T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇAPRAZ ELEMANLARIN SAYISAL MODELLENMESİNDE GEREKLİ DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN AÇIK KAYNAKLI YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

DAMLA BAHAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN: PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ

2. DANIŞMAN: DOÇ. DR. ONUR ŞEKER

TEMMUZ 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜST EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇAPRAZ ELEMANLARIN SAYISAL MODELLENMESİNDE GEREKLİ DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN AÇIK KAYNAKLI YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

DAMLA BAHAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN: PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ
2. DANIŞMAN: DOÇ. DR. ONUR ŞEKER

TEMMUZ 2024

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

DEVELOPMENT OF OPEN SOURCE SOFTWARE FOR DETERMINING REQUIRED BEHAVIOR PARAMETERS IN NUMERICAL MODELING OF BRACED FRAMES

DAMLA BAHAR

A THESIS OF MASTER OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT

EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING

ADVISOR: PROF. BULENT AKBAS

Co-ADVISOR: ASSOC. PROF.ONUR SEKER

JULY 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2024/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Damla BAHAR'ın tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :Prof. Dr. Bülent AKBAŞ

ÜYE :Prof. Dr. Ferit ÇAKIR

ÜYE :Dr. Öğr. Üyesi Bora AKŞAR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

……/……./...…. tarih ve …..…./…..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Aileme…

ÖZET

Çapraz elemanlar, binalar, köprüler, kuleler ve diğer birçok yapısal sistemde kullanılarak yük taşıma ve dayanıklılık sağlamada önemli bir rol oynarlar. Bu tür elemanlar, 1960'lardan beri yaygın olarak kullanılmakta olup 1980'lerden itibaren de deprem yönetmeliklerinde yer almaktadır. Çelik yapıların, betonarme yapılara nazaran birim ağırlığı başına yüksek dayanım sağlaması, daha hafif yapıların inşa edilmesine olanak tanır. Ayrıca, sahada çoğunlukla kolayca monte edilip inşaat süresinden tasarruf sağlaması ve dinamik yükler altında enerji yutma kapasitelerinin fazla olması gibi avantajları vardır. Buna karşın, çelik yapıların korozyon riski, montaj ve kaynak işlemleri gibi ekstra maliyet çıkarabilme ihtimali, sıcaklık değişimine karşı hassasiyetlerinden dolayı gerçekleşecek olası genleşmede ek gerilmeler oluşabilmesi gibi dezavantajları da mevcuttur.

Çelik çaprazlar, deprem yükleri altında yüksek yanal rijitliğe sahip olmalarına karşılık, basınç etkisi altında çaprazların burkulması nedeniyle süneklik sadece çekmeye çalışan çapraz elemanlar tarafından sağlanabilmektedir. Bu tür taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesinde, özellikle çapraz elemanın basınç yük etkisi altındaki burkulma ve çekme yükü etkisi altındaki akma davranışının gerçekçi biçimde sayısal modellenmesi gerekmektedir. Yapılan bu çalışma, çelik çapraz elemanların dinamik yükler altındaki davranışlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunarak, mühendislik uygulamalarında daha güvenilir ve verimli tasarımlar yapılmasına olanak tanır. Aynı zamanda, bu çalışma ile elde edilen bulgular, çelik yapıların tasarımında yeni kriterlerin belirlenmesine yardımcı olabilir. Çelik çaprazların süneklik kapasitelerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, yapısal güvenlik ve performans açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, bu tür elemanların modellenmesinde kullanılan parametrelerin doğru belirlenmesi ve sonuçların deneysel verilerle doğrulanması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, içi boş dairesel kesitli çapraz elemanların sayısal modellenmesinde gerekli davranış parametrelerinin basınç ve çekme etkisi altındaki süneklikleri ile olan ilişkileri incelenmektir. Bu ilişki, kesit özellikleri (D/t), narinlik oranı (KL/r) ve E/Fy oranı ile geliştirilmiş ve süneklik tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Ardından Python yazılım dili kullanılarak gerekli parametreler kullanıcıdan istenmekte ve süneklik tahmin sonuçları kullanıcıya verilmektedir. Sonrasında sonuçlar test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çapraz Elemanlar, Sayısal Modelleme, Kesit Özellikleri, Narinlik Oranı, E/Fy Oranı, Süneklik

ABSTRACT

Braced members are used in buildings, bridges, towers and many other structural systems, playing an important role in providing load bearing and durability. Such elements have been widely used since the 1960s and have been included in earthquake regulations since the 1980s. Steel structures provide higher strength per unit weight compared to reinforced concrete structures, allowing lighter structures to be built. In addition, they have the advantages of being easily assembled in the field, saving construction time, and having high energy absorption capacity under dynamic loads. On the other hand, steel structures also have disadvantages such as the risk of corrosion, the possibility of extra costs such as assembly and welding processes, and the possibility of additional stresses due to possible expansion due to their sensitivity to temperature changes.

Although steel braces have high lateral rigidity under earthquake loads, ductility can only be provided by the braced members trying to pull due to the buckling of the braces under the influence of compression. In examining the nonlinear behavior of such carrier systems, it is necessary to realistically numerically model, in particular, the yield behavior of the braced member under the influence of buckling and tensile load under the influence of compression load. This study contributes to a better understanding of the behavior of steel braced members under dynamic loads, allowing more reliable and efficient designs in engineering applications. At the same time, the findings obtained from this study may help determine new criteria in the design of steel structures. Accurate assessment of the ductility capacity of steel braces is critical to structural safety and performance. Therefore, it is of great importance to correctly determine the parameters used in modeling such elements and to verify the results with experimental data.

In this thesis, the relationship between the behavioral parameters required in the numerical modeling of circular hollow braced members and their ductility under compression and tension is examined. This relationship was developed with section properties (D/t), slenderness ratio (KL/r) and E/Fy ratio, and ductility prediction equations is created. Then, using the Python software, the necessary parameters are requested from the user and the ductility estimation results are given to the user. Afterwards, the results were compared with the test results.

Keywords: Braced Members, Numerical Modeling, Section Properties, Slenderness Ratio, E/Fy Ratio, Ductility

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim ve Tez çalışmam boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendilerine ne zaman danışsam beni büyük bir sabır ve anlayışla dinleyip yol gösteren, güler yüz ve samimiyetlerini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdikleri değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli danışman hocalarım Prof. Dr. Bülent AKBAŞ ve Doç. Dr. Onur ŞEKER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Teşekkürlerin az kalacağı, başta kariyer çizgimi belirlememde büyük rol oynayan, sonsuz sabır ve anlayışıyla bana birçok şey öğreten kıymetli hocam Prof. Dr. Faruk KARADOĞAN ve diğer üniversite hocalarımın da bana 4 yıllık lisans öğrenimim boyunca kazandırdıkları her şey için ve beni gelecekte söz sahibi yapacak bilgilerle donattıkları için hepsine teker teker teşekkürlerimi sunuyorum.

Ve son olarak çalışmalarımda desteklerini, fedakarlıklarını ve bana olan güvenlerini benden esirgemeyen babam Erkan BAHAR ve annem Muazzez BAHAR'a, her anımda yanımda olan kardeşim Eray BAHAR'a, beni sürekli motive edip, sabrı ve hoş görüsüyle bana yol gösteren nişanlım Berkay BOY'a sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1.Literatür Özeti	2
1.2.Tezin Amacı	5
1.3.Araştırma Yöntemi ve Adımları	5
2. ÇELİK ÇAPRAZ ELEMANLAR	7
2.1. Yapısal Çelik Profilleri	7
2.2. Çelik Malzemelerin Mekanik Özellikleri	7
2.2.1. Gerilme-Deformasyon Eğrisi	8
2.2.2. Süneklik	9
2.3. Çapraz Elemanların Yapısal Sistemlerdeki Önemi	10
2.4. Deprem Yönetmeliklerinde Çelik Çapraz Elemanlar	11
2.4.1. Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsü (AISC)	11
2.4.2. Avrupa Deprem Yönetmeliği (Eurocode 8)	12
2.4.3. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği	12
2.4.4. Japon Deprem Yönetmeliği	12
2.5. Depreme Dayanıklı Çelik Yapı Tasarımı	12
3. AMERİKAN YÖNETMELİĞİNE GÖRE ÇELİK YAPILAR TASARIM KRİTERLERİ	15
3.1. Genişlik-Kalınlık Oranı Sınırlamaları	15
3.2. Brüt Enkesit Alanının (A_g) Hesaplanması	16
3.3. Kritik Burkulma Gerilmesi (F_{cr}) Hesaplanması	16
3.4. Çekme ve Basınç Yükleri Etkisi Altındaki Maksimum Yüklerin Hesaplanması	16
3.5. Çapraz Elemanların Tasarıma Esas Davranışları	17
4. Kİ-KARE TESTİ VE SPSS İLE İSTATİSTİKSEL ANALİZ	19
4.1. Ki-Kare Testi	19
4.2. SPSS ile İstatistiksel Analiz	20
4.2.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi	20

5. BASINÇ VE ÇEKME YÜKLERİ ETKİSİ ALTINDA SÜNEKLİK TAHMİNİ YAPILMASI 29
5.1. Deney Sonuçlarının Toplanması 29
5.1.1. Numune Malzeme, Kesit Özellikleri ve Yükleme Protokolleri 29
5.1.2. Çekme ve Basınç Yükleri Etkisi Altında Süneklik Değerlerinin Toplanması 36
5.2. Süneklik Değerlerinin Tahmin Edilmesi 38
5.2.1. Basınç Yükleri Etkisi Altındaki Süneklik Değerinin Tahmin Edilmesi 38
5.2.2. Çekme Yükleri Etkisi Altındaki Süneklik Değerinin Tahmin Edilmesi 44
5.3. Süneklik Tahmin Sonuçlarını Elde Etmek İçin Açık Kaynaklı Yazılım Geliştirilmesi 51

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR 55x

KAYNAKLAR 57
ÖZGEÇMİŞ 61
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR 62
EKLER 63

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Ag	: Brüt enkesit alanı
D	: Çap
do	: Dış çap
di	: İç çap
E	: Elastisite modülü
Fcr	: Kritik burkulma gerilmesi
Fy	: Minimum akma dayanımı
Fu	: Minimum çekme dayanımı
Fe	: Elastik burkulma gerilmesi
K	: Burkulma katsayısı
L	: Eleman boyu
$P_{max,basınç}$	: Basınç etkisi altındaki elemanlar için maksimum yük
$P_{max,basınç,1}$	: Basınç etkisi altındaki elemanlar için maksimum yük
$P_{max,basınç,2}$	: Basınç etkisi altındaki elemanlar için maksimum yük
$P_{max,çekme}$	: Çekme etkisi altındaki elemanlar için maksimum yük
R_y	: Beklenen akma geriliminin belirtilen minimum akma gerilmesine oranı
r	: Atalet yarıçapı
t	: Et kalınlığı
X^2	: Ki-kare değeri
X^2_{kritik}	: Kritik Ki-Kare değeri
A	: Ki-Kare olasılık değeri
μ	: Süneklik
μ_c	: Basınç yükleri etkisi altındaki süneklik
μ_t	: Çekme yükleri etkisi altındaki süneklik
δ_{uc}	: Basınç yükleri etkisi altındaki maksimum deformasyon
δ_{cr}	: Burkulma yüküne karşılık gelen deformasyon
δ_t	: Çekme yükleri etkisi altındaki maksimum deformasyon
δ_y	: Burkulma yüküne karşılık gelen deformasyon
λ_{hd}	: Yüksek sünek basınç elemanları için genişlik-kalınlık oranının sınırlanması
D/t	: Genişlik-kalınlık oranı
KL/r	: Narinlik Oranı
E/F_y	: Elastisite modülü-Akma dayanımı oranı
CHS	: Dairesel içi boş kesit (Circular hollow section)
SPSS	: İstatistiksel Paket Programı (Statistical Package for the Social Sciences)
AISC	: Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü (American Institute of Steel Construction)
Sig.	: Ki-Kare anlamlılık değeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Yapısal çelik profilleri.	7
Şekil 2.2: Çekme deneyinin aşamaları **[19].**	8
Şekil 2.3: Gerilme – Şekil Değiştirme diyagramı **[20].**	9
Şekil 2.4: Kuvvet - Deplasman ilişkisi.	10
Şekil 2.5: Çelik çerçeve tipleri.	13
Şekil 3.1: Genişlik-Kalınlık Oranı sınırlamaları **[28].**	15
Şekil 3.2: Çapraz elemanın çekme ve basınç kuvvetleri altındaki tasarıma esas davranışı **[29].**	18
Şekil 4.1: Ki-Kare testi kullanım amaçları.	19
Şekil 4.2: SPSS programına veri girişi.	21
Şekil 4.3: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi.	22
Şekil 4.4: $(KL/r)^2$ değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması.	23
Şekil 4.5: ln(E/Fy) değerinin "Compute Variable" Sekmesinden oluşturulması.	23
Şekil 4.6: Analiz yönteminin seçilmesi.	24
Şekil 4.7: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin girilmesi.	24
Şekil 4.8: "Statistics" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.	25
Şekil 4.9: "Plots" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.	25
Şekil 4.10: "Save" sekmesinden "Cook's Distance" seçeneğinin seçilmesi.	26
Şekil 4.11.a: Regresyon Analizi sonuçları.	26
Şekil 4.11.b: Regresyon Analizi sonuçları.	27
Şekil 4.11.c: Regresyon Analizi sonuçları.	27
Şekil 4.11.d: Regresyon Analizi sonuçları.	28
Şekil 5.1: [13] makalesinde kullanılan yükleme protokolü.	29
Şekil 5.2: [2] Makalesinde kullanılan yükleme protokolü.	31
Şekil 5.3: Pipe5STD numunesi için yükleme protokolleri **[3].**	32
Şekil 5.4: Pipe3STD numunesi için yükleme protokolleri **[3].**	33
Şekil 5.5: [15] makalesinde kullanılan yükleme protokolü.	34
Şekil 5.6: [17] makalesinde kullanılan yükleme protokolü.	35
Şekil 5.7: [18] makalesinde kullanılan yükleme protokolü.	36
Şekil 5.8: Eşdeğer sürüklenme açısı (θ) ile uygulanan eksenel yer değiştirme (δ) arasındaki ilişkinin gösterimi **[18].**	36
Şekil 5.9: D/t ile μc arasındaki ilişki.	38
Şekil 5.10: KL/r ile μc arasındaki ilişki.	39
Şekil 5.11: E/Fy ile μc arasındaki ilişki.	39
Şekil 5.12: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.	41
Şekil 5.13: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.	43
Şekil 5.14: D/t ile μt arasındaki ilişki.	45
Şekil 5.15: KL/r ile μt arasındaki ilişki.	45
Şekil 5.16: E/Fy ile μt arasındaki ilişki.	46
Şekil 5.17: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.	47
Şekil 5.18: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.	50

Şekil 5.19.a: Süneklik tahmini için yazılan Python kodu. 52
Şekil 5.19.b: Süneklik tahmini için yazılan Python kodu devamı. 53
Şekil 5.20: Süneklik tahmini için yazılan Python kodu ile örnek bir hesap. 54
Şekil A.1: SPSS Programına veri girişi. 63
Şekil A.2: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi. 64
Şekil A.3: $1/(D/t)^2$ değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması. 64
Şekil A.4: 1/(D/t) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması. 65
Şekil A.5: $(KL/r)^2$ değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması. 65
Şekil A.6: 1/(E/Fy) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması. 66
Şekil A.7: Analiz yönteminin seçilmesi. 66
Şekil A.8: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin girilmesi. 67
Şekil A.9: "Statistics" sekmesinden özelliklerin seçilmesi. 67
Şekil A.10: "Plots" sekmesinden özelliklerin seçilmesi. 68
Şekil A.11: "Save" sekmesinden "Cook's Distance" seçeneğinin seçilmesi. 68
Şekil A.12.a: Regresyon Analizi sonuçları. 69
Şekil A.12.b: Regresyon Analizi sonuçları. 69
Şekil A.12.c: Regresyon Analizi sonuçları. 70
Şekil A.12.d: Regresyon Analizi sonuçları. 70
Şekil A.13: SPSS Programına veri girişi. 72
Şekil A.14: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi. 73
Şekil A.15: ln(D/t) değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması. 73
Şekil A.16: ln (KL/r) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması. 74
Şekil A.17: ln(E/Fy) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması. 74
Şekil A.18: Analiz yönteminin seçilmesi. 75
Şekil A.19: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin girilmesi. 75
Şekil A.20: "Statistics" sekmesinden özelliklerin seçilmesi. 76
Şekil A.21: "Plots" sekmesinden özelliklerin seçilmesi. 76
Şekil A.22: "Save" sekmesinden "Cook's Distance" seçeneğinin seçilmesi. 77
Şekil A.23.a: Regresyon Analizi sonuçları. 77
Şekil A.23.b: Regresyon Analizi sonuçları. 78
Şekil A.23.c: Regresyon Analizi sonuçları. 78
Şekil A.23.d: Regresyon Analizi sonuçları. 79
Şekil A.24: SPSS Programına veri girişi. 80
Şekil A.25: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi. 81
Şekil A.26: Üs(D/t) değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması. 81

Şekil A.27: (E/Fy) ² değerinin “Compute Variable” sekmesinden oluşturulması. 82
Şekil A.28: Analiz yönteminin seçilmesi. 82
Şekil A.29: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız beğişkenlerin girilmesi. 83
Şekil A.30: “Statistics” sekmesinden özelliklerin seçilmesi. 83
Şekil A.31: “Plots” sekmesinden özelliklerin seçilmesi. 84
Şekil A.32: “Save” sekmesinden “Cook's Distance” seçeneğinin seçilmesi. 84
Şekil A.33.a: Regresyon Analizi sonuçları. 85
Şekil A.33.b: Regresyon Analizi sonuçları. 85
Şekil A.33.c: Regresyon Analizi sonuçları. 86
Şekil A.33.d: Regresyon Analizi sonuçları. 86

TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1: Malzeme özelliklerine karşılık gelen Ry değerleri.	15
Tablo 4.1: Ki-Kare tablosundan bazı değerler.	20
Tablo 5.1: [13] çalışmasında seçilen numuneler.	29
Tablo 5.2: [14] çalışmasında seçilen numuneler.	30
Tablo 5.3: [1] çalışmasında seçilen numuneler**.**	30
Tablo 5.4: [2] çalışmasında seçilen numuneler.	30
Tablo 5.5: [3] çalışmasında seçilen numuneler.	31
Tablo 5.6: [15] çalışmasında seçilen numuneler.	34
Tablo 5.7: [16] çalışmasında seçilen numuneler.	34
Tablo 5.8: [17] çalışmasında seçilen numuneler.	35
Tablo 5.9: [18] çalışmasında seçilen numuneler**.**	35
Tablo 5.10: Tez kapsamında seçilen numunelerin süneklik değerleri.	37
Tablo 5.11: $D/t \leq \lambda hd$ durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.	40
Tablo 5.12: Denklem (5.3) de yer alan sabit değerler.	40
Tablo 5.13: Ki-Kare Testi sonuçları.	42
Tablo 5.14: $D/t > \lambda hd$ durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.	42
Tablo 5.15: Denklem (5.4) de yer alan sabit değerler.	43
Tablo 5.16: Ki-Kare Testi sonuçları.	44
Tablo 5.17: $D/t \leq \lambda hd$ durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.	46
Tablo 5.18: Denklem (5.5) de yer alan sabit değerler.	47
Tablo 5.19: Ki-Kare Testi sonuçları.	48
Tablo 5.20: $D/t > \lambda hd$ durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.	49
Tablo 5.21: Denklem (5.6) da yer alan sabit değerler.	49
Tablo 5.22: Ki-Kare Testi sonuçları.	51

1. GİRİŞ

Deprem gibi doğa olayları, yapıların dayanıklılığını ve stabilitesini test etmede önemli bir rol oynamaktadır. Yapı mühendisliğinde çelik çapraz elemanlar, binalar, köprüler, kuleler ve diğer birçok yapısal sistemlerde kullanılmaktadır. Çapraz elemanlar, özellikle yüksek yanal rijitlik ve enerji yutma kapasiteleri ile yapıların deprem yüklerine karşı dayanımını artırmada önemli bir yere sahiptir **[1]**. Çelik yapılar, betonarme yapılara göre birim ağırlığı başına yüksek dayanım sağlamakta, daha hafif ve daha esnek yapıların inşa edilmesine olanak tanımaktadır. Çelik çapraz elemanların enerji yutma kapasiteleri yüksek olduğundan, dinamik yükler altında yapının deformasyonunu absorbe ederek hasar riskini azaltmaktadır.

1960'lardan beri yaygın olarak kullanılan çapraz elemanlar, 1980'lerden itibaren deprem yönetmeliklerinde de yer almaya başlamıştır. Bu gelişme, çapraz elemanların depreme dayanıklı yapı tasarımında yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ancak, çelik yapıların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Çelik, korozyona karşı hassas bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı düzenli bakım ve koruma gerektirir. Aynı zamanda, montaj ve kaynak işlemleri ekstra maliyetlere yol açabilir ve sıcaklık değişimlerine karşı hassas olduğundan dolayı genleşme sorunları yaşanabilir. Bu nedenle, çelik yapıların uzun ömürlü ve dayanıklı olabilmesi için bu dezavantajların dikkate alınması ve uygun tedbirlerin alınması gerekmektedir.

Çelik çapraz elemanlar, deprem yükleri altında yüksek yanal rijitliğe sahip olmalarına karşın, basınç etkisi altında burkulma riski taşımaktadır **[1]**. Bu durum göz önüne alındığında çapraz elemanların çekme kuvvetleri altındaki davranışlarının detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Çapraz elemanların doğrusal olmayan davranışlarının gerçekçi bir şekilde modellenmesi, yapıların güvenli ve etkili bir şekilde tasarlanabilmesi için kritik öneme sahiptir **[2]**. Bu bağlamda, çapraz elemanların basınç ve çekme etkisi altındaki davranış parametrelerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır **[3]**. Bu parametreler, yapıların deprem yükleri altında nasıl performans göstereceğini anlamak ve tasarım süreçlerinde doğru kararlar almak için gereklidir. Bu tez kapsamında, yüksek atalet momentine sahip oldukları için son zamanlarda sismik dirençli çapraz elemanlar olarak yaygın şekilde kullanılmakta olan içi boş dairesel kesitler üzerinde çalışılmaktadır.

1.1. Literatür Özeti

Son otuz yılda, dikdörtgen veya içi boş dairesel kesitlerden (CHS) yapılmış çelik çapraz elemanların inelastik sismik performansını karakterize etmek için çevrimsel yarı-statik testler yapılmıştır **[1], [3]-[12**] ve bu test verileri, yerel burkulmanın sonunda plastik mafsalın oluştuğunu ve basınç altındaki çapraz elemanların orta uzunluğunda inelastik burkulma meydana geldiğini ortaya koymuştur **[2]**. Literatürdeki mevcut çalışmalar, çapraz elemanların davranışlarının çeşitli faktörlere bağlı olduğunu ve bu davranışların doğru bir şekilde modellemesinin yapıların davranışı üzerinde kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çelik çaprazlar üzerindeki deneysel çalışmalarda, kesit özellikleri ve eleman narinliği gibi faktörlere bağlı olarak çapraz elemanların davranışlarını incelediği görülmektedir.

- Referans **[13]**'de 24 numune ele alınmış ve bu numuneler deprem etkilerini simüle eden çevrimsel yarı-statik eksenel yüklere maruz bırakılmıştır. Test edilen yapısal şekiller geniş flanşlar, çift açılar, çift kanallar ve hem kalın hem de ince dairesel ve kare tüp kesitlerdir. Tüm tüp kesitler için ASTM-A53 Gr. B çeliği kullanılmıştır. Numunelerin on sekizi her iki uçtan da mafsallı olup, 40, 80 ve 120 narinlik oranlarına sahiptir; geri kalan altı numune ise bir uçtan mafsallı ve diğer uçtan sabitlenmiş olup, 40 ve 80 narinlik oranlarına sahiptir.
- Referans **[14]**'den bu tez kapsamında 2 adet numune kullanılmıştır. Bu çalışmada E/Fy oranı sabit tutulup, Aynı narinlik oranına sahip fakat D/t oranları farklı numunelerin davranışları incelenmektedir.
- Referans **[1]**'de, çevrimsel yükleme etkisindeki sabit mesnetli boru şeklindeki çaprazların davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan çaprazlar, soğuk şekillendirilmiş C350L0 (350 MPa akma gerilmesi) çelik sınıfında, D/t (çap-kalınlık oranı) 19-56 aralığında ve KL/r (narinlik oranı) 25-41 aralığında olan dokuz farklı içi boş dairesel kesitten oluşmaktadır. Araştırmada, üç farklı yükleme protokolü altında bu çaprazların histerezis davranışları incelenmiştir. Çalışma bulgularına göre, CHS çaprazların yerel burkulmaya kadar kararlı bir histerezis davranışı sergilediği, ancak yerel burkulma sonrasında D/t ve KL/r oranlarına bağlı olarak süneklik ve mukavemetlerinde önemli ölçüde bozulma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, CHS çaprazların sismik tasarım ve değerlendirme süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli parametreler olduğuna işaret etmektedir.

- Referans **[2]**'de, bu makale öncesinde yapılan CHS çapraz eleman testleri, maksimum kesit boyutu 165 mm veya daha az olan küçük çapraz eleman numuneleri üzerinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Pratikte, 305 mm'ye kadar olan HSS çapraz elemanlar yaygın olarak kullanılmakta olduğunu ancak büyük çapraz elemanlar için fiziksel test verilerinin mevcut olmadığını da eklemiştir. Bu durum, büyük boy çapraz elemanlar üzerinde geniş kapsamlı bir test programının başlatılmasına neden olmuştur. Bu makale, büyük boyutlu çelik çapraz elemanların çevrimsel inelastik davranışını incelemek amacıyla başlatılan kapsamlı bir deney programını özetlemektedir. Çevrimsel yarı-statik testler, kare, dairesel ve W (H) şeklindeki elemanlar dahil olmak üzere 34 çapraz eleman numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. ASTM-A500 Gr. C çeliği kullanılmıştır. Testlerde, çapraz elemanların kesit elemanlarının narinlik oranı ve yükleme protokolü de değiştirilmiştir. Çapraz eleman kesitlerinin çapları 152 mm ile 305 mm arasında değişmektedir. Sonuç olarak ise kesit şeklinin ve eleman narinliğinin çapraz elemanların kırılma ömrünü etkilediği belirlenmiştir.
- Referans **[3]**'de, çelik çapraz elemanların inelastik burkulma ve kırılma davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilen 18 büyük ölçekli testin sonuçları yer almaktadır. ASTM-A53 Gr. B çeliği kullanılmıştır. Çapraz numuneler, kare boşluklu yapısal şekiller (HSS), boru ve geniş flanşlı kesitler içermektedir. Genişlik-kalınlık ve narinlik oranları, kesit şekli, yükleme protokolü, yükleme hızı gibi özelliklerin çapraz elemanların performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu parametreler arasında, yükleme geçmişi, genişlik-kalınlık oranı ve narinlik oranının çapraz sünekliği üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Yükleme hızının etkilerinin önemsiz olduğu bulunmuştur.
- Referans **[15]**'de, farklı narinlik oranları (KL/r) ve çap-kalınlık oranları (D/t) olan JIS G3444 STK400 malzeme sınıfına sahip 10 dairesel tüp çapraz eleman numunesi üzerinde çevrimsel yükleme testleri gerçekleştirmiştir. Numuneler mafsallı uçlara sahiptir. Tüp çapraz elemanlarda gerilme yoğunlaşma mekanizması çeşitli Analiz türlerinde incelenmiş ve çapraz elemanların toplam eksenel deformasyonuna dayalı olarak kırılma öncesi

kümülatif deformasyon kapasitesini değerlendirmek için bir yöntem önerilmiştir.

- Referans **[16]**, yazmış olduğu makalede, boşluklu ve beton dolgulu dairesel tüplerin çevrimsel eksenel yükleme altındaki tepkisini incelemektedir. Aynı zamanda malzeme imalatının etkisini incelemek için sıcak bitimli ve soğuk şekillendirilmiş kesitler karşılaştırılmıştır. Narinliğin etkisini değerlendirmek için ise iki farklı numune uzunluğu kullanılmıştır. Süreklilik, enerji sönümleme, çekme dayanımı ve basınç dayanımı gibi parametreler, ampirik olarak elde edilen tahminlerle karşılaştırılmıştır.
- Referans **[17]'**de, içi boş dairesel (CHS) ve kare (HSS) kesitli çaprazların tekrarlı yükleme koşulları altında kırılma sünekliğini doğru bir şekilde ölçmek için hem deneysel hem de sayısal çalışmalar yapılmıştır. Çapraz çaprazların narinlik ve çap/kalınlık oranı değerlerinin değişmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. CHS çaprazlar için narinlik oranı ve çap-kalınlık oranına ilişkin kırılma sünekliği için bir ifade önerilmiştir. Bu ifadeler ve sayısal sonuçlar, mevcut ve önerilen ampirik yöntemlerin verimliliğini vurgulamak için geçmiş ve mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hint Standardına uygun olan Yst210 malzeme özelliklerine sahip 6 CHS çapraz numunesi deneysel çalışma için seçilmiştir. Seçilen HSS kesitlerinin narinlik oranı (λ) ve çap-kalınlık (D/t) oranları 76-213 ve 11-28 arasında değişmektedir.
- Referans **[18]**'de, kanal içine yerleştirilmiş CHS çapraz elemanların etkinliğini deneysel testler ve sonlu eleman simülasyonları aracılığıyla araştırmayı amaçlamaktadır. ASTM A500 Gr. B çeliği kullanılmıştır. Kümülatif enerji yutma kapasitesini, histeristik davranışı ve kırılma ömrünü nicel olarak değerlendirmek için, üç küçük ölçekli numunenin çevrimsel testlerini içeren bir deneysel program geliştirilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler, kuvvet-deformasyon ilişkileri ve maksimum ve kümülatif süneklik kapasiteleri açısından değerlendirilmiştir. Araştırmanın ikinci aşamasında, daha önce test edilmiş büyük ölçekli izole çapraz numuneleri kullanılarak bir doğrulama çalışmasını takiben bir sonlu elemanlar tabanlı sayısal çalışma yapılmıştır. Daha sonra, kanal içine yerleştirilmiş ve yerleştirilmemiş tam ölçekli bir çapraz çerçeve numunesinin sonlu elemanlar simülasyonları karşılaştırılmış ve izole numuneler üzerindeki parametrik

çalışmanın bulgularının çapraz bir çerçevedeki çapraz elemanlara genişletilip genişletilemeyeceği test edilmiştir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, çapraz elemanların kesit özellikleri (D/t oranı), narinlik oranı (KL/r) ve E/Fy oranının çekme ve basınç yükleri etkisi altındaki süneklikleri ile olan ilişkilerinin belirlenmesi ve bu parametrelerin sayısal analizler yoluyla tahmin edilmesini sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, literatürde yer alan içi boş dairesel kesitler için deneysel veriler toplanacak, analiz edilecek ve elde edilen sonuçlar test verileri ile karşılaştırılacaktır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, çapraz elemanların davranışlarını tahmin edebilecek açık kaynaklı bir yazılım geliştirilecektir. Bu yazılım ile, mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek pratik ve güvenilir çözümler sunmak hedeflenmektedir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar çeşitli tasarım parametreleri arasındaki ilişkileri aydınlatarak, yapısal mühendislik pratiğine yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Bu tez, içi boş dairesel çapraz çerçevelerle ilgili mekanik performans konusundaki literatürdeki eksikliği doldurmayı hedeflemekte ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

1.3. Araştırma Yöntemi ve Adımları

Araştırmanın ilk adımında, literatürde yer alan eksenel yük etkisi altındaki içi boş dairesel kesitli çapraz elemanlar için deneysel veri setleri toplanmıştır. Bu veri setlerinde, numunelerin kesit boyutları, malzeme özellikleri ve uzunluk bilgileri gibi özellikler yer almaktadır. Daha sonra bu veriler Analiz edilerek, malzeme ve kesit özellikleri ile süneklik değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu kapsamda, süneklik değerleri ile D/t, KL/r ve E/Fy oranları arasındaki ilişkiler SPSS programı kullanılarak belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda, süneklik tahmin denklemleri oluşturulmuştur.

