of the breads are evaluated by experts using a 1-10 scale interval. The shape unfiormity is found by dividing the height of bread with the width. The goal value for that variable is decided to be 0.62 to avoid flat or oval shaped breads. Image processing technique is used to rate the pour shape, one of the response variables. For that, the breads are first cut from the middle and scanned with a HP brand scanner in a high resolution (4800 dpi). Later on, by investigating these bread images in image processing software ImageJ 1.48v, the pour distribution of breads are determined.

To be able to investigate the squared effects along with linear effects, a second degree model is also used. Box-Behnken experimental design which is highly economical and used widely for second degree models is selected and the data is collected according to this experimental design. To eliminate the effect of randomness and to get better results, the experiments are conducted in a random order and each experiment is replicated 3 times.

After getting the data according to the selected experimental design, hierarchical regression analysis is used to find second degree equations representing the relationsship between each response variable and independent variables. By making significance tests for the developed models and estimated coefficients, insignificant parameters are discarded from the model. For these analysis, Minitab v. 17.1.0 is used.

After making all the analysis and getting a significant regression equation depended on independent variables for each response variable, desirability functions are defined for response variables. Finally, a non-linear programming model is constructed to optimize the total desirability level. The developed model is solved by GAMS v. 24.1.3 and optimum levels of the factors are obtained. The optimum levels are found as 28.748% for gluten ratio, 34.018 ppm for alfa amilaz enzyme addition, 9.714 minutes for knead duration, 34.988 °C for fermentation temperature and 65.273 minutes for fermentation duration. With determined factor levels, values for response variables are expected as 5.398 milliliter for specific volume, 6.986 for peel color and structure, 0.652 for shape uniformity and 158.663 for inner pore structure.

1. GİRİŞ

Sürekli olarak gelişen ve kızışan rekabet içerisinde sanayi, tarım, kimya ve bunun gibi birçok sektörde faaliyet gösteren şirketler, varlıklarını devam ettirebilmek için istatistiksel ve matematiksel teknikleri gün geçtikçe daha yoğun ve etkin bir şekilde kullanmaktadırlar. Ürün ve/veya hizmet kalitelerini arttırmak, üretim maliyetlerini düşürmek ve böylelikle karlılıklarını arttırmak için şirketler optimizasyon tekniklerini kullanmak durumundadırlar. Bu optimizasyon çalışmalarında minimum veri toplama ve analiz etme maliyeti ile maksimum sonucu elde etmek esastır. Bu nedenle etkin deney tasarımı yöntemleri uzun zamandır ilgi görmekte ve kalite iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

1.1 Deney Tasarımı Çalışmaları ve Cevap Yüzeyi Yöntembilimi

Deney tasarımı yöntemi ilk olarak 1920'li yıllarda, özellikle tarım alanındaki verimlilik araştırmaları için R. A. Fisher ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Ortaya atıldığı ilk zamanlardan günümüze kadar üzerinde yoğun şekilde çalışılan ve çok çeşitli alanlara uygulanan deney tasarımı yöntemleri, günümüzde kalite geliştirmede, parametre optimizasyonunda ve süreç gelişiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şirvancı, 1997).

Ürün veya süreç kalitesini etkileyen bağımsız değişkenler, kontrol ve gürültü değişkenleri olarak iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Deney tasarımı yönteminin mantığı, kontrol değişkenlerinin, cevap değişkenleri üzerindeki etkilerini analiz ederek belirlemektir. Böylelikle hem çıktıları optimize edecek hem de gürültü değişkenlerinin çıktı üzerindeki etkilerini en aza indirecek şekilde kontrol değişkenlerinin seviyeleri belirlemek amaçlanmaktadır (Montgomery, 2005).

Optimizasyon üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak, ilgilenilen sürece ait cevapların (çıktı değişkenlerinin) istenen değerlere getirilmesi veya en azından belli sınırlar içerisinde olması hedeflenir. Literatürde bu amaçla yapılan çalışmalarda, deney tasarımı yönteminin bir alt dalı olarak düşünülebilecek cevap yüzeyi

yönteminin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Cevap yüzeyi yöntemi, çeşitli sektörlerde faaliyet gösteren işletmelerin süreçlerinin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimizasyonunda kullanılan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bütünüdür. Cevap yüzeyi yöntemi, bir kaç girdi değişkeninin (faktörün) bir ürün veya sürecin performans ölçüsü veya kalite karakteristiğini etkilediği durumlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu performans ölçüsü veya kalite karakteristiği cevap değişkeni, olarak adlandırılmaktadır.

Cevap yüzeyi yöntemi ilk olarak 1951 yılında Box ve Wilson tarafından tanımlanmış ve geliştirilmiştir. Box ve Wilson mümkün olan en az sayıda deney ile cevap yüzeyi üzerinde cevap değişkeninin optimum değerini aldığı noktaya ulaşılması amaçlanan deneme düzenlerini makalelerin de tartışmışlardır. Bazı deneme düzenlerini karşılaştırmış ve "Merkezi bileşik deneme düzenini" ortaya koymuşlardır. 1957 yılında ise Box ve Hunter merkezi bileşik deneme düzenlerinde dönersellik kavramını ortaya atmıştır. Box ve Draper'ın 1959 yılında farklı amaçlar için kullanılabilecek olan cevap yüzeyi yöntemlerini anlatan makalesi de cevap yüzeyi yöntemlerinin gelişiminde önemli bir yere sahiptir.

Cevap yüzeyi yöntemi günümüzde, biyoloji, biyo-teknoloji, kimya, kimya mühendisliği, çevre, gıda teknolojileri, imalat ve eczacılık gibi alanlarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Tania ve Deborah, 2002). Özellikle gıda alanında yapılan birçok çalışmada cevap yüzeyi yöntemi tercih edilmiş ve etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu nedenle tez kapsamında yapılan uygulama çalışması için de cevap yüzeyi yöntemi kullanılmış ve tez kapsamında açıklanacak doğrusal olmayan bir programlama modeli kurulmuştur.

Cevap yüzeyi yöntembiliminde kullanılan teknikler, söz konusu cevabın ölçülmesini sağlayacak deneylerin tasarlanması, seçilen deney tasarımına göre toplanan verilere en iyi uyumu sağlayacak modelin bulunması ve kurulması, optimum cevap değerini veren koşulların (faktör seviyelerinin) tahmin edilmesi konularını kapsamaktadır.

Cevap yüzeyi çalışmalarında veri toplama sürecinin planlanması ve gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Bu aşamada deney tasarımlarının özel bir sınıfı olan cevap yüzeyi tasarımları (Merkezi bileşik tasarımlar, Box-Behnken tasarımları vb.) kullanılmaktadır. Eğer ikinci derece bir model kurulacaksa, kullanılacak deney

tasarımı bu amaçla özel olarak seçilmeli ve her bir faktör için en azından üçer seviye deneylere dâhil edilmelidir.

Seçilen deney tasarımına göre toplanan verilere en iyi uyumu sağlayacak modelin bulunması regresyon analizi yardımıyla gerçekleştirilir. Bir faktörün ana etkisinin veya etkileşim etkisinin cevap değişkeninin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımıyla karar verilir. Birinci veya ikinci derece model kurulduktan sonra, model ve model parametreleri ile ilgili hipotez testleri, uyum yetersizliği testi, artık (residual) analizi testi yapılarak, modelin geçerli olup olmadığına karar verilebilir. Ayrıca girdi değişkenleri ve/veya cevap değişkeni üzerine uygulanan transformasyonlar ile modelin uyumu iyileştirilebilir.

Optimum cevap değerini veren faktör seviyelerinin seçimi ise ancak istatistiksel olarak geçerli ve yeterli bir modelin kurulumundan sonra mümkün olabilmektedir. Cevap değişkenleri ile faktörler arasındaki ilişki birinci derece modeller ile yeterince açıklanabildiğinde, bu modellerin ekstrem noktaları bulunarak, faktörler için optimum seviyeler kolaylıkla elde edilebilir. İkinci veya daha yüksek dereceli modellerde ise ekstrem noktaların elde edilmesi daha güç olmaktadır.

Cevap yüzeyi çalışmaları ilk ortaya çıktığında tek cevap üzerine yoğunlaşmıştır. Başlangıçta çalışmalar tarım ve hayvancılıkla ilgili olarak cevap eğrileri üzerine yapılmıştır. İlerleyen yıllarda, gerçek hayat problemlerinin ele alınmasında tek cevabın optimizasyonunun yeterli olmadığı, maliyet ve kalite temelli birçok yanıt değişkeninin eş zamanlı olarak optimizasyonunun gerçekleştirilmesi gereği ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar çoklu cevap içeren problemleri ele alınırken, bilinen deney tasarımlarını kullanmışlar, ancak optimum faktör seviyelerini bulurken çok farklı yaklaşımlar önermişlerdir.

Çoklu cevap yüzeylerinde optimize edilmek istenen cevap değişkenleri en küçüklenmek, en büyüklenmek veya hedef bir değere ulaştırılmak isteniyor olabilir. Bu tür problemlerde asıl sorun, farklı hedeflere sahip olan bu cevap değişkenlerinin istenen ağırlıklara göre bir araya getirilip ortak bir çatı altında aynı hedefe doğru yönlendirilmesidir. Ancak bu şekilde bütün cevap değişkenlerini göz önünde bulundurarak optimum faktör seviyeleri belirlenebilir. Çoklu cevap yüzeylerinin birlikte optimizasyonu için yapılan çalışmalar, istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı,

çoklu varyans analizi, kontur çizimleri, kısıtlanmış çözümlemeler, bağımlı uygun modellemeler oluşturarak tek bir değişkene indirgeme başlıkları altında özetlenebilir.

Özellikle birinci derece modellerin yeterli olmadığı ve daha yüksek dereceli fonksiyonların kullanıldığı durumlarda, incelenen bölge içerisinde, faktörlerin optimum değerlerini bulmak amacı ile yapay sinir ağları ve sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Tezde, ancak bu şekilde karmaşık fonksiyonlarla ifade edilebilen çok yanıtı cevap yüzeyi problemlerinin optimizasyonu için doğrusal olmayan bir modelin kullanılabileceği savunulmuş ve bir model önerilmiştir.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Tezde çoklu cevap yüzeylerinin optimizasyonu için Derringer ve Suich tarafından önerilen istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı da kullanılarak doğrusal olmayan bir matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Oluşturulan bu model farklı birimlere, büyüklüklere ve hedeflere (minimizasyon, maksimizasyon veya istenen bir hedef değer) sahip cevap değişkenlerini eş zamanlı olarak optimize etme imkanı sağlamaktadır. Ayrıca cevap değişkenlerinin ağırlıklandırılabilir olması ve herhangi bir çok yanıtı cevap yüzeyi problemine rahatlıkla uygulanabilme esnekliğine sahip olması önerilen modelin önemli avantajlarındanıdır.

Çalışmanın izleyen bölümlerinde cevap yüzeyi yöntembiliminde kullanılan teknikler, çoklu cevap yüzeyi problemlerinin çözümü için bir model önerisi ve ekmek üretimi sürecinde çok yanıtı cevap yüzeyi uygulaması anlatılmaktadır. İkinci bölümde, ilk olarak cevap yüzeyi yönteminin tarihçesi anlatılmış ve bu alanla ilgili geniş bir literatür taraması verilmiştir. Daha sonra cevap yüzeyi yönteminde oldukça önemli bir yeri olan ortagonallik ve dönersellik kavramları açıklanarak, birinci ve ikinci derece cevap yüzeyi modelleri ayrı başlıklar altında açıklanmıştır. Bu modelleri oluşturabilmek için literatürde sıklıkla kullanılan deney tasarımları anlatılmıştır. Özellikle ekonomik olması sebebiyle ikinci derece tasarımlar için çoğunlukla tercih edilen Merkezi Bileşik tasarımlar ve bu tezin uygulama kısmında da kullanılan Box-Behnken tasarımları ayrıntılı bir şekilde açıklanmışlardır. Ayrıca bu bölümde, kurulan modellerin ve kestirilen katsayıların istatistiksel olarak anlamlılığının test edilmesine ilişkin hipotez testleri de anlatılmıştır. Bunlarla beraber uyum eksikliği

testi, artık analizi testi, gibi model yeterliliği ile ilgili istatistiksel testlere de yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise çok yanıtlı cevap yüzeyi yöntemi ele alınmış ve bu tür problemler için önerilen yaklaşımlar literatür araştırması şeklinde anlatılmıştır. İstenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı, kayıp fonksiyonu yaklaşımı, uzaklık fonksiyonu yaklaşımı, çoklu regresyon modeli yaklaşımı, kısıtlanmış optimizasyon yaklaşımı ve sezgisel yöntemler bu tip problemler için önerilen başlıca tekniklerdir. Bu bölümde Derringer ve Suich tarafından önerilen istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı da kullanılarak farklı birimlere, büyüklüklere ve hedeflere (minimizasyon, maksimizasyon veya istenen bir hedef değer) sahip cevap değişkenlerini eş zamanlı olarak optimize etmeye yönelik bir doğrusal olmayan programlama modeli önerilmiştir. Önerilen bu model herhangi bir çok yanıtlı cevap yüzeyi problemine rahatlıkla uygulanabilme ve cevap değişkenlerinin isteğe bağlı olarak ağırlıklandırılabilmesi esnekliğine sahiptir.

Dördüncü bölümde ise ekmek nitelikleri ve üretim süreci hakkında bilgi verilmiştir. Bu bilgiler beşinci bölümde anlatılan ve ekmek üretimi sürecinde gerçekleştirilen uygulama çalışmasının daha iyi anlaşılabilmesi için verilmiştir. Bu bölümde ekmeğin kalitesi üzerinde etkili olduğu düşünülen un özellikleri ve üretim parametreleri incelenmiştir. Un özelliklerinden gluten oranı ve alfa amilaz enzim ilavesi, üretim parametrelerinden ise, kullanılan su miktarı, yoğurma süresi, son fermantasyon sıcaklığı ve son fermantasyon süresinin ekmek kalitesine olabilecek muhtemel etkileri önceki çalışmalar da incelenerek irdelenmiştir.

Beşinci bölümde ise, üçüncü bölümde önerilen model ekmek üretimi sürecine uygulanarak daha kaliteli ekmek üretimi için un özellikleri ve üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Tekirdağ'da bulunan EKSUN gıda işletmesinde gerçekleştirilen bu uygulama çalışması, kullanılan unun gluten oranı, alfa amilaz enzim ilavesi, kullanılan su miktarı, yoğurma süresi, fermantasyon sıcaklığı ve fermantasyon süresi olmak üzere altı adet bağımsız değişken (faktör) içermektedir. Ekmek kalitesini belirlemek için seçilen kriterler ise, ekmeğin özgül hacmi, kabuk rengi ve yapısı, şekil düzgünlüğü ve iç gözenek yapısı olmak üzere dört tanedir.

Çalışmada incelenen cevap değişkenlerinden özgül hacim ekmeğin hacmine kütlesi oranlanarak elde edilmiştir. Hacim ölçümü ise, Amerikan Tahıl Kimyagerleri

Derneği'nin onaylı metotlarından tohumla ölçme metodu (seed displacement metot) baz alınarak ölçülmüştür. Ekmeklerin kabuk rengi ve yapısı, uzmanlar tarafından incelenmiş ve 1-10 arası bir skala kullanılarak değerlendirilmiştir. Ekmeklerin şekil düzgünlüklerine ise yükseklikleri enlerine oranlanarak karar verilmiştir. Ekmeklerin ne yassı ne de oval olmaması için bu oranın 0,62 olması hedeflenmiştir. Cevap değişkenlerinden gözenek yapısının değerlendirilebilmesi için görüntü işleme tekniğinden yararlanılmıştır. Bunun için öncelikle ekmekler tam ortasından kesilerek gözenek yapılarının bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için Hp marka bir tarayıcı da yüksek çözünürlükte (4800 dpi) taranmıştır. Daha sonra bu ekmek resimleri görüntü işleme programı ImageJ 1.48v yazılımında incelenerek ekmeklerin gözeneklerinin dağılımı değerlendirilmiştir.

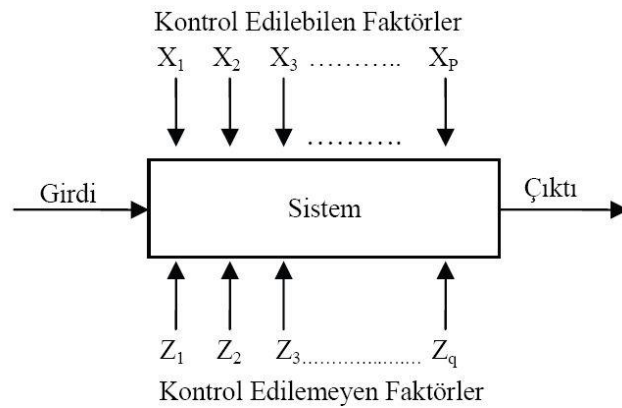
Çalışmada doğrusal etkilerin yanında kareli etkileri de inceleyebilmek için ikinci derece bir model kullanılmıştır. Oldukça ekonomik olan ve ikinci derece modeller için yaygın şekilde kullanılan Box-Behnken deney tasarımı tercih edilmiş ve veriler bu deney desenine göre toplanmıştır. Rassallığın etkisini ortadan kaldırmak ve daha sağlıklı sonuçlar elde etmek amacıyla deneyler rassal bir sıra ile gerçekleştirilmiş ve her bir deneme kombinasyonu için üç adet tekrar yapılmıştır.

Deney desenine göre veriler elde edildikten sonra her bir cevap değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade eden ikinci derece denklemler aşamalı regresyon analizi kullanılarak elde edilmiştir. Kurulan modeller ve tahmin edilen katsayılar için anlamlılık testleri yapılarak istatistiksel olarak anlamsız terimler modelden çıkarılmıştır. Bu analizler için Minitab® paket programının 17.1.0 versiyonundan yararlanılmıştır.

Analizler yapıp her bir cevap değişkeni için bağımsız değişkenlere (faktörlere) bağlı anlamlı birer regresyon denklemi elde edildikten sonra, cevap değişkenleri için istenebilirlik fonksiyonları tanımlanmış ve nihayetinde toplam istenebilirlik değerini en büyüleyecek doğrusal olmayan bir programlama modeli kurulmuştur. Kurulan bu model GAMS adlı paket programın 24.1.3 versiyonu kullanılarak çözülmüş ve böylelikle faktörlerin optimum seviyeleri elde edilmeye çalışılmıştır.

2. CEVAP YÜZEYİ YÖNTEMİ

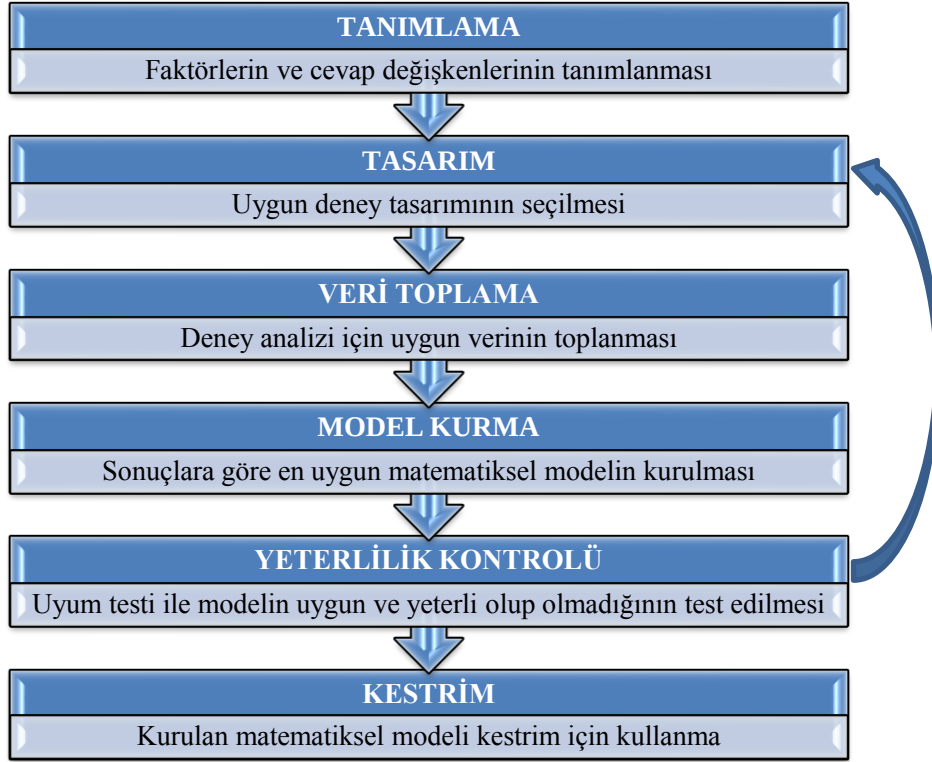
Genel olarak sistemler girdi, çıktı ve bu girdileri işleyerek çıktıya dönüştüren elemanlardan oluşurlar (Şekil 2.1). Bununla birlikte her sistemde onu etkileyen kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen faktörler vardır. Bu faktörler sistemin çıktısını niteliksel ve niceliksel olarak etkilerler. Gerek nitelik gerekse nicelik bakımından daha güzel sonuçlar elde edebilmek için bu faktörlerin çıktı üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu irdelenmeli ve kontrol edilebilen faktörlerin (bağımsız değişkenler) seviyeleri çıktı özelliklerini optimum yapacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu bağlamda Cevap Yüzeyi Yöntemi (CYY), veya İngilizcesi ile Response Surface Methodology (RSM), bir sistem de ilgilenilen bir veya daha fazla tepkinin birkaç değişken tarafından etkilendiği ve amacın bu tepkiyi optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için kullanılan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir arada kullanıldığı bir yöntem bilimidir (Montgomery, 1997). CYY ile kontrol edilebilen bağımsız değişkenlerin (faktörlerin) tek başına ya da etkileşimli olarak, cevap değişkeni veya değişkenleri üzerindeki etkisini ortaya koymak ve faktör değerlerinin kombinasyonları arasından cevap değişkenlerini optimum seviyeye taşıyacak kombinasyonu bulmak hedeflenir.



Şekil 2.1 : Bir sistem veya sürecin genel gösterimi (Montgomery, 2005).

Cevap yüzeyi yönteminde ilk adım cevap değişkeni üzerinde etkisi olduğu düşünülen ve kontrol edilebilir bağımsız değişkenlerin yani faktörlerin belirlenmesidir. Bu adımdan sonra, cevap yüzeyi yönteminde deney tasarımı için uygun bir desen

belirlenir. Bu aşamadan sonra regresyon, modelleme ve optimizasyon teknikleri iç içe kullanılır (Baş ve Boyacı, 2007) (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Tepki yüzeyi yönteminin adımları.

CYY sayesinde bağımsız değişkenlerin tek tek veya etkileşim halinde, ilgilenilen prosesin performansını veya kalitesini ölçmeye yönelik belirlenen cevap değişkenine veya değişkenlerine olan etkilerini açıklayabilmek mümkündür (Box ve Drapper, 1987). Günümüzde, CYY, yeni süreçlerin geliştirilmesi, mevcut süreçlerin performanslarının optimizasyonu ve yeni ürünlerin tasarım ve/veya formülasyonlarının iyileştirilmesi konularında etkin şekilde kullanılmaktadır. Ürün ve süreç değişkenliğinin indirgenmesi ve ürün/süreç performansının iyileştirilmesini içeren kalite iyileştirmenin hedefleri, cevap yüzeyi yöntem biliminin kullanımı ile çoğu kez gerçekleştirilebilmektedir. Cevap yüzeyi yönteminde kullanılan teknikler genel olarak şunları kapsamaktadır.

- Söz konusu cevabın veya cevapların ölçülmesini sağlayacak uygun bir deney deseninin tasarlanması;
- Tasarlanan deney deseni yardımıyla toplanan verilere en iyi uyumu sağlayacak modelin kurulması;

- Optimum cevap değerini veren bağımsız (kontrol) değişken değerlerinin bulunması.

CYY ile bir seferde, seçilen kontrol faktörlerinin yanıt değişkenleri üzerindeki tek tek ve birlikte etkileri görülebilmekte ve özel deney tasarımları kullanılarak optimizasyon için gerekli deney sayısı azaltılabilmektedir (Myers ve diğ, 2008).

2.1 Cevap Yüzeyi Yönteminin Tarihi ve Literatür Araştırması

CYY ilk olarak Box ve Wilson tarafından endüstriyel deneyler için geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Box ve Wilson'dan önceki çalışmalarda genel olarak ilgilenilen alan cevap yüzeyleri değil cevap eğrileri olmuş ve modelleme çalışmaları üzerinde durulmuştur. Cevap eğrileri ilk olarak bitki ve hayvanların büyümelerini göstermek için büyüme eğrileri yerine kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda Mead ve Pike (1975) tarafından tarım ile ilgili çalışmalarda, Carter ve diğ. (1983) tarafından tıbbi çalışmalarda ve Vining ve Myers (1990) tarafından süreç dışı kalite kontrolü çalışmalarında kullanılmıştır.

Modern anlamda cevap yüzeyi yönteminin temelleri Box ve Wilson tarafından atılmıştır. Box ve Wilson'ın cevap yüzeyi yöntemine katkıları Myers ve arkadaşları tarafından,

- Deney tasarımlarının cevap yüzeyi yönteminin içine alınması,
- Optimum noktaların belirlenmesi ve değişik deney tasarımlarına ilişkin performans karşılaştırma fikrinin ortaya atılması,
- Optimizasyon tekniklerinin cevap yüzeyi yönteminin içine girmesi ve en iyi noktaların bulunmasında en hızlı çıkış yönteminin benimsenmesi,
- Merkezi bileşik tasarımların istatistik literatürüne kazandırılması

olarak verilmiştir (Myers ve diğ, 1981). Cevap yüzeyi yöntemindeki bu çalışmalar, daha sonraki yıllarda hızlı bir biçimde gelişmesini sürdürmüştür. Box ve Wilson'dan sonraki çalışmalar deney tasarım düzeyindeki gelişmeler ve analiz düzeyindeki gelişmeler olarak ikiye ayrılabilir. Cevap yüzeyi yönteminin kullanıldığı uygulamalardaki ve model yapılarındaki değişikliklere paralel olarak yeni tasarımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen tasarımlardan bazıları, dönersel tasarımlar, sağlam tasarımlar, ikinci dereceden model için tasarımlar, optimal tasarımlar, madde karışım deneyleri ile ilgili tasarımlar ve özel amaçlı tasarımlardır (Hill ve Hunter, 1966).

Cevap yüzeyi yönteminde kullanılan tasarımlarla ilgili geniş bir kaynak taraması 1999 yılına kadar Köksoy (2001) tarafından verilmiştir.

Hahn (1985) istatistiksel tecrübe gerektiren bazı durumlarda, istatistiksel tecrübenin bilgisayar sistemlerine aktararak deneyimsiz kullanıcılara sunulabileceğini, böylelikle bilgisayar destekli deney tasarımının bu konudaki eksikliğini giderebileceğini belirtmiştir.

Snee (1985) deney tasarımında bilgisayar kullanımı konusunda çalışmış ve klasik tasarımların özel koşullardan dolayı kullanılmadığı durumlarda bilgisayarların önemini vurgulamıştır. Snee (1985) deney tasarımında bilgisayar kullanmanın avantajlarını şu şekilde sıralamıştır; kodlanmış deney tasarımları kitaplar yerine bilgisayar dosyalarında saklanacak, böylece tasarımcı literatürden tasarım araştırması yapmayacak. Bazı durumlarda tasarımın kullanıcı tarafından yaratılması bilgisayar tarafından yaratılmasına oranla daha uygundur ve deney tasarımının kalitesini artıracaktır. Çünkü bloklama yapıları, kısıtlar, kısmi deney tekrarları ve diğer teknik detaylar daha iyi değerlendirilebilecek, deney kodlaması bilgisayar tarafından gerçekleştirileceğinden dolayı deneyin bu ilk adımlarında hata yapma ihtimali ortadan kalkacak.

Coleman ve Montgomery (1993) endüstriyel deney planlaması prosesinin aşağıdaki adımlardan oluştuğunu belirtmiştir: problemin anlaşılması ve tam olarak ifade edilmesi, deney değişkenlerinin (faktörlerinin) ve bu faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi, deney cevap değişkeninin belirlenmesi, deney tasarımının seçilmesi, deneyin gerçekleştirilmesi, veri analizi ve deney sonuçlarının değerlendirilmesi.

Coleman ve Montgomery (1993) deney planlaması yapılmasına rağmen deneyi yapan kişinin bilgi ve tecrübesi arasındaki çelişkilerinden dolayı birçok endüstriyel deneyin planlandığı gibi gitmediğini belirtmiştir. Deneyi yapan kişinin bilgisizliğinin aşağıdaki sonuçları doğurabileceğini belirtmişlerdir: yanlış varsayımlar, uygun olmayan kontrol edilebilen faktör seviyeleri kombinasyonu, bilinen fiziksel kuralların değiştirilmesi veya göz ardı edilmesi, gereğinden büyük veya küçük deney tasarımının seçilmesi, deney tepki değişkeni değerinin yanlış ölçülmesi ve yanlış deney gözlemi sırası.

Hahn (1993) deneylerin planlama aşamasında bilgisayar kullanılmasının önemini vurgulamıştır. Günümüzde, bilgisayarların standart tasarım geliştirmede başarılı

olduğunu, fakat var olan yazılımların deney tasarımlarının bazı teknik özellikleri konusunda yetersiz olduğunu belirtmiştir.

Tavanai ve diğ. (1997) çorap üretiminde kullanılan yalancı büküm tekstüre ipliklerde bükümün etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada tekstüre ipliğin mekanik özelliklerini etkileyen ana proses parametreleri olan sıcaklık ve tekstüre hızının kısa ısıtıcılı yüksek hızlı (SHHS, short heater high speed) yalancı büküm tekstüre prosesinde polyamid 6.6 ipliğe olan etkileri incelenmiştir. Bu proseste yüksek sıcaklıkta ve düşük sürede ısıtıcıda kalan ipliğin, iplik hattında stabil kalmasının önemi vurgulanarak diğer proses parametreleriyle birlikte incelenmiştir.

Montgomery ve Runger (1999) Mühendisler için uygulamalı istatistik ve olasılık kitabında deneylerin tüm mühendislik ve bilimsel disiplinlerde gerçekleştirildiğini ve sistemlerle proseslerin nasıl çalıştıklarının önemli unsurlar olduğunu ifade etmişlerdir. Bir deney sonrasında tespit edilen çözüm ve önerilerin geçerliliğinin geniş bir anlamda deneyin nasıl oluşturulduğuna dayandığını, böylece bir deneyin tasarımının problemin nihai çözümünde ana rol oynadığı vurgulanmıştır. Deneysel tasarım, bir üretim prosesini geliştirmek isteyen mühendis ve bilim adamları için çok önemli bir araçtır. Yeni proses ve yeni ürün tasarımlarında geniş bir uygulama alanı vardır. Deney tasarımlarının bazı uygulama alanlarının proses karakterizasyonu, optimizasyon ve ürün tasarımı olduğu belirtilmiştir.

Montgomery (1997) cevap yüzeyi metodolojisinin, ilgilenilen tepkinin birkaç değişken tarafından etkilendiği ve amacın bu tepkiyi optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için faydalı olan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir grubu olduğunu belirtmiştir.

İlerleyen yıllarda, Allen ve Yu, daha düşük maliyetli cevap yüzeyi yöntemleri için tasarımlarla ilgili simülasyon programları üzerinde durmuşlardır (Allen ve Yu, 2002). Myers ve Montgomery (2002) Tepki Yüzeyi Metodolojisinin prosesleri geliştirmek ve optimize etmek için istatistiksel ve matematiksel tekniklerin toplamı olduğunu ve ayrıca mevcut ürün tasarımlarında olduğu kadar tasarım, geliştirme ve formülasyonda çok önemli uygulama alanları olduğunu vurgulamışlardır. 2005 yılında Goos ve Donev cevap yüzeyi tasarımlarının blok yapısı üzerine çalışmışlardır (Goos ve Donev, 2005). Hanrahan ve Lu ise 2006 yılında faktöriyel tasarımlar üzerinde çalışmıştır (Hanrahan ve Lu, 2006).

Diğer taraftan, cevap yüzeyleri 1990'lı yıllardan sonra çeşitli uygulama alanlarında kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları;

- Tıp, kimya ve ilaç sanayisi (Yin ve Carter, 1996; Hasmann ve diğ, 2003; Kong ve Lee, 2006),
- Gıda sektörü (Gomes ve Malcata, 1998),
- Bilgisayar ve otomotiv sektörüdür (Amago, 2001; Kaymaz ve McMahon, 2005; Bucher ve Most, 2008).

Cevap yüzeyi yönteminin uygulama alanlarının genişlemesiyle, model yapılarında da değişiklikler olmuştur. Bu değişiklikler, özellikle Poisson ve Gamma modellerinin cevap yüzeyi yönteminde kullanılması fikrini ön plana çıkarmıştır. Bununla beraber, “Bayesci tasarımlar” da gündeme gelmiştir (Myers, 1999).

2001 yılından sonraki makaleler genel olarak cevap yüzeyi yönteminin yapay sinir ağları gibi diğer sezgisel yöntemler ile karşılaştırılması şeklindedir. Bunlardan bazıları Dutta ve Banerjee (2003), Gomes ve Awruch (2004), Baş ve Boyacı (2006) makaleleridir. Rohani ve Signh (2004) cevap yüzeyi yönteminde yerel optimum noktalar ile genel optimum nokta arasındaki ilişkileri incelemiştir. Khuri ve Mukhopadhyay (2010) cevap yüzeyi yönteminin gelişme evrelerini sırasıyla anlatmışlardır.

Eren ve Ertekin (2007) patatesin osmotik dehidrasyonu sırasında su kaybını maksimum, katı emilimi ve su aktivitesini ise minimum yapacak proses şartlarını bulabilmek için cevap yüzeyi yöntemini kullanmışlardır. Deneylerinde, sıcaklık (20-60 °C), işlem süresi (0.5 – 8 saat), sukroz yüzdesi (40 – 60% w/w) ve tuz yüzdesi (0-15% w/w) olmak üzere dört bağımsız değişken (faktör) kullanmışlardır. Deney tasarımı olarak da merkezi kompozit dönersel tasarımı kullanmışlar ve optimum koşulları sıcaklık için 22 °C, işlem süresi için 29 dakika, sukroz yüzdesi için 54.5% ve tuz yüzdesi için 14% olarak elde etmişlerdir.

Özdemir ve diğ. (2008) doğranmış yeşilbiberin dehidrasyonunu cevap yüzeyi yöntemini kullanarak optimize etmeye çalışmışlardır. Çalışmada cevap değişkenleri olarak; su kaybı, katı emilimi, tuz alımı, sorbitol alımı, kontrol değişkenleri olarak ise sıcaklık (20 – 40 °C), işlem süresi (15 – 600 dak.), tuz oranı (0 – 10 g/100g) ve sorbitol oranı (0 – 10 g/100g) belirlenmiştir. Çalışmaların da 2⁴ merkezi kompozit dönersel tasarımı kullanmış ve optimum proses şartlarını tuz oranı için 5.5 g/100g,

sorbitol oranı için 6 g s/100g, sıcaklık için 30 °C ve işlem süresi için 240 dakika olarak bulmuşlardır.

Günümüze daha yakın çalışmalardan ise şunlar örnek verilebilir. Hejazi ve diğ. (2012) çok yanıtlı tepki yüzeyi yöntemini ve onun stokastik doğasını hedef programlama ile modellemiş ve optimize etmişlerdir. Farklı yanıt değişkenlerinin ağırlıklarını ise bir Grup Karar Verme yöntemi ile belirlemişlerdir. Kurulan stokastik model belirsizlikler içermesi nedeniyle, robüst optimum sonuçlar bulmak için bazı stokastik optimizasyon metodlarını kullanmışlardır.

He ve diğ. (2012) çok yanıtlı tepki optimizasyonu için robüst bir istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı önermişlerdir. Önerdikleri yaklaşım verilere uydurulan tepki yüzeyi modeline ilişkin belirsizliği dikkate almaktadır. Her bir tepki için tek bir tahmini değer yerine, güven aralığındaki tüm değerleri dikkate alması önerdikleri modelin özgün tarafını oluşturmaktadır. Aynı zamanda robüst optimal değeri bulabilmek için hibrid bir genetik algoritma geliştirmişlerdir.

Stelios ve diğ. (2014) uygulamada etkili ve ekonomik bir dizi cevap yüzeyi desenleri önermişlerdir. Önerilen bu deney desenleri merkezi kompozit dizaynın modifiye edilmiş bir halidir. Bu desenleri oluşturmak için bir algoritma geliştirmiş ve uygulamışlardır.

Shafisoltani ve diğ. (2014), glukoz aksidaz ve ksilanaz enzimlerinin α amilaz enzim dengelemesi yapılmış unlarda hamur ve ekmeğin kalite karakteristiklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Shafisoltani ve diğ. (2014), düşük α amilaz etkinliği unlarda kalite noksanlıklarına neden olduğu için bu tip unlara α amilaz enzimi eklendiğini vurgulamışlardır. Enzim katkısının hamur ve ekmeğin, özgül hacim, şekil, içyapı ve algısal özelliklerine olan etkilerini cevap yüzeyi yöntemi tasarımlarından biri olan Merkezi Kompozit Tasarımı kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda glukoz aksidaz ve ksilanaz enzimlerinin hamur ve ekmek kalitesini etkilediği ve optimum katkı değerlerinin enzimler için sırasıyla 30 ve 20 ppm olduğu ortaya çıkmıştır.