Araştırmanın ikinci adımında, elde edilen veriler ve tahmin denklemleri doğrultusunda Python programlama dili kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, çeşitli kesitler için süneklik değerleirni tahmin edebilme kapasitesine sahiptir. Yazılım, kullanıcıların çeşitli çapraz elemanlar için ilgili parametreleri tahmin etmelerine

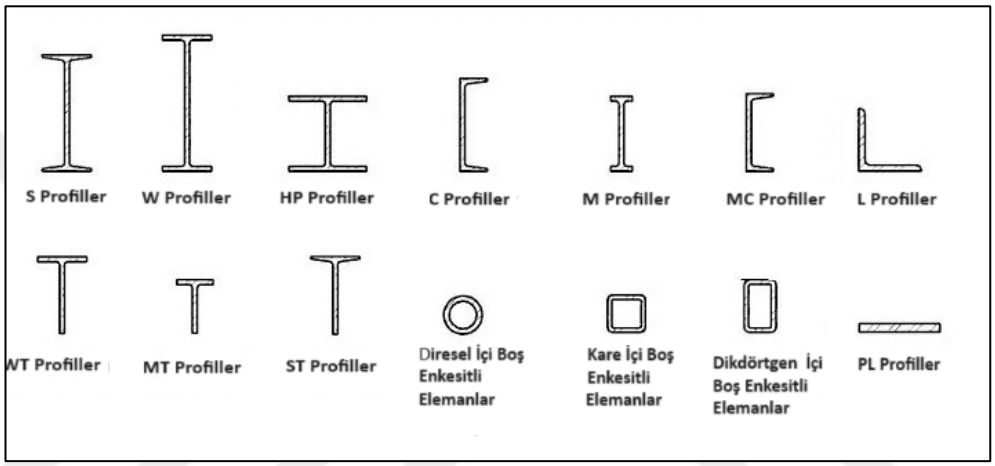
olanak sağlamaktadır. Yazılımın doğruluğu ve güvenilirliği, farklı veri setleri ve senaryolar ile test edilerek doğrulanmıştır.

Sonuç olarak, bu tez, çapraz elemanların sayısal modellemesinde kullanılacak davranış parametrelerinin belirlenmesine yönelik önemli katkılar sağlamaktadır. Geliştirilen açık kaynaklı yazılım, mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir araç olarak hizmet verecek ve zaman tasarrufu sağlayacaktır.

2. ÇELİK ÇAPRAZ ELEMANLAR

2.1. Yapısal Çelik Profilleri

Sıcak haddelenerek üretilen ve yapma enkesitli profiller olmak üzere 2 çeşit çelik profil türü mevcuttur. Bazı sıcak haddelenerek üretilen çelik profil örnekleri **Şekil 2.1**' de verilmiştir.



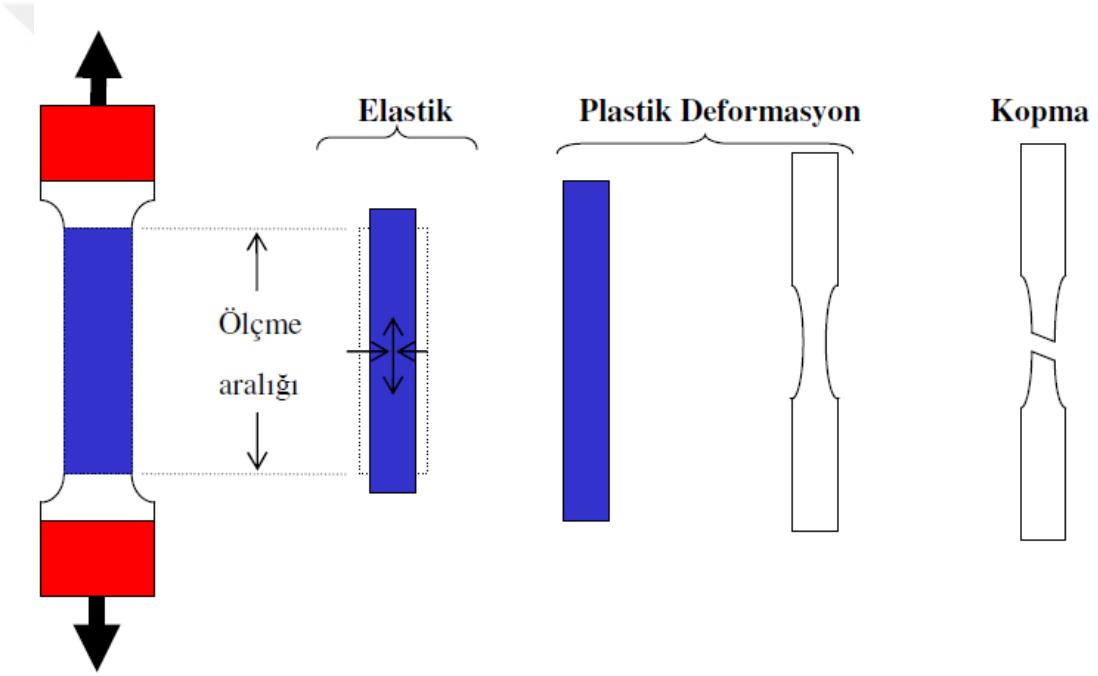
Şekil 2.1: Yapısal çelik profilleri.

2.2. Çelik Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Çeliğin mekanik özellikleri, yapı elemanlarının yük altındaki davranışlarını daha iyi anlayıp bu doğrultuda tasarım yapmak için oldukça önemlidir. Çeliğin başlıca mekanik özellikleri arasında çeliğin elastik davranıştan plastik davranışa geçtiği noktadaki gerilme değerine karşılık gelen akma dayanımı (Fy), çeliğin kırılmadan önceki dayanabileceği maksimum gerilme değerini temsil eden çekme dayanımı (Fu), çeliğin elastik bölgedeki deformasyonu sırasında gerilme değerinin uzama değerine oranı olan elastisite modülü (E) ve çelik elemanın yüksek deformasyonlar yapabilme yeteneğini ifade eden süneklik (μ) yer almaktadır. Bu özellikler, çeliğin kimyasal bileşimi ve üretim sürecine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

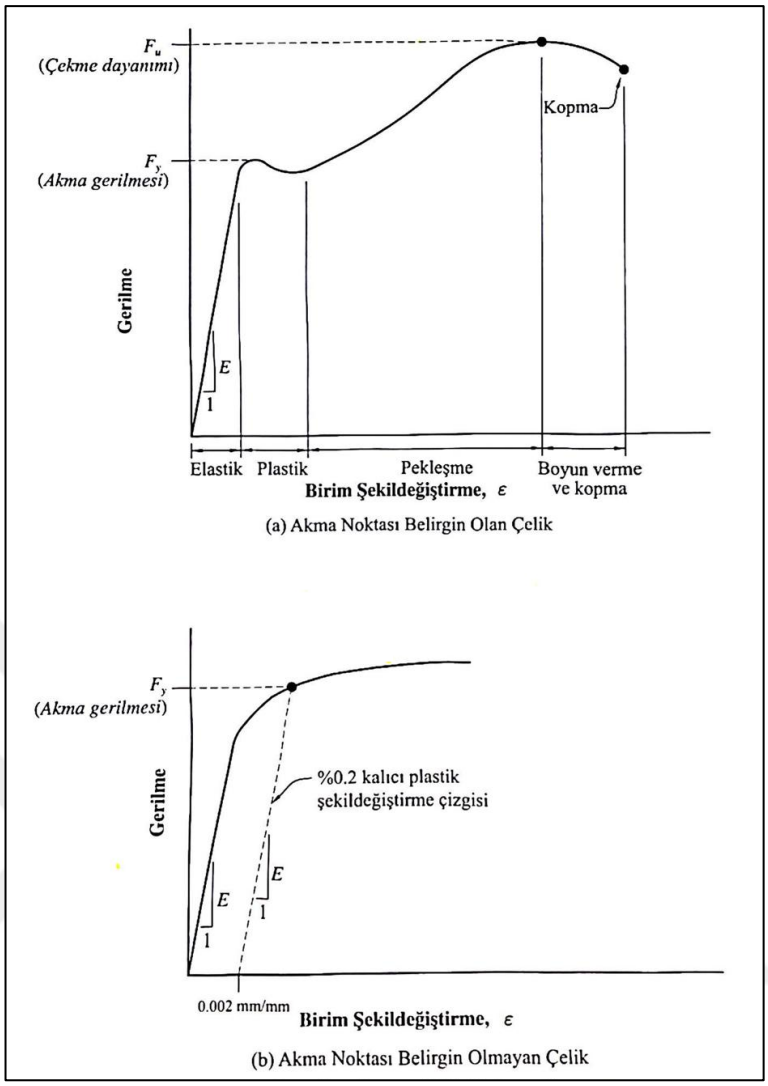
2.2.1. Gerilme-Deformasyon Eğrisi

Yapı tasarımında çeliğin en önemli iki özelliği bulunmaktadır. Bunlar çekme deneyi ile elde edilen akma gerilmesi ve çekme dayanımıdır. Çekme deneyinde, çubuk biçiminde bir çelik numune yavaş yavaş ve giderek artan çekme kuvvetine maruz bırakılmaktadır. Bu çelik numune güç kaybı yaşayana kadar test devam eder ve bu sırada yük ve uzama değerleri ölçülür. Uygulanan yük değerinin enkesit alanına bölünmesi sonucunda gerilme değeri, uzama değerinin çeliğin ilk boyuna bölünmesi ile ise birim şekil değiştirme değeri hesaplanır. Çelik bir numuneye uygulanan çekme deneyi ve akma, peklesme, kopma olayları **Şekil 2.2** görülmektedir **[19]**.



Şekil 2.2: Çekme deneyinin aşamaları **[19].**

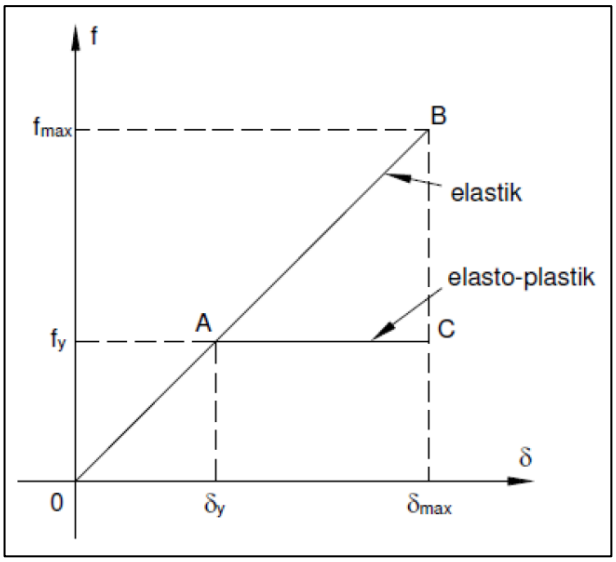
Çekme deneyi süresince elde edilen gerilme ve uzama değerleri ile gerilme-şekil değiştirme grafiği elde edilmektedir. Burada akma dayanımına eşdeğer maksimum gerilme ile tanımlanan bir doğrusal elastik bölge, gerilmenin birim şekil değiştirme arttıkça akma gerilmesinde göreli olarak sabit kaldığı plastik bölge ve tepe noktasının çekme dayanımını, (Fu), belirlediği bir pekleşme bölgesi bulunmaktadır (**Şekil 2.3**) **[20]**.



Şekil 2.3: Gerilme – Şekil Değiştirme diyagramı **[20].**

2.2.2. Süneklik

Çeliğin çekme etkisinde sabit yükler altında büyük şekil değiştirmelere dayanabilme kabiliyeti süneklik olarak ifade edilmektedir. Gerilme-Şekil değiştirme diyagramında plastik bölgede, eğri ne kadar uzar ise eleman o kadar sünek olmaktadır.



Şekil 2.4: Kuvvet - Deplasman ilişkisi.

Şekil 2.4 de, OAC doğrultusu elemanın elasto-plastik davranışına, B noktası ise elastik özelliğin devam etmesi durumunda meydana gelecek olan en büyük yer değiştirmeye karşılık gelmektedir. Elemanın sünekliği artıkça enerji sönümlemesi ve plastik deformasyon kapasitesi artmaktadır. Bu da sünekliğin, yapının deprem performansını etkileyen önemli parametrelerden bir tanesi olduğunu göstermektedir. Düşük sünekliğe sahip elemanlar ise gevrek kırılmaya neden olmaktadır. Gevrek kırılma tekrarlı yüklerden kaynaklı yorulmadan meydana gelen yorulma çatlağı ile başlamakta ve devamında ilerlemektedir.

2.3. Çapraz Elemanların Yapısal Sistemlerdeki Önemi

Çapraz elemanlar, yapı mühendisliğinde yanal yüklerin kontrol edilmesi ve yapıların rijitliğinin artırılması açısından önemli bir rol oynar. Binalar, köprüler, kuleler ve diğer mühendislik yapılarında geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Çelik çapraz elemanlar, özellikle yüksek yapılar ve endüstriyel tesislerde yanal stabilite sağlamak için sıklıkla tercih edilmektedir **[21]**. Bu elemanlar, yüksek dayanımları ve hafif yapıları sayesinde yapıların performansını artırır ve deprem, rüzgâr gibi dinamik yükler altında güvenliği sağlar **[22]**.

1960'lı yıllardan itibaren çelik çapraz elemanlar, mühendislik yapılarında standart bir uygulama haline gelmiştir. Bu dönemde, modern inşaat tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, çelik çapraz elemanlar yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri nedeniyle

tercih edilmeye başlanmıştır. Özellikle yüksek binaların yanal stabilitesini artırmak ve köprü gibi büyük ölçekli yapıların rijitliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Zamanla, bu elemanlar deprem bölgelerinde yapıların yanal yükler altındaki performansını artırmak için standart bir uygulama haline gelmiştir **[21]**.

Çelik çapraz elemanların sağladığı yanal rijitlik, yapının yanal yükler altındaki deformasyonunu sınırlandırır ve yapının genel stabilitesini artırır **[21]**. Ayrıca, çelik malzemenin elastik ve plastik deformasyon kapasiteleri, yapıların enerji sönümleme yeteneklerini artırarak dinamik yükler altındaki performanslarını iyileştirir **[22]**. Çapraz elemanlar, çekme ve basınç kuvvetlerine karşı yüksek dayanım gösterir. Çekme kuvvetleri altında, çelik çapraz elemanlar yüksek süneklik ve deformasyon kapasiteleri ile enerji sönümleme yeteneği sağlar. Bu, yapıların deprem gibi ani yük değişikliklerine karşı daha dayanıklı olmasına yardımcı olur **[23]**. Basınç kuvvetlerine karşı ise burkulma davranışı sergileyen çapraz elemanlar, doğru tasarım ve modelleme ile bu dezavantajı minimize eder ve yapıların genel performansını artırır **[24]**.

2.4. Deprem Yönetmeliklerinde Çelik Çapraz Elemanlar

Çelik çapraz elemanlar, deprem dayanımını artırmak amacıyla birçok deprem yönetmeliğinde önemli bir yer tutar. Deprem yönetmeliklerinde çelik çapraz elemanların kullanımına yönelik getirilen başlıca kriterler arasında yüksek dayanım ve süneklik özellikleri yer alır. Bu kriterler, çapraz elemanların deprem sırasında büyük deformasyonlara uğramadan enerjiyi sönümlemesini sağlar. Ayrıca, bu elemanların burkulma ve akma davranışlarını optimize etmek için belirli enkesit ve narinlik oranlarına sahip olması gereklidir. Çelik çapraz elemanların tasarımında dikkate alınması gereken diğer bir önemli faktör ise bu elemanların uygun şekilde monte edilmesi ve bağlantılarının doğru yapılmasıdır. Bu, yapının genel stabilitesini ve güvenliğini doğrudan etkilemektedir **[2]**.

2.4.1. Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsü (AISC)

Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsü tarafından yayınlanan "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings" yönetmeliği, çelik çapraz elemanların deprem dayanımı açısından nasıl tasarlanması gerektiğini detaylı bir şekilde açıklamaktadır. Bu yönetmelik, çapraz elemanların kesit boyutları, bağlantı detayları, malzeme özellikleri

ve yükleme koşulları gibi kritik parametreler için spesifik gereksinimler sunmaktadır. Özellikle Kuzey Amerika'da yaygın olarak kullanılmakta ve mühendislik uygulamalarında standart olarak kabul edilmektedir.

2.4.2. Avrupa Deprem Yönetmeliği (Eurocode 8)

Avrupa'da yaygın olarak kullanılan yönetmelik, deprem dayanımı ile ilgili detaylı kurallar sunmaktadır. Bu yönetmelik, çelik yapıların ve dolayısıyla çelik çapraz elemanların nasıl tasarlanması gerektiğini belirler, çapraz elemanların yanal yükler altında nasıl davranması gerektiğini ve bu elemanların enerji sönümleme kapasitelerini optimize edecek şekilde nasıl tasarlanacağını açıklar **[25]**.

2.4.3. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

Çelik çapraz elemanların kullanımını detaylandırarak, bu elemanların deprem yükleri altında nasıl davranması gerektiğini belirlemektedir. Bu yönetmelik, özellikle Türkiye gibi deprem riski yüksek bölgelerde, yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Yönetmelik, çapraz elemanların boyutlandırılması, bağlantı detayları ve malzeme seçimleri konusunda kapsamlı yönergeler sunmaktadır **[26]**.

2.4.4. Japon Deprem Yönetmeliği

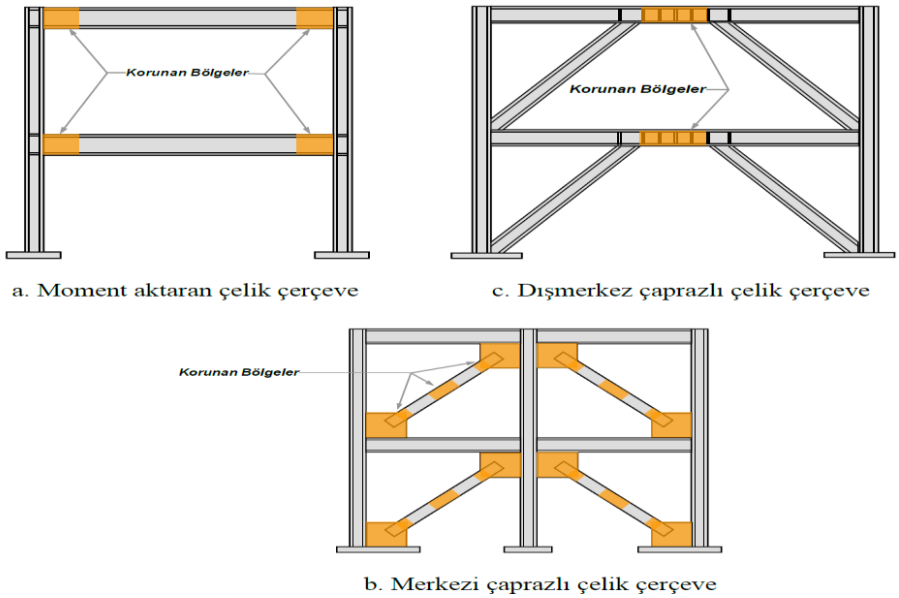
Japonya, yüksek deprem riski nedeniyle oldukça gelişmiş bir deprem yönetmeliğine sahiptir. Japon Deprem Yönetmeliği, çelik yapıların ve çapraz elemanların tasarımında oldukça detaylı kurallar içerir. Bu yönetmelik, çelik çapraz elemanların deprem sırasında yüksek dayanım ve süneklik sağlaması için gerekli olan tasarım kriterlerini belirler.

2.5. Depreme Dayanıklı Çelik Yapı Tasarımı

Bir yapının tasarımındaki en önemli amaçlardan bir tanesi yapının kullanım ömrü boyunca beklenen depremlerde göçmeden ayakta kalıp can güvenliğini sağlamaktır. Çünkü depremden sonra kullanımı zorunlu olacak olan yapıların (hastane, endüstriyel tesisler vb.) kullanımına devam edilmesi amaçlanmaktadır. Bu gereksinimlerin

karşılanabilmesi için yapı elastik sınırlar içinde kalmalıdır. Bu da yapıda hasar meydana gelmemesine neden olacaktır.

Deprem etkilerini karşılayabilecek özelliğe sahip yatay yük taşıyıcı sistem seçimi oldukça önemlidir. Yatay yük etkisindeki çelik yapı tasarımında 3 farklı yapı tipi mevcuttur. Bunlar; moment taşıyabilen çerçeveler, merkezi çaprazlı çerçeveler, dışmerkez çaprazlı çerçevelerdir.



Şekil 2.5: Çelik çerçeve tipleri.

Yatay yük taşıyıcı sistemler, yapının depreme karşı davranışı bakımından 3 kategoriye ayrılmaktadır.

- Süneklik Düzeyi Yüksek Sistemler
- Süneklik Düzeyi Karma Sistemler
- Süneklik Düzeyi Sınırlı Sistemler

Süneklik düzeyi yüksek sistemler, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde **[26]** belirtilen koşulları sağlayan ve moment aktaran çelik çerçeve sistemler, merkezi çaprazlı çelik çerçeve sistemler, dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve sistemler ve burkulması önlenmiş çelik çerçeve sistemler kullanılarak veya moment aktaran çerçeve sistemlerin diğer sistemlerle bir araya getirilmesiyle oluşturulan sistemlerdir **[27]**.

Benzer şekilde süneklik düzeyi sınırlı sistemler de yönetmelikte belirtilen koşulları sağlayan moment aktaran çelik çerçeve sistemler, merkezi çaprazlı çelik çerçeve sistemler ve bu iki sistemin bir araya getirilmesiyle oluşturulan sistemlerden oluşur **[27]**.

Süneklik düzeyi karma sistemler ise, süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçeve sistemlerin süneklik düzeyi yüksek çelik çaprazlı çerçeveler veya betonarme perdeler ile birlikte kullanıldığı sistemlerdir **[27]**.

3. AMERİKAN YÖNETMELİĞİNE GÖRE ÇELİK YAPILAR TASARIM KRİTERLERİ

3.1. Genişlik-Kalınlık Oranı Sınırlamaları

Çelik elemanlar AISC-341-22 **[28]** yönetmeliğine göre genişlik-kalınlık oranlarına göre yüksek ve orta derece sünek olmak üzere 2 grupta incelenmektedir. Şekil 3.1 de bu tez kapsamında değerlendirilen içi boş tüp kesitler için genişlik-kalınlık oranına göre belirlenen süneklik düzeyi sınırlamaları yer almaktadır.

TABLE D1.1a (continued)
Width-to-Thickness Ratios:
Compression Elements—Diagonal Braces

Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio: λ_{hd} Highly Ductile Members	Limiting Width-to-Thickness Ratio: λ_{md} Moderately Ductile Members	Example
3	Walls of round HSS [a]	D/t	$0.053\frac{E}{R_yF_y}$	$0.062\frac{E}{R_yF_y}$	

Şekil 3.1: Genişlik-Kalınlık oranı sınırlamaları **[28].**

Tablo 3.1: Malzeme özelliklerine karşılık gelen Ry değerleri **[28]**.

Uygulama	R_y
İçi Boş Kesitler (HSS)	
• ASTM A53/A53M	1.6
• ASTM A500/A500M Gr. B	1.4
• ASTM A500/A500M Gr. C	1.3
• ASTM A501/A501M	1.4
• ASTM A1085/A1085M Gr. A	1.25

3.2. Brüt Enkesit Alanının (Ag) Hesaplanması

Dairesel içi boş kesitlerin brüt alanı Denklem (3.1)'de gösterilmiştir.

$$A_g = \frac{\pi}{4}\, d_o^2 - d_i^2 \tag{3.1}$$

Bu denklemde do dış çapı, di iç çapı temsil etmektedir.

3.3. Kritik Burkulma Gerilmesi (F_{cr}) Hesaplanması

Çelik yapı elemanlarının belirli bir yük altında stabilitesini koruyabilme durumunu burkulma dayanımı belirlemektedir. Kritik burkulma gerilmesi (F_{cr}), elemanın burkulma kapasitesini ifade etmektedir. Kritik burkulma gerilmesinin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmaktadır:

$$\text{Eğer} \quad 0{,}44F_y \leq F_e \qquad \text{ise} \qquad F_{cr} = \left(0{,}658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) F_y \tag{3.2}$$

$$\text{Eğer} \quad 0{,}44F_y > F_e \qquad \text{ise} \qquad F_{cr} = 0{,}877\, F_e \tag{3.3}$$

Burada F_e, elastik burkulma gerilmesini temsil etmektedir ve Euler burkulma teorisini doğrultusunda Denklem (3.4)'e göre hesaplanmaktadır.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \tag{3.4}$$

KL/r, narinlik oranını temsil etmektedir ve AISC **([28], [37])** şartnamesine göre bu oranın 200'e eşit veya küçük olması tavsiye edilmektedir.

3.4. Çekme ve Basınç Yükleri Etkisi Altındaki Maksimum Yüklerin Hesaplanması

Bir malzemenin maksimum çekme ve basınç yükleri elemanın akma dayanımı ve kesit alanına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Çekme Etkisi altındaki maksimum yük Denklem (3.5)'e göre hesaplanmaktadır **[28]**.

$$P_{maks,çekme} = R_y\, F_y\, A_g \tag{3.5}$$

Basınç etkisi altındaki elemanlar için maksimum yük ise Denklem (3.6) ve (3.7)'nin hesaplanmasının ardından çıkan sonuçlardan minimum olanının kabul edilmesi ile hesaplanmaktadır.

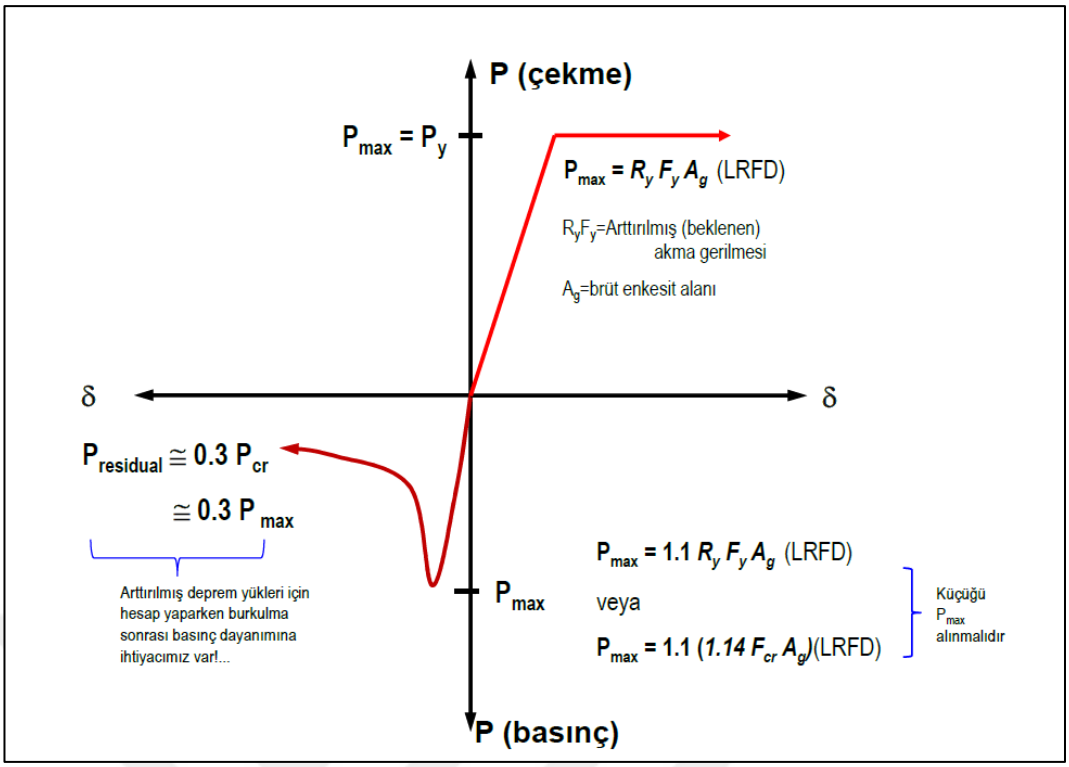
$$P_{maks,basınç,1} = 1{,}1\ R_y\ F_y\ A_g \tag{3.6}$$

$$P_{maks,basınç,2} = 1{,}1\ (1{,}14\ F_{cr}\ A_g) \tag{3.7}$$

$$P_{maks,basınç} = \min\ (P_{maks,basınç,1}\ , P_{maks,basınç,2}) \tag{3.8}$$

3.5. Çapraz Elemanların Tasarıma Esas Davranışları

Yapısal tasarımda çapraz elamanlar şiddetli yer hareketi sırasında yatay yükleri karşılamak üzere doğrusal olmayan davranış gerçekleştirecek şekilde tasarlanmaktadırlar. Merkezi çaprazlı sistemlerdeki çapraz elemanlar, şiddetli yer hareketleri sırasında doğrusal olmayan davranış gerçekleştirecek şekilde tasarlanırlar. Çapraz elemanın, deprem yer hareketi sırasında çekme kuvvetleri altında akması, basınç kuvvetleri altında ise burkulması beklenir. Süneklik, çekme kuvveti altında akan çapraz elemanlar tarafından sağlanır, diğer bir deyişle taşıyıcı sistemin dağıtması gereken sismik enerjinin önemli bir kısmı çekme kuvveti altında akan çaprazlar tarafından tüketilir. Burkulma, sünek bir davranış olmadığından burkulan çaprazlar, taşıyıcı sistemin sünekliğine herhangi bir katkı sağlamazlar **[29]**. AISC 341-22 **[28]** yönetmeliği doğrultusunda belirlenen çapraz elemanın çekme ve basınç kuvvetleri altındaki tasarıma esas davranışı **Şekil 3.3**' de gösterildiği gibidir.

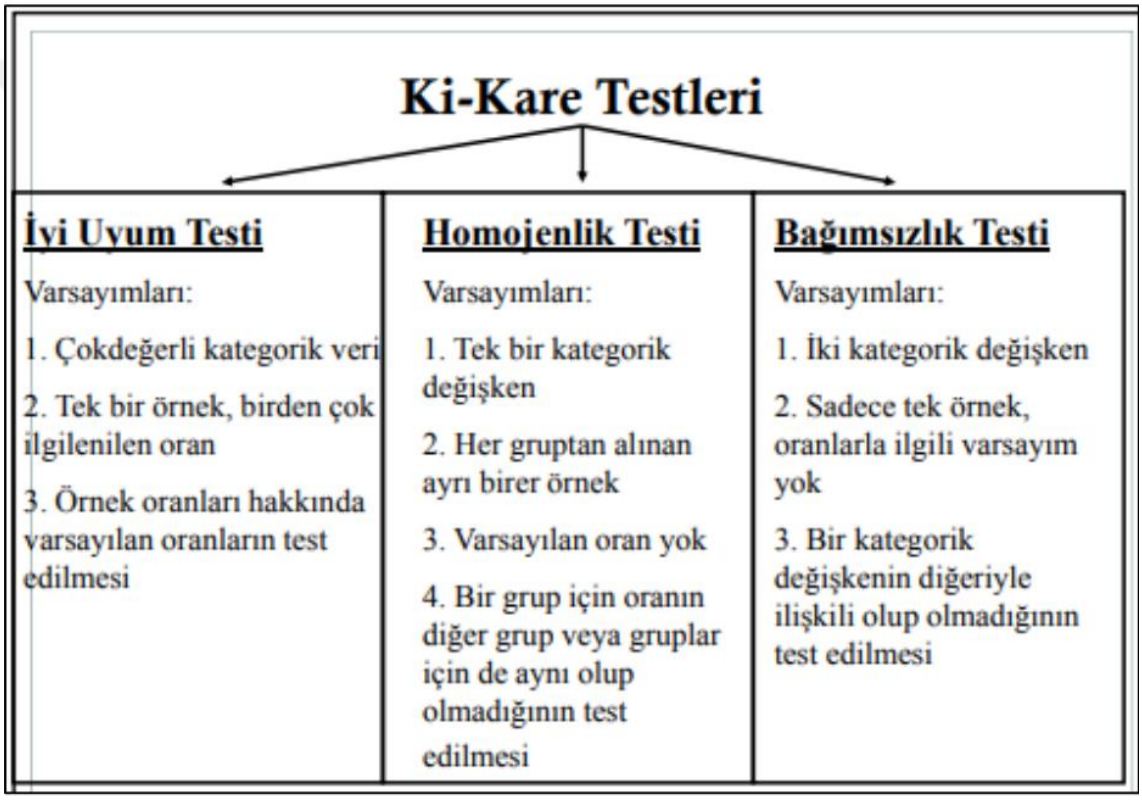


Şekil 3.2: Çapraz elemanın çekme ve basınç kuvvetleri altındaki tasarıma esas davranışı **[29].**

4. Kİ-KARE TESTİ VE SPSS İLE İSTATİSTİKSEL ANALİZ

4.1. Ki-Kare Testi

Ki-Kare testi deneysel verilerin elde edilen veriler ile uygunluğunu test etmek için kullanılan bir hipotez testidir. Bu testte serbestlik derecesi kavramı ve kritik ki-kare (X^2) değeri önemlidir. Ki- kare testi, iyi uyum testi, homojenlik testi ve bağımsızlık testi olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır.



Şekil 4.1: Ki-Kare testi kullanım amaçları.

Bu testi uygulayabilmek için öncelikle gözlenen değer ile beklenen değer arasındaki uyum bulunması yani Kritik Ki-Kare (X^2) değerinin hesaplanması gerekmektedir.

$$X^2 = \sum \frac{(\text{Gözlenen Değer} - \text{Beklenen Değer})^2}{\text{Beklenen Değer}} \tag{4.1}$$

X^2 değerinin hesaplanmasından sonra, serbestlik Derecesi belirlenmektedir. Bu derece grup sayısının 1 eksiğine eşittir.

Ardından sonuçlara göre Ki-Kare tablosundan (**Tablo 4.1**) kritik değere bakılır. α değeri 0,05 olarak kabul edilmektedir.

Tablo 4.1: Ki-Kare tablosundan bazı değerler.

SD	0.950	0.900	0.750	0.500	0.250	0.100	0.05
1	0.00393	0.01579	0.10153	0.45494	1.32330	2.70554	3.841
2	0.10259	0.21072	0.57536	1.38629	2.77259	4.60517	5.99146
3	0.35185	0.58437	1.21253	2.36597	4.10834	6.25139	7.81473
4	0.71072	1.06362	1.92256	3.35669	5.38527	7.77944	9.48773
5	1.14548	1.61031	2.67460	4.35146	6.62568	9.23636	11.07050
6	1.63538	2.20413	3.45460	5.34812	7.84080	10.64464	12.59159
7	2.16735	2.83311	4.25485	6.34581	9.03715	12.01704	14.06714
8	2.73264	3.48954	5.07064	7.34412	10.21885	13.36157	15.50731
9	3.32511	4.16816	5.89883	8.34283	11.38875	14.68366	16.91898
10	3.94030	4.86518	6.73720	9.34182	12.54886	15.98718	18.30704
11	4.57481	5.57778	7.58414	10.34100	13.70069	17.27501	19.67514
12	5.22603	6.30380	8.43842	11.34032	14.84540	18.54935	21.02607
13	5.89186	7.04150	9.29907	12.33976	15.98391	19.81193	22.36203

Gözlenen ve beklenen değerler arasındaki toplam X^2 değeri hesaplanır ve tablodaki Kritik X^2 değeri ile bu değer karşılaştırılır. Ardından $X^2 < X^2_{kritik}$ ise hesaplamalar doğru kabul edilmektedir.

4.2. SPSS ile İstatistiksel Analiz

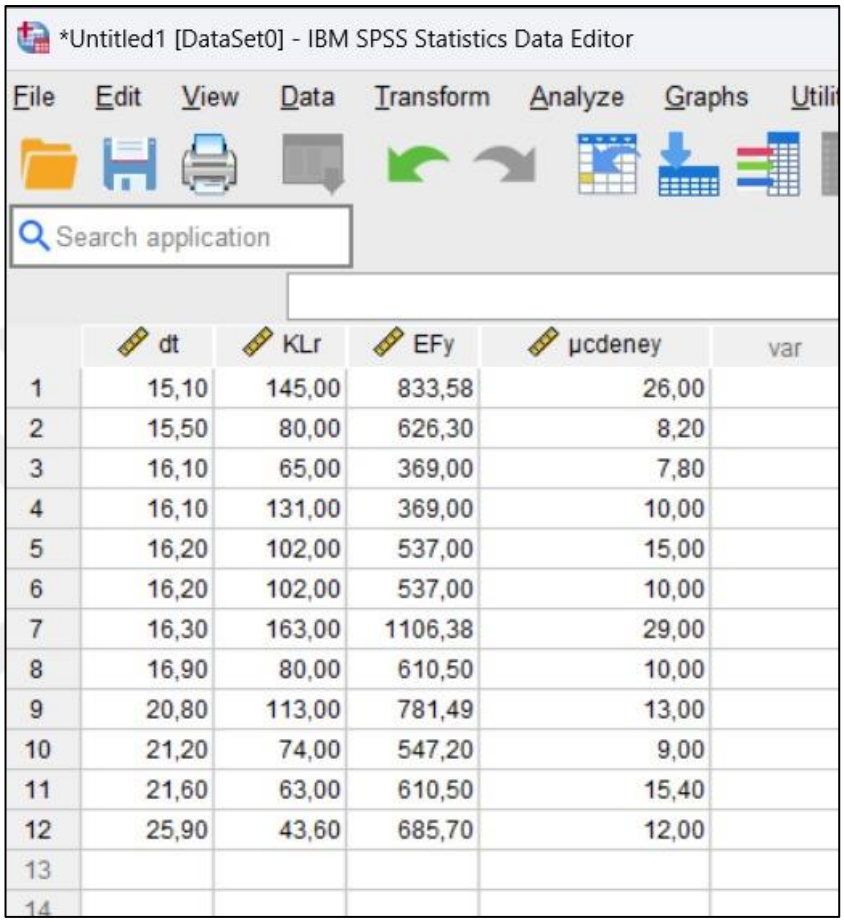
SPSS, veri girişi, veri yönetimi ve çeşitli istatistiksel Analizlerin yapılmasına olanak sağlayan bir program çeşididir. Bu tez kapsamında SPSS programı kullanılarak çoklu doğrusal regresyon Analizi yapılmıştır.

4.2.1. Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi

Bu Analiz çeşidinde bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız değişken olmak üzere 2 tip değişken bulunmaktadır. Bu değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ortaya koyan yönteme çoklu doğrusal regresyon Analizi adı verilmektedir. Bir bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki anlamlılığı ise anlamlılık değeri ifade etmektedir. Ve bu yönteme de çoklu korelasyon Analizi denmektedir. Çoklu regresyon ve çoklu korelasyon Analizi hesaplamaları SPSS programı sayesinde birlikte yapılabilmektedir. Verilere uyan modelin açıklayıcılık yüzdesi ise çoklu

belirtme katsayısı olan R^2 değeri ile belirlenmektedir. Bu tez kapsamında SPSS programı ile yapılan bir regresyon Analizinin aşamalarını bu bölümde gösterebilmek adına Denklem (5.3) için uygulanan adımlar sırası ile aşağıda yer almaktadır.

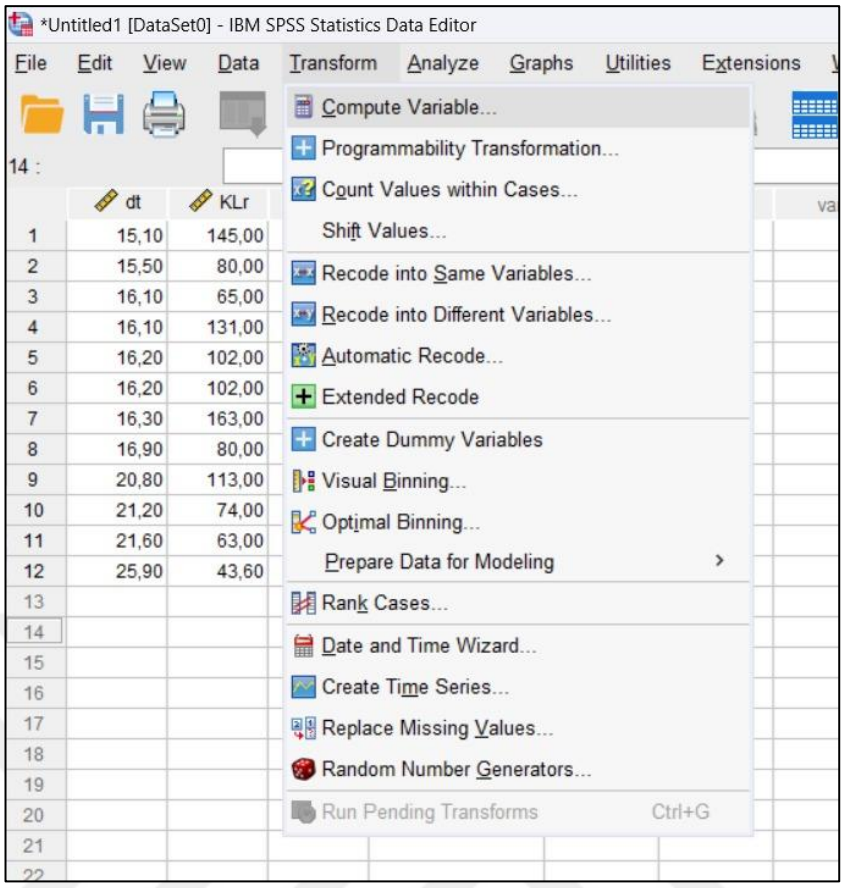
Öncelikle veri girişi gerçekleştirilmelidir (**Şekil 4.2**).



	dt	KLr	EFy	µcdeney	var
1	15,10	145,00	833,58	26,00	
2	15,50	80,00	626,30	8,20	
3	16,10	65,00	369,00	7,80	
4	16,10	131,00	369,00	10,00	
5	16,20	102,00	537,00	15,00	
6	16,20	102,00	537,00	10,00	
7	16,30	163,00	1106,38	29,00	
8	16,90	80,00	610,50	10,00	
9	20,80	113,00	781,49	13,00	
10	21,20	74,00	547,20	9,00	
11	21,60	63,00	610,50	15,40	
12	25,90	43,60	685,70	12,00	
13					
14					

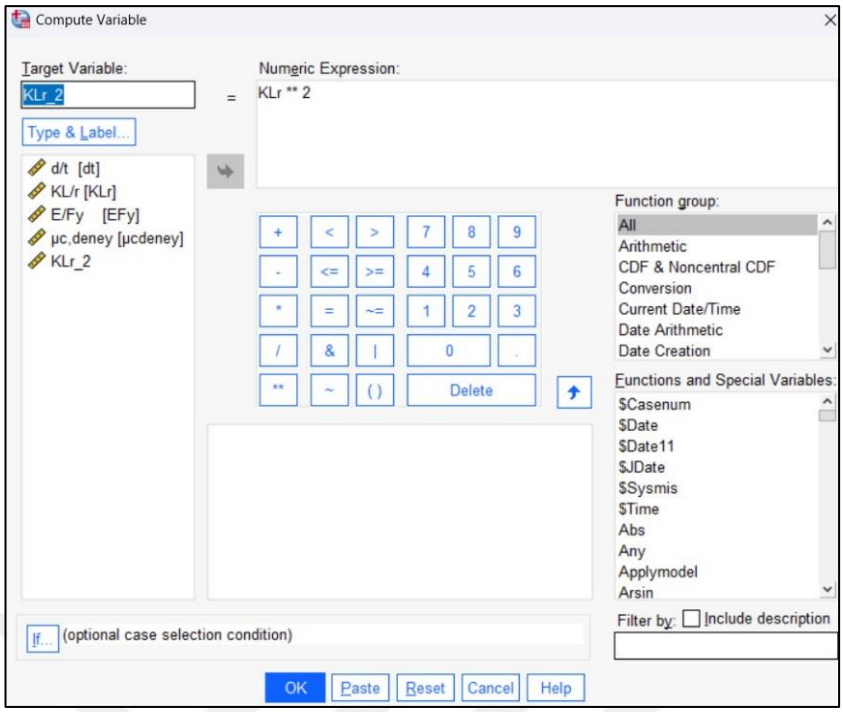
Şekil 4.2: SPSS programına veri girişi.

Ardından lineer regresyon yöntemi kullanıldığından dolayı, anlamlılık değerinin 0,05 ve daha küçük olduğu ilişki seçilmelidir. Bu bağlamda parametreler ile kombinasyonlar yapılmaktadır. Bu kombinasyonları oluştururken SPSS programında "Compute Variable" sekmesi (**Şekil 4.3**) kullanılmaktadır. (Örn. $(D/t)^2$, ln(KL/r) vb.).

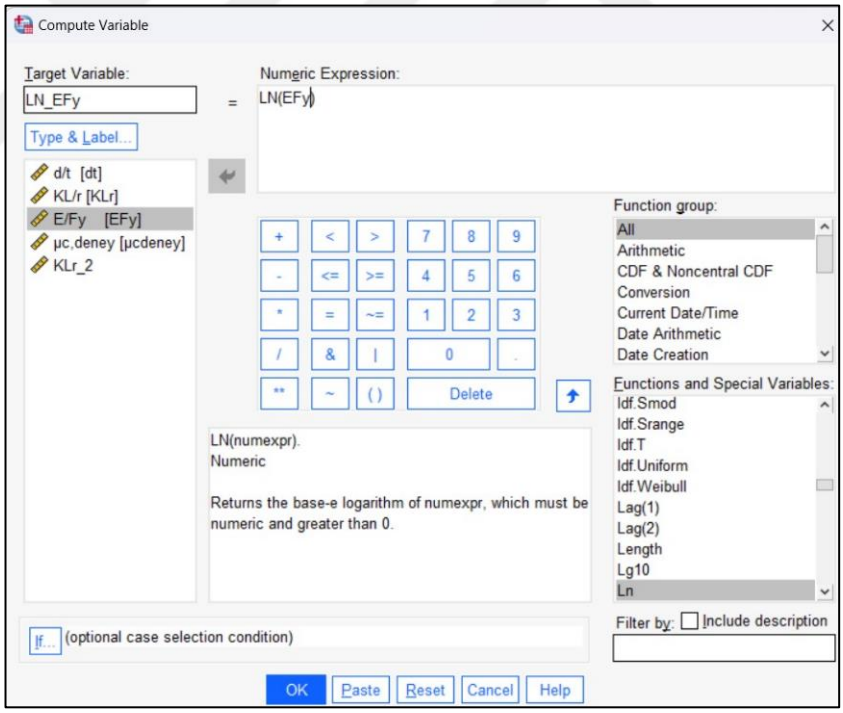


Şekil 4.3: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi.

Sonrasında uygun kombinasyonu oluşturmak için yeni değişkenler elde edilir (**Şekil 4.4**).

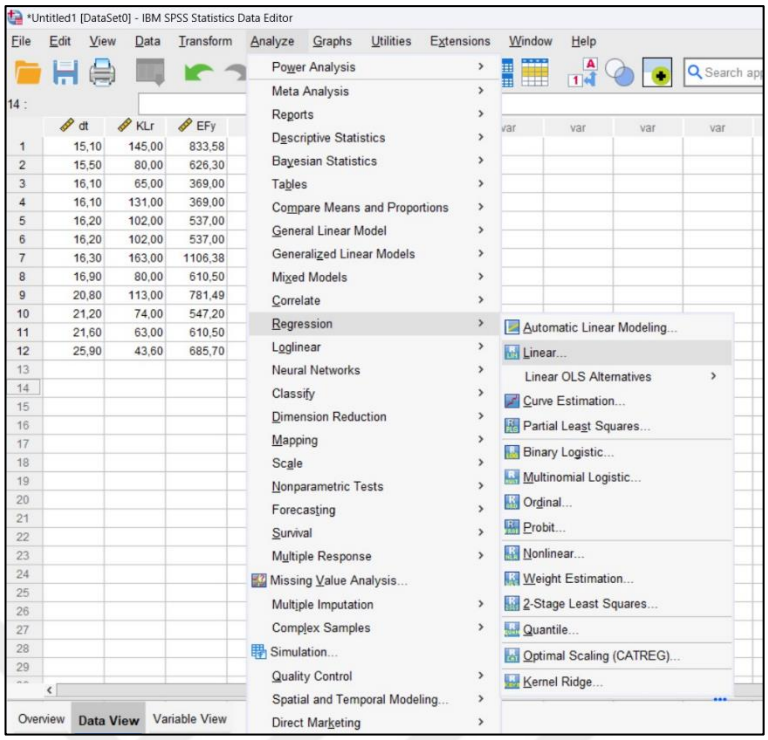


Şekil 4.4: (KL/r)² değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması.



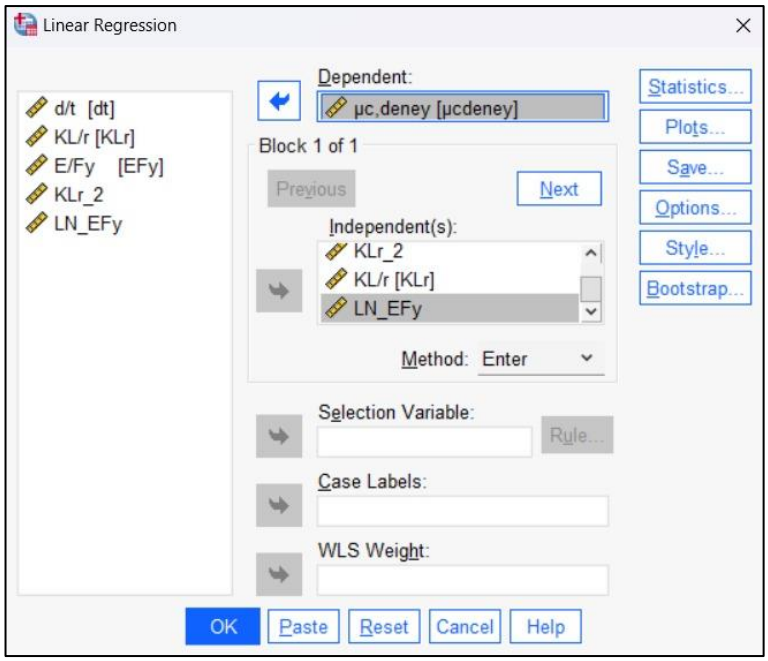
Şekil 4.5: ln(E/Fy) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması.

Sonrasında çoklu lineer regresyon Analizi gerçekleştirilmektedir (**Şekil 4.6)**.



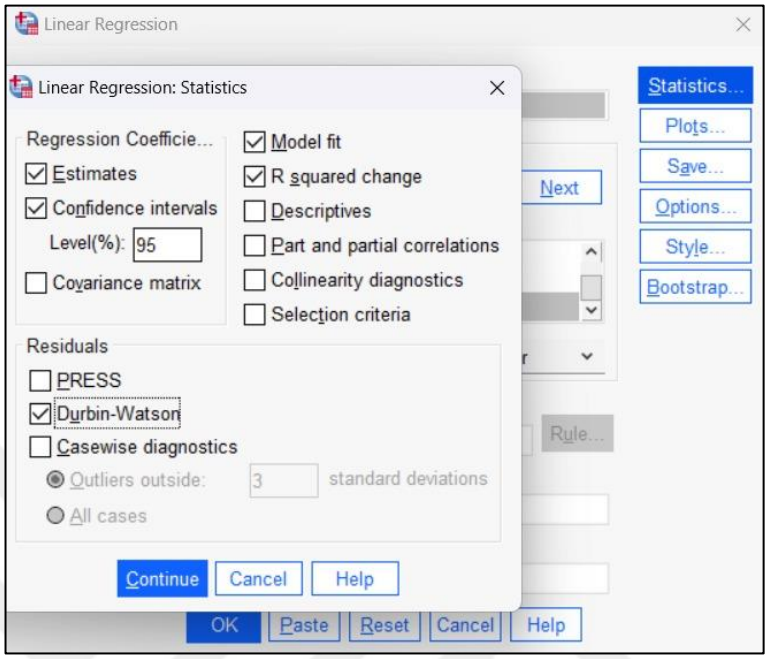
Şekil 4.6: Analiz yönteminin seçilmesi.

Analiz yönteminin seçilmesinden sonra, oluşturulacak denklem için bağımlı ve bağımsız değişkenler ilgili kutucuklara taşınmaktadır (**Şekil 4.8**).

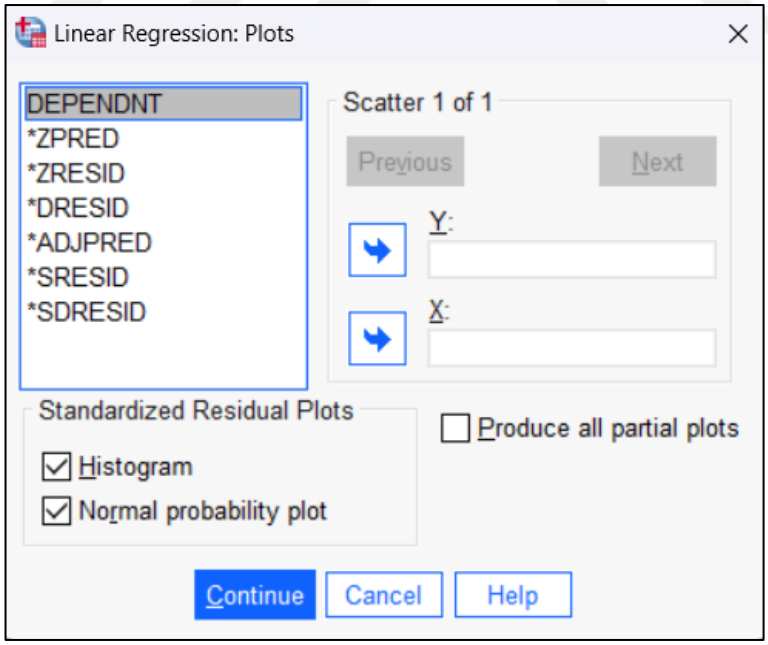


Şekil 4.7: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin girilmesi.

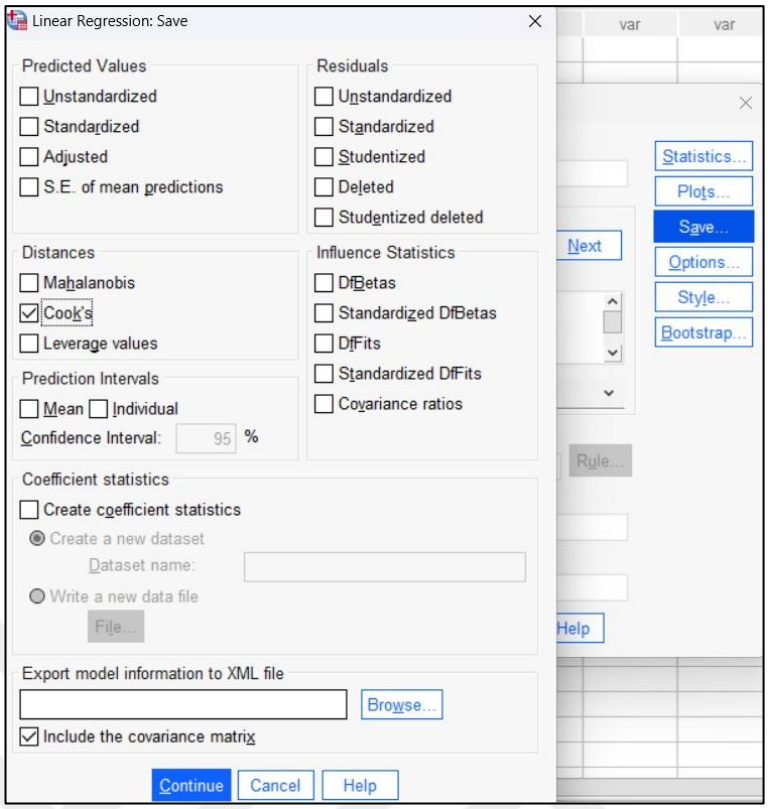
Sonrasında Analizde gerekli kabullerin kontrolü için programdan bazı değerlerin hesaplanması istenmektedir **(Şekil 4.8, 4.9, 4.10).**



Şekil 4.8: "Statistics" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil 4.9: "Plots" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil 4.10: "Save" sekmesinden "Cook's Distance" seçeneğinin seçilmesi.

Regression

Variables Entered/Removed[a]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	LN_EFy, d/t , KLr_2, KL/r[b]	.	Enter

a. Dependent Variable: µc,deney

b. All requested variables entered.

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,929[a]	,862	,784	3,20232	,862	10,963	4	7	,004	2,584

a. Predictors: (Constant), LN_EFy, d/t , KLr_2, KL/r

b. Dependent Variable: µc,deney

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	449,692	4	112,423	10,963	,004[b]
	Residual	71,784	7	10,255		
	Total	521,477	11			

a. Dependent Variable: µc,deney

b. Predictors: (Constant), LN_EFy, d/t , KLr_2, KL/r

Şekil 4.11.a: Regresyon Analizi sonuçları.

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B Lower Bound	95,0% Confidence Interval for B Upper Bound
1	(Constant)	-29,685	29,225		-1,016	,344	-98,791	39,421
	d/t	-,218	,437	-,107	-,499	,633	-1,251	,815
	KLr_2	,002	,001	2,264	2,179	,066	,000	,004
	KL/r	-,336	,203	-1,758	-1,655	,142	-,816	,144
	LN_EFy	9,095	4,215	,413	2,158	,068	-,873	19,063

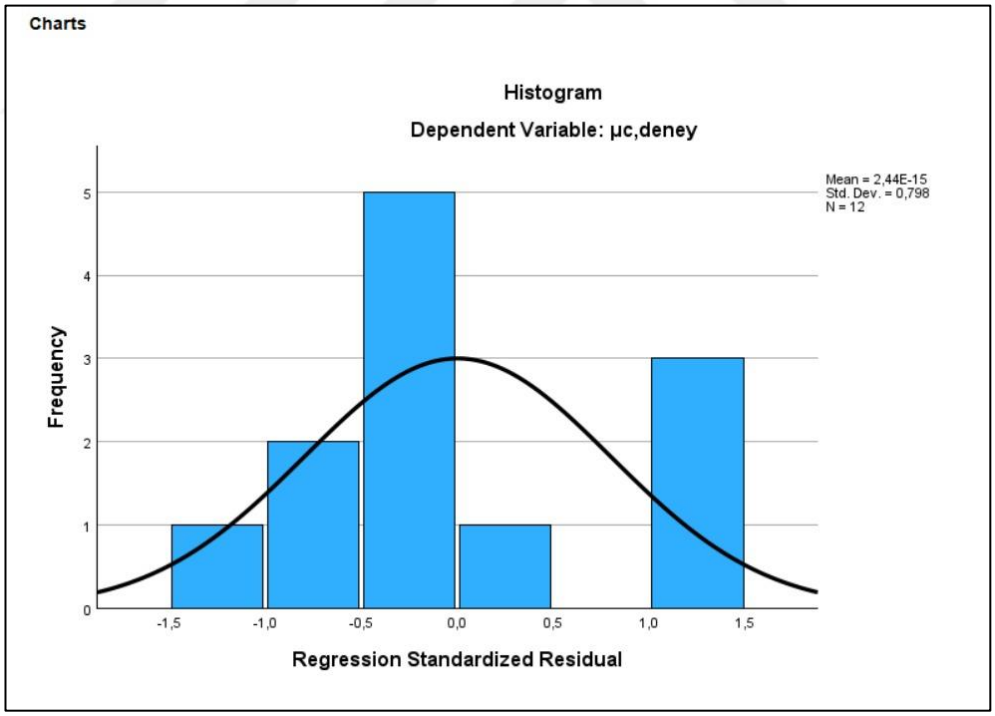
a. Dependent Variable: µc,deney

Residuals Statistics[a]

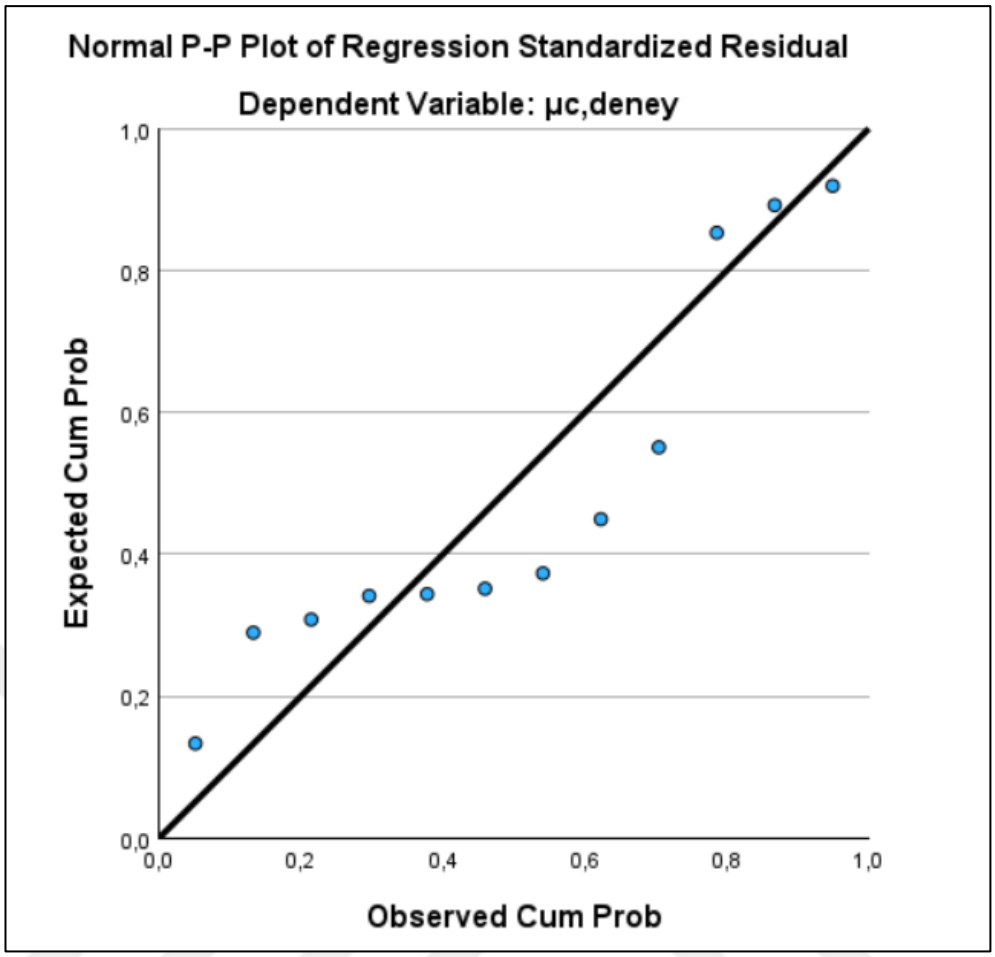
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	7,3923	30,2888	13,7833	6,39384	12
Std. Predicted Value	-1,000	2,581	,000	1,000	12
Standard Error of Predicted Value	1,349	2,795	1,991	,580	12
Adjusted Predicted Value	6,9130	33,6957	14,9172	7,20698	12
Residual	-3,56007	4,48146	,00000	2,55457	12
Std. Residual	-1,112	1,399	,000	,798	12
Stud. Residual	-1,430	1,561	-,119	1,008	12
Deleted Residual	-7,45930	5,57855	-1,13391	4,40841	12
Stud. Deleted Residual	-1,574	1,791	-,090	1,080	12
Mahal. Distance	1,034	7,461	3,667	2,556	12
Cook's Distance	,001	,826	,184	,231	12
Centered Leverage Value	,094	,678	,333	,232	12

a. Dependent Variable: µc,deney

Şekil 4.11.b: Regresyon Analizi sonuçları.



Şekil 4.11.c: Regresyon Analizi sonuçları.



Şekil 4.11.d: Regresyon Analizi sonuçları.

Sonuçlar değerlendirildiğinde R^2 değerinin 70'in üzerinde olması denklemin doğruluk seviyesinin iyi olmasını ifade etmektedir. **Şekil 4.11.a** da yer alan Sig. değeri, anlamlılık değerine karşılık gelmektedir ve değişkenler arasındaki regresyon Analizinin anlamlılığı ifade etmektedir. Bu değerin 0.05'e eşit veya az olması beklenmektedir. Bununla birlikte **Şekil 4.11.a** da yer alan Durbin Watson değerinin 1 ile 4 arasında olması denklemin güvenilirlik koşulunu da sağlamaktadır. Ayrıca **Şekil 4.11.b** de yer alan "Cook's Distance" değerinin 1'den küçük olması da Analizde uç değerlerin olmaması anlamına gelmektedir. Ayrıca burada "Unstandardized B" başlığının altında değişkenlere ait olan katsayılar yer almaktadır. Tahmin denklemler bu katsayılar doğrultusunda belirlenmektedir (Denklem (5.3)). Ek olarak **Şekil 4.11.c** de yer alan histogram grafiğinde çan eğrisinin simetrik şeklinin olması ve **Şekil 4.11.d** de yer alan grafikte noktalar düzgün bir şekilde yayılmış olduğundan dolayı hataların normal dağıldığı söylenebilir.