Derossi ve diğ. (2015), çery domatesinin tuz ve şeker çözeltisindeki osmotik dehidrasyonu üzerinde tepki yüzeyi yöntemini kullanarak çalışmışlardır. Farklı kalite parametrelerini bir araya getirip global optimumu elde edebilmek amacıyla istenebilirlik fonksiyonundan faydalanmışlardır. Tepki değişkenleri olarak; su

aktivitesini, nem yüzdesini, tutarlılığı ve kırmızılık indeksini, bağımsız değişkenler (kontrol değişkenleri) olarak ta sukroz yüzdesi, sodyum klorid yüzdesi almışlardır. Maksimum istenebilirlik değerini, 55.62% sukroz yüzdesi ve 2.45% sodyum klorid yüzdesi değerleri ile elde etmişlerdir.

Cevap yüzeyi üzerine çalışmalar değişik alanlarda yazılmaya devam edilmektedir.

2.2 Cevap Yüzeyi Yönteminin Temel Elemanları

Cevap yüzeyi yönteminin temel elemanları; etkenler (faktörler), cevap değişkenleri, cevap fonksiyonu, cevap yüzeyi, cevap yüzeyinin kontur ve grafikleri, deneysel (experimental) ve işlevsel (operational) alanlar olarak sıralanabilir. Yöntemin detaylı bir şekilde anlatılabilmesi için her bir eleman bir alt başlık altında açıklanacaktır.

2.2.1 Bağımsız değişkenler

Bağımlı değişkenleri (cevap değişkenleri) etkileyen değişkenler genel olarak gürültü ve kontrol değişkenleri olmak üzere iki sınıfa ayrılabilirler. Gürültü değişkenleri sistemin çıktıları etkileyen ancak kontrol edilmesi mümkün olmayan veya çok zor olan değişkenlerdir. Kontrol değişkenleri ise sistemin çıktıları etkileyen ve bununla birlikte araştırmacı tarafından kontrol edilebilen değişkenlerdir. Etkenler veya faktörler olarak adlandırdığımız değişkenler kontrol değişkenleridir. Yani kısaca faktörler, deneyi yapan kişinin kontrol edebildiği değerler alan bağımsız değişkenlerdir. Faktörlerin aldıkları değerler, kullanılacak deney deseni düzenine ve araştırmacı ekibin tecrübelerine göre iki veya daha fazla seviyeli olacak şekilde belirlenir. Klasik yaklaşımda faktör değişkenlerinin seviyeleri eşit olarak alınmasına rağmen son yıllarda karma seviyeli faktörlerle de çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Faktörlerin gerçek seviye değerleri, CYY’de genellikle kodlanmış düzey olarak kullanılmaktadır. Örneğin bir faktör üç seviyeli ise genellikle orta seviye değeri (0), alt seviye değeri (-1) ve üst seviye değeri (1) olacak şekilde kodlama yapılır. Kodlama yapmanın temel amacı işlem yükünü hafifletmektir.

Faktör düzeyleri değiştiğinde cevap değişkenlerinin değeri de değişir. CYY’nin temel amaçlarından birisi; faktör seviyeleri değiştikçe her bir cevap değişkeninin değerinde nasıl bir değişim olduğunun yani cevap değişkeninin değişimindeki miktarın ve yönün belirlenmesi ve bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının irdelenmesidir. Faktörler, buğday türü gibi nitel veya yoğurma süresi ya

da fermentasyon süresi gibi nicel değişkenler olabilir. Cevap yüzeyi problemlerinde etkenlerin genellikle nicel olduğu durumlar ele alınmaktadır. Son yıllarda sıralı değişkenlerin de içinde bulunduğu çalışmalar yapılmaktadır. Faktörler tez boyunca $X_1, X_2, \dots, X_k$ gibi harflerle gösterilecektir. Yukarıda anlatıldığı üzere işlem kolaylığı açısından çoğu zaman bağımsız değişkenlerin kodlanmış değerleri kullanılmaktadır, kodlanmış faktör değerleri ise tez boyunca küçük harflerle $x_1, x_2, \dots, x_k$ şeklinde ifade edilecektir.

2.2.2 Cevap değişkenleri

Cevap değişkenleri ilgilenilen sistemin veya sürecin sonuncunda elde edilen çıktının (mal veya hizmet) bir karakteristiğidir. Örneğin ekmek üretimi sürecinde cevap değişkenleri olarak ekmeğin kalite karakteristiklerinden şekil düzgünlüğü, iç gözenek yapısı, tadı ve aroması gibi özellikler seçilebilir. Bir deney çalışmasında tek bir cevap değişkeni veya birden fazla cevap değişkeni belirlenebilir. Birden fazla cevap değişkeninin bulunduğu durumlar Çok Yanıtlı Cevap Yüzeyi Yöntemi (ÇYCYY) olarak isimlendirilir ve bu çalışmalarda cevap değişkenlerini birlikte optimize edebilmek için İstenebilirlik Fonksiyonu (İF) gibi yaklaşımlar kullanılır.

Cevap değişkeni, deneysel hatanın yokluğunda sadece faktörlerin (etkenlerin) bir fonksiyonudur. Gerçek değer olarak ise faktörlerin bir fonksiyonu ve bununla birlikte deneysel hatanın (ε) toplamıdır. Bu çalışmada etken düzeylerinin herhangi bir kombinasyonuna karşılık gelen cevap değişkeninin gerçek değeri Y ile gösterilecektir. Ölçümlerin dahil olduğu bütün deneylerde deneysel hata olduğundan, etken düzeylerinin herhangi bir kombinasyonu için gözlenen cevap değişkeni kurulan model sayesinde kestirilen (tahmin edilen) değerden farklıdır. Bu durum $Y = \tilde{Y} + \varepsilon$ olarak ifade edilir. Burada $\tilde{Y}$, cevap değişkeninin (cevabın) kestirim değerini, ε , deneysel hatayı göstermektedir (Khuri ve Cornell, 1996). CYY'nin modelleme kısmında temel amaç, eldeki verilere deneysel hatayı (ε) minimum yapacak bir doğru veya eğri denklemi uydurmak ve bu denklemin parametrelerini hesaplamaktır.

2.2.3 Gerçek cevap fonksiyonu

$X_1, X_2, \dots, X_k$ Bağımsız değişkenleri (faktörleri), Y cevap değişkeninin gerçek değerini ve ε deneysel hatayı temsil ettiği düşünüldüğünde, gerçek cevap fonksiyonu Eşitlik 2.1 şeklinde ifade edilebilir.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (2.1)$$

f fonksiyonu cevap fonksiyonu olarak adlandırılır ve sürekli değişken olan X_i 'lerin ($i = 1, 2, \dots, k$) bir fonksiyonu olduğu varsayılır (Khuri ve Cornell, 1996; Bucher ve Most, 2008). Pratikte birçok durumda cevap fonksiyonunun (f) yapısal biçimi bilinmemektedir. Bu fonksiyon oldukça karmaşık bir yapıda (muhtemelen doğrusal olmayan bir fonksiyon) olabilir. Burada amaç, en küçük sapmaya sahip fonksiyonun elde edilmesidir. Böylelikle bu fonksiyon kullanılarak cevap değişkenini veya değişkenlerini maksimum ya da minimum yapan faktör değerleri bulunabilir.

Buradaki ε deneysel hatası, cevaptaki ölçüm hatasının veya süreçlerin doğasında olan diğer varyasyon kaynaklarının etkilerini içerir, ε için beklenen değeri sıfır ($E(\varepsilon) = 0$) ve varyansı sabit σ^2 olan normal dağılıma sahip olduğu varsayımı yapılmaktadır ($\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$).

Eşitlik 2.1 ile verilen ilişki, $k = 1$ olduğunda bir doğru veya eğri, $k = 2$ olduğunda bir yüzey ve $k > 2$ olduğunda bir hiper yüzey ile temsil edilir. Birçok cevap yüzeyi probleminde cevap ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkinin gerçek yapısı bilinmediğinden, gerçek fonksiyonel ilişki için bir yaklaşımın (genellikle bir polinomiyal) bulunması söz konusudur. Genellikle girdi değişkeni uzayının küçük bir bölgesinde düşük dereceli yaklaşım polinomiyailleri kullanılmaktadır. Cevap değişkenleri, bağımsız değişkenlerin doğrusal bir fonksiyonu ile yeterli derecede temsil edilebiliyorsa, yaklaşım fonksiyonu için birinci derece ifadeler ve etkileşimler yeterli olacaktır. Ancak birinci dereceden modeller istatistiksel anlamda verileri temsil etmek için yeterli olmazsa ikinci ve hatta üçüncü dereceden modeller kullanmak ve bunların parametrelerini tahmin etmek gerekir.

Birinci dereceden modelin genel yapısı Eşitlik 2.2'deki gibi ifade edilebilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{mn} X_m X_n + \varepsilon \quad (2.2)$$

Bu modelde β_0 model sabitini, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ana etkilerin (bağımsız değişkenlerin) katsayılarını, $\beta_{12}, \beta_{23}, \dots, \beta_{mn}$ etkileşim etkilerinin katsayılarını ifade etmektedir. İkinci dereceden bir modelin genel gösterimi ise Eşitlik 2.3'de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{mn} X_m X_n + \cdots + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \cdots + \beta_{kk} X_k^2 + \varepsilon \quad (2.3)$$

Bu modelde birinci derece modelden farklı olarak (X_i^2) kuadratik (kareli) terimleri bulunmaktadır. β_{kk} kuadratik terimlerin katsayılarını ifade etmektedir. Birinci dereceden ve ikinci dereceden modeller tezin ilerleyen aşamalarında daha ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır.

2.2.4 Tahmini (kestrilen) cevap fonksiyonu

Gerçek cevap fonksiyonu pratik çalışmalarda bilinemez ancak yapılacak çalışmaya özgü bir deney tasarımı kullanılarak toplanan veriler yardımıyla bir cevap fonksiyonu tahmini yapılabilir. Bunun için öncelikle eldeki verilere uygun bir model seçilmeli ve o modelin parametrelerini (katsayılarını) tahmin etmek için verilerden faydalanılmalıdır. Parametre tahmininde en sık kullanılan yöntem En Küçük Kareler Yöntemidir (EKKY).

Birçok çalışmada öncelikle birinci dereceden modeller seçilerek, modelin parametreleri tahmin edilir ve daha sonra model yeterliliği test edilir. Eğer model yeterli değilse ikinci veya üçüncü dereceden modeller kullanılarak bunların parametreleri tahmin edilir.

$\tilde{Y}$ tahmini cevap değişkenini ve $X_1, X_2, \dots, X_k$ bağımsız değişkenleri göstermek üzere tahmini cevap fonksiyonu Eşitlik 2.4'deki gibi ifade edilebilir.

$$\tilde{Y} = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (2.4)$$

Birinci dereceden modellerin gösterimi ise Eşitlik 2.5'deki gibidir.

$$\tilde{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_k X_k + b_{12} X_1 X_2 + \cdots + b_{mn} X_m X_n \quad (2.5)$$

Bu modelde;

$\tilde{Y}$: Tahmini cevap değişkenini,

b_0 : Tahmini model sabitini,

$b_1, b_2, \dots, b_k$: Ana etkilerin (faktörlerin) tahmini katsayılarını,

$b_{12}, b_{23}, \dots, b_{mn}$: Etkileşimlerin tahmini katsayılarını,

ifade etmektedir.

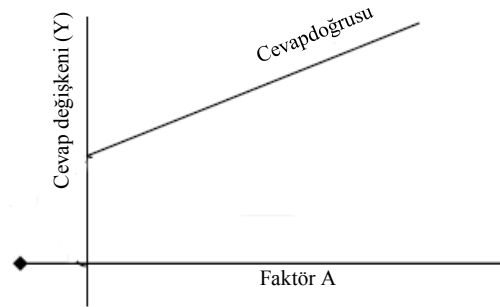
İkinci dereceden modellerin genel gösterimi ise Eşitlik 2.6'daki gibi ifade edilebilir.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + b_{12}X_1X_2 + b_{mn}X_mX_n + \dots + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + \dots + b_{kk}X_k^2 \quad (2.6)$$

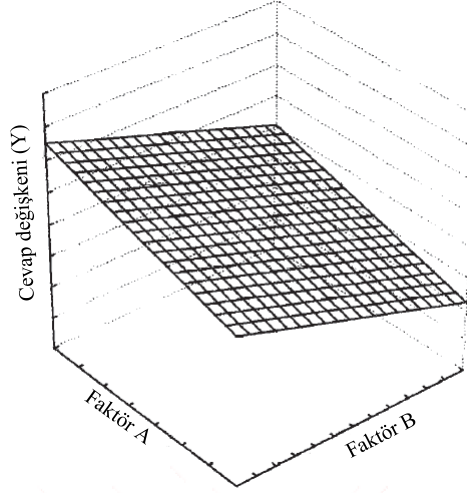
Bu modelde birinci dereceden modelden farklı olarak kuadratik ifadeler bulunmaktadır. b_{kk} ise ikinci dereceden ifadelerin tahmini katsayısını ifade etmektedir.

2.2.5 Cevap yüzeyi grafikleri

Cevap yüzeyi grafikleri cevap yüzeyi fonksiyonlarını daha görsel hale getiren çizimlerdir ve optimum yanıtı ulaşmak için görsel bir araç olarak kullanılmaktadırlar. Çizimler iki bağımsız değişkenin varlığında daha anlamlı olmaktadır. Eğer bağımsız değişkenlerin sayısı ikiden fazla ise diğer faktörlerin değerleri sabitlenerek asıl ilgilenilen faktörlerin cevap değişkeni üzerindeki etkisini görmek mümkün olmaktadır. Eğer kurulan model birinci dereceden ise grafik tek değişken için bir doğru (Şekil 2.3), iki değişken için de doğrusal bir düzlem (Şekil 2.4) olur.

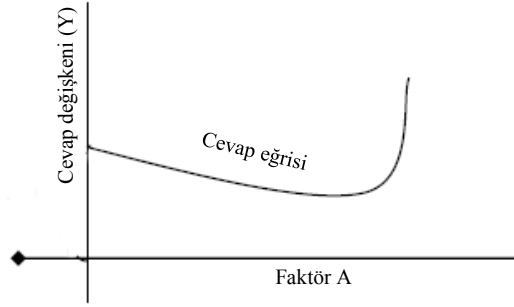


Şekil 2.3 : Birinci dereceden modelin tek faktöre göre cevap değişkeni grafiği.

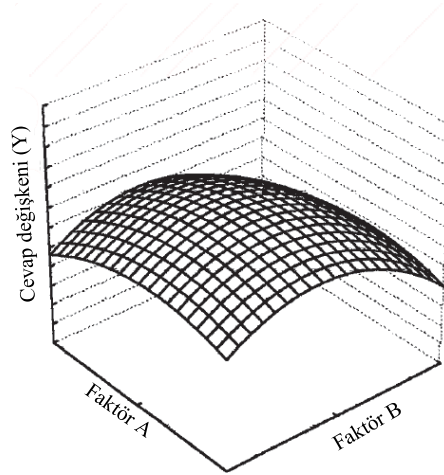


şekil 2.4 : Birinci dereceden modelin iki faktöre göre cevap değişkeni grafiği.

İkinci dereceden modeller için ise cevap değişkeninin tek değişkene göre grafiğini çizdiğimizde bir eğri (şekil 2.5), iki değişkene göre çizdiğimizde şekil 2.6'deki gibi bir yüzey elde ederiz.



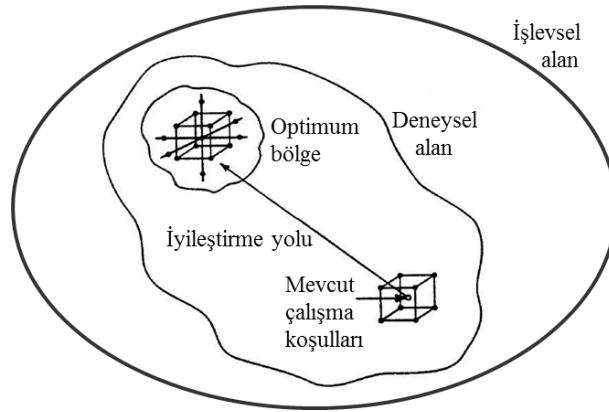
şekil 2.5 : İkinci dereceden modelin tek faktöre göre cevap değişkeni grafiği.



şekil 2.6 : İkinci dereceden modelin iki faktöre göre cevap değişkeni grafiği.

2.2.6 Deneysel ve işlevsel alanlar

Deneyin yapılması düşünülen etken alanlarının geniş kümesi işlevsel alan olarak adlandırılır. Fakat tüm bu alanın kapsanması hem zaman hem de maddi açıdan genel olarak zor olduğu için, işlevsel alanın bir alt kümesi olan ve deneysel alan olarak isimlendirilen bir bölgede araştırmalar yapılmaktadır. Deneysel ve işlevsel alanların temsili gösterimi Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 : Bir cevap yüzeyi çalışmasında deneysel ve işlevsel bölgeler.

2.3 Cevap Yüzeyi Yönteminde Ortagonallik ve Dönersellik Kavramları

Cevap yüzeyi yöntemi için birçok özel tasarım üzerinde çalışılmıştır. Bu tasarımlar ortagonallik ve dönersellik özellikleri taşıdıkları takdirde cevap yüzeyi problemlerinin çözümünde daha sağlıklı çözümler üretmektedirler.

Oluşturulan bir deneme düzeninde ana ve etkileşim etkilerin tahmin edilebilmesi için bu etkilerin birbirinden bağımsız olmaları gerekmektedir. Eğer bir deneme matrisi ortagonallik özelliğine sahipse, düzen matrisinde yer alan ana etkilerin ve birinci dereceden etkileşim etkilerinin birbirinden bağımsız olduğu söylenebilir. Yani ortagonallik, k adet faktörün bireysel etkilerini bağımsız olarak tahmin etme imkânı sunan bir özelliktir.

Teknik olarak eğer kodlarla belirtilmiş olan düzen matrisinde satırların her birinin kendi içinde toplamı 0 ise o düzen matrisinin ortogonal bir matris olduğuna ve istenilen etkilerin diğerlerin etkilerden bağımsız bir şekilde tahmin edilebileceğine karar verilir. Pratikte ortogonal düzen matrisleri ile karşılaşmak zor olabilir. Genel olarak bir denemenin ortogonallik düzeyi arttıkça etkinliği de artar. Bunun nedeni ise ilgilenilen etkiler hakkında daha bağımsız bilgilerin denemenin sonucunda elde edilecek olmasıdır.

Bir denemeden yansız ve mümkün olan en fazla miktarda bilgi edinmek için dikkat edilmesi gereken bir başka nokta ise denemenin dönersellik özelliğine sahip olmasıdır. Deney tasarımlarının dönersellik yapısına sahip olmasının istenmesinin amacı, varyansın tutarlılığının sağlanmasıdır. Tasarımda dönersellik özelliği, tasarım parametrelerinin seçimi için çok önemli bir katkı sağlamaktadır.

Dönersellik, $Var [\hat{y}(x)]$ 'in büyüklüğü ile ölçülen kestirim kalitesinin, girdi değişkenleri uzayındaki koordinat eksenlerinin döndürülmesi ile değişmemesi yani invariant olmasıdır. Deney tasarımı bölgesi boyunca tahmini varyansın sabit dağılımını sağlamak, ikinci dereceden tasarımlar için büyük önem taşımaktadır. Deneyi yapan ve tasarlayan kişiler tasarım uzayında başlangıç noktalarının ve optimum noktaların nerelerde olduğunu tasarımın başlarında bilemezler. Ancak $Var [\hat{y}(x)]$ değerini en küçük yapacak, merkezden belli uzaklıktaki noktalar, deney noktaları olarak alınabilir. Bu noktalar üç boyutlu uzayda bir kare üzerinde bulunacaktır. Bu şekilde hazırlanmış tasarımlara dönersel tasarımlar denir. Böylece, sabit tahmini varyans, gelecekteki cevap değerlerinin bir tahmini olarak $\hat{y}(x)$ 'in kalitesinin ilgilenilen alan içerisinde aynı kalmasını garantilemiş olur (Myers ve Montgomery, 2002).

Cevap değişkeninin tahmini için standart hata Eşitlik 2.7'den yararlanarak elde edilir. Bu eşitlikte $f(X)'$ kodlar yardımıyla elde edilen cevap yüzeyi modelinin transpozu, $(X'X)^{-1}$ düzen matrisinin kendi transpozu ile çarpıldıktan sonra tersi alınmış halidir. Yapılan cevap değişkeni tahminlerinin ne kadarının bilindiği deneme noktalarının değişkenliğine bağlıdır. Değişkenlik yani standart hata ne kadar küçük olursa tahminin kesinliği de o kadar iyi olacaktır.

$$\sqrt{(1 + f(X)'(X'X)^{-1}f(X))} \quad (2.7)$$

2.4 Birinci Derece Cevap Yüzeyi Modelleri ve Deney Tasarımları

2.4.1 Birinci derece modeller

Cevap yüzeyi yönteminin temel amacı etkenler (bağımsız değişkenler) ile cevap değişkenleri arasındaki fonksiyonel ilişkinin deney sonuçlarına göre belirlenmesidir. Bu ilişki belirlenmiş bölgelerde sürekli olduğu varsayılan bilinmeyen cevap fonksiyonu ile ifade edilir. CYY'de çoğu zaman birinci veya ikinci, bazı durumlarda

ise daha yüksek polinomiyal modeller, gerçek cevaba yaklaşmak için kullanılır. Pratikte düşük dereceli polinomlar basit formda olmalarından dolayı, çoğu zaman yüksek dereceli polinoma tercih edilmektedir. Ancak eğer gerçek tepki fonksiyonu eğrisel bir yapıda ise tepki değişkeni ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki, doğrusal modellerle açıklanamayabilir. Bu durumlarda iki veya daha yüksek dereceli modelleri kullanmak gerekir (Myers, 1971).

k kontrol değişkeni sayısını ifade etmek üzere, birinci dereceden bir cevap yüzeyinin genel formu;

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{\substack{j=2 \\ i < j}}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.8)$$

şeklinde. Burada, Y gözlemlenebilir cevap değişkeni, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ bilinmeyen ve kestirmeye çalışılan parametreler, $X_1, X_2, \dots, X_k$ kontrol değişkenlerini ve ε rasgele dağılan deneysel hatayı ifade etmektedir. ε hata teriminin ortalaması sıfır ve varyansı sabit σ^2 olan normal dağılıma sahip olduğu ($\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$) varsayımı yapılmaktadır. Bu varsayım altında deneysel hatanın beklenen değeri sıfır olacağından ($E(\varepsilon) = 0$) gerçek tepki fonksiyonu;

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{\substack{j=2 \\ i < j}}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.9)$$

şeklinde olacaktır. Ancak gerçek uygulamalarda ε hata terimi deneysel hatanın yanında rasgele olmayan (sistemik) hatayı da içeriyor olabilir. Bu durumda tahmini model gerçek modeli temsil etmede yetersiz kalır. Sistemik hata;

- Ölçüm yöntemlerinden veya kullanılan araç gereçlerin kalibrasyonundan kaynaklanan problemlerden,
- Yanlış ve/veya eksik kontrol değişkeni belirlemeden,
- Kontrol değişkenlerinin daha üst derecelerden terimlerinin modele dahil edilmemesinden yani gerçek yanıt fonksiyonu ikinci veya daha yüksek dereceden bir fonksiyon iken birinci dereceden bir cevap fonksiyonunun kullanılmasından kaynaklanabilir.

Birinci dereceden modelin matris formunda gösterimi;

$$Y = \beta X + \varepsilon \quad (2.10)$$

şeklindedir. Burada kullanılan deney tasarımıdaki toplam deney sayısı N , bağımsız değişken sayısı ise k ile ifade edildiğinde,

Y : $N \times 1$ boyutlu gözlemler vektörünü,

β : $(k+1) \times 1$ boyutlu katsayılar vektörünü,

X : $N \times (k+1)$ boyutlu faktörler (etkenler) matrisini,

ε : $N \times 1$ boyutlu hatalar vektörünü ifade etmektedir.

Eşitlik 2.10'da X matrisi $[1:D]$ formundadır, bu formda 1 bütün elemanları 1'den oluşan bir sütun vektörü, D ise $N \times k$ boyutlu özel bir matristir. $i = 1, 2, \dots, N$ ve $j = 1, 2, \dots, k$ olmak üzere i . deney noktasında j . faktörün değeri X_{ij} , bu matrisin elemanlarından oluşur. D aynı zamanda deney matrisi olarak da isimlendirilmektedir.

Model parametrelerinin (β) tahmini için en küçük kareler veya ağırlıklı en küçük kareler yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerin temeli bağımlı değişkenlerin gözlem değerleri ile tahmini değerleri arasındaki farkın kareli ortalamasını en küçükmeye dayanır. En küçük kareler yönteminin parametre tahminin de kullanılabilmesi için deneysel hatanın sıfır ortalama ve σ^2 sabit varyansa sahip normal dağılıma uyması gerekir. Parametre tahmini sonuncu tepki yüzeyi denklemi şu şekilde elde edilir;

$$\tilde{Y} = bX \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11'de eğer,

- $\forall X_i$ sabit,
- $\forall Y_i$ gözlemlenebilir rassal bir değişken,
- $\forall \varepsilon = \varepsilon_i$ gözlemlenemeyen bir rassal değişken ($i = 1, 2, \dots, N$),
- ε_i rassal değişkeni için beklenen değer sıfır ($E[\varepsilon_i] = 0$), varyansı sabit σ^2 olan ($Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$) ve kovaryansı $Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$, $i \neq j$ ise,

β 'nin en küçük kareler kestireci olan b en iyi doğrusal yansız kestireç (EİDYK) olarak adlandırılır ve şu şekilde hesaplanır;

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\sigma^2 \quad (2.12)$$

$\mathbf{b}$ 'nin kovaryans matrisi ise;

$$\text{var}(\mathbf{b}) = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{Y} \quad (2.13)$$

formülü ile hesaplanır (Box ve Draper, 1987).

Dik tasarımlar β_j ($j = 1, 2, \dots, k$) değerleri ile bulunan k etkenin bağımsız olarak hesaplanmasına imkan tanıdığı ve bu tasarımlarda $\mathbf{b}$ matrisinin elemanları istatistiksel olarak birbirinden bağımsız olduğu için birinci dereceden tasarımlar için diklik kavramı önemlidir.

2.4.2 Birinci derece modeller için deney tasarımları

Birinci dereceden dik tasarımlardan bazıları, 2^k tam faktöriyel tasarımları, 2^k kesirli faktöriyel tasarımlar, simpleks tasarımlar ve Plackett-Burman tasarımları olarak sıralanabilir.

2.4.2.1 2^k tam faktöriyel deney tasarımları

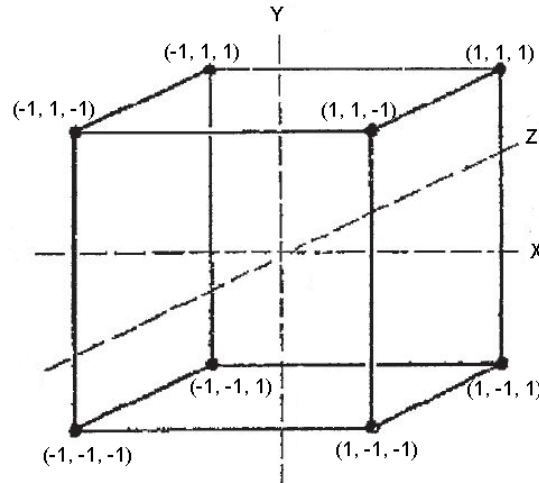
2^k faktöriyel tasarımlarda her bir faktör yüksek ve düşük olmak üzere iki seviye değerine sahiptir. “ 2^k ” gösteriminde “k” değeri faktör sayısını ifade etmektedir. Faktör seviyelerinden düşük olan “-1”, yüksek olan ise “+1” ile kodlanabilmektedir. Faktörlerin kodlama işlemi,

$$x_{ij} = 2(X_{ij} - \bar{X}_j)/R_j, \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, k \quad (2.14)$$

eşitliği kullanılarak yapılabilir. Bu eşitlikteki x_{ij} kodlanmış faktör seviyesini ifade etmektedir. $\bar{X}_j = \sum_{i=1}^N X_{ij} / N$ ve $R_j = (X_{maks} - X_{min})$ formülleri ile hesaplanmaktadır. k adet faktörün olası tüm kombinasyonlarını ele alan ve kodlanmış değerler cinsinden yazılmış matrise tasarım matrisi denir ve D ile ifade edilir. Eşitlik 2.15’de 2^3 tam faktöriyel tasarıma ait tasarım matrisi verilmektedir.

$$D = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & -1 \\ -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} = [d_1; d_2; d_3] \quad (2.15)$$

Bu matriste görüldüğü üzere $d'_i d_j = 0$, $i \neq j$ ve $d'_i d_i = 8$, ($i = 1, 2, 3$) şeklindedir. Böylelikle $D'D$ matrisinin diagonal terimleri 8 (2^3) diğer terimleri ise “0”dır. Bir 2^k tam faktöriyel tasarımda 2^k tane toplam kombinasyon, dolayısıyla deneme sayısı vardır. Bu tip tasarım, geometrik olarak, k boyutlu bir hiperküpün köşelerinden oluşmaktadır. 2^3 tam faktöriyel tasarımına ait geometrik gösterim Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : 2^3 tam faktöriyel deney tasarımının geometrik gösterimi.

Faktöriyel tasarımların önemli özelliklerinden bir tanesi de bu tasarımların faktörlerin ana etkilerinin yanında etkileşimlerin etkilerinin de hesaplanmasına izin vermesidir. Bu tip tasarımlarda bir faktörün ana etkisi veya etkileşimin etkisi, yüksek seviye ortalaması ile düşük seviye ortalamasının arasında fark olarak tanımlanabilir. Böylelikle herhangi bir faktörün etkisi,

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} \quad (2.16)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir (Yates, 1937).

Bir 2^3 faktöriyel tasarımında ana ve etkileşim etkilerini kolayca hesaplamak Çizelge 2.1'deki işaret kolonları ile kolayca yapılabilir. Bu tablodaki muamele sütunu hangi değişkenin üst seviye değeri kullanıldığına bakarak oluşturulmuştur. Örneğin bu tabloya bakarak BC etkileşimi için etki değeri şu şekilde hesaplanabilir;

$$BC = \frac{1}{4}(y_{(1)} + y_a - y_b - y_{ab} - y_c - y_{ac} + y_{bc} + y_{abc}) \quad (2.17)$$

Bu eşitlikteki her bir işaretten dörder veri olduğu için toplam 4'e bölünmüştür.

Çizelge 2.1 : 2^3 faktöriyel tasarım için ana ve etkileşim etkilerinin sistematik bir şekilde elde edilmesi için işaret kolonları.

A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Muamele Kombinasyonu	Cevap
-	-	-	+	+	+	-	(1)	$y_{(1)}$
+	-	-	-	-	+	+	a	y_a
-	+	-	-	+	-	+	b	y_b
+	+	-	+	-	-	-	ab	y_{ab}
-	-	+	+	-	-	+	c	y_c
+	-	+	-	+	-	-	ac	y_{ac}
-	+	+	-	-	+	-	bc	y_{bc}
+	+	+	+	+	+	+	abc	y_{abc}

2.4.3 Birinci derece modellerde hipotez testleri

Basit veya çoklu doğrusal regresyon analizi olarak da düşünülebilecek olan birinci derece cevap yüzeyi modellerinde, modelin kendisinin veya parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını, kullanılan modelin var olan verileri ne derecede temsil ettiğini, yani yeterli olup olmadığını sınamak amacıyla hipotez testleri kullanılır. Bu testlerin anlamlı sonuçlar verebilmesi için ε_i rassal hata terimlerinin her bir deney için birbirinden bağımsız, sıfır ortalama ve σ^2 sabit varyansa sahip olması gerekmektedir.

2.4.3.1 Model ve katsayıların anlamlılığının sınanması

CYY'de öncelikle yapılacak çalışma için, cevap değişkeni veya değişkenleri (y) ile bağımsız değişkenler ($X_1, X_2, \dots, X_k$) arasında doğrusal ve istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkinin gerçekten var olup olmadığını sınanmalıdır. Eğer bu test sonucunda anlamlı bir sonuç elde edilirse ikinci aşama olarak her bir parametrenin istatistiksel

anlamlılığı teker teker sınıanır. Genellikle modelin sınıanması F testi ile, parametrelerin ayrı ayrı sınıanması ise t testi ile yapılmaktadır.

Oluşturulan bir modelin anlamlılığının genel olarak sınıanması için kurulan hipotezler şu şekildedir;

$$\begin{aligned} H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_K = 0 \\ H_1: \beta_j \neq 0, \text{ en az bir tek } j \text{ değeri için} \end{aligned} \quad (2.18)$$

bu hipotezlerden H_0 'ın reddedilmesi bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin modele istatistiksel olarak anlamlı bir katkıda bulunduğunu, yani bağımlı değişkeni (cevap değişkeni) anlamlı olarak açıkladığını ifade etmektedir.

Hipotez testi kareler toplamı kullanılarak gerçekleştirilir. Bir modelde kareler toplamı iki kısımdan oluşur; birincisi modelden (regresyon) kaynaklanan kareler toplamıdır ki buna açıklanabilen değişkenlik de denir, diğeri ise tamamen tesadüfilikten (hatadan) kaynaklanan kareler toplamıdır ki buna da açıklanamayan değişkenlik denir. Bu iki kareler toplamı şu eşitlikle ifade edilebilir;

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (2.19)$$

H_0 hipotezinin doğruluğunu test etmek için aşağıda verilen F istatistiği hesaplanır.

$$F = \frac{SS_R/k}{SS_E/(n - k - 1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (2.20)$$

Bu eşitlikte MS_R regresyon modeline ait kareler ortalamasını, MS_E ise hatalara ait kareler ortalamasını ifade etmektedir. hesaplanan F değeri $F_{\alpha,k,n-k-1}$ tablo değerinden büyükse H_0 hipotezi reddedilir ve modelin anlamlı olduğuna karar verilir. Modelin genel olarak anlamlılığını sınamaya yönelik yapılan bu test aslında bir varyans analizi çözümlemesidir. Varyans analizinin temeli bağımlı değişkendeki değişkenliğin, açıklanabilen ve açıklanamayan (tesadüfi) değişkenlik olarak bileşenlerine ayrılmasından ibarettir. Çizelge 2.2'de herhangi bir regresyon modelinin varyans çözümlemesinde kullanılan standart bir varyans analizi tablosu verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Varyans analizi tablosu.

Değişkenlik Kaynağı	Kareler Toplamı (SS)	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması (MS)	F
Regresyon (Açıklanabilir değişkenlik)	$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	k	$MS_R = SS_R/k$	$\frac{MS_R}{MS_E}$
Hata (Tesadüfi değişkenlik)	$SS_E = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2$	n-k-1	$MS_E = SS_E / (n - k - 1)$	
Toplam	$SS_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$	n-1		

Tablodaki $Y_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ gözlem değerlerini, $\hat{Y}$ regresyon doğrusu ile elde edilen tahmini cevap değerlerini, $\bar{Y}$ ise gözlem değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.

Modelin genel olarak anlamlılığı sılandıktan sonra ikinci aşama, modelde yer alan bütün parametrelerin teker teker istatistiksel açıdan anlamlı olup olmadıklarını kontrol etmektir. Bu kontrol sonucunda anlamsız olduğu tespit edilen değişken veya değişkenler modelden çıkarılarak model tekrar kurulabilir.

Parametrelerin testine ilişkin hipotezler aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} H_0: \beta_j &= 0 \\ H_1: \beta_j &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Bu hipotezlerin sınanması için çoğunlukla t istatistiği kullanılır ve t değeri şu şekilde hesaplanır;

$$t = \frac{b_j}{\sqrt{\sigma^2 C_{ij}}} = \frac{b_j}{se(b_j)} \quad (2.22)$$

Burada C_{ij} 'ler $(X'X)^{-1}$ matrisinin b_j kısmi regresyon katsayısına ilişkin köşegen elemanları ve $se(b_j)$ standart hata değeridir. t hesap değeri $t_{\alpha/2, n-k-1}$ çizelge değerinden büyük çıkarsa H_0 hipotezinin reddedilmesine karar verilir. Böylelikle ilgili katsayının istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonuncuna varılır.