5. BASINÇ VE ÇEKME YÜKLERİ ETKİSİ ALTINDA SÜNEKLİK TAHMİNİ YAPILMASI

5.1. Deney Sonuçlarının Toplanması

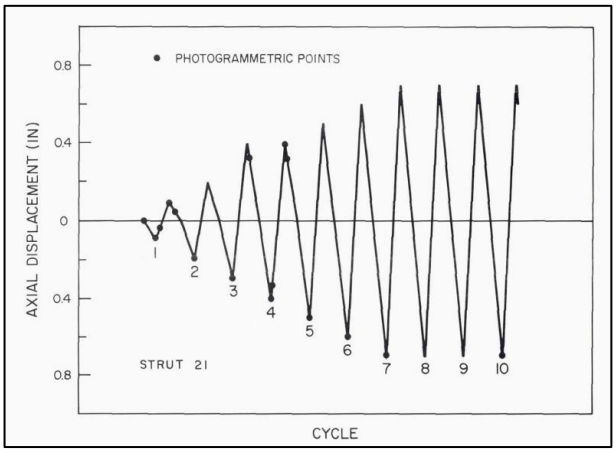
10 farklı kaynaktan içi boş dairesel kesitler için deney sonuçları toplanmıştır.

5.1.1. Numune Malzeme, Kesit Özellikleri ve Yükleme Protokolleri

- Referans **[13]:** Bu çalışmada D/t oranı 15,5-16,9, narinlik oranı 80 ve E/Fy oranı 610,5-626,3 aralığında olan 2 adet numune seçilmiştir **(Tablo 5.1).**

Tablo 5.1: [13] çalışmasında seçilen numuneler**.**

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
1980 Black vd.	14	Pipe 4 Std	ASTM-A53 Gr. B	16,9	80	610,5
	24	Pipe 3–1/2 Stdb		15,5	80	626,3



Şekil 5.1: [13] makalesinde kullanılan yükleme protokolü**.**

- Referans **[14]:** Bu çalışmada D/t oranı 33-48, narinlik oranı 25-54 aralığında ve E/Fy oranı 935,5 olan 4 adet numune seçilmiştir (**Tablo 5.2**). Bu makaledeki deneylerde numunelere simetrik yükleme protokolü uygulanmıştır.

Tablo 5.2: [14] çalışmasında seçilen numuneler**.**

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
1980 Zayas vd.	1	4 × 0,083	A36	48	54	935,5
	2	4 × 0,12		33	54	935,5
	5	4 × 0,083		48	25	935,5
	6	4 × 012		33	25	935,5

- Referans **[1]:** Bu çalışmada D/t oranı 39,91, narinlik oranı 29 ve E/Fy oranı 527,3 olan 2 adet numune seçilmiştir. (**Tablo 5.3**) Bu makaledeki deneylerde numunelere farklı simetrik yükleme protokolleri uygulanmıştır.

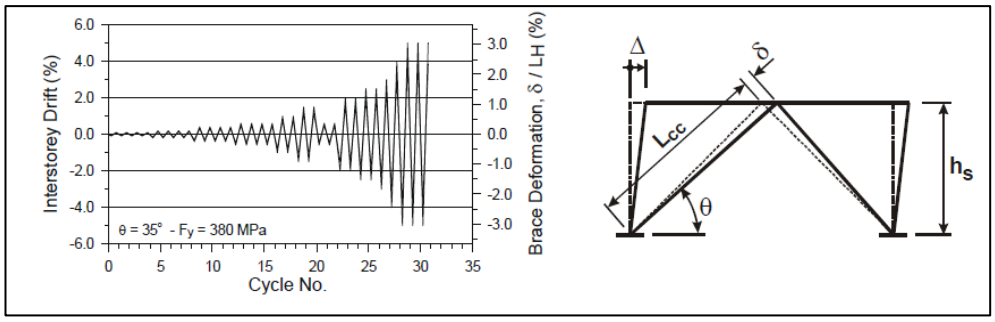
Tablo 5.3: [1] çalışmasında seçilen numuneler**.**

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
2003 Elchalakani vd.	S7B	CHS 139.7 X 3.5	C350L0	39,91	29	527,3
	S7C	CHS 139.7 X 3.5		39,91	29	527,3

- Referans **[2]:** Bu çalışmada D/t oranı 30-31, narinlik oranı 42-62 aralığında ve E/Fy oranı 630,4 olan 2 adet numune seçilmiştir **(Tablo 5.4).**

Tablo 5.4: [2] çalışmasında seçilen numuneler.

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
2008 Tremblay vd.	CHS–1	HCS 273×9.5	ASTM-A500 Gr. C	30	42	630,4
	CHS–2	HCS 273×9.5		31	62	630,4

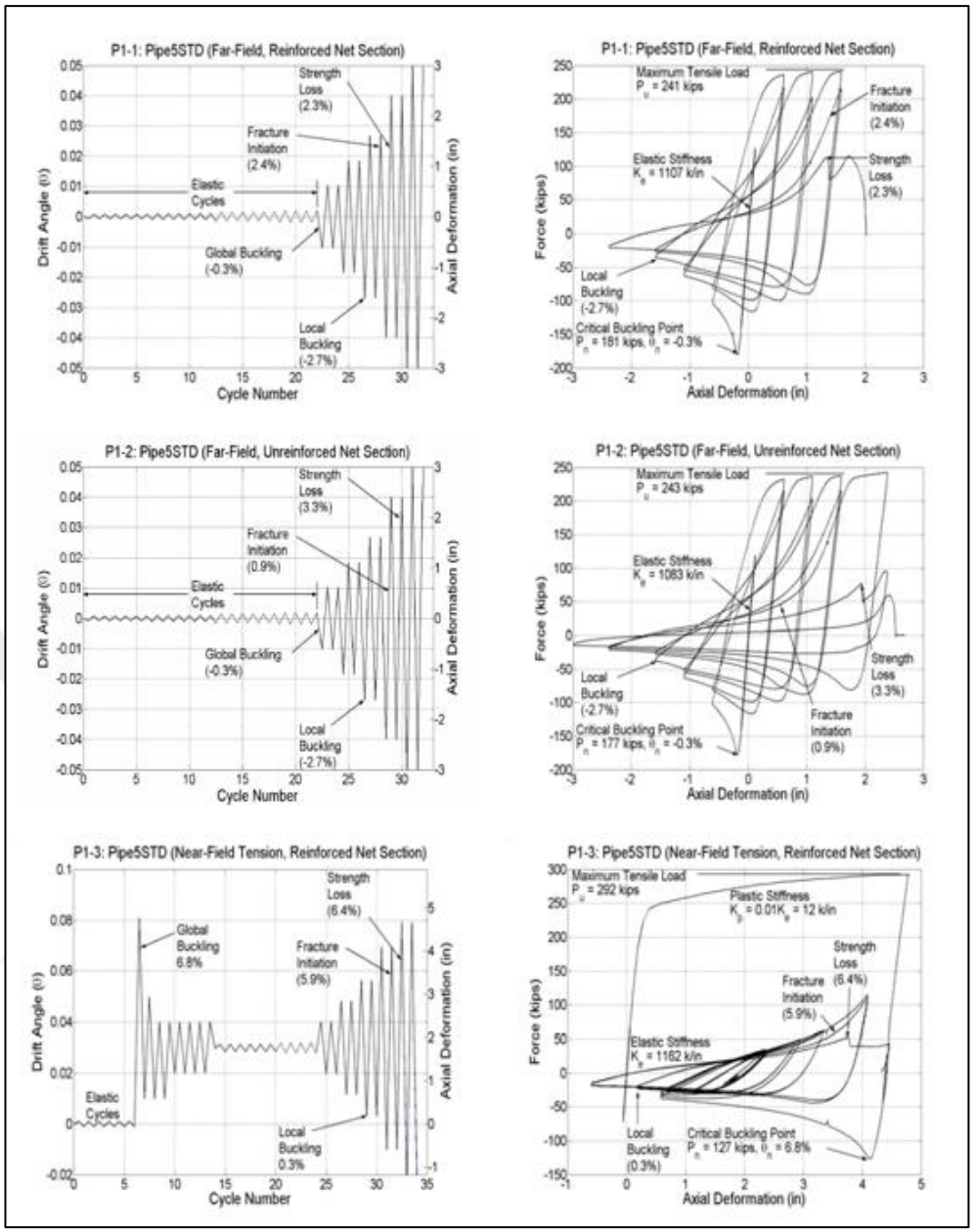


Şekil 5.2: [2] makalesinde kullanılan yükleme protokolü.

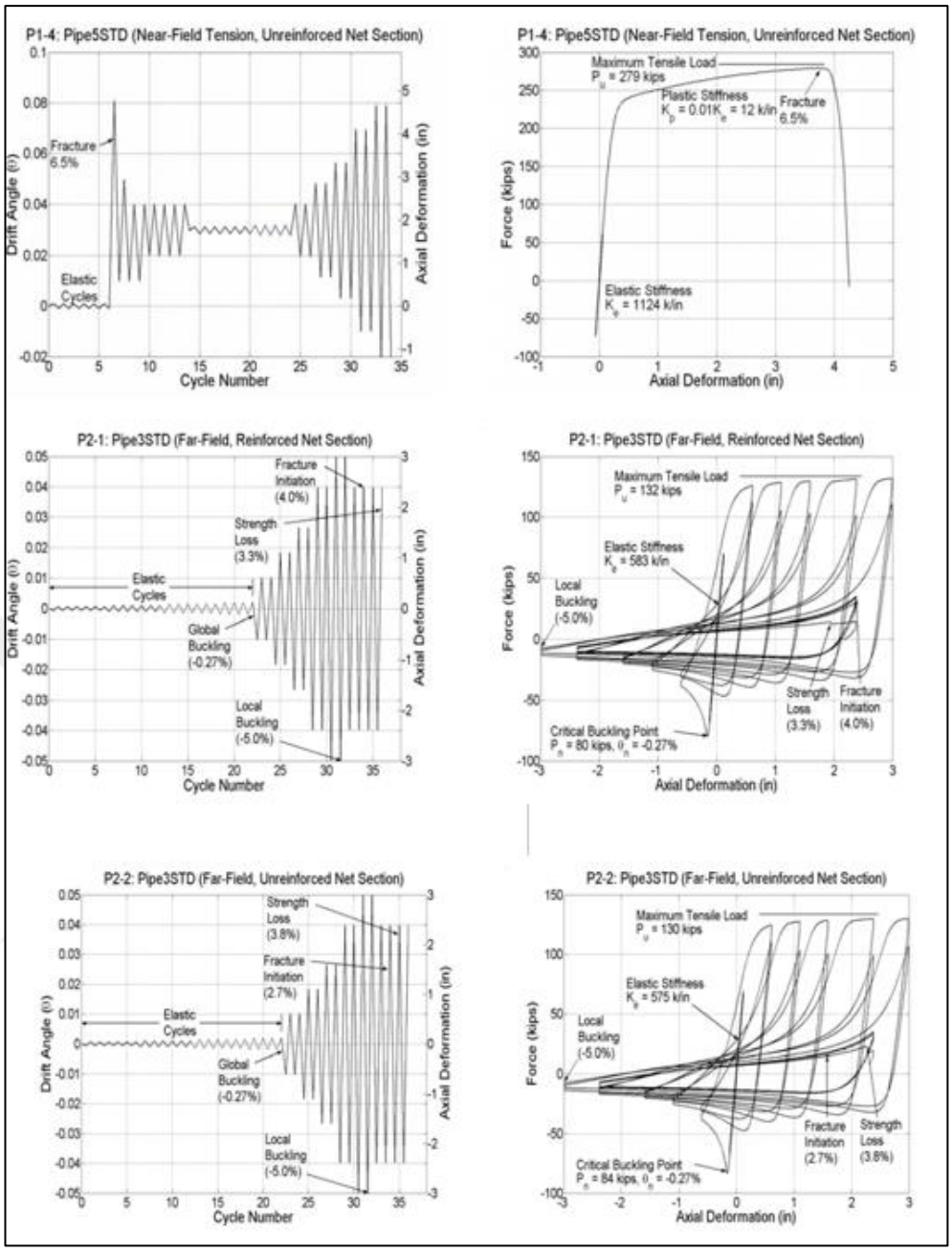
- Referans **[3]:** Bu çalışmada D/t oranı 16,2-21,6, narinlik oranı 63-102 ve E/Fy oranı 537-610,5 aralığında olan 3 adet numune seçilmiştir (**Tablo 5.5**).

Tablo 5.5: [3] çalışmasında seçilen numuneler.

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
2009 Fell vd.	13	Pipe127STD (Pipe 5STD)	ASTM-A53 Gr. B	21,6	63	610,50
	6	Pipe 76STD (Pipe 3STD)		16,2	102	537,00
	9	Pipe 76STD (Pipe 3STD)		16,2	102	537,00



Şekil 5.3: Pipe5STD numunesi için yükleme protokolleri **[3].**

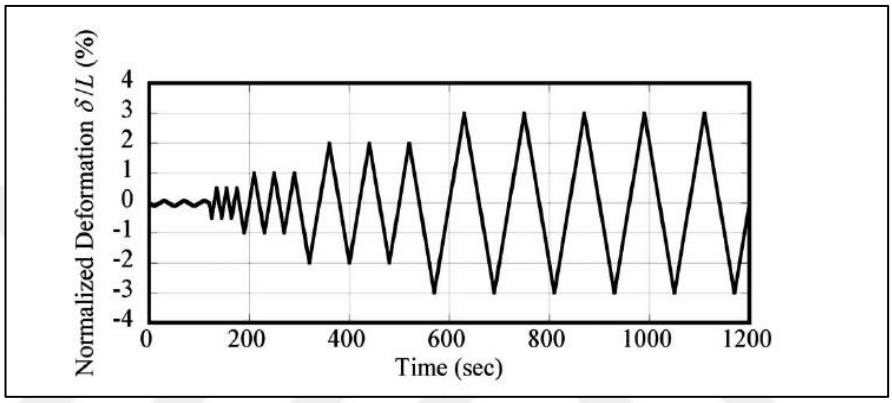


Şekil 5.4: Pipe3STD numunesi için yükleme protokolleri **[3].**

- Referans **[15]:** Bu çalışmada D/t oranı 21,2-31,8, narinlik oranı 53-121 ve E/Fy oranı 547,2-573,1 aralığında olan 6 adet numune seçilmiştir (**Tablo 5.6**).

Tablo 5.6: [15] çalışmasında seçilen numuneler**.**

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
2011 Takeuchi vd.	528	89,1 x 3,2	JIS G3444 STK400	27,8	53	573,10
	721	89,1 x 4,2		21,2	74	547,20
	728	89,1 x 3,2		27,8	73	573,10
	732	89,1 x 2,8		31,8	73	560,90
	1028	89,1 x 3,2		27,8	103	573,10
	1228	76,3 x 2,8		27,3	121	566,40



Şekil 5.5: [15] makalesinde kullanılan yükleme protokolü**.**

- Referans **[16]:** Bu çalışmadan D/t oranı 25,9, narinlik oranı 53,6 ve E/Fy oranı 685,7 olan 2 adet numune seçilmiştir (**Tablo 5.7**). Bu makaledeki deneylerde numunelere simetrik yükleme protokolü uygulanmıştır.

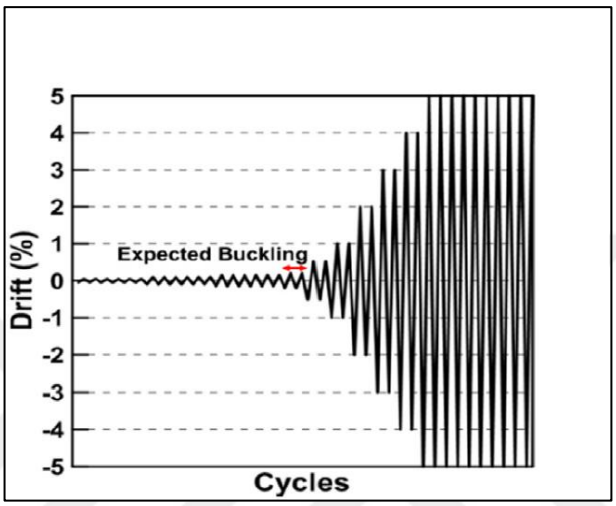
Tablo 5.7: [16] çalışmasında seçilen numuneler**.**

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
2014 Sheehan vd.	CF-H-1500	48 × 3.0	--	16,1	65	369
	CF-H-3000	48 × 3.0		16,1	131	369

- Referans **[17]:** Bu çalışmadan D/t oranı 15,1-27,8, narinlik oranı 76-163 ve E/Fy oranı 406,9-1106,1 aralığında olan 4 numune seçilmiştir (**Tablo 5.8**).

Tablo 5.8: [17] çalışmasında seçilen numuneler.

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
2018 Kumar vd.	C2	HCS 42.4×2.6	Yst 210 (IS:1161)	16,3	163	1106,1
	C4	HCS 48.3×3.2		15,1	145	847,5
	C5	HCS 60.3×2.9		20,8	113	778,6
	C6	HCS 88.9×3.2		27,8	76	406,9

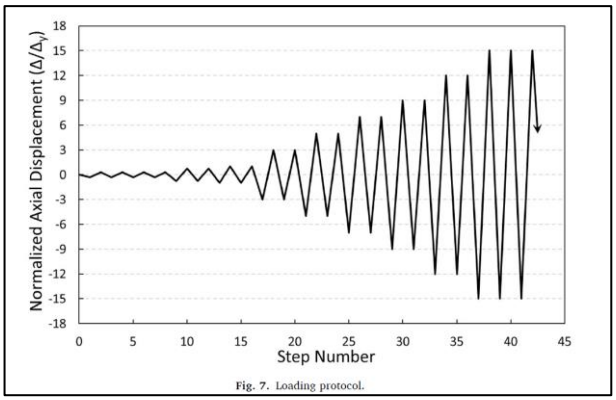


Şekil 5.6: [17] makalesinde kullanılan yükleme protokolü**.**

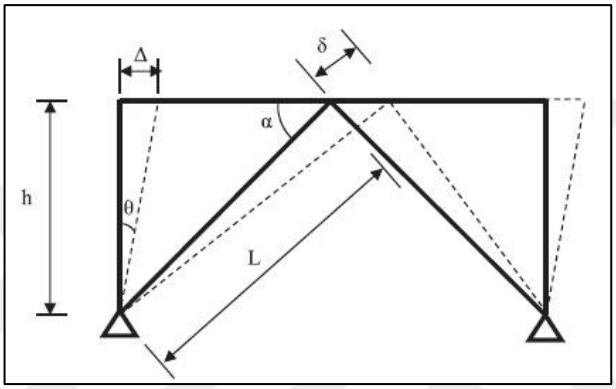
- Referans **[18]:** Bu çalışmadan D/t oranı 25,9, narinlik oranı 53,6 ve E/Fy oranı 685,7 olan numune seçilmiştir (**Tablo 5.9**).

Tablo 5.9: [18] çalışmasında seçilen numuneler**.**

ÇALIŞMA	NUMUNE	KESİT	MALZEME	D/t	KL/r	E/Fy
2021 Şeker vd.	Conventional C-BCB-1	CHS 76,2 x 3,2	ASTM 500Gr. B	25,9	43,6	685,7



Şekil 5.7: [18] makalesinde kullanılan yükleme protokolü.



Şekil 5.8: Eşdeğer sürüklenme açısı (θ) ile uygulanan eksenel yer değiştirme (δ) arasındaki ilişkinin gösterimi **[18].**

5.1.2. Çekme ve basınç Yükleri Etkisi Altında Süneklik Değerlerinin Toplanması

Basınç ve çekme yükleri etkisi altındaki süneklikler Denklem (5.1) ve (5.2)'deki gibi hesaplanmıştır. Burada, μ_C başınç yükleri altındaki süneklik değerini μ_T ise çekme yükleri etkisi altındaki sünekliği temsil etmektedir. Δ_{uc}, basınç yükleri etkisi altındaki maksimum deformasyon değerini, δ_{cr}, burkulma yüküne karşılık gelen deformasyonu, δ_t, çekme yükleri etkisi altındaki maksimum deformasyonu, δ_y, ise akma anındaki deformasyonu temsil etmektedir.

$$\mu_C = \frac{\delta_{uc}}{\delta_{cr}} \tag{5.1}$$

$$\mu_T = \frac{\delta_t}{\delta_y} \tag{5.2}$$

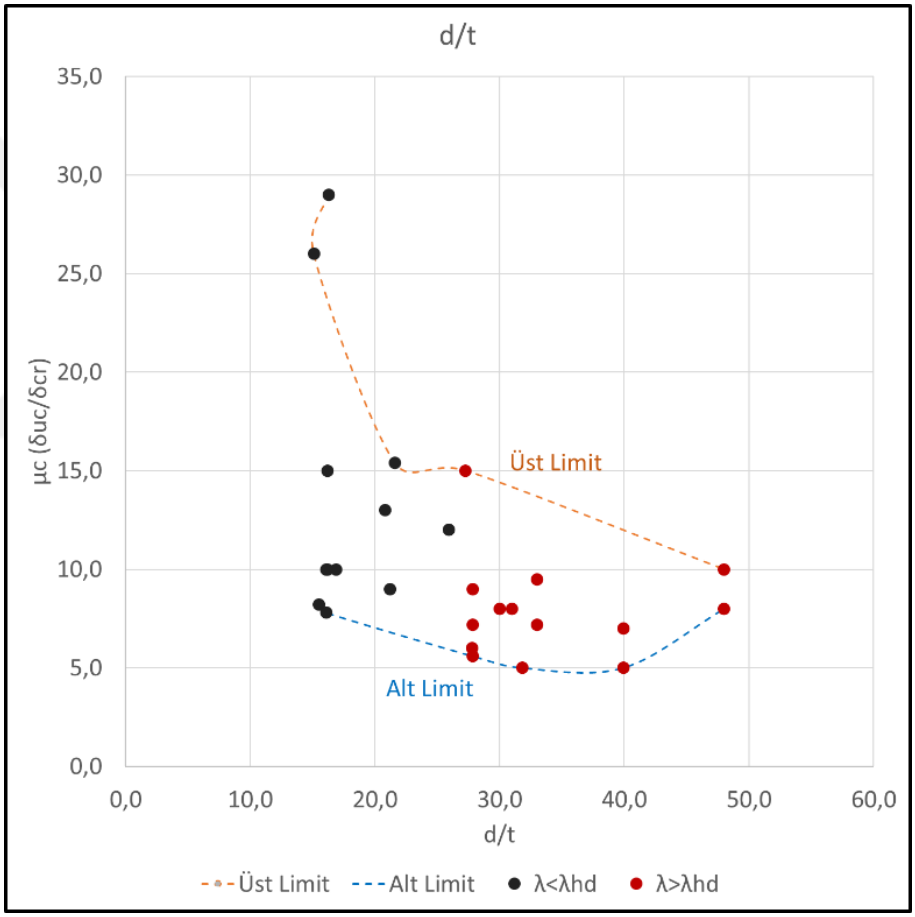
Tablo 5.10: Tez kapsamında seçilen numunelerin süneklik değerleri.

ÇALIŞMA	NUMUNE	D/t	KL/r	E/Fy	Süneklik (Basınç) μc = δuc/ δcr	Süneklik (Çekme) μt = δt/ δy
1980 Black vd.	14	16,9	80	610,5	10,0	6,0
	24	15,5	80	626,3	8,2	5,2
1980 Zayas vd.	1	48	54	935,5	8,0	6,6
	2	33	54	935,5	7,2	8,5
	5	48	25	935,5	10,0	7,0
	6	33	25	935,5	9,5	6,9
2003 Elchalakani vd.	S7B	39,91	29	527,3	7	6
	S7C	39,91	29	527,3	5	4,5
2008 Tremblay vd.	CHS–1	30	42	630,4	8	4
	CHS–2	31	62	630,4	8	4,5
2009 Fell vd.	13	21,6	63	610,50	15,40	8,50
	6	16,2	102	537,00	15,00	13,70
	9	16,2	102	537,00	10,00	20,50
2011 Takeuchi vd.	528	27,8	53	573,10	5,60	4,00
	721	21,2	74	547,20	9,00	5,00
	728	27,8	73	573,10	7,20	6,00
	732	31,8	73	560,90	5,00	5,20
	1028	27,8	103	573,10	9,00	4,00
	1228	27,3	121	566,40	15,00	9,30
2014 Sheehan vd.	CF-H-1500	16,1	65	369	7,8	4,2
	CF-H-3000	16,1	131	369	10	5
2018 Kumar vd.	C2	16,3	163	1106,1	29	17
	C4	15,1	145	847,5	26	16
	C5	20,8	113	778,6	13	17
	C6	27,8	76	406,9	6	10
2021 Şeker vd.	Conventional C-BCB-1	25,9	43,6	685,7	12	9

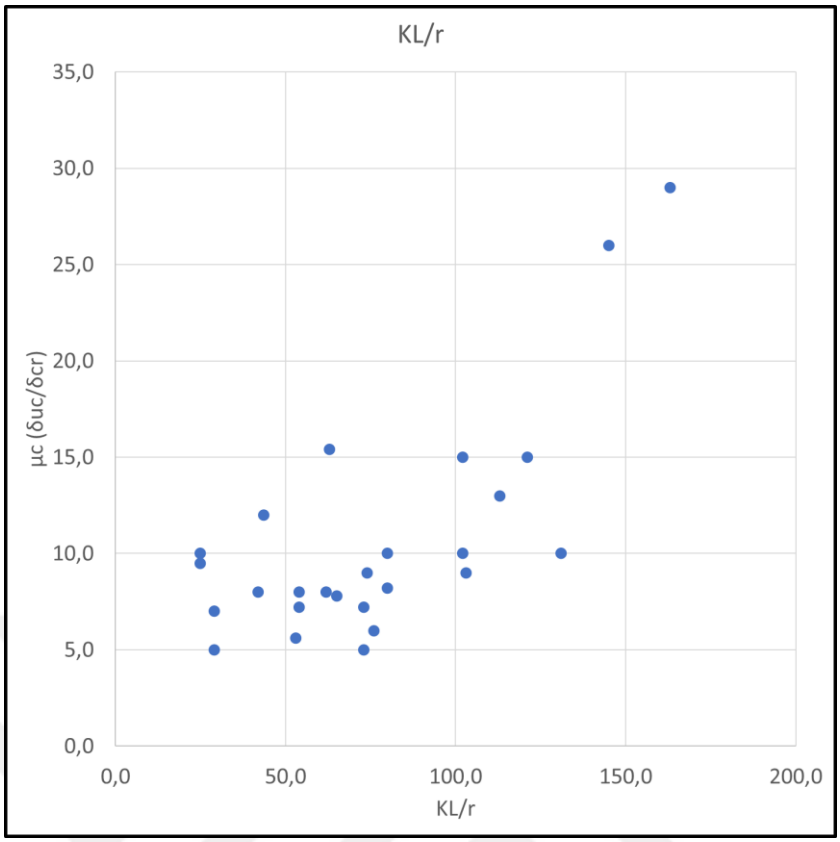
5.2. Süneklik Değerlerinin Tahmin Edilmesi

Süneklik değerleri, elemanın genişlik-kalınlık oranı (D/t), narinlik oranı (KL/r), ve Elastisite Modülü-Akma Dayanımı oranı (E/F_y) ile ilişki kurularak tahmin edilmiştir. Bu ilişki "Sosyal Bilimler için İstatistik Paket Programı (SPSS)" programı **[30]** ile incelenmiştir. En doğru sonuçlar elde edilmesi adına λ_{hd} =26 kabul edilerek $D/t \leq \lambda_{hd}$ ve $D/t > \lambda_{hd}$ olarak gruplandırılmıştır.

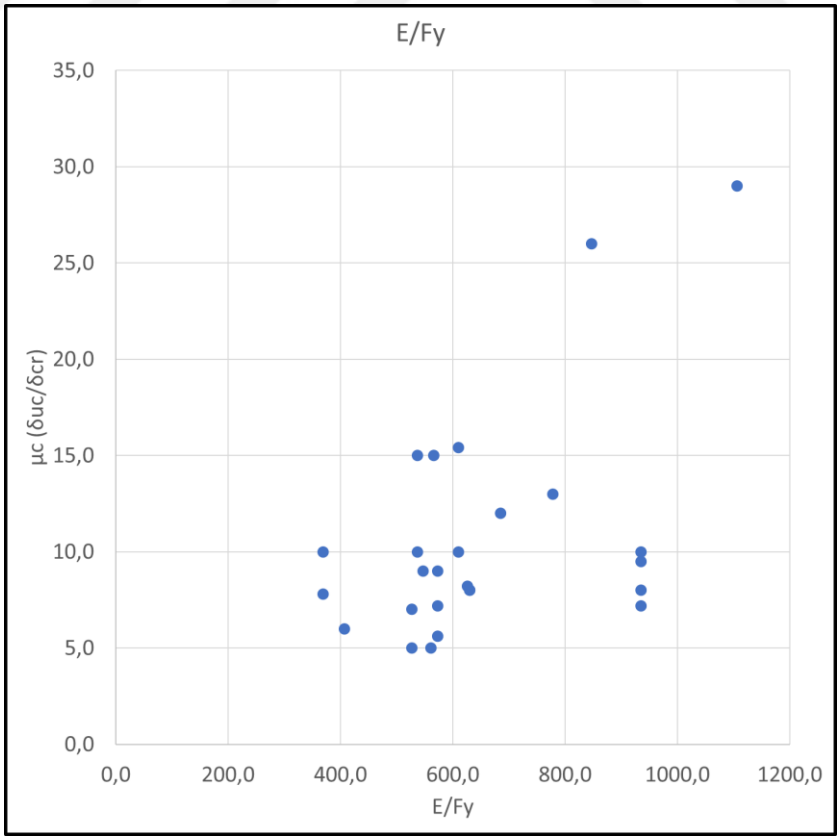
5.2.1. Basınç Yükleri Etkisi Altındaki Süneklik Değerinin Tahmin Edilmesi



Şekil 5.9: D/t ile μ_c arasındaki ilişki.



Şekil 5.10: KL/r ile μ_c arasındaki ilişki.



Şekil 5.11: E/Fy ile μ_c arasındaki ilişki.

Grafiklerden görüldüğü üzere basınç etkisi altındaki süneklik (μ_c) ile D/t oranı arasında ters, KL/r oranı arasında doğru, E/Fy oranı arasında ise zayıf bir ilişki vardır.

5.2.1.1. D/t ≤ λhd Durumu için Süneklik Tahmini

Tablo 5.11: D/t ≤ λ_{hd} durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.

D/t	KL/r	E/Fy	μc,deney	μc,tahmin
15,1	145	833,58	**26**	**21,52**
15,5	80	626,3	**8,2**	**11,43**
16,1	65	369	**7,8**	**7,17**
16,1	131	369	**10**	**10,87**
16,2	102	537,00	**15,00**	**10,49**
16,2	102	537,00	**10,00**	**10,49**
16,3	163	1106,38	**29**	**28,88**
16,9	80	610,5	**10,0**	**10,89**
20,8	113	781,49	**13**	**13,93**
21,2	74	547,20	**9,00**	**9,12**
21,6	63	610,50	**15,40**	**10,71**
25,9	43,6	685,7	**12**	**13,22**

Tablo 5.11 de yer alan değerler SPSS programına işlenmiştir. Ardından denklem kombinasyonları deneyerek anlamlılık değerinin 0,05 ve küçük olduğu denklem elde edilmiştir.

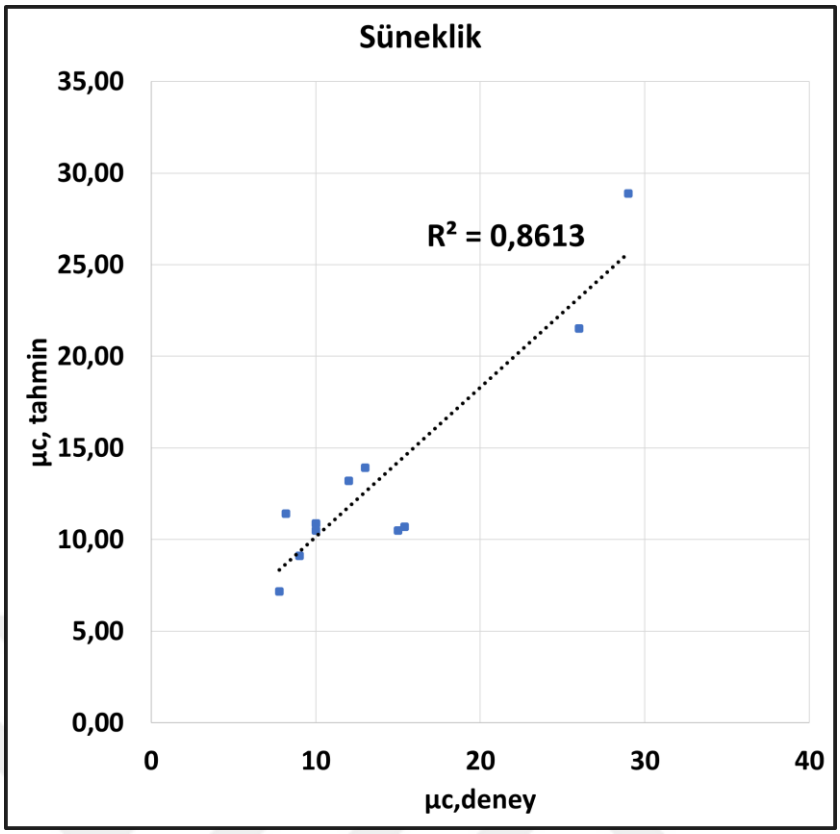
$$\mu_{c,1} = a + \left(b * \frac{D}{t}\right) + \left(c * \left(\frac{KL}{r}\right)^2\right) + \left(d * \frac{KL}{r}\right) + \left(e * \ln\frac{E}{Fy}\right) \tag{5.3}$$

Bu denklem, 15 ≤ D/t ≤ 26, 43 ≤ KL/r ≤ 163 ve 369 ≤ E/Fy ≤ 1107 değerleri arasında geçerlidir ve a,b, c, d ve e değerleri **Tablo 5.12**'deki gibidir.