2.4.3.2 Model uygunluğunun test edilmesi

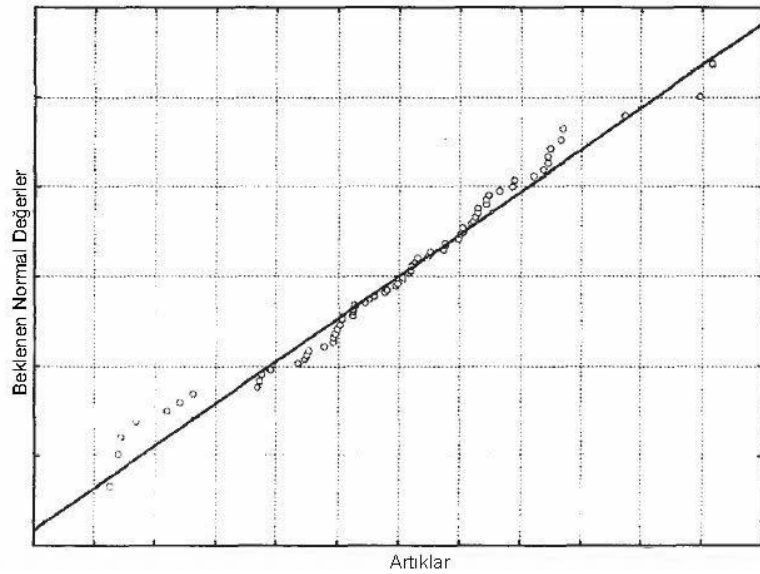
Cevap yüzeyi yöntemi ile bir modelin kurulmasından sonra, bu modelin uygunluğunun sınanması gerekmektedir. Bu gereksinimin temel olarak iki amacı vardır. Birincisi, kurulan modelin gerçek modele ne kadar yakın olduğunun test edilmesi, diğeri ise parametre tahmini için kullanılan en küçük kareler yönteminin varsayımlarından herhangi birinin ihlal edilip edilmediğinin irdelenmesidir. Aşağıda bir modelin uygunluğunun sınanmasında kullanılan artıkların analizi ve uyum eksikliği testlerinden bahsedilmektedir.

2.4.3.3 Artıkların analizi

Bir regresyon modeli için artıklar aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır;

$$e_i = (Y_i - \hat{Y}_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.23)$$

Burada Y_i gözlem değerlerini, $\hat{Y}_i$ ise regresyon doğrusu ile elde edilen tahmini cevap değerlerini ifade etmektedir. En küçük kareler yönteminin temel varsayımlarından biri hata teriminin “0” ortalama ve σ^2 sabit varyans ile normal dağılmasıdır. Bu varsayımın kurulan her model için test edilmesi gerekmektedir. Bu test artıkların normal olasılık grafiğinin çizilmesi ile gerçekleştirilebilir. Şekil 2.9’da örnek bir normal olasılık dağılımı grafiği verilmiştir.



Şekil 2.9 : Artıklar için normal olasılık grafiği.

Artık değerlerin grafikteki doğrunun etrafında toplanmaları normallik ön şartı yerine geldiğinin bir göstergesidir. Bu varsayım yerine gelmediği durumda verilerin dönüştürölmesi (transformation) yöntemine başvurulabilir.

2.4.3.4 Uyum eksikliği testi

Cevap yüzeyi yöntemin de deneyler yapıldıktan sonra elde edilen verilere bir model uydurulmaya çalışılır. Uydurulan bu model verileri iyi bir şekilde tanımlamadığı zaman uyum eksikliği problemi ortaya çıkmakta ve bu sakıncalı durumun model kurulup parametre tahmini yapıldıktan sonra test edilmesi gerektedir. Uyum eksikliğinin olup olmadığına bağımsız değişkenler (faktörler) için cevap değişkeninin aldığı değerler tekrarlı bir şekilde elde edildiği durumdaki gözlenen hata ile eğrinin uyumundaki hata karşılaştırılarak karar verilir.

Uyum eksikliğinin var olması bulunan modelin tahmin edici özelliğinin istatistiksel bir anlamlılığa sahip olmadığını, yani çalışmanın doğru sonuçlar vermeyeceğini gösterir. Bu sorunun ortadan kaldırılması için kullanılan iki yöntem vardır: Bunlardan birincisi verilerin dönüştürölmesi diğeri ise regresyon modelinin genişletilerek daha kompleks ve daha fazla sayıda verinin elde edilmesidir.

Uyum eksikliği testi için kurulan hipotezler şu şekildedir:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{Uyum eksikliği vardır,} \\ H_1: & \text{Uyum eksikliği yoktur.} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Bu hipotezler yukarıda geçtiği gibi yine varyans analizi çözümlemesi ile test edilirler.

Cevap değişkeninin her bir X_i tahmin edicisi için aldığı m tane değeri gösteren n_i tane gözleme sahip olduğumuzu varsayalım. Y_{ij} yanıt değişkeninin j. gözlem, i. tahmin edici değişken için aldığı değerleri, n bütün gözlem değerlerinin toplamını gösterebilir. Varyans analizi çizelgesinde yer alan artık kareler toplamının iki bileşeni vardır.

$$SSE = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (2.25)$$

SS_{PE} saflık hatasından (pure error) kaynaklanan kareler toplamını, SS_{LOF} uyum eksikliğinden (lack of fit) kaynaklanan kareler toplamını ifade eder. Burada;

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (2.26)$$

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2.27)$$

şeklindedir ve serbestlik dereceleri SS_{PE} için $(n - m)$, SS_{LOF} için $(m - p)$ 'dir.

F değeri ise şu şekilde hesaplanır;

$$F = \frac{SS_{LOF}/(m - p)}{SS_{PE}/(n - m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (2.28)$$

Hesaplanan F değeri tablodan bulunacak $F_{\alpha, (m-p), (n-m)}$ değeri ile karşılaştırılır. Eğer H_0 hipotezi reddedilirse kurulan modelin verileri iyi bir şekilde temsil ettiğine karar verilir.

2.5 İkinci Derece Cevap Yüzeyi Modelleri ve Deney Tasarımları

2.5.1 İkinci derece modeller

Birinci derece modeller, daha yüksek dereceli modellere göre nispeten daha basit olması, parametre tahminin kolaylıkla yapılabilmesi, daha az deney yapmayı gerektirmesi gibi nedenlerle araştırmacılar tarafından öncelikli olarak tercih edilmektedirler. Ancak cevap yüzeyi belirleme çalışmalarında, birinci dereceden modellerle yüzey biçimini tanımlamada uyum eksikliğinin söz konusu olduğu durumlarda, iki veya gerektiğinde daha fazla dereceden modellerle problem ele alınmalıdır. Pratikte karşılaşılan problemler için genellikle ikinci dereceden modeller yeterli uyumu göstermekte ve bağımsız değişkenler ile yanıt değişkeni arasındaki ilişkiyi yeterli derecede açıklayabilmektedirler.

İkinci derece modeller birinci derece modellerden farklı olarak faktörlerin (bağımsız değişkenlerin) kuadratik (kareli) formlarını da modele dahil etmektedirler. İkinci derece modeller genel olarak,

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{\substack{j=2 \\ i < j}}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.29)$$

biçiminde tanımlanır. Bu eşitlikte $X_1, X_2, \dots, X_k$ bağımsız değişkenler, Y cevap değişkeni, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, (i = 1, 2, \dots, k), \beta_{ij}, (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, k)$ bilinmeyen parametreleri ve ε rastgele hata terimini göstermektedir.

İkinci derece modellerde standartlaştırma, u. ($u = 1, 2, \dots, N$) deneme için,

$$x_{ui} = \frac{X_{ui} - \bar{X}_i}{S_{X_i}} \quad (2.30)$$

eşitliği ile gerçekleştirilir. Buradaki x_{ui} i. etkenin ($i = 1, 2, \dots, k$) u. düzeyinin ($u = 1, 2, \dots, N$) standardize edilmiş faktör değerini, X_{ui} , i. etkenin u. düzeyinin gerçek değerini ve N ise gözlem sayısını veya deney sayısını göstermektedir. Eşiklikteki $\bar{X}_i, X_{ui}$ değerlerinin ortalamasını, S_{X_i} ise standart sapmasını ifade etmektedirler ve şu şekilde hesaplanabilirler;

$$\bar{X}_i = 1/N \sum_{u=1}^N X_{ui} \quad (2.31)$$

$$S_{X_i} = \left[\sum_{u=1}^N (X_{ui} - \bar{X}_i)^2 / N \right]^{1/2} \quad (2.32)$$

Eşitlik 2.29 de X_i yerine standartlaştırılmış x_{ui} değerleri kullanıldığında, u. deneme için cevap değeri;

$$Y_u = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_{ui} + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_{ui}^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{\substack{j=2 \\ i < j}}^k \beta_{ij} x_{ui} x_{uj} + \varepsilon_u \quad (2.33)$$

eşitliği ile elde edilebilir. Bu eşitlikte ε_u, Y_u cevabı için sıfır ortalama ve sabit σ^2 varyansa sahip hata terimini ifade etmektedir. Birinci derece modellerde olduğu gibi ikinci derece modeller de matris formda ifade edilebilirler. İkinci derece model matris formda şu şekilde gösterilebilir.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.34)$$

Burada $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_N)'$, $1 \times N$ boyutunda yanıt değişkenleri vektörü, $\mathbf{X}$, tasarım matrisi olarak da isimlendirilen $N \times p$ boyutlu bir matris, $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N)'$ ise $1 \times N$ boyutlu rassal ve bağımsız dağılan hatalar vektörüdür. Burada bahsedilen N toplam deney veya gözlem sayısı, p ise tahmin edilen toplam parametre sayısıdır.

İkinci derece modellerde k bağımsız değişken sayısını göstermek üzere p şu şekilde hesaplanabilir.

$$p = (k + 1)(k + 2)/2 \quad (2.35)$$

Birinci derece modellerde olduğu gibi β 'nın en küçük kareler tahminleyicisi (en iyi doğrusal yansız kestireç) olan $\mathbf{b}$,

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{Y} \quad (2.36)$$

eşitliği ile hesaplanır. $\mathbf{b}$ 'nin varyans-kovaryans matrisi ise,

$$\text{var}(\mathbf{b}) = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\sigma^2 \quad (2.37)$$

formülü ile bulunabilir (Box ve Drapper, 1987).

İkinci derece cevap yüzeyi modellerini oluşturabilmek için birçok deney tasarımı geliştirilmiştir. Bu tasarımlar ortagonallik ve dönersellik özelliklerini taşıdıklarında problemlerin çözümü için daha sağlıklı sonuçlar vermektedirler. Ortagonallik ve döndürülebilirlik kavramları birinci derece modellerde olduğu gibi ikinci derece modellerde de doğru bir tahminleme ve optimizasyon çalışması yapabilmek adına oldukça önemlidir. İkinci derece modeller oluşturabilmek için geliştirilmiş tasarımlardan bazıları şunlardır;

- 3^k faktöriyel tasarım
- Merkezi bileşik tasarımlar
- Box-Behnken tasarımları
- Eş yarıçaplı tasarımlar
- Küçük bileşik tasarımlar
- Silindirik döndürülebilir tasarımlar
- Asimetrik döndürülebilir tasarımlar
- Koshal tasarımları
- Box-Draper doyurulmuş tasarımları
- Tekdüzen kabuk tasarımları
- Hoke tasarımları
- Melez tasarımlar

Merkezi bileşik tasarımlar ve Box-Behnken tasarımları, deney sayısını önemli ölçüde azaltması, ortagonallik ve dönersellik özelliğini sağlanması için oldukça sağlıklı sonuçlar vermesi gibi nedenlerle bu alanda en çok başvurulan ve en önemli deney tasarımı yöntemlerindendir (Box ve Draper, 1987). Çalışmanın devamında bu deney tasarımları anlatılacak ve uygulama kısmında Box-Behnken tasarımı kullanılacaktır.

2.5.2 İkinci derece modeller için deney tasarımları

2.5.2.1 Merkezi bileşik tasarım

Merkezi bileşik tasarım (MBT), 1951 de Box ve Wilson tarafından 3^k faktöriyel tasarımlara bir alternatif olarak geliştirilmiştir (Box ve Wilson, 1951). Bu tasarımların en önemli özelliklerinden biri 3^k faktöriyel deney tasarımlarına göre deney sayısını oldukça azaltmasıdır. Bu nedenle günümüzde ikinci dereceden bir cevap yüzeyi modelinin oluşturulabilmesi amacıyla MBT oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadırlar.

MBT temel olarak 2^k faktöriyel tasarımlara merkez ve eksen noktalarının eklenmesi ile oluşturulmuşlardır. Bir merkezi bileşik tasarım genel olarak şunlardan oluşmaktadır (Khuri ve Cornell, 1987):

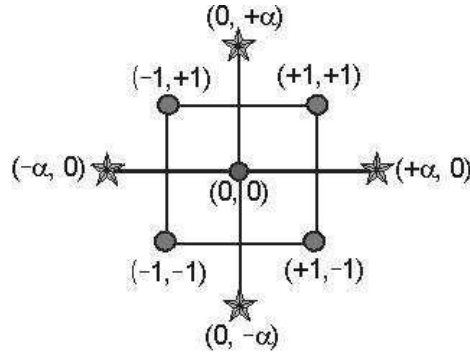
1. 2^k faktöriyel veya 2^{k-m} kesirli faktöryel tasarım,
2. n_0 adet merkez noktası ($n_0 > 1$),
3. Her bir tasarım değişkeninin eksenı üzerinde, tasarım merkezine uzaklığı α olan iki yıldız (eksen) noktası.

Bunlardan 2^k tam faktöriyel veya 2^{k-m} kesirli faktöryel tasarımda faktör seviyeleri düşük “-1” ve yüksek “+1” olarak kodlanır ve bu kesim tasarımın faktöriyel parçası olarak adlandırılır. Merkez noktası bütün faktörlerin orta seviyede olduğu noktadır ve tasarımın tam merkezinde yer alır. Faktörlerin orta seviyeleri “0” değeri ile kodlanır. Yıldız (eksen) noktaları ise, tasarımın merkezinden ilerleyen aşamalarda hesaplanacak olan $+\alpha$, $-\alpha$ kadar uzakta bulunan ve her bir faktör için iki adet olan noktalardır. Bu noktalar kuadratik terimleri tahmin edebilmek için tasarıma eklenmişlerdir.

Çizelge 2.3 : k faktörlü merkezi bileşik deney deseninin parçaları.

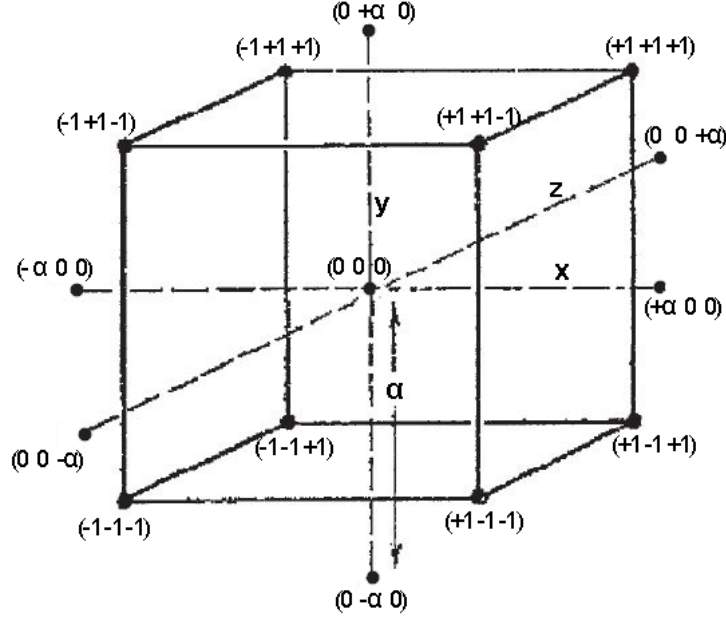
x_1	x_2	...	x_k	
-1	-1	...	-1	} 2^k çok etkenli deneye ait nokta
-1	-1	...	1	
-1	1	...	-1	
-1	1	...	1	
1	-1	...	-1	
1	-1	...	1	
1	1	...	-1	
1	1	...	1	
$-\alpha$	0	...	0	} $2k$ eksen noktası
α	0	...	0	
0	$-\alpha$	...	0	
0	α	...	0	
.	.	...	.	
.	.	...	.	
.	.	...	.	
0	0	...	$-\alpha$	
0	0	...	α	
0	0	...	0	} n_c merkez noktası
0	0	...	0	
0	0	...	0	

k faktörlü bir sistem için faktör kombinasyonlarına ait noktalar ile merkez ve yıldız noktalarının merkezi kompozit deneme desenin de standart yerleşimi Çizelge 2.3’de gösterilmiştir. Ancak bu deney sıralaması uygulama yapılırken gürültünün (kontrol edilemeyen değişkenliğin) sonuç üzerindeki etkisini azaltmak yani daha robüst sonuçlar elde etmek adına rassal hale getirilmelidir. Çizelge 2.3’de verilen noktaların deney desenindeki yerlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için iki faktörlü bir merkezi bileşik deney tasarımına ait noktaların geometrik yerleri Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Merkezi bileşik deney tasarımında iki değişkenli bir sistem için deney noktaları örneği.

Üç faktörlü bir sistem için faktör kombinasyonlarına ait noktalar ile merkezi ve yıldız noktalarının merkezi kompozit deneme desenin de standart yerleşimi ise Şekil 2.11'de gösterildiği gibidir. Bu şekilde faktörleri temsil eden eksenler x, y ve z harfleri ile kodlanmıştır. Görüldüğü üzere denemede, $2^3 = 8$ adet faktör kombinasyonlarına ait nokta (faktör noktası), her biri merkezden α kadar uzaklıkta bulunan altı adet yıldız (eksen) noktası ve tasarımın tam ortasında bulunan bir adet merkez noktası bulunmaktadır.



Şekil 2.11 : Merkezi bileşik deney tasarımında üç değişkenli bir sistem için deney noktaları örneği.

Merkezi bileşik deney tasarımları için toplam deney sayısı (TDS) şu eşitlik ile bulunabilir;

$$TDS = 2^k + 2k + n_c \quad (2.38)$$

Burada, k faktör sayısını, 2^k faktöriyel deneme sayısını, $2k$ yıldız noktalarındaki deneme sayısını ve n_c de merkez noktadaki deneme sayısını ifade etmektedir. Tasarımın dönersellik özelliği taşıyabilmesi için, bu eşitlikte yer alan n_c 'ye yani merkez noktada yapılacak deneme sayısına deney matrisinin momentlerine bakılarak karar verilmektedir. Bu sayısının belirlenmesi ilerleyen aşamalarda anlatılacaktır.

Daha öncede bahsedildiği gibi deney desenlerinde olması istenen en önemli özelliklerden iki tanesi, ortagonallik ve dönersellik kavramlarıdır. Bu iki özelliğin

MBT de bulunabilmesi için yıldız noktalarının merkeze olan uzaklığı (α) ve merkez noktada yapılan deneme sayısının (n_c) özel olarak belirlenmesi gerekir.

Standart bir MBT'nı ortagonal yapmak veya ortagonalliğe yakın bir tasarım haline getirmek mümkündür. MBT'nin ortagonalliği yıldız noktalarının merkeze olan uzaklığına bağlıdır. Eğer;

$$\alpha = \left\{ \left[(2^k + 2k + n_c)^{1/2} - n_c^{1/2} \right]^2 \frac{n_c}{4} \right\}^{1/4} \quad (2.39)$$

eşitliği dikkate alınarak α değeri belirlendiği takdirde merkezi bileşik tasarım ortagonallik şartını sağlamaktadır. Bu eşitlikte, k faktör sayısını, 2^k faktöriyel deneme sayısını, $2k$ yıldız noktalarındaki deneme sayısını ve n_c de merkez noktadaki deneme sayısını ifade etmektedir.

Dönersellik ise daha önce de bahsedildiği gibi deney tasarımı bölgesi boyunca tahmini varyansın sabit dağılımını sağlamak ve böylelikle cevap değişkenini daha doğru tahmin etmek adına önemli bir kavramdır. Merkezi bileşik deneme deseninin dönersel olabilmesi için;

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (2.40)$$

şartı sağlanmalıdır (Myers ve Montgomery, 2002).

Bir MBT'nin hem dönersel hem de ortagonal olabilmesi için yukarıda geçen iki şartı birden sağlaması gerekir. Bu durumda, eksen noktalarının merkeze olan uzaklıkları (α) belirlendikten sonra merkez noktada yapılacak deney sayısına;

$$n_c = 4\sqrt{2^k} + 4 - 2k \quad (2.41)$$

eşitliği ile karar verilir. Burada n_c 'nin rasyonel değer alması mümkündür. Bu durumda kendisine en yakın tamsayı değerine yuvarlatılır. Örneğin $k = 2$ için $n_c = 9.33$ olmaktadır. Bu durumda $n_c = 9$ olarak kabul edilmelidir.

2.5.2.2 Box-Behnken tasarımları

İkinci derece cevap yüzeyi modellerinin parametrelerinin tahmin edilmesinde kullanılan etkili tasarımlardan biri de 1960 yılında Box ve Behnken tarafından geliştirilen Box-Behnken tasarımları (BBT) Merkezi bileşik tasarımlara kıyasla daha ekonomik bir tasarım sınıfıdır (Köksoy, 2001). Küresel bir tasarım olması, ekonomik

olması ve düşük (-1), orta (0), yüksek (1) olmak üzere sadece üç düzeyde veri gerektirmesi, BBT'nın en önemli avantajlarından biridir. Bu avantajlar nedeniyle BBT en sık kullanılan tasarımlardan biridir.

BBT temel de, tamamlanmamış bir blok tasarımının (incomplete block design) iki düzeyli, çok etkenli bir faktöriyel tasarımla uygun bir şekilde birleştirilmesi ile oluşturulmuştur (Şehirlioğlu, 1997). Tamamlanmamış bloklar oluşturulurken her seferinde sadece iki değişkene yıldız konulmakta bunun dışındaki tüm değişkenler merkez değerinde (0 kodlu değer) sabit tutulmaktadır. Yıldız konulması ilgili iki değişkene olası tüm kombinasyonların (2^2 tam faktöriyel) uygulanacağı anlamına gelmektedir. Box ve Behnken (1960), sadece $k = 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12$ ve 16 adet faktör (bağımsız değişken) için tasarımlar vermişlerdir (Khuri ve Cornell, 1987).

Tasarımın oluşturulma aşamasının daha iyi anlaşılması açısından dört faktörlü bir BBT'nın elde edilmesini çizelgelerle açıklayalım. Çizelge 2.4'de dört faktörlü sistem için tamamlanmamış bir blok tasarım ve Çizelge 2.5'de ise 2^2 tam faktöriyel tasarım gösterilmiştir. Tamamlanmamış blok tasarımda görüldüğü üzere üç adet blok mevcuttur ve bunlar kesikli çizgilerle birbirinden ayrılmış durumdadırlar. BBT oluşturulurken 2^2 tam faktöriyel tasarımlar tamamlanmamış bloklarda iki yıldız yerine konumlandırılırlar. Ayrıca her bloğa bütün değişkenlerin orta seviyelerinde olduğu (0 0 ... 0) deney noktası ilave edilir. Böylece Çizelge 2.6'da verilen deney tasarımı düzeni, yani deney noktaları elde edilir.

Çizelge 2.4 : Tamamlanmamış blok tasarım.

X_1	X_2	X_3	X_4
*	*		
		*	*
.....			
*			*
	*	*	
.....			
	*		*
*		*	

Çizelge 2.5 : 2^2 tam faktöriyel tasarım.

X_i	X_j
-1	-1
1	-1
-1	1
1	1

Çizelge 2.6 : 4 değişkenli bir Box-Behnken tasarımı.

X_1	X_2	X_3	X_4	
-1	-1	0	0	BLOK 1
1	-1	0	0	
-1	1	0	0	
1	1	0	0	
0	0	-1	-1	
0	0	1	-1	
0	0	-1	1	
0	0	1	1	
0	0	0	0	
-1	0	0	-1	BLOK 2
1	0	0	-1	
-1	0	0	1	
1	0	0	1	
0	-1	-1	0	
0	1	-1	0	
0	-1	1	0	
0	1	1	0	
0	0	0	0	
0	-1	0	-1	BLOK 3
0	1	0	-1	
0	-1	0	1	
0	1	0	1	
-1	0	-1	0	
1	0	-1	0	
-1	0	1	0	
1	0	1	0	
0	0	0	0	

Aynı mantık ile üç faktörlü bir sistem için de tasarım matrisi oluşturulabilir. Üç faktörlü tasarım matrisi için tamamlanmamış blok tasarımı Çizelge 2.7’de ve bu tamamlanmamış blok ile Çizelge 2.5’de verilen 2^2 tam faktöriyel tasarım

kullanılarak hazırlanmış Box-Behnken deney tasarımı matrisi Çizelge 2.8’de verilmiştir.

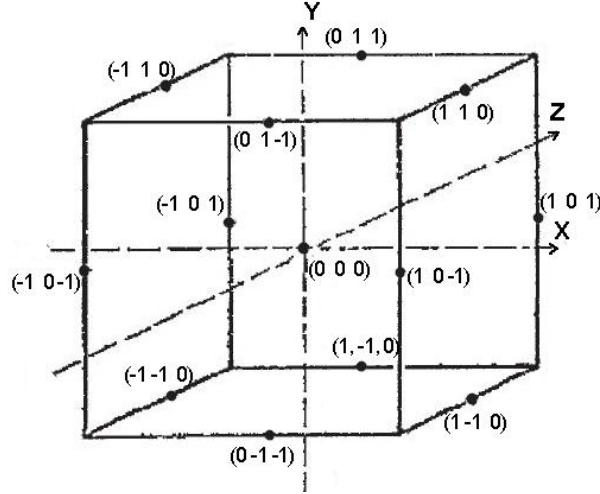
Çizelge 2.7 : Tamamlanmamış blok tasarım.

X_1	X_2	X_3
*	*	
*		*
	*	*

Çizelge 2.8 : Üç değişkenli bir Box-Behnken tasarım.

X_1	X_2	X_3
-1	-1	0
1	-1	0
-1	1	0
1	1	0
-1	0	-1
1	0	1
-1	0	-1
1	0	1
0	-1	-1
0	1	-1
0	-1	1
0	1	1
0	0	0
0	0	0
0	0	0

Ayrıca deney noktalarının tam olarak anlaşılabilmesi için üç faktörlü bir sistem için deney noktalarının geometrik yerleri Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Box-Behnken deney tasarımında üç değişkenli bir sistem için deney noktaları örneği.

BBT döndürülebilirdir ve Çizelge 2.4 ile Çizelge 2.6’da görülen noktalı çizgiler ile ayrılmış üç blokta blok ortagonaldır. Ayrıca BBT, dik bloklama (orthogonally blocked) özelliğini taşımaktadır, diğer bir değişle ikinci dereceden modelin parametre tahminleri blok etkisinden etkilenmezler (Köksoy, 2001).

BBT için deneme noktasının sayısı,

$$N = 2k(k - 1) + n_c \quad (2.42)$$

denklemleriyle belirlenmektedir. Bu denklemde k faktör sayısını n_c merkezi deneme sayısını belirtmektedir (Ferreira ve diğ, 2007).

Tasarımda Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.7’den de anlaşılabacağı üzere tüm etkenler için alt ve üst sınırlar aynı anda hiçbir zaman kapsamazlar, böylelikle uç değerlerin yaratacağı tatmin edici olmayan sonuçlar da engellenmiş olur.

Özetle BBT, ikinci dereceden modellerin tahminine, ardışık (sequential) tasarımların kurulumuna, modelin güven eksikliğinin analizine ve bloklara izin verdiği için yaygın bir şekilde kullanılan bir cevap yüzeyi tasarımıdır. Genele olarak, biyoloji, biyo-teknoloji, kimya, kimya mühendisliği, çevre, gıda teknolojileri, imalat ve eczacılık gibi alanlarda oldukça sık kullanılmaktadır (Tania ve Deborah, 2002). Bu çalışma kapsamında yapılan gıda sektöründeki bir uygulama için de Box-Behnken deney tasarımı kullanılmıştır.

3. ÇOK YANITLI CEVAP YÜZEYİ YÖNTEMLERİ

Cevap yüzeyi çalışmaları 1950'li yıllarda başladığında tek cevap ile ilgilenilmiştir (Myers ve diğ, 1989). Ancak CYY gün geçtikçe daha çeşitli ve karmaşık alanlarda uygulanmaya başlanmasıyla tek cevaplı yaklaşımlar yeterli görülmemeye başlanmıştır. CYY uygulamaları genellikle bir ürünün, hizmetin veya komple bir sistemin kalitesini arttırmak, daha yüksek performanslı ve daha düşük maliyetli olmasını sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçlar göz önüne alındığında süreç veya ürün iyileştirme çalışmalarında tek bir kriterin iyileştirilmesi yeterli görülmemeyerek, kalite, maliyet ve performans temelli birçok kriterin aş zamanlı olarak optimize edilmesi istenmiştir. Bu gelişmeler çok yanıtli cevap yüzeyi problemlerini ortaya çıkarmış ve araştırmacıları bu probleme çözüm bulmaya yöneltmiştir.

Çok cevaplı bir deneyden elde edilen veriler analiz edilirken, verilerin çok değişkenli yapısı dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır. Diğer bir deyişle, cevap değişkenleri bireysel ve diğerlerinden bağımsız olarak incelenmemelidir. Cevaplar arasında var olabilecek ilişkiler, bu tip tek değişkenli incelemelerin anlamsız olmasına neden olabilmektedir. Bu durumda, birden çok cevap fonksiyonu eş zamanlı olarak optimize edilmek isteniyorsa, ayrı ayrı optimumların elde edilmesi anlamsızdır. Bir cevap için optimal olan faktör seviyeleri, diğer cevaplar için optimumdan oldukça uzak olabilirler.

Temelde çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak düşünülebilecek çok yanıtli cevap yüzeyi problemlerinin çözümü için keşifsel bir yaklaşım olarak, tüm cevapların eş yükselti eğrilerinin üst üste koyularak, faktör seviyelerinin tüm cevaplar için yaklaşık optimum olduğu bir bölge belirlenebilir (Lind ve diğ, 1960). Bununla birlikte, bu prosedür, çok sayıda girdi değişkeni ve cevap içeren sistemlerde sınırlıdır. Bundan başka, bir koşullar setini (veya deney bölgesindeki bir noktayı) böyle bir prosedür ile optimum olarak tanımlamak zordur. Çok yanıtli cevap yüzeyi problemlerine çözüm arayan ilk çalışmalara bakıldığında, klasik çoklu varyans analizi ve cevap yüzeyi yöntemleri göze çarpmaktadır. Daha sonraki yıllarda bu konuyla ilgili, hedef programlamadan çoklu regresyon analizine, sezgisel

algoritmalarından Taguchi'nin kayıp fonksiyonuna kadar birçok teknik, yöntem ve algoritma kullanılmış ve oldukça kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmaları genel olarak, istatistiksel tabanlı ve yöneylem araştırmasına dayanan çalışmalar olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

3.1 İstatistik Tabanlı Yöntemler

İstatistiksel temelli çalışmalara bakıldığında en belirgin başlıklar, istenebilirlik fonksiyonu, kayıp fonksiyonu, uzaklık fonksiyonu, çoklu regresyon modeli olarak göze çarpmaktadır. Derringer ve Suich (1980) durağan bir deneyde çoklu cevap değişkenlerini optimize etmek için istenebilirlik fonksiyonunu kullanmışlardır. Logothesis ve Haigh (1988), 5 cevaplı bir cevap yüzeyi çalışmasında optimizasyon için çoklu regresyon tekniği ve doğrusal programlama yaklaşımını kullanarak bir çözüm üretmişlerdir. Layne (1995) ise, optimum parametre kombinasyonunu elde edebilmek için, ağırlıklandırılmış kayıp fonksiyonu (weighted loss function), istenebilirlik fonksiyonu ve bir uzaklık fonksiyonu olmak üzere üç yöntemi aynı anda içeren bir yöntem geliştirmiştir.

Su ve Tong (1997), çoklu cevap problemlerinin çözümü için temel bileşenler analizi yöntemini kullanmışlardır. İlk olarak, her cevabın kalite kaybı standartlaştırılmış, daha sonra temel bileşenler analizi kalite kayıplarını daha aza indirmek için kullanılmış ve sonrasında optimum parametre kombinasyonu, standartlaştırılmış kalite kaybının toplamının maksimum yapılmasıyla elde edilmiştir. Bu çalışmada, nominal en iyidir yapısı gerektiği için, bu yöntemin uygulama alanı kısıtlıdır.

Kim ve Lin (2000), üstel istenebilirlik fonksiyonu kullanarak çoklu cevap problemini çözme yöntemi geliştirmiştir.

3.2 Yöneylem Araştırmasına Dayanan Yöntemler

Yöneylem araştırması temeline dayanan çalışmalar ise genel olarak kısıtlanmış optimizasyon ve sezgisel yöntemler başlıkları altında incelenebilir. Kısıtlanmış optimizasyon teknikleri ile ilgili çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ancak sezgisel yöntemlerin bu alanda yoğun bir şekilde kullanıldığı söylenebilir. Bilgisayar ve programlama yöntemlerinin gelişmesi ile hesaplama yoğunluğunu içeren bu yöntemlerin kullanımı kolaylaşmış ve 2000'li yıllarından başından itibaren en çok

Çalışılan konular arasına girmişlerdir. Bu yöntemler, pratikte karşılaşılan sorunların problemlere daha kolay aktarılabilmesi nedeniyle istatistiksel tekniklerden daha avantajlı olarak görülmüşler ve çok sık kullanılmışlardır.

Bu konuda yapılan çalışmalara bakıldığında şu örnekler verilebilir. Lai ve Chang (1994), uygun bir kombinasyon ya da işlem parametresi düzenini bulmak için bulanık çoklu cevap optimizasyon yöntemini geliştirmiştir. Kim ve diğ. (2001), öncelik-temelli olarak isimlendirdikleri yaklaşımlarında en önemli cevap, karar verici tarafından amaç fonksiyonu olarak kullanılmış ve geri kalan cevaplar kısıtlamalar olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşımın temel dezavantajı, tüm cevaplar aynı anda göz önüne alındığında çoklu cevap yüzeyi optimizasyonunun temel düşüncesine uyumlu olmamasıdır. Buna ilaveten amaç fonksiyonu olarak bir cevabın seçilmesi tüm durumlarda kolay olamamaktadır.

Hsieh (2006), çözüm için yapay zeka yöntemini önermiştir. İşlem parametresi ve cevabı arasındaki doğrusal olmayan ilişki bu yöntemde çok iyi bir biçimde modellenmiş ve ek olarak, sürekli parametre düzenlemeleri de bu yöntemde elde edilmiştir. Bu alışmaları anlattıktan sonra şu belirtilmelidir ki; Genetik Algoritmalar (GA), Tavlama Benzetimi (TB), Tabu Arama (TA) gibi sezgisel araştırma algoritmaları, önemli derecede doğrusal olmayan, kompleks ve kötü huylu yüzeyler için kullanılabilir.

3.3 İstenebilirlik Fonksiyonu Yaklaşımı

İstenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı çok cevaplı bir cevap yüzeyi problemini ele almada kullanılan en etkin yöntemlerden bir tanesidir. Bu yaklaşım ile temel olarak yapılan şey, çok cevaplı bir cevap yüzeyi probleminin, matematiksel dönüşümler kullanılarak tek cevaplı bir problem durumuna getirilmesidir. Bu yöntem cevap değişkenlerinin ağırlıklandırılmasına da izin verdiği için sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, nitel veriler için, özgün istenebilirlik fonksiyonlarının kullanılması ilk olarak 1965 yılında Harrington tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem daha sonra Derringer ve Suich (1980) tarafından geliştirilmiştir.

3.3.1 Tekil istenebilirlik

İstenebilirlik fonksiyonu yaklaşımında öncelikle her bir nitel cevap değişkeni için tekil (bireysel) istenebilirlik değerleri hesaplanır ve daha sonra bu tekil istenebilirlik değerleri ağırlıklar da göz önünde bulundurularak bir araya getirilir.

Harrington (1965) tarafından tanımlanan istenebilirlik fonksiyonu, cevap bir aralık (bölge) içerisinde aranıyor ise;

$$d_j \left(\hat{Y}'_j(x) \right) = \exp(-|\hat{Y}'_j|^n) \quad (3.1)$$

$$\hat{Y}'_j = \frac{2\hat{Y}_j - (Y_{maxj} + Y_{minj})}{Y_{maxj} - Y_{minj}} \quad (3.2)$$

şeklindedir. Eğer cevap en büyüklenmek ya da en küçüklenmek isteniyorsa, Harrington (1965) istenebilirlik fonksiyonunu;

$$d_j \left(\hat{Y}'_j(x) \right) = \exp(-|\hat{Y}'_j|) \quad (3.3)$$

$$\hat{Y}'_j = b_{0j} + b_{1j}Y_j \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlamıştır. Eşitlik 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4'de $\hat{Y}'_j$, $j = 1, 2, \dots, m$ j. cevap değişkenini n ağırlığı, Y_{maxj} , Y_{minj} j. cevap için sırasıyla en büyük ve en küçük cevap değerini b_{0j} j. cevap değişkeni için regresyon eşitliğindeki sabit katsayıyı b_{1j} j. cevap ya da çıktı için regresyon eşitliğindeki birinci dereceden katsayıları göstermektedir.

Derringer ve Suich (1980) tarafından önerilen istenebilirlik fonksiyonu ise, $d_t \left(\hat{Y}_t(x) \right)$, $(t = 1, 2, \dots, m)$ istenebilirlik değerini göstermek üzere, eğer $\hat{Y}_t(x)$ cevap değişkeni en büyüklenmek isteniyorsa,

$$d_t \left(\hat{Y}_t(x) \right) = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_t < A_t \\ \left(\frac{\hat{Y}_t - A_t}{U_t - A_t} \right)^{s_t}, & A_t \leq \hat{Y}_t \leq U_t \\ 1, & \hat{Y}_t > U_t \end{cases} \quad (3.5)$$

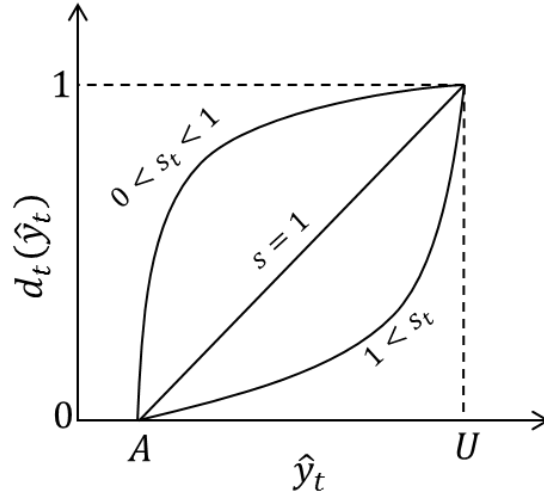
şeklinde, eğer ilgili cevap değişkeni en küçüklenmek isteniyorsa,

$$d_t(\hat{y}_t(x)) = \begin{cases} 1, & \hat{Y}_i < A_t \\ \left(\frac{U_t - \hat{Y}_t}{U_t - A_t}\right)^{l_t}, & A_t \leq \hat{Y}_t \leq U_t \\ 0, & \hat{Y}_t > U_t \end{cases} \quad (3.6)$$

şeklinde, eğer cevap değişkeninin nominal bir değerde olması isteniyorsa,

$$d_t(\hat{Y}_t(x)) = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_t < A_t \\ \left(\frac{\hat{Y}_t - A_t}{T_t - A_t}\right)^{a_t}, & A_t \leq \hat{Y}_t \leq T_t \\ \left(\frac{U_t - \hat{Y}_t}{U_t - T_t}\right)^{b_t}, & T_t \leq \hat{Y}_t \leq U_t \\ 0, & \hat{Y}_t > U_t \end{cases} \quad (3.7)$$

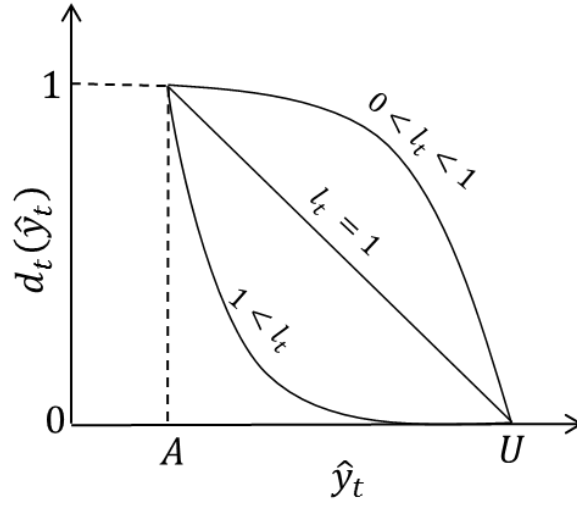
şeklinde tanımlanmıştır. Bu eşitliklerde, $\hat{Y}_t$, $t = 1, 2, \dots, m$ t. cevap değişkenini, A_t , U_t ve T_t sırasıyla t. cevap değişkeni için alt sınır, üst sınır ve hedef değeri ifade etmektedir. Eşitliklerdeki s_t , l_t , a_t ve b_t değerleri ise ağırlıkları ifade etmektedirler. Eşitlik 3.5’de s_t ağırlığının aldığı değere göre cevap değişkenindeki değişimin istenebilirlik değeri üzerinde oluşturduğu değişiklik Şekil 3.1’deki grafikte gösterilmiştir. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere eğer $d_t(\hat{Y}_t)$ değerinin istenilen değere çok yakın olması isteniyorsa s_t değeri yüksek seçilmelidir.



Şekil 3.1 : s_t ağırlığının aldığı değerlere göre $\hat{Y}_t$ ile $d_t(\hat{Y}_t)$ arasındaki ilişki.

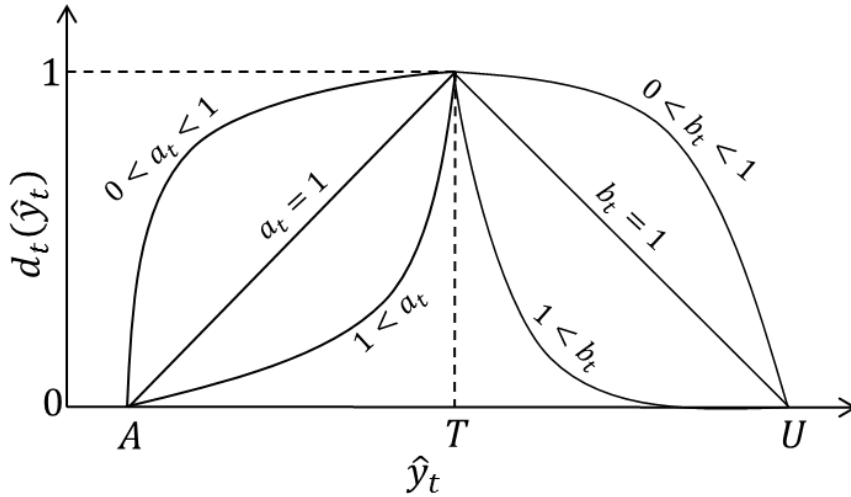
Cevap değişkeni en küçüklenmek istenildiği zaman kullanılacak olan Eşitlik 3.6’da l_t ağırlığının aldığı değere göre cevap değişkenindeki değişimin istenebilirlik değeri üzerinde oluşturduğu değişiklik Şekil 3.2’de verilen grafikte gösterilmiştir. Bu

grafikten de aynı şekilde eğer $d_t(\hat{Y}_t)$ değerinin hedef değere çok yakın olması isteniyorsa l_t ağırlık değerinin yüksek seçilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.2 : l_t ağırlığının aldığı değerlere göre $\hat{Y}_t$ ile $d_t(\hat{Y}_t)$ arasındaki ilişki.

Son olarak cevap değişkeninin belirli bir hedef değerde (T) olması istenildiği zaman kullanılacak olan Eşitlik 3.7'deki a_t ve b_t ağırlıklarının aldığı değere göre cevap değişkenindeki değişimin istenebilirlik değeri üzerinde oluşturduğu etki Şekil 3.3'deki grafikte gösterilmiştir. Bu grafikten de aynı şekilde eğer $d_t(\hat{Y}_t)$ değerinin istenilen değere çok yakın olması isteniyorsa a_t ve b_t değerlerinin yüksek seçilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.3 : a_t ve b_t ağırlığının aldığı değerlere göre $\hat{Y}_t$ ile $d_t(\hat{Y}_t)$ arasındaki ilişkinin grafiği.

Diğer durumlarda ise s_t , l_t , a_t ve b_t ağırlık değerleri uygulayıcının isteği ve problemin gerektirdiği durumlar karşısında çeşitli değerler almaktadır.

3.3.2 Bileşik İstenebilirlik

Her bir nitel cevap için tekil istenebilirlik değerleri hesaplandıktan sonra bu değerlerin belli ağırlıklarla bir araya getirilmesi gerekir. Böylelikle bütün cevapları belli ağırlıklarla sağlayan optimum faktör değerleri elde edilebilir. Bireysel istenebilirlik değerlerini bir araya getirme konusunda farklı yaklaşımlar vardır. Derringer ve Suich (1980) toplam istenebilirliği ($D_{DS}(x)$), her bir cevap için istenebilirlik değerlerinin ($d_i(\hat{y}_i)$) geometrik ortalaması olarak tanımlamışlardır. Buna göre toplam istenebilirlik;

$$D_{DS}(x) = [d_1(\hat{Y}_1) * d_2(\hat{Y}_2) * ... * d_m(\hat{Y}_m)]^{\frac{1}{m}} \quad (3.8)$$

eşitliği ile bulunabilir. Eşitlik 3.5, 3.6 ve 3.7 ile hesaplanan istenebilirlik değerleri $0 < d_t(\hat{Y}_t) < 1$ aralığındadır. Cevap değeri istenen değere ne kadar yakınsa istenebilirlik değeri de 1'e o kadar yakın olacaktır. $d_t(\hat{Y}_t)$ değerine bağlı olarak $D_{DS}(x)$ değeri de 0 ile 1 aralığında olacaktır. Derringer ve Suich (1980)'ın geometrik ortalama kullanılma sebebi, cevap değişkenlerinden herhangi bir tanesi kabul edilemez bir değer alırsa, istenebilirlik değeri 0 olacağından, toplam istenebilirlik değerinin de 0 değerine ulaşabilmesidir.

Derringer ve Suich (1980)'ın tanımladığı geometrik ortalama dışında diğer çalışmalarda kullanılan farklı toplam istenebilirlik fonksiyonları şunlardır;

$$D_{min}(x) = (\min d_i, i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.9)$$

$$D(x) = 1/m \left(\sum_{t=1}^m d_t \right) \quad (3.10)$$

3.4 Doğrusal Olmayan Optimizasyon Modeli Yaklaşımı

Doğrusal (birinci dereceden) modeller, veri toplama, analiz etme ve optimizasyon açısından daha kolay olmalarına karşın, çoğu zaman gerçek hayat problemlerini veya süreçlerini temsil etmek konusunda yetersiz kalırlar. Bu nedenle çoğu zaman ikinci hatta daha yüksek derece modellere ihtiyaç duyulur. Bu noktada deneylerin

maliyetleri de göz önünde bulundurularak karar vermek daha doğru olacaktır. Çünkü birinci derece bir model kurulmak istendiğinde her faktör için iki seviyede veri toplamak yeterli olurken, ikinci derece bir model için en az üç seviyeli ve üçüncü derece bir model için ise en az dört seviyeli veri toplanmalıdır.

İki veya daha yüksek dereceli bir model kurulduğunda, optimum faktör seviyelerini, yani cevap değişkeninin istenen değerde olmasını sağlayacak faktör kombinasyonunu bulmak için kareli ve etkileşimli terimleri içeren bir fonksiyonun (regresyon eğrisi) irdelenmesi gerekmektedir. En Küçük Kareler veya başka bir yöntemle elde edilen bu fonksiyonların diferansiyellenebilir olmaması, yerel minimum veya maksimumlara sahip olması durumu gibi nedenler cevap değişkeninin arzu edilen değerde olmasını sağlayacak optimum faktör seviyelerini bulmak konusunda araştırmacıları zorlamaktadır.

ÇYCY'Y'nde ise iki veya daha fazla dereceli modellerin birlikte optimizasyonu çok daha karmaşık ve zor olmaktadır. Bunun nedenleri;

- Cevap değişkenlerinden her biri farklı birimlerde ve farklı büyüklüklerde olması,
- Farklı cevap değişkenlerinin farklı hedeflere ulaştırılmak istenmesi, yani bir cevap değişkeninin en küçüklenmesi istenirken, diğer bir cevap değişkeninin en büyüklenmek, bir başkasının ise hedef bir değere ulaştırılmak istenmesidir.

Farklı birimlere ve büyüklüklere sahip, farklı hedeflere ulaşması istenen yanıt değişkenlerinin birlikte optimizasyonu temelde çok amaçlı bir karar problemini oluşturmaktadır. Buradaki ilk problem cevap değişkenlerinin ortak bir skalaya dönüştürülmesi ve ortak bir hedefe yönlendirilmesidir. Bu konuda, Derringer ve Suich (1980) tarafından geliştirilen ve Bölüm 3.3'de açıklanan istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı oldukça etkili bir yöntemdir. Bu yaklaşım sayesinde, en küçük en iyidir, en büyük en iyidir ve hedef değer en iyidir, şeklindeki farklı cevap değişkenlerinin istenebilirlik değerlerinin hesaplanması ile hepsi en büyük en iyidir şeklinde bir yapıya dönüşmektedirler. Ayrıca bu yöntem ile cevap değişkenlerinin değerleri ve birimleri ne olursa olsun, istenebilirlik değerleri 0 ile 1 arasında olmaktadır.

ÇYCY'Y'nde farklı cevap fonksiyonları bir araya getirilip aynı hedefe yönlendirildikten sonra ikinci aşama, elde edilen bileşik istenebilirlik değerini

optimum yapan faktör kombinasyonlarını belirlemektir. Kesikli bir yapıda olan ve lineer olmayan bu fonksiyonların optimizasyonu için literatürde genellikle, yapay sinir ağları veya sezgisel yaklaşımların kullanıldığı göze çarpmaktadır. Ancak tezin bu kısmında ilgilenilen optimizasyon probleminin, doğrusal olmayan programlama ile çözülebilmesi için, parçalı fonksiyonların çeşitli kısıtlar kullanılarak ifade edildiği bir doğrusal olmayan programlama modeli önerilmektedir.

$\hat{Y}_1, \hat{Y}_2, \dots, \hat{Y}_t$, ($t = 1, 2, \dots, m$) olmak üzere m adet cevap değişkeni olduğunu düşünelim. Herhangi bir t cevap değişkeni için faktör seviyelerine göre cevap değerini veren ikinci dereceden fonksiyonu şu şekilde ifade edelim;

$$Y_t = \beta_{t0} + \sum_{i=1}^k \beta_{ti} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{tii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{tij} X_i X_j \quad (3.11)$$

f indisi ile gösterilen F kümesi bütün cevap değişkenlerini içeren ve t indisi ile gösterilen T kümesinin bir alt kümesi olsun ($F \subset T$) ve en büyüklenmek istenen bütün cevap değişkenlerini içersin. En büyüklenmek istenen cevap değişkenlerinin istenebilirlik değerlerini hesaplamak için Derringer ve Suich (1980) tarafından önerilen istenebilirlik fonksiyonu,

$$d_f = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_f < A_f \\ \left(\frac{\hat{Y}_f - A_f}{U_f - A_f} \right)^{s_f}, & A_f \leq \hat{Y}_f \leq U_f \\ 1, & \hat{Y}_f > U_f \end{cases} \quad (3.12)$$

şeklindedir. Bu tip cevap değişkenleri için istenebilirlik değeri Eşitlik 3.12 de kullanılarak şu matematiksel model ile hesaplanabilir;

$$\text{Max } d_f \quad (3.13)$$

$$Y_t = \beta_{t0} + \sum_{i=1}^k \beta_{ti} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{tii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{tij} X_i X_j \quad (3.14)$$

$$\alpha_f = \left(\frac{\hat{Y}_f - A_f}{U_f - A_f} \right)^{s_f} \quad (3.15)$$

$$d_f \leq \alpha_f \quad (3.16)$$

$$d_f \leq 1 \quad (3.17)$$

$$A_f \leq \hat{Y}_f \quad (3.18)$$

$$L_f \leq X_f \leq H_f \quad (3.19)$$

p indisi ile gösterilen P kümesi ise bütün cevap değişkenlerini içeren T kümesinin bir alt kümesi olsun ($P \subset T$) ve en küçüklenmek istenen bütün cevap değişkenlerini içersin. En küçüklenmek istenen cevap değişkenlerinin istenebilirlik değerlerini hesaplamak için Derringer ve Suich (1980) tarafından önerilen istenebilirlik fonksiyonu,

$$d_t = \begin{cases} 1, & \hat{Y}_t < A_t \\ \left(\frac{U_t - \hat{Y}_t}{U_t - A_t} \right)^{l_t}, & A_t \leq \hat{Y}_t \leq U_t \\ 0, & \hat{Y}_t > U_t \end{cases} \quad (3.20)$$

şeklindedir. Bu tip cevap değişkenleri için istenebilirlik değeri ise Eşitlik 3.20 de kullanılarak şu matematiksel model ile hesaplanabilir;

$$\text{Max } d_p \quad (3.21)$$

$$Y_t = \beta_{t0} + \sum_{i=1}^k \beta_{ti} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{tii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{tij} X_i X_j \quad (3.22)$$

$$\alpha_p = \left(\frac{U_p - Y_p}{U_p - A_p} \right)^{l_p} \quad (3.23)$$

$$d_p \leq \alpha_p \quad (3.24)$$

$$d_p \leq 1 \quad (3.25)$$

$$\hat{Y}_p \leq U_p \quad (3.26)$$

$$L_p \leq X_p \leq H_p \quad (3.27)$$

Aynı şekilde, r indisi ile gösterilen R kümesi ise bütün cevap değişkenlerini içeren T kümesinin bir alt kümesi olsun ($R \subset T$) ve önceden belirlenmiş bir hedef değerde olması istenen bütün cevap değişkenlerini içersin. Nominal bir değerde olması istenen cevap değişkenlerinin istenebilirlik değerlerini hesaplamak için Derringer ve Suich (1980) tarafından önerilen istenebilirlik fonksiyonu,

$$d_t = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_t < A_t \\ \left(\frac{\hat{Y}_t - A_t}{T_t - A_t} \right)^{a_t}, & A_t \leq \hat{Y}_t \leq T_t \\ \left(\frac{U_t - \hat{Y}_t}{U_t - T_t} \right)^{b_t}, & T_t \leq \hat{Y}_t \leq U_t \\ 0, & \hat{Y}_t > U_t \end{cases} \quad (3.28)$$

şeklindedir. Bu tip cevap değişkenleri için istenebilirlik değeri Eşitlik 3.28 de kullanılarak şu matematiksel model ile hesaplanabilir;

$$Max d_r \quad (3.29)$$

$$Y_t = \beta_{t0} + \sum_{i=1}^k \beta_{ti} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{tii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{tij} X_i X_j \quad (3.30)$$

$$\alpha_r = \left(\frac{\hat{Y}_r - A_r}{T_r - A_r} \right)^{a_r} \quad (3.31)$$

$$\beta_r = \left(\frac{U_r - \hat{Y}_r}{U_r - T_r} \right)^{b_r} \quad (3.32)$$

$$d_r \leq \alpha_r \quad (3.33)$$

$$d_r \leq \beta_r \quad (3.34)$$

$$A_r \leq \hat{Y}_r \leq U_r \quad (3.35)$$

$$L_r \leq X_r \leq H_r \quad (3.36)$$

Birçok yanıtın olduğu, çoklu cevap yüzeyleri ise Derringer ve Suich (1980) tarafından tanımlanan bileşik istenirlik fonksiyonu yardımıyla şu şekilde modellenebilir;

$$Max (d_1 * d_2 * ... * d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (3.37)$$

$$Y_t = \beta_{t0} + \sum_{i=1}^k \beta_{ti} X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{tii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{tij} X_i X_j \quad (3.38)$$

$$\alpha_f = \left(\frac{\hat{Y}_f - A_f}{U_f - A_f} \right)^{s_f} \quad (3.39)$$

$$d_f \leq \alpha_f \quad (3.40)$$

$$d_f \leq 1 \quad (3.41)$$

$$A_f \leq \hat{Y}_f \quad (3.42)$$

$$\alpha_p = \left(\frac{U_p - Y_p}{U_p - A_p} \right)^{l_p} \quad (3.43)$$

$$d_p \leq \alpha_p \quad (3.44)$$

$$d_p \leq 1 \quad (3.45)$$

$$\hat{Y}_p \leq U_p \quad (3.46)$$

$$\alpha_r = \left(\frac{\hat{Y}_r - A_r}{T_r - A_r} \right)^{a_r} \quad (3.47)$$

$$\beta_r = \left(\frac{U_r - \hat{Y}_r}{U_r - T_r} \right)^{b_r} \quad (3.48)$$

$$d_r \leq \alpha_r \quad (3.49)$$

$$d_r \leq \beta_r \quad (3.50)$$

$$A_r \leq \hat{Y}_r \leq U_r \quad (3.51)$$

$$L_r \leq X_r \leq H_r \quad (3.52)$$

Bu denklemde amaç fonksiyonu istenebilirlik değerlerinin geometrik ortalaması şeklinde hesaplanmıştır. Bunun nedeni daha önce de belirtildiği gibi herhangi bir cevap değişkeni “0” değerini aldığı anda sonucun sıfır çıkmasının istenmesidir. Ancak amaç değeri aritmetik ortalama olarak hesaplanabilir. Bir başka yaklaşım olarak en küçük istenebilirlik değeri en büyüklenmek istenebilir.

Araştırmacı cevap değişkenlerinin farklı ağırlıklarla ele almak isteyebilir. Yani bazı cevap değişkenleri karar verici için diğer değişkenlere göre daha kritik veya önemli olabilir. Bu durumda amaç fonksiyonunda, cevap değişkenlerini ağırlıklı geometrik

ortalamasını veya ağırlıklı aritmetik ortalamasını kullanmak daha anlamlı olacaktır. Ağırlıklı geometrik ortalama kullanılarak elde edilecek amaç fonksiyonu şu şekilde olacaktır.

$$Max \left(d_1^{w_1} * d_2^{w_2} * ... * d_m^{w_m} \right)^{1/\sum_{t=1}^m w_t} \quad (3.53)$$

Bu eşitlikte w_t , $(t = 1, 2, \dots, m)$ ağırlık değerlerini temsil etmektedir. Ağırlıklı aritmetik ortalama kullanıldığında ise amaç fonksiyonu;

$$Max \left(\sum_{t=1}^m w_t * d_t \right) / \left(\sum_{t=1}^m w_t \right) \quad (3.54)$$

şeklinde olmaktadır.

4. EKMEK NİTELİKLİKLERİ VE ÜRETİM SÜRECİ

4.1 Ekmek ve Ekmek Bileşenleri

Ekmek, un haline getirilmiş hububatlardan özellikle buğday unu kullanılarak hazırlanan hamurun pişirilmesi ile elde edilen bir gıda ürünüdür (Goesaert ve diğ, 2005). Un, su, tuz, maya ve gerekli katkı maddeleri ile yoğurularak hazırlanan hamurun uygun süre fermantasyonu sonrası, kesilip şekil verilmesi ve tekrar kabartıldıktan sonra fırında pişirilmesi ile elde edilen ürüne ekmek denir (Ünal, 1991). Her ne kadar buğday ekmek yapımında kullanılan temel hububat olsa da, farklı tahıllarla da ekmek üretilmektedir (Goesaert ve diğ, 2005).

Maya veya ekşi hamur kullanılarak ekmek üretimi insanoğlunun bildiği en eski ve yaygın teknolojilerden biridir (Linko ve diğ, 1997; Goesaert ve diğ, 2005). Dünyanın pek çok ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de günlük kalorisinin büyük bir kısmı hububat ve ürünlerinden sağlanmaktadır. Özellikle buğdayın temel besin maddesi olma özelliği tarih boyunca olduğu gibi bugün de devam etmektedir. Birçok gıdanın hammaddesi olan buğdayın kullanıldığı en önemli ürün ekmektir (Poutanen, 1997). Binlerce yıldır insan beslenmesinin temel içeriğini oluşturan ekmek, geliştirilen pek çok gıda maddesine rağmen yerini ve önemini korumaktadır (Goesaert ve diğ, 2005).

Ekmek yapımında kullanılan temel madde genellikle buğday unu olsa da; üretimde kullanılan unun, çeşitli katkıların ve üretim metotlarının farklılıklarına göre ekmekler çeşitli şekillerde gruplandırılabilir. Ekmekleri francala ekmeği, sandviç ekmeği ile çeşitli tava ekmekleri gibi dünyada üretilen çeşitleri ve bazlama, yufka ekmek, göçmen ekmeği ile pide ekmekleri gibi ülkemize ait çeşitler olarak da gruplandırmamız mümkündür. Ayrıca, mısır ve çavdar unu gibi çeşitli unların kullanılmasıyla da değişik ekmekler yapılabilmektedir (Özer, 1998).

İnsanlar çok eski zamanlardan beri ekmek yaparken temel maddelerden başka; seker, yağ, bazı baharatlar ve bitkiler gibi çeşitli maddeleri de ekmek yapımında kullanmışlardır. Yani değişik özellik ve yapılarıdaki ekmekleri üretmenin çaresi ve yolu olarak insanlar, imalat yöntemlerinde bazı değişikliklerin geliştirilmesinin ve

ekmek katkı maddeleri diye tanımladığımız doğal veya doğala özdeş, sağlığa zararsız maddelerin kullanılmasının gerekli olduğunun bilincine çok eskilerden beri varmışlardır (Cabı, 1992).

TS 5000 ekmek standardında ekmek katkısız ve katkılı ekmek olarak iki çeşide ayrılmıştır. Katkılı ekmeklerin yapımında una su, tuz ve maya katılmasının yanında kaliteyi yükseltmek amacıyla (görünüşü düzeltmek ya da dayanıklılığı arttırmak, besin değerini yükseltmek, aroma ve çeşni vermek ve/ya da bayatlamayı geciktirmek gibi), izin verilen gıda katkı maddelerinin kullanılabileceği belirtilmektedir.

En temel ekmek bileşenlerinden biri olan su, hamur bileşenlerinin karışmasını ve birbirleriyle kimyasal etkileşime girmelerini sağlayan, hamura arzu edilen visko-elastik yapıyı kazandıran, fermantasyonun başlamasına ve devamına yol açan ve son ürün kalitesi üzerinde etkili olan temel bir bileşendir. Ekmek yapımında kullanılacak su, mikroorganizmalardan arınmış, temiz, renksiz, kokusuz ve orta sertlikte olmalıdır (Pyler, 1988).

Diğer bir temel bileşen olan ekmek mayası ise, hamurda bulunan, basit şekerleri fermantasyona uğratarak, fermantasyon sonucu oluşan CO_2 gazı ile hamurun kabarmasını, fermantasyon ürünü diğer maddelerle de hamurun olgunlaşmasını ve aroma teşekkülünü sağlayan, tek hücreli mikroorganizmalar olan *Saccharomyces cerevisae*'dir (Kent, 1984; Pyler, 1988; Ünal, 1991). Ekmek mayası kendine has tatta olmalı, içerisinde gözle görülebilen yabancı madde bulunmamalı, bozuşmuş veya kokuşmuş olmamalıdır.

Hamur ve ekmeğin başlıca bileşenlerinden olan tuz, ekmeğe tat vermesinin yanı sıra özü yumuşatıcı etkiye sahip proteazların etkinliğini azaltarak özün yumuşamasını önler. Ayrıca, fermantasyon sırasında mayanın çalışmasını dolayısıyla gaz oluşumunu ve hamurun olgunlaşmasını düzenler (Blanshard ve diğ, 1988). Tuz ekmek içi su aktivitesini düşürerek mikrobiyolojik bozulmayı geciktirmek ve küf gelişimini inhibe edici etkisinden dolayı ekmeğin raf ömrünü uzatmak amacıyla da ekmekte kullanılan temel bileşenlerden birisidir. Ekmek yapımında kullanılacak tuz yeterli incelikte, temiz, parlak ve beyaz olmalı, fermantasyonu etkileyecek iyot ve benzeri mineralleri içermemelidir (Özer, 1998).

Kaliteli bir ekmekte; ekmek şekli oval, ekmek rengi açık, parlak kahverengi, kabuğu ince ve çıtır, ekmek yüzeyi pürüzsüz, ekmek içi yumuşak-elastik ve rengi beyaz, iç

gözenekler yaklaşık eşit büyüklükte ve düzgün dağılmış olmalıdır. Ayrıca ekmek tipik kendine özgü tat ve aromada olmalı, çiğnenmesi kolay olmalı, raf ömrü uzun olmalı ve ağızda kalıntı bırakmamalıdır (Öten ve Ünsal, 2006; Gâmbaro ve diğ, 2006; Giannou, 2003; Selinheimo ve diğ, 2006).

Bu şekilde kaliteli bir ekmeğin elde edilebilmesi için ekmeğin temel bileşenlerinin (un, su, tuz, maya, katkı maddeleri) yeterli seviye ve kalitede, yoğurma, fermentasyon ve pişirme süreçlerinin en uygun koşullarda ve sürelerde yapılması gerekmektedir.

4.1.1 Unun nitelikleri ve ekmek kalitesine etkileri

Günümüzde ekmek üretimi çoğunlukla buğday unundan üretildiği için bu başlıkta buğday ununun özellikleri ve ekmek kalitesine olan etkilerinden bahsedilecektir. Buğday unu son derece karışık ve kompozisyonu değişebilen bir madde olup, başlıca bileşenleri proteinler, karbonhidratlar, lipitler, mineral maddeler, vitaminler, su ve enzimler olarak sayılabilir. Her biri farklı önem ve işleve sahip olan bu kimyasal madde gruplarının un içindeki miktarları ve birbirlerine oranlarının yanı sıra iç kompozisyonları da çeşitli etmenlere bağlı olarak büyük değişiklikler göstermektedir (Lazsisty, 1986; Pyler, 1988).

Buğday ununda bulunan proteinlerin başlıcaları ve görece olarak en önemlileri çözünmez proteinler olarak bilinen gliadin ve glutenin ile çözünür proteinler olarak adlandırılan albumin, globulin ve proteozdur. Gliadin ve glutenin proteinleri hamurun yogrulması sırasında özü meydana getirmektedirler (Hoseney, 1983).

Unda bulunan karbonhidratlardan en önemlisi nişasta olup, unun %65-70'ini oluşturmakta ve amiloz ile amilopektin olmak üzere iki farklı fraksiyondan meydana gelmektedir. Unda bulunan diğer karbonhidratlar ise pentozanlar ve selüloz ile bazı mono ve oligosakkaritlerdir.

Lipitler unda miktar olarak az bulunmalarına rağmen ekmek kalitesi ve hacmi üzerinde önemli etkiye sahiptirler. Un lipitlerinden polar galaktolipid ve fosfolipidler hacim artırıcı etki yaparken, monogliserid ve serbest yağ asitleri hacim azaltıcı etki yapmaktadırlar. Trigliseridlerin tek başlarına bir etkileri olmamasına rağmen diğer lipitler ile beraber etkili olmaktadır (Özer, 1998).

Enzimler canlı organizma tarafından üretilen protein tabiatındaki katalizörlerdir. Tahıl tanesinde bulundukları miktar ve fonksiyonları itibariyle en önemli enzim grupları; amilazlar, proteazlar, lipazlar, oksidazlar, fosfatazlar vd. olarak sıralanabilir. Kaliteli unlar birçok enzimi içerse de bu enzimlerin birçoğu çimlenmemiş buğdayda az miktarda bulunmakta ve nem içeriği düşük buğday ve unda inaktif durumdadırlar.

Buğday içerisinde yer alan proteinlerden miktar olarak en çoğu ve ekmek kalitesine olan etkisi bakımından en önemlisi gluten proteinleri yani gliadin ve glutenindir. Bu nedenle protein miktar ve niteliği ile ilgili detaylı bir açıklama yapılacak ve uygulama kısmında unun gluten oranı bir parametre olarak ele alınacaktır. Enzimlerden ise, başta maltoz olmak üzere dekstrinler gibi fermente edilebilir bileşiklerin hamurdaki miktarının artmasını sağladığı ve dolayısıyla da ekmek kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünüldüğü için α amilaz enzimi etkinliği, ne şekilde ölçüldüğü detaylı olarak açıklanacak ve uygulama kısmında bir parametre olarak modele dahil edilecektir.

4.1.1.1 Protein miktar ve niteliği

Proteinler, α ve L amino asitlerinin peptid ve diğer bağları ile meydana getirmiş oldukları yüksek moleküllü bileşiklerdir. Unda bulunan azotlu maddeler bileşim, yapı ve niteliklerine göre Albumin, Globulin, Gliadin ve Glutenin olarak dörde ayrılır. Albumin ve globulinin gerek miktarları (yaklaşık 1%), gerekse nitelikleri ekmek kalitesine etkileri bakımından çok önemli değildir. Gliadin ve glutenin su ile birleştiğinde Gluten (öz) adını verdiğimiz bir madde oluştururlar (Ünal, 1991).

Gluten maddesi hamurun iskeletidir. Fermantasyon sonucunda karbonhidratlardan karbondioksit ve su oluşur. Gluten nişasta hücreleri ile oluşturduğu ağ gibi yapının içinde karbondioksit gazını tutarak hamurun kabarmasını sağlar. Karbondioksitin tutulabilme oranı protein miktar ve kalitesine bağlıdır. Bu nedenle gluten proteinlerinin ekmek kalitesine olan etkisi oldukça büyüktür. Kuvvetli unlardan elde edilen glutenler (öz), uzatılmak istendiğinde direnç gösterirler ve bırakıldıkları zaman tekrar eski durumlarına dönerler. Zayıf unların glutenleri (öz) ise, uzama işlemine direnç göstermeyen ve kolayca uzayabilen karakterdedir.

4.1.1.2 Alfa-amilaz enzimi etkinliği

Enzimler, biyokimyasal reaksiyonları hızlandıran protein yapısındaki biyolojik katalizörlerdir. Un bileşenlerini düşük molekül ağırlıklı ünitelere çevirerek hamur viskozitesi ve konsistensinde zaman içinde değişim meydana getirip, fermantasyonu iyileştirerek gaz üretiminde artış sağlayan enzimler sayesinde hamurun işlenebilirliği iyileşmekte ve daha kaliteli ekmeklerin üretimi mümkün olabilmektedir. Enzimlerin fırın ürünlerinde etkileriyle ilgili yayınlanmış makalelerin birçoğu ekmek hacmini, tekstürel yapısını ve raf ömrünü geliştirmesiyle ilgilidir (Poutanen, 1997).

Undaki proteinlerin nitelik ve nicelikleri yanı sıra hamur fermantasyonu için gerekli şekerleri oluşturan amilazların aktivitesi ekmek kalitesine önemli ölçüde etki yapar. Ekmek yapımında amilazların etkisi yoğurma, fermantasyon ve pişirme sırasında önemli olarak devam eder. Enzim miktarı yeterli olduğuunda,

- Karbondioksit gazı oluşumu artar,
- Kabuk rengi istenilen düzeyde olur,
- Bayatlama gecikir,
- Ekmek içi gözenekli yapısı iyi olur,
- Hamurun gaz tutma kapasitesi ve ekmek hacmi artar.

Amilaz enzimlerinden biri olan α amilaz, fırın ürünlerinde kullanılan yaygın enzimlerden biridir. Amilaz enzimleri un içindeki zedelenmiş nişasta üzerine etki etmektedirler. α amilaz nişasta yapısına etki eden ve amiloz ile amilopektinin a-1,4 bağlarını kırarak, düşük molekül ağırlıklı kısa zincirli polisakkaritler oluşturmaktadır (Gray ve Bemiller, 2003; Gâmbaro ve diğ, 2006). Unun α amilaz enzimi ile işlenmesindeki amaç, başta maltoz olmak üzere dekstrinler gibi fermente edilebilir bileşiklerin hamurdaki miktarını arttırmaktır (Doğan, 2003). Nişasta α amilaz enzimi ile maltodekstrinlere, maltodekstrinler de β amilaz ile serbest maltoza parçalanmaktadır. Mayanın hücre içi enzimleri de maltozu glukoza parçalayıp, oluşan basit şekerleri kullanarak hamurun kabarması için gerekli karbondioksit gazını ve alkollerini oluştururlar.

Görüldüğü gibi amilaz enzimleri birlikte çalışarak, daha hacimli ve alımlı kabuk rengine sahip, iç elastikiyeti daha yüksek ve raf ömrü daha uzun ekmeklerin elde edilebilmesini sağlarlar. Her iki amilaz enzimi de kaliteli ekmek üretimi için çok önemli olsa da β amilaz enzimleri buğday unu içerisinde yeterli miktarda

bulunduğundan dolayı genellikle α amilaz enziminin aktivitesi arttırılmaya, yani eksikliği giderilmeye çalışılır. Ancak bu enzimin un içerisinde fazla miktarda bulunması da yetersiz olması durumu gibi sakıncalıdır. Çünkü fazla miktarda α amilaz enzimi ekmek içinin yapışkan olmasına ve dolayısıyla hacimsiz bir ekmeğin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Ekmek yapımında ve hububat sektöründe kullanılan katkı α amilaz enzimleri bakteri, fungi ya da malttan elde edilmektedir. Ekmek üretiminde kullanılan α amilaz aktivitesi elde edildiği kaynağa göre farklılık göstermektedir (Maeda ve diğ, 2003). Fungal enzimler düşük sıcaklıklarda (50-60 $^{\circ}\text{C}$), bakteriyel enzimler ise yüksek sıcaklıklarda (70-80 $^{\circ}\text{C}$) aktif halde çalışabilmektedirler.

4.1.2 Ekmeğin üretim aşamaları

Ekmek üretimi gerek kullanılan tahıl ürünlerinin çeşidinden, gerekse de farklı bölgelerde var olan farklı kültürlerden dolayı küçük farklılıklar arz edebilmektedir. Ancak genel hatlarıyla ele aldığımızda ekmeğin yapılış şekli çok farklı değildir.

Ekmek üretimine ilk olarak malzemelerin yoğurmayı yapacak makina veya herhangi bir kap içerisinde karıştırılması ile başlanır. Hamur için kullanılan malzemelerin oranları bölgeden bölgeye ufak değişiklikler göstermekle birlikte, genel olarak kullanılan unun 1,3%'ü kadar tuz, 4%'ü kadar maya, 60-65%'ü kadar su kullanılır.

Bu malzemeler yoğurma kabında bir araya getirildikten sonra öncelikle yavaş bir şekilde karıştırılırlar. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra ikinci aşama olan yoğurma işlemine geçilir. Yoğurma, malzemelerin birbiri ile etkileşime girdiği ve gluten ağ yapısında önemli reolojik değişimlerin meydana geldiği bir aşamadır. Meydana gelen bu değişimler hamur ve dolayısıyla ekmek kalitesini doğrudan etkilerler.