Tablo 5.12: Denklem (5.3) de yer alan sabit değerler.

a	b	c	d	e
-29,685	-0,218	0,002	-0,336	9,095

Sabit değerler denklemde yerine konduğunda tahmin edilen süneklik değerleri **Tablo 5.11**'de verilmiştir.



Şekil 5.12: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.

Denklem sonucunda R^2 değerinin 86,13% olması, anlamlılık değerinin 0,05'ten küçük olması, SPSS değerlerinden olan Cook's Distance değerinin 1'den küçük olması, ve Durbin-Watson katsayısının 0 ile 4 arasında olması nedeniyle denklem kabul edilebilir düzeyde sonuçlar vermektedir.

Aynı zamanda Ki-Kare testi uygulandığında da denklemin kabul edilebilir olduğu **Tablo 5.13**'de görülmektedir. 12 adet test sonucu olduğundan dolayı serbestlik derecesi 12-1=11'dir. Ki-Kare tablosuna bakıldığında 11 serbestlik dereceli ve 0,05 anlamlılık seviyesinde ki X^2 değeri 19,6750 dir. Tahmin sonuçlarından elde edilen X^2 değeri ise 5,2428 olduğundan dolayı denklem kabul edilebilir seviyededir.

Tablo 5.13: Ki-Kare testi sonuçları.

D/t	KL/r	E/Fy	µc,d	µc,t	X²			KONTROL
15,1	145	833,58	**26**	**21,52**	**0,7706**	**SERBESTLİK DERECESİ**	**X²kritik**	**5,2728 < 19,6750 ✓**
15,5	80	626,3	**8,2**	**11,43**	**1,2694**			
16,1	65	369	**7,8**	**7,17**	**0,0503**			
16,1	131	369	**10**	**10,87**	**0,0757**			
16,2	102	537,00	**15,00**	**10,49**	**1,3557**			
16,2	102	537,00	**10,00**	**10,49**	**0,0241**			
16,3	163	1106,38	**29**	**28,88**	**0,0005**			
16,9	80	610,5	**10,0**	**10,89**	**0,0790**			
20,8	113	781,49	**13**	**13,93**	**0,0671**			
21,2	74	547,20	**9,00**	**9,12**	**0,0016**			
21,6	63	610,50	**15,40**	**10,71**	**1,4258**			
25,9	43,6	685,7	**12**	**13,22**	**0,1231**			
Kİ-KARE TESTİ					**5,2428**	**11,00**	**19,6750**	

5.2.1.2. D/t > λhd Durumu için Süneklik Tahmini

Tablo 5.14: D/t > λ_{hd} durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.

D/t	KL/r	E/Fy	µc,deney	µc,tahmin
27,3	121	566,40	**15,00**	**16,33**
27,8	76	404,94	**6**	**6,01**
27,8	53	573,10	**5,60**	**7,21**
27,8	73	573,10	**7,20**	**7,91**
27,8	103	573,10	**9,00**	**11,96**
30	42	630,4	**8**	**7,24**
31	62	630,4	**8**	**6,82**
31,82	73	560,90	**5,00**	**6,66**
33	54	935,5	**7,2**	**7,91**
33	25	935,5	**9,5**	**9,63**
39,91	29	527,3	**7**	**6,49**
39,91	29	527,3	**5**	**6,49**
48	54	935,5	**8,0**	**8,19**
48	25	935,5	**10,0**	**9,90**

Tablo 5.14 de yer alan değerler SPSS programına işlenmiştir. Ardından denklem kombinasyonları deneyerek anlamlılık değerinin 0,05 ve küçük olduğu denklem elde edilmiştir.

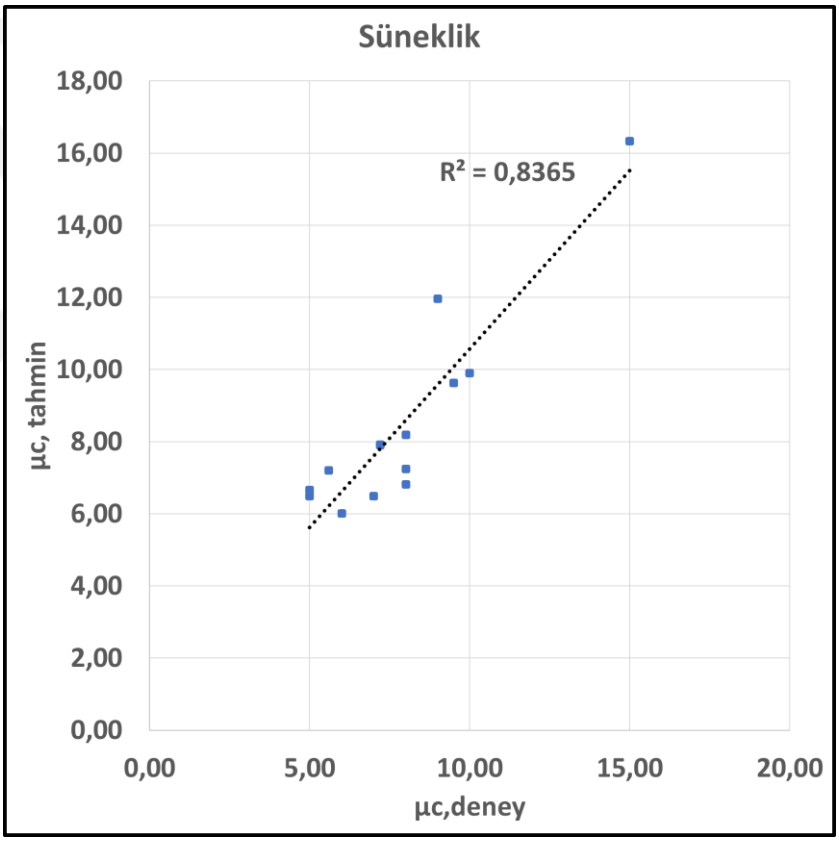
$$\mu_{c,2} = a + \left(\frac{b}{\left(\frac{D}{t}\right)^2}\right) + \left(\frac{c}{\frac{D}{t}}\right)\left(d * \left(\frac{KL}{r}\right)^2\right) + \left(e * \frac{KL}{r}\right) + \left(\frac{f}{\frac{E}{Fy}}\right) \quad (5.4)$$

Bu denklem, $26 < D/t \leq 48$, $25 \leq KL/r \leq 121$ ve $404 \leq E/Fy \leq 936$ değerleri arasında geçerlidir ve a,b, c, d, e ve f değerleri **Tablo 5.15** deki gibidir.

Tablo 5.15: Denklem (5.4) de yer alan sabit değerler.

a	b	c	d	e	f
28,898	17443,493	-921,463	0,002	-0,217	-2986,397

Sabit değerler denklemde yerine konduğunda tahmin edilen süneklik değerleri **Tablo 5.14** de verilmiştir.



Şekil 5.13: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.

Denklem sonucunda R^2 değerinin 83,65% olması, anlamlılık değerinin 0,05'ten küçük olması, SPSS değerlerinden olan Cook's Distance değerinin 1 den küçük olması, ve Durbin-Watson katsayısının 0 ile 4 arasında olması nedeniyle denklem kabul edilebilir düzeyde sonuçlar vermektedir.

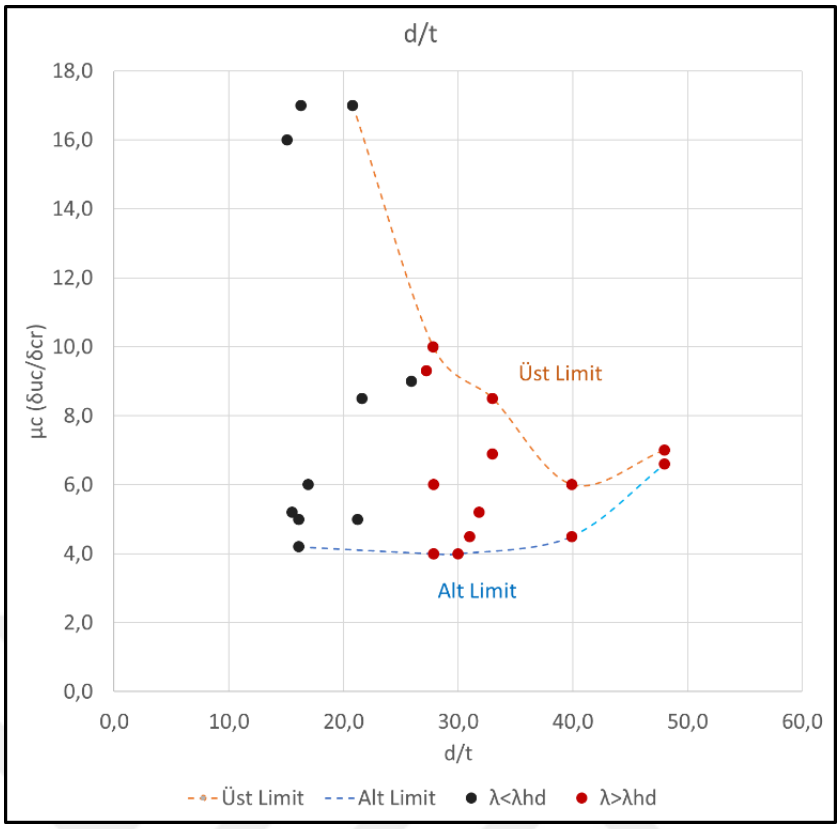
Aynı zamanda Ki-Kare testi uygulandığında da denklemin kabul edilebilir olduğu **Tablo 5.16** da görülmektedir. 14 adet test sonucu olduğundan dolayı serbestlik derecesi 14-1=13'dür. Ki-Kare tablosuna bakıldığında 13 serbestlik dereceli ve 0,05 anlamlılık seviyesinde ki X^2 değeri 22,3620 dir. Tahmin sonuçlarından elde edilen X^2 değeri ise 2,9776 olduğundan dolayı denklem kabul edilebilir seviyededir.

Tablo 5.16: Ki-Kare testi sonuçları.

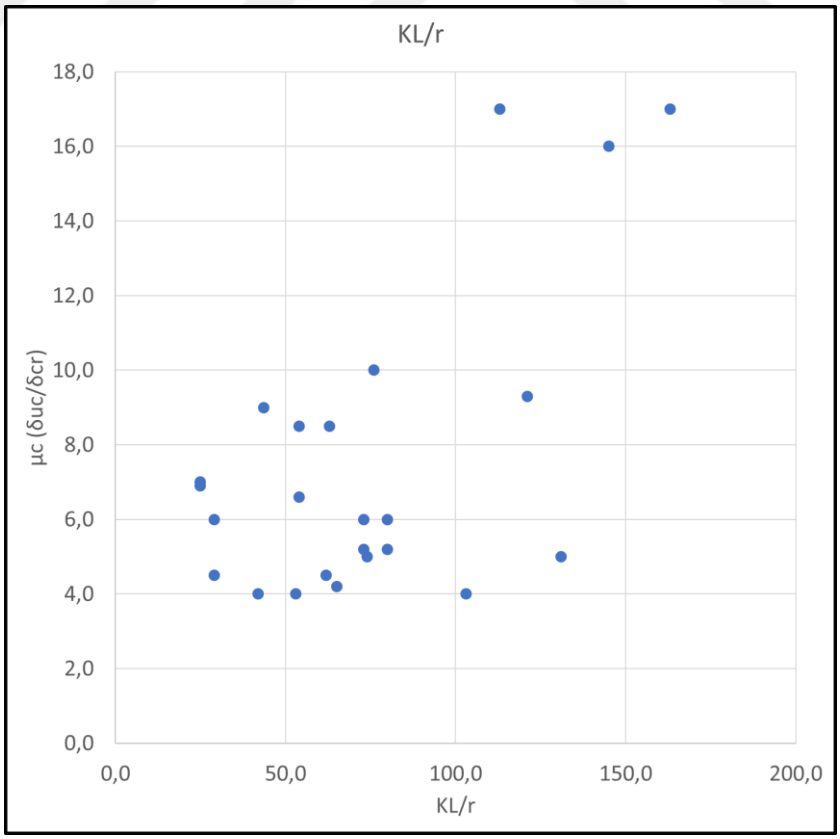
D/t	KL/r	E/Fy	μc,d	μc,t	X^2	SERBESTLİK DERECESİ	X^2kritik	KONTROL
27,3	121	566,40	**15,00**	**16,33**	**0,1173**			**2,9776 < 22,3620 ✓**
27,8	76	404,94	**6**	**6,01**	**0,0000**			
27,8	53	573,10	**5,60**	**7,21**	**0,4627**			
27,8	73	573,10	**7,20**	**7,91**	**0,0700**			
27,8	103	573,10	**9,00**	**11,96**	**0,9733**			
30	42	630,4	**8**	**7,24**	**0,0720**			
31	62	630,4	**8**	**6,82**	**0,1736**			
31,82	73	560,90	**5,00**	**6,66**	**0,5510**			
33	54	935,5	**7,2**	**7,91**	**0,0709**			
33	25	935,5	**9,5**	**9,63**	**0,0017**			
39,91	29	527,3	**7**	**6,49**	**0,0377**			
39,91	29	527,3	**5**	**6,49**	**0,4419**			
48	54	935,5	**8,0**	**8,19**	**0,0047**			
48	25	935,5	**10,0**	**9,90**	**0,0009**			
Kİ-KARE TESTİ					**2,9776**	**13,00**	**22,3620**	

5.2.2. Çekme Yükleri Etkisi Altındaki Süneklik Değerinin Tahmin Edilmesi

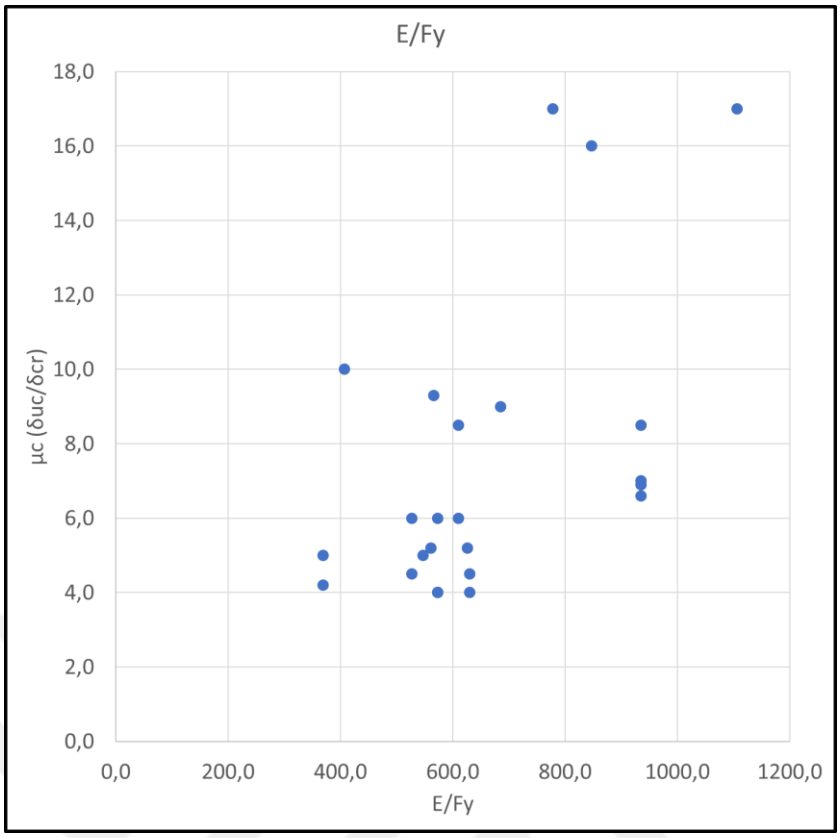
Çekme yükleri etkisi altındaki süneklik tahmin hesaplarında, uç değerler fazla olduğundan dolayı uygun denklem bulunamamış olup bu nedenle yalnızca yükleme protokolü simetrik olan numuneler referans alınmıştır.



Şekil 5.14: D/t le μ_t arasındaki ilişki.



Şekil 5.15: KL/r ile μ_t arasındaki ilişki.



Şekil 5.16: E/Fy ile μ_t arasındaki ilişki.

Grafiklerden görüldüğü üzere μ_C ile olduğu gibi μ ile D/t arasında ters, KL/r arasında doğru, E/Fy arasında ise zayıf bir ilişki vardır.

5.2.2.1. D/t ≤ λ_{hd} Durumu için Süneklik Tahmini

Tablo 5.17: D/t ≤ λ_{hd} durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.

D/t	KL/r	E/Fy	μt,deney	μt,tahmin
15,1	145	833,58	**16**	**13,83**
15,5	80	626,3	**5,2**	**7,06**
16,1	65	369	**4,2**	**0,98**
16,1	131	369	**5**	**6,11**
16,3	163	1106,38	**17,00**	**18,05**
16,9	80	610,50	**6**	**7,65**
20,8	113	781,5	**17,0**	**14,45**
21,2	74	547,20	**5**	**8,21**
21,6	63	610,50	**8,50**	**8,23**
25,9	43,6	685,70	**9,00**	**8,35**

Tablo 5.17 de yer alan değerler SPSS programına işlenmiştir. Ardından denklem kombinasyonları deneyerek anlamlılık değerinin 0,05 ve küçük olduğu denklem elde edilmiştir.

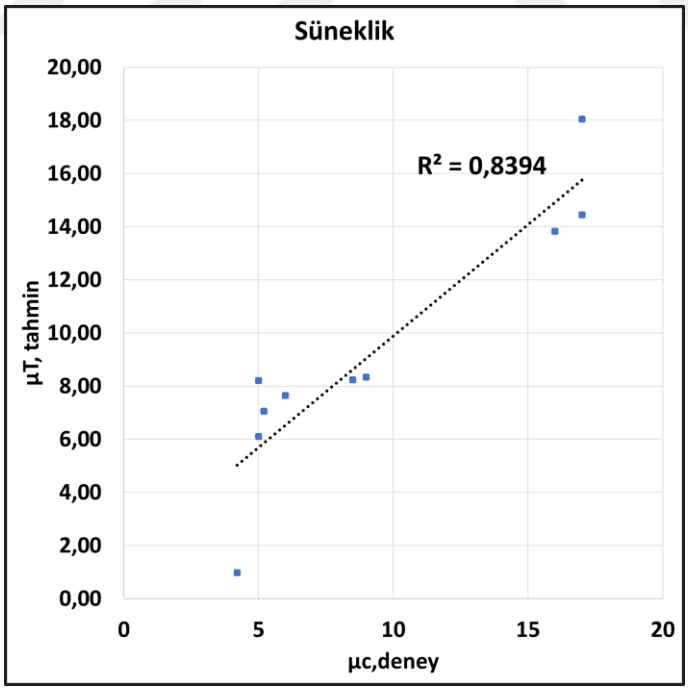
$$\mu_{t,1} = a + \left(b * \ln\frac{D}{t}\right) + \left(c * \ln\frac{KL}{r}\right) + \left(d * \ln\frac{E}{Fy}\right) \tag{5.5}$$

Bu denklem, $15 \leq D/t \leq 26$, $43 \leq KL/r \leq 163$ ve $369 \leq E/Fy \leq 1107$ değerleri arasında geçerlidir simetrik yüklemeler için ve a,b, c ve d değerleri **Tablo 5.18** deki gibidir.

Tablo 5.18: Denklem (5.5) de yer alan sabit değerler.

a	b	c	d
-111,034	9,511	7,321	9,309

Sabit değerler denklemde yerine konduğunda tahmin edilen süneklik değerleri **Tablo 5.17** de verilmiştir.



Şekil 5.17: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.

Denklem sonucunda R^2 değerinin 83,94% olması, anlamlılık değerinin 0,05'ten küçük olması, SPSS değerlerinden olan Cook's Distance değerinin 1 den küçük olması, ve

Durbin-Watson katsayısının 0 ile 4 arasında olması nedeniyle denklem kabul edilebilir düzeyde sonuçlar vermektedir.

Aynı zamanda Ki-Kare testi uygulandığında da denklemin kabul edilebilir olduğu **Tablo 5.19** da görülmektedir. 10 adet test sonucu olduğundan dolayı serbestlik derecesi 10-1=9'dur. Ki-Kare tablosuna bakıldığında 9 serbestlik dereceli ve 0,05 anlamlılık seviyesinde ki X^2 değeri 16,9190 dır. Tahmin sonuçlarından elde edilen X^2 değeri ise 6,6998 olduğundan dolayı denklem kabul edilebilir seviyededir.

Tablo 5.19: Ki-Kare testi sonuçları.

D/t	KL/r	E/Fy	µt,d	µt,t	X^2	SERBESTLİK DERECESİ	X^2Kritik	KONTROL
15,1	145	833,58	**16**	**13,83**	**0,2943**			
15,5	80	626,3	**5,2**	**7,06**	**0,6677**			
16,1	65	369	**4,2**	**0,98**	**2,4692**			
16,1	131	369	**5**	**6,11**	**0,2465**			
16,3	163	1106,38	**17,00**	**18,05**	**0,0648**			**6,6998 < 16,9190 ✓**
16,9	80	610,50	**6**	**7,65**	**0,4526**			
20,8	113	781,5	**17,0**	**14,45**	**0,3826**			
21,2	74	547,20	**5**	**8,21**	**2,0662**			
21,6	63	610,50	**8,50**	**8,23**	**0,0084**			
25,9	43,6	685,70	**9,00**	**8,35**	**0,0475**			
Kİ-KARE TESTİ					**6,6998**	**9,00**	**16,9190**	

5.2.2.2. D/t > λhd Durumu için Süneklik Tahmini

Tablo 5.20: D/t > λ_{hd} durumundaki süneklik ve süneklik tahmin değerleri.

D/t	KL/r	E/Fy	μt,deney	μt,tahmin
27,3	121	566,40	**9,30**	**7,33**
27,8	76	404,94	**10**	**10,30**
27,8	53	573,10	**4,00**	**5,05**
27,8	73	573,10	**6,00**	**5,69**
27,8	103	573,10	**4,00**	**6,65**
30	42	630,4	**4**	**4,05**
31	62	630,4	**4,5**	**4,69**
31,82	73	560,90	**5,20**	**5,89**
33	54	935,5	**8,5**	**8,57**
33	25	935,5	**6,9**	**7,64**
39,91	29	527,3	**6**	**5,13**
39,91	29	527,3	**4,5**	**5,13**
48	54	935,5	**6,6**	**7,68**
48	25	935,5	**7,0**	**6,75**

Tablo 5.20 de yer alan değerler SPSS programına işlenmiştir. Ardından denklem kombinasyonları deneyerek anlamlılık değerinin 0,05 ve küçük olduğu denklem elde edilmiştir.

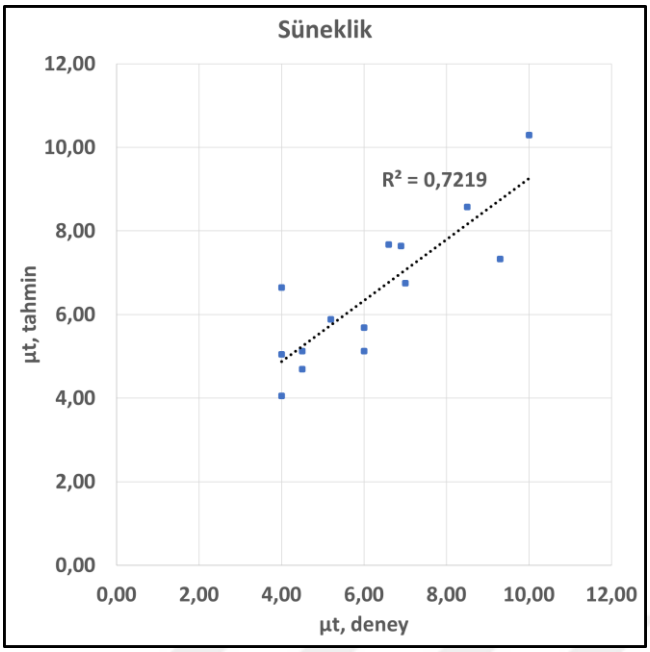
$$\mu_{t,2} = a + \left(b * \text{ÜS}\left(\frac{D}{t}\right)\right) + \left(c * \frac{KL}{r}\right) + \left(d * \left(\frac{E}{Fy}\right)^2\right) + \left(e * \frac{E}{Fy}\right) \qquad (5.6)$$

Bu denklem, 26 < D/t ≤ 48, 25 ≤ KL/r ≤ 121 ve 404 ≤ E/Fy ≤ 936 değerleri arasında ve simetrik yüklemeler için geçerlidir ve a,b, c, d ve e değerleri **Tablo 5.21** deki gibidir.

Tablo 5.21: Denklem (5.6) da yer alan sabit değerler.

a	b	c	d	e
34,666	0,000	0,032	0,000	-0,094

Sabit değerler denklemde yerine konduğunda tahmin edilen süneklik değerleri **Tablo 5.20** de verilmiştir.



Şekil 5.18: Deney ve tahmin süneklik değerlerinin karşılaştırılması.

Denklem sonucunda R^2 değerinin 72,19% olması, anlamlılık değerinin 0,05'ten küçük olması, SPSS değerlerinden olan Cook's Distance değerinin 1 den küçük olması, ve Durbin-Watson katsayısının 0 ile 4 arasında olması nedeniyle denklem kabul edilebilir düzeyde sonuçlar vermektedir.

Aynı zamanda Ki-Kare testi uygulandığında da denklemin kabul edilebilir olduğu **Tablo 5.22** de görülmektedir. 14 adet test sonucu olduğundan dolayı serbestlik derecesi 14-1=13'dür. Ki-Kare tablosuna bakıldığında 13 serbestlik dereceli ve 0,05 anlamlılık seviyesinde ki X^2 değeri 22,3620 dir. Tahmin sonuçlarından elde edilen X^2 değeri ise 3,0539 olduğundan dolayı denklem kabul edilebilir seviyededir.

Tablo 5.22: Ki-Kare testi sonuçları.

D/t	KL/r	E/Fy	µt,d	µt,t	X²			KONTROL
27,3	121	566,40	**9,30**	**7,33**	**0,4161**	**SERBESTLİK DERECESİ**	**X²kritik**	**3,0539 < 22,3620 ✓**
27,8	76	404,94	**10**	**10,30**	**0,0088**			
27,8	53	573,10	**4,00**	**5,05**	**0,2764**			
27,8	73	573,10	**6,00**	**5,69**	**0,0159**			
27,8	103	573,10	**4,00**	**6,65**	**1,7575**			
30	42	630,4	**4**	**4,05**	**0,0006**			
31	62	630,4	**4,5**	**4,69**	**0,0080**			
31,82	73	560,90	**5,20**	**5,89**	**0,0910**			
33	54	935,5	**8,5**	**8,57**	**0,0006**			
33	25	935,5	**6,9**	**7,64**	**0,0802**			
39,91	29	527,3	**6**	**5,13**	**0,1272**			
39,91	29	527,3	**4,5**	**5,13**	**0,0872**			
48	54	935,5	**6,6**	**7,68**	**0,1753**			
48	25	935,5	**7,0**	**6,75**	**0,0091**			
Kİ-KARE TESTİ					**3,0539**	**13,00**	**22,3620**	

5.3. Süneklik Tahmin Sonuçlarını Elde Etmek İçin Açık Kaynaklı Yazılım Geliştirilmesi

Bölüm 5 de yer alan tüm çalışmaların daha kısa sürede pratik bir şekilde hesaplanabilmesi için, bir web tarayıcısı üzerinden notebook belgesi formatındaki kodları düzenlemeyi ve çalıştırmayı sağlayan bir sunucu-istemci uygulaması olan Jupyter Notebook **[31]** ile Python **[32]** yazılım dili kullanılarak bir kod geliştirilmiştir. Bu kodun çalışma prensibi aşağıda açıklandığı gibidir:

- Çap ve Kalınlık değerlerini mm cinsinden kullanıcıdan istenmesi
- KL/r oranının kullanıcıdan istenmesi
- Elastisite Modülü ve Akma gerilmesi değerlerinin kullanıcıdan istenmesi
- E/Fy oranının hesaplanması
- Girilen bilgiler doğrultusunda brüt enkesit alanının hesaplanması
- Burkulma Yükünün Euler formülü ile hesaplanması
- AISC341-22 standardında $F_y / F_e \leq 2{,}25$ koşuluna göre Kritik Burkulma Gerilmesinin hesaplanması
- Malzeme cinsine göre Ry (gerilme-yapısal dayanım katsayısı) seçilmesi
- Ardından çekme ve basınç etkisi altındaki maksimum yüklerin hesaplanması

- Sonrasında Artırılmış deprem yükleri için yaklaşık basınç dayanımının hesaplanması
- Sonrasında Bölüm 5.2 de yer alan sınırlamalar ve kabuller doğrultusunda basınç ve çekme yükleri etkisi altındaki süneklik değerlerinin hesaplanması

Bu bağlamda yazılan Python kodu:

```
import math

def hesapla_ag(d_o, t):
    d_i = d_o - 2 * t
    A_g = math.pi * (d_o**2 - d_i**2) / 4
    return A_g

def hesapla_fcr(E, KLr_orani, F_y):
    Fe = (math.pi ** 2 * E) / (KLr_orani ** 2)
    if F_y / Fe <= 2.25:
        F_cr = 0.658 ** (F_y / Fe) * F_y
    else:
        F_cr = 0.877 * Fe

    return F_cr

def hesapla_ry():
    print("Malzeme türünü seçin:")
    print("1: ASTM A500 Gr. B")
    print("2: ASTM A500 Gr. C")
    print("3: ASTM A501")
    print("4: ASTM A53")
    print("5: ASTM A1085")
    secim = int(input("Seçiminizi girin (1-5): "))

    if secim == 1:
        Ry = 1.4
    elif secim == 2:
        Ry = 1.3
    elif secim == 3:
        Ry = 1.3
    elif secim == 4:
        Ry = 1.6
    elif secim == 5:
        Ry = 1.25
    else:
        Ry = float(input("Geçersiz seçim. Ry değerini manuel olarak girin: "))

    return Ry

def main():
    d_o = float(input("d_o (dış çap, mm) değerini girin: "))
    t = float(input("t (mm) değerini girin: "))
    KLr_orani = float(input("KL/r oranını girin: "))
    E = float(input("E (MPa) değerini girin: "))
    F_y = float(input("Fy (MPa) değerini girin: "))

    A_g = hesapla_ag(d_o, t)
    F_cr = hesapla_fcr(E, KLr_orani, F_y)
    R_y = hesapla_ry()
    if R_y is None:
        print("Hesaplama yapılamadı.")
        return
```

Şekil 5.19.a: Süneklik tahmini için yazılan Python kodu.

```
    P_max_cekme = (R_y * F_y * A_g) / 1000
    P_max_basinc_1 = (1.1 * R_y * F_y * A_g) / 1000
    P_max_basinc_2 = (1.1 * (1.14 * F_cr * A_g)) / 1000
    P_max_basinc = min(P_max_basinc_1, P_max_basinc_2)
    P_residual = 0.3 * P_max_basinc

    dt_orani = d_o / t
    EFy_orani = E / F_y

    a1, b1, c1, d1, e1 = -29.685, -0.218, 0.002, -0.336, 9.095
    a2, b2, c2, d2 = -15.140, 0.465, 0.069, 0.014

    a3, b3, c3, d3, e3, f3 = 28.898, 17443.493, -921.463, 0.002, -0.217, -2986.397
    a4, b4, c4, d4, e4 = 34.666, 0.000, 0.032, 0.000, -0.094

    if 15 <= dt_orani <= 26 and 43 <= KLr_orani <= 163 and 369 <= EFy_orani <= 1107:
        suneklik_basinc = a1 + (b1 * dt_orani) + (c1 * (KLr_orani ** 2)) + (d1 * KLr_orani) + (e1 * maf
        suneklik_cekme = a2 + (b2 * dt_orani) + (c2 * KLr_orani) + (d2 * EFy_orani)
        formül_basinc = "Formül 1"
        formül_cekme = "Formül 2"
    elif 26 < dt_orani <= 48 and 25 <= KLr_orani <= 121 and 404 <= EFy_orani <= 936:
        suneklik_basinc = a3 + (b3 / (dt_orani ** 2)) + (c3 / dt_orani) + (d3 * (KLr_orani ** 2)) + (e:
        suneklik_cekme = a4 + (b4 * math.exp(dt_orani)) + (c4 * KLr_orani) + (d4 * (EFy_orani ** 2)) +
        formül_basinc = "Formül 3"
        formül_cekme = "Formül 4"
    else:
        print("Verilen değerler belirtilen aralıklar içinde değil.")
        return

    # Sonuçlar
    print(f"\nd/t: {dt_orani:.2f}\n")
    print(f"KL/r: {KLr_orani:.2f}\n")
    print(f"E/Fy: {EFy_orani:.2f}\n")
    print(f"Ry: {R_y:.2f}\n")
    print(f"A_g (brüt enkesit alanı): {A_g:.2f} mm^2\n")
    print(f"Kritik burkulma gerilmesi (F_cr): {F_cr:.2f} MPa\n")
    print(f"Çekme etkisi altındaki maksimum yük (P_max_cekme): {P_max_cekme:.2f} kN\n")
    print(f"Basınç etkisi altındaki maksimum yük (P_max_basinc): {P_max_basinc:.2f} kN\n")
    print(f"Artırılmış deprem yükleri için basınç dayanımı (P_residual): {P_residual:.2f} kN\n")
    print(f"Basınç etkisi altındaki süneklik ({formül_basinc}): {suneklik_basinc:.2f}\n")
    print(f"Çekme etkisi altındaki süneklik ({formül_cekme}): {suneklik_cekme:.2f}\n")

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Şekil 5.19.b: Süneklik tahmini için yazılan Python kodu.

Bu kod kullanılarak Bölüm 3.2 de yer alan Kumar vd. (2018) makalesindeki C6 numunesi için örnek hesaplama yapılmıştır. Sonuçlar excel tablolarındaki değerler ile uyumludur.

```
d_o (dış çap, mm) değerini girin: 88.9
t (mm) değerini girin: 3.2
KL/r oranını girin: 76
E (MPa) değerini girin: 114745.8
Fy (MPa) değerini girin: 282
Malzeme türünü seçin:
1: ASTM A500 Gr. B
2: ASTM A500 Gr. C
3: ASTM A501
4: ASTM A53
5: ASTM A1085
Seçiminizi girin (1-5): 6
Geçersiz seçim. Ry değerini manuel olarak girin: 1.3

d/t: 27.78

KL/r: 76.00

E/Fy: 406.90

Ry: 1.30

A_g (brüt enkesit alanı): 861.55 mm^2

Kritik burkulma gerilmesi (F_cr): 154.46 MPa

Çekme etkisi altındaki maksimum yük (P_max_cekme): 315.84 kN

Basınç etkisi altındaki maksimum yük (P_max_basinc): 166.87 kN

Artırılmış deprem yükleri için basınç dayanımı (P_residual): 50.06 kN

Basınç etkisi altındaki süneklik (Formül 3): 6.05

Çekme etkisi altındaki süneklik (Formül 4): 10.22
```

Şekil 5.20: Süneklik tahmini için yazılan Python kodu ile örnek bir hesap.

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu tez çalışmasında, içi boş dairesel kesitli çelik çapraz elemanların basınç ve çekme yükleri altındaki süneklik davranışlarını incelemek ve bu davranışları belirlemek amacıyla açık kaynaklı bir yazılım geliştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, mühendislik uygulamalarında daha güvenilir ve verimli tasarımlar yapılmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, çapraz elemanların D/t oranı, narinlik oranı (KL/r) ve E/F_y oranı parametrelerinin, süneklik ile ilişkileri incelenmiştir. SPSS programı kullanılarak yapılan istatistiksel Analizler sonucunda, basınç ve çekme yükleri altındaki süneklik değerlerini tahmin eden denklemler geliştirilmiştir. Bu denklemler, yüksek doğruluk seviyeleri ve güvenilirlik koşulları sağladığından, mühendislik tasarımlarında kullanılabilir niteliktedir.

Python programlama dili kullanılarak geliştirilen açık kaynaklı yazılım, çeşitli kesitler için davranış parametrelerini tahmin edebilmeyi sağlamaktadır. Yazılım, mühendislik uygulamalarında pratik ve güvenilir çözümler sunmakta olup, farklı veri setleri ve senaryolar ile doğrulanmıştır. Bu yazılımın, mühendisler ve araştırmacılar için değerli bir araç olarak hizmet verebilmesini hedeflemektedir.

İçi boş dairesel kesitli çelik çapraz elemanların sayısal modellenmesinde kullanılan D/t oranın basınç ve çekme etkisi altındaki süneklik değerleriyle ters, KL/r oranın basınç ve çekme etkisi altındaki süneklik değerleriyle doğru, E/Fy oranın ise basınç ve çekme etkisi altındaki süneklik değerleriyle zayıf ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. En kuvvetli ilişki ise süneklik değeri ile D/t oranı arasında olduğu belirlenmiştir. Yine de daha doğru denklem ve sonuçlar elde etmek için daha fazla deney yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doğrultuda aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir:

1. Çelik çaprazların süneklik kapasitelerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, yapısal güvenlik ve performans açısından kritik öneme sahiptir. Çapraz elemanların D/t oranı, narinlik oranı ve E/Fy oranı gibi parametreler, bu elemanların süneklik davranışlarını belirlemede kritik rol oynamaktadır.
2. Bu tez kapsamında geliştirilen istatistiksel modeller ve tahmin denklemleri, çapraz elemanların süneklik davranışlarını yüksek doğrulukla öngörebilmektedir.

3. Python ile geliştirilen açık kaynaklı yazılım, mühendislik uygulamalarında pratik ve güvenilir çözümler sunarak tasarım süreçlerini kolaylaştırmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Elchalakani M, Zhao XL, Grzebieta R., (2003). “Tests of cold-formed circular tubular braces under cyclic axial loading”, J Struct Eng, 129(4):507–14.

[2] Tremblay R, Haddad M, Martinez G, Richard J, Moffatt K., (2008), “Inelastic Cyclic Testing of Large Size Steel Bracing Members”, The 14thWorld Conference on Earthquake Engineering, (Beijing, China).

[3] Fell B, Kanvinde A, Deierlein Gregory, Myers Andrew., (2009), “Experimental Investigation of Inelastic Cyclic Buckling and Fracture of Steel Braces”, J Struct Eng,135. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:1(19).

[4] Lee, S., Goel, S. C. (1987), “Seismic Behavior of Hollow and Concrete-Filled Square Tubular Bracing Members”. Rep. No. UMCEE 87-11, Dept. of Civ. Eng., University of Michigan, Ann Arbor, MI.

[5] Liu, Z., Goel, S. C. (1988), “Cyclic Load Behavior of Concrete-Filled Tubular Braces”, ASCE J. Struct. Eng., 114:7, 1488-1506.

[6] Walpole, W. R. (1996), “Behaviour of cold-formed steel RHS members under cyclic loading”, Research Rep. No. 96-4, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

[7] Shaback, B., Brown, T. (2003), “Behaviour of Square Hollow Structural Steel Braces with End Connections under Reversed Cyclic Axial Loading”, Can. J. of Civil Eng., 30:4, 745-753.

[8] Tremblay, R. Archambault, M.H., Filiatrault, A. (2003), “Seismic Performance of Concentrically Braced Steel Frames made with Rectangular Hollow Bracing Members”, ASCE J. of Struct. Eng.,129:12, 1626-1636.

[9] Goggins, J.M., B.M. Broderick, B.M., Elghazouli, A.Y., and Lucas, A.S. (2005), “Experimental cyclicresponse of cold-formed hollow steel bracing members”, Eng. Struct. , 27:7, 977–989.

[10] Uriz, P. (2005), “Towards Earthquake Resistant Design of Concentrically Braced Steel Structures”, Ph.D. Thesis. Dept. of Civ. Eng., University of California, Berkeley, CA.

[11] Yang, F., and Mahin, S.A. (2005), “Limiting Net Section Fracture in Slotted Tube Braces”, Steel Tips Series, Structural Steel Education Council, Moraga, CA.

[12] Han, S.-W., Kim, W.T., and Foutch, D.A. (2007), “Seismic Behavior of HSS Bracing Members according to Width–Thickness Ratio under Symmetric Cyclic Loading”, ASCE J. of Struct. Eng., 133:2, 264-273.

[13] Black GR, Wenger BA, Popov EP. (1980), “Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversals”, University of California, Berkeley, California, USA. Technical Report, UCB/EERC-80/40.

[14] Zayas VA, Popov EP, Mahin SA., (1980), “Cyclic Inelastic Behavior of Steel Offshore Structures”, A Report to Sponsor American Petroleum Institute (No. 14). University of California, Earthquake Engineering Research Center.

[15] Takeuchi T, Matsui R., (2011), “Cumulative cyclic deformation capacity of circular tubular braces under local buckling”, J Struct Eng, 137(11):1311–8.

[16] Sheehan T, Chan TM., (2014), “Cyclic response of hollow and concrete-filled circular hollow section braces”, Proc ICE – Struct Build, 167(3):140–52.

[17] Kumar P.C.A., Sahoo D.R.,(2018), “Fracture ductility of hollow circular and square steel braces under cyclic loading”, J.tws, 0263-8231. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.005

[18] Seker O, Shen J., Faytarouni M., Akbas B, (2021), “Investigation of channel-encased braces incorporating circular HSS”, Eng Struct, 0141-0296.

[19] Özhendekçi, M., (2008), “Yapı Tasarımında Çeliğin Özellikleri ve Çekme Deneyi”, Yapısal Çelik Tasarımı Dergisi, 3(2), 45-56.

[20] Aghayere A.O., Vigil J., (2021), “Çelik Yapı Tasarımı-Uygulamaya Yönelik Bir Yaklaşım”, 2. Basımdan Çeviri, Ankara

[21] Topkaya, C. (2010), “Çelik Yapılar: Tasarım ve Hesap Esasları”, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Yayınları

[22] Türk Yapısal Çelik Derneği (TUCSA). (2008). Çelik Yapılar El Kitabı. TUCSA Yayınları.

[23] Gülkan, P., (2002), “Deprem Mühendisliği ve Yapı Dinamiği”, ODTÜ Yayınları

[24] Demir, M., (2017), “Deprem Etkisi Altında Yapısal Çelik Tasarımı”, İstanbul Üniversitesi Yayınları.

[25] Eurocode 8 (EC8), (2005), Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. UNI ENV 1998-1; March.

[26] TBDY, (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

[27] Darılmaz K., (2019), “Depreme Dayanıklı Binaların Tasarımına Giriş”, Birsen Yayın Dağıtım Ltd. Şti., İstanbul

[28] AISC 341-22. Seismic provisions for structural steel buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction; 2022.