Yoğurma işleminden sonraki aşama kitle fermantasyonu veya halk arasında dinlendirme olarak da bilinen aşamadır. Bu işlemde hamur yoğurma kazanından alındıktan sonra parçalara ayrılmadan önce 5 dakika kadar dinlendirilir. Bazı ekmek üreticileri bu dinlendirme işlemini yapmadan doğrudan hamuru parçalara ayırıp yuvarlama işlemini yapmaktadır. Kesme ve tartma işleminden sonra yuvarlanan hamur parçaları (pezi) 10 dakikalık bir ara fermantasyona bırakılmaktadırlar.

Bir sonraki aşamada hamura el veya makine ile nihai şekli verilmekte ve son fermantasyon için uzun bir süre beklemeye alınmaktadır. Son fermantasyon süresi ve sıcaklığı ekmek kalitesi için oldukça önemlidir. Zira iyi fermante olamamış hamurdan hacimli ve alımlı bir ekmeğin ortaya çıkması mümkün değildir. Fermantasyon işlemi her ne kadar fırında da devam etse de asıl fermantasyon son fermantasyon süresi olarak adlandırılan bu süre içinde gerçekleşmektedir.

Ekmek üretiminde son ürünün kalitesine, bileşenlerin miktarının ve niteliğinin olduğu kadar, üretim aşamalarının da (yoğurma, yuvarlama, şekil verme, fermantasyon, pişirme) oldukça büyük bir etkisi vardır. Bu nedenle kaliteli bir ekmek üretimi için üretim aşamalarının her biri dikkatle incelenmeli ve optimum şartların ne olması gerektiği araştırılmalıdır. Özellikle değişen un karakteristiklerine göre her bir aşama için optimum üretim parametrelerinin (bileşen oranları, yoğurma süresi, fermantasyon sıcaklığı ve süresi, pişirme sıcaklığı ve süresi) hangi seviyelerde olması gerektiğine karar verilmelidir (Autio ve Laurikainen, 1997).

4.1.3 Üretim parametreleri ve ekmek kalitesine etkileri

4.1.3.1 Su miktarı

Su, hamur bileşenlerinin karışmasını ve birbirleriyle kimyasal etkileşime girmelerini sağlayan, hamura arzu edilen visko-elastik yapıyı kazandıran, fermantasyonun başlamasına ve devamına yol açan dolayısıyla da hamur ve son ürün kalitesi üzerinde oldukça etkili olan temel bir bileşendir. Birçok organik ve inorganik madde için çözücü olan su; hamurda tuz, şeker ve çözünür proteinler gibi hidrofilik bileşenleri çözer ve suda çözünmeyen proteinleri hidrate ederek gluten oluşmasında önemli rol oynar. Ekmek yapımında kullanılacak suyun, mikroorganizmalardan arınmış, temiz, renksiz, kokusuz ve orta sertlikte olması gerekir (Pyler, 1988).

Belirli yapıda hamur elde etmek için una ilave edilmesi gereken su miktarına unun su kaldırma kapasitesi denir. Ünal (1991), unun su kaldırma kapasitesinin içerdiği kuru gluten miktarı ile ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca unun su kaldırma kapasitesinin undaki zedelenmemiş nişasta miktarı ve un zerrecilerinin büyüklüğüne de bağlı olabileceği düşünülmektedir.

4.1.3.2 Yoğurma süresi

Ekmek yapımında ilk aşama buğday unu, su, tuz ve mayanın belirli oranlarda karıştırılarak gerekli koşullarda uygun süre yoğurulmasıyla hamur elde edilmesidir. Yoğurmanın amacı ekmek formülasyonunda kullanılan bileşenlerin bir araya getirilip, homojen bir karışım meydana getirerek gluten ağı yapısını oluşturmaktır (Autio ve Laurikainen, 1997). Yoğurma, gluten proteinlerinin sülfidril (SH) ve disülfid grupları üzerinde etkisi olan bir işlemdir.

Yoğurma esnasında, unda bulunan polimerlerin kimyasal modifikasyonu sayesinde hamur meydana gelmektedir. İlave edilen su, protein moleküllerinin hidrofilik grupları ve nişasta tarafından emilmektedir. Her ne kadar bazı un proteinleri suda çözünür olsa da, çözünmeyen proteinler üzerinde yapılan çalışmalar su ve undan nasıl hamur meydana geldiğini açıklamaktadır (Scanlon ve Zghal, 2001). Yoğurucuda gelişen hamur kütlesi içindeki unda bulunan yağ ve karbonhidrat içerikleriyle kompleks oluşturan protein yapısı havayı, nişasta granüllerini ve küçük boyuttaki kepek parçalarını hapsederek viskoelastik bir yapı oluşturur (Scanlon ve Zghal, 2001).

4.1.3.3 Son fermantasyon süresi ve sıcaklığı

Fermantasyon, hamurun şekillendirildikten sonra fırına atılncaya kadar geçen evresidir. Bu sürede şekil verilmiş hamurlar genellikle buhar odalarında belirli bir süre beklerler. Buhar odalarında fermantasyon süresi genellikle 45- 75 dakika arasında değişmektedir.

Bu süre boyunca, glutenin kolloidal yapısı maya fermantasyonu ile oluşan gazı tutarak hamurun hacim kazanmasını sağlamaktadır (Ünal, 1991). Hamur yapısı içinde birkaç mikrometre çapa sahip küçük gaz hücreleri büyük hücrelerin arasına yerleşmiş durumdadır (Autio ve Laurikainen, 1997). Fermantasyon sırasında oluşan asitler glutenin su absorbe etmesine neden olur. Böylece gluten daha yumuşak, elastiki, CO₂ gazını geçirmeyecek bir yapıya dönüşür (Ünal, 1991). Gaz hücrelerinin kapasitesi ve direnci, ekmeğin içyapısı ve hacmini etkilemesi açısından oldukça önemlidir (Autio ve Laurikainen, 1997).

Son fermantasyon evresinde hamurun gözenek yapısının oluşması istenir. Ancak bu süre iyi dengelenmelidir. Amaç bekleme sırasında hamurun bünyesinde karbondioksit gazının oluşması ve bu gazı hamurun tutmasını sağlamaktır. Zaman

çok uzun olursa gluten oluşan gazı tutamaz ve bazı gaz hücreleri birleşir. Bunun sonucunda ekmekte oyuklar görülür. Böylelikle düzgün bir gözenek yapısı elde edilemez.

Fermantasyonun gerçekleştirildiği ortamın sıcaklığı da ekmek kalitesi üzerinde süre kadar önemli bir faktördür. Olması gereken sıcaklık değerlerin üzerine çıkıldığı zaman, hamurlar mayanın süratli çalışması sonucu aşırı büyür ve yayılır. Bu şekilde fermantasyonu yapılmış hamurlar pişirildiğinde, soluk renkli, hacimsiz (kabarmamış) ve yüzeyinde çatlaklar bulunan ekmekler elde edilir. Sıcaklık düşük olduğu zaman da un ve maya içerisindeki enzimler iyi çalışamayacağından dolayı ekmek yeterince hacimli ve alımlı olamayacaktır.

4.1.3.4 Pişirme sıcaklığı ve süresi

Pişirme ekmek üretiminin son aşaması olarak nitelendirilebilir. Sıcaklığın etkisi ile tadı hoş olmayan hamur kitlesi; lezzetli, hazmı kolay, iştah açıcı, süngerimsi bir kitleye dönüşür. Ekmeğin pişmesi sırasında meydana gelen olaylar oldukça karışıktır. Pişirme sırasında (özellikle pişirmenin ilk aşamalarında) hamurdaki en önemli yapısal değişim gaz hücrelerinin genişerek ekmek içi gözenek durumunu oluşturmasıdır (Autio ve Laurikainen, 1997). Bunun yanında, pişirme sırasında, mikroorganizmalar ve enzimler fonksiyonlarını yitirir, stabil olmayan kolloid sistem stabil hale gelir, pirodekstrinler, melanoidinler ve çeşitli aroma maddeleri meydana gelir (Ünal, 1991).

5. EKMEK ÜRETİMİ SÜRECİNE ÇOK YANITLI CEVAP YÜZEYİ METODUNUN UYGULANMASI

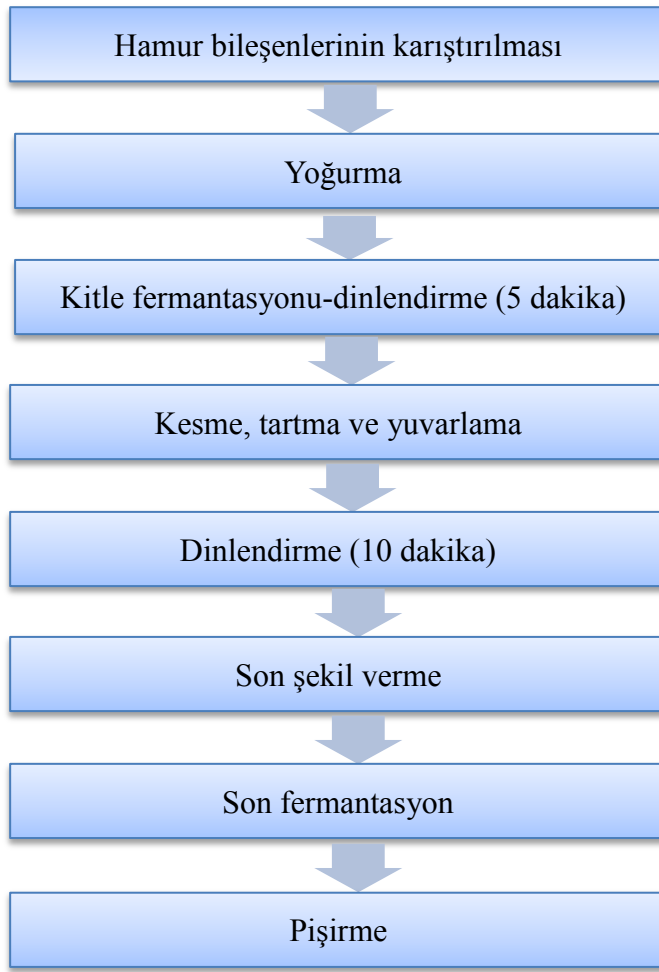
5.1 Materyal

Denemelerde, ekmek yapımı için kullanılan ve marketlerde ekmeklik un olarak satılan unlar kullanılmıştır. Kullanılan unlar EKSUN GIDA'da (Tekirdağ) üretilmiştir. Bütün deneme gruplarında aynı marka ve özellikteki unlar kullanılmış, taze unlar kullanılmadan önce yaklaşık 20 °C'de 2 hafta süreyle bekletilmek suretiyle dinlendirilmiştir. Bir faktör olarak düşünülen unun gluten oranını farklı seviyelerde elde edilebilmek için çeşitli buğdaylardan üretilmiş unlar paçallanmıştır. Alfa amilaz enzim ilavesi için mantar (fungal) kökenli alfa amilaz (Amylase AO11P 100,000 SKB) kullanılmıştır.

Araştırmada taze olarak temin edilen, "Pakmaya" firmasınca üretilen, üretici firma tarafından TS 3522 pres yaş maya standardına uygun olduğu belirtilen kullanıldığı süre içinde buzdolabı şartlarında muhafaza edilmiş maya kullanılmıştır. Tekerrürlerin her birinde kullanılan maya aynı fermantasyon gücüne sahiptir. Bununla birlikte denemelerde içme suyu ve rafine edilmiş tuz kullanılmıştır.

5.2 Yöntem

Ülkemizde en çok üretilen ekmek çeşitlerini, francala ekmeği, sandviç ekmeği, çeşitli tava ekmekleri, bazlama, yufka ekmek, göçmen ekmeği, pide ekmekleri şeklinde sıralayabiliriz. Bu ekmek türleri içinden en sık üretilen çeşit ise francala tipi ekmektir. Bu nedenle çalışmada francala tipi ekmekler yapılmıştır. Deney ekmekleri Bölüm 4.1.2'de anlatıldığı şekilde genel olarak normal bir ekmek yapma prosedürü izlenerek üretilmiştir. Ekmek üretiminin adım adım akışı Şekil 5.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.1 : Ekmek üretimi aşamaları.

Deney ekmeklerinin yapımında 1000 gram un için 13 gram tuz, 40 gram preslenmiş yaş ekmek mayası, deney desenine göre 600-650 gram arasında su kullanılmıştır. Hamur için öncelikle malzemeler bir araya getirilmiş ve DİOSNA marka mikser tipi hamur yoğurma makinasında iki dakika boyunca yavaş devirde karıştırılmışlardır. Daha sonra deney deseninde belirtildiği şekilde 7, 9 veya 11 dakika hızlı devirde yoğurma işlemi yapılmıştır. Bu aşamadan sonra hamur makinadan çıkarılarak 5 dakika süresince dinlenmeye (kitle fermantasyonuna) bırakılmış ve daha sonra kesilip tartılarak yuvarlanmıştır.

Yuvarlanan ekmek hamurları 10 dakika ön fermentasyon işlemine tabi tutulduktan sonra otomatik bir makine ile francala ekmeği şekline getirilmişlerdir. Ekmeklerle ilgili ölçülen cevap değişkenlerinden biri de şekil düzgünlüğü olduğu için son şekil vermenin otomatik bir makine tarafından yapılması sağlıklı sonuçlar elde etmek açısından önemlidir. Son şekli verilen ekmek hamurları deney deseninde belirtilen sürede ve sıcaklıkta son fermantasyon sürecini geçirmeleri için fermantasyon

dolabına yerleştirilmişlerdir. Fermantasyon dolabı, sıcaklığı ve buhar düzeyi ayarlanabilen ve içindeki ekmek hamurlarını değişen çevre şartlarının etkisinden koruduğu için daha sağlıklı sonuçlar almaya yardımcı olan bir dolaptır.

Son fermantasyon süresi sona erdikten sonra ekmek hamurları Sveba Dahlen AB marka fırında 220 °C’de 20 dakika pişirilmişlerdir. Ekmek hamurlarına, ölçümlerin ve kıyaslamaların daha sağlıklı yapılabilmesi için bıçak açma işlemi uygulanmamıştır. Ekmekler pişirildikten sonra daha doğru sonuçlar elde edebilmek adına ölçümler yapılmadan önce ekmekler 24 saat dinlendirilmişlerdir.

5.3 Faktörlerin Belirlenmesi

Çalışmada, ekmek kalitesi üzerinde etkili olan faktörleri belirlemek için beyin fırtınası yapılmış ve böylelikle uzman görüşleri alınmıştır. Çeşitli faktörler arasından en çok etkili olduğu düşünülen toplam altı adet faktör (bağımsız değişken) belirlenmiştir. Bunlar, unun içerdiği gluten yüzdesi, Alfa-amilaz enzim ilavesi, kullanılan su miktarı, yoğurma süresi, son fermantasyon sıcaklığı ve son fermantasyon süresidir.

Gluten (öz), adlı madde un içerisinde bulunan gliadin ve glutenin proteinleri su ile birleştiğinde oluşur. Bu madde fermantasyon sırasında oluşan karbondioksit gazını tutup hamurun kabarmasını sağladığı, dolayısıyla hamurun iskeletini oluşturduğu için ekmek kalitesi açısından oldukça önemlidir. Hacimli, güzel bir ekmek elde etmek için unun gluten oranının ve kalitesinin yüksek olması gereklidir, ancak gluten kalitesi ve miktarı ekmeğin fermantasyonu ve pişmesi sırasında kabarmasını engelleyecek kadar yüksek olmamalıdır. Çünkü çok güçlü ve fazla miktarda gluten mayalanma sırasında oluşan karbondioksit gazının ekmeği kabartmasını engellemektedir. Zayıf unlardan yapılan ekmekler, gazın tutulamaması nedeniyle daha yayvan ve basık, kuvvetli unlardan yapılan ekmekler ise tam tersi toplu ve silindirik bir yapıda olmaktadır. Arzu edilen ekmek ise ve ne yayvan ne de silindirik şekilde olmayan büyük hacimli yapıya sahip ekmek tipidir. Bu çalışma ile unun içerdiği gluten seviyesinin ne olması gerektiği ve diğer faktörlerle nasıl bir etkileşime sahip olduğu araştırılmıştır. Gluten oranı faktörü, 24%, 28% ve 32% olmak üzere üç seviye olarak alınmıştır.

Bölüm 4.1.1.2’de anlatıldığı üzere kullanılan unun α amilaz enzimi aktivitesinin ekmek kalitesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Bunun nedeni α amilaz enzimlerinin undaki zedelenmiş nişastaya etki ederek bu maddeleri daha basit şekerler olan maltodekstrinlere dönüştürmesi ve daha sonra da bu basit şekerlerin unda genellikle yeterince var olan β amilaz tarafından maya içi enzimlerinin kullanacağı basit bileşenlere dönüştürülmesidir.

Düşük α amilaz enzim aktivitesine sahip unlarda, nişasta fermantasyon ve pişme sırasında mayanın kullanabileceği basit şekerlere yeterli miktarda dönüştürülemediği için maya görevini yeterince yapamamakta, bunun sonuncu olarak da hacimsiz ve solgun renkte ekmekler ortaya çıkmaktadır. Yüksek α amilaz enzim aktivitesi ise ekmek için yapışkan ve dolayısıyla gözeneklerinin çok küçük ve nihayetinde yine aynı şekilde ekmek hacminin düşük olmasına ve ekmek kabuğunun yanık rengine yaklaşacak şekilde fazlaca kızarmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı uygulama çalışmasında α amilaz enzimi ilavesi için optimum seviye bulunmaya çalışılacaktır. Denemelerde α amilaz enzim ilavesi için 0ppm, 20ppm ve 40ppm seviyeleri belirlenmiş ve denemeler bu seviyelerde gerçekleştirilmiştir.

Hamur yapılırken kullanılan su miktarı da ekmek kalitesini etkileyen önemli bir parametre olarak düşünülmektedir. Çünkü su, hamur bileşenlerinin karışmasını ve birbirleriyle kimyasal etkileşime girmelerini sağlayan, hamura arzu edilen visko-elastik yapıyı kazandıran, fermantasyonun başlamasına ve devamına yol açan önemli bir bileşendir. Kullanılması gereken suyun yüzde olarak oranı için sabit bir değer söylemek yanlış olacaktır. Çünkü kaliteli, işlenebilir bir hamur ve dolayısıyla kaliteli bir ekmek elde etmek için kullanılması gereken su miktarı unun özelliklerine göre değişebilmektedir. Kullanılacak su miktarı unun farklı özellikleriyle ilişkili olan su kaldırma kapasitesini aşmamalı, bu seviyede olmalıdır. Bu nedenle kullanılması gereken suyun miktarı araştırılmalı ve un özellikleri ile arasında nasıl bir ilişki olduğu ortaya konulmalıdır. Bu amaçla faktörler arasına alınan kullanılan su miktarı, un miktarının 60%’ı, 62,5%’ı ve 65%’ı olmak üzere üç seviyeli olarak denemelere dâhil edilmiştir.

Her açıdan kaliteli bir ekmek elde edebilmek için nitelikli bir hamur yapılmalıdır. Bunun için en önemli süreçlerden biri de yoğurma aşamasıdır. Hamurun yoğurulması süresini üç ayrı aşamada değerlendirmek mümkündür. İlk aşamada hamur yapışkan, elastikiyeti az, büyük ve ıslak parçalardan ibarettir. Bu aşamada hamurun

deformasyona karşı olan direnci düşüktür. Yoğurmaya devam edildiğinde hamur yüzeyi düzgün, kuru ve hamur elastiki bir durum alır. Son aşamada ise hamur yüzü düzgün, kuru ve ipeksi bir görünüm kazanır. Uzama yeteneği en yüksek düzeye ulaşır (Ünal, 1991). Yoğurmanın başlangıcında hamurun deformasyona karşı olan direnci düşükken, zaman geçtikçe direnç artar. Yoğurmaya daha fazla devam edilirse hamur direnci tekrar azalır (Zheng ve diğ, 2000).

Görüldüğü üzere yoğurma esnasında, zamanla gluten ağ yapısında meydana gelen reolojik değişimler ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir (Dobraszczyk ve Morgenstern, 2003). Bu nedenle yoğurma süresi ne gluten yapısı tam olarak oluşamayacak kadar az, ne de bu yapının yorularak yıpranacağı kadar çok olmamalı, optimum bir değer olmalıdır. Ne var ki optimum yoğurma süresi kullanılan unun özelliklerine, su miktarına yoğurma şekline göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle optimum sürenin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir faktör olarak denemelere dahil edilen yoğurma süresi parametresi, 7 dakika, 9 dakika ve 11 dakika olmak üzere üç seviyeli olarak alınmıştır.

Son fermantasyon süreci de aynı şekilde ekmek üretiminin çok önemli bir sürecidir ve nihai ürün kalitesi üzerinde oldukça etkili olduğu düşünülmektedir. Fermantasyon sürecinde, süre ve ortam sıcaklığı ekmek hamurlarının yeterli hacme ulaşmaları ve düzgün şekil almaları açısından kritik bir önem taşımaktadır. Fermantasyon süresi içerisinde hamurun hacmini alması ve düzgün bir gözenek yapısının oluşması beklenir. Ancak bunun için fermantasyon süresi ve sıcaklığı iyi dengelenmelidir.

Fermantasyon süresi yetersiz olduğu durumlarda ekmek; küçük hacimli, içini tam çekmemiş ve tıkız olmaktadır. Gereğinden fazla olduğunda ise, gluten ağ yapısı maya hücreleri tarafından oluşturulan karbondioksit gazını tutamamakta ve yırtılmaktadır, böylece çökme denen durumun ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde hatalı büyütülen hamurlar fırına atıldığı zaman küçük, açık renkli dolayısıyla kalitesiz ekmekler oluşur.

Fermantasyon sıcaklığının yetersiz olması durumunda ise maya içinde bulunan enzimler uygun şartlar sağlanmadığı için yavaş çalışacaklardır ve bunun sonuncu olarak da ekmek yeterince hacimli ve alımlı olmayabilir. Yüksek sıcaklık ise maya enzimlerinin fazla hızlı çalışmasına neden olacağından düzgün bir gözenek yapısı ortaya çıkamayabilir.

Bu tür problemlerin ortaya çıkmaması için hamurların gereğinden az veya fazla süre ve sıcaklıkta fermente edilmesini engellemek, optimum süre ve sıcaklığın un özelliklerine göre nasıl değiştiğini ortaya koymak gerekmektedir. Bu amaçla ekmek hamurlarının fermantasyon süresi 45 dakika, 60 dakika ve 75 dakika, fermantasyon sıcaklığı ise, 28°C , 33°C ve 38°C olmak üzere üçer seviyeli olarak deneye dahil edilmişlerdir.

5.4 Deney Deseninin Seçimi ve Denemelerin Düzenlenmesi

Çalışmada hangi kombinasyonlarla denemelerin yapılacağını belirlemek amacıyla öncelikle bir deney deseni belirlenmiştir. Araştırma kapsamında belirlenen faktörlerin cevap değişkenleri üzerinde, ana etkilerinin yanında kareli ve ikili etkileşim etkilerinin de gözlemlenmesi istendiği için her bir faktörden en az üç seviyenin denemeye dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu durumda altı adet bağımsız değişkeni içeren bir çalışmada eğer kuadratik terimlerin etkisi de araştırılmak isteniyorsa, tam faktöriyel bir deney tasarımı kullanıldığında toplam deney sayısı $3^6 = 729$ adet olmalıdır. Ancak pratikte bu kadar deneyi yapmak ekonomik olmayacağından ve çok fazla zaman gerektireceğinden dolayı deneme deseni Box-Behnken tasarımları kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada Box Behnken tasarımlarının kullanılmasının nedenleri şu şeklide sıralanabilir;

- Tam faktöriyel ve Merkezi bileşik deneme desenlerine göre daha az deneme gerektirmesi,
- Faktörlerin doğrusal etkilerinin yanında kareli etkilerinin ve ikili etkileşimlerinin etkilerinin de hesaplanmasına olanak tanınması,
- Sadece üç düzeyde veri gerektirmesi.

Altı faktörlü bu çalışmada, Box-Behnken tasarımları kullanılarak ve her denemeden üç tekrar yapılarak toplam da $54 \times 3 = 162$ deney, yani ekmek yapılmıştır. Her denemeden üç tekrarın yapılmasının sebebi rasgeleliğin denemeler ve dolayısıyla sonuçlar üzerindeki etkisinin olabildiğince azaltılmak istenmesidir. Rasgeleliğin sonuçları etkilemesini engellemek için alınan bir başka önlem ise deneme sırasının rassallaştırılmasıdır.

5.5 Ekmek Analizleri

Ekmeğe ait, özgül hacim, şekil düzgünlüğü, gözenek yapısı, kabuk rengi ve yapısı olmak üzere dört adet cevap değişkeni (kalite karakteristiği) ölçülmüş ve bunların optimum düzeye getirilebilmesi için faktörlerin seviyelerinin ne olması gerektiği araştırılmıştır.

5.5.1 Özgül hacim

Özgül hacim (ÖH) ekmeğin ne kadar kabardığı ile ilgili bilgi verir. Bu nedenle ölçülmesi gereken önemli bir yanıt değişkenidir. Özgül hacmi hesaplayabilmek için öncelikle ekmeğin ağırlığının ve hacminin ölçülmesi gerekir. Bu çalışmada ekmeğin ağırlığı hassas bir tartı ile ölçülmüştür. Hacmi ise, Amerikan Tahıl Kimyagerleri Derneği'nin (ATKD) onaylı metotlarından tohumla ölçme metodu (seed displacement metot) (ATKD metot 10-05.01) baz alınarak ölçülmüştür. Bu metot kapsamında ölçüm için çok ince olması ve dolayısıyla homojen bir yapı oluşturması nedeniyle haşhaş tohumu kullanılmıştır.

Ölçme işlemi için öncelikle boş bir kaba tamamen dolacak şekilde haşhaş tohumu konulmuştur (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Ekmek hacmini ölçmek için kullanılan ölçüm gereçleri.

Daha sonra bu haşhaş tohumu kabın içerisinden çıkarılmış ve Şekil 5.3'de görüldüğü gibi öncelikle kaba hacmi ölçülecek ekmeğin konularak çıkarılan tohum aldığı kadar kaba ilave edilmiştir. Kaba sığmayan haşhaş tohumu, ölçülen ekmeğin kapladığı alanı yani hacmini ifade etmektedir. Böylece, kalan tohumun hacmi Şekil 5.2'de sol taraftaki ölçekli kaplar yardımıyla ölçülerek ekmeğin hacmi bulunmuştur.



Şekil 5.3 : Ekmek hacmini ölçme işlemi.

Sağlıklı sonuçların elde edilebilmesi için ölçümler, ekmekler fırından çıktıktan 12 saat sonra yapılmıştır. ÖH Eşitlik 5.1 ile hacmin kütleye oranı (ml/g) olarak hesaplanmıştır.

$$\text{ÖH} = \frac{\text{Ekmeğin hacmi}}{\text{Ekmeğin ağırlığı}} \quad (5.1)$$

Ekmeğin hacminin olabildiğince yüksek olması istendiği için özgül hacim yanıt değişkeni en büyük en iyidir şeklinde düşünülmüş ve kurulan modelde en büyüklenmeye çalışılmıştır.

5.5.2 Şekil düzgünlüğü

Ekmeğin şekil düzgünlüğüne Bodroza-Solarov ve diğ. (2008) ve Curic ve diğ. (2008)'e göre düzgünlük oranı (DO) hesaplanarak karar verilmiştir. Ekmek kalitesi ile ilgili yapılan diğer birçok çalışmada da ekmeğin şekil düzgünlüğünü bu yöntem ile ölçülmüştür. DO ekmeğin yükseklik ve en kalın genişliğinin ölçülüp birbirine oranlanmasıyla belirlenmektedir. Bunun için öncelikle ekmeklerin yüksekliği ve en kalın genişliği kumpas yardımıyla Şekil 5.4 ve 5.5'de görüldüğü gibi ölçülmüştür.



Şekil 5.4 : Ekmek eninin kumpas ile ölçülmesi.



Şekil 5.5 : Ekmek yüksekliğinin kumpas yardımıyla ölçülmesi.

DO Eşitlik 5.2’de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$DO = \frac{\text{Ekmeğin yüksekliği}}{\text{Ekmeğin en kalın genişliği}} \quad (5.2)$$

Yapılan ekmeklerin farklı uzmanlar tarafından incelenmesi sonucu en düzgün şekle sahip ekmek belirlenmiş ve DO’nın en iyi değeri 0,62 olarak kararlaştırılmıştır. Buna göre DO 0.62 veya yakın bir değer ise ekmeğin düzgün bir şekle sahip olduğuna karar verilebilir. DO 0,62’den ne kadar küçük ise ekmek somunun o derece de yassı bir şekle sahip olduğu ve 0,62’den ne kadar büyük ise o derece de küresel bir şekle sahip olduğu söylenebilir. İdeal bir ekmekte düzgünlük oranının nominal değer olarak 0,62 olması istendiği için şekil düzgünlüğü yanıt değişkeninin istenebilirlik değeri hesaplanırken, bu oranın 0.62 hedef değerinde olması gerektiği göz önünde bulundurulmuştur.

5.5.3 Gözenek yapısı

Ekmek kesildiğinde görülen iç gözeneklerin (kabarcıkların) çok büyük veya çok küçük olmamaları, yaklaşık olarak eşit büyüklüğe sahip olmaları ve ekmeğin içinde homojen olarak dağılmaları gerekmektedir. Ekmek içinde diğerlerine oranla aşırı büyük gözeneklerin, oyukların olması kusur olarak kabul edilmektedir. Bu kusurların temel nedenleri arasında, aşırı fermantasyon sonucu gluten ağ yapısının maya enzimleri tarafından oluşturulan gaza dayanamaması, aşırı yoğurma sonucu gluten yapısının yorulması ve zarar görmesi sayılabilir.

Gözeneklerin çok küçük olması ise ekmek hacmi küçük olacağından dolayı yine istenen bir durum değildir. Bu şekilde çok küçük gözeneklerin bulunması ise fermantasyon süresinin ve/veya sıcaklığının yeterli olmaması, yoğrulmanın yetersiz veya fazla olması gibi nedenlerden dolayı kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Çalışmada gözenek yapısının değerlendirilebilmesi için görüntü işleme tekniklerinden yararlanılmıştır. Bunun için öncelikle ekmekler Şekil 5.6'de görüldüğü gibi, tam ortasından kesilerek gözenek yapılarının bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için Hp marka bir tarayıcıda yüksek çözünürlükte (4800 dpi) taranmıştır. Tarama işleminde ekmeğin tarayıcı yüzeyine temas eden yerleri beyaz veya beyaza yakın bir renkte çıkarken, gözenekler, tarayıcının ışığı bu noktalardan yansımadığı için koyu renkte yani siyah tonlarında çıkmaktadır.



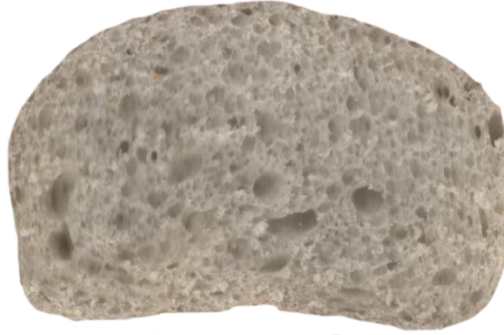
Şekil 5.6 : Ekmeklerin gözenek yapılarının incelenebilmesi için taranması.

Tarama sonucu elde edilen resimlerin bir örneği Şekil 5.7'de verilmiştir. Daha sonra bu ekmek resimlerinin arka planları ve nispeten siyah görünen kabuk kısımları

temizlenmiş ve ekmekler birbirinden ayrılmıştır (Şekil 5.8). Tüm ekmeklerin tarama görüntüleri Şekil 5.8’de görüldüğü gibi yapıldıktan sonra görüntü işleme programı ImageJ 1.48v yazılımında gözeneklerin dağılımı değerlendirilmiştir.

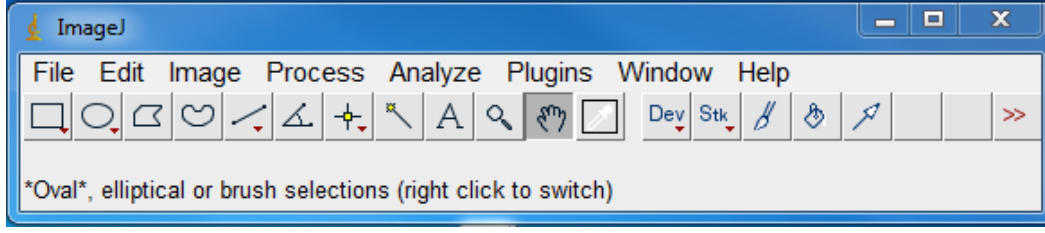


Şekil 5.7 : Örnek ekmek tarama görüntüsü.



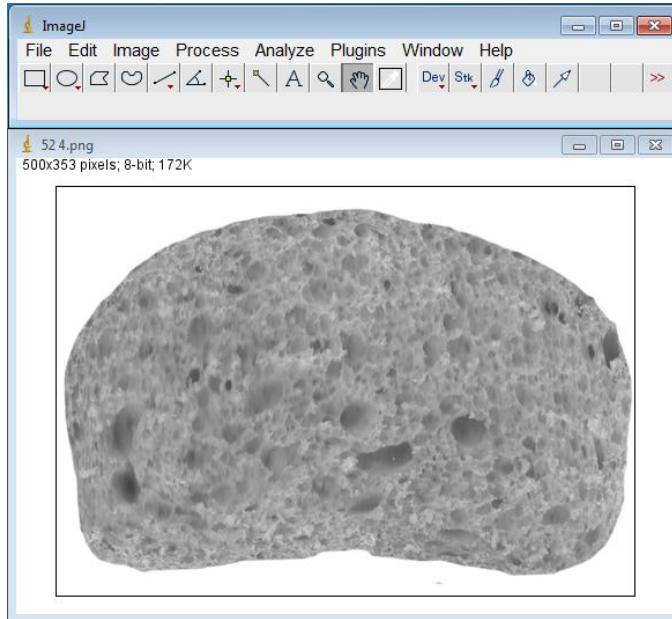
Şekil 5.8 : Arka plan ve kabuklarından arındırılmış ekmek tarama görüntüsü.

Şekil 5.9’de ekran görüntüsü verilen ImageJ yazılımı ücretsiz bir görüntü işleme programı olup akademik ve pratik çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle parçacık analizlerini esnek ve ayrıntılı bir şekilde yapması çok tercih edilme sebeplerinin başında gelmektedir. Bu tez kapsamında ImageJ programı ekmek içi gözeneklerinin dağılımı hakkında bilgi edinmek için kullanılmıştır. Bunun için öncelikle tüm ekmek tarama görüntüleri arka planlarından ve kabuklarından arındırılmıştır. Daha sonra ekmek tarama görüntüsü ImageJ yazılımı ile açılıp Image (Resim) sekmesi altındaki type (Tip) komutu kullanılarak 8 bit gri skalaya dönüştürülmüştür. Bunun nedeni görüntünün siyah noktalarını belli bir eşik değerinde ayırt edebilmeyi sağlamaktır.



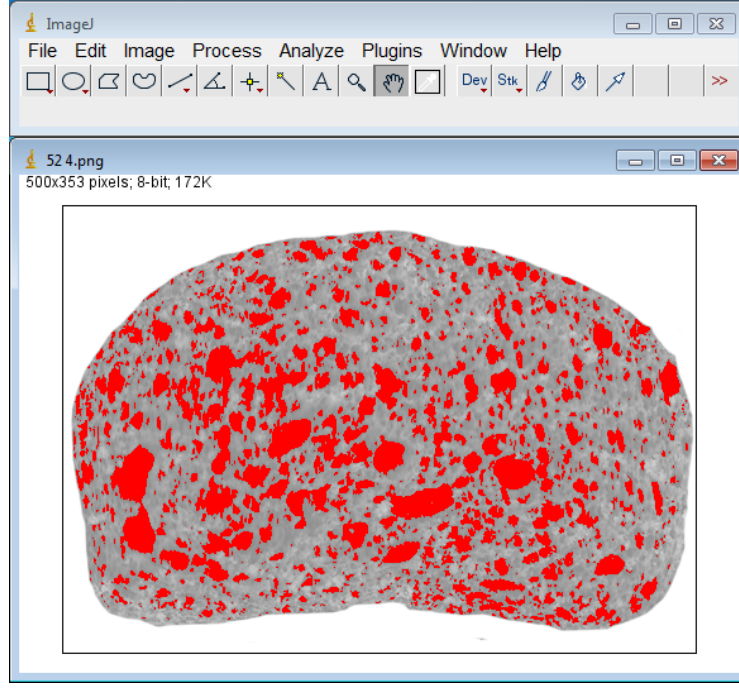
Şekil 5.9 : ImageJ yazılımının ekran görüntüsü ve sekmeleri.

8 bit gri skalaya çevrilen ekmek içi görüntüsü Şekil 5.10’da verilmiştir. Daha sonra yine Image sekmesi altından Trehshold (Eşik) komutu ile resim için uygun bir eşik değeri belirlenmiştir. Bu eşik değerine göre belli bir koyuluğa sahip noktalar program tarafından gözenek (parçacık) olarak kabul edilmektedir.



Şekil 5.10 : 8 bit gri skalaya çevrilmiş ekmek içi görüntüsü.

Eşik değeri belirlenmiş bir görüntü örneği Şekil 5.11’de verilmiştir. Görüldüğü üzere program bu eşik değerine göre gözenek olarak algıladığı yerleri kırmızı ile göstermiştir. Ekmeğin kabuklarının ve arka planının çıkarılmasının nedeni ise koyu renkli oldukları için yazılım tarafından gözenekmiş gibi algılanmasının engellenmek istenmesidir.