[29] Çakır F., Kaya E. Ş., Akşar B., Shen J., Şeker O., Akbaş B., (2015), “Merkezi Çaprazlı Çerçevelerde Çapraz Elemanlarda Sayısal Modelleme Teknikleri”, 6. Çelik Yapılar Sempozyumı”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Eskişehir, 9-11 Aralık

[30] IBM Corp., (2021), "IBM SPSS Statistics for Windows", Armonk, NY: IBM Corp.

[31] Jupyter Project, (2023), "Jupyter Notebook", Project Jupyter.

[32] Python Software Foundation, (2023), "Python Programlama Dili", Beaverton, OR: Python Software Foundation.

[33] Wakabayashi M, Nakamura T, Yoshida N., (1980), “Experimental Studies on the Elastic-Plastic Behavior of Braced Frames under Repeated Horizontal Loading. Part 2 Experiments of braces composed of steel circular tubes, angle-shapes, flat bars or round bars”, Bull Disaster Prevent Res Inst, 29.

[34] Lai JW, (2012), “Experimental and analytical studies on the seismic behavior of conventional and hybrid braced frames”, Doctoral dissertation, UC Berkeley.

[35] Faytarouni M, Seker O, Akbas B, Shen J., (2019), “Seismic assessment of ductile concentrically braced frames with HSS bracings”, Eng Struct, 191:401–16.

[36] Faytarouni M, Shen J, Seker O, Akbas B., (2019), “Evaluation of brace fracture models in seismic analysis of concentrically braced frames”. J Constr Steel Res, 162: 105709.

[37] AISC 360-22. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction; 2022.

[38] Tang, X., Goel, S. C., (1989), “Brace Fractures and Analysis of Phase I Structure”. ASCE J. Struct. Eng.,115:3, 1960–1976.

[39] Tremblay, R. (2002), “Inelastic Seismic Response of Steel Bracing Members”,. J. of Const. Steel Research,58:5-8, 665-701

[40] https://www.yontemistatistik.com/post/spss-regresyon-Analizi, Erişim Tarihi: 10.06.2024

[41] Güngör M., Bulut Y., (2008), “Kİ-KARE TESTİ ÜZERİNE”, Fırat Üniversitesi, Fen – Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, 23119 , ELAZIĞ

[42] Newbold, P., (2005), “İşletme ve İktisat İçin İstatistik”, (Ü. Şenesen, Çev.). Literatür Yayıncılık, İstanbul

[43] Erilli, N.A., (2018), “İstatistik-2”, Seçkin Yayıncılık, Ankara

[44] Spiegel, M. R., & Stephens, L. J. (1988), “İstatistik”, Çev. Erdal Öney ve Nahit Töre.,AÜ Basımevi, Ankara

[45] McClave, J. T., & Sincich, T., (2006), “Statistics” (No. QA 276.12. M33 2006)

ÖZGEÇMİŞ

Damla BAHAR, 2016 yılında FMV Işık Üniversitesi'nde 1 sene hazırlık okuduktan sonra İngilizce İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı. 75% ÖSYM bursu ile başladığı okulda 7. Yarıyılda bölüm birincisi olarak bursunu 100% başarı bursuna yükseltti. Ardından 2021 Haziran ayında mezun oldu. Sonrasında 2021 Eylül'de Gebze Teknik Üniversitesi'nde Deprem ve Yapı Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

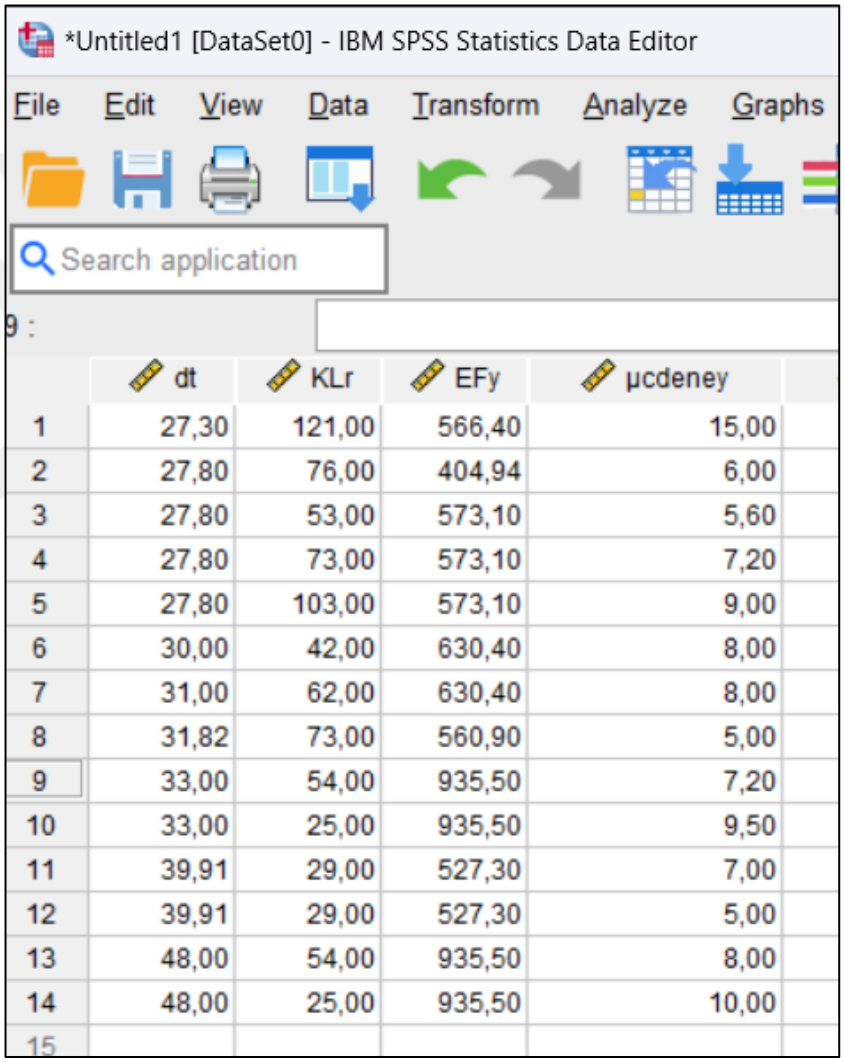
Bahar D., Şeker O., Akbaş B., (2024) "Çapraz Elemanların Sayısal Modellenmesinde Çevrimsel Davranış Parametrelerinin İncelenmesi", 8. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 31 Mayıs.

EKLER

Ek-A: SPSS Analiz Sonuçları

- Denklem (5.4) için;

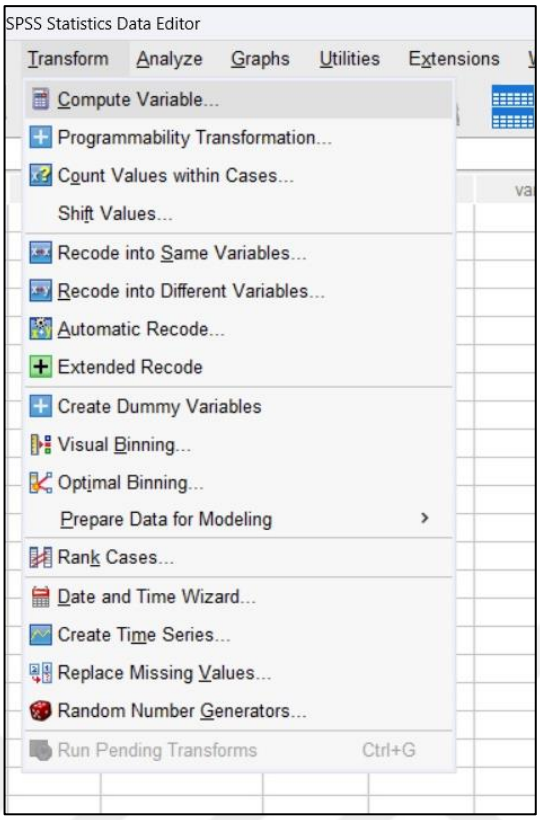
Bu denklem, $26 < D/t \leq 48$, $25 \leq KL/r \leq 121$ ve $404 \leq E/Fy \leq 936$ değerleri arasında geçerlidir. Bu aralıktaki deney sonuçları, programa girilmiştir.



	dt	KLr	EFy	µcdeney
1	27,30	121,00	566,40	15,00
2	27,80	76,00	404,94	6,00
3	27,80	53,00	573,10	5,60
4	27,80	73,00	573,10	7,20
5	27,80	103,00	573,10	9,00
6	30,00	42,00	630,40	8,00
7	31,00	62,00	630,40	8,00
8	31,82	73,00	560,90	5,00
9	33,00	54,00	935,50	7,20
10	33,00	25,00	935,50	9,50
11	39,91	29,00	527,30	7,00
12	39,91	29,00	527,30	5,00
13	48,00	54,00	935,50	8,00
14	48,00	25,00	935,50	10,00
15				

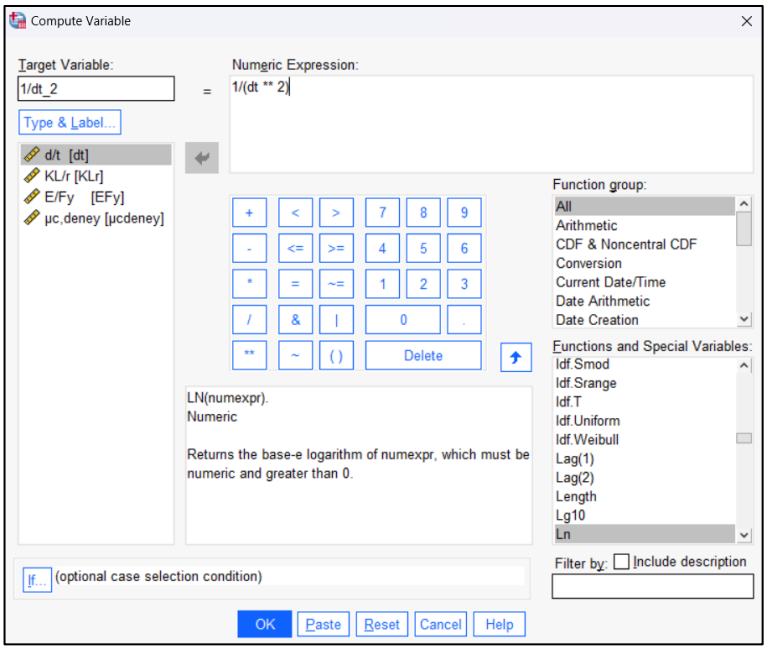
Şekil A.1: SPSS programına veri girişi

Ardından lineer regresyon yöntemi kullanıldığından dolayı, anlamlılık değerinin 0,05 ve daha küçük olduğu ilişki seçilmelidir. Bu bağlamda parametreler ile denklem kombinasyonlar yapılmaktadır. Bu kombinasyonları oluştururken SPSS programında "Compute Variable" sekmesi (**Şekil A.2**) kullanılmaktadır.

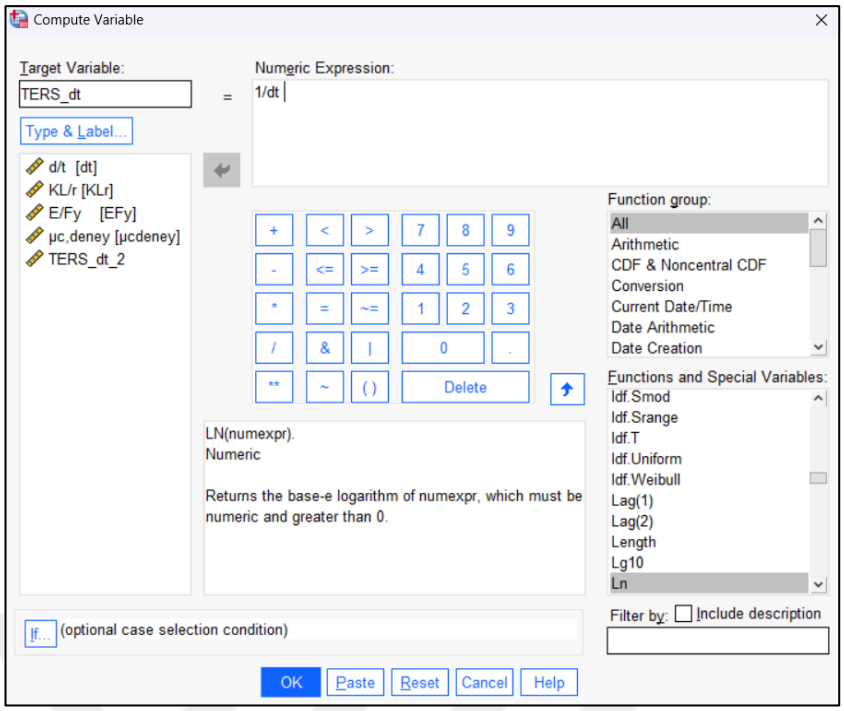


Şekil A.2: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi.

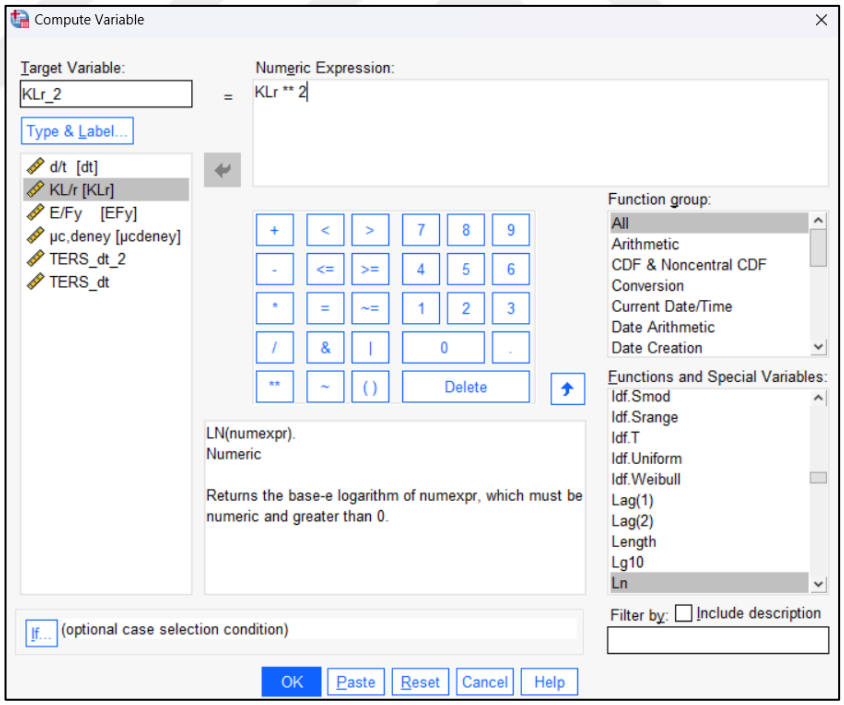
Sonrasında uygun kombinasyonu oluşturmak için yeni değişkenler elde edilir (**Şekil A.3**).



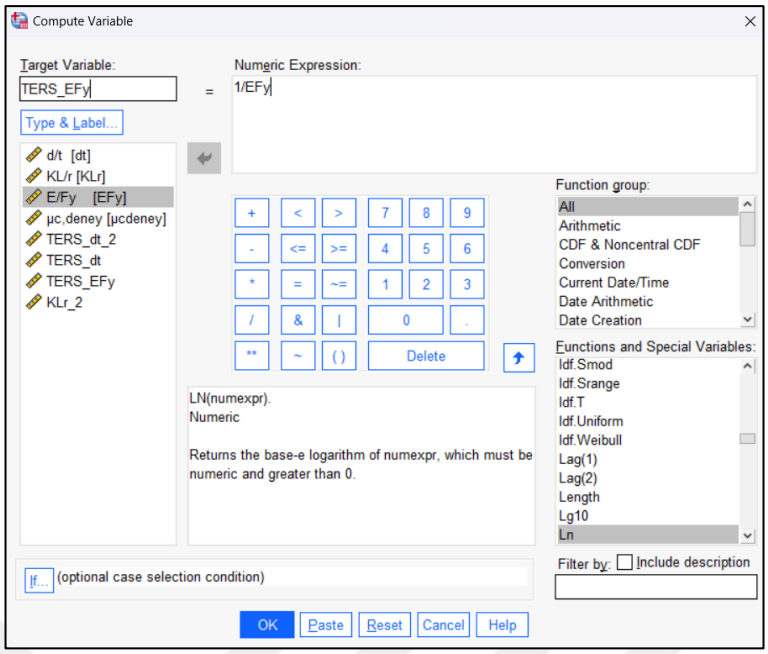
Şekil A.3: 1/(D/t)² değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması.



Şekil A.4: 1/(D/t) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması.

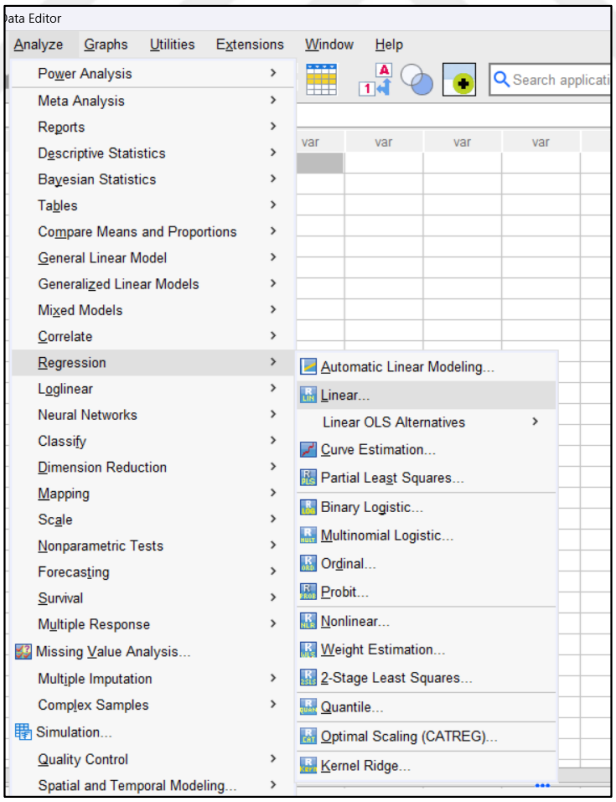


Şekil A.5: $(KL/r)^2$ değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması.



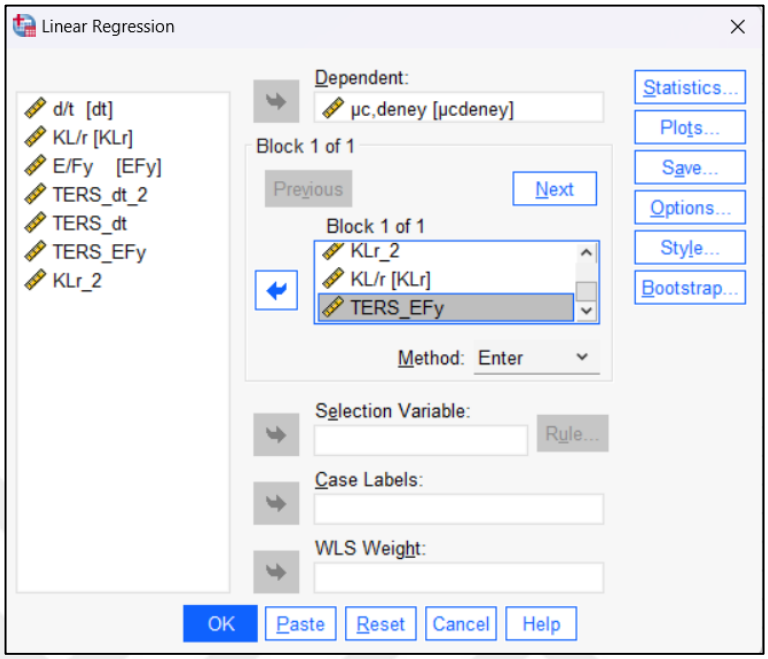
Şekil A.6: 1/(E/F_y) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması.

Sonrasında çoklu lineer regresyon Analizi gerçekleştirilmektedir (**Şekil A.7**).



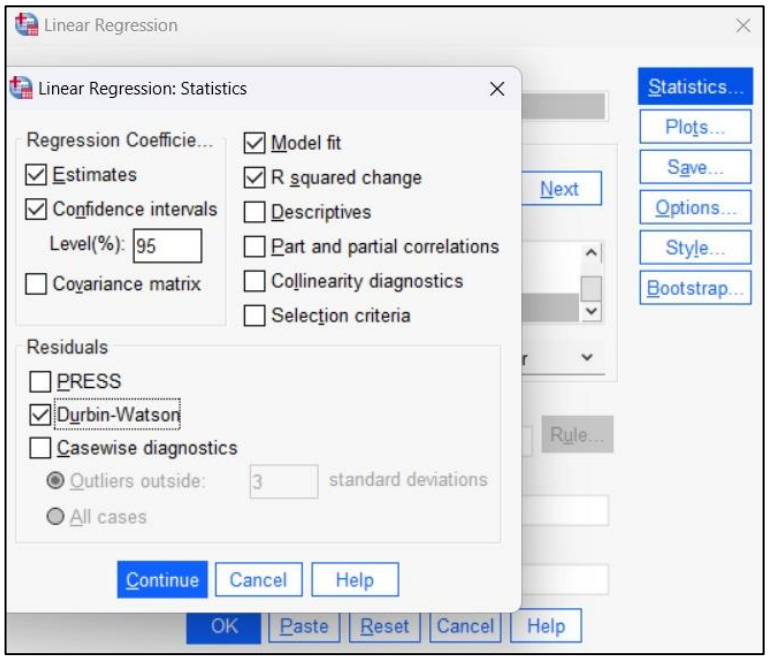
Şekil A.7: Analiz yönteminin seçilmesi.

Analiz yönteminin seçilmesinden sonra, oluşturulacak denklem için bağımlı ve bağımsız değişkenler ilgili kutucuklara taşınmaktadır (**Şekil A.8**).

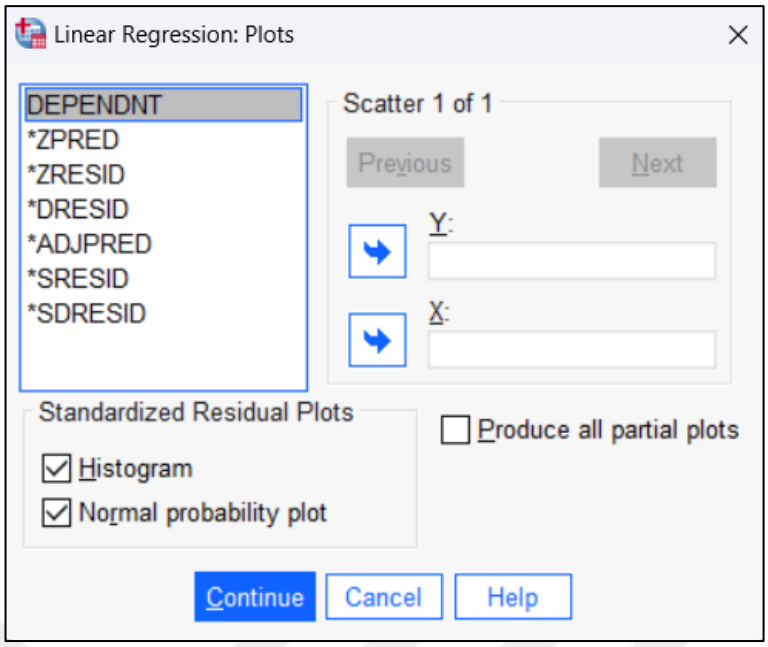


Şekil A.8: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin girilmesi.

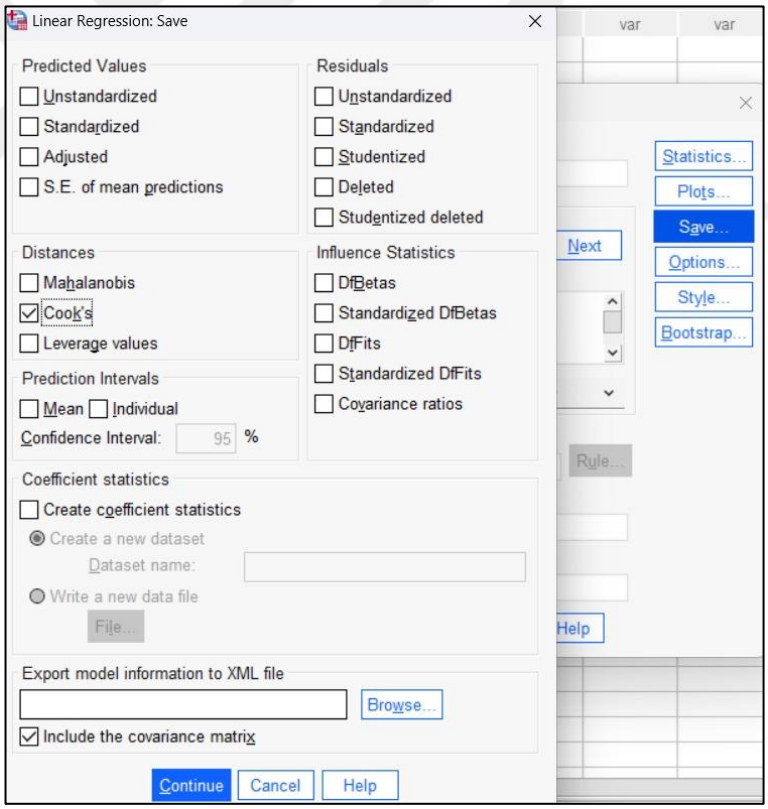
Sonrasında Analizde gerekli kabullerin kontrolü için programdan bazı değerlerin hesaplanması istenmektedir (**Şekil A.9, A.10, A.11**).



Şekil A.9: "Statistics" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil A.10: "Plots" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil A.11: "Save" sekmesinden "Cook's Distance" seçeneğinin seçilmesi.

Regression

Variables Entered/Removed[a]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	TERS_EFy, KLr_2, TERS_dt, KL/r, TERS_dt_2[b]	.	Enter

a. Dependent Variable: µc,deney

b. All requested variables entered.

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,927[a]	,858	,770	1,23463	,858	9,701	5	8	,003	2,368

a. Predictors: (Constant), TERS_EFy, KLr_2, TERS_dt, KL/r, TERS_dt_2

b. Dependent Variable: µc,deney

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	73,935	5	14,787	9,701	,003[b]
	Residual	12,195	8	1,524		
	Total	86,129	13			

a. Dependent Variable: µc,deney

b. Predictors: (Constant), TERS_EFy, KLr_2, TERS_dt, KL/r, TERS_dt_2

Şekil A.12.a: Regresyon Analizi sonuçları.

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	28,898	12,888		2,242	,055	-,823	58,618
	TERS_dt_2	17443,493	16383,153	2,222	1,065	,318	-20336,124	55223,110
	TERS_dt	-921,463	917,173	-2,022	-1,005	,344	-3036,469	1193,542
	KLr_2	,002	,000	2,925	4,761	,001	,001	,003
	KL/r	-,217	,058	-2,442	-3,704	,006	-,351	-,082
	TERS_EFy	-2986,397	979,625	-,475	-3,049	,016	-5245,416	-727,377

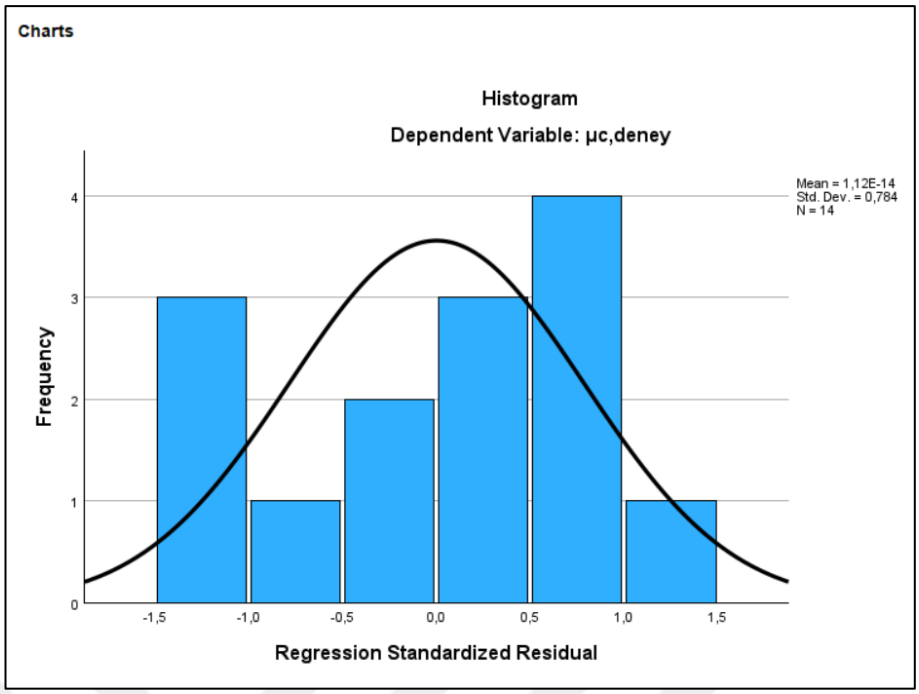
a. Dependent Variable: µc,deney

Residuals Statistics[a]

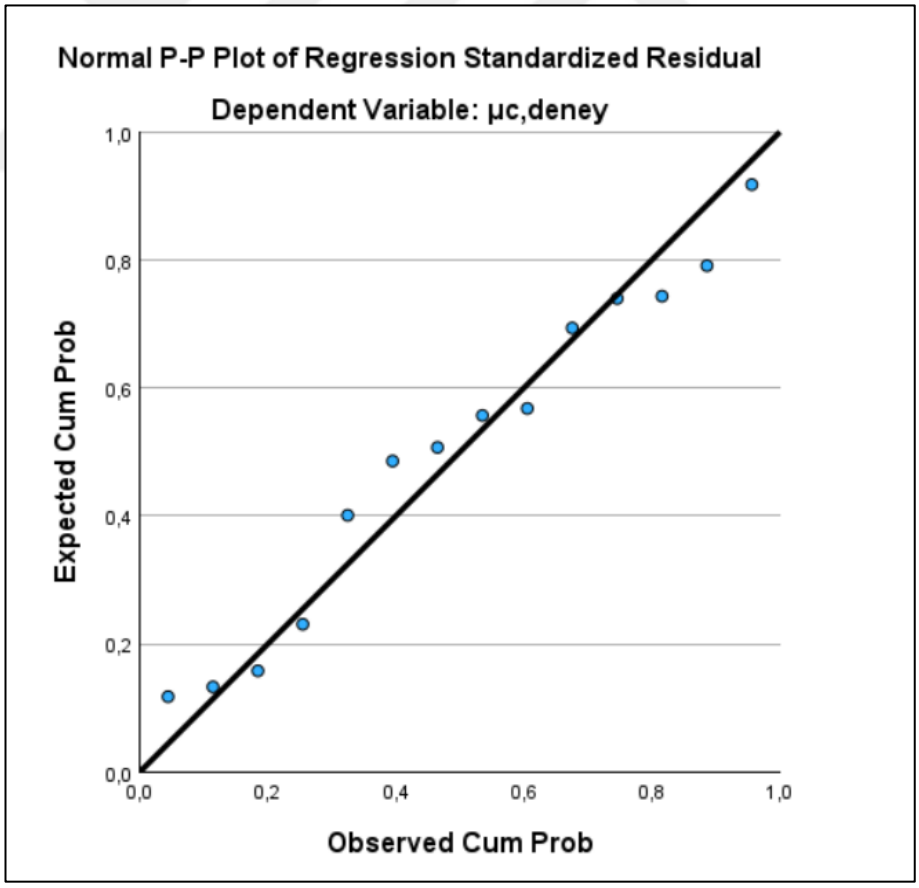
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	5,1935	14,2071	7,8929	2,38480	14
Std. Predicted Value	-1,132	2,648	,000	1,000	14
Standard Error of Predicted Value	,559	1,083	,794	,159	14
Adjusted Predicted Value	4,4214	11,5616	7,7495	2,02458	14
Residual	-1,46721	1,71534	,00000	,96853	14
Std. Residual	-1,188	1,389	,000	,784	14
Stud. Residual	-1,444	1,562	,031	1,007	14
Deleted Residual	-2,31100	3,43842	,14337	1,71796	14
Stud. Deleted Residual	-1,571	1,752	,026	1,067	14
Mahal. Distance	1,739	9,074	4,643	2,182	14
Cook's Distance	,000	,995	,145	,256	14
Centered Leverage Value	,134	,698	,357	,168	14

a. Dependent Variable: µc,deney

Şekil A.12.b: Regresyon Analizi sonuçları.



Şekil A.12.c: Regresyon Analizi sonuçları.

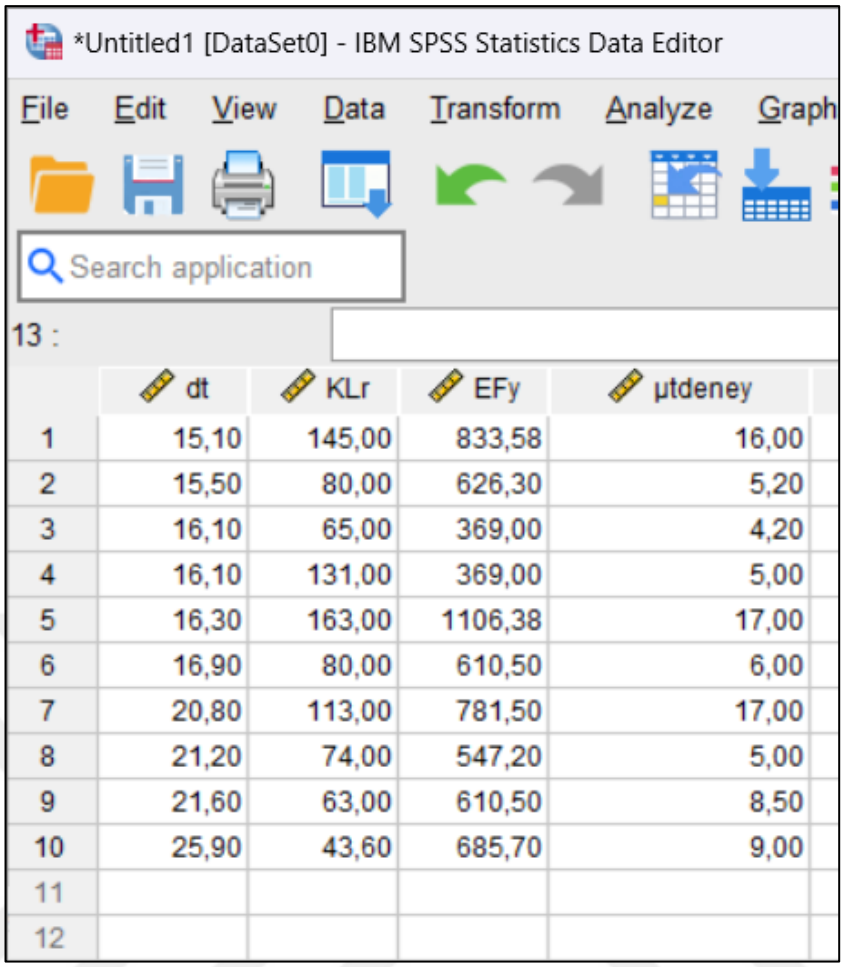


Şekil A.12.d: Regresyon Analizi sonuçları.

Sonuçlar değerlendirildiğinde R^2 değerinin 85,8% olması denklemin doğruluk seviyesinin çok iyi olduğunu ifade etmektedir. **Şekil A.12.a** da yer alan değerlere bakıldığında, bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde anlamlı bir etkisinin olup olmadığı açıklanmaktadır. Bu tabloda da Sig.(anlamlılık değeri) 0,05 den küçüktür, bu da bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında anlamlılık olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte **Şekil A.12.a** da yer alan Durbin Watson değerinin 1 ile 4 arasında olması denklemin güvenilirlik koşulunu da sağlamaktadır. Ayrıca **Şekil A.12.b** de yer alan "Cook's Distance" değerinin 1'den küçük olması da Analizde uç değerlerin olmaması anlamına gelmektedir. Ayrıca burada "Unstandardized B" başlığının altında değişkenlere ait olan katsayılar yer almaktadır. Tahmin denklemler bu katsayılar doğrultusunda belirlenmektedir. (Denklem (5.4)) Ek olarak **Şekil A.12.c** de yer alan histogram grafiğinde çan eğrisinin simetrik şeklinin olması ve **Şekil A.12.d** de yer alan grafikte noktalar düzgün bir şekilde yayılmış olması denklemdeki hataların normal dağıldığı göstermektedir.

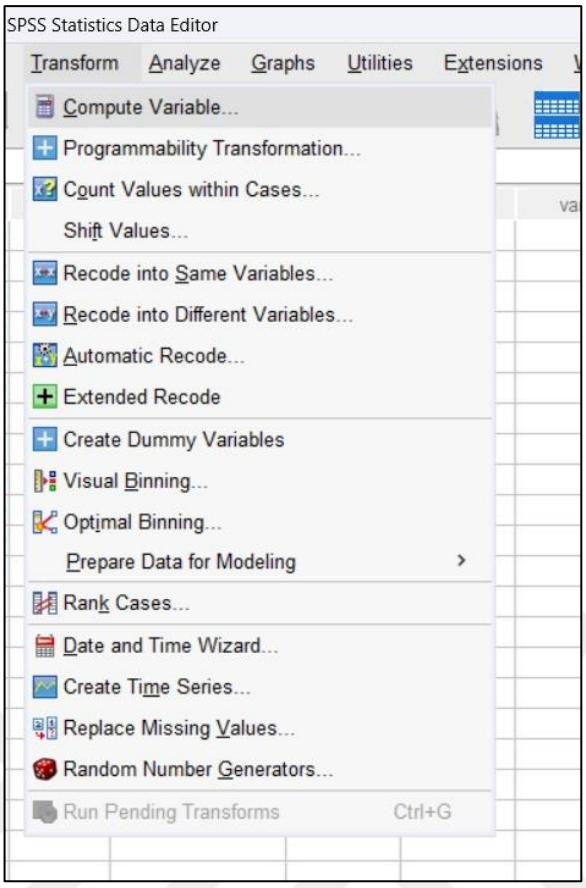
- Denklem (5.5) için;

Bu denklem, $15 \leq D/t \leq 26$, $43 \leq KL/r \leq 163$ ve $369 \leq E/Fy \leq 1107$ değerleri arasında geçerlidir. Denklem (5.4) için uygulanan adımlar burada tekrar edilmiştir.

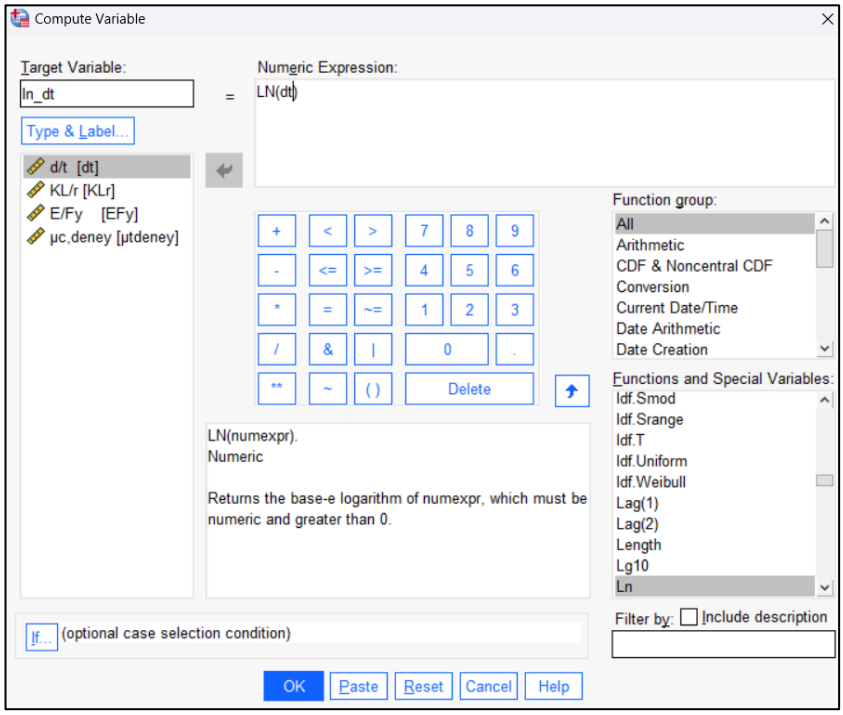


	dt	KLr	EFy	µtdeney
1	15,10	145,00	833,58	16,00
2	15,50	80,00	626,30	5,20
3	16,10	65,00	369,00	4,20
4	16,10	131,00	369,00	5,00
5	16,30	163,00	1106,38	17,00
6	16,90	80,00	610,50	6,00
7	20,80	113,00	781,50	17,00
8	21,20	74,00	547,20	5,00
9	21,60	63,00	610,50	8,50
10	25,90	43,60	685,70	9,00
11				
12				

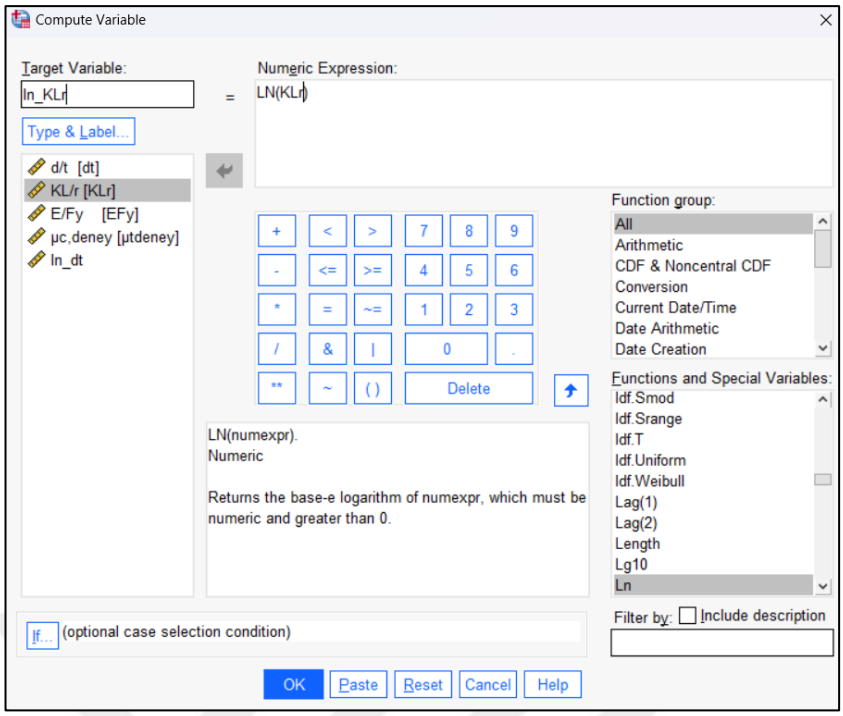
Şekil A.13: SPSS Programına veri girişi.



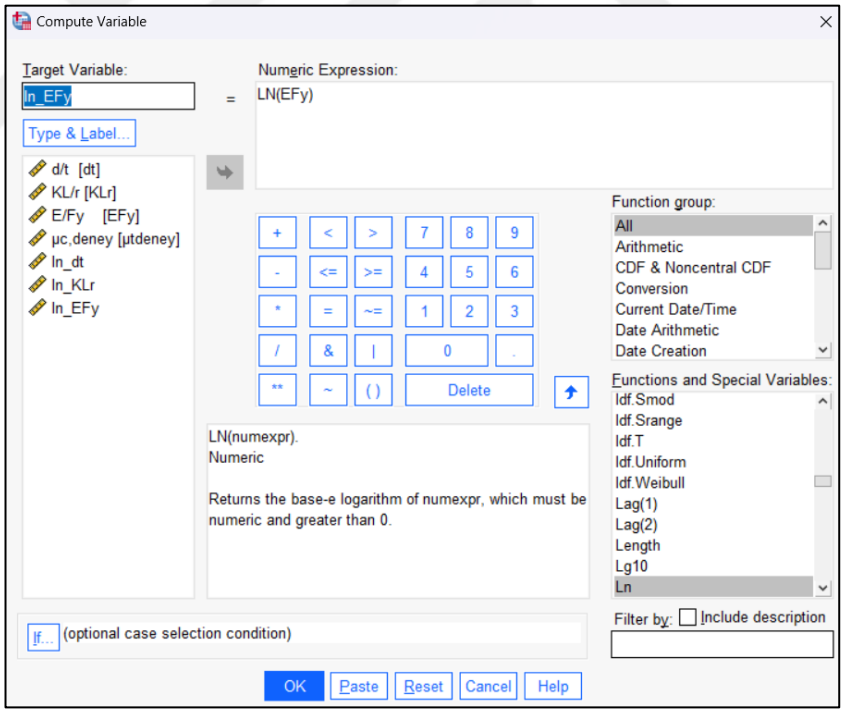
Şekil A.14: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi.



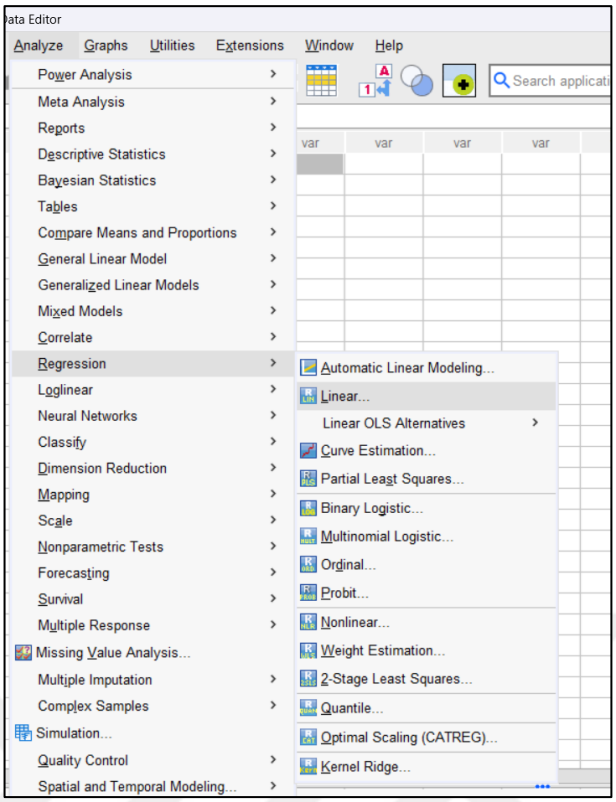
Şekil A.15: ln(D/t) değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması.



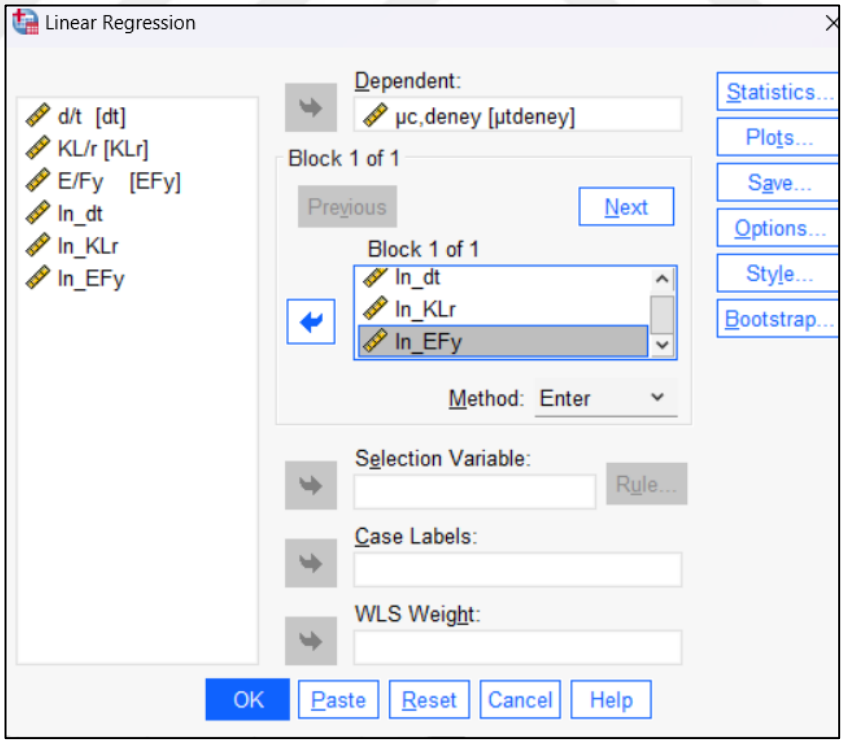
Şekil A.16: ln(KL/r) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması.



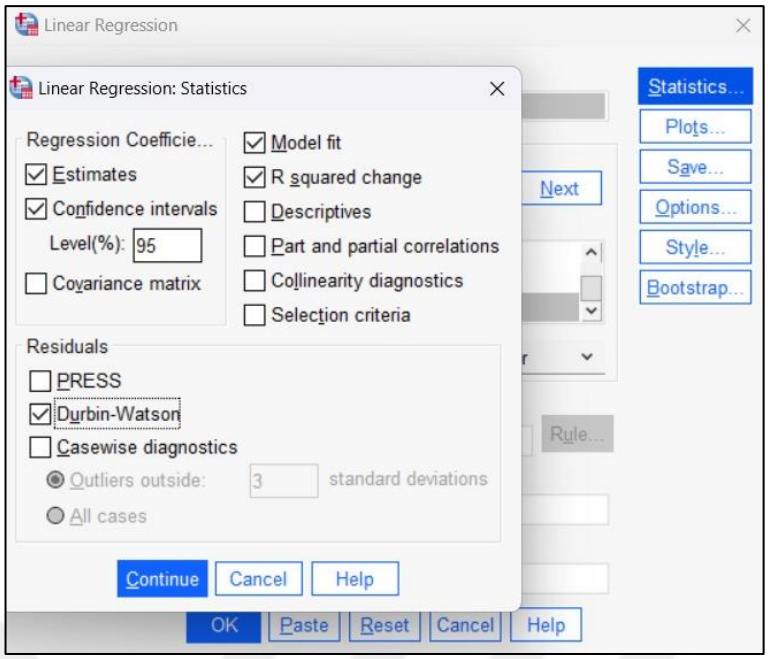
Şekil A.17: ln(E/F_y) değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması.



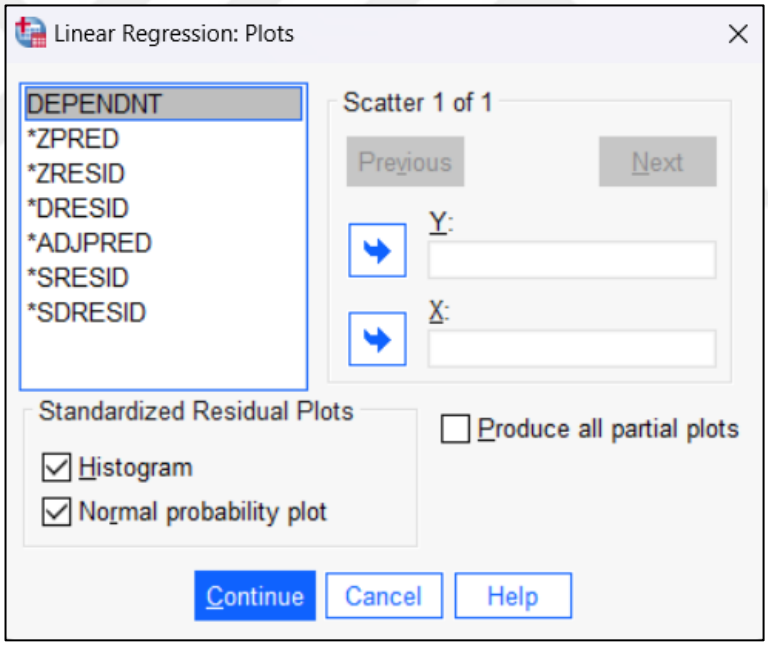
Şekil A.18: Analiz yönteminin seçilmesi.



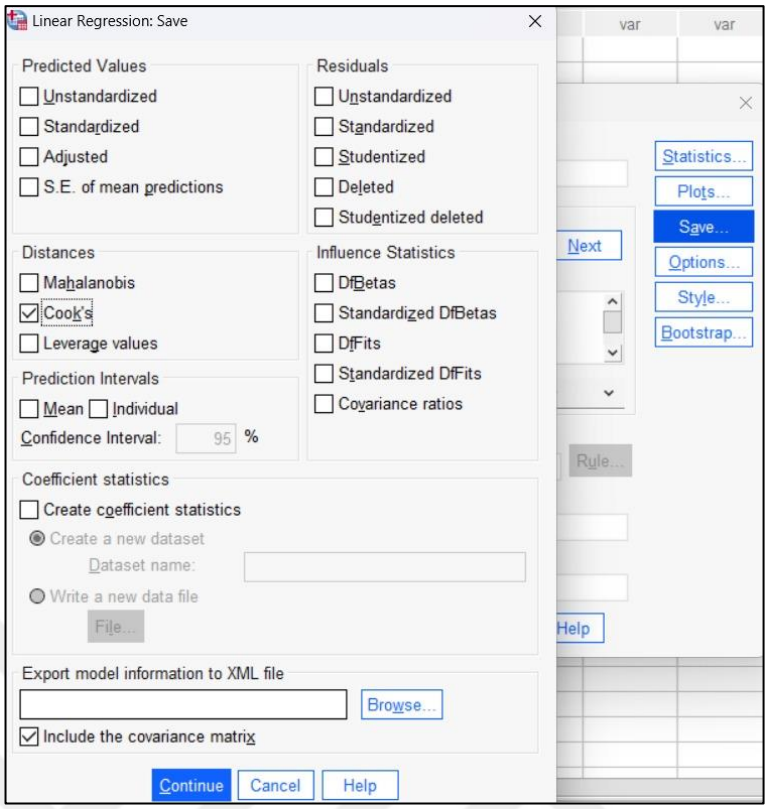
Şekil A.19: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin girilmesi.



Şekil A.20: "Statistics" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil A.21: "Plots" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil A.22: "Save" sekmesinden "Cook's Distance" seçeneğinin seçilmesi.

Regression

Variables Entered/Removed[a]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	ln_EFy, ln_dt, ln_KLr[b]	.	Enter

a. Dependent Variable: µc,deney
b. All requested variables entered.

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,916[a]	,839	,759	2,61197	,839	10,454	3	6	,008	3,038

a. Predictors: (Constant), ln_EFy, ln_dt, ln_KLr
b. Dependent Variable: µc,deney

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	213,955	3	71,318	10,454	,008[b]
	Residual	40,934	6	6,822		
	Total	254,889	9			

a. Dependent Variable: µc,deney
b. Predictors: (Constant), ln_EFy, ln_dt, ln_KLr

Şekil A.23.a: Regresyon Analizi sonuçları.

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B Lower Bound	95,0% Confidence Interval for B Upper Bound
1	(Constant)	-111,034	27,600		-4,023	,007	-178,569	-43,499
	ln_dt	9,511	7,001	,328	1,358	,223	-7,620	26,642
	ln_KLr	7,321	3,264	,579	2,243	,066	-,666	15,308
	ln_EFy	9,309	3,099	,595	3,004	,024	1,726	16,891

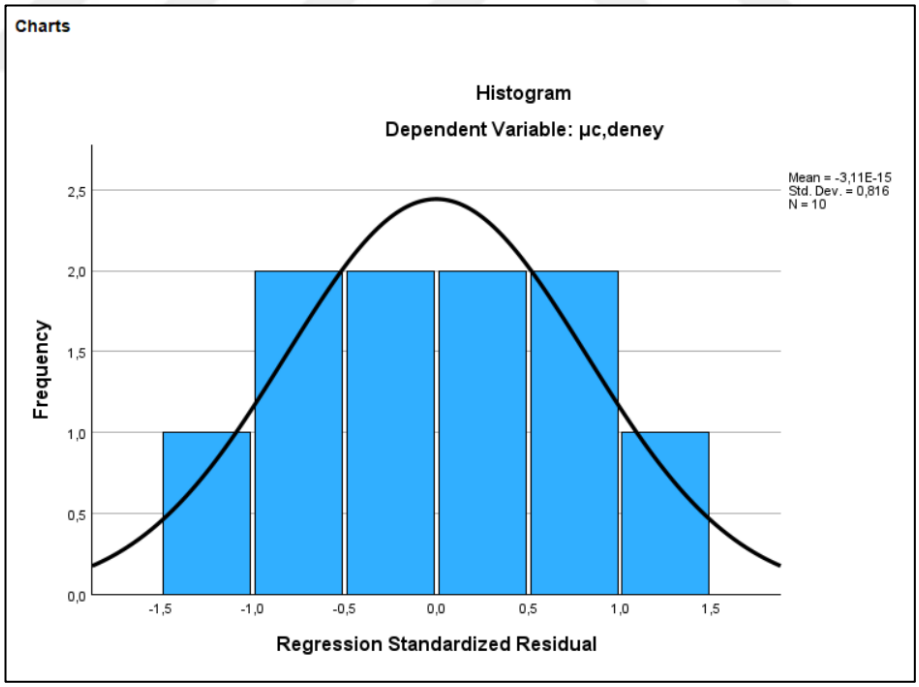
a. Dependent Variable: µc,deney

Residuals Statistics[a]

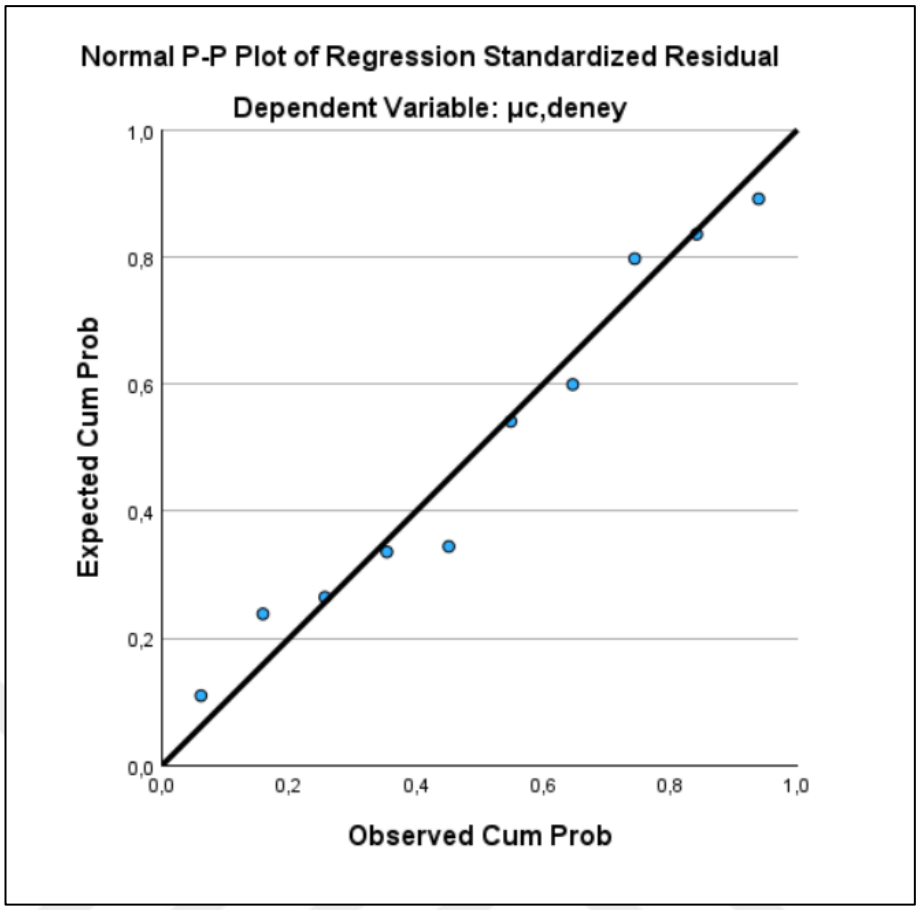
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	,9774	18,0471	9,2900	4,87573	10
Std. Predicted Value	-1,705	1,796	,000	1,000	10
Standard Error of Predicted Value	1,142	2,246	1,615	,368	10
Adjusted Predicted Value	-1,9626	19,1451	9,3253	5,34198	10
Residual	-3,21176	3,22259	,00000	2,13267	10
Std. Residual	-1,230	1,234	,000	,816	10
Stud. Residual	-1,392	1,706	,003	1,048	10
Deleted Residual	-4,25246	6,16256	-,03529	3,65422	10
Stud. Deleted Residual	-1,544	2,171	,048	1,160	10
Mahal. Distance	,819	5,755	2,700	1,605	10
Cook's Distance	,001	,664	,193	,215	10
Centered Leverage Value	,091	,639	,300	,178	10

a. Dependent Variable: µc,deney

Şekil A.23.b: Regresyon Analizi sonuçları.



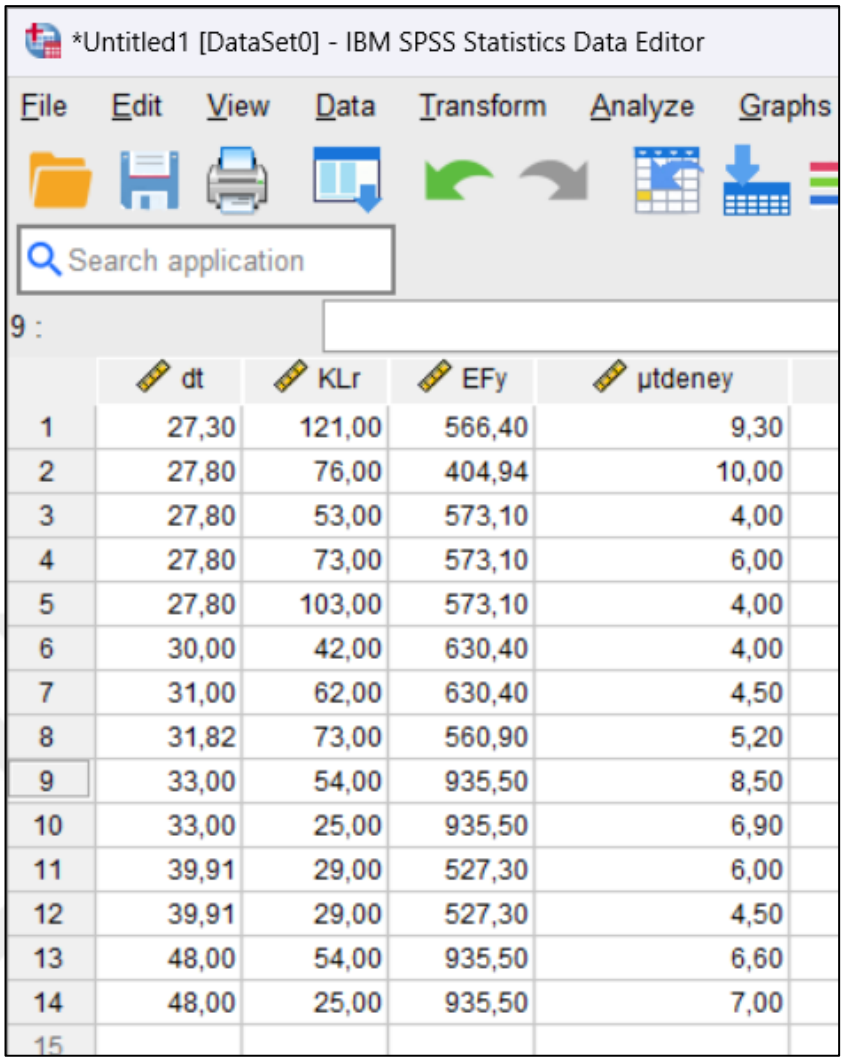
Şekil A.23.c: Regresyon Analizi sonuçları.



Şekil A.23.d: Regresyon Analizi sonuçları.

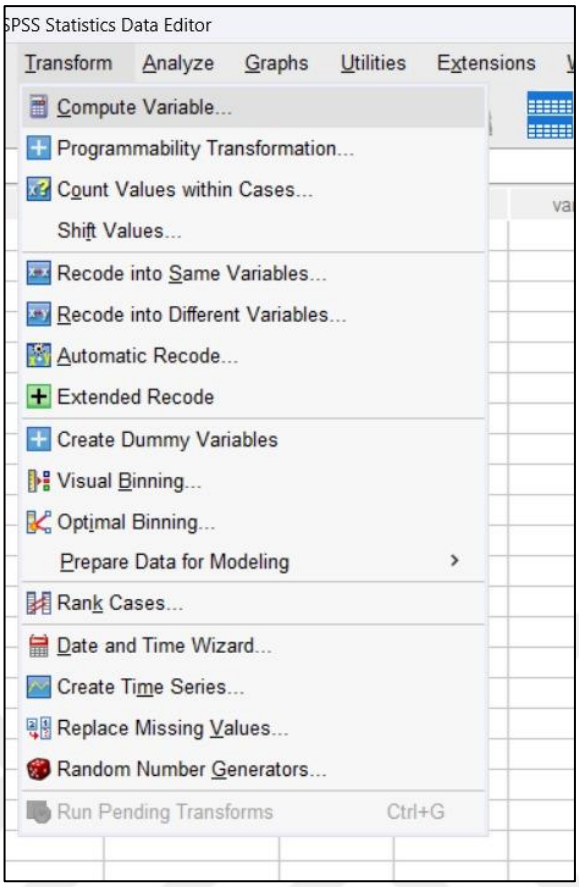
- Denklem (5.6) için;

Bu denklem, $26 < D/t \leq 48$, $25 \leq KL/r \leq 121$ ve $404 \leq E/Fy \leq 936$ değerleri arasında geçerlidir. Denklem (5.4) için uygulanan adımlar burada tekrar edilmiştir.

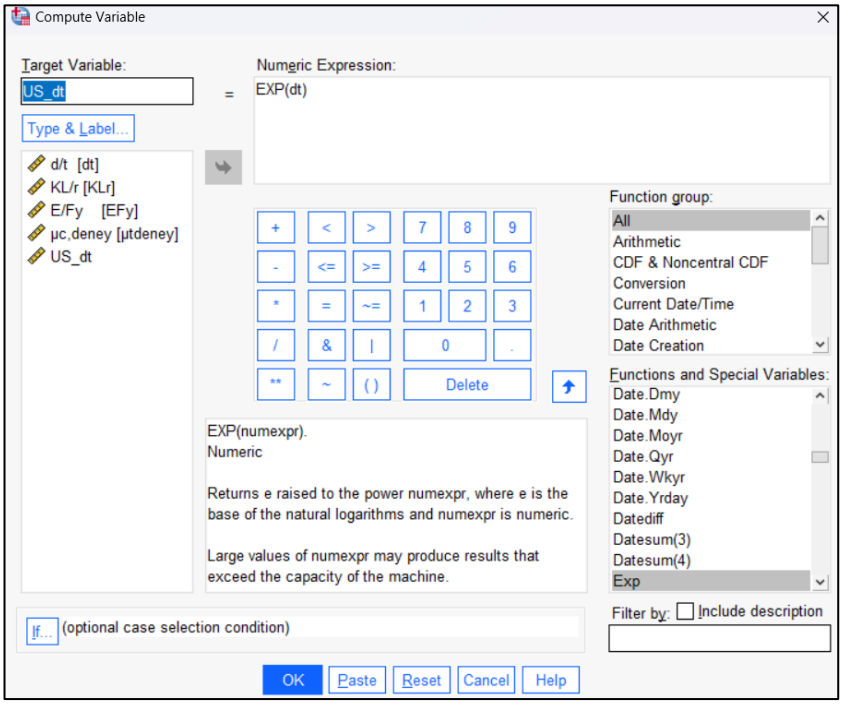


	dt	KLr	EFy	µtdeney
1	27,30	121,00	566,40	9,30
2	27,80	76,00	404,94	10,00
3	27,80	53,00	573,10	4,00
4	27,80	73,00	573,10	6,00
5	27,80	103,00	573,10	4,00
6	30,00	42,00	630,40	4,00
7	31,00	62,00	630,40	4,50
8	31,82	73,00	560,90	5,20
9	33,00	54,00	935,50	8,50
10	33,00	25,00	935,50	6,90
11	39,91	29,00	527,30	6,00
12	39,91	29,00	527,30	4,50
13	48,00	54,00	935,50	6,60
14	48,00	25,00	935,50	7,00
15				

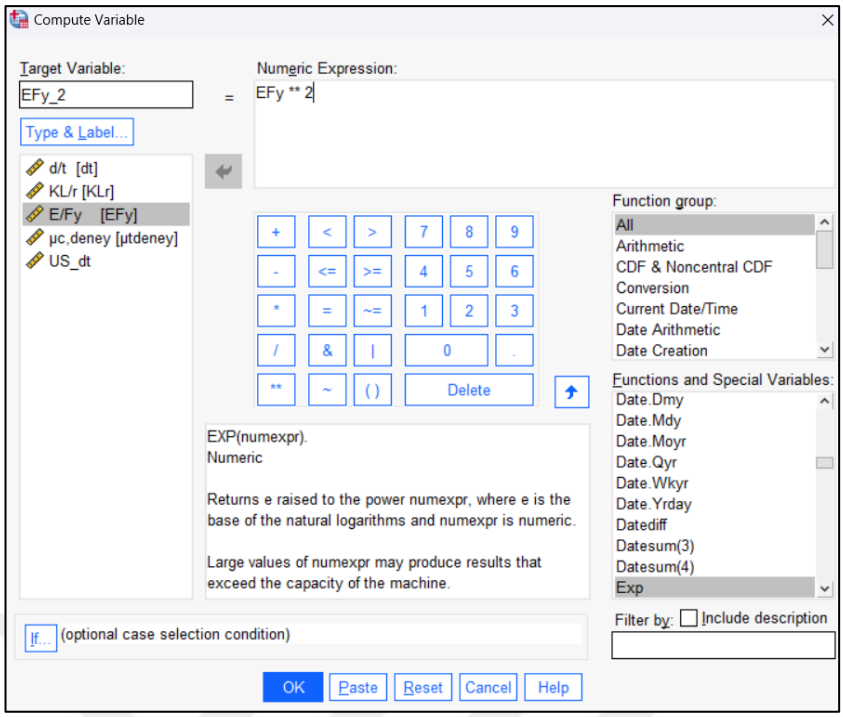
Şekil A.24: SPSS Programına veri girişi.



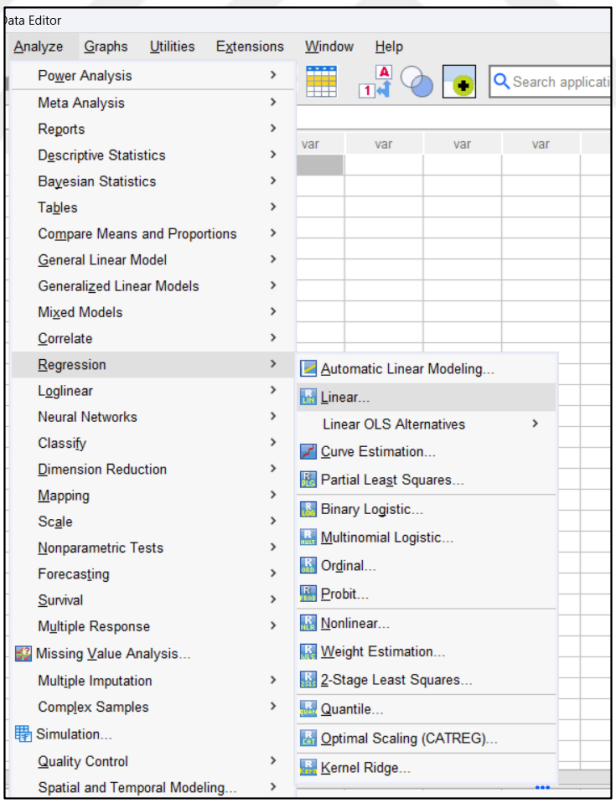
Şekil A.25: "Compute Variable" sekmesinden bağımsız değişkenlerin uygun parametrelere dönüştürülmesi.



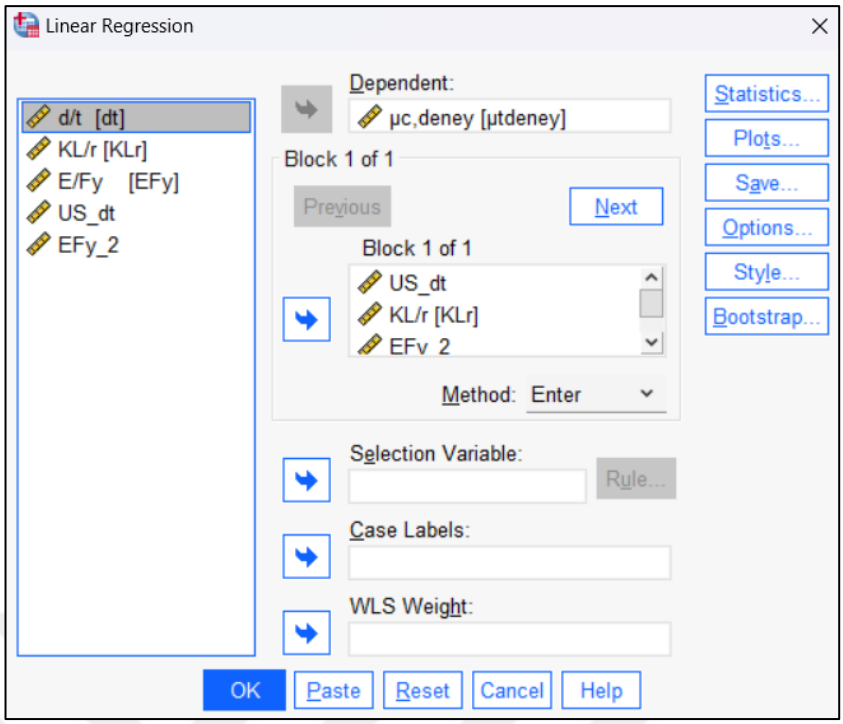
Şekil A.26: Üs(D/t) değerinin "Compute Variable" sekmesinde oluşturulması.



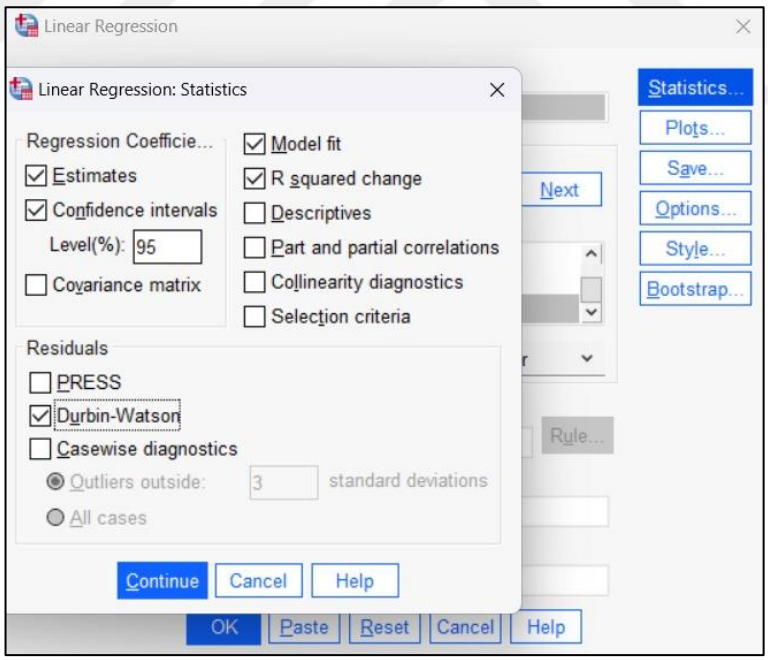
Şekil A.27: $(E/F_y)^2$ değerinin "Compute Variable" sekmesinden oluşturulması.



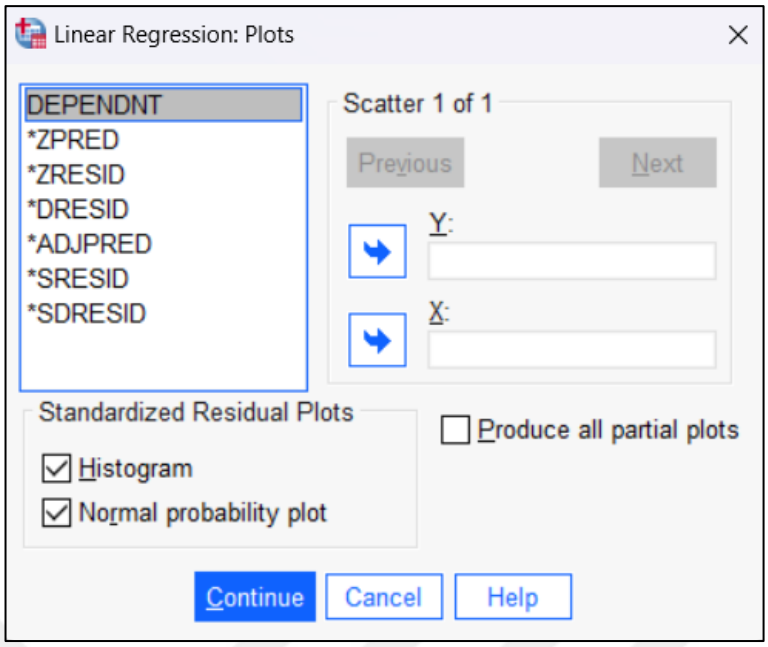
Şekil A.28: Analiz yönteminin seçilmesi.



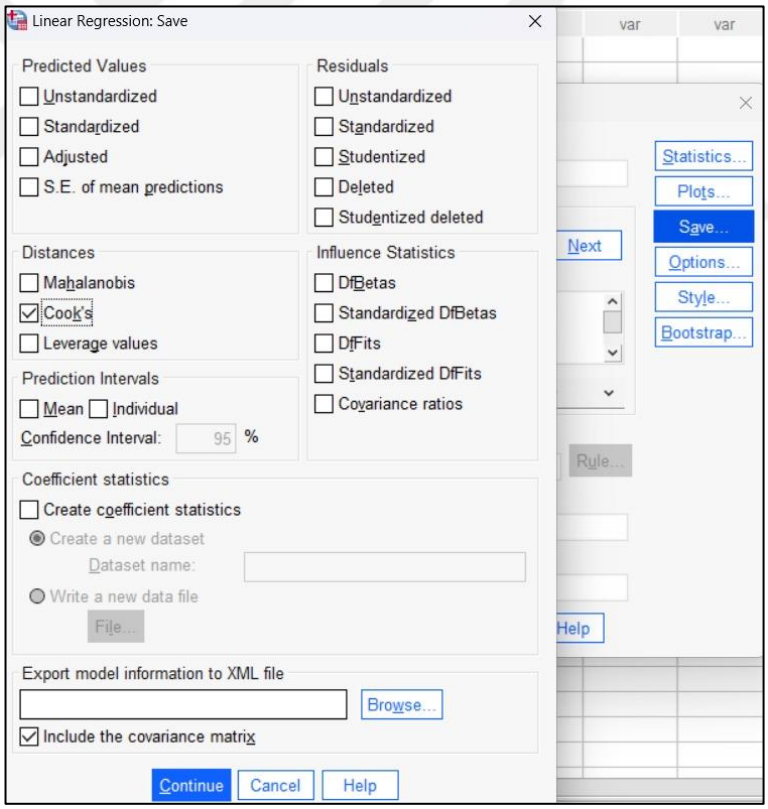
Şekil A.29: Lineer Regresyon Analizi için bağımlı ve bağımsız değişkenlerin girilmesi.



Şekil A.30: "Statistics" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil A.31: "Plots" sekmesinden özelliklerin seçilmesi.



Şekil A.32: "Save" sekmesinden "Cook's Distance" seçeneğinin seçilmesi.

Regression

Variables Entered/Removed[a]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	E/Fy , KL/r, US_dt, EFy_2[b]	.	Enter

a. Dependent Variable: µc,deney

b. All requested variables entered.

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	,851[a]	,724	,601	1,26382	,724	5,890	4	9	,013	2,155

a. Predictors: (Constant), E/Fy , KL/r, US_dt, EFy_2

b. Dependent Variable: µc,deney

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	37,628	4	9,407	5,890	,013[b]
	Residual	14,375	9	1,597		
	Total	52,004	13			

a. Dependent Variable: µc,deney

b. Predictors: (Constant), E/Fy , KL/r, US_dt, EFy_2

Şekil A.33.a: Regresyon Analizi sonuçları.

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95,0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	34,666	7,624		4,547	,001	17,419	51,913
	US_dt	-1,277E-21	,000	-,163	-,710	,496	,000	,000
	KL/r	,032	,013	,467	2,404	,040	,002	,062
	EFy_2	6,869E-5	,000	9,240	4,354	,002	,000	,000
	E/Fy	-,094	,023	-8,752	-4,196	,002	-,145	-,044

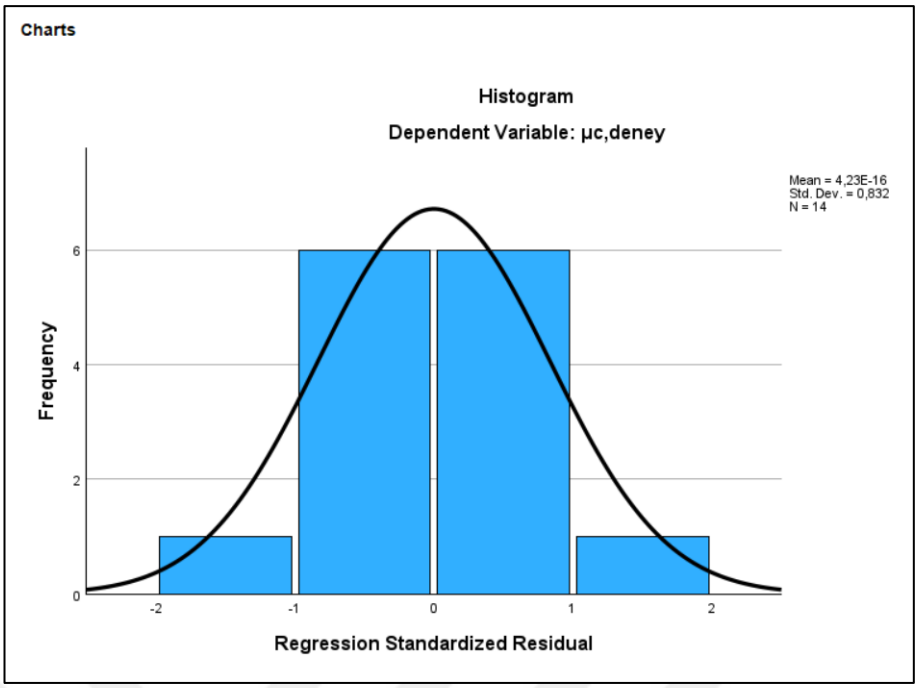
a. Dependent Variable: µc,deney

Residuals Statistics[a]

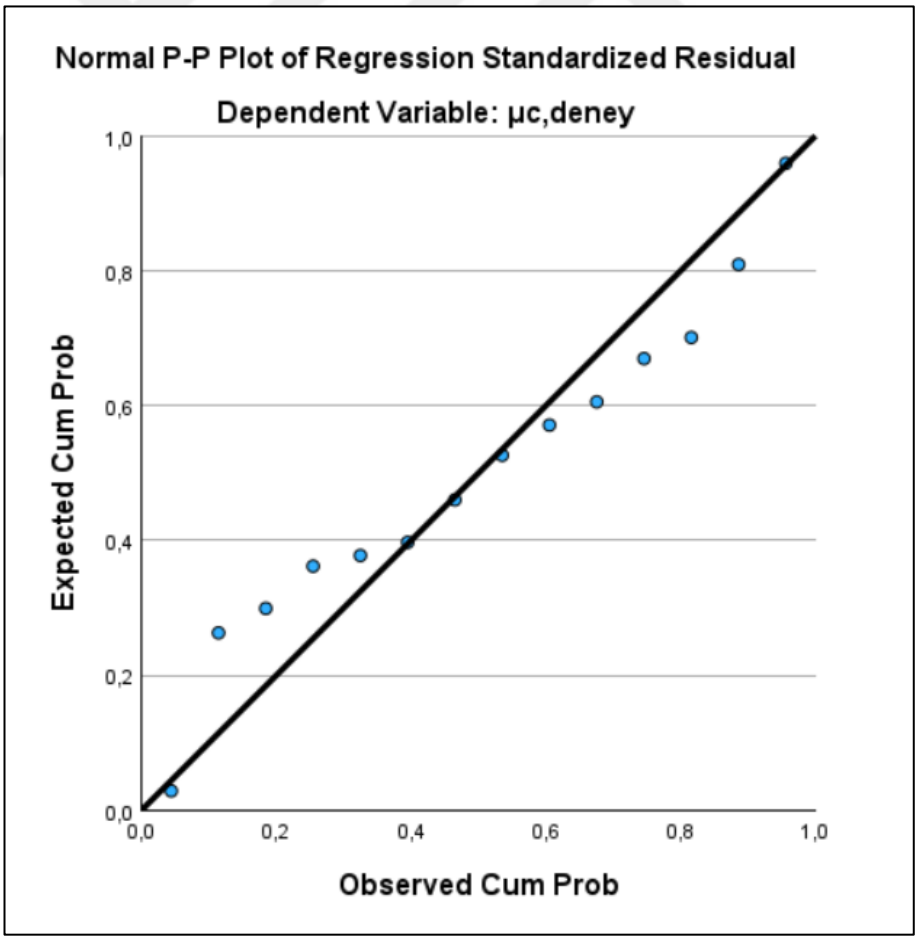
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	3,7740	10,1266	6,1786	1,70132	14
Std. Predicted Value	-1,413	2,321	,000	1,000	14
Standard Error of Predicted Value	,423	1,176	,723	,226	14
Adjusted Predicted Value	3,7049	10,9481	6,1550	1,93859	14
Residual	-2,40983	2,20314	,00000	1,05156	14
Std. Residual	-1,907	1,743	,000	,832	14
Stud. Residual	-2,225	2,339	,014	1,038	14
Deleted Residual	-3,28250	3,96483	,02361	1,67596	14
Stud. Deleted Residual	-3,129	3,520	,037	1,403	14
Mahal. Distance	,530	10,335	3,714	2,818	14
Cook's Distance	,000	,875	,126	,236	14
Centered Leverage Value	,041	,795	,286	,217	14

a. Dependent Variable: µc,deney

Şekil A.33.b: Regresyon Analizi sonuçları.



Şekil A.33.c: Regresyon Analizi sonuçları.



Şekil A.33.d: Regresyon Analizi sonuçları.