Şekil 5.11 : Eşik değeri belirlenmiş ekmek içi görüntüsü.

Eşik değeri belirlendikten sonra Analyze (Analiz) menüsünden Analyze Particles (Parçacıkları analiz et) komutu ile belirlenen parçacıkların (gözeneklerin) analizi yapılmaktadır. Şekil 5.12’de örnek analiz sonuçları verilmektedir. Listede ilk sütun (en soldaki) parçacıkların sıra numarasını, ikinci sütun etiketlerini, üçüncü sütun parçacıkların piksel cinsinden büyüklüklerini, dördüncü sütun parçacıkların 256 bit skalası üzerinden renk ortalamalarını, beşinci ve altıncı sütunlar ise sırasıyla parçacıkların renk değerlerinin minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi bu resimde 1014 adet parçacık yani gözenek mevcuttur. En alt satırda ise görüldüğü üzere sütunlar bazında bütün parçacıklar için ortalama, standart sapma ve minimum ile maksimum değerler hesaplanmıştır. Örnek ekmek içi resmi için gözeneklerin büyüklüklerinin ortalamaları 34,786, standart sapması ise 113,435 piksel olarak ölçülmüştür.

	Label	Area	Mean	Min	Max
1004	1	139	139	139	139
1005	6	131.833	126	141	141
1006	54	135	124	141	141
1007	8	133.875	126	141	141
1008	26	134.231	124	141	141
1009	1	136	136	136	136
1010	34	130.235	117	141	141
1011	3	137.667	135	141	141
1012	2	139.500	139	140	140
1013	3	134.667	131	138	138
1014	4	127	123	134	134
1015	Mean	34.786	136.052	130.012	140.283
1016	SD	113.435	4.756	11.669	1.487
1017	Min	1	108.164	67	125
1018	Max	1671	141	141	141

Şekil 5.12 : Ekmek içi gözeneklerinin analiz sonuçları tablosu.

Çalışmada ekmek gözeneklerinin yaklaşık olarak eşit büyüklüğe sahip olması istendiği için buradaki standart sapma değerinin olabildiğince küçük olması gerekmektedir. Bunun için standart sapmayı cevap değişkeni olarak alıp bu değeri en küçükleyecek faktör seviyeleri bulunmaya çalışılacaktır.

5.5.4 Kabuk rengi ve yapısı

Ekmekğin ideal olarak altın rengine yakın veya en azından açık kahverengi ve parlak bir kabuk rengine ve damarsız, çatlaksız bir yüzeye sahip olması istenir. Çok koyu kahverengi, mat bir kabuk rengi veya solgun, çok açık bir kabuk rengi ekmekte istenmeyen durumlardır. Aynı şekilde kabuk renginin düzgün bir şekilde dağılması beklenir, yani bazı kısımlar çok koyu iken diğer bazı kısımların açık renkte olması istenmeyen bir durumdur. Ekmek kabuğu ile ilgili diğer bir ölçü ise kabuk yüzeyinin damarlı ve çatlak bir yapıya sahip olup olmamasıdır. Bu damarlı ve çatlak yapıların ekmek kabuğunda bulunmaları istenmeyen diğer durumlardır. Bu nitelikler göz önüne alınarak kabuk rengi ve yapısı kriteri 1’den 10’a kadar numaralı bir ölçek ile değerlendirilmiştir.



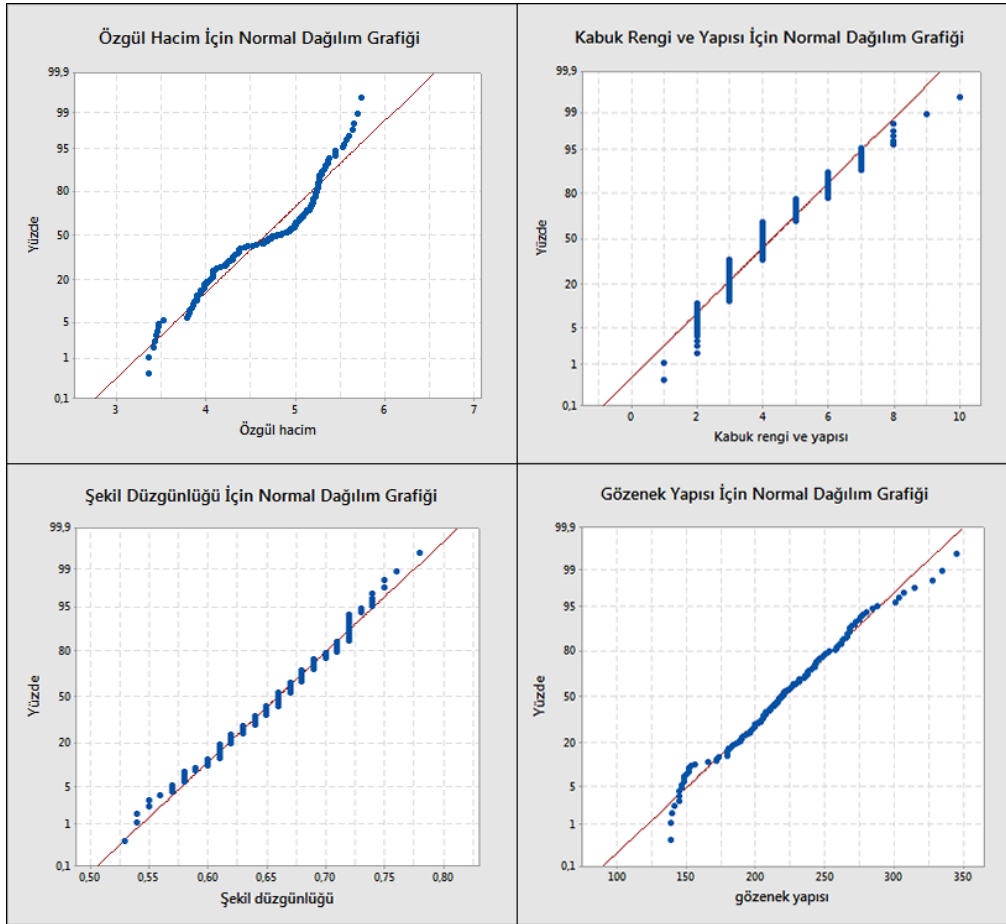
Şekil 5.13 : Farklı kombinasyonlarla üretilmiş ekmeklerin kabuk rengi ve yapısı.

Ölçekte en düşük değer olan 1 değeri çok koyu veya çok soluk, mat ve homojen dağılmayan bir renge sahip, çatlak ve damarlı bir kabuk yüzeyini ifade etmektedir. En yüksek değer olan 10 değeri ise iştah açıcı, homojen dağılan ideal parlak bir kabuk rengini ve çatlaksız, damarsız bir kabuk yüzeyini ifade etmektedir. Şekil 5.13’de farklı kombinasyonlarla üretilmiş iki farklı deneye ait örnekler bir arada verilmiştir. Görüldüğü üzere ön tarafta duran ekmekler mat, koyu bir kahverengi renge ve pürüzlü bir yüzeye sahipken arka tarafta duran ekmekler daha parlak pürüzsüz ve alımlı görünmektedirler.

5.6 İstatistiksel Analizler ve Modelleme

Deneyler Çizelge A.1’de verilen rassal deneme sırasına göre gerçekleştirilip bütün cevap değerleri elde edildikten sonra istatistiksel analiz ve modelleme aşamalarına geçilmiştir. İstatistiksel analizler için Minitab® paket programının 17.1.0 versiyonundan yararlanılmıştır. İstatistikler analizler yapıp her bir cevap değişkeni için bağımsız değişkenlere (faktörlere) bağlı anlamlı birer regresyon denklemi elde edildikten sonra, cevap değişkenleri için istenebilirlik fonksiyonları tanımlanmış ve nihayetinde Bölüm 3.4’de açıklandığı şekilde doğrusal olmayan bir programlama modeli kurulmuştur. Kurulan bu model GAMS adlı paket programın 24.1.3 versiyonu kullanılarak çözülmüş ve optimum faktör değerleri elde edilmeye çalışılmıştır.

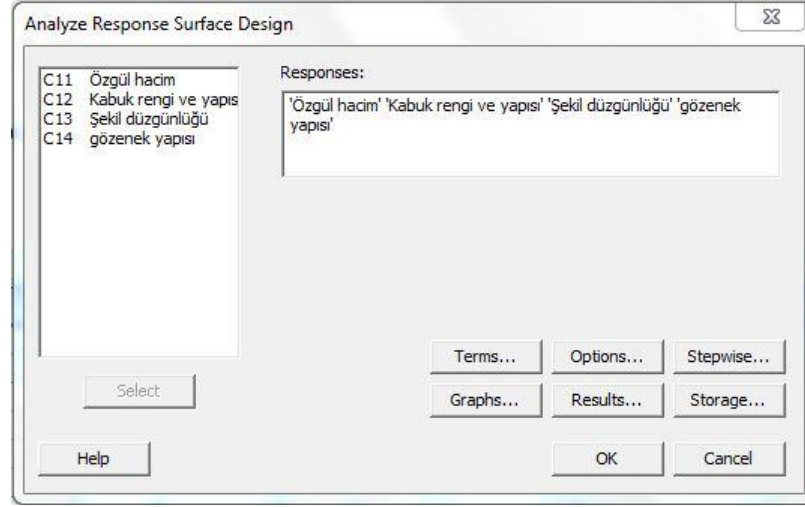
Cevap değişkenleri ile faktörler arasındaki anlamlı ilişkilerin var olup olmadığı, varsa nasıl bir ilişki olduğu regresyon analizi ve EKKY ile araştırılmıştır. Bunun için öncelikle bu yöntemlerin en temel varsayımlarından biri olan normal dağılıma uygunluk testi yapılmıştır. Her bir cevap değişkeni için toplanan verilerin normal dağılıma uygunluk testlerine ait grafikler Şekil 5.14’de verilmiştir. Cevap değişkenlerinden sadece Özgül hacim Anderson Darling normallik testine göre anlamlı şekilde normal dağılıma uygun çıkmamaktadır, ancak çarpıklık ve basıklık ölçüleri Tabachnick ve Fidell (2013)’e göre -1,5 ile +1,5 arasında ve George ve Mallery (2010)’a göre -2,0 ile +2,0 arasında olduğu için verilerin normal dağıldığı kabul edilebilmektedir.



Şekil 5.14 : Cevap değişkenleri için normal olasılık grafikleri.

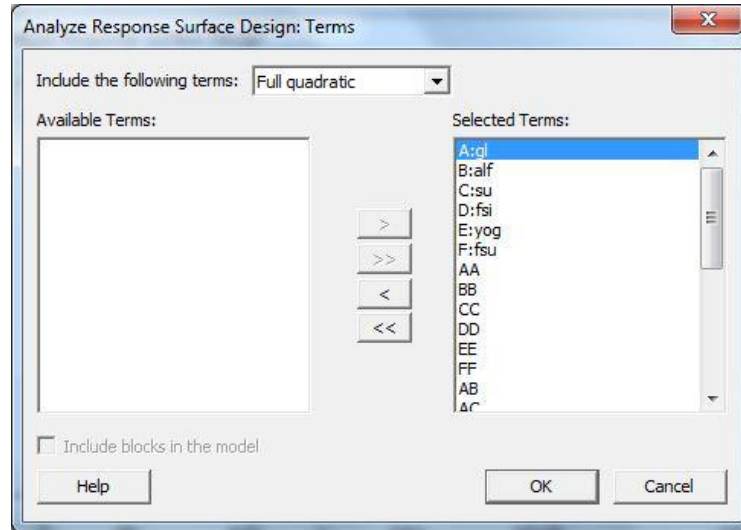
Normallik testinden sonra her bir cevap değişkeni için cevap yüzeyi denklemleri elde edilmiştir. Bunun için verilerin Minitab’e girişi yapıldıktan sonra sırasıyla, Stat (İstatistik), DOE (Deney Tasarımı), Response Surface (Cevap Yüzeyi), Analyze Response Surface Design (Cevap Yüzeyi Tasarımını Analizi) sekmeleri izlenerek analizler yapılmıştır. Cevap yüzeyi analizi için Minitab’de açılan pencere Şekil

5.15’de verilmiştir. Öncelikle bu pencerede tüm cevap değişkenleri seçilerek Responses kısmına aktarılmıştır.



Şekil 5.15 : Minitab cevap yüzeyi analiz penceresi.

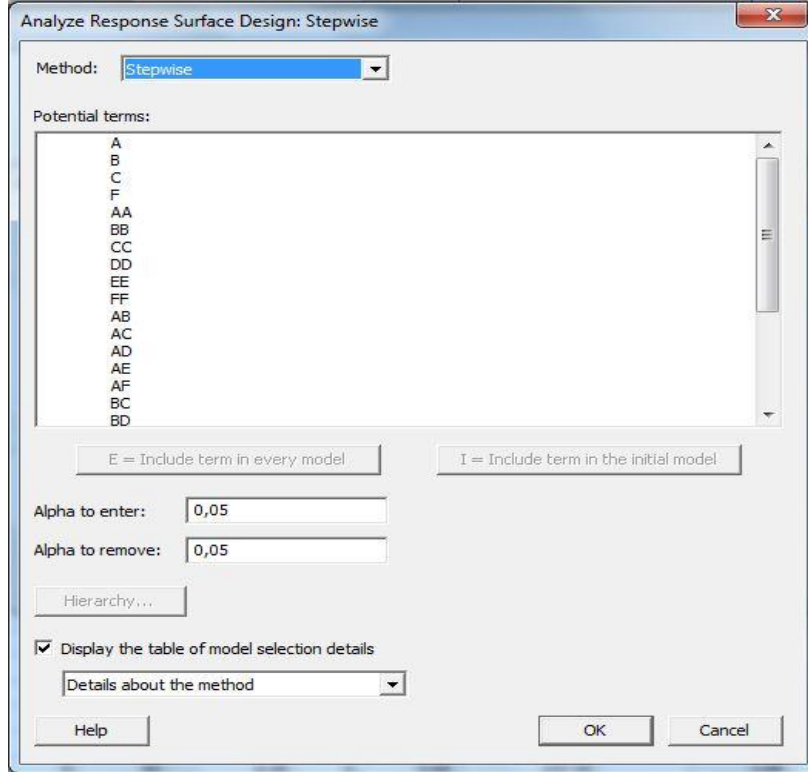
Daha sonra Şekil 5.16’da da görüldüğü üzere Terms kısmından Full quadratic seçeneği seçilerek bütün terimler analize dahil edilmiştir.



Şekil 5.16 : Minitab programında bütün terimlerin analize dahil edilmesi.

Bir diğer önemli sekme olan Stepwise (Aşamalı) kısmından da Şekil 5.17’de görüldüğü üzere “Stepwise” (“Aşamalı”) seçeneği seçilmiştir. Ayrıca yine bu pencereden “Alpha to enter” (giriş için alfa düzeyi), “Alpha to remove” (çıkış için alfa düzeyi) seçenekleri 0.05 olacak şekilde ayarlanmıştır. Aşamalı regresyonda amaç bağımsız değişken sayısını azaltarak en önemli tahminleyicileri belirlemektir. Uygulama çalışmasında 6 ana etki, 6 kareli etki ve 15 ikili etkileşim etkisi olmak üzere toplamda 27 adet potansiyel tahminleyici bulunmaktadır. Bu

tahminleyicilerden 0,95 güven düzeyinin altından kalanlar aşamalı regresyon sayesinde modele dahil edilmeyecektir.



Şekil 5.17 : Cevap yüzeyleri oluşturmak için aşamalı regresyonun seçilmesi.

Bu ayarlamalar yapıldıktan sonra analizler gerçekleştirilmiş ve her bir cevap değişkeni için ayrı ayrı regresyon denklemleri ve istatistiksel testler elde edilmiştir. Cevap değişkenlerinden özgül hacim için regresyon denklemi Eşitlik 5.3’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \hat{Y}_{ozg} = & 16.08 + 0.903 * gl + 0.0923 * alf - 0.666 * su - \\
 & 0.500 * fsi + 0.2762 * yog - 0.0278 * fsu - 0.02212 * gl^2 - \\
 & 0.000846 * alf^2 + 0.001708 * gl * alf + 0.00825 * gl * su - \\
 & 0.002125 * gl * fsi - 0.001325 * alf * su + 0.01173 * su * \\
 & fsi + 0.001489 * su * fsu - 0.00717 * fsi * yog - 0.001356 * \\
 & fsi * fsu
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Bu eşitlikte " $\hat{Y}_{ozg}$ " özgül hacim cevap değişkeninin regresyon denklemi ile hesaplanan tahmini değerini, "gl" gluten oranını, "alf" α amilaz enzim ilavesini, "su" kullanılan su miktarını, "fsi" fermantasyon sıcaklığını, "yog" yoğurma süresini, "fsu" fermantasyon süresini ifade etmektedir. Bu modelin belirlilik katsayısı ise 95,94%’

olarak hesaplanmıştır. Bu oran, bağımsız değişkenlerin (faktörler) cevap değişkenindeki değişkenliğin 95,94%ünü anlamlı bir şekilde açıkladığını ifade etmektedir. Regresyon modeline ilişkin anlamlılık testlerinden Varyans analizi (Anaysis of Variance) (ANOVA) tablosu Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Özgül hacim cevap değişkeni için ANOVA tablosu.

Kaynak	SD	Düz. KT	Düz. KO	F-Değeri	P-Değeri
Model	16	58,0228	3,6264	214,01	0,000
Doğrusal	6	48,5018	8,0836	477,05	0,000
Kareli	2	7,6801	3,8401	226,62	0,000
2’li Etkileşim	8	1,8409	0,2301	13,58	0,000
Hata	145	2,4570	0,0169		
Toplam	161	60,4798			

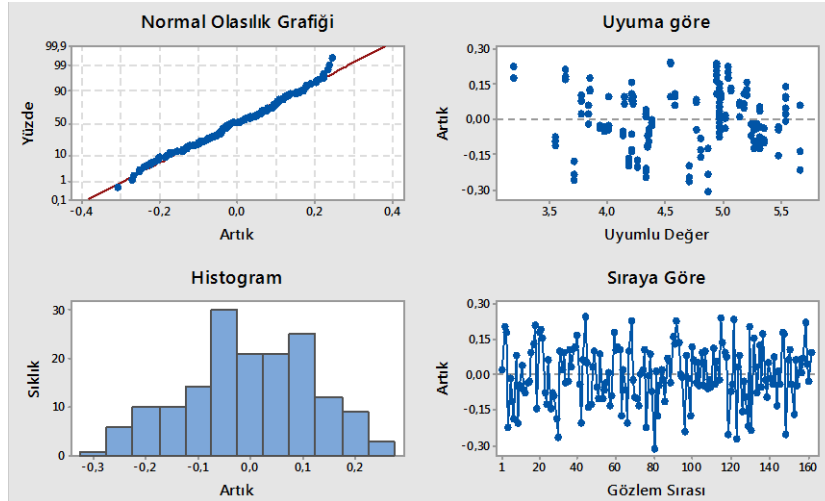
ANOVA tablosunda görüldüğü üzere, düzeltilmiş kareler toplamı (Düz. KT) serbestlik derecelerine (SD) bölünerek düzeltilmiş kareler ortalaması (Düz. KO) hesaplanmıştır. Daha sonra her bir değişkenlik kaynağı için bu değer hatanın Düz. KO’na bölünerek F ve P değerleri elde edilmiştir.

ANOVA tablosundan, 0.05 anlamlılık düzeyinde bağımsız değişkenler ile cevap değişkeni arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu ve 27 adet olası tahminleyiciden 16 tanesinin anlamlı bir şekilde özgül hacim cevap değişkenini açıkladığı anlaşılmaktadır. Görüldüğü üzere modelde doğrusal, kareli ve ikili etkileşim terimleri yer almaktadır. Çizelge 5.2’de verilen katsayılar tablosu ise, modeldeki tüm katsayıların 0.05 anlamlılık düzeyinde anlamlı olduğunu yani, modeldeki bütün bağımsız değişkenlerin cevap değişkenini anlamlı şekilde açıkladığını ifade etmektedir. Ayrıca çizelgenin en son sütununda bulunan Varyans Genişliği Faktörü (VGF) değerlerinin oldukça düşük olması bağımsız değişkenler arasında bir ilişki olmadığını, yani çoklu doğrusallığın bulunmadığını ifade etmektedir.

Çizelge 5.2 : Özgül hacim cevap değişkeni için katsayılar tablosu.

Terim	Etki	Katsayı	Kat SH	T-Değeri	P-Değeri	VGF (VIF)
Sabit		4,9671	0,0177	280,40	0,000	
gl	1,1511	0,5756	0,0153	37,52	0,000	1,00
alf	0,9400	0,4700	0,0153	30,64	0,000	1,00
su	0,0764	0,0382	0,0153	2,49	0,014	1,00
fsi	0,2761	0,1381	0,0153	9,00	0,000	1,00
yog	0,1589	0,0794	0,0153	5,18	0,000	1,00
fsu	0,6153	0,3076	0,0153	20,05	0,000	1,00
gl*gl	-0,7080	-0,3540	0,0210	-16,85	0,000	1,04
alf*alf	-0,6772	-0,3386	0,0210	-16,12	0,000	1,04
gl*alf	0,2733	0,1367	0,0266	5,14	0,000	1,00
gl*su	0,1650	0,0825	0,0266	3,10	0,002	1,00
gl*fsi	-0,0850	-0,0425	0,0188	-2,26	0,025	1,00
alf*su	-0,1325	-0,0662	0,0266	-2,49	0,014	1,00
su*fsi	0,2933	0,1467	0,0266	5,52	0,000	1,00
su*fsu	0,1117	0,0558	0,0188	2,97	0,003	1,00
fsi*yog	-0,1433	-0,0717	0,0266	-2,70	0,008	1,00
fsi*fsu	-0,2033	-0,1017	0,0266	-3,83	0,000	1,00

Regresyon analizinin en önemli varsayımlarından biri olan artık değerlerin normal dağılıma uyması gerekliliği de kontrol edilmelidir. Şekil 5.18’de özgül hacim cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere artık değerlerin dağılımı normal dağılım desenine oldukça benzemektedir.



Şekil 5.18 : Özgül hacim cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri.

Diğer bir cevap değişkeni olan kabuk rengi ve yapısı için regresyon denklemi Eşitlik 5.4’de, ANOVA tablosu Çizelge 5.3’de ve katsayılar tablosu ise Çizelge 5.4’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\hat{Y}_{kabuk} = & -377.7 + 1.667 * gl + 1.721 * alf + 9.12 * su + \\
& 1.029 * fsi + 4.20 * yog + 0.5446 * fsu - 0.03507 * gl^2 - \\
& 0.0609 * su^2 - 0.01911 * fsi^2 - 0.004284 * fsu^2 + 0.0469 * gl * \\
& yog - 0.02750 * alf * su + 0.00833 * alf * yog - 0.1083 * su * \\
& yog + 0.0375 * fsi * yog
\end{aligned} \tag{5.4}$$

Bu eşitlikte “ $\hat{Y}_{kabuk}$ ”, regresyon denklemi ile elde edilen kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeninin tahmini değerini ifade etmektedir. Bu modelin belirlilik katsayısı ise 80,60%’dir. Yani ilgili cevap değişkenindeki değişkenliğin 80,60%’si modelde var olan terimler tarafından açıklanabilmektedir.

Çizelge 5.3 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için ANOVA tablosu.

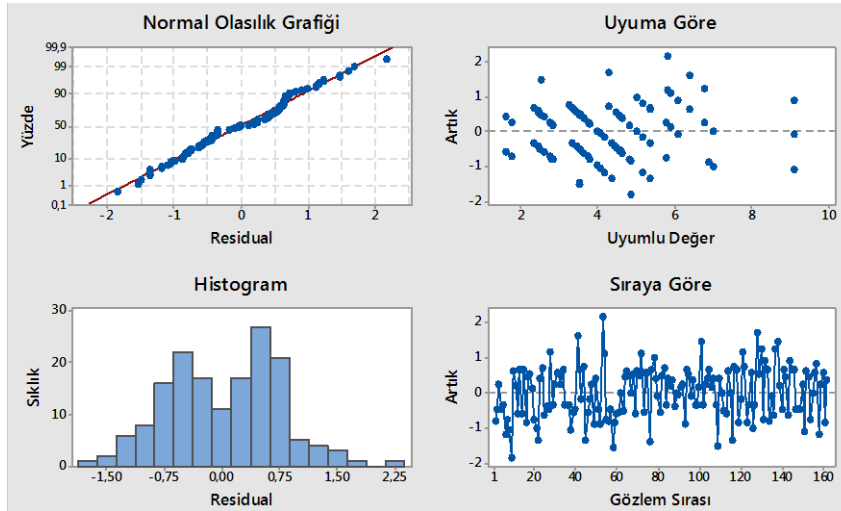
Kaynak	SD	Düz. KT	Düz. KO	F-Değeri	P-Değeri
Model	14	357,706	23,847	40,45	0,000
Doğrusal	5	230,556	38,426	65,18	0,000
Kareli	4	62,650	15,663	26,57	0,000
2’li Etkileşim	5	64,500	12,900	21,88	0,000
Hata	146	86,072	0,590		
Toplam	161	443,778			

Çizelge 5.3’de görülen ANOVA tablosundan, 0.05 anlamlılık düzeyinde bağımsız değişkenler ile cevap değişkeni arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu ve 27 adet olası tahminleyiciden 14 tanesinin anlamlı bir şekilde kabuk rengi ve yapısı cevap değişkenini açıkladığı anlaşılmaktadır. Çizelge 5.4’de verilen katsayılar tablosu ise, tüm katsayıların 0.05 anlamlılık düzeyinde anlamlı olduğunu yani, cevap değişkenini anlamlı şekilde açıkladığını ifade etmektedir. Varyans Genişliği Faktörü (VGF) değerlerinin oldukça düşük olması ise bağımsız değişkenler arasında bir ilişki olmadığını, yani çoklu doğrusallığın bulunmadığını ifade etmektedir.

Çizelge 5.4 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için katsayılar tablosu.

Terim	Etki	Katsayı	Kat SH	T-Değeri	P-Değeri	VGF (VIF)
Sabit		5,356	0,124	43,32	0,000	
gl	1,0000	0,5000	0,0905	5,53	0,000	1,00
alf	3,0833	1,5417	0,0905	17,04	0,000	1,00
fsi	1,0556	0,5278	0,0905	5,83	0,000	1,00
yog	0,5833	0,2917	0,0905	3,22	0,002	1,00
fsu	0,9167	0,4583	0,0905	5,07	0,000	1,00
gl*gl	-1,122	-0,561	0,134	-4,18	0,000	1,22
su*su	-0,761	-0,381	0,134	-2,84	0,005	1,22
fsi*fsi	-0,956	-0,478	0,134	-3,56	0,001	1,22
fsu*fsu	-1,928	-0,964	0,134	-7,18	0,000	1,22
gl*yog	0,750	0,375	0,157	2,39	0,018	1,00
alf*su	-2,750	-1,375	0,157	-8,77	0,000	1,00
alf*yog	0,667	0,333	0,111	3,01	0,003	1,00
su*yog	-1,083	-0,542	0,157	-3,46	0,001	1,00
fsi*yog	0,750	0,375	0,157	2,39	0,018	1,00

Şekil 5.19’da kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere artık değerlerin dağılımı normal dağılım desenine oldukça benzemektedir.



Şekil 5.19 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri.

Ekmek kalitesinin ölçülebilmesi için belirlenen diğer bir cevap değişkeni ise şekil düzgünlüğüdür. Yapılan deney çalışması ve analizler sonucunda şekil düzgünlüğünün faktörlere bağlı denklemi Eşitlik 5.5’de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}\hat{Y}_{\text{şekil}} = & 1.582 + 0.00375 * gl + 0.03677 * alf + 0.00806 * su - \\ & 0.0443 * fsi - 0.1498 * yog - 0.00775 * fsu + 0.000777 * \\ & fsi^2 + 0.00611 * yog^2 + 0.000082 * fsu^2 - 0.000198 * gl * \\ & alf + 0.000181 * gl * fsu - 0.000533 * alf * su + 0.000046 * \\ & alf * fsu + 0.001250 * fsi * yog - 0.000306 * fsi * fsu\end{aligned}\quad (5.5)$$

Bu eşitlikte “ $\hat{Y}_{\text{şekil}}$ ”, regresyon denklemi ile elde edilen şekil düzgünlüğü cevap değişkeninin tahmini değerini ifade etmektedir. Bu modelin belirlilik katsayısı 74,39% olarak bulunmuştur. Yani modeldeki bağımsız değişkenlerin ilgili cevap değişkenindeki değişkenliğin 74,39%’unu açıklamaktadır.

Çizelge 5.5 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için ANOVA tablosu.

Kaynak	SD	Düz. KT	Düz. KO	F-Değeri	P-Değeri
Model	13	0,292883	0,019526	28,27	0,000
Doğrusal	4	0,214117	0,035686	51,66	0,000
Kareli	3	0,031974	0,010658	15,43	0,000
2’li Etkileşim	6	0,046792	0,007799	11,29	0,000
Hata	146	0,100856	0,000691		
Toplam	161	0,393738			

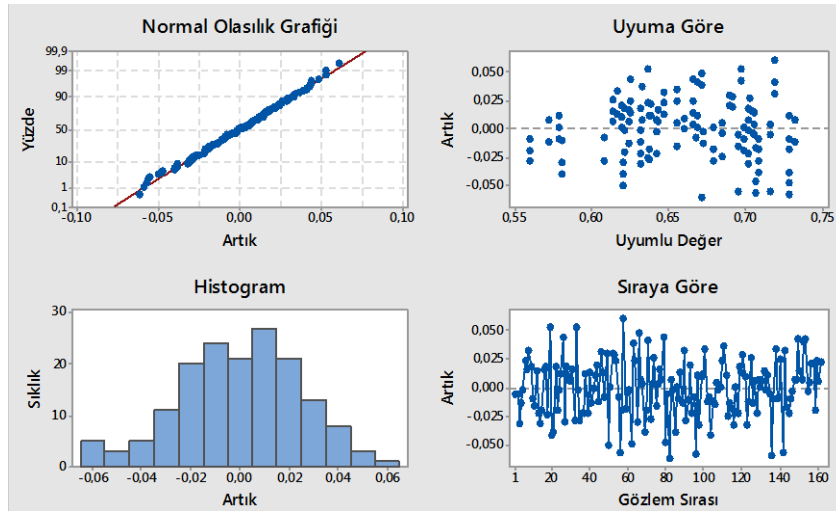
Çizelge 5.5’de verilen ANOVA tablosundan, 0.05 anlamlılık düzeyinde bağımsız değişkenler ile cevap değişkeni arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu, modelde doğrusal terimlerin yanında kareli ve etkileşim terimlerinin de olduğu ve 27 adet olası tahminleyiciden 13 tanesinin anlamlı bir şekilde ilgili cevap değişkenini açıkladığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.2’de verilen katsayılar tablosu ise, modeldeki tüm katsayıların 0.05 anlamlılık düzeyinde anlamlı olduğunu yani, ilgili cevap değişkenini anlamlı şekilde açıkladığını ifade etmektedir. Düşük Varyans Genişliği Faktörü (VGF) değerleri ise bağımsız değişkenler arasında bir ilişki olmadığını, yani çoklu doğrusallığın bulunmadığını ifade etmektedir.

Çizelge 5.6 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için katsayılar tablosu.

Terim	Etki	Katsayı	Kat SH	T-Değeri	P-Değeri	VGF (VIF)
Sabit		0,63173	0,00462	136,81	0,000	
gl	0,08500	0,04250	0,00310	13,72	0,000	1,00
alf	0,02583	0,01292	0,00310	4,17	0,000	1,00
su	-0,01306	-0,00653	0,00310	-2,11	0,037	1,00
fsu	-0,06167	-0,03083	0,00310	-9,95	0,000	1,00
fsi*fsi	0,03884	0,01942	0,00438	4,43	0,000	1,11
yog*yog	0,04884	0,02442	0,00438	5,58	0,000	1,11
fsu*fsu	0,03676	0,01838	0,00438	4,20	0,000	1,11
gl*alf	-0,03167	-0,01583	0,00536	-2,95	0,004	1,00
gl*fsu	0,02167	0,01083	0,00536	2,02	0,045	1,00
alf*su	-0,05333	-0,02667	0,00536	-4,97	0,000	1,00
alf*fsu	0,02750	0,01375	0,00536	2,56	0,011	1,00
fsi*yog	0,02500	0,01250	0,00536	2,33	0,021	1,00
fsi*fsu	-0,04583	-0,02292	0,00536	-4,27	0,000	1,00

Şekil 5.20’de ise şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere artık değerlerin dağılımı normal dağılım desenine oldukça benzemektedir.



Şekil 5.20 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri.

Diğer bir cevap değişkeni olan gözenek yapısı değişkenine ilişkin elde edilen regresyon denklemi Eşitlik 5.6’da verilmektedir.

$$\begin{aligned}
\hat{Y}_{gozenek} = & 18037 - 312.2 * gl + 1.10 * alf - 401.4 * su - \\
& 28.54 * fsi + 43.7 * yog - 24.35 * fsu + 3.554 * gl^2 + \\
& 0.08561 * alf^2 + 2.816 * su^2 + 0.404 * fsi^2 - 1.760 * yog^2 + \\
& 0.2310 * fsu^2 - 0.1087 * gl * alf + 1.824 * gl * su - 0.0341 * \\
& alf * fsu - 0.211 * yog * fsu
\end{aligned} \tag{5.6}$$

Bu eşitlikte “ $\hat{Y}_{gozenek}$ ”, regresyon denklemi ile elde edilen gözenek yapısı cevap değişkeninin tahmini değerini ifade etmektedir. Analiz sonucunda bu modelin belirlilik katsayısı 88,56% olarak hesaplanmıştır. Buradan modelde var olan bağımsız değişkenlerin gözenek yapısı cevap değişkenindeki değişkenliğin 88,59%'sinin açıkladığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.7 : Gözenek yapısı cevap değişkeni için ANOVA tablosu.

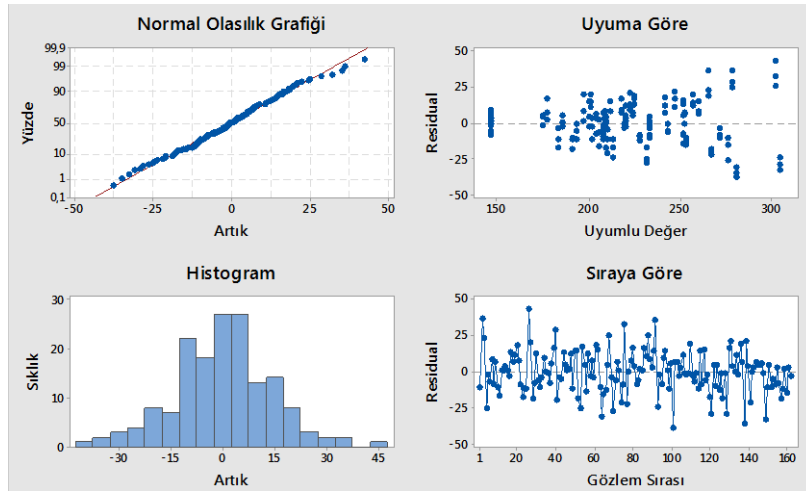
Kaynak	SD	Düz. KT	Düz. KO	F-Değeri	P-Değeri
Model	15	250957	15684,8	70,15	0,000
Doğrusal	5	28930	4821,6	21,56	0,000
Kareli	6	208746	34791,0	155,60	0,000
2'li Etkileşim	4	13281	3320,3	14,85	0,000
Hata	145	32422	223,6		
Toplam	161	283379			

Çizelge 5.7’de verilen ANOVA tablosundan, kurulan modelin $\alpha = 0.05$ düzeyinde anlamlı olduğu, modelde doğrusal terimlerin yanında kareli ve etkileşim terimlerinin de anlamlı bir şekilde yer aldığı anlaşılmaktadır. Görüldüğü üzere, aşamalı regresyon yöntemi ile 27 adet potansiyel tahminleyici terimden 15 tanesi modele dahil edilmiştir. Çizelge 5.8’de verilen katsayılar tablosuna göre, 0.05 anlamlılık düzeyinde bütün terimlerin cevap değişkenini anlamlı bir şekilde açıkladığı ifade edilebilir. Ayrıca çizelgede bulunan düşük Varyans Genişliği Faktörü (VGF) değerleri ise bağımsız değişkenler arasında bir ilişki olmadığını, yani çoklu doğrusallığın bulunmadığını ifade etmektedir.

Çizelge 5.8 : Gözenek yapısı cevap değişkeni için katsayılar tablosu.

Terim	Etki	Katsayı	Kat SH	T-Değeri	P-Değeri	VGF (VIF)
Sabit		146,91	3,52	41,68	0,000	
gl	-10,80	-5,40	1,76	-3,06	0,003	1,00
alf	-22,67	-11,33	1,76	-6,43	0,000	1,00
su	8,38	4,19	1,76	2,38	0,019	1,00
fsi	-18,48	-9,24	1,76	-5,24	0,000	1,00
fsu	23,65	11,82	1,76	6,71	0,000	1,00
gl*gl	113,73	56,87	2,69	21,13	0,000	1,30
alf*alf	68,49	34,24	2,69	12,72	0,000	1,30
su*su	35,20	17,60	2,69	6,54	0,000	1,30
fsi*fsi	20,22	10,11	2,69	3,76	0,000	1,30
yog*yog	-14,08	-7,04	2,69	-2,62	0,010	1,30
fsu*fsu	103,96	51,98	2,69	19,31	0,000	1,30
gl*alf	-17,39	-8,70	3,05	-2,85	0,005	1,00
gl*su	36,49	18,24	3,05	5,98	0,000	1,00
alf*fsu	-20,48	-10,24	3,05	-3,36	0,001	1,00
yog*fsu	-12,65	-6,32	3,05	-2,07	0,040	1,00

Şekil 5.20’de ise gözenek yapısı cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere artık değerlerin dağılımı normal dağılım desenine oldukça benzemektedir.



Şekil 5.21 : Gözenek yapısı cevap değişkeni için artıkların normal olasılık ve histogram grafikleri.

Her bir cevap değişkeni için regresyon denklemleri elde edildikten sonra, bu denklemler kullanılarak bütün cevap değişkenlerini eş zamanlı olarak optimize edecek faktör değerleri bulunmalıdır. Eğer çalışma tek bir cevap değişkeni içerseydi elde edilen ikinci derece regresyon denkleminin ekstrem noktaları araştırılarak, ilgili cevap değişkenini istenen değere ulaştıracak faktör seviyeleri belirlenebilirdi. Ancak görüldüğü üzere çalışmada dört adet cevap değişkeni bulunmakta, bunlardan

bazılarının en büyüklenmesi istenirken, bazılarının en küçüklenmesi istenmekte ve diğer bir kısmının ise bir hedef değere ulaşması arzu edilmektedir. Farklı birimlere sahip olan ve farklı hedeflere ulaşması istenen bu cevap değişkenlerini optimize etmek adına öncelikle her biri için tekil istenebilirlik değerlerinin hesaplanması gerekmektedir.

Özgül hacim cevap değişkeni Bölüm 5.5.1’de açıklandığı gibi olabildiğince yüksek olması istenen bir cevap değişkenidir. Bu nedenle bu cevap değişkeni için tekil istenebilirlik fonksiyonu Eşitlik 3.12’den de yararlanılarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$d_{ozg} = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_{ozg} < 3,36 \\ \left(\frac{\hat{Y}_{ozg} - 3,36}{5,73 - 3,36} \right)^{s_f}, & 3,36 \leq \hat{Y}_{ozg} \leq 5,73 \\ 1, & 5,73 < \hat{Y}_{ozg} \end{cases} \quad (5.7)$$

Bu eşitlikte $\hat{Y}_{ozg}$ ve d_{ozg} terimleri özgül hacim cevap değişkeni için sırasıyla, tahmini cevap değerini ve istenebilirlik değerini ifade etmektedir. Bu cevap değişkeni için alt sınır 3.36, üst sınır ise 5.73 olarak belirlenmiştir. Bu fonksiyona göre, d_{ozg} ifadesi $\hat{Y}_{ozg}$, üst sınırdan veya daha yüksek bir değer aldığı anda bir olmakta, alt sınıra yaklaştıkça bu değerde sıfıra yaklaşmakta ve alt sınırdan veya daha düşük bir değer aldığı anda ise sıfır değerini almaktadır.

Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni de aynı şekilde Bölüm 5.5.1’de açıklandığı üzere en büyüklenmek istenen bir değişkendir. Bu cevap değişkeni için istenebilirlik değerini aynı şekilde Eşitlik 3.12’den yararlanarak şu eşitlik ile hesaplanabilir.

$$d_{kabuk} = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_{kabuk} < 1 \\ \left(\frac{\hat{Y}_{kabuk} - 1}{10 - 1} \right)^{s_f}, & 1 \leq \hat{Y}_{kabuk} \leq 10 \\ 1, & 10 < \hat{Y}_{kabuk} \end{cases} \quad (5.8)$$

Bu eşitlikte $\hat{Y}_{kabuk}$ ve d_{kabuk} terimleri kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için sırasıyla, tahmini cevap değerini ve istenebilirlik değerini ifade etmektedir. Bu cevap değişkeni için 1-10 arasında değişen bir ölçek kullanıldığı için alt sınır 1, üst sınır ise 10 olarak belirlenmiştir.

Diğer bir cevap değişkeni olan şekil düzgünlüğü ise, Bölüm 5.5.1’de açıklandığı üzere 0,62 hedef değerinde olması istenen bir değişkendir. Bu nedenle bu cevap

değişkeni için istenebilirlik değeri Eşitlik 3.28'den de yararlanarak şu şekilde hesaplanabilir.

$$d_{sekil} = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_{sekil} < 0,53 \\ \left(\frac{\hat{Y}_{sekil} - 0,53}{0,78 - 0,53} \right)^{a_t}, & 0,53 \leq \hat{Y}_{sekil} \leq 0,62 \\ \left(\frac{0,78 - \hat{Y}_{sekil}}{0,78 - 0,62} \right)^{b_t}, & 0,62 \leq \hat{Y}_{sekil} \leq 0,78 \\ 0, & \hat{Y}_{sekil} > 0,78 \end{cases} \quad (5.9)$$

Eşitlikte $\hat{Y}_{sekil}$ ve d_{sekil} terimleri şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için sırasıyla, tahmini cevap değerini ve istenebilirlik değerini ifade etmektedir. Bu cevap değişkeni için alt sınır 0,53 üst sınır 0,78 ve hedef değer 0,62 olarak belirlenmiştir. Eşitlik 5.9'da verilen fonksiyona göre, d_{sekil} ifadesi $\hat{Y}_{sekil}$, hedef değerde olduğunda 1 değerini almakta, alt sınır ve üst sınıra yaklaştıkça bu değer de sıfıra yaklaşmaktadır. $\hat{Y}_{sekil}$ alt sınırın altında veya üst sınırın üstünde değer alması durumunda ise d_{sekil} ifadesi sıfır değerini almaktadır.

Gözenek yapısı cevap değişkeni ise gözeneklerin büyüklüklerinin dağılımına ilişkin standart sapmayı ifade ettiği için bu cevap değişkeninin en küçükleme istenmektedir. Çünkü ekmeklerin düzgün ve yaklaşık olarak eşit dağılan büyüklükteki gözeneklere sahip olması istenmektedir. Bu nedenle bu cevap değişkeni için istenebilirlik değeri Eşitlik 3.20'den de yararlanarak şu şekilde hesaplanabilir.

$$d_{gozenek} = \begin{cases} 1, & \hat{Y}_{gozenek} < 138,4 \\ \left(\frac{345 - \hat{Y}_{gozenek}}{345 - 138,4} \right)^{l_t}, & 138,4 \leq \hat{Y}_{gozenek} \leq 345 \\ 0, & \hat{Y}_{gozenek} > 345 \end{cases} \quad (5.10)$$

Eşitlikte $\hat{Y}_{gozenek}$ ve $d_{gozenek}$ terimleri gözenek yapısı cevap değişkeni için sırasıyla, tahmini cevap değerini ve istenebilirlik değerini ifade etmektedir. Bu cevap değişkeni için alt sınır 138,4 üst sınır ise 345 olarak belirlenmiştir. Bu fonksiyona göre, $d_{gozenek}$ ifadesi, $\hat{Y}_{gozenek}$ alt sınırdaki veya daha düşük bir değer aldığı bir olmakta, üst sınıra yaklaştıkça bu değer de sıfıra yaklaşmakta ve üst sınırdaki veya daha yüksek bir değer aldığı anda ise sıfır değerini almaktadır.

Bu cevap değişkenlerinin istenebilirlik değerlerini eş zamanlı olarak optimize edecek faktör seviyeleri Bölüm3.4’de önerilen doğrusal olmayan programlama modeli (Eşitlik 3.37–3.52) kullanılarak bulunulmaya çalışılacaktır. Bu amaçla Eşitlik 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10’da ifade edilen istenebilirlik fonksiyonları için aşağıda verilen matematiksel programlama modeli kurulmuştur.

$$Max (d_{ozg} * d_{kabuk} * d_{sekil} * d_{gozenek})^{1/4} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{ozg} = & 16.08 + 0.903 * gl + 0.0923 * alf - 0.666 * su \\ & - 0.500 * fsi + 0.2762 * yog - 0.0278 * fsu - 0.02212 * gl^2 \\ & - 0.000846 * alf^2 + 0.001708 * gl * alf + 0.00825 * gl * su \\ & - 0.002125 * gl * fsi - 0.001325 * alf * su \\ & + 0.01173 * su * fsi + 0.001489 * su * fsu \\ & - 0.00717 * fsi * yog - 0.001356 * fsi * fsu \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\alpha_{ozg} = \left(\frac{\hat{Y}_{ozg} - 3,36}{5,73 - 3,36} \right)^{sf} \quad (5.13)$$

$$d_{ozg} \leq \alpha_{ozg} \quad (5.14)$$

$$d_{ozg} \leq 1 \quad (5.15)$$

$$3,36 \leq \hat{Y}_{ozg} \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{kabuk} = & -377.7 + 1.667 * gl + 1.721 * alf + 9.12 * su \\ & + 1.029 * fsi + 4.20 * yog + 0.5446 * fsu - 0.03507 * gl^2 \\ & - 0.0609 * su^2 - 0.01911 * fsi^2 - 0.004284 * fsu^2 \\ & + 0.0469 * gl * yog - 0.02750 * alf * su + 0.00833 * alf * yog \\ & - 0.1083 * su * yog + 0.0375 * fsi * yog \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\alpha_{kabuk} = \left(\frac{\hat{Y}_{kabuk} - 1}{10 - 1} \right)^{sf} \quad (5.18)$$

$$d_{kabuk} \leq \alpha_{kabuk} \quad (5.19)$$

$$d_{kabuk} \leq 1 \quad (5.20)$$

$$10 \leq \hat{Y}_{kabuk} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned}
\hat{Y}_{sekil} = & 1.582 + 0.00375 * gl + 0.03677 * alf + 0.00806 * su \\
& - 0.0443 * fsi - 0.1498 * yog - 0.00775 * fsu \\
& + 0.000777 * fsi^2 + 0.00611 * yog^2 + 0.000082 * fsu^2 \\
& - 0.000198 * gl * alf + 0.000181 * gl * fsu - 0.000533 * alf \\
& * su + 0.000046 * alf * fsu + 0.001250 * fsi * yog \\
& - 0.000306 * fsi * fsu
\end{aligned} \tag{5.22}$$

$$\alpha_{sekil} = \left(\frac{\hat{Y}_{sekil} - 0,53}{0,78 - 0,53} \right)^{a_t} \tag{5.23}$$

$$\beta_{sekil} = \left(\frac{0,78 - \hat{Y}_{sekil}}{0,78 - 0,62} \right)^{b_t} \tag{5.24}$$

$$d_{sekil} \leq \alpha_{sekil} \tag{5.25}$$

$$d_{sekil} \leq \beta_{sekil} \tag{5.26}$$

$$0,53 \leq \hat{Y}_r \leq 0,78 \tag{5.27}$$

$$\begin{aligned}
\hat{Y}_{gozenek} = & 18037 - 312.2 * gl + 1.10 * alf - 401.4 * su \\
& - 28.54 * fsi + 43.7 * yog - 24.35 * fsu + 3.554 * gl^2 \\
& + 0.08561 * alf^2 + 2.816 * su^2 + 0.404 * fsi^2 \\
& - 1.760 * yog^2 + 0.2310 * fsu^2 - 0.1087 * gl * alf \\
& + 1.824 * gl * su - 0.0341 * alf * fsu - 0.211 * yog * fsu
\end{aligned} \tag{5.28}$$

$$\alpha_{gozenek} = \left(\frac{345 - \hat{Y}_{gozenek}}{345 - 138,4} \right)^{l_t} \tag{5.29}$$

$$d_{gozenek} \leq \alpha_{gozenek} \tag{5.30}$$

$$d_{gozenek} \leq 1 \tag{5.31}$$

$$\hat{Y}_p \leq 345 \tag{5.32}$$

$$24 \leq gl \leq 32 \tag{5.33}$$

$$0 \leq alf \leq 40 \tag{5.34}$$

$$60 \leq su \leq 65 \tag{5.35}$$

$$28 \leq fsi \leq 38 \tag{5.36}$$

$$7 \leq \text{yog} \leq 11 \quad (5.37)$$

$$45 \leq \text{fsu} \leq 75 \quad (5.38)$$

Modelin amaç fonksiyonu Eşitlik 5.11’de görüldüğü gibi cevap değişkenlerinin istenebilirlik değerlerinin geometrik ortalaması olarak hesaplanmıştır. Bunun nedeni cevap değişkenlerinden herhangi birinin istenebilirlik değeri sıfır olduğunda bileşik istenebilirlik değerinin de sıfır olmasının istenmesidir. Bu modelde, Eşitlik 5.12-5.16’da özgül hacim değişkeni için, Eşitlik 5.17-5.21’de kabuk rengi ve yapısı değişkeni için, Eşitlik 5.22-5.27’de şekil düzgünlüğü değişkeni için ve Eşitlik 5.28-5.32’de ise gözenek yapısı değişkeni için kısıtlar kümesi verilmektedir. Eşitlik 5.33-5.38’de ise bağımsız değişkenlerin sınırlandırılmasına ilişkin kısıtlar bulunmaktadır.

Bütün cevap değişkenlerini eş zamanlı olarak optimize etmek amacıyla kurulan bu model GAMS yazılımının 24.1.3 versiyonu kullanılarak çözülmüştür. Modelin GAMS yazılım kodları Ek A’de verilmiştir. Doğrusal olmayan programlama ile 24 iterasyon süren çözüm sonuncu bileşik istenebilirlik değeri 0,802 olarak elde edilmiştir. Bu çözümü sağlayan optimum faktör değerleri ise Çizelge 5.9’da verilmektedir.

Çizelge 5.9 : Modelin çözülmesi sonuncu elde edilen optimum faktör değerleri.

Faktör	Alt sınır	Üst sınır	Optimum değer
Gluten oranı	24%	32%	28.748%
α Amilaz enzim ilavesi	0 ppm	40 ppm	34.018 ppm
Kullanılan su miktarı	60%	65%	62.471%
Fermantasyon sıcaklığı	28 °C	38 °C	34.988 °C
Yoğurma süresi	7 dk	11 dk	9.714 dk
Fermantasyon süresi	45 dk	75 dk	65.273 dk

5.7 Bulgular ve Tartışma

Çoklu cevap yüzeylelerinin optimizasyonu için önerilen matematiksel modelin ekmek üretimi sürecinde uygulaması sonuncunda, un özellikleri ve üretim parametrelerinin ekmek kalitesine olan etkilerinin yönü, şekli ve şiddeti açısından birçok bulgu elde edilmiş ve kaliteli bir ekmek üretimi için optimum parametre değerleri önerilmiştir. Her bir cevap değişkeninin faktörlerle arasındaki ilişkilerin şeklini görebilmek için etki grafikleri çizilmiştir.

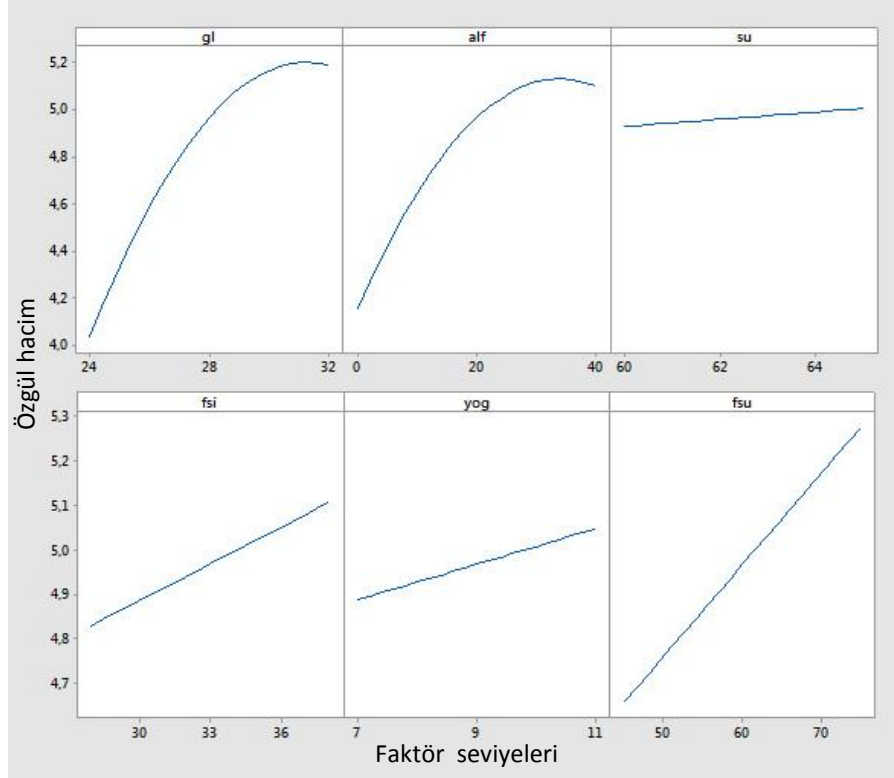
Şekil 5.22’de çalışma kapsamında ele alınan bütün faktörlerin (bağımsız değişkenlerin) özgül hacim cevap değişkenine olan etkileri ayrı ayrı grafikler üzerinde gösterilmiştir. Grafikten anlaşılabileceği üzere, kullanılan su miktarı, fermantasyon sıcaklığı, fermantasyon süresi ve yoğurma süresi ekmeğin özgül hacmi üzerinde yaklaşık olarak doğrusal bir etkiye sahipken, gluten oranı ve α amilaz enzimi ilavesinin etkileri eğriseldir.

Şekil 5.22’de verilen grafiğe göre, gluten oranının artmasının belli bir seviyeye kadar ekmeğin özgül hacmini arttırdığı, yaklaşık olarak 30% değerinden sonra ise özgül hacim üzerinde olumsuz bir etki yaptığı ifade edilebilir. Bunun temel nedeni, yüksek gluten oranının, çok güçlü bir gluten ağı yapısı oluşturarak maya enzimleri tarafından oluşturulan karbondioksit gazının ekmeğin kabarmasını engellemesi olarak düşünülebilir.

Alfa amilaz enzimi ilavesinin özgül hacim üzerine etkisi de, yaklaşık olarak gluten oranı değişkeni ile aynıdır. Bu grafikte alfa amilaz enzimi ilavesinin yaklaşık olarak 30 ppm seviyesine kadar özgül hacmi etkili bir şekilde arttırdığı bu noktadan sonra ise tersi yönde bir etki yapmaya başladığı görülmektedir. Bunun nedeni, fazla enzim aktivitesinin ekmek içinin yapışkan, gözeneklerinin çok küçük ve dolayısıyla ekmek hacminin düşük olmasına neden olabileceği ile açıklanabilir.

Kullanılan su oranı, fermantasyon sıcaklığı, fermantasyon süresi ve yoğurma süresi faktörlerinin yaklaşık olarak doğrusal bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Dört faktörün hepsi de özgül hacim cevap değişkenini olumlu yönde etkilemektedirler. Bunlardan en fazla etkiye fermantasyon süresi, daha sonra sırasıyla fermantasyon sıcaklığı, yoğurma süresi ve en az etkiye de kullanılan su miktarının sahip olduğu ifade edilebilir. Eğer bu uygulama çalışması tek cevaplı (özgül hacim) olsaydı bu dört değişkenin hangi seviyeye kadar özgül hacmi arttırdığı ve nerede tepe noktaya

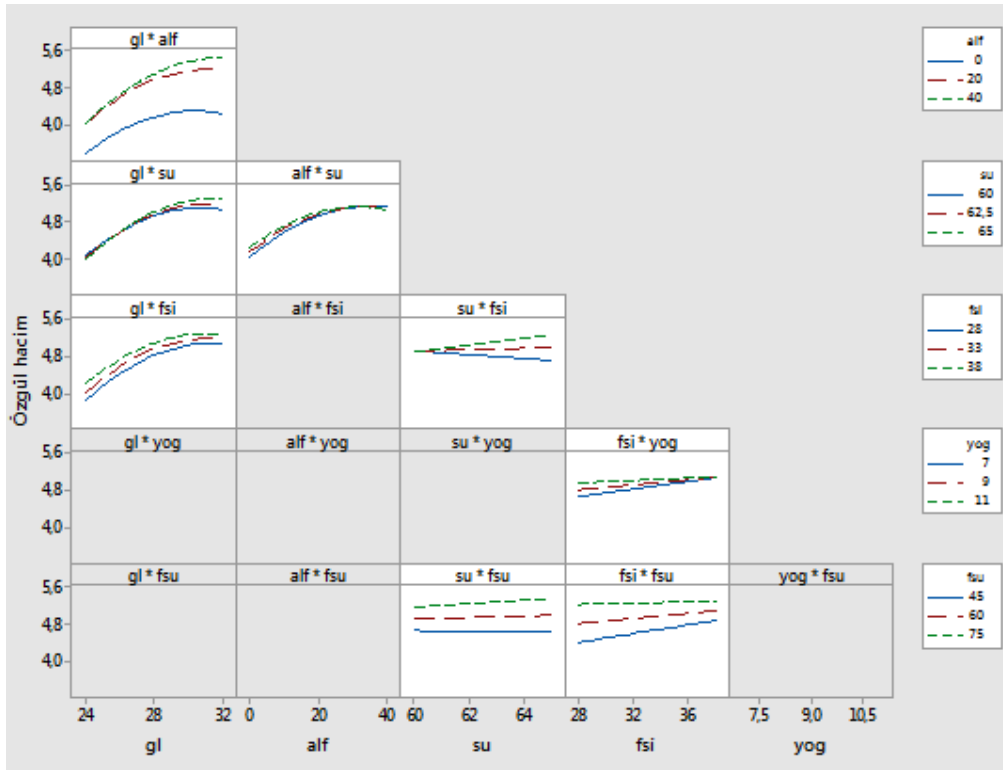
ulaştığını araştırmak için faktör aralıklarını genişleterek deneyler yapmaya devam etmek gerekirdi.



Şekil 5.22 : Faktörlerin özgül hacim cevap değişkenine olan etkileri.

Özgül hacim cevap değişkeni için faktörlerin ikili etkileşimlerinden istatistiksel olarak anlamlı olanlar Şekil 5.23’de ayrı ayrı grafikler olarak verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, özellikle su ile fermantasyon sıcaklığı değişkenlerinin önemli bir etkileşime sahip olduğu söylenebilir. Bu etkileşime göre, fermantasyon sıcaklığı düşük değer aldığı anda kullanılan su miktarı ile ekmeğin özgül hacmi arasında pozitif yönlü bir ilişki mevcutken, yüksek değer aldığı anda bu ilişkinin yönü tersine dönmekte, yani su ile özgül hacim arasında negatif yönlü bir ilişki olmaktadır.

Fermantasyon sıcaklığı ile yoğurma süresi, su miktarı ile fermantasyon süresi ve fermantasyon sıcaklığı ile fermantasyon süresi değişkenleri arasında da hafif etkileşimler bulunmaktadır.

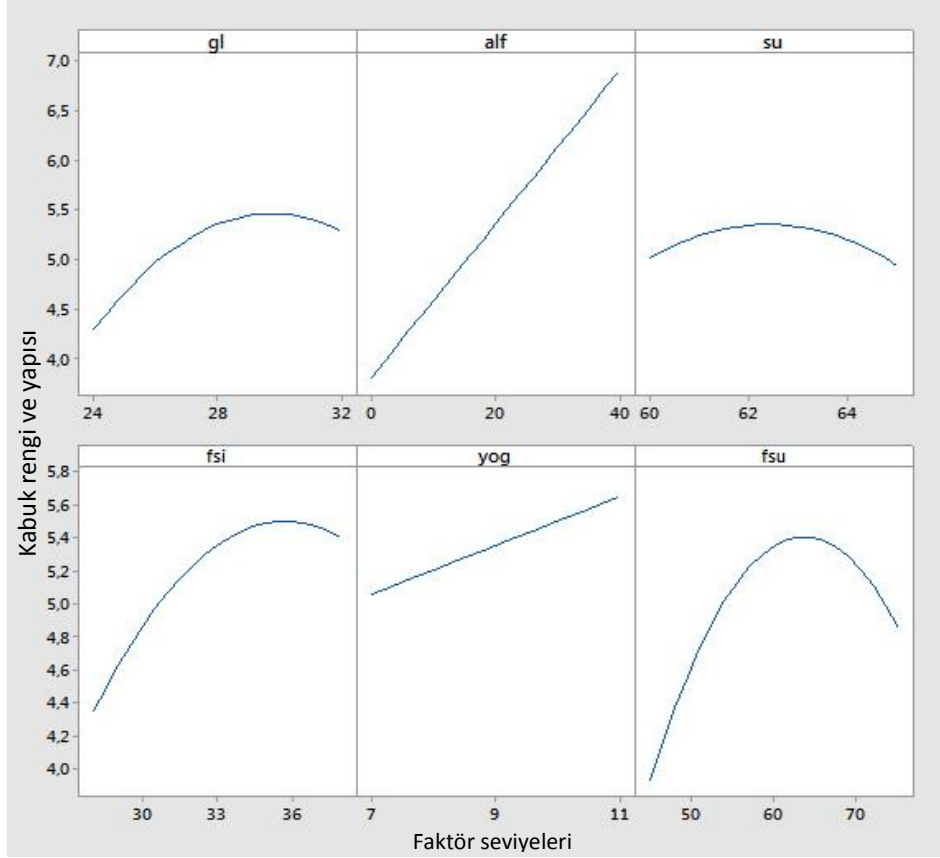


Şekil 5.23 : Özgül hacim cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri.

Her bir faktörün kabuk rengi ve yapısı cevap değişkenine olan etkilerinin gösterildiği grafikler Şekil 5.24’de verilmiştir. Grafiklere bakıldığında, ilk olarak gluten oranının, kabuk rengi ve yapısını belli bir seviyeye kadar olumlu yönde etkilediği, yaklaşık 29% seviyesinden sonra ise bu etkinin tersi yönde olduğu görülmektedir. Alfa amilaz enzimi ilavesi ise gluten oranının aksine kabuk rengi ve yapısı üzerinde doğrusal ve güçlü bir etkiye sahiptir. Bu etki görüldüğü üzere pozitif yönlüdür. Bunun nedeni alfa amilaz enziminin un içerisindeki zedelenmiş nişastaya etki ederek ekmeğin daha kırmızı ve alımlı bir renge sahip olmasını sağlaması olarak yorumlanabilir.

Kullanılan su değişkeni çok güçlü olmamakla birlikte eğrisel bir etkiye sahiptir. Görüldüğü üzere su miktarı için 62.5% seviyesi kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni açısından en iyi seviye olarak görülmektedir. Fermantasyon sıcaklığı ve süresi de ekmeğin kabuk rengi ve yapısı üzerinde oldukça etkili olduğu söylenebilecek faktörlerdir. Görüldüğü üzere her ikisi de eğrisel bir etkiye sahiptir ve bir noktaya kadar ekmeğin kabuk rengine ve yapısına olumlu yönde etkileri vardır. Ancak belli bir noktadan sonra her iki grafik içinde eğriler tersine dönmektedir. Bunun nedenini özellikle belli bir seviyeden sonra gluten yapısının maya enzimleri tarafından oluşturulan karbondioksit gazına dayanamaması sonucu ekmeğin yüzeyinin çatlaması ve düzgünsüzleşmesi olarak açıklayabiliriz. Yoğurma süresi

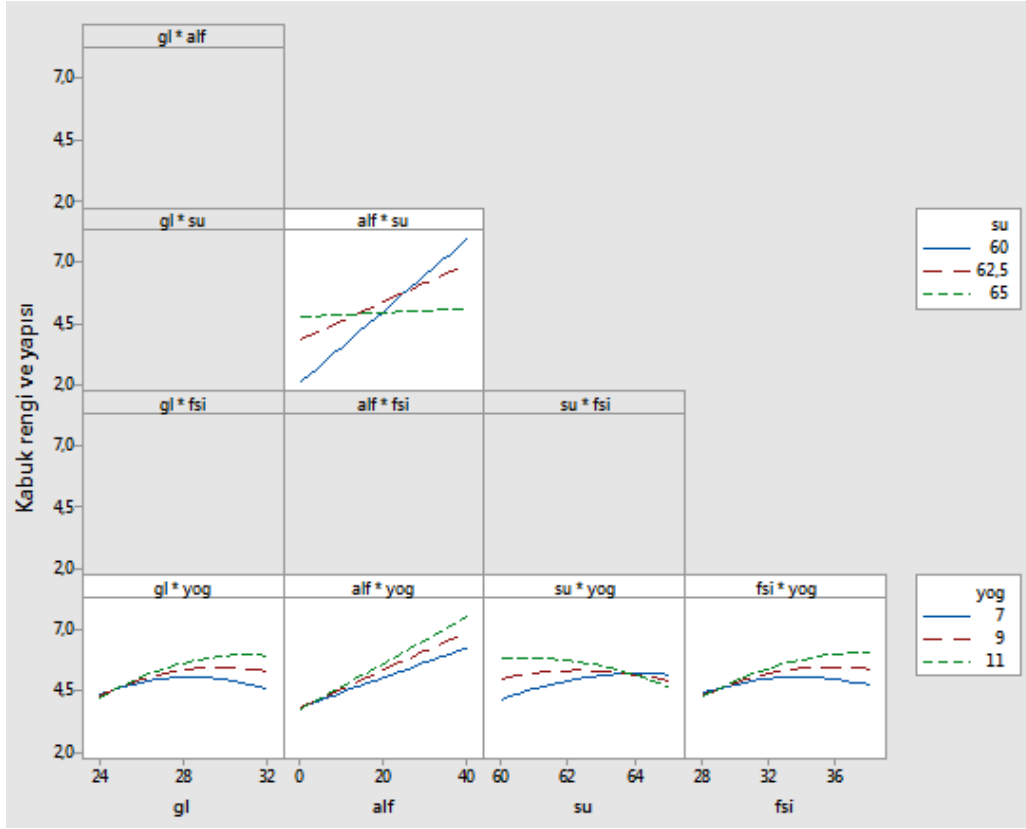
faktörü ise, alfa amilaz enzim ilavesi gibi ekmeğin kabuk rengi ve yapısını olumlu yönde ve doğrusal bir şekilde etkilemektedir.



Şekil 5.24 : Faktörlerin kabuk rengi ve yapısı cevap değişkenine olan etkileri.

Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni için faktörlerin ikili etkileşimlerinden istatistiksel olarak anlamlı olanlar Şekil 5.25’de ayrı ayrı grafikler olarak verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere, özellikle alfa amilaz enzim ilavesi ile su değişkenlerinin önemli bir etkileşime sahip olduğu söylenebilir. Bu etkileşime göre kullanılan su miktarı 60% seviyesinde olduğunda alfa amilaz enzim ilavesinin, ekmeğin kabuk rengi ve yapısını oldukça etkili şekilde iyileştirdiği ifade edilebilir. Su miktarı arttıkça alfa amilaz enzim ilavesinin, ekmeğin kabuk rengi ve yapısı üzerindeki iyileştirme gücünün azaldığı görülmektedir.

Yoğurma süresi ile diğer değişkenler arasında var olan etkileşimlere bakıldığında, yoğurma süresinin artması sonuncu, gluten oranının, alfa amilaz enzim ilavesinin ve fermantasyon sıcaklığının kabuk rengi ve yapısı üzerindeki etkisinin kısmen arttığı, kullanılan su miktarının etkisinin ise azaldığı ifade edilebilir.

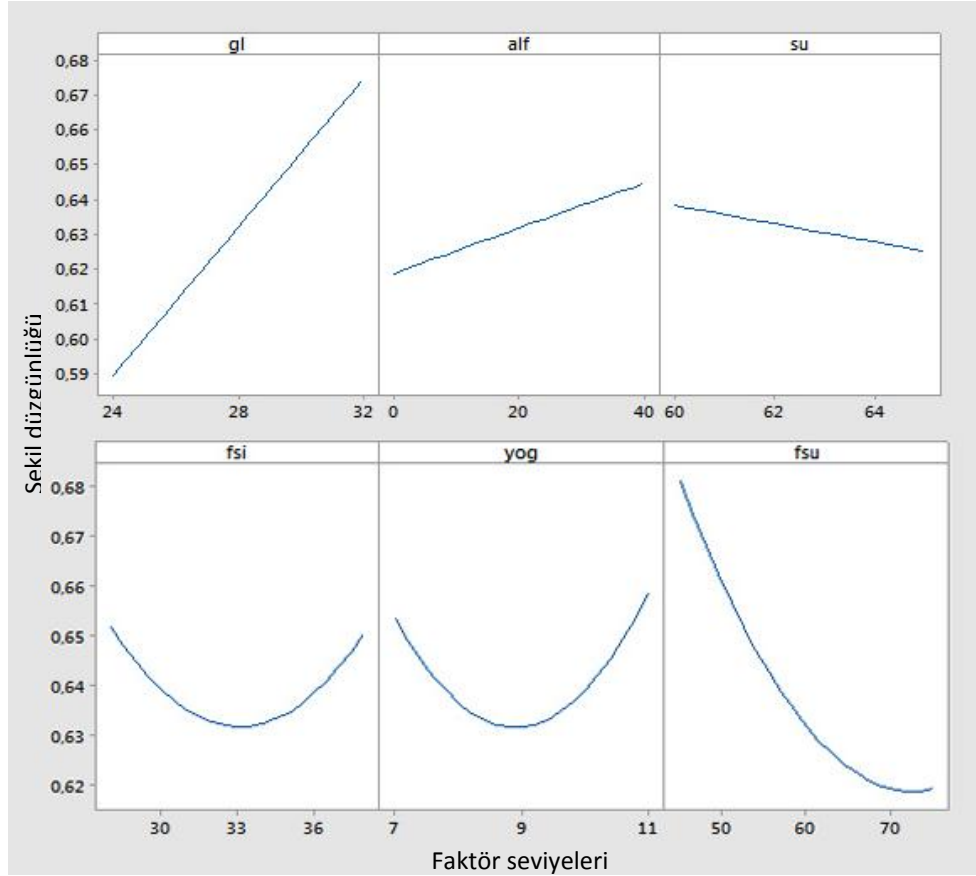


Şekil 5.25 : Kabuk rengi ve yapısı cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri.

Ekmeğin kalitesi hakkında bilgi veren diğer bir kriter olan şekil düzgünlüğü cevap değişkeninin faktörler tarafından ne derecede ve ne şekilde etkilendiğini ifade eden grafikler Şekil 5.26'da verilmiştir. Bu grafikleri incelediğimizde gluten oranı ve alfa amilaz enzim ilavesi değişkenlerinin şekil düzgünlüğüne doğrusal ve olumlu bir etkilerinin olduğu söylenebilir. Bu değişkenlerden gluten oranının ilgili cevap değişkeni üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Bölüm 5.5.1'de açıklandığı üzere bu cevap değişkeni için en iyi değer 0,62 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle gluten oranının yaklaşık olarak 28% seviyesine kadar cevap değişkenine olumlu yönde bir etkisi olurken, bu seviyeden sonra artmaya devam eden gluten oranının cevap değişkenini olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Buradan hareketle, özellikle 30%'dan daha fazla gluten oranının ekmeğin şeklini oval bir yapıya çevirdiği için şekil düzgünlüğünü olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Alfa amilaz enzimi ilavesinin yüksek seviyede olması durumunda da aynı şekilde, DO'nın fazla yüksek olduğu ve dolayısıyla ekmek şeklinin gereğinden fazlaca oval yapıya yaklaştığı ifade edilebilir.

Kullanılan su miktarının şekil düzgünlüğü ile doğrusal ve ters bir ilişkisinin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni fazla suyun hamurun özgül ağırlığını arttırarak, maya hücreleri tarafından oluşturulan gazın ekmeği kabartmasını engellemesi olarak açıklanabilir. DO'nın optimum değeri 0,62 olarak kabul edildiğinde en iyi su seviyesinin 62% civarında olduğu belirtilebilir.

Fermantasyon sıcaklığı, fermantasyon süresi ve yoğurma süresi değişkenleri ise grafiklerden de anlaşılacağı üzere eğrisel etkilere sahiptir. Fermantasyon sıcaklığı ve yoğurma süresinin yaklaşık olarak aynı tipte bir etki grafiğine sahip olduğu ve bu iki değişken için de orta seviyedeki değerlerin şekil düzgünlüğü açısından en iyi düzey olduğu ifade edilebilir. DO'nı için en iyi seviye 0,62 kabul edildiğinde fermantasyon süresi değişkeni için de en iyi seviyenin yaklaşık olarak 65 dakika olduğu ifade edilebilir.

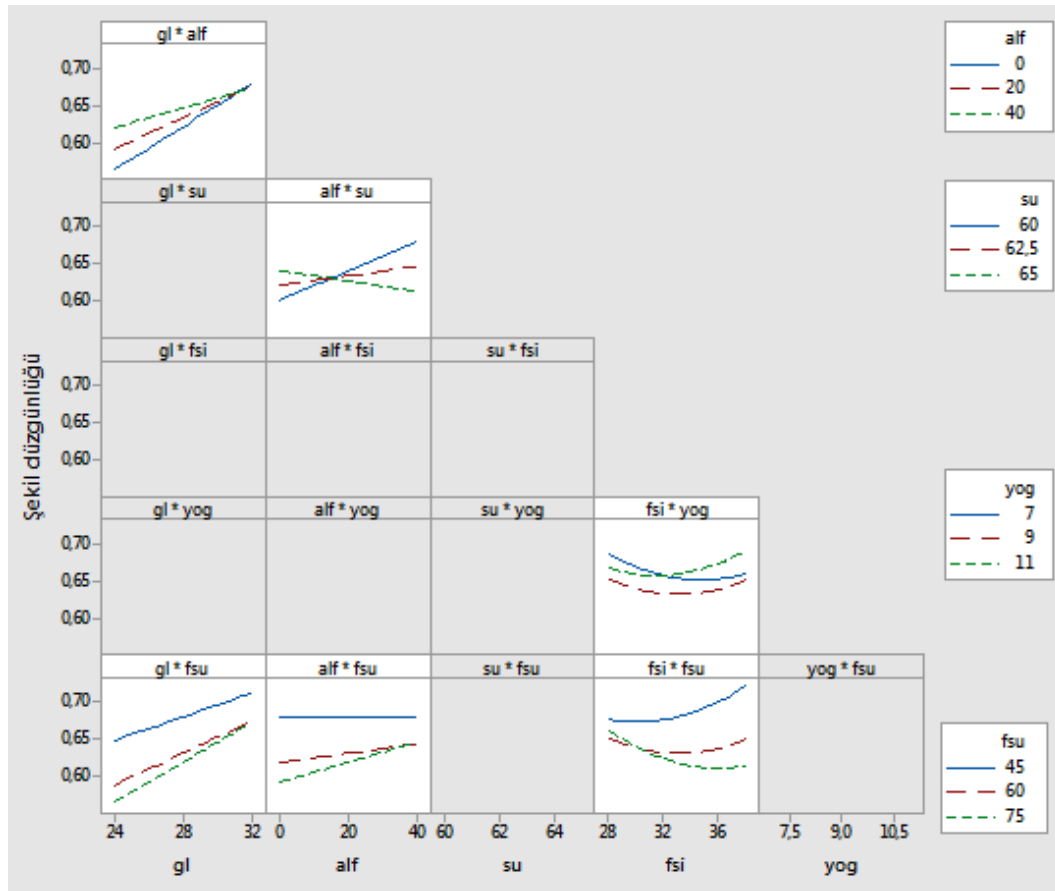


Şekil 5.26 : Faktörlerin şekil düzgünlüğü cevap değişkenine olan etkileri.

Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni için faktörlerin ikili etkileşimlerinden istatistiksel olarak anlamlı olanlar Şekil 5.27'de ayrı ayrı grafikler olarak verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, özellikle alfa amilaz enzim ilavesi ile kullanılan su miktarı ve fermantasyon sıcaklığı ile fermantasyon süresi değişkenleri arasında

önemli bir etkileşimin olduğu vurgulanmalıdır. Bu etkileşime göre, kullanılan su miktarı düşükken (60% civarı) alfa amilaz enzim ilavesi ekmeğin şekil düzgünlüğü üzerinde önemli ve pozitif bir etkiye sahiptir. Ancak bu etki alfa amilaz enzim ilavesi fazla olduğunda tersine dönmektedir. Çünkü su seviyesi düşükken kullanılan fazla alfa amilaz enzimi ilavesi, ekmeği olması gerektiğinden daha fazla şişirip istenmeyen oval bir şekil almasına neden olabilmektedir. Kullanılan su miktarı arttıkça, alfa amilaz enzimi ilavesinin ekmeğin şekil düzgünlüğüne olan etkisi tersine dönmekte, yani negatif bir etkiye sahip olmaktadır.

Fermantasyon süresi düşük seviyede (45 dakika civarı) olduğunda, fermantasyon sıcaklığının ekmeğin şekil düzgünlüğüne olan etkisi pozitif yönlü iken, artması ile bu etki tersine dönmektedir. Diğer etkileşimlere bakıldığında, alfa amilaz enzim ilavesinin artması gluten oranının şekil düzgünlüğüne olan etkisini hafif bir şekilde azaltmaktadır. Yoğurma süresinin artması ise, fermantasyon sıcaklığının şekil düzgünlüğüne olan etkisini negatif yönden pozitif yöne çevirmektedir.



Şekil 5.27 : Şekil düzgünlüğü cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri.

Gözenek yapısı cevap değişkeninin araştırma kapsamında ele alınan her bir faktör tarafından ne derecede ve ne şekilde etkilendiğini ifade eden grafikler Şekil 5.28’de verilmiştir. Bu grafiklerden gözenek yapısının bütün faktörler tarafından eğrisel bir şekilde etkilendiği, özellikle gluten oranı, alfa amilaz enzim ilavesi ve fermantasyon sıcaklığı faktörlerinden güçlü bir şekilde etkilendiği sonuncu çıkarılabilir.

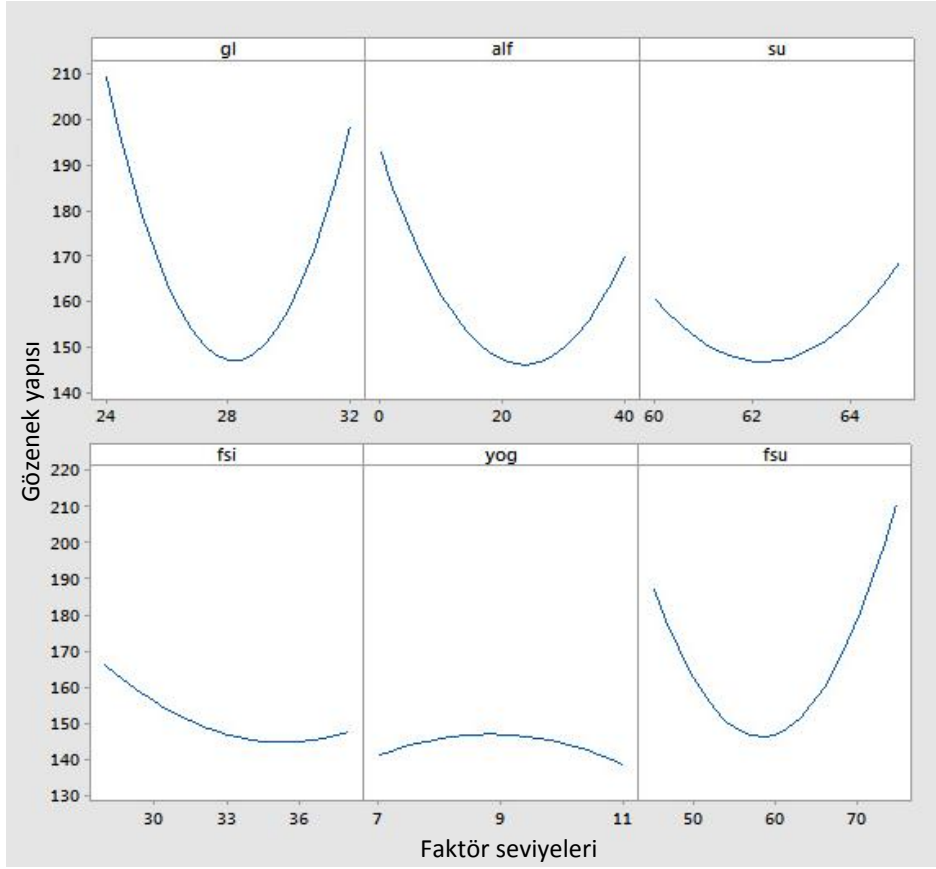
Grafikler yorumlanırken gözenek yapısı cevap değişkeninin Bölüm 5.5.1’de açıklandığı üzere en küçüklenmek istenen bir cevap değişkeni olduğuna dikkat edilmelidir. Bu düşünce ile bakıldığında ilk sırada bulunan gluten oranı için en iyi seviyenin yaklaşık olarak 28% olduğunu söylemek mümkündür. Görüldüğü üzere gluten oranının az veya fazla olması gözeneklerin büyüklüklerinin standart sapmasının büyük olmasına yani, birbirinden çok farklı büyüklüklerde gözeneklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bunun nedenini, düşük gluten miktarına sahip unlarla yapılan hamurlardaki gluten ağ yapısının fermantasyon süresince oluşan gazı tutamayıp yırtılması ve gözeneklerin birleşmesi sonuncu aşırı büyük oyukların oluşması olarak açıklayabiliriz.

Alfa amilaz enzim ilavesine bakıldığında, bu faktörün belli bir seviyeye kadar gözenek yapısı cevap değişkenini iyileştirdiği, yaklaşık 23 ppm seviyesinden sonra ise tersi yönünde bir etki yaptığı görülmektedir. Alfa amilaz enzim ilavesinin ekmek içi gözenek yapısı üzerinde olumlu bir etkisi olduğu zaten bilinmektedir. Ancak bu çalışma ile alfa amilaz enziminin belli bir noktadan sonra tersi yönünde bir etki yaptığını görmekteyiz. Bunun muhtemel nedeni ise aşırı miktardaki alfa amilaz enziminin hamurun yapışkanlığını arttırması sonuncu gözenek yapısını olumsuz yönde etkilemesi olarak tahmin edilmektedir.

Kullanılan su miktarı ve fermantasyon sıcaklığı değişkenlerinin etkileri ise nispeten daha azdır. İlgili cevap değişkeni açısından, su miktarı için en iyi seviye yaklaşık olarak 63%, fermantasyon sıcaklığı için 35⁰C olarak ifade edilebilir. Yoğurma süresi faktörünün gözenek yapısı cevap değişkeni üzerinde oldukça az bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

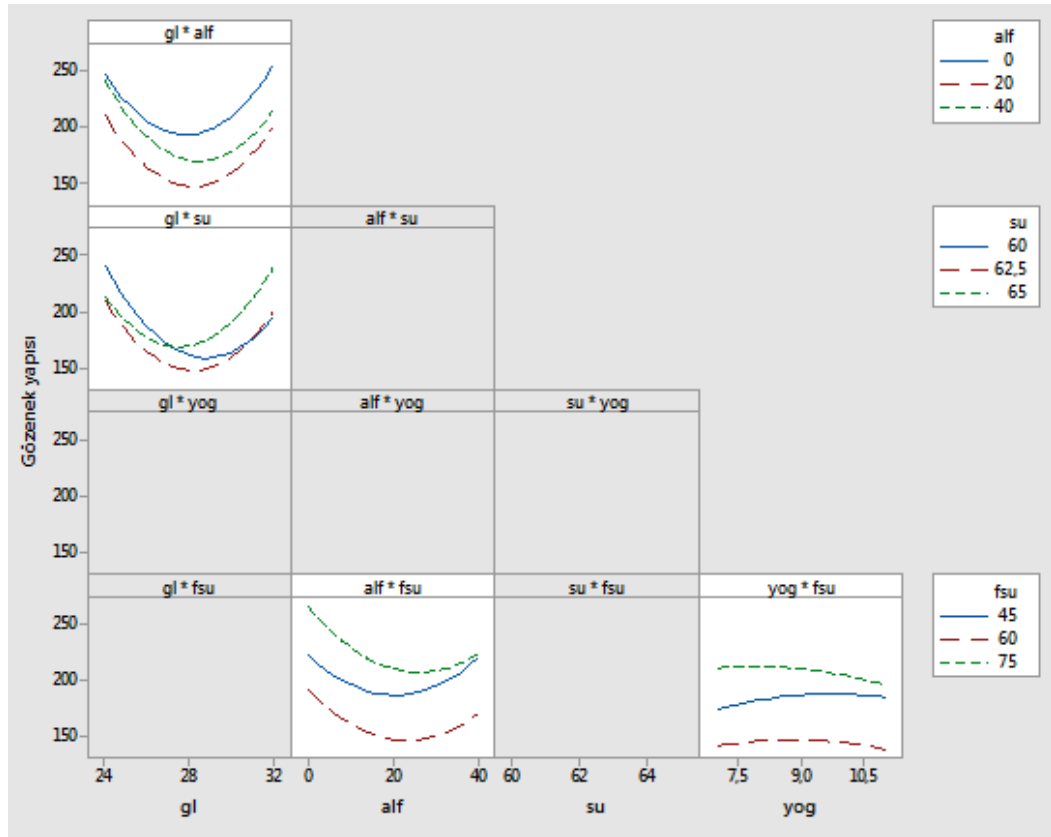
Fermantasyon süresi ise, alfa amilaz ve gluten oranı değişkenlerinde olduğu gibi belli bir seviyeye kadar gözenek yapısı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmuş, yaklaşık 60 dakika seviyesinden sonra ise gözenek yapısının düzgünlüğünü azaltıcı bir etki göstermiştir. Bunun nedenini uzayan fermantasyon süresi boyunca maya hücreleri

tarafından açığa çıkarılan karbondioksit gazına ne kadar güçlü olsa da bir süreden sonra gluten ağ yapısının dayanamaması ve ekmek içi boşlukların birleşerek büyük oyukları meydana getirmesi şeklinde açıklamak mümkündür.



Şekil 5.28 : Faktörlerin gözenek yapısı cevap değişkenine olan etkileri.

Gözenek yapısı cevap değişkeni için faktörlerin ikili etkileşimlerinden istatistiksel olarak anlamlı olanlar Şekil 5.29’da ayrı ayrı grafikler olarak verilmiştir. Grafiklere bakıldığında önemli bir etkileşim görülmemektedir. Ancak kullanılan su miktarının artması, özellikle belli bir seviyeden sonra gluten oranının ekmeğin gözenek yapısına olan negatif etkisini arttırmaktadır.



Şekil 5.29 : Gözenek yapısı cevap değişkeni bazında faktörlerin ikili etkileşimleri.

Yukarıda verilen grafiklerde görüldüğü üzere, bağımlı ve bağımsız değişken arasında var olan ilişkilerin birçoğu eğriseldir. Eğer ikinci dereceden bir cevap yüzeyi modeli kullanılmamış olsaydı eğrisel olan bu ilişkileri açıklamakta doğrusal modeller yetersiz kalacaklardı.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Cevap yüzeyi yöntemi üzerine yapılan bu çalışmada, farklı birimlere, büyüklüklere ve hedeflere (minimizasyon, maksimizasyon veya istenen bir hedef değer) sahip cevap değişkenlerinin eş zamanlı olarak optimizasyonunu sağlayabilmek için doğrusal olmayan bir model önerisinde bulunulmuş ve önerilen bu model ekmek üretimi sürecinde uygulanmıştır. Böylelikle çalışma kapsamında çoklu yanıt yüzeylerinin birlikte optimizasyonu için farklı bir bakış açısı getirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca önerilen bu model oldukça önemli bir besin kaynağı olan ekmeğin üretim sürecine uygulanarak hem modelin daha iyi anlaşılabilmesi, hem de daha kaliteli bir ekmek üretimi için un özellikleri ve üretim parametrelerinin ne olması gerektiği konusunda literatüre bir katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Tez kapsamında, çoklu cevap yüzeylerinin daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle tek yanıtlı cevap yüzeyi yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntem birinci derece modeller ve ikinci derece modeller olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir. Birinci derece modeller için literatürde sıklıkla kullanılan deney tasarımlarına değinildikten sonra, model anlamlılığı ve yeterliliği ile ilgili istatistiksel testler açıklanmıştır. Böylelikle hangi durumlarda birinci derece modellerin yeterli olmadığı ve daha yüksek dereceli modellerin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

Daha sonra ikinci derece modellerin genel yapıları verilerek bu modelleri oluşturabilmek için kullanılan deney tasarımları anlatılmıştır. Bu noktada 3^k deney desenleri en kapsamlı desenler olmalarına rağmen, çok fazla deney gerektirmesi pratik uygulamalarda maliyet ve zaman açısından sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, daha az deney ile oldukça yeterli ve etkili sonuçlar verdiği daha önce bir çok kez kanıtlanmış olan Merkezi Bileşik Tasarımlar ve Box-Behnken deney tasarımlarına da tezde değinilmiş ve uygulama çalışmasında Box-Behnken tasarımı kullanılmıştır.

Çoklu cevap yüzeyi problemlerinde farklı amaçlara ulaşması istenen ve farklı birimlere sahip cevap değişkenlerinin bir araya getirilerek ortak bir çatı altında toplanması ve böylelikle bütün cevap değişkenleri için belli bir ödünleşim ile

optimum faktör seviyelerinin elde edilmesi önemli bir sorundur. Derringer ve Suich (1980), bu sorun üzerinde çalışarak farklı hedef değerlere ulaşması istenen cevap değişkenleri için istenebilirlik fonksiyonlarını tanımlamışlardır. Herbir cevap değişkeni için tekil istenebilirlik değerleri bu fonksiyonlar kullanılarak elde edildikten sonra, bu değerler farklı ortalamalar veya yaklaşımlar kullanılarak, bileşik istenebilirlik değeri altında bir araya getirilebilmektedirler. Ancak bu noktada özellikle ikinci veya daha yüksek dereceden modeller kullanıldığında bileşik istenebilirlik değerini optimum yapacak faktör seviyelerini elde etmek araştırmacılar için sorun oluşturmaktadır. Bu sorunun temel nedenleri, cevap yüzeylerini ifade eden denklemlerin doğrusal olmaması (yüksek dereceli olması) ve istenebilirlik değerlerini tanımlayan fonksiyonların kesikli fonksiyon olmalarıdır.

Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, literatürde, yapay sinir ağları ve sezgisel algoritmalar önerilmiş ve denenmiştir. Ancak, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ve modelleme ile en azından, derecesi çok yüksek olmayan bu tip fonksiyonların matematiksel programlama ile çözülebileceği düşünülmüş ve bileşik istenebilirlik değerini optimize etmek için doğrusal olmayan bir model önerisinde bulunulmuştur. Önerilen bu modelde kesikli istenebilirlik fonksiyonları çeşitli kısıtlar kullanılarak ifade edilmişlerdir. Cevap değişkenlerinin isteğe göre ağırlıklandırılabilir olması ve herhangi bir çok yanıtlı cevap yüzeyi problemine rahatlıkla uygulanabilme esnekliğine sahip olması önerilen modelin önemli avantajlarındanıdır.

İleriye dönük çalışmalarda, önerilen bu modelin tekrarlı deneylerdeki değişkenliği de dikkate alacak şekilde kurgulanması önerilebilir. Böylelikle daha robüst sonuçlar elde etmek mümkün olabilecektir. Bunu gerçekleştirebilmek için stokastik modellemeyi bu konuya dahil etmek gerekmektedir. Diğer bir düşünce olarak bulanık mantık kullanılarak modelleme yapılabilir. Özellikle dilsel cevap değişkenlerini ölçerken belirsizliği göz önünde bulundurduğu için bulanık modellemenin daha anlamlı sonuçlar vereceği ifade edilebilir.

Çalışmanın ikinci kısmı olarak düşünülebilecek uygulama kısmında ise önerilen model ekmek üretimine uygulanıştır. Böylelikle hem modelin daha iyi anlaşılmasının sağlanması hem de gıda sektöründe ve insanoğlunun beslenmesinde oldukça önemli bir yeri olan ekmeğin daha kaliteli üretilmesi için öneriler verilmesi hedeflenmiştir. Tekirdağ'da faaliyet göstermekte olan EKSUN gıda işletmesinde gerçekleştirilen bu uygulama çalışması, kullanılan unun gluten oranı, alfa amilaz

enzim ilavesi, kullanılan su miktarı, yoğurma süresi, fermantasyon sıcaklığı ve fermantasyon süresi olmak üzere altı adet bağımsız değişken (faktör) içermektedir. Ekmek kalitesini belirlemek için seçilen kriterler ise, ekmeğin özgül hacmi, kabuk rengi ve yapısı, şekil düzgünlüğü ve iç gözenek yapısı olmak üzere dört tanedir.

Çalışmada cevap değişkenleri ile faktörler arasındaki ilişiyi açıklayabilmek için öncelikle birinci derece modeller denenmiş ancak bu modeller yetersiz kalınca ikinci derece modellerin kullanılmıştır. Veri toplama düzeni için oldukça ekonomik olan ve ikinci derece modeller için yaygın şekilde kullanılan Box-Behnken deney tasarımı tercih edilmiştir. Rassallığın denemeler üzerindeki etkisini azaltmak ve daha sağlıklı sonuçlar elde etmek amacıyla deneyler rassal bir sıra ile gerçekleştirilmiş ve her bir deneme kombinasyonu için üç adet tekrar yapılmıştır.

Cevap değişkenleri ile faktörler arasındaki ilişkiyi ifade eden ikinci derece regresyon denklemleri, bu denklemler için anlamlılık ve yeterlilik testleri Minitab® paket programının 17.1.0 versiyonundan yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Herbir cevap değişkeni ile faktörler arasındaki ilişkiyi ifade eden fonksiyonlar elde edildikten sonra tekil istenebilirlik değerlerini verecek fonksiyonlar tanımlanmış ve nihayetinde toplam istenebilirlik değerini en büyüleyecek doğrusal olmayan bir programlama modeli kurulmuştur. Kurulan bu model GAMS adlı paket programın 24.1.3 versiyonu kullanılarak çözülmüş ve böylelikle faktörlerin optimum seviyeleri elde edilmeye çalışılmıştır.

Faktörlerin herbir cevap değişkenine olan doğrusal, eğrisel ve etkileşim etkilerinden istatistiksel olarak anlamlı olanlar, Bölüm 5.7’de grafiklerle ifade edilerek pratik önemleri açıklanmış ve yorumlanmıştır. Toplam istenebilirlik değerini en büyülemek amacıyla kurulan modelin GAMS paket programı kullanılarak çözülmesi sonuncu, gluten oranı için 28.748%, alfa amilaz enzimi ilavesi için 34.018 ppm, su yüzdesi için 62.471%, yoğurma süresi için 9.714 dakika, fermantasyon sıcaklığı için 34.988 °C ve fermantasyon süresi için 65.273 dakika seviyeleri optimum seviyeler olarak elde edilmiştir. Bu değerler bazında toplam istenebilirlik değeri ise, 0,802 olarak bulunmuştur. İstenebilirlik değerinin 0-1 arasında olduğunu düşünüldüğünde bu değer oldukça iyi bir değerdir.

KAYNAKLAR

- Allen, T. T. ve Yu, L.** (2002). Low Costs Response Surface Methods from Simulation Optimization. *Quality and Engineering Quality International*, 18, 1-17.
- Amago, T.** (2001). Sizing optimization using response surface method in FOA. *R & D Review of Toyota CRDL*, 37, 1-7.
- Autio, K. ve Laurikainen, T.** (1997). Relationships Between Flour/Dough Microstructure and Dough Handling and Baking Properties. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 181-185.
- Blanshard, J. M. V., Frazier, P. J. ve Galliard, T.** (1988). *Chemistry and physics baking*. Royal Society of Chemistry, England.
- Bodroza-Solarov, M., Filipcev, B., Kevresan, Z., Mandic, A. ve Simurina, O.** (2008). Quality of bread supplemented with popped *Amaranthus cruentus* grain. *Journal of Food Process Engineering*, 31, 602–618.
- Box, G. E. P. ve Draper, N. R.** (1987). *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. Wiley, New York.
- Box, G. E. P. ve Drapper, N.** (1987). *Emprical Model-Building and Response Surfaces*. John Wiley & Sons, New York.
- Box, G. E. P. ve Hunter, J. S.** (1957). Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *Ann. Math. Statist*, 28, 195-241.
- Box, G. E. P. ve Wilson, K. B.** (1951). On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, *Journal of the Royal Statistical Society*, 13, 1-45.
- Box, G. E. P., ve Behnken, D. W.** (1960). Some New Three-Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics*, 2, 455-475.
- Bucher, C. ve Most, T.** (2008). A comparison of approximate response functions in structural reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 23, 154-163.
- Cabı, O.** (1992). Ekmek yapımında kullanılan katkı maddelerinin gelişimi ve ekmek kalitesine etkileri. *Unlu Mamulleri Dünyası*, 1, 16-22.
- Curic, D., Novotni, D., Skevin, D., Rosell, C. M., Collar, C., Bail, A. L. Colic-Baric, I., Gabric, D.** (2008). Design of a quality index for the objective evaluation of bread quality: Application to wheat breads using selected bake off technology for bread making. *Food Research International*, 41, 714–719.
- Del Castillo, E. ve Cahya, S.** (2001). A Tool for Computing Confidence Regions on the Stationary Point of Response Surface. *The American Statistician*, 55, 358-365.

- Derossi, A., Severini, C., Mastro, A. D. ve Pilli, T. D.** (2015). Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach. *LWT - Food Science and Technology*, 60, 641-648.
- Derringer, G. ve Suich, R.** (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12, 214-219.
- Dobraszczyk, B.J. ve Morgenstern, M.P.** (2003). Rheology and the Breadmaking Process. *Journal of Cereal Science*, 38, 229-245.
- Dobson, J. A.** (1989). *An Introduction to Generalized Linear Models*. Chapman & Hail, Canada.
- Doğan, İ. S.** (2003). Effect of α -Amylases on Dough Properties During Turkish Hearth Bread Production. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 209-216.
- Dutta, J. R., Dutta, P. K. ve Banerjee, R.** (2004). Optimization of culture parameters for extracellular protease production from a newly isolated *Pseudomonas* sp. using response surface and artificial neural network models. *Process biochemistry*, 39, 2193-2198.
- Ercan, R. ve Velioglu, S.** (1990). Başlıca bugday çeşitlerinin ve unlarının mineral madde kompozisyonu. *Doga, Tarım ve Ormancılık Dergisi*, 14, 393-400.
- Eren, İ. ve Ertekin, F. K.** (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79, 344-352.
- Gámbaro, A., Giménez, A., Ares, G. ve Gilardi, V.** (2006). Influence of Enzymes on the Texture of Brown Pan Bread. *Journal of Texture Studies*, 37, 300-314.
- George, D. ve Mallery, M.** (2010). *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 update*. Pearson, Boston.
- Giannou, V., Kessoglou, V. ve Tzia, C.** (2003). Quality and Safety Characteristics of Bread Made from Frozen Dough. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 99-108.
- Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W. S., Courtin, C. M., Gebruers, K. ve Delcour, J. A.** (2005). Wheat Flour Constituents: How They Impact Bread Quality, and How to Impact Their Functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 16, 12-30.
- Gomes, A. M. ve Malcata, F. X.** (1998). Development of probiotic cheese manufactured from goat milk: response surface analysis via technological manipulation. *Journal of dairy science*, 81, 1492-1507.
- Gomes, H. M. ve Awruch, A. M.** (2004). Comparison of response surface and neural network with other methods for structural reliability analysis. *Structural Safety*, 26, 49-67.
- Goos, P. ve Donev, A. N.** (2006). Blocking response surface designs. *Computational Statistics and Data Analysis*, 51, 1075-1088.

- Gray, J. A. ve Bemiller, J. N.** (2003). Bread staling molecular basis and control. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 3, 1-21.
- Hanrahan, G. ve Lu, K.** (2006). Critical Application of Factorial and Response Surface Methodology in Modern Experimental Design and Optimization. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36, 141–151.
- Harington, J.** (1965). The Desirability Function. *Industrial Quality Control* 21, 494-498.
- Hasmann, F. A., Cortez, D. V., Junior, A. P. ve Roberto, I. C.** (2003). Optimization of β -xylosidase recovery by reversed micelles using response surface methodology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6, 153-160.
- He, Z., Zhu, P. F. ve Park, S. H.** (2012). A robust desirability function method for multi-response surface optimization considering model uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 221, 241–247.
- Hejazi, T. H., Bashiri, M., Díaz-García, J. A. ve Noghondarian, K.** (2012). Optimization of probabilistic multiple response surfaces. *Applied Mathematical Modelling*, 36, 1275–1285.
- Hoseney, R. C.** (1983). *Principles of Cereal Science and Technology*. A.A.C.C., U.S.A.
- Hsieh, K. L.** (2006). Parameter optimization of a multi-response process for lead frame manufacturing by employing artificial neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 584-591.
- Johnson, R. A. ve Wichern, D. W.** (1992). *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Pearson Education, New York.
- Kaymaz, I. ve Mc Mahon, C. A.** (2005). A response surface method based on weighted regression for structural reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 20, 11-17.
- Khuri, A. I. ve Cornell, J. A.** (1987), *Response Surfaces: Designs and Analyses*, Marcel Dekker, New York.
- Khuri, A. I. ve Mukhopadhyay, S.** (2010). Response Surface Methodology. *WIREs computational statistics*, 2, 128-149.
- Kim, K. ve Lin, D.** (2000). Simultaneous optimization of multiple responses by maximizing exponential desirability functions. *Applied Statistics (Journal of the Royal Statistical Society: Series C)*, 49, 311-325.
- Kong, M. ve Lee, J.** (2006). A Generalized Response Surface Model with Varying Relative Potency for Assessing Drug Interaction. *Biometrics*, 62, 986-995.
- Köksoy, O.** (2001). *Taguchi ve Cevap Yüzeyi Felsefelerinin Birleştirilmesi: Problem ve Çözüm Teknikleri*. (doktora tezi), Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Lai, Y. J. ve Chang, S.** (1994). A fuzzy approach for multiresponse optimization: an off-line quality engineering problem. *Fuzzy Sets and Systems*, 63, 117-129.

- Layne, K. L.** (1995). Methods to Determine Optimum Factor Levels for Multiple Response in Designed Experiment. *Quality Engineering*, 7, 649-656.
- Lazsisty, R.** (1986). *The Chemistry of Cereal Proteins*. CRC Press. U. S. A.
- Lind, E. E., Goldin, J. ve Hickman, J. B.** (1960). Fitting Yield and Cost Response Surfaces. *Chemical Engineering Progress*, 56, 62-68.
- Linko, Y., Javanainen, P. ve Linko, S.** (1997). Biotechnology of Bread Baking. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 339-344.
- Logolhetis, N. ve Haigh, A.** (1988). Characterizing and optimizing multi response by Taguchi method. *Quality Reliabil Int.*, 4, 159-169.
- Maeda, T., Hashimoto, T., Minoda, M., Tamagawa, S. ve Morita, N.** (2003). Effect of Mutant Thermostable α -Amylases on Rheological Properties of Wheat Dough and Bread. *Cereal Chemistry*, 80, 722-727.
- Montgomery, D. C.** (2002). *Design and Analysis of Experiment*. John Wiley&Sons Inc, New York.
- Montgomery, D. C. and Runger, G. C.** (1999). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons, New York.
- Myers, R. H.** (1971). *Response Surface Methodology*. Ally and Bacon Inc., Boston.
- Myers, R. H.** (1999). Response surface methodology - current status and future directions. *Journal of Quality Technology*, 31, 30-44.
- Myers, R. H. ve Montgomery, D. C.** (2002). *Response Surface Methodology*. Wiley, New York.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. ve Anderson-Cook, C. M.** (2008). *Response Surface Methodolgy Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Öten, M. ve Ünsal, S.** (2006). Sanliurfa yöresine özgü tırnaklı ve açık ekmeklerin bazı kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. *HR. Ü. Z. F. Dergisi*, 10, 57-62.
- Özdemir, M., Özen, B. F., Dock, L. L. ve Floros, J. D.** (2008). Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *Food Science and Technology*, 41, 2044-2050.
- Özer, S. M.** (1998). *Kepekli ekmeklerin bazı niteliklerinin incelenmesi ve kalitelerinin iyileştirilmesi olanakları*, Adana, (doktora tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Poutanen, K.** (1997). Enzymes: An Important Tool in the Improvement of the Quality of Cereal Foods. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 300-306.
- Poutanen, K.** (1997). Enzymes: An Important Tool in the Improvement of the Quality of Cereal Foods. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 300-306.
- Pylar, E. J.** (1988). *Baking Science and Technology*. Sosland Publishing Co., U.S.A.

- Rais-Rohani, M. ve Singh, M. N.** (2004). Comparison of global and local response surface techniques in reliability-based optimization of composite structures. *Struct Multidisc Optim*, 26, 333–345.
- Scanlon, M.G. ve Zghal, M.C.** (2001). Bread Properties and Crumb Structure. *Food Research International*, 34, 841-864.
- Selinheimo, E., Kruus, K., Buchert, J., Hopia, A. ve Autio, K.** (2006). Effects of Laccase, Xylanase and Their Combination on the Rheological Properties of Wheat Doughs. *Journal of Cereal Science*, 43, 152-159.
- Shafisoltani, M., Salehifar, M. ve Hashemi, M.** (2014). Effects of enzymatic treatment using Response Surface Methodology on the quality of bread flour. *Food Chemistry*, 148, 176–183.
- Stelios, D. G., Stylianou, S. ve Aggarwal, M.** (2014). A class of composite designs for response surface methodology. *Computational Statistics & Data Analysis*, 71, 1124–1133.
- Şehirlioğlu, A.K.** (1997). *Ürün ve süreç kalitesini iyileştirmede kullanılan istatistiksel modelleme teknikleri üzerine bir araştırma*, İzmir, (doktora tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Şirvancı, M.** (1997). *Kalite İçin Deney Tasarımı*. Literatür Yayınları, İstanbul.
- Tabachnick, B. G. ve Fidell L. S.** (2013). *Using Multivariate Statistics*. Pearson, Boston.
- Tania, P. ve Deborah, J. S.** (2002). An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 106, 245–269.
- Tong, L. I. ve Su, C. T.** (1997). Optimization Multi-Response Problems in Taguchi Method by Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. *Quality and Reliability Engineering International*, 13, 25-34.
- TS-5000** (1987). Ekmek, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ünal, S. S.** (1991). *Hububat Teknolojisi*. Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ders Kitabı Çoğaltma Yayını, İzmir.
- Ünal, S. S., Köse, E. ve Boyacıoğlu, M. H.,** (1989), Hububat Mamüllerinde Alfa Amilaz Enziminin Tayin Yöntemlerinin irdelenmesi, *E.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi, Seri:B Gıda Mühendisliği*, 7, 121-131.
- Yates, F.** (1937). *The Design and Analysis of Factorial Experiments*. Imperial Bureau of Soil Science, London.
- Yin, Y. ve Carter, C. W.** (1996). Incomplete factorial and response surface methods in experimental design: yield optimization of TRNATrp from in vitro T7 RNA polymerase transcription, *Oxford University Press Nucleic Acids Research*, 24, 1279–1286.
- Zheng, H., Morgenstern, M.P., Campanella, O.H. ve Larsen, N.G.** (2000). Rheological Properties of Dough During Mechanical Dough Development. *Journal of Cereal Science*, 32, 293-306.

EKLER

EK A: GAMS kodları

EK A

```
1 variables z, gl, alf, su, fsi, yog, fsu, ozg, kabuk,  
skl,d_ozg,» d_kabuk, d_skl, gozenek, d_gozenek, t1, t2,  
t3, t4, t5 ;  
2 parameter  
3 ozg_alt /3.36/  
4 ozg_ust /5.73/  
5 kabuk_alt /1/  
6 kabuk_ust /10/  
7 skl_alt /0.53/  
8 skl_ust /0.78/  
9 skl_hedef /0.62/  
10 gozenek_alt /138.4/  
11 gozenek_ust /345/ ;  
12 gl.lo =24;  
13 gl.up=32 ;  
14 alf.lo=0;  
15 alf.up=40;  
16 su.lo=60;  
17 su.up=65;  
18 fsi.lo=28;  
19 fsi.up=38;  
20 yog.lo=7;  
21 yog.up=11;  
22 fsu.lo=45;  
23 fsu.up=75;  
24 ozg.lo = ozg_alt;  
25 kabuk.lo=kabuk_alt;  
26 skl.lo=skl_alt;  
27 skl.up=skl_ust ;  
28 gozenek.up=gozenek_ust ;  
29 equation amac, kst1, kst2, kst3, kst4, kst5, kst6,  
kst7, kst8, » kst9, kst10, kst11, kst12, kst13, kst14,  
kst15, kst16, kst17 ;  
30 amac.. z =e= rPower(d_ozg,  
1/4)*rPower(d_kabuk,1/4)*rPower(d_sk»  
1,1/4)*rPower(d_gozenek,1/4);  
31 kst1.. ozg =e= 16.08+0.903*gl+0.0923*alf-0.666*su-  
0.500*fsi+0.2» 762*yog -0.0278*fsu -0.02212*sqr(gl) -  
0.000846*sqr(alf)+0.00170» 8*gl*alf +0.00825*gl*su -  
0.002125*gl*fsi -0.001325*alf*su +0.01» 173*su*fsi  
+0.001489*su*fsu -0.00717*fsi*yog -0.001356*fsi*fsu » ;  
32 kst2.. t1 =e= rpower((ozg-ozg_alt)/(ozg_ust -  
ozg_alt), 1) ;  
33 kst3.. d_ozg =l= t1 ;  
34 kst4.. d_ozg =l= 1 ;  
35 kst5.. kabuk =e=-  
377.7+1.667*gl+1.721*alf+9.12*su+1.029*fsi+4.2»  
0*yog+0.5446*fsu-0.03507*sqr(gl)-0.0609*sqr(su)-  
0.01911*sqr(fsi» )-0.004284*sqr(fsu)+0.0469*gl*yog-
```

```

0.02750*alf*su+0.00833*alf*yo» g-
0.1083*su*yog+0.0375*fsi*yog;
36 kst6.. t2 =e= rpower((kabuk-kabuk_alt)/(kabuk_ust-
kabuk_alt),1)» ;
37 kst7.. d_kabuk =l= t2 ;
38 kst8.. d_kabuk =l= 1 ;
39 kst9.. skl =e=1.582+0.00375*g1+0.03677*alf+0.00806*su-
0.0443*fs»

```

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ali İhsan Boyacı
Doğum Yeri ve Tarihi : Bartın, 22.10.1990
E-Posta : boyaci.alihsan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü