

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM VE ÇELİK ELEMANLARIN
ÖNGERİLMELİ YÜKSEK MUKAVEMETLİ
BULONLAR İLE BİRLEŞİMİ**

**DOKTORA TEZİ
S.Gökhan KARAMAN**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

HAZİRAN 2009

**ALÜMİNYUM VE ÇELİK ELEMANLARIN
ÖNGERİLMELİ YÜKSEK MUKAVEMETLİ
BULONLAR İLE BİRLEŞİMİ**

**DOKTORA TEZİ
S.Gökhan KARAMAN
(501972014)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Şubat 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Reha ARTAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Faruk YÜKSELER (YTÜ)
Doç. Dr. İrfan COŞKUN (YTÜ)
Doç. Dr. Ünal ALDEMİR (İTÜ)
Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ (İTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Programı çerçevesinde gerçekleştirilen bu doktora çalışmasında, günümüzde çelik yapıların bulonlu birleşimlerinde kullanılan yüksek mukavemetli önerilmeli bulonların, farklı malzemeleri birleştirmesi durumunda sürtünme arttırıcı alkali silikat boyanın davranışa etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Konu ile ilgili yapılmış herhangi bir araştırmanın olmaması alüminyum ile çelik elemanların yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerinin araştırılması gereğini ortaya çıkarmıştır.

Sayın Prof. Dr. Reha Artan'a, bu çalışmada danışmanım olmayı kabul ettiği için onur duyar ve beni doktora eğitimimde yalnız bırakmadığı için kendisine en içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimim boyunca, bilimsel, maddi ve manevi desteklerini gördüğüm tüm akademisyen ve arkadaşlarıma en içten sevgi ve saygılarımı sunarım.

Doktora tez çalışmamın konusu, doktora eğitimim sırasında Technische Universität Hamburg-Harburg'da Prof. Dr.-Ing. G. Valtinat'ın yanında 02-07.2001 ve 09-12.2002 tarihlerinde 5 ay burslu ve 3 ay araştırma görevlisi olarak bulunduğum, toplam 8 aylık süre zarfında kendisinin yöneticiliğinde çalıştığım bir araştırmadır. Prof. Dr.-Ing. G. Valtinat, kendisi ile birlikte çalıştığım projeye ait deneysel bilgileri bir doktora tezi içerisinde sunmama izin vermiştir. Kendisine en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam süresince desteğini her zaman gördüğüm sevgili babama, yardım ve sabırlarıyla yanımda olan M. A. Milena Urban'a teşekkürlerimi sunarım. Ablam Av. Vildan Karaman Haraz'a, yapmış olduğu özverili çalışması için teşekkür ederim. Yardım ve desteğiyle yanımda olan arkadaşım Doç. Dr. Müh. Hilmi Berk Çelikoğlu'na, Doç. Dr. Müh. Tanju Akar'a ve Dr. Müh. Emre Gürcanlı'ya teşekkür ederim. Hamburg'da bulunduğum süre içerisinde ve sonrasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Dr.-Ing Ulrike Eberwien ve Dr.-Ing. Michael Tobschall'a teşekkür ederim. Hiçbir zaman yardımını esirgemeyen aziz dostum Dr.-Ing. Vladimir Supik'e ve Prof. Dr. Stuart S. Chen'e teşekkürlerimi sunarım.

Şu an aramızda olmayan kendilerinden mesleğe saygının ne demek olduğunu öğrendiğim değerli hocalarım Prof. Dr. Yalman Odabaşı'na ve Prof. Dr. Tefvik Seno Arda'ya teşekkür ederim. Prof. Dr.-Ing. G. Valtinat'a, yeni yetişen gençlere sağladığı imkanlar ve onları destekleyen ve teşvik eden yaklaşımı için saygı ve sevgilerimi sunarım.

Şubat 2009

S.Gökhan Karaman

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Konunun Tanımı	1
1.2 Konu Hakkında Bilgilere Toplu Bakış.....	3
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	7
2. KISA SÜRELİ KAYMA DENEYLERİNİN TANIMI	11
2.1 Deney Numunesi	11
2.2 Kullanılan Malzeme	14
2.2.1 Alüminyum	14
2.2.2 Çelik	14
2.3 Bulonlar	14
2.4 Birleşim Yüzeylerinin Hazırlanması	15
2.5 Deney Yükleme ve Kayıt Cihazları.....	16
2.6 Deney Adımları	17
2.6.1 Deney numunelerinin kapasitelerinin hesabı	17
2.6.2 Deney numunelerinin listesi.....	18
2.6.3 Ölçülen değerler	19
2.7. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	22
2.7.1 Öngerilme kuvvetinde azalma	25
2.7.2 Sürtünme katsayısı diyagramları.....	30
2.7.3 Yük-yerdeğiştirme diyagramları	36
3. UZUN SÜRELİ YÜKLEME DENEYLERİ	41
3.1 Yükleme Çerçevesi.....	41
3.2 Deney Numuneleri	41
3.3 Bulonlar	41
3.4 Montaj	42
3.5 Çerçeve Yüklerinin Belirlenmesi	45
3.6 Deney Adımları	51
3.7 Deney Sonuçları	51
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE İSTATİSTİK ANALİZİ ...	63
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPILAN ARAŞTIRMALAR	69
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çözümleme	69
5.2 Kontak Basınç Gerilmesinin Alüminyum Laşe Kalınlığına Bağlı Değişimi ...	70

5.3 Birleşim Davranış Hesaplarında Kullanılacak Yarım Bulon Modeli.....	77
5.4 Alüminyum Laşe Kalınlıklarının Sürtünme Katsayısına Etkisi	85
5.5 Sıcaklık Değişiminin Sürtünme Katsayısına Etkisi.....	93
5.6 Kayma Gerilmesinin Zamana Bağlı Değişimin Araştırılması.....	96
5.7 Birleşimin Toplam Kalınlığının Sürtünme Katsayısına Etkisi.....	101
5.8 Sayısal Çözümlemede Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	104
6. SONUÇLAR	107
KAYNAKLAR.....	111
EKLER.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....	167

KISALTMALAR

AISC	: American Institute of Steel Construction (AISC)
ASD	: Allowable Stress Design
DIN	: Deutsches Institut für Normung
ECCS	: European Convention for Constructional Steelwork
EDE	: Elektriksel Dirençli Ekstansometre
FBE	: Fen Bilimleri Enstitüsü
GmbH	: Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HBM	: Hottinger Baldwin Mess Technik
INALCO	: International Aluminium Conference
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
TUHH	: Technische Universität Hamburg-Harburg

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Alüminyum malzeme listesi.....	14
Çizelge 2.2 : Deneyler için birleşim hesabında kullanılan özellikler	18
Çizelge 2.3 : Birleşimde enkesit, makaslama, ezilme ve sürtünme ile taşınabilen kuvvetler	19
Çizelge 2.4 : Kısa süreli kayma deneyi listesi	24
Çizelge 3.1 : Herbir çerçevede kullanılan malzeme adedi.....	43
Çizelge 3.2 : Çerçevelerde alüminyum levha kalınlık ve malzeme özellikleri	44
Çizelge 4.1 : Kısa süreli kayma deneyi sürtünme katsayısı sonuçları	66
Çizelge 4.2 : Kısa süreli kayma deneyi sürtünme katsayısı sonuçları (alüminyum alaşımına göre)	67
Çizelge 4.3 : Uzun süreli deney sonuçları	68
Çizelge 5.1 : Bulon rijitliğinin düzeltilmesi hesap adımları	85
Çizelge 5.2 : Sürtünme katsayısına kalınlığın etkisi.....	90
Çizelge 5.3 : $v=0.10$ mm için anlık sürtünme katsayısına kalınlığın etkisi.....	90
Çizelge 5.4 : Sürtünme katsayısına sıcaklığın etkisi	93
Çizelge 5.5 : Sürtünme katsayısına sıcaklığın etkisinde değişim miktarı.....	93
Çizelge 5.6 : Uzun süreli deney sonuçları ve fiktif kayma gerilmeleri	98
Çizelge C.1 : Deney No 1-2	135
Çizelge C.2 : Deney No 2-2	136
Çizelge C.3 : Deney No 3-2	137
Çizelge C.4 : Deney No 4-2	138
Çizelge C.5 : Deney No 5-2	139
Çizelge C.6 : Deney No 6-2	140
Çizelge C.7 : Deney No 7-2	141
Çizelge C.8 : Deney No 8-2	142
Çizelge C.9 : Deney No 9-2	143
Çizelge C.10 : Deney No 10-2	144
Çizelge C.11 : Deney No 11-2	145
Çizelge C.12 : Deney No 12-2	146
Çizelge C.13 : Deney No 13-2	147
Çizelge C.14 : Deney No 14-2	148
Çizelge D.1 : Uzun süreli deney no 1	151
Çizelge D.2 : Uzun süreli deney no 2	152
Çizelge D.3 : Uzun süreli deney no 3	153
Çizelge D.4 : Uzun süreli deney no 4	154
Çizelge D.5 : Uzun süreli deney no 5	155
Çizelge D.6 : Uzun süreli deney no 6	156
Çizelge D.7 : Uzun süreli deney no 7	157
Çizelge D.8 : Uzun süreli deney no 8	158
Çizelge D.9 : Uzun süreli deney no 9	159
Çizelge D.10 : Uzun süreli deney no 10	160

Sayfa

Çizelge D.11 : Uzun süreli deney no 11	161
Çizelge D.12 : Uzun süreli deney no 12	162
Çizelge D.13 : Uzun süreli deney no 13	163
Çizelge D.14 : Uzun süreli deney no 14	164
Çizelge D.15 : Uzun süreli deney no 15	165

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 :	Kısa süreli deney numunesi boyutları	12
Şekil 2.2 :	Kısa süreli deney numunesi için yükleme ve ölçme ekipmanı sistemi..	13
Şekil 2.3 :	Öngerilmeli yüksek mukavemetli ölçüm bulonu	16
Şekil 2.4 :	Deney numunesi ve yerdeğiştirme ölçerler.....	20
Şekil 2.5 :	Instron 8503'te deney numunesi	21
Şekil 2.6 :	Instron 8503 kumanda paneli	22
Şekil 2.7 :	Kısa süreli deneyler sürtünme katsayısı özet diyagramı	23
Şekil 2.8 :	Öngerilmeli bulon pul altında alüminyumda oluşan ezilme	25
Şekil 2.9 :	AlZn4.5Mg1(80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =100 kN, kontak yüzeyleri herhangi bir başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış	26
Şekil 2.10 :	AlMgSi0.5(80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =100 kN, kontak yüzeyleri herhangi bir başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış	26
Şekil 2.11 :	AlZn4.5Mg1(80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =75 kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.....	27
Şekil 2.12 :	AlMgSi0.5(80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =50 kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	27
Şekil 2.13 :	AlZn4.5Mg1(80x10...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =75 kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.....	28
Şekil 2.14 :	AlMgSi1(80x9.7...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =75 kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.....	28
Şekil 2.15 :	AlZn4.5Mg1(80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =100 kN, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.....	31
Şekil 2.16 :	AlMgSi0.5(80x5...400), S235 hot dip galvanized, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış. [No.4-2 : F _V =100 kN, No.5-2 : F _V =80 kN]	31
Şekil 2.17 :	AlZn4.5Mg1(80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =75 kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.....	32
Şekil 2.18 :	AlMgSi0.5(80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti F _V =50 kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	32

Şekil 2.19 : AlZn _{4,5} Mg ₁ (80x10...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.....	33
Şekil 2.20: AlMgSi ₁ (80x9.7...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.....	33
Şekil 2.21 : AlZn _{4,5} Mg ₁ (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=100$ kN kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.....	34
Şekil 2.22 : Alkali silikat çinko bileşimi ile boyanmış kontak yüzeyleri	35
Şekil 2.23 : Deney sonrası kontak yüzeyleri ve sürtünme aktaran bölgeler.....	35
Şekil 2.24 : Deney sonrası kontak yüzeyleri ve sürtünme aktaran bölgeler.....	36
Şekil 2.25 : AlZn _{4,5} Mg ₁ (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=100$ kN, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.....	37
Şekil 2.26 : AlMgSi _{0,5} (80x5...400), S235 galvanizli, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış. [No.4-2 : $F_V=100$ kN, No.5-2 : $F_V=80$ kN].....	37
Şekil 2.27 : AlZn _{4,5} Mg ₁ (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.....	38
Şekil 2.28 : AlMgSi _{0,5} (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=50$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali-silikat çinko boya ile boyanmış	38
Şekil 2.29 : AlZn _{4,5} Mg ₁ (80x10...200), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali-silikat çinko boya ile boyanmış.....	39
Şekil 2.30 : AlMgSi ₁ (80x9.7...200), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_V=75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali-silikat çinko boya ile boyanmış	39
Şekil 3.1 : Uzun süreli yükleme deneyi, çerçeveler ve ölçüm ekipmanları (TUHH laboratuvarı)	41
Şekil 3.2 : Tipik uzun süreli deney numunesi.....	45
Şekil 3.3 : Uzun süreli deney çerçevesi	46
Şekil 3.4 : 1 numaralı çerçeve (yerdeğiştirme saat numaraları ve yükleme $P=90$ kN)	47
Şekil 3.5 : 2 numaralı çerçeve (yerdeğiştirme saat numaraları ve yükleme $P=78$ kN)	48
Şekil 3.6 : 3 numaralı çerçeve (yerdeğiştirme saat numaraları ve yükleme $P=60$ kN)	49
Şekil 3.7 : Uzun süreli deney çerçevesi (aşağıda görülen U profil M30 luk çerçeve şaftına kuvvet yüklenmesi sırasında numunelerin burulmasını engellemek içindir	50
Şekil 3.8 : Deney çerçevesi 1, $\mu=0.75\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C1}=90$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 1: 2 lama $t=9.7$ mm [AlMgSi ₁] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 1: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	53

- Şekil 3.9 :** Deney çerçevesi 1, $\mu=0.75x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C1}=90$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 2: 2 lama $t=9.7$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 2: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış 53
- Şekil 3.10 :** Deney çerçevesi 1, $\mu=0.75x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C1}=90$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 3: 2 lama $t=8.0$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 3: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış 54
- Şekil 3.11 :** Deney çerçevesi 1, $\mu=0.75x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C1}=90$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 4: 2 lama $t=10.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 4: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış..... 54
- Şekil 3.12 :** Deney çerçevesi 1, $\mu=0.75x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C1}=90$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 5: 2 lama $t=10.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 5: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış..... 55
- Şekil 3.13 :** Deney çerçevesi 2, $\mu=0.65x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C2}=78$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 6: 2 lama $t=8.0$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 6: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış 55
- Şekil 3.14 :** Deney çerçevesi 2, $\mu=0.65x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C2}=78$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 7: 2 lama $t=8.0$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 7: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış 56
- Şekil 3.15 :** Deney çerçevesi 2, $\mu=0.65x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C2}=78$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 8: 2 lama $t=5.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 8: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış..... 56
- Şekil 3.16 :** Deney çerçevesi 2, $\mu=0.65x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C2}=78$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 9: 2 lama $t=10.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 9: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış 57
- Şekil 3.17 :** Deney çerçevesi 2, $\mu=0.65x\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C2}=78$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 10: 2 lama $t=10.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 10: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış 57

Şekil 3.18 : Deney çerçevesi 3, $\mu=0.50\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C3}=60$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 11: 2 lama $t=9.7$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 11: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	58
Şekil 3.19 : Deney çerçevesi 3, $\mu=0.50\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C3}=60$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 12: 2 lama $t=8.0$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 12: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	58
Şekil 3.20 : Deney çerçevesi 3, $\mu=0.50\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C3}=60$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 13: 2 lama $t=8.0$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 13: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	59
Şekil 3.21 : Deney çerçevesi 3, $\mu=0.50\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C3}=60$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 14: 2 lama $t=5.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 14: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	59
Şekil 3.22 : Deney çerçevesi 3, $\mu=0.50\mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C3}=60$ kN, HVM16 öngerilme $F_V=100$ kN. Deney numune no 15: 2 lama $t=5.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t=10$ mm [S235]. Deney numune no 15: kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış	60
Şekil 3.23 : Çerçeve yüklemeleri - Zaman diyagramı, $F_{C1}=90$ kN, $F_{C2}=78$ kN, $F_{C3}=60$ kN. ($\mu_{C1}=0.75\mu_{st}$, $\mu_{C2}=0.65\mu_{st}$, $\mu_{C3}=0.50\mu_{st}$).....	61
Şekil 5.1 : Alüminyum ve çelik levhalarda öngerilme kuvvetinden dolayı iki levha arasında oluşan basınç dağılımının belirlenmesinde kullanılan model, yükler ve sınır şartları (üstten ve perspektif görünüş).....	72
Şekil 5.2 : $t_{Al}=8.0$ mm, $t_{St}=10$ mm, 1/8 sonlu eleman modelinde, alum.-çelik kontak rijitliğinin, maksimum kontak yüzeyi basıncına etkisi.....	73
Şekil 5.3 : $t_{Al}=8.0$ mm, $t_{St}=10$ mm, 1/8 sonlu eleman modeli için FKN, kontak rijitliği değerlerine bağlı olarak kontak basıncı değişimi	74
Şekil 5.4 : Alüminyum ve çelik birleşim yüzeyinde $t_{Al}=5, 8, 10$ mm ve $t_{St}=10$ mm için 1/8 sonlu eleman modelinde (kontak rijitliği FKN=10.0) delik kesitinde kuvvete dik doğrultuda kontak basıncı dağılımı	75
Şekil 5.5 : Düzgün yayılı yük olarak pul alt yüzü alanına verilen öngerilme kuvvetinin birleşim içerisinde z eksen yönünde gerilme olarak dağılımı.....	76
Şekil 5.6 : Kontak yüzeyindeki basınç gerilmesi dağılımı	77
Şekil 5.7 : Öngerilmeli bulon modeli geometrik parametreleri	79
Şekil 5.8 : Tam bulon modeli ve sınır şartları	80
Şekil 5.9 : HVM16 DIN6914 10.9, $l_b=72$ mm, öngerilmeli bulon çekme deneyi (A.Steurer) ve sonlu eleman modeli sonuçları	81
Şekil 5.10 : Yarım bulon modeli ve sınır şartları.....	82
Şekil 5.11 : $l_b=72, 76, 80$ mm için sonlu eleman bulon modeli elastisite modülü düzeltilmesi.....	84

Şekil 5.12 : Kalınlık değişiminin sürtünme katsayısına etkisini incelemede kullanılan 1/8 birleşim modeli ve sınır şartları.....	85
Şekil 5.13 : Birleşimde kontak yüzeylerinde oluşturulan kontak elemanları	86
Şekil 5.14 : Alüminyum ve çelik levha delik eksenleri x ekseninde 1 mm farklıdır.	87
Şekil 5.15 : $t_{Al}=8.0$ mm birleşim modeli öngerilme yüklemesi sonrasında z ekseninde gerilme dağılımı	88
Şekil 5.16 : $t_{Al}=8.0$ mm birleşim modeli yerdeğiştirme yüklemesi sonrası x ekseninde gerilme dağılımı	89
Şekil 5.17 : $t_{Al}=8.0$ mm birleşim modeli kontak yüzeyi kayma gerilmesi dağılımı ..	89
Şekil 5.18 : $t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm için sürtünme katsayısına kalınlığın etkisi.....	91
Şekil 5.19 : $t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm için bulon öngerilme kuvvetinde değişim.....	92
Şekil 5.20 : $t_{Al}=5.0$ mm için sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi ($t_0=+20$ °C)	94
Şekil 5.21 : $t_{Al}=8.0$ mm için sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi ($t_0=+20$ °C)	95
Şekil 5.22 : $t_{Al}=10.0$ mm için sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi ($t_0=+20$ °C)	95
Şekil 5.23 : Sayısal analiz sonucunda kontak basınç gerilmesi ve tanımlanan fiktif üniform kontak basınç gerilmesinin delik çevresinde gösterimi.....	96
Şekil 5.24 : $t_{Al}=5,8,10$ mm ve $t_{St}=10$ mm için 1/8 sonlu eleman modelinde elde edilen kontak basıncı ve kontak basıncını tarifleyen fonksiyonlar	99
Şekil 5.25 : Sonlu eleman modeli ve uzun süreli deney sonuçları ile kayma etkisinin belirlenmesi	100
Şekil 5.26 : İç levha kalınlığının $t_{St}=10, 12, 14, 16, 18$ ve 20 mm olması durumunda $t_{Al}=5$ mm için kontak basıncı dağılımı.....	102
Şekil 5.27 : İç levha kalınlığının $t_{St}=10, 12, 14, 16, 18$ ve 20 mm olması durumunda $t_{Al}=8$ mm için kontak basıncı dağılımı.....	102
Şekil 5.28 : İç levha kalınlığının $t_{St}=10, 12, 14, 16, 18$ ve 20 mm olması durumunda $t_{Al}=10$ mm için kontak basıncı dağılımı.....	103
Şekil 5.29 : $t_{Al}=5, 8, 10.0$ mm için, hesap ile elde edilen sürtünme katsayısının, deneylerden elde edilen ortalama sürtünme katsayısına oranı	105
Şekil A.1 : Alüminyum ve çelik levhalar, montaj öncesi.....	117
Şekil A.2 : Öngerilmeli yüksek mukavemetli ölçüm bulonları.....	118
Şekil A.3 : Deney numunesi grubunun ilk elemanı.....	119
Şekil A.4 : Öngerilmeli bulonların montajı sırasında çelik levhaların birbirlerine yaklaştırılması	120
Şekil A.5 : Levhaların öngerilmeli bulonlarla ilk montajı	121
Şekil A.6 : Bulonlara öngerilme kuvvetinin verilmesi için hazırlık.....	122
Şekil A.7 : Bulonlara öngerilme kuvvetinin verilmesi	123
Şekil A.8 : Bulonlara öngerilme kuvvetinin verilmesinde son aşama.....	124
Şekil A.9 : Alüminyum-çelik levhalardan oluşan deney düzeni çerçeveye yerleştirilmek için hazır.....	125

SEMBOL LİSTESİ

A_n	: Net enkesit alanı
A_s	: Bulon makaslama alanı
b	: Genişlik
C_{vx}	: Değişim oranı
d_s	: Bulon çapı
$f_y, f_{0.2}, \beta_{0.2}$	: Akma gerilmesi
f_{ub}	: Bulon kopma mukavemeti
$F_{FR1}, F_{Ç1}, \dots$	: Uzun süreli çerçeve yükü
F_v	: Bulon öngerilme kuvveti
FKN	: Kontak rijitliği
glz	: Galvanizli
P	: Kuvvet
P_v	: Kalibrasyon kuvveti
P_l	: Ezilme kuvveti
P_g	: Sürtünme kuvveti
P_{sh}	: Makaslama kuvveti
P_n	: Net enkesit tarafından taşınabilen kuvvet
p	: Alkali silikat çinko boya ile boyanmış
R	: Gerçek sürtünme katsayısı
s_x	: Standart sapma
S_1	: Anlık öngerilme kuvveti
t	: Kalınlık
v_{lim}	: Limit yerdeğiştirme
w	: levhaların birbirlerine göre bağıl hareketi
w_m	: yerdeğiştirme
x_i	: Örnek
$\bar{x}$	: Aritmetik ortalama
Z	: Çekme kuvveti
α_l	: Ezilme katsayısı
μ	: Sürtünme katsayısı

ALÜMİNYUM VE ÇELİK ELEMANLARIN ÖNGERİLMELİ YÜKSEK MUKAVEMETLİ BULONLAR İLE BİRLEŞİMİ

ÖZET

Bu çalışmada, alüminyum ve çelik iki farklı malzemenin sürtünme ile yük aktaran öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimi incelenmiştir. Literatürde alüminyum-alüminyum ve çelik-çelik gibi aynı türden malzemenin birleşimi için araştırmalar mevcut olmasına karşın farklı iki malzemenin birleşimi ile ilgili sistemli çalışmalara rastlanmamıştır.

Galvanizli çelik malzeme ile alüminyum malzemenin birleştirilmesinde, öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonların kullanılması zorunludur. Kaynak kullanımı, malzemelerin farklı özellikte olması sebebiyle mümkün değildir. Bu amaçla iki farklı grup deney gerçekleştirilmiştir. Bunlar, kısa süreli ve uzun süreli deneyler olmak üzere; 10.0 mm, 9.7 mm, 8.0 mm ve 5.0 mm'lik dört farklı kalınlıktaki, üç farklı alüminyum alaşımı AlMgSi1 (6082), AlMgSi0.5 (6063) ve AlZn4.5Mg1 (7020) üzerinde yapılmıştır. Herbir numunede, 2 adet M16 bulon kullanılmıştır. Kısa süreli deneylerde, sürtünme yüzeyleri ilk beş adet deneyde sadece yağdan arındırılmış, sonraki dokuz adet deney numunesinde ise alkali silikat çinko boya ile boyanmıştır.

Kısa süreli kayma deneyleri ile öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde, hem alüminyum ve hem de galvanizli çelik temas yüzeylerine herhangi bir işlem yapılmadan sadece yüzeyler yağdan arındırılmış hal için ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış hal için sürtünme katsayısı belirlenmiştir.

Yukarıda belirtilen iki farklı temas yüzeyi haline ait yük-yerdeğiştirme diyagramları, kayma yükü ve sonrasında kopma haline kadar incelenmiştir. Bulonlara öngerilme kuvveti verildikten sonra 30 dakika boyunca, deneylere başlamadan önce öngerilme kuvvetindeki azalma araştırılmıştır.

Alüminyum alaşımın akma sınırının çelik malzemeden düşük olması nedeniyle, alüminyum malzemede pul altında ezilme oluşmuş ve öngerilme kuvvetinin daha geniş bir yüzeye aktarılması gerektiği gözlenmiştir. Bunun için daha kalın ve genişçe bir pul kullanılabilir. Bu gözlem AlMgSi0.5 (6063) alaşımında belirgindir.

Kısa süreli deneylerde bulonlara öngerilme kuvveti verildikten sonra öngerilme kuvvetinde zaman içerisinde alüminyum malzemenin sünme özelliğinden dolayı büyük bir azalma gözlemlenmemiştir. Kısa süreli deneylerde, sürtünme yüzeylerinde boyar madde kullanılmaması durumunda birleşimler ekonomik olmaktan uzaktır. Sürtünme arttırıcı alkali silikat çinko boya kullanılması durumunda bir bulonun sürtünme ile taşıyabileceği kuvvet yaklaşık olarak 3.5 kat daha fazladır. Kısa süreli deneylerde; sürtünme katsayısına, alüminyum dış levha kalınlıklarındaki farklılığın azaltıcı etkisi gözlemlenmemiştir.

Kısa süreli deney sonuçlarının istatistiksel incelemesi ile elde edilen sürtünme katsayısı standart sapmasının %10'luk sınır içerisinde olduğu gözlenmiştir.

Yapılan ondört adet kısa süreli deneyden elde edilen verilerden yararlanılarak uzun süreli deney sistemi hazırlanmış ve toplam onbeş adet uzun süreli birleşim numunesi bir yıl boyunca üç farklı çerçevede 90 kN, 78 kN ve 60 kN'luk sürekli yük altında gözlenmiştir. Uzun süreli deneylerde, sürtünme yüzeyinin hazırlanmasında sadece alkali silikat çinko boya kullanılmıştır.

Uzun süreli deneylerde kalınlık etkisi temas yüzeylerinin zaman içerisinde kaymasına sebep olmuştur. Bu gözlem, kalınlığın azalması ile daha kısa sürede meydana gelmiştir. Uzun süreli deney sonuçlarının irdelenmesinde, daha önce literatürde rastlanmayan sabit aralıklı ayrıklaştırma uygulanmak suretiyle elli yıl sonundaki davranış tahmin edilmeye çalışılmıştır. Alüminyum levha kalınlığı 10.0 mm olan numunelerde, bir yıl boyunca elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiş ve elli yıl sonrası için levhaların birbirlerine göre yerdeğiştirmesinin 0.30 mm'lik sınır içerisinde kalacağı hesaplanmıştır. Alüminyum ve çelikten oluşan farklı iki malzemenin birleşimi için alkali silikat çinko boyanın sürtünme katsayısını artırdığı gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile kısa süreli deney numuneleri modellenmiş ve üzerinde parametrik çalışmalar yapılmıştır. Alüminyum dış levha kalınlığındaki değişimin temas yüzeyinde kontak basıncına etkisi incelenmiştir. Burada; alüminyum levhada kalınlık azaldıkça, bulon öngerilme kuvvetinden meydana gelen yüzeyler arasındaki kayma kuvveti daha küçük bir alandan aktarılmaktadır. Bu farklılık, sadece ortada kullanılan çelik levha kalınlığının değiştirilmesi durumunda görülmemiştir.

Levha düzleminde uygulanan çekme kuvvetinden, levha düzlemine dik düzlemde şekil değiştirmeler oluşmaktadır. Bunun sürtünme katsayısına etkisi, sonlu elemanlar modelinde Poisson katsayısı sıfır alınarak incelenmiştir. Kuvvet eksenine dik eksenlerdeki şekil değiştirmelerin sürtünme katsayısına etkisi çizelge ile özetlenmiştir. Sonlu eleman modelleri ve deney sonuçları ile elde edilen sürtünme katsayıları birbirlerine çok yakındır.

Deneyler +20°C sıcaklıkta yapılmıştır. Parametrik olarak sıcaklık değişiminin sürtünme katsayısına etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık farkı olarak -40, -20 ve +20°C uygulanması durumunda, hesaplanan sürtünme katsayısında büyük bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

İnce alüminyum levha kullanılması durumunda kontak basıncı, temas yüzeyinde daha küçük bir alana dağılmaktadır. Uzun süreli deneylerde sabit yük etkisi altında kaymanın daha erken görülmesini açıklamaktadır. Sayısal hesaptan elde edilen levhalar arasında oluşan kayma gerilmesi ve deney sonuçlarından elde edilen kayma zamanının birlikte kullanılmasıyla birleşimin kayma ile elli yıl süre üzerine etkileyen yükleri sürtünme ile güvenle taşıyabileceği belirlenebilir.

PRE-LOADED HIGH STRENGTH BOLTED CONNECTIONS OF ALUMINIUM MEMBERS WITH STEEL MEMBERS

SUMMARY

The presented work is the result of the studies conducted on two different materials- aluminium and steel and their friction grip pre-loaded high strength connections. A certain amount of research and studies had been done so far on the connections of one kind of material such as aluminium-to-aluminium or steel-to-steel connections. However, as far as the connections of two different materials are concerned, no systematic works on the subject exist.

It is necessary to use high strength pre-loaded bolts when connecting hot-dip galvanized steel material with aluminium material. The use of weld is not possible because of the different properties of materials. For this reason, two different types of experiments have been carried out. These tests are the short-term and the long-term tests, performed on four different dimensions of thickness: 10.0 mm, 9.7 mm, 8.0 mm and 5.0 mm, and three different aluminium alloys: AlMgSi1 (6082), AlMgSi0.5 (6063) and AlZn4.5Mg1 (7020). In each specimen two M16 bolts have been used. In the first five tests of the short-term tests, friction surfaces were treated oil-free and in the remaining nine tests the specimens friction surfaces were painted with alkali silicate zinc.

In pre-loaded high strength bolted connections, the friction coefficient was determined for the oil-free aluminium and steel contact surfaces without any further treatment and also for the alkali silicate zinc painted contact surfaces.

For the above mentioned two different cases of treatment of the contact surface, loading-displacement diagrams were studied for shear loads and up to the occurrence of the rupture. After having subjected the bolts to pre-loading, the loss of pre-load had been examined for 30 min prior to the beginning of the test.

When the aluminium alloy has lower yield stress than steel, an indent under the washer can occur. That's why it is necessary to transfer the pre-load to a greater surface. For this purpose, a thicker and wider washer could be used. This observation is of significance for the AlMgSi0.5(6063) alloy.

In the short-term tests, after having applied the pre-loading to the bolts, no big loss on the pre-load was observed due to the creep behaviour of aluminium in time. In the short-term tests, when no paint on the friction surfaces was used, the number of the bolts necessary for the proper connections would be too high to be considered efficient from the economical point of view. In case of using the friction - increasing alkali silicate zinc paint, the limit friction force of one bolt increased 3.5 times. A change of the thickness had no effect on the friction coefficient in short-term tests.

After evaluating the short-term test results statistically, it has been concluded that the standard deviation of the friction coefficient is within the 10% limit.

Based on the results of fourteen short-term tests, a long-term testing system had been prepared and a total of fifteen long-term connection specimens in three different frames with 90 kN, 78 kN and 60 kN of continuous loading was monitored for one year. To prepare the friction surfaces of long-term test specimens, all surfaces were treated with alkali silicate zinc paint.

The influence of plates' thickness on friction in the long-term tests caused the slip of contact surfaces in time. The thinner the specimen, the earlier the slip occurred. For the study of the long-term test results using constant distance separation, a method not found in the literature, an attempt has been made to predict the behaviour of specimens within fifty prospective years. Inspecting of the 10.0 mm thick aluminium plate specimens after the lapse of time of one year showed that the predicted displacement in fifty years' time would be within the 0.30 mm shear limit range. It can be concluded that the alkali silicate zinc paint increases the friction coefficient of connections made of two different materials, aluminium and steel.

Short term shear test specimens are modeled with finite element method and parametric work performed on these models. The examination of the contact pressure effect on contact surfaces with varying thickness of the aluminium outer plate revealed that the thinner the aluminium plate, the smaller the area for the shear force distribution. This was not observed when the mid-steel plate thickness had been changed.

Because of the tension force applied onto the plate plane, strains occurred also in the perpendicular plane. Its effect on the friction coefficient was studied using Poisson's ratio equal to zero. The influence on friction coefficient, because of strains in perpendicular axis to force axis, is given in table. The friction coefficient values obtained with finite element models and laboratory test are highly convergent.

The tests were carried out in +20°C temperature. The influence of change in temperature on the friction coefficient was researched parametrically. As a result, no significant change in the friction coefficient was noticed for -40, -20 and +20°C temperature difference.

By using thinner aluminium plates, contact pressure was distributed on a smaller area of contact surface. This explains the earlier shear observed in the long-term tests under constant tension force. The shear stress between plates from numerical results and the shear time obtained from experimental results were used together to estimate whether the connection is capable of carrying the load without creep for fifty years.

1. GİRİŞ

1.1 Konunun Tanımı

Bulonların görevi, farklı kesitlerdeki yapı elemanlarını birbirlerine birleştirmektir. Bulonlu birleşimler, noktasal birleşimlerdir. Öngerilme ve temas yüzeylerinin sürtünme aktarır hale getirilmesi ile bazı yükleme durumlarında sanal yüzeysel birleşimler oluşturulur [1]. Günümüzde bulonlu birleşimler, perçinli birleşimlerin yerini almıştır.

Çelik yapıların her kısmında bulonlar önemli bir yer tutmaktadır. Her alanda meydana gelen ilerlemeler bulonların da zaman içerisinde gelişmesini sağlamıştır. Çeşitli mukavamette ve çapta üretilen bulonlar aynı zamanda yeni teknolojilerin uygulanması ile günümüzde M42 boyutlu 12.9 kalitesinde (42 mm çapında, çelik malzemede 1080 N/mm^2 akma ve 1200 N/mm^2 kopma gerilmesi) üretilebilmektedir. Üretimi çapları büyüdükçe zorlaşmaktadır. Öngerilmeli bulonlar, bulon ailesi içerisinde yapılarda en çok kullanılan birleşim elemanıdır. Bulonlara gelen yükler bulon ekseninde, bulon eksenine dik veya bu ikisinin bileşkesi şeklinde olabilir.

Yapıda kullanılan bulonlar, üretimleri sırasında daldırma yöntemi ile galvanizlenip korozyona karşı korunur. Galvanizlenmiş bulonların dış açılmış kısmı, üretim aşamasında molibdendisülfid ile yağlanır [2]. Öngerilmeli bulonlarda öngerilme kuvvetinin verilebilmesi bakımından kullanılan öngerilme aletinin türüne göre, bulon başlığı çeşitli şekillerde üretilir.

Yapıda, yük aktarmada kullanılan minimum bulon boyutu M12'dir. Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonların, aynı zamanda alüminyum yapılarda kullanımı da sözkonusudur.

Öngerilmeli bulonlu birleşimlerin çelik malzeme için kullanımı, günümüze değin çeşitli araştırmalara konu olmuştur. Boyutlandırmasında yapılan ilerlemeler ile bulonlu bir birleşimin ne kadar yük etkisi altında taşıma kapasitesine ulaşacağı hesaplanabilmektedir.

Bulonların elik kalitesi genellikle 10.9 veya 8.8 kalitesinde olmaktadır. Rüzgar santrallerinin, petrol platformlarının ve diğ er bazı uygulamaların gerektirdiğı birleşimleri oluşturmak için günümüzde 12.9 kalitesinde bulonlar da kullanılmaktadır.

Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonların avantajları [3]:

1. Perinle birleşimlere nazaran daha az sayıda işçiden oluşan takımların yeterli olması.  rnek vermek gerekecek olursa iki kişiden oluşan iki bulon takımı bir gün içerisinde 4 kişiden oluşan perçin takımının iki katından fazla bulon yerleştirebilir. Böylece elik yapının daha hızlı yapılması sağlanır.
2. Aynı mukavemeti sağlamak için perinlere nazaran daha az sayıda birleşim elemanı kullanılır.
3. Öngerilmeli bulonların uygun şekilde yerleştirilmesi birkaç saat içerisinde öğrenilebilir. Aynı kalitede kaynaklı ve perçinli birleşimlerin yapılması için çalışma ve deneyim gerekmesine rağmen, öngerilmeli bulonlar az deneyimle düzgün şekilde yapılabilir.
4. Kaynaklı birleşimlerde kullanılan montaj bulonlarının kullanımına gerek yoktur.
5. Uygulanması perçinler gibi gürültülü değildir.
6. Bulonlu birleşimlerin oluşturulmasında daha ucuz ekipman kullanılır.
7. Bulonlar uygulanması sırasında herhangi bir tehlike veya risk oluşurmazlar.
8. Perçinli ve bulonlu birleşimler aynı yükleme durumunda karşılaştırıldığında, bulonlu birleşimlerin daha iyi yorulma dayanımına sahip olduğu bilinir. Yorulma dayanımları kaynaklı birleşimlere eşit veya daha fazladır.
9. Yapının bir kısmındaki veya tamamındaki değişiklik, bulonların s k lmesindeki kolaylık sebebiyle çok basittir.

Birleşime etkiyen yükler, gerilmeleri değiştiriyor ve yorulmanın dikkate alınmasını gerekli kılıyorsa, öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar kullanılmalıdır. Bu birleşimler kayma kritik birleşimler olarak boyutlandırılmalıdır. AISC ASD J1.12'de [4] kayma ile yük aktaran birleşimlerin kullanılması gereken yerler olarak; yük değişimlerinin olduğu, makina yüklerinin ve çarpma etkisi oluşturan hareketli yüklerin bulunduğu mesnet birleşimleri, 62 metreden yüksek kolon eklerinde ve 40

metreden yüksek yapılarda kiriş kolon birleşimleri olarak belirtilmiştir. Öngerilme kuvvetinin uygulamada zaman içerisinde azalmasını engellemek için daha uzun bulon boyu ve birden fazla somun kullanılmaktadır.

Bulonun kayma ile taşıyabileceği kuvvet sürtünme ile taşıyabileceği kuvvetten daha düşükse, bulon kayma kritik ismini alır. Eğer yüzeyler galvanizlenmiş ise bu durumda sürtünme faktörünün yarısı kullanılır.

İki farklı metalin bulunduğu araştırma konusu birleşimlerde temas korozyonu önlenmelidir. Alüminyum malzeme, yapıda paslanmaya karşı herhangi bir koruyucu veya boya ile boyanmadan kullanılabilmesine rağmen, çelik ancak galvanizlendikten sonra temas korozyonundan korunabilmektedir.

1.2 Konu Hakkında Bilgilere Toplu Bakış

Coulomb sürtünmesine göre; sürtünme kuvveti, sürtünmenin olduğu temas yüzeyine paralel etkir. Yüzeye dik olarak etkiyen kuvvetle orantılıdır. Kayma ile yük aktaran bir birleşimin boyutlandırılmasında öngerilme ile taşınabilecek yük sürtünme katsayısına bağlıdır. Literatürde çelik yapılarda öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde temas yüzeyleri farklı şekillerde hazırlanmak suretiyle sürtünme katsayısı arttırılmaya çalışılır. Öngerilme kuvvetine bağlı olarak da taşınabilecek kayma yükü artar.

G.Valtinat et. al. [5] çalışmalarında, çelik elemanlarda sürtünme ile yük aktaran birleşimleri incelemişlerdir. Çalışmada galvanizli sürtünme yüzeylerine herhangi bir işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış olarak ve alkali silikat çinko ile boyanmak suretiyle hazırlanmıştır. Deney numuneleri toplam kalınlıkları, M16 bulonlu numunelerde 32 mm, M20 bulonlu birleşimlerde ise 40 mm'dir. Her bir numunede toplam 4 adet bulon kullanılmıştır. Numuneler St52-3 çeliğinden hazırlanmıştır. İki kısımdan oluşan çalışmanın birinci kısmında kısa süreli kayma deneyleri ile birleşimlerin sürtünme katsayısı belirlenmiştir. İkinci kısımda ise uzun süreli kayma deneyleri ve uzun süreli tekrarlı yükler etkisi altında davranış incelenmiştir. Her iki kısma ait sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Çelik yapılarda sürtünme ile yük aktaran öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerle ilgili literatürde rastlanmış en ayrıntılı çalışmadır. Bu çalışmada izlenen adımlar ve daha

önce hazırlanan uzun süreli deney çerçeveleri tez konusunun araştırılmasında da kullanılmıştır.

Zimmerman ve Rostasy [6] çalışmalarında galvanizli öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlarda sürtünme katsayısını incelemiş ve galvaniz tabakasının buna etkisini araştırmışlardır. Bulon HV M16 ve toplam birleşim kalınlığı 42 mm'dir. Bir diğer çalışmalarında [7] kısa ve uzun süreli deneylerle çelik-çelik öngerilmeli yüksek mukavemetli sürtünme aktarır birleşimleri araştırmışlardır.

Fortin et. al. [8]'in çalışmasında, T6 6061 alüminyum malzeme için sürtünmeli birleşimleri deneysel araştırmıştır. Avrupa Birliği'nde sürtünme ile yük aktaran öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonların kullanımı 70'li yılların ortasında başlamasına rağmen Amerika Birleşik Devletleri'nde 1990'lı yıllarda yer bulmuştur. Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri standartlarında sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler incelenmiştir. Aluminium Design Manual ve Eurocode 9 [9] standartları esas alınmıştır. Her iki standarda göre numuneler alüminyum lamalar ve bunları birleştiren öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlardan oluşmaktadır. Yüzey hazırlanması, ısı etkileri, bulon boyutları, tutunma uzunluğu ve pul adedi değişkenleri dikkate alınarak toplam 86 adet deney sonuçları ve alüminyum bulonlu birleşimler için tavsiyeler çalışmada verilmiştir. Kullanılan bulonlar Amerika Birleşik Devletleri standardındadır. Çalışmanın sonucunda Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği standartlarının sürtünme aktarır birleşimlerini güvenli olarak değerlendirmiştir. Deneysel çalışma sonuçları bunu onaylamaktadır. Özellikle yüzeye olivine kumu püskürterek yüzeyin hazırlanması ile sürtünme katsayısının 0.40 olarak bulunduğu belirtilmiştir. Her iki ülke standardında verilen deney yöntemleri yaklaşık olarak aynı sürtünme katsayısı sonuçlarını vermiştir. Eurocode 9 da verildiği gibi, birleşimin toplam kalınlığı arttıkça, sürtünme katsayısının da buna bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Ama bu alanda daha fazla deney yapılmasının gerekliliği de vurgulanmıştır. Öngerilme kuvvetinin kaybı ile sürtünme dayanımının azalacağı belirtilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanan deney yöntemi ile yapılan deneylerde, okumalar daha değişken olmasına rağmen, Avrupa Birliği yönetmeliğine göre yapılan deneyler ile daha gerçeğe yakın ve bulon gevşemesini de içeren sonuçlar elde edilebileceği belirtilmiştir. Birleşim kalınlığına ve bulon gevşemesine bağlı etkilerin araştırılması gerektiği çalışmanın sonucunda vurgulanmıştır.

Nakagomi et. al. [10], 100 ila 350 dereceler arasında birleşim ısıtılmak suretiyle deney numuneleri hazırlanmıştır. Deneyleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Yüzeyler #36 alüminyum oksit püskürtmek suretiyle hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan bulonlar Japon standardındadır. Alüminyum alaşım olarak A6061-T6 ve A6063-T6'dır.

Yamada ve Tadao [11], çalışmalarında alüminyum ve çelik malzemenin birleşimini incelemişler, sadece iki adet deneyde birleşim yüzeylerine paslanmaz çelik tozunu anorganik boya ile uygulamışlardır. Malzeme A6063-T6, toplam birleşim kalınlığı 35 mm'dir.

Çağlayan ve Uzgider [12], çalışmalarında St52 ve HISTAR 460 çelik kalitesindeki elemanların 10.9 kalitesinde M27 öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlarla birleşimini araştırmıştır. Yöntem olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde kabul gören basınç altında kayma deneyi kullanılmıştır. Sürtünme yüzeyleri dökme çelik kumu püskürtmek suretiyle hazırlanmıştır. Birleşimde kullanılan levha kalınlığı 30 mm ve toplam birleşim kalınlığı 90 mm'dir. HISTAR 460 çeliği St52 ye nazaran daha sert bir malzeme olmasından dolayı elde edilen sürtünme katsayısı St52 malzeme kullanılan numunelerde daha yüksektir.

Valtinat et. al. [13] çalışmaları yüksek mukavemetli bulonlar ile ilgilidir. İngiliz-Amerikan ve Avrupa'da kullanılan bulonlar arasında; somun kalınlığı, başlık taban yarıçapı ve diş açılmış kısmın uzunluğu farklılık göstermektedir. HR M20 ve HV M20 bulonlar üzerinde deneyler yapılmış, her iki tip bulonun Avrupa Birliği'nde çelik yapılarda kullanımının yeterliliği araştırılmıştır. İki bulon tipi arasındaki önemli farklardan biri, uzun süreli öngerilme kuvvetinde HV bulonlarda öngerilme kuvveti miktarında HR tipi kadar oluşmayan azalmadır [14]. Bu da HV bulonların uzun süreli öngerilmeli kullanımında tercih edilmesini sağlar. Bu sebeple tez çalışmasında HV M16 öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar kullanılmıştır.

Bickford [15], bulon davranışını daha çok makine mühendislerinin perspektifinden anlatmasına rağmen, öngerilme kuvvetinin verilmesi ve uygulamada karşılaşılan durumlar için açıklamalar getirmiştir. Öngerilme ölçme bulonlarının tipleri hazırlanmaları ile ilgili bilgiler vermiştir.

Vogt [16], öngerilmeli bulonların dinamik yükler etkisi altında alüminyum yapılarda davranışını incelemiştir. Çalışmada, birleşimlerde sürtünme yüzeyinin hazırlanması ve sürtünme katsayılarını da içermektedir. Uzun süreli yükleme etkisi altında sünme davranışı da incelenmiştir. Dischinger'in beton üzerinde yaptığı çalışmayı alüminyum malzemede kullanmak suretiyle sünmeyi teorik olarak hesaplamıştır.

Mazzolani [17], kitabının mekanik birleşimler bölümünde, sürtünmeli birleşimler ve yüksek mukavemetli bulonlara yer vermiştir. Sürtünme ile aktarılabilecek yükün kullanma sınır durumu için hesaplandığını belirtmiş, öngerilme kuvvetinde azalma olmaması için yüksek mukavemetli bulonların kullanılması gerektiğine değinmiştir. Sürtünme katsayısının yüzeylerin pürüzlülüğüne ve uygulanan öngerilme kuvvetine bağlı olduğunu belirtmiştir. Avrupa Birliği tavsiyeler kitabında güvenlik katsayısı olarak 1.30'un kullanıldığını açıklamıştır. Fransa'da Hacquart ve Molina'nın, Almanya'da ise Valtinat'ın çalışmalarına yer vermiş ve konu ile ilgili tavsiyeler kitabının [18] bu çalışmalara bağlı olarak hazırlandığını belirtmiştir. Poisson oranının etkisinin özellikle ince elemanlarda sürtünme katsayısını düşürdüğü bu sebeple ince elemanların birleşiminde sürtünme aktarır birleşimlerin kullanılmaması gerektiğini belirtmiştir.

Kissel ve Ferry [19], bulonlu birleşimler ile ilgili bölümde, sürtünme aktarır birleşimlerin davranışının bilinmediğine değinmiş, bunu da alüminyum yüzeylerinin yeterli pürüzlülükte olmamasına bağlamıştır. Bu yüzden alüminyum birleşimlerde yüzeyler arasında kayma oluştuğu düşüncesi ile hesaplanması gerektiğini belirtmiştir. Bu ise Avrupa'da görülen sürtünme ile yük aktaran birleşimler yaklaşımından farklılık göstermektedir.

Sharp [20] ise alüminyum elemanların birleşiminde, alüminyum alaşımlı bulonların yanında çelik bulonların da kullanılabileceğini belirtmiştir. Sürtünme aktarır birleşimler ile ilgili herhangi bir bilgi vermemiştir. Mekanik birleşimlerin en sorunsuz birleşimler olduğuna ve gözlemlenmesinin kolaylığına değinilmiştir. Bu da göstermektedir ki, Amerika Birleşik Devletleri'nde sürtünme aktarır birleşimler yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Kulak et. al. [21], birleşim yüzeylerinin hazırlanması ile ilgili bölümde, kısa süreli kayma dayanımı üzerinde sürtünme yüzeyi kaplamasının etkisini açıklamış, çinko içerikli organik ve inorganik boyalara değinmiştir. Sürtünme ile yük aktaran birleşimlerde uygulanması gereken hesap adımlarına yer verilmiştir. Amerika

Birleşik Devletleri'nde sürtünme katsayısını belirlemede uygulanan deney yöntemi açıklanmıştır.

Eurocode 9 [9], alüminyum yapıların tasarımı standardında, kayma dayanımlı birleşimlerin kullanma ve taşıma sınır durumları için boyutlandırılabilceği açıklanmıştır. Bulonlu birleşimler sınıflara ayrılmış ve her bir sınıfın üzerine gelen yükleri ne şekilde aktardığı belirtilmiştir.

Çalışmalar göstermektedir ki, Avrupa Birliğinde 1970'li yıllardan beri uygulanan sürtünme ile yük aktaran öngerilmeli yüksek mukavemetli birleşimler, 1990'ların ikinci yarısında Amerika Birleşik Devletleri'nde yer edinmiştir. Günümüzde halen konu ile ilgili araştırmalar daha ekonomik birleşimler oluşturmak için devam etmektedir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma ile alüminyum ve çelik iki farklı malzemenin öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile birleşimi araştırılmıştır. Literatürde aynı malzemenin birleşimi için araştırmalar mevcut olmasına rağmen, farklı iki malzemenin birleşimi ile ilgili sistemli çalışmalara rastlanmamıştır.

Mevcut bir yapıya daha hafif bir yapının bağlanması durumunda, galvanizli çelik malzeme ile alüminyum malzemenin öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile birleştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkar. Kaynak kullanımı malzemelerin farklı özellikte olması sebebiyle mümkün değildir.

Yapılan deneysel çalışmalar ile, ülkemizde de yaygın üretimi olan öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonların alüminyum ve çelik iki farklı metali birleştirmede kullanılması durumunda, sürtünme yüzeylerine herhangi bir işlem yapılmaması halinde ve sürtünme artırıcı boya olarak alkali silikat çinko boya ile boyanması halinde birleşimin davranışı incelenmiştir. Daha önce öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimler ile ilgili yapılmış araştırmalar aynı cins metallerin birleştirilmesi halini içermektedir. Bu çalışma için yapılan deneylerden elde edilen veriler ile :

- Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde, hem alüminyum ve hem de galvanizli çelik temas yüzeylerine herhangi bir işlem yapılmadan sadece yüzeyler yağdan arındırılmış halde sürtünme katsayısı belirlenmiştir.

- Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde, hem alüminyum ve hem de galvanizli çelik kontak yüzeyleri yağdan arındırıldıktan sonra alkali silikat çinko boya ile boyanmış halde sürtünme katsayısı belirlenmiştir.
- Yukarıda belirtilen iki farklı temas yüzeyi haline ait yük-yerdeğiştirme diyagramları, kayma yükü ve sonrasında kopma haline kadar incelenmiştir.
- Bulonlara öngerilme kuvveti verildikten sonra, deneylere başlamadan önce 30 dakika boyunca, bulon öngerilme kuvvetindeki azalma araştırılmıştır.
- Deney başladıktan sonra yük altında bulonlardaki öngerilme kuvvetindeki değişim araştırılmıştır.
- Öngerilme kuvvetinde anlık düşüş olup olmadığı araştırılmıştır.
- Uzun süreli kayma deneyleri ile birleşimin sabit yük etkisi altında davranışı incelenmiştir. Bu deneylerde temas yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmıştır.

Deneyler aynı zamanda sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Modellerin oluşturulması ve sonuçların değerlendirilmesi için makrolar hazırlanmış ve bu makroların daha sonraki çalışmalarda kullanılması amaçlanmıştır. Sayısal modeller ile yapılan parametrik sonlu eleman çalışmaları ile :

- Temas yüzeyindeki kontak basıncına dış alüminyum levha kalınlığının ($t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm) etkisi ve levha delik yüzeyinden levha dış kenarına kontak basıncı değerinin değişimi araştırılmıştır.
- Sonlu eleman modelinde kullanılacak olan bulon modeli, literatürden alınan deney sonuçları ile düzeltilmiştir.
- Çekme deneyi farklı dış alüminyum levha kalınlıkları için ($t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm) benzetilmiş ve levhaların bağlı yerdeğiştirmesi dikkate alınarak sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Aynı benzetim levhalarda Poisson katsayısı sıfır alınmak suretiyle tekrarlanmış ve çekme kuvvetine dik yöndeki şekil değiştirmelerin sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir.
- Sıcaklık değişimi modellerde dikkate alınmıştır. Yapılan benzetim ile sürtünme katsayısına $-40, -20, +20^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farklılıklarının etkisi araştırılmıştır.

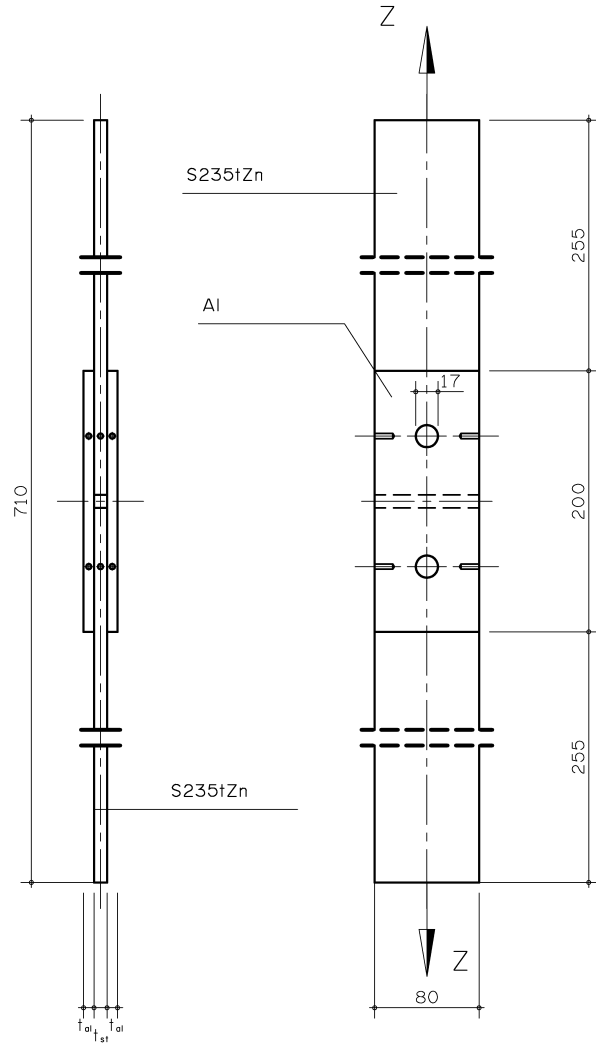
- Bulonların birleştirdiği levhaların toplam kalınlığına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim incelenmiştir. Sadece iç çelik levha kalınlığı değiştirilmek suretiyle ($t_{St}=10, 12, 14, 16, 18, 20$ mm), temas yüzeyinde oluşan kontak basıncındaki değişim incelenmiştir.
- Hesaplardan elde edilen kontak basıncı fiktif üniform yayılı yük ile tarif edilmiştir. Uzun süreli deneylerde, elde edilen zamana bağlı sonuçların, temas yüzeyinde sayısal olarak elde edilen kayma gerilmeleri ile değişimi araştırılmıştır.

2. KISA SÜRELİ KAYMA DENEYLERİNİN TANIMI

Bu bölümde kısa süreli etkiyen yükler altında alüminyum ve çelik elemanlardan oluşan birleşimlerin sürtünme ile yük aktaran davranışını belirlemek için yapılan deneyler anlatılmıştır. Deneylerde kullanılan elemanların özellikleri, öngerilme ölçümlerinde kullanılacak olan bulonlar, sürtünme artırıcı alkali silikat boya ve deney düzenini içeren bilgiler verilmiştir.

2.1 Deney Numunesi

Deneylerde kullanılan birleşim, bir adet çelik ve iki adet alüminyum lamadan oluşmaktadır. Birleşim elemanları öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlardır. Bütün deney numuneleri aynı boyuttur. Sadece alüminyum levhalarda, levha kalınlığı ve malzeme alaşımı farklılık göstermektedir. Böylece malzeme cinsinin farklılığı ve kalınlık değişiminin etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. Her bir numunede iki adet HV M16 öngerilmeli yüksek mukavemetli bulon kullanılmıştır. Birleşim ortasında kullanılan çelik levhanın kalınlığı 10 mm'dir. Numunenin her iki tarafında öngerilmeli bulonlarla aynı hizada yerdeğiştirme ölçümleri yapmak için yerdeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Birleşim elemanı ile levhalar arasındaki 1 mm'lik boşluk, yükleme sonrasında kayma kapasitesinin aşılması ile oluşacak hareketin gözlemlenebilmesi için yükleme doğrultusuna ters yönde olacak biçimde düzenlenmiştir. Şekil 2.1'de numunenin boyutları gösterilmiştir. Yerdeğiştirme ölçerlerin bağlantısı için, M4 uygunlukta açılmış deliklerin galvanizleme sonrasında herhangi bir işlem yapılmadan kullanılabilir olması istenmiştir. Bu sebeple; TU Hamburg-Harburg'da daha önceki benzer çalışmalardan [5] elde edilen deneyimler ışığında, M4 vida teflon folyo ile sarılmak suretiyle korunmuştur. Böylece, galvanizlemeden sonra yiv açılmış kısmın galvanizlenmesi önlenmiştir.



Şekil 2.1 : Kısa süreli deney numunesi boyutları.

2.2 Kullanılan Malzeme

2.2.1 Alüminyum

Alüminyum malzeme, deneylerde kullanılmak üzere Alusuisse Singen GmbH tarafından üretilmiştir. Malzeme, farklı alaşımlar ve buna bağlı olarak farklı akma mukavemetinden oluşmaktadır. Bunlar; AlMgSi1, AlZn4.5Mg1 ve AlMgSi0.5'dir. Malzeme kalınlığı 5 mm'den 10 mm'ye değişkenlik göstermektedir. Malzeme adedi ve boyutları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Alüminyum malzeme listesi.

	Malzeme	Boyutlar	Adet
1	AlMgSi1 (Anticorodal 110), (6082)	400x80x9.7	10
2	AlMgSi1 (Anticorodal 110), (6082)	400x80x8.0	10
3	AlZn4.5Mg1 (Unidur-102), (7020)	400x80x5.0	12
4	AlZn4.5Mg1 (Unidur-102), (7020)	400x80x10	6
5	AlMgSi0.5, (6063)	400x80x5.0	6

Deneyde kullanılan bütün alüminyum malzeme 80xkalınlıkx200 boyutlarında olacak şekilde hazırlanmıştır.

2.2.2 Çelik

Çelik malzeme 10 mm kalınlığında ve S235 yapı çeliği özelliklerine sahiptir. Korozyona karşı galvanizlenmiştir.

2.3 Bulonlar

Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar DIN 6914, 6915 ve 6916'ya [22, 23, 24] uygundur. Galvanizli olarak Peiner (Textron) GmbH tarafından üretilmiş 10.9 kalitesinde M16 [25, 26] boyutlarında öngerilmeli bulonlar kullanılmıştır. Bulonların öngerilme kuvvetinin ölçülebilmesi için, bulon merkezine 2 mm çapında bir delik açılmak suretiyle HBM GmbH tarafından üretilmiş 12 mm uzunluğundaki EDE kullanılmıştır. EDE'nin yapıştırılmasında normal uygulamadan farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. EDE bulon içerisinde açılan yuvaya yapıştırıldıktan sonra 140°C'de 3 saat boyunca fırınlanmıştır. Bu şekilde EDE'nin uzun süreli dayanımı sağlanmıştır. Bulon başlığına iki adet lehim noktası yapıştırılmıştır. Bulonların üst kısmına veri kablusunun zedelenmesini ve EDE'ye gelebilecek çekme kuvvetini engellemek için

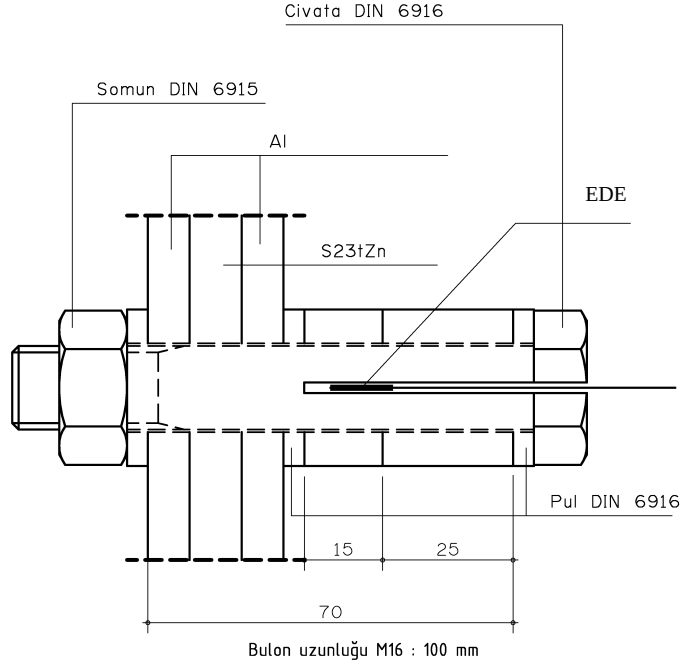
alüminyumdan yapılmış bir kapak hazırlanmıştır. Bulonların veri toplayıcı cihaza bağlanmasında altın uçlu konnektörler kullanılmıştır (HBM GmbH). Bulonların yapımında 2 mm çapında ve 70 mm derinliğinde 10.9 kalitesinde bulona delik açmak oldukça zor olmuştur. Bulonlar hazırlandıktan sonra ayrıca kalibrasyonu yapılmıştır. Hazırlanan bulon Şekil 2.3’de görülmektedir.

Öngerilmeli yüksek mukavemetli ölçüm bulonları aşağıdaki adımlar takip edilerek kalibre edilmişlerdir [5].

1. Bulon test düzeneğine yerleştirilmiştir.
2. Öngerilme yüklemesiz ilk ölçüm yapılmıştır.
3. Birinci yükleme adımında bulon yaklaşık 10 adımda 0 kN’dan başlanarak $1.2 \times P_v$ ’ye kadar yüklenmiş, 10 saniye beklendikten sonra okuma yapılmış ve yük boşaltıldıktan sonra 10 saniye sonra yeni değerler okunmuştur. Yükleme ve boşaltma hızı $v = \pm 2$ kN/sn’dir.
4. 2’den 11’e kadar olan yükleme adımlarında, bulon 10 kez tek seferde yüklenmiş ve boşaltılmıştır. Yükleme sınırı 0 kN ile $1.2 \times P_v$ arasındadır. Her adımda 15 saniye durulmuştur. Yükleme ve boşaltma hızı 5 kN/sn’dir.
5. 3 no’lu adım 3 kez tekrarlanmıştır.
6. Son 3 okumadan elde edilen değerler ile kalibrasyon katsayısı hesaplanmıştır. Hesaplama doğrusal regresyon çözümlemesi yapılmıştır.
7. Yüklemedeki fark ile bulondaki ölçülen öngerilme kuvveti karşılaştırılmış ve bu şekilde kalibrasyonun doğruluğu kontrol edilmiştir.
8. Standart sapma değerinin, P_v kuvvetinin %1.0 sınır değeri içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilmiştir. Eğer sınırlar arasında kalmıyorsa, kalibrasyon adımları tekrarlanmıştır. EDE’de sabit bir okuma görülmüyorsa, yeni EDE uygulanması için eskisi sökülüştür.

2.4 Birleşim Yüzeylerinin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan birleşim yüzeyleri iki şekilde hazırlanmıştır. Bunlardan birincisinde yüzeylere herhangi bir işlem yapılmamış ve sadece galvanizli olarak kullanılmıştır. Yüzeyler yağ ve kirden arındırılmıştır.



Şekil 2.3 : Öngerilmeli yüksek mukavemetli ölçüm bulonu.

Birleşimin sürtünme ile aktarabileceği yükü büyütmek amacıyla alkali silikat çinko sürtünme artırıcı boya, alüminyum ve çelik birleşim yüzeylerine uygulanmıştır. Boya, uygulamadan önce hazırlanmıştır. Çinko tozu, potasyum suyu ile karıştırılmış ve yağdan arındırılmış yüzeylere uygulanmıştır. Uygulamada fırça kullanılmış ve birleşim yüzeylerine homojen olarak sürülmesine çalışılmıştır.

2.5 Deney Yükleme ve Kayıt Cihazları

Yükleme makinesi olarak kısa süreli statik deneylerde servo-hidrolik kontrollü Instron International Limited, Offenbach / Main, Instron 8503 kullanılmıştır. Verinin alınması ve kaydedilmesinde Catman Ver4. yazılımı kullanılmıştır. Cihazın yükleme kapasitesi $P_{maks} = \pm 500$ kN'dur.

Test düzeni içinde, yerdeğiştirmelerin ölçülmesinde Hottinger Baldwin firmasına ait yerdeğiştirme ölçer W10 kullanılmıştır. Ölçüm hassasiyeti 1/1000'dir.

Test düzeni, test cihazı ve kontrol panosu (Catman hariç) sırasıyla Şekil 2.4, 2.5 ve 2.6’da gösterilmiştir.

2.6 Deney Adımları

Bu kısımda deney sırasında uygulanan adımlara yer verilmiştir. Deneyler kuvvete bağlı yükleme ile yapılmıştır.

2.6.1 Deney numunelerinin kapasitelerinin hesabı

Deney numunelerinin kapasite ve boyutları hesaplanırken, DIN 18 800 [27] ve Eurocode 9 [9] dikkate alınmış, herhangi bir güvenlik katsayısı kullanılmamıştır [28-32].

Enkesit tarafından taşınabilecek kuvvet P_n ,

$$P_n = A_n \times f_y \quad (2.1)$$

Makaslama ile taşıyabileceği kuvvet P_{sh} ,

$$P_{sh} = 0.55 \times A_s \times f_{ub} \quad (2.2)$$

Ezilme ile taşınabilen kuvvet P_l ,

$$P_l = \alpha_l \times t \times d_s \times f_y \quad (2.3)$$

Sürtünme ile taşınabilen kuvvet P_g ,

$$P_g = 2 \times \mu \times F_v \quad (2.4)$$

kullanılmıştır. Burada; μ : sürtünme katsayısını, F_v : öngerilme kuvvetini, A_s : bulon kesiti alanını, f_{ub} : bulon kopma gerilmesini, A_n : net enkesit alanını, f_y : akma gerilmesini, d_s : bulon çapını, α_l : ezilme katsayısını ve t : yük etkisindeki elemanın kalınlığını göstermektedir. Birleşime ait hesaplarda kullanılan özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir [33, 34]. (2.1)-(2.4) bağıntılarının sonuçları Çizelge 2.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 : Deneyler için birleşim hesabında kullanılan özellikler.

Test No	μ_{ini}	F_v [kN]	t_{Al} [mm]	f_{yAl} [N/mm ²]
1-2	0.20	100	5	275
2-2	0.20	100	5	275
3-2	0.20	100	5	275
4-2	0.20	100	5	160
5-2	0.20	80	5	160
6-2	0.60	75	5	275
7-2	0.60	75	5	275
8-2	0.60	75	5	275
9-2	0.60	50	5	160
10-2	0.60	50	5	160
11-2	0.60	75	10	275
12-2	0.60	75	10	275
13-2	0.60	75	9.7	255
14-2	0.60	75	9.7	255

2.6.2 Deney numunelerinin listesi

Deneyler tanımlanırken, isimlendirilmesinde ek olarak ‘1’ ve ‘2’ no’ları kullanılmıştır. ‘1’ yükleme öncesi öngerilme kuvvetindeki azalmayı gözlemlemek amacıyla yapılan 30 dakikalık deneyi belirtir, ‘2’ ise kısa süreli yükleme deneylerini tanımlar.

Sürtünme yüzeylerinin hazırlanmasını tariflemeye, ‘glz’ sadece yağdan arındırılmış ve herhangi başka işlem yapılmamış durumu, ‘p’ ise alkali silikat çinko boya ile boyanmış hali ifade eder. Bütün numunelerde HV M16 DIN 6914 kullanılmıştır.

Çizelge 2.3 : Birleşimde enkesit, makaslama, ezilme ve sürtünme ile taşınabilen kuvvetler.

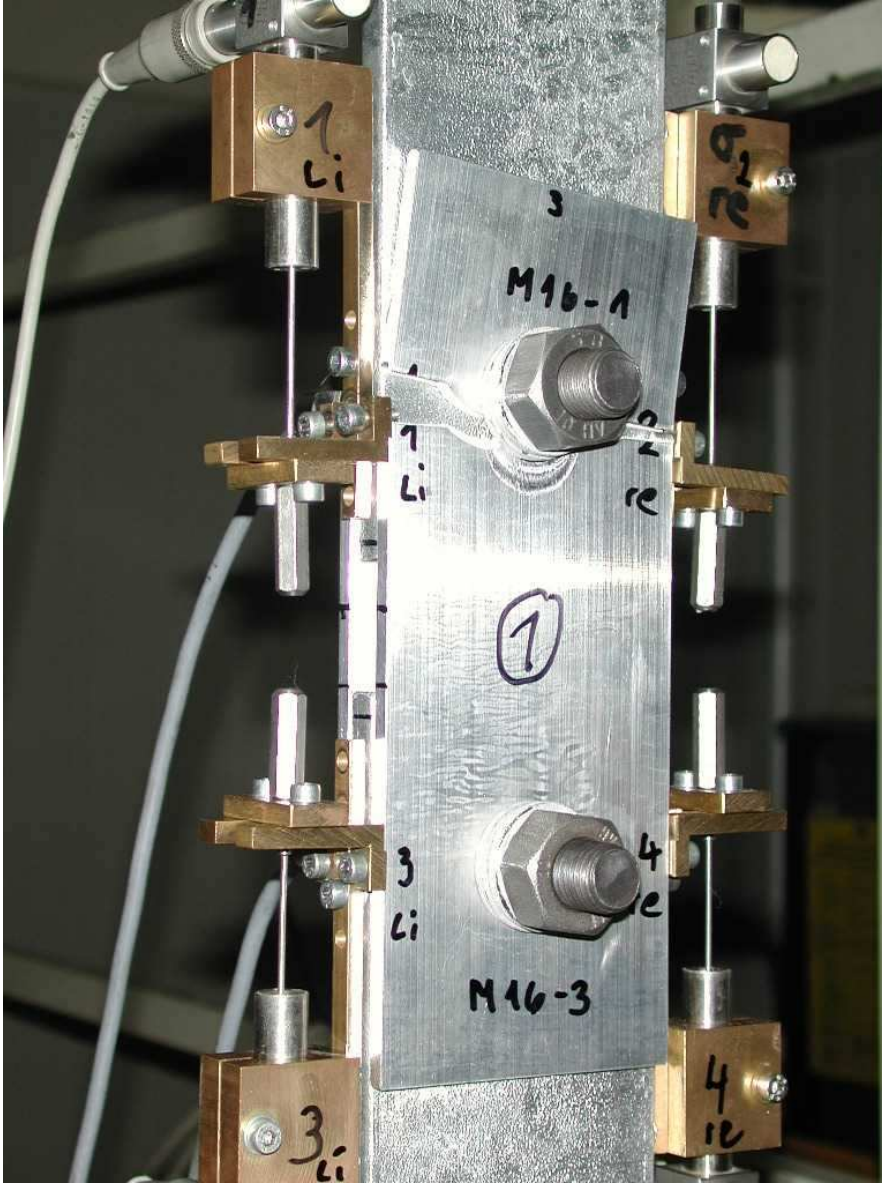
Test No	Enkesit			Makaslama	Ezilme			Sürtünme	min P [kN]
	P _{nSt} [kN]	P _{nAl} [kN]	P _n [kN]	P _{sh} [kN]	P _{lst} [kN]	P _{lAl} [kN]	P _l [kN]	P _g [kN]	
1-2	151.20	173.25	151.20	221.17	100.29	114.92	100.29	40.00	40.00
2-2	151.20	173.25	151.20	221.17	100.29	114.92	100.29	40.00	40.00
3-2	151.20	173.25	151.20	221.17	100.29	114.92	100.29	40.00	40.00
4-2	151.20	100.80	100.80	221.17	100.29	66.86	66.86	40.00	40.00
5-2	151.20	100.80	100.80	221.17	100.29	66.86	66.86	32.00	32.00
6-2	151.20	173.25	151.20	221.17	100.29	114.92	100.29	90.00	90.00
7-2	151.20	173.25	151.20	221.17	100.29	114.92	100.29	90.00	90.00
8-2	151.20	173.25	151.20	221.17	100.29	114.92	100.29	90.00	90.00
9-2	151.20	100.80	100.80	221.17	100.29	66.86	66.86	60.00	60.00
10-2	151.20	100.80	100.80	221.17	100.29	66.86	66.86	60.00	60.00
11-2	151.20	346.50	151.20	221.17	100.29	229.83	100.29	90.00	90.00
12-2	151.20	346.50	151.20	221.17	100.29	229.83	100.29	90.00	90.00
13-2	151.20	311.66	151.20	221.17	100.29	206.73	100.29	90.00	90.00
14-2	151.20	311.66	151.20	221.17	100.29	206.73	100.29	90.00	90.00

2.6.3 Ölçülen Değerler

Yapılan deneylerden ölçülen değerler, aşağıda tanımlanan R sürtünme katsayısı ile irdelenmiştir.

R, sürtünme katsayısı, $R = Z / (2 \times (S_1))$ olarak hesaplanmıştır. Burada; Z, deney numunesine o an etkiyen yükü, S_1 ise numunenin değerlendirilen yarısında o an öngerilme bulonuna etkiyen kuvveti belirtir.

Uluslararası çalışmalarda kabul gören 0.15 mm'lik [35] levhalar arasındaki yerdeğiştirme anı için hesaplanan anlık sürtünme katsayısı değeri, birleşimin statik sürtünme katsayısı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2.4 : Deney numunesi ve yerdeğiştirme ölçerler.



Şekil 2.5 : Instron 8503'te deney numunesi.

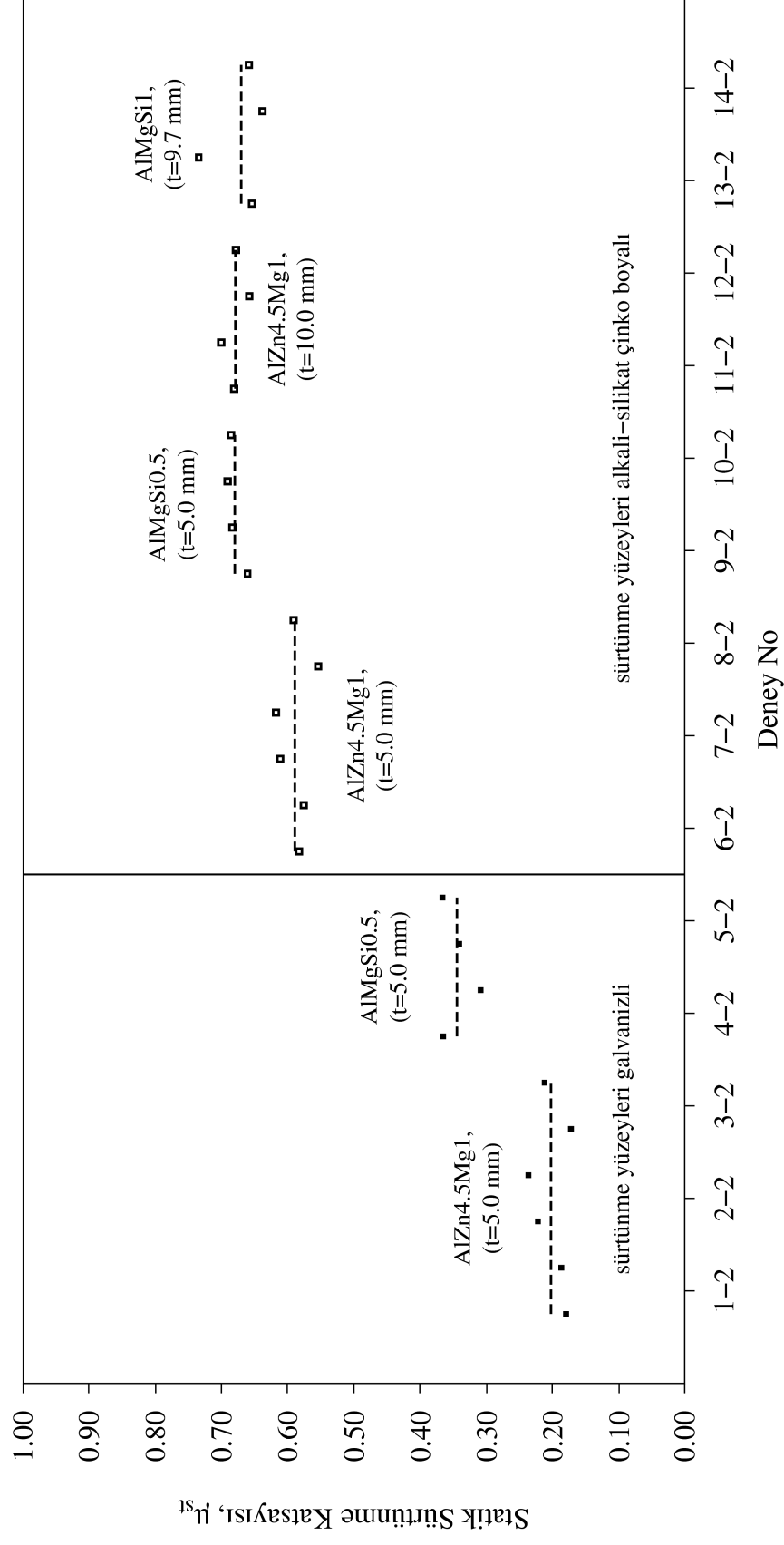


Şekil 2.6 : Instron 8503 kumanda paneli.

2.7 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deney sonuçları; numune boyutları, sürtünme yüzeyinin hazırlanışı, alüminyum levhaların kalınlığı ve alüminyum malzemenin özelliği, uygulanan öngerilme kuvveti de dikkate alınarak aşağıdaki Çizelge 2.4’de ve Şekil 2.7’de özetlenmiştir.

Deneylerin ilk kısmında; 30 dakika süre ile bulonda öngerilme kuvvetindeki azalma araştırılmıştır. Bu şekilde alüminyumun elastisite modülünün çeliğe göre azlığı ve alüminyumun yüksek gerilme halinde sünmeye eğiliminin, bulon öngerilme kuvvetine etkisi incelenmiştir. Bu tür bir ölçümün daha uzun süreli yapılması daha gerçekçi sonuçlar verecek olmasına rağmen, bugüne kadar yapılan çalışmalardan gözlemlenen bulon öngerilme kuvvetindeki azalmanın ilk 10 dakikalık sürede gerçekleştiğini göstermektedir. En fazla öngerilme kuvvetinin ilk 30 dakikada azalacağı düşünülmüş ve ölçüm buna uygun olarak yapılmıştır.

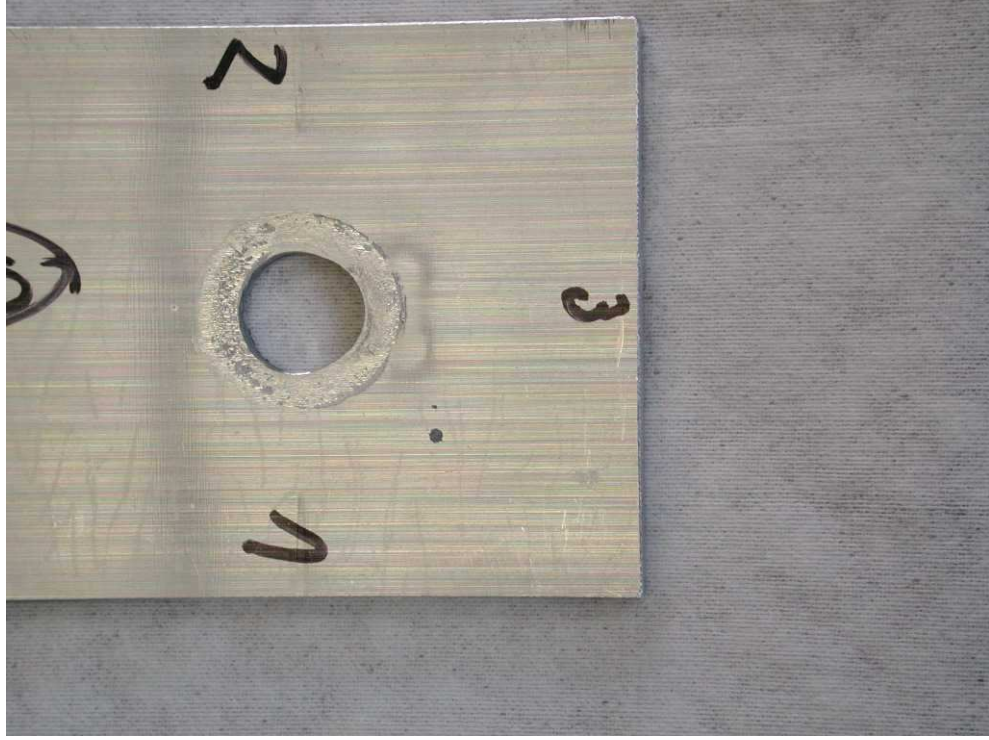


Şekil 2.7 : Kısa süreli deneyler sürtünme katsayısı özet diyagramı.

Çizelge 2.4 : Kısa süreli kayma deneyi listesi.

No.	Eleman (S235)			2 Ek Levhası			Bulonlar	$f_{0.2}$ (N/mm ²)	σ_p
	b mm	t mm	glz / p	t mm	g / p	Malzeme	2x1HVM16 F _v kN		
1	80	10	glz	5	g	AlZn4.5Mg1	100	275	289
2	80	10	glz	5	g	"	100	275	289
3	80	10	glz	5	g	"	100	275	289
4	80	10	glz	5	g	AlMgSi0.5	100	160	289
5	80	10	glz	5	g	"	80	160	231
6	80	10	p	5	p	AlZn4.5Mg1	75	275	217
7	80	10	p	5	p	"	75	275	217
8	80	10	p	5	p	"	75	275	217
9	80	10	p	5	p	AlMgSi0.5	50	160	145
10	80	10	p	5	p	"	50	160	145
11	80	10	p	10	p	AlZn4,5Mg1	75	275	217
12	80	10	p	10	p	"	75	275	217
13	80	10	p	9.7	p	AlMgSi1	75	255	217
14	80	10	p	9.7	p	"	75	255	217

Birleşim elemanlarının ayrılmasından sonra, alüminyum yüzeyindeki bulonda kullanılan pulun altında ezilme olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.8). Bu tür bir ezilme, genelde alüminyum kayma kritik birleşimlerde görülür. Birleşimde öngerilme kuvvetinin daha geniş bir alandan yayılmasını sağlayacağından, daha büyük ve kalın pul kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür [36].



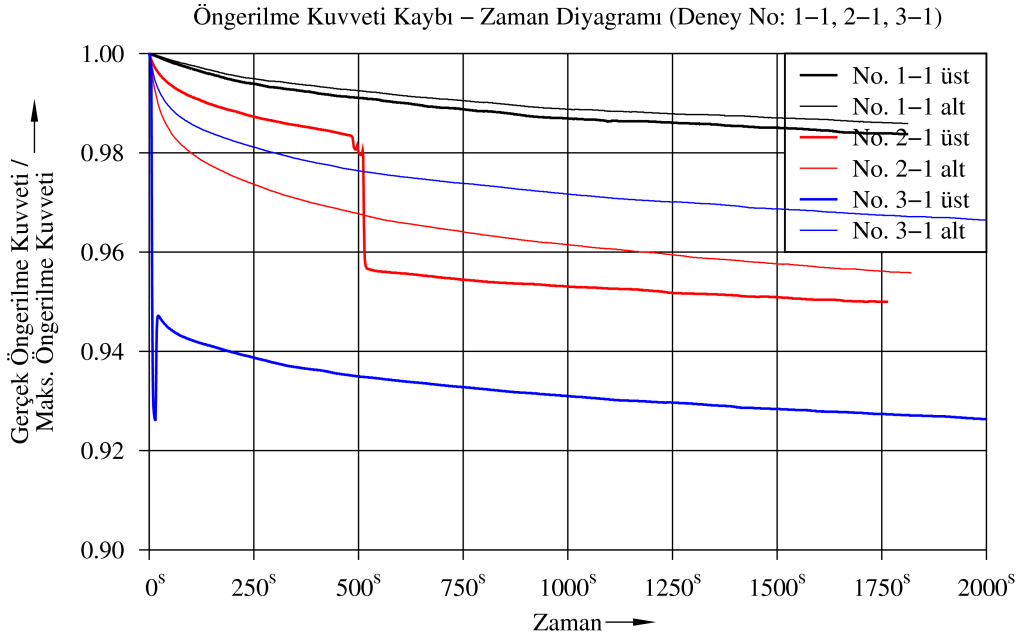
Şekil 2.8 : Öngerilmeli bulon pul altında alüminyumda oluşan ezilme.

Kayma deneylerinde toplam dokuz farklı veri okunmuştur. Bunlar, zaman, deney numunesinde çekme kuvveti, test cihazındaki yerdeğiştirme, iki bulona ait öngerilme kuvveti, ikisi üst diğer ikisi alt olmak üzere toplam dört adet alüminyum ve çelik lamalar arasındaki yerdeğiştirmedir. Bu okumalar saniyede 20 ile 10 sıklıkla yapılmıştır.

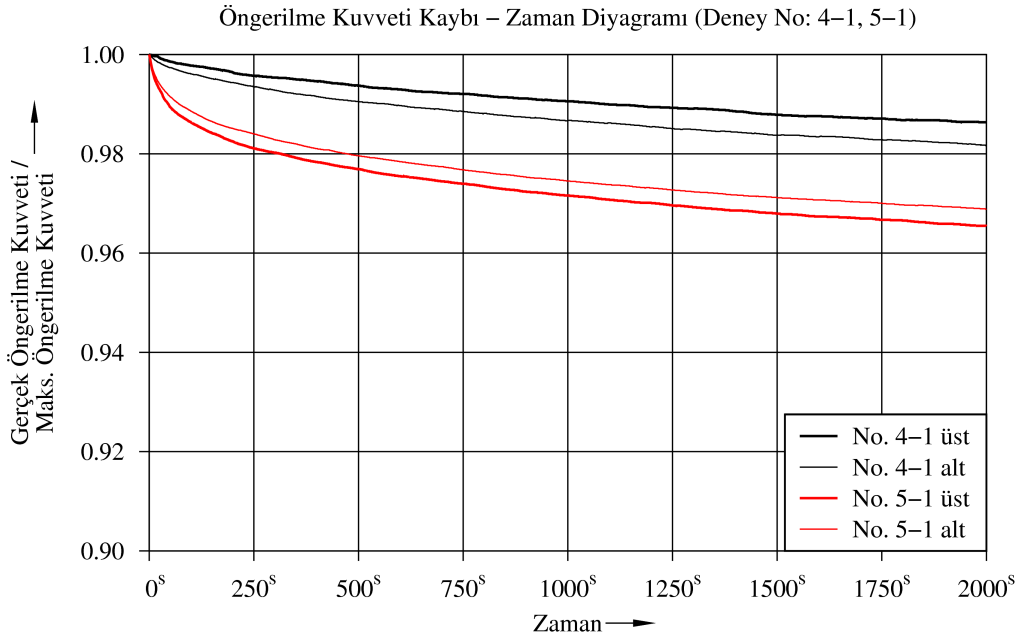
2.7.1 Öngerilme Kuvvetinde Azalma

İlk grupta yapılan deneylerde, bulondaki öngerilmeye azalma gözlemlenmiştir. Şekil 2.9'da deney no 1-1, 2-1 ve 3-1 e ait gözlemler verilmiştir. Burada düşey ekseninde verilen değer, maksimum öngerilme kuvvetine bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Malzeme S235 galvanizli $t=10$ mm'lik çelik lamadan oluşmaktadır. 2 adet alüminyum lama $AlZn4.5Mg1$ malzemesindendir. Öngerilme kuvveti $F_v=100$ kN'dur. Herhangi sürtünme artırıcı boya kullanılmamıştır. Yüzeyler sadece yağdan

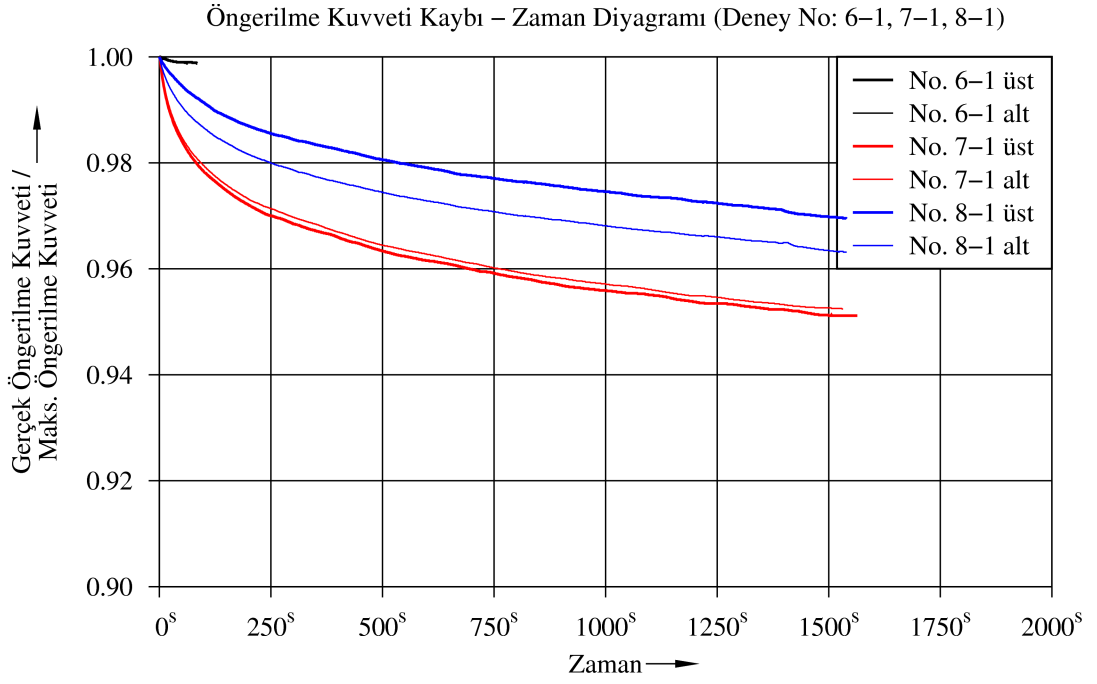
arındırılmıştır. Şekil 2.9 ve 2.10’da verilen diyagramlar, deney numunelerinde levha temas yüzeylerinin sadece yağdan arındırılmış olduğu durumu, Şekil 2.12-2.14’de ise levha temas yüzeylerinin alkali silikat çinko boya ile boyanmış olduğu durumu göstermektedir.



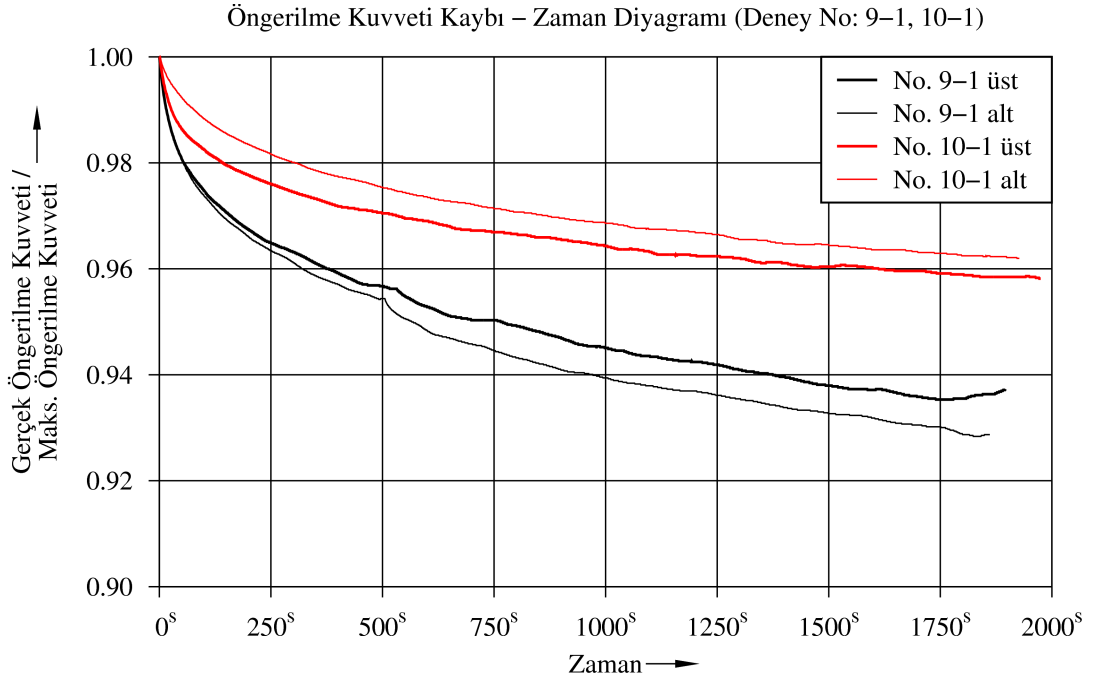
Şekil 2.9 : AlZn4.5Mg1 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 100$ kN, kontak yüzeyleri herhangi bir başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.



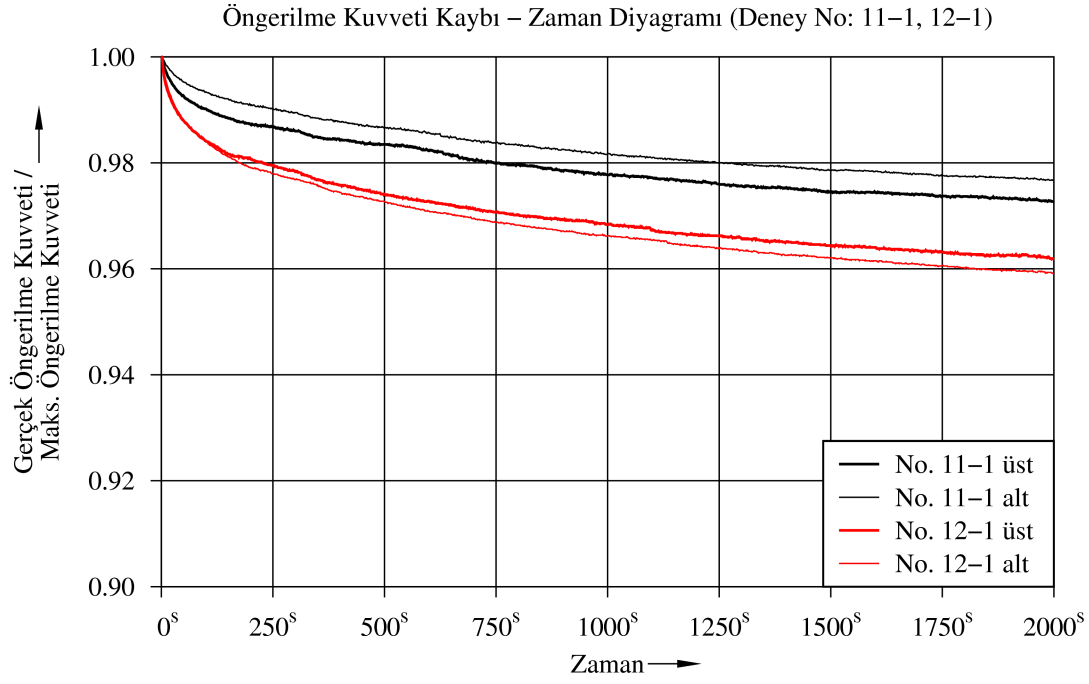
Şekil 2.10 : AlMgSi0.5 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 100$ kN, kontak yüzeyleri herhangi bir başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.



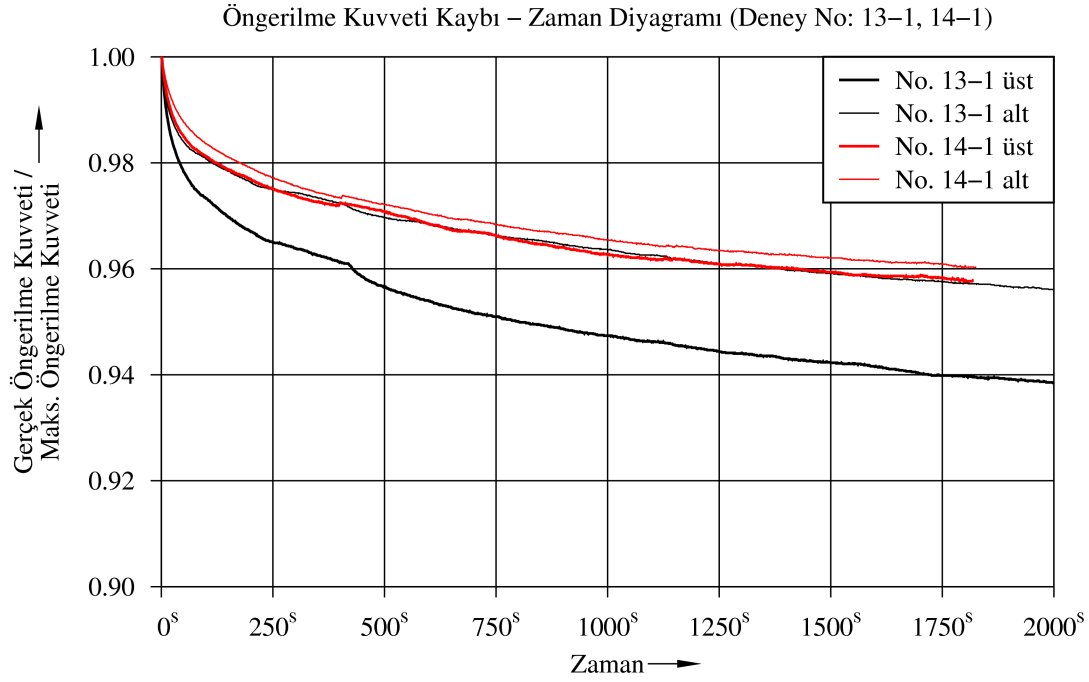
Şekil 2.11 : AlZn4.5Mg1 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.



Şekil 2.12 : AlMgSi0.5 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 50$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.



Şekil 2.13 : AlZn4.5Mg1 (80x10...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.



Şekil 2.14 : AlMgSi1 (80x9.7...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Bu deneylerden beklenen düşük sürtünme katsayısı ve düşük gerilmeler, birleşimin kayma yükünde akma gerilmesinin altında zorlanmasına sebep olur. Bu yüzden, toplam $F_v=100$ kN'luk öngerilme kuvveti bulonlara verilmiştir. ngerilme yükündeki azalma, şekillerden görülebileceği gibi %2 ile %7 arasındadır. En büyük öngerilme kaybı ilk 10 dakikada gözlenmiştir.

şekil 2.10'da deney grubu 4-1 ve 5-1'de orta galvanizli elik lama ve iki adet alüminyum lama AlMgSi0.5 alaşımından ve kontak yüzeyleri herhangi boyama yapılmadan sadece yağdan arındırılmış olarak düzenlenmiştir. ngerilme kuvveti $F_v=100$ kN'dur. Bu deneylerde kullanılan alüminyum alaşım, diğer alaşıma göre daha zayıftır. Bu yüzden 5-2 test numunesinde öngerilme kuvveti azaltılmıştır. Böylece numunenin kaymadan önce kopma yüküne erişmesi engellenmiştir. Bu deney numunelerinde, ilk 30 dakikada öngerilme kuvvetindeki azalma daha fazladır.

Deney no 6-1, 7-1 ve 8-1'de malzeme S235 ve AlZn4.5Mg1 alaşımıdır. Alkali silikat çinko boya ile boyanmış ve öngerilme kuvveti olarak $F_v=75$ kN uygulanmıştır. Bu deneylerde alkali silikat çinko boya sebebiyle daha yüksek sürtünme katsayısı beklenmiştir. Bu da yine 4-1 ve 5-1 grubunda olduğu gibi numunede yüksek gerilmelerin oluşmasına ve net kesitte akmanın gözlemlenmesine sebep olmuştur. Bulon ngerilme kuvveti standart $F_v=100$ kN değerinden $F_v=75$ kN'a dşrlmştir. En büyük öngerilme azalması ilk 10 dakikada gözlemlenmiştir (şekil 2.11).

Deney 9-1 ve 10-1'de malzeme galvanizli elik S235 ve alüminyum AlMgSi0.5 ve bulonda öngerilme kuvveti $F_v=50$ kN'dur. Kontak yüzeyleri alkali silikat çinko boya ile boyanmıştır. Daha düşük bir öngerilme yükleme uygulanmasına rağmen yukarıda belirtilen diğer deneylerde gözlemlenen oranlarda öngerilme kuvvetinde azalma gözlenmiştir (şekil 2.12).

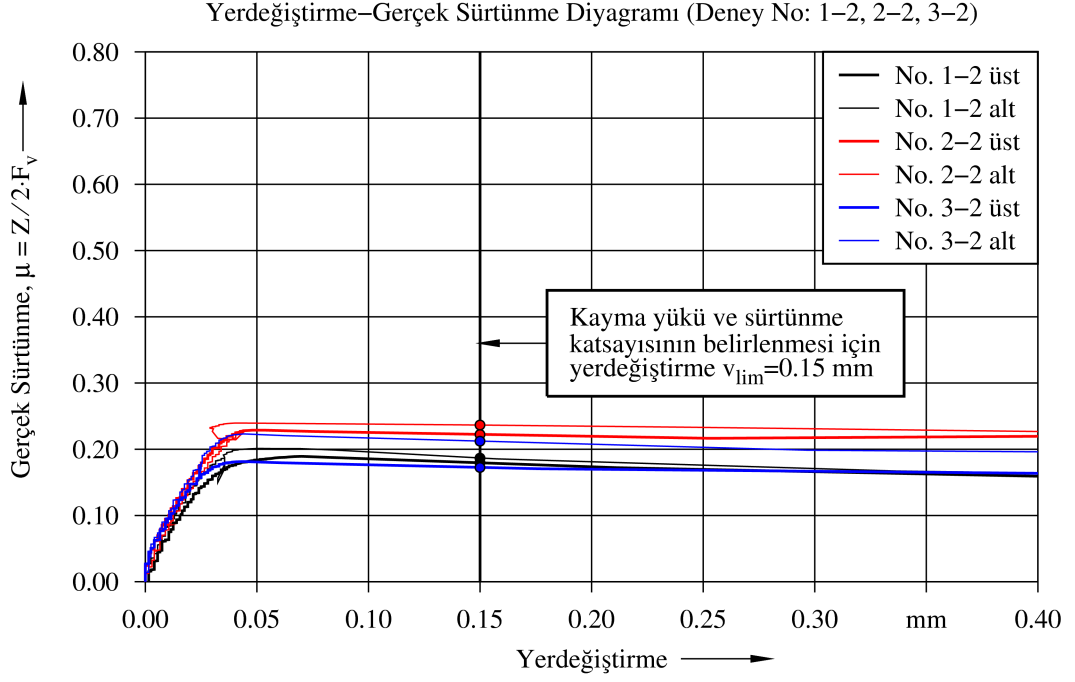
Deney 11-1, 12-1, 13-1 ve 14-1 numuneleri, daha önce yapılan deneylere göre sadece alüminyum elemanların kalınlıkları yönünden farklılık göstermiştir (şekil 2.13-2.14).

2.7.2 Sürtünme katsayısı diyagramları

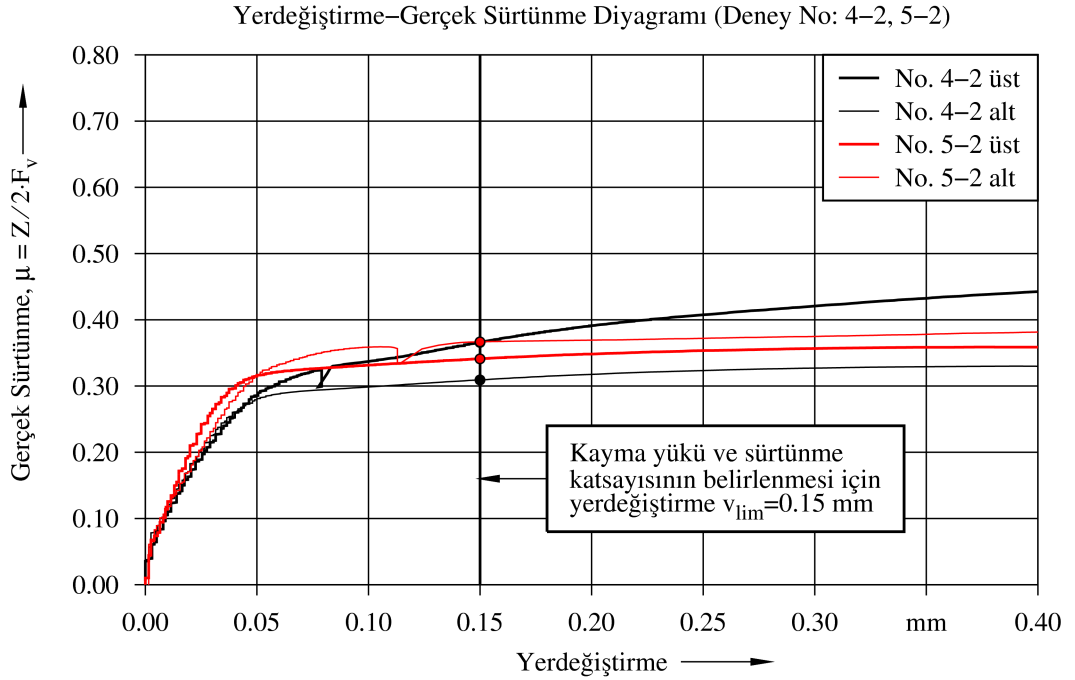
Şekil 2.15-2.16'da, anlık sürtünme katsayısı düşey ekseninde ve birleşen parçalar arasındaki yerdeğiştirme ise yatay ekseninde olmak üzere verilmiştir. Göreli yerdeğiştirmenin 0.15 mm olduğu an için test yükünün öngerilme yüküne bölünmesiyle hesaplanan sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Bu prosedür, uzunca bir süredir ECCS Teknik Komite 10 tarafından kabul edilmektedir. Bu limit göreli yerdeğiştirme, bütün diyagramlarda belirtilmiştir. Kayma yüzeyleri, kum püskürtme ile hazırlanmış çelik lamaların kaymasındaki gibi ani olarak değil daha düzenli ve yavaş olmaktadır. Herhangi bir boya kullanılmamış iki adet numunede, sürtünme katsayıları 0.20 ile 0.34 olarak belirlenmiştir. Bu değerler; kontak yüzeyleri herhangi bir işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılarak hazırlanmış birleşimlerin ekonomik olarak değerlendirilebilmesi için yeterli değildir.

Şekil 2.17-2.20'de görülen sürtünme yerdeğiştirme diyagramlarında kontak yüzeyleri alkali silikat çinko boya ile boyanmıştır. 0.15 mm sınır yerdeğiştirme için elde edilen sürtünme katsayıları gösterilmiştir. Bu değerler 0.58 ile 0.68 arasındadır. Bu büyüklükteki sürtünme katsayıları, tıpkı çelik-çelik ve alüminyum-alüminyum birleşimlerde daha önce gözlemlenenlerden farklı değildir. En yüksek değerlerin daha zayıf olan AlMgSi0.5 alüminyum alaşımında gözlemlenmesinin sebebi bilinmemektedir.

Şekil 2.21'de; bulonda düşey ekseninde öngerilme yükü ve yatay ekseninde ise göreli yerdeğiştirmenin verildiği grafiklerde öngerilme kuvvetinin yükleme ile nasıl değiştiği gözlemlenebilir. 0.05 mm'lik yerdeğiştirmeden sonra, öngerilme kuvvetinde %2 kadar bir azalma gözlemlenmiştir. Bu düşüşten sonra düşüş devam etmesine rağmen oranı azalmıştır. Deneylerde ani bir öngerilme kuvvetinde azalma gözlemlenmemiştir. Şekil 2.21; 1-2, 2-2 ve 3-2 numuneleri için bu durumu göstermektedir.

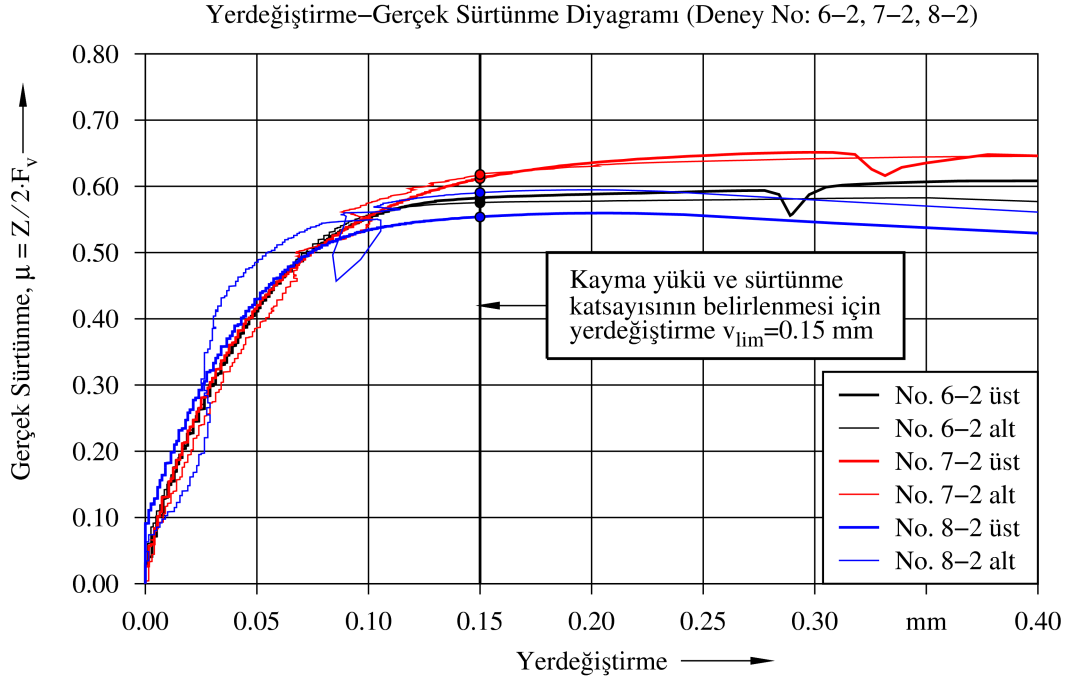


Şekil 2.15 : AlZn4.5Mg1 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 100$ kN, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.

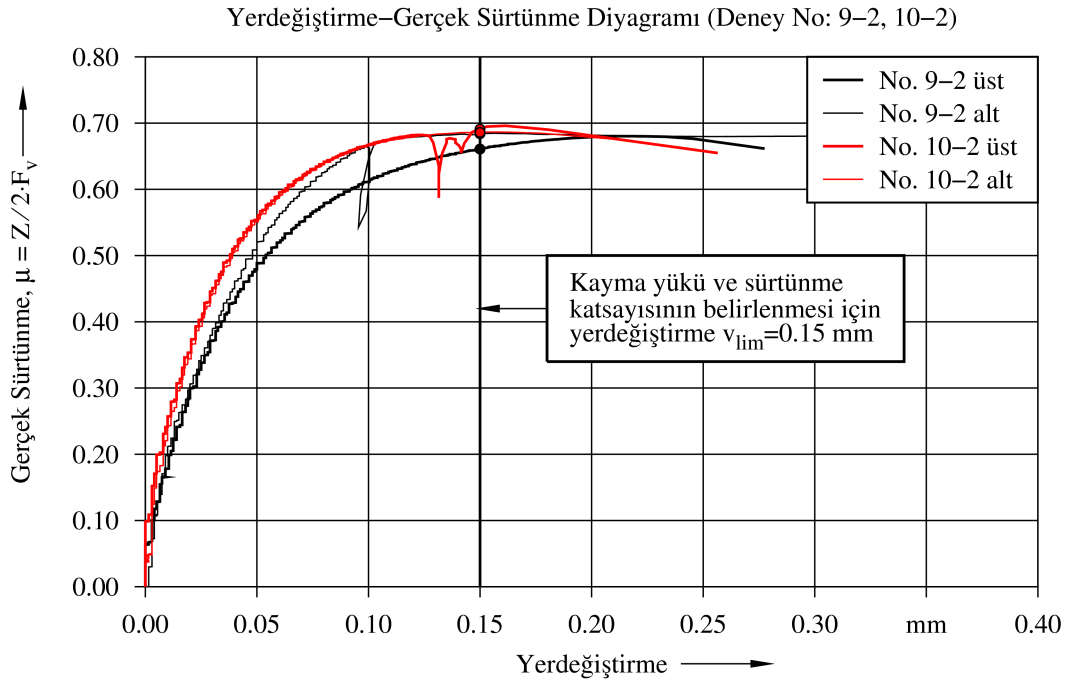


Şekil 2.16 : AlMgSi0.5 (80x5...400), S235 galvanizli, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış [No.4-2 : $F_v = 100$ kN, No.5-2 : $F_v = 80$ kN].

Şekil 2.15 ve 2.16’da verilen diyagramlar, deney numunelerinde levha temas yüzeylerinin sadece yağdan arındırılmış olduğu durumu göstermektedir.

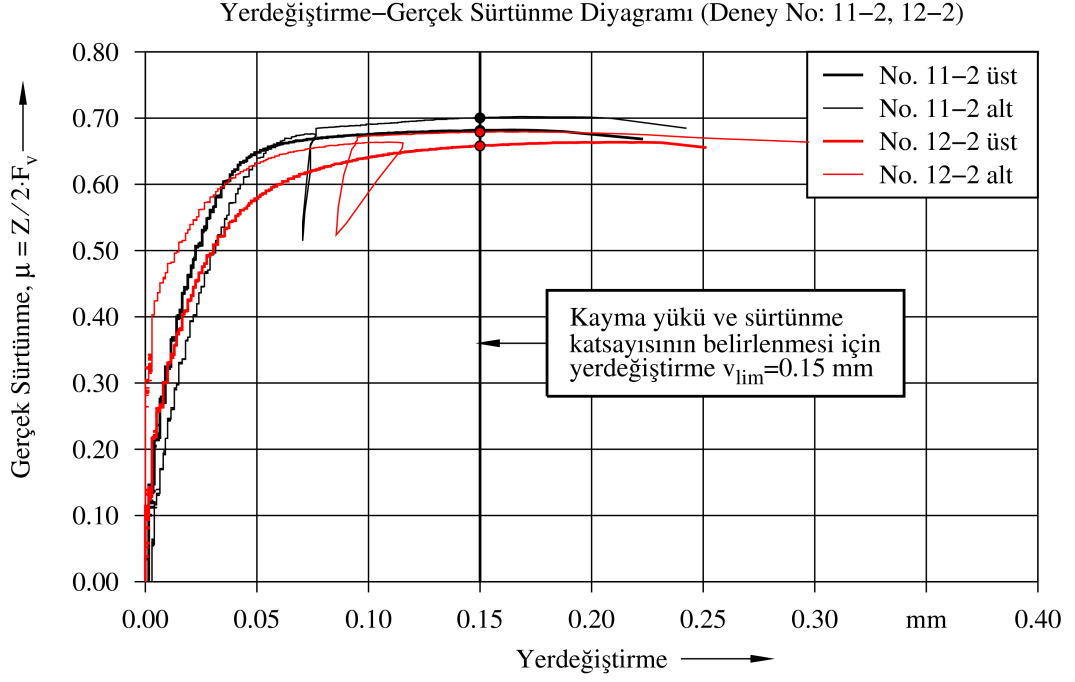


Şekil 2.17 : AlZn4.5Mg1 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

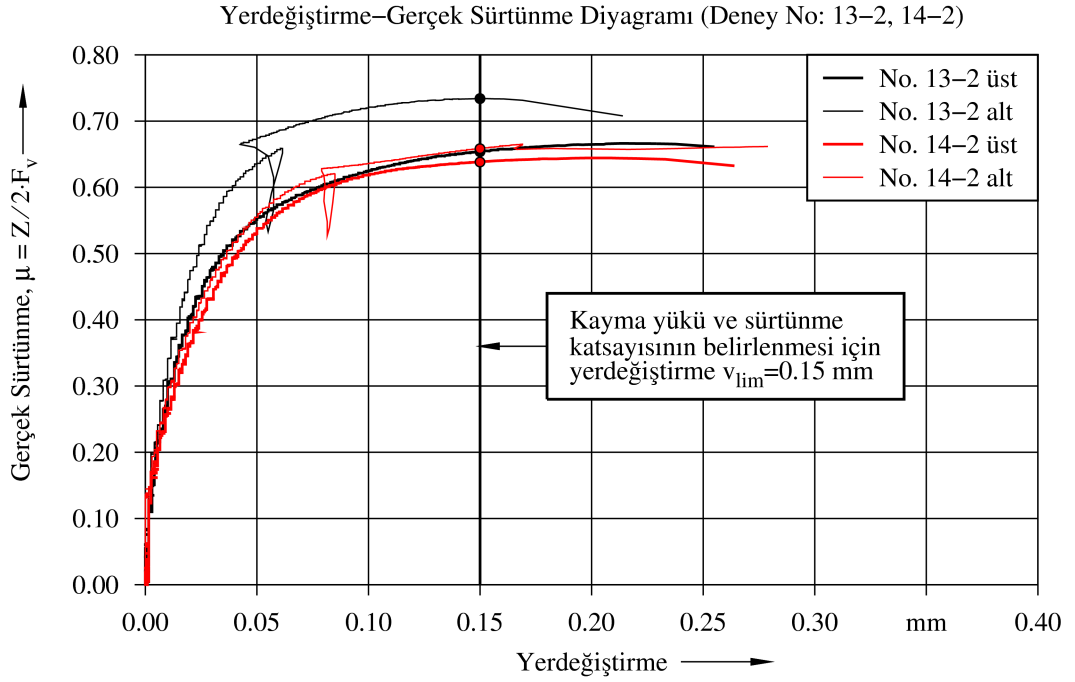


Şekil 2.18 : AlMgSi0.5 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 50$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Şekil 2.17-2.20 levha temas yüzeylerinin alkali silikat çinko boya ile boyanmış olduğu durumu göstermektedir.

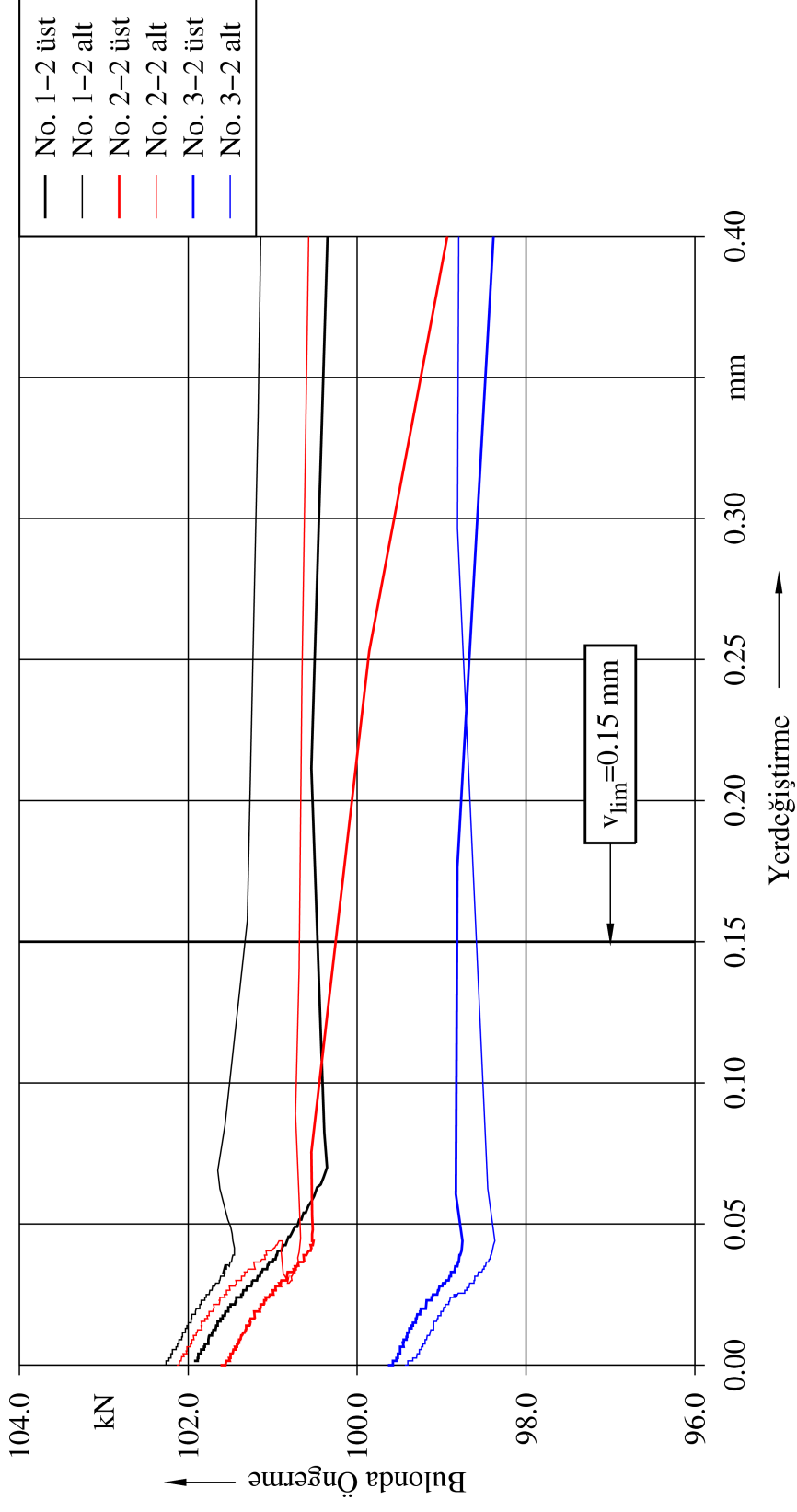


Şekil 2.19 : AlZn4.5Mg1 (80x10...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

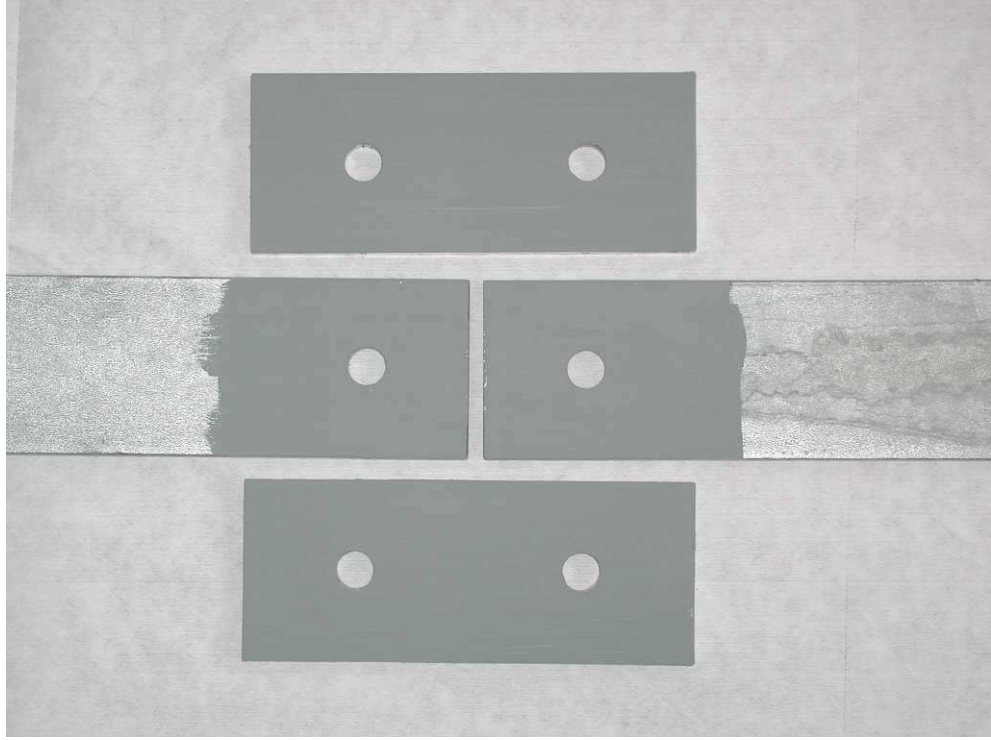


Şekil 2.20 : AlMgSi1 (80x9.7...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

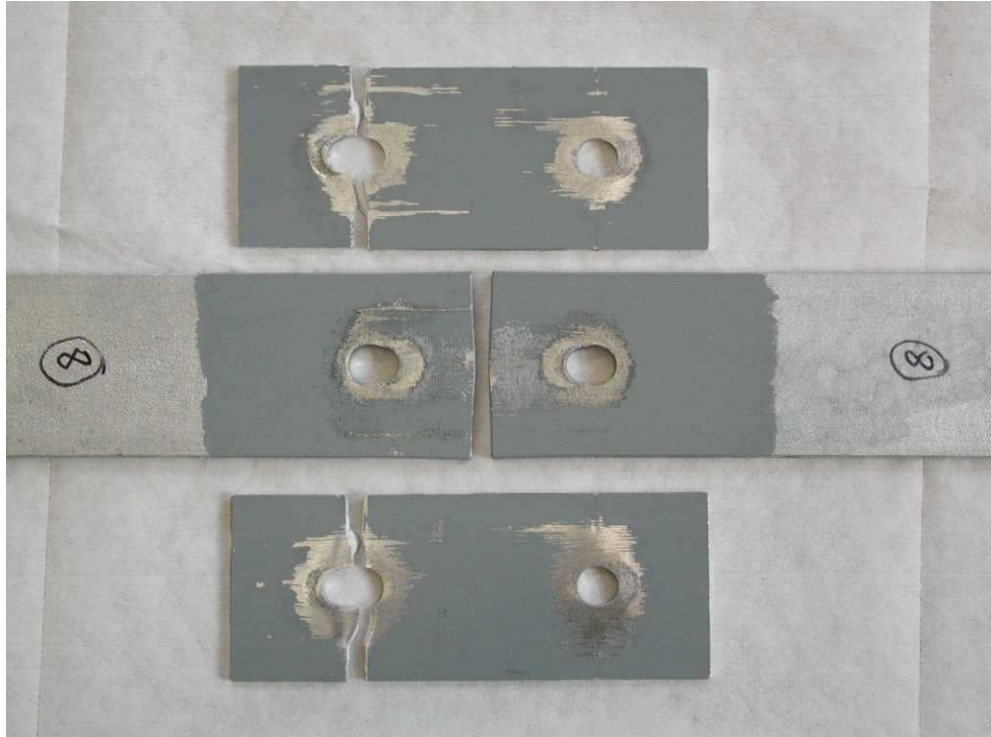
Yerdeğiştirme-Bulonda Öngerme Diyagramı (Deney No: 1-2, 2-2, 3-2)



Şekil 2.21 : AlZn4.5Mg1 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 100 \text{ kN}$, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.



Şekil 2.22 : Alkali silikat çinko bileşimi ile boyanmış kontak yüzeyleri.



Şekil 2.23 : Deney sonrasında sürtünme yüzeyleri ve alüminyum lamada çekme kopması ($t_{Al}=5.0$ mm).

Şekil 2.22’de sürtünme artırıcı boyanın uygulandığı galvanizli çelik ve alüminyum lamalar görülmektedir. Boya hazırlandıktan sonra 8 saat içerisinde kullanılmalıdır.

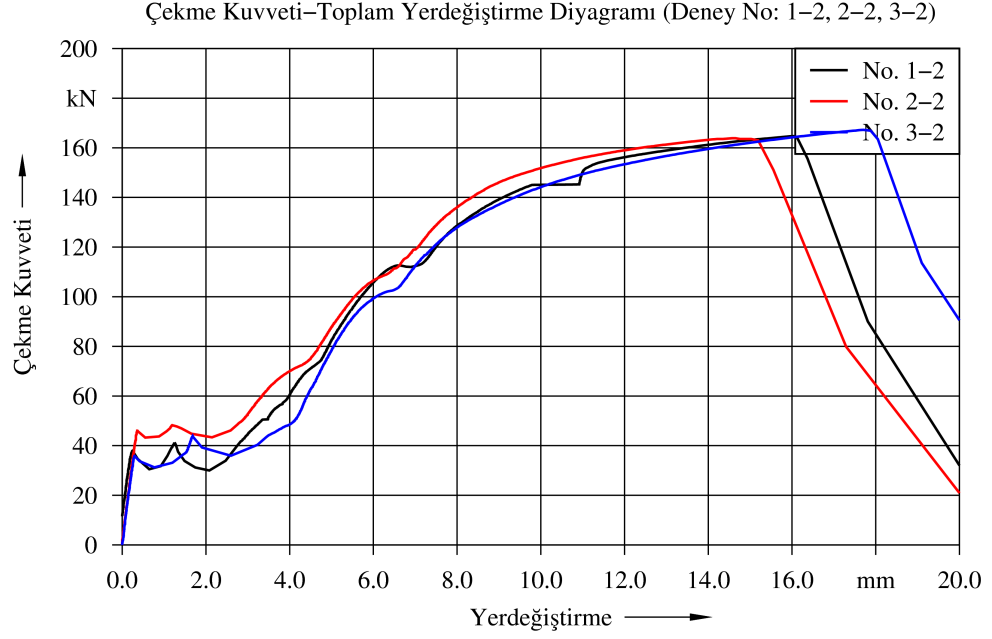


Şekil 2.24 : Deney sonucunda çelikte kayma sonucu kopma ($t_{Al}=10.0$ mm).

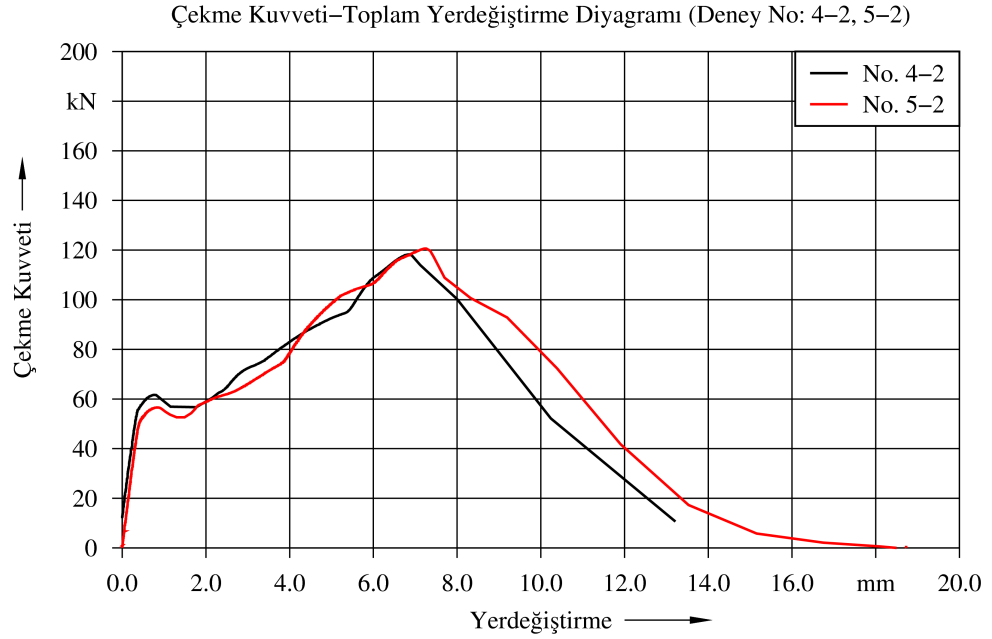
Şekil 2.23 ve 2.24 de, 5 mm kalınlığında alüminyum lamaların kullanıldığı numunede, sürtünme yüzeyinin 10 mm’lik alüminyum elemanlardaki sürtünme yüzeyine nazaran küçüklüğü gözlemlenebilmektedir. Şekillerden, ayrıca numunelerin tipik göçme durumları da açıktır. Alkali silikat çinko boyanın her yüzeydeki görünümü birbirine yakındır. Sürtünme ile yükün aktarıldığı yüzeylerde boya toz haline gelmiştir.

2.7.3 Yük – Yerdeğiştirme Diyagramları

Şekil 2.25-2.30’da, deney numunelerinin yükleme altında genel davranışı izlenebilir. Bu diyagramlarda test cihazındaki yükleme düşey ekseninde, test cihazı uçları arasındaki yerdeğiştirme ise yatay ekseninde gösterilmiştir. Diyagramlarda verilen eğriler Şekil 2.15-2.20’den farklıdır. Dolayısı ile, birbirileri ile karşılaştırılamazlar. Kayma yükünden sonra, birleşimin taşıyabileceği yükte artışın sürdüğü gözlenmiştir. Kayma sınırına erişildikten sonra, numune hem sürtünme hem de ezilme ile gelen yükleri taşımakta ve zamanla sürtünme ile taşınan yük bileşeni azalmaktadır. Bunun sebebi ise alüminyum kesitte oluşan akmadır. Aynı sebepten, öngerilme kuvveti de başlangıçtaki değerini koruyamaz ve azalır. İnce alüminyum lamalardan üretilmiş tüm numunelerde, alüminyum kesitte kopma ile taşıma sınır durumuna erişilmiştir. Diğer numunelerde çelik lamada kayma ile kopma yüküne ulaşılmıştır. Bu sonuçlar daha önce hesaplardan da elde edilmiştir.

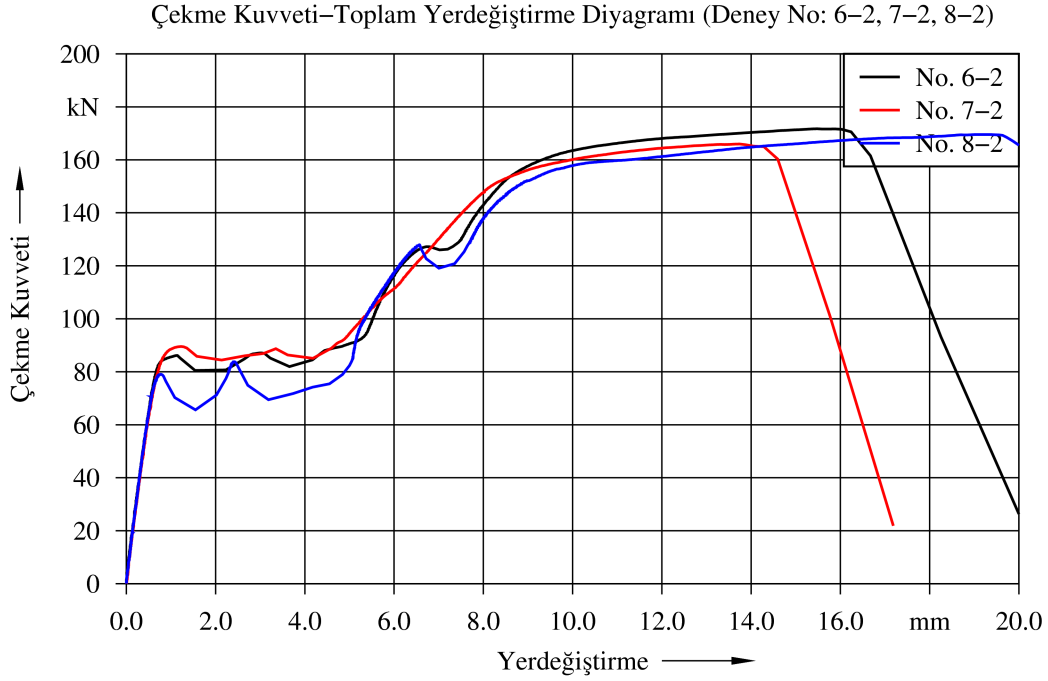


Şekil 2.25 : AlZn4.5Mg1 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 100$ kN, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış.

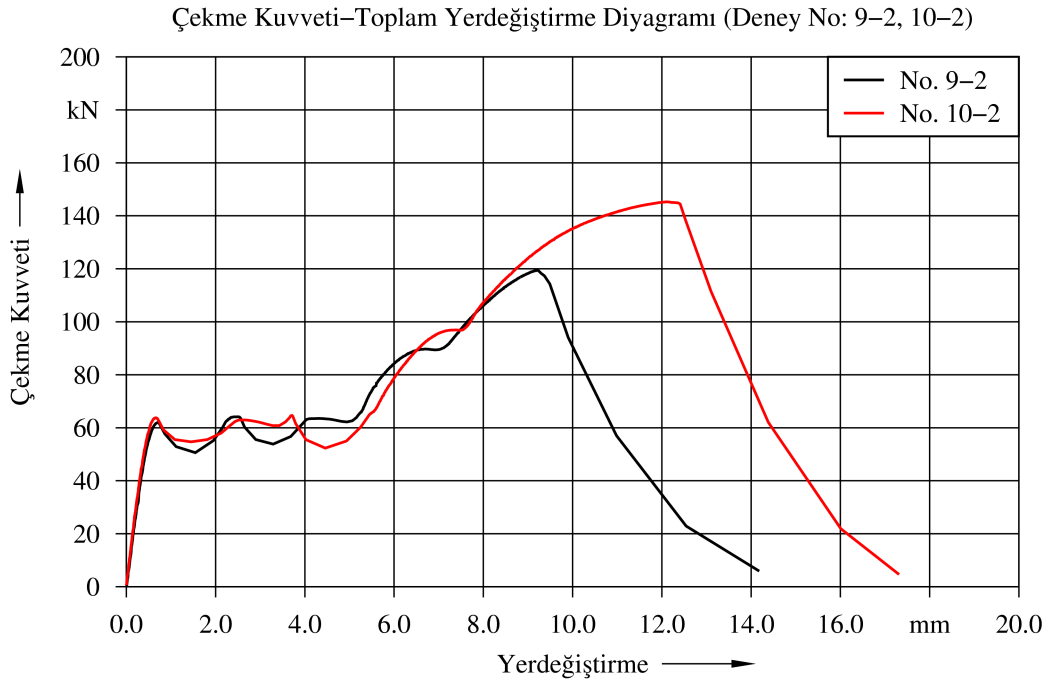


Şekil 2.26 : AlMgSi0.5 (80x5...400), S235 galvanizli, kontak yüzeyleri herhangi başka işlem yapılmadan sadece yağdan arındırılmış [No.4-2 : $F_v = 100$ kN, No.5-2 : $F_v = 80$ kN].

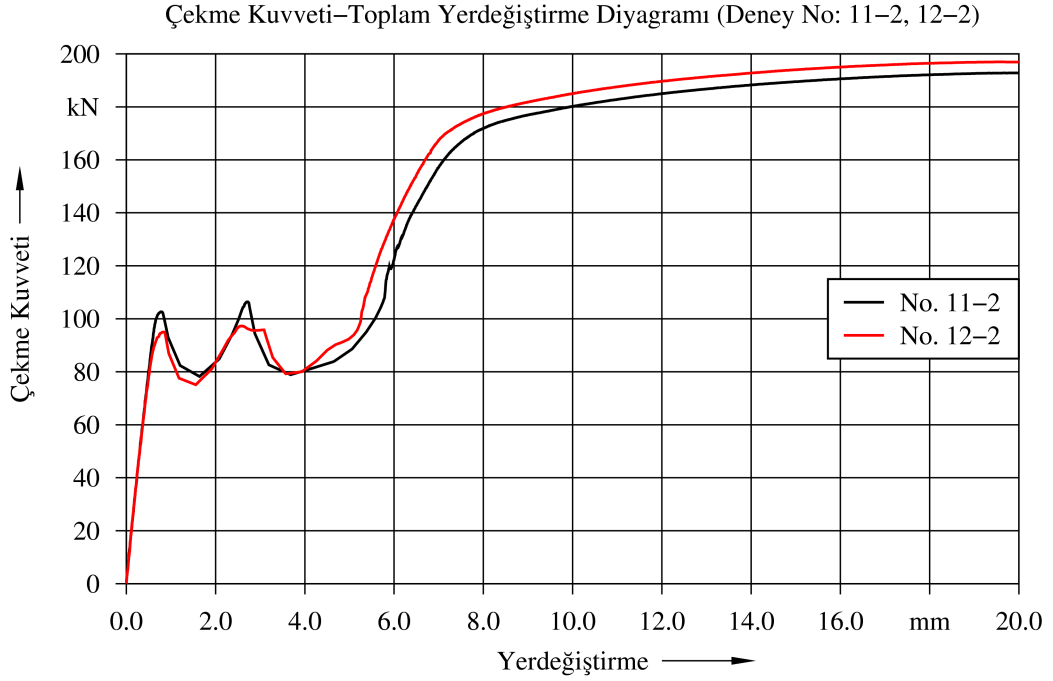
Şekil 2.25 ve 2.26’da verilen diyagramlar, deney numunelerinde levha temas yüzeylerinin sadece yağdan arındırılmış olduğu durumu, Şekil 2.27-2.30’da ise levha temas yüzeylerinin alkali silikat çinko boya ile boyanmış olduğu durumu göstermektedir.



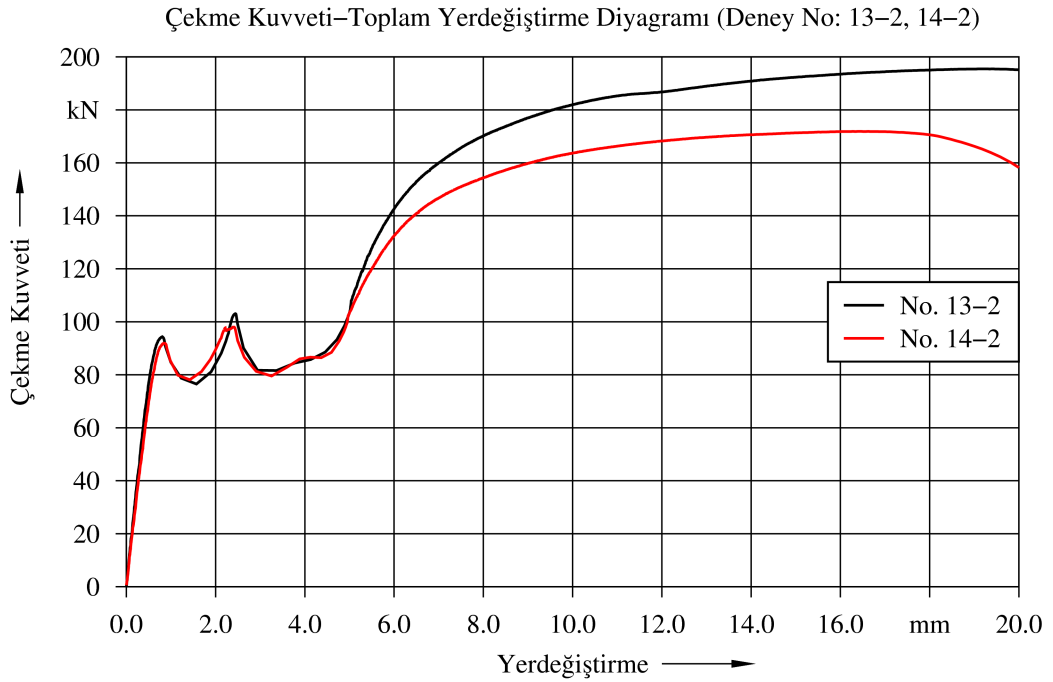
Şekil 2.27 : AlZn4.5Mg1 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.



Şekil 2.28 : AlMgSi0.5 (80x5...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 50$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.



Şekil 2.29 : AlZn4.5Mg1 (80x10...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.



Şekil 2.30 : AlMgSi1 (80x9.7...400), S235 galvanizli, öngerilme kuvveti $F_v = 75$ kN, kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

3. UZUN SÜRELİ YÜKLEME DENEYLERİ

Bu bölümde, Bölüm 2’de detayları ile açıklanan deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak uzun süreli yükleme deneylerinin yapılışına, yüklemenin belirlenmesine, sonuçların toplanmasına ve sistemle ilgili bilgilere yer verilmiştir. Deneylerde, Bölüm 2’yi içeren esaslar bu bölümde tekrarlanmamıştır.

3.1 Yükleme Çerçevesi

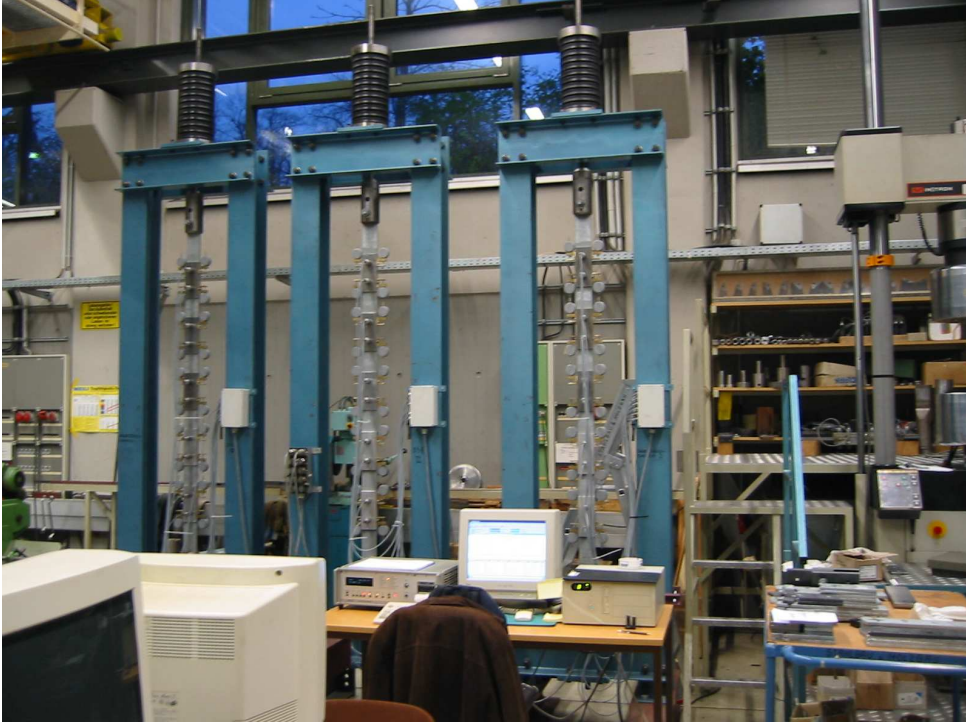
Deney numuneleri ardışık olarak birbirlerine bağlanmış ve sürekli olarak numunelerin belirli bir kuvvet altında kalması için yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Bu kısımda kullanılan çerçeveler, daha önce Technische Universitaet Hamburg-Harburg’da sadece çelik malzemenin çelik malzemeye birleşimini incelemede kullanılmıştır. Çerçeve sistemi Şekil 3.1’de görülmektedir. Deneylerde üç adet yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Herbir çerçeveye beş adet numune yerleştirilebilmektedir. Çerçevelerde 30 adet yaprak yay kullanılmıştır. Boyutları 200x102x14 tür ve yüklenmemiş boyutları 18.2 mm’dir. Bu şekilde; 5 numuneden birinde oluşacak kayma sonucunda, sistemdeki kuvvet azalmasının minimumda tutulması sağlanmıştır. Çerçeveye ilk yükleme, bir hidrolik veren aracılığıyla yapılmış sonrasında EDE ile hazırlanmış M30 şaft ile ölçülmüştür (çerçeve alt kısmında). M30 şaft tıpkı Bölüm 2’de anlatılan önerilmeli yüksek mukavemetli ölçme bulonlarının kalibrasyonunda olduğu gibi kalibre edilmiştir.

3.2 Deney Numuneleri

Deneyde kullanılacak alüminyum levhalar Bölüm 2’de kullanılan kısa süreli deneylerde kullanılan elemanlarla aynı boyuttadır (Şekil 3.2).

3.3 Bulonlar

Her 3 çerçevede kullanılan toplam 30 adet önerilmeli yüksek mukavemetli ölçüm bulonu hazırlanmış ve kalibre edilmiştir (Bakınız Bölüm 2).



Şekil 3.1 : Uzun süreli yükleme deneyi, çerçeveler ve ölçüm ekipmanları.

3.4 Montaj

Her üç yükleme çerçevesine beşer adet numune yerleştirilmiştir (Bakınız Ek A). Alüminyum ve çelik elemanlara, ölçüm cihazlarının montajı için çapları 4.0 mm olan delikler açılmıştır. Birleşim yüzeyleri alkali silikat çinko boya ile boyanmıştır. Herbir numune öncelikle masa üzerinde hazırlanmış ve ön montajı yapılmıştır. Sistem; ön montaj aşamasında beş numunenin aynı hizada olmasını sağlamak için bir alüminyum profil yanında düzenlenmiştir. Sistem hazırlanırken, kuvvet yönünün aksi yönünde çelik parçalar birbirine yaklaştırılarak yükleme durumunda kaymanın oluşması için numuneye hareket olanağı verilmiştir. Her numunede kullanılan alüminyum levha kalınlıkları aynı olmadığından, bulonlar numune kalınlığına bağlı olarak ek bir pul kullanılmak suretiyle birleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler daha sonra mengenerler arasına alınıp bulonlara öngerilme verilmiştir. Öngerilme işleminde her M16 öngerilmeli bulona $F_v=100$ kN öngerilme kuvveti verilmiştir. Bu işlem yapılırken öngerilme kuvveti bulonlarda okunmuştur. Sıkıştırma işlemi, sistem çerçeveye yerleştirmeden önce yapılmıştır. Böylece öngerilme verilirken beşli numune zincirinin doğrusal şekli montaj sırasında bozulmamıştır.

Çerçevelere yerleştirilen beşli numune zincirleri üzerlerine, yerdeğiştirme okumaları için analog saatlerin montajı yapılmıştır. Montaj esnasında hazırlanan analog saat ile

numune arasındaki birleşimi sağlayan metalden yapılan parçaların noktasal olarak numuneye bağlanması için pullar kullanılmıştır. Her numunede; levhaların birbirlerine göre hareketinin engellenmemesi için, toplam levha kalınlığının, yerdeğiştirme ölçerleri birleştirmedeki pulların çaplarının toplamından büyük olması amacıyla, çapları farklı pullar kullanılmıştır.

Daha sonra yerdeğiştirme saatleri, numune üstünde yukarı bakacak şekilde, numune alt tarafında ise aşağı bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Başlangıç koşulunda sıfırı gösterecek şekilde düşey olarak hizalanmıştır.

Her numunede kaymanın net bir şekilde gözlemlenebilmesi için siyah kalemle numune alt ve üstüne kalınlık boyunca çizgiler çekilmiştir. Her numune üzerine numuneye ait markalama ve ölçü aletlerinin numaralanması yapılmıştır.

Bulon öngerilme kuvveti ölçüm sistemine, ısıl değişiklikleri gözönüne almak için, bir adet öngerilme kuvveti verilmemiş kalibrasyon bulonu ilave edilmiştir.

Yukarıda anlatılan montaj işlemleri esas olarak tekniker Bay Uwe Stender ve tekniker Bay Thomas Jessen tarafından yapılmıştır. Kendilerine bu adımlarda yardımcı olunmuştur.

Çizelge 3.1 : Herbir çerçevede kullanılan malzeme listesi

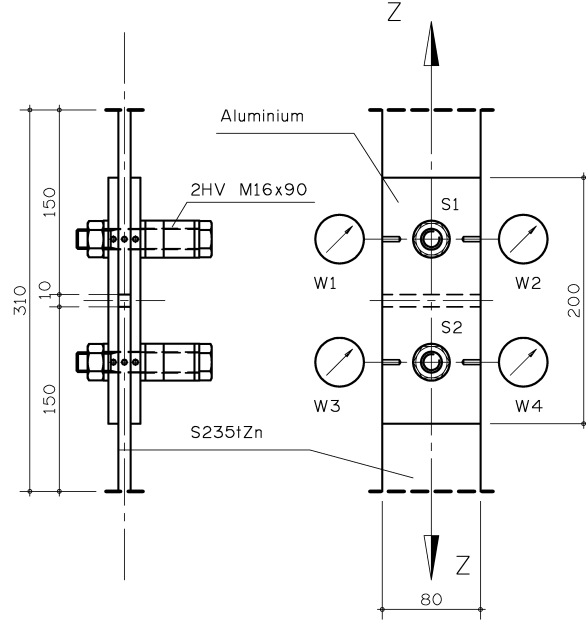
Malzeme	Boyutlar	Çerçeve 1 [75%]	Çerçeve 2 [65%]	Çerçeve 3 [50%]
AlMgSi1 (Anticorodal 110)	400x80x9.7	2	-	1
AlMgSi1 (Anticorodal 110)	400x80x8.0	1	2	2
AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)	400x80x5.0	-	1	2
AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)	400x80x10.0	2	2	-
AlMgSi0.5	400x80x5.0	-	-	-
	F _ç	90.00	78.00	60.00
	F _v	100.00	100.00	100.00

Çizelge 3.2 : Uzun süreli yükleme deneyi özeti

Numune				μ_{st}	R 8.76h	yükl. Oranı 0.001 yıl
no.	mat	t [mm]	bulon			
1	AlMgSi1	9.7	S1	0.625	0.459	0.73
1	AlMgSi1	9.7	S2	0.625	0.461	0.74
2	AlMgSi1	9.7	S3	0.625	0.459	0.73
2	AlMgSi1	9.7	S4	0.625	0.460	0.74
3	AlMgSi1	8.0	S5	0.625	0.463	0.74
3	AlMgSi1	8.0	S6	0.625	0.465	0.74
4	AlZn4.5Mg1	10.0	S7	0.625	0.455	0.73
4	AlZn4.5Mg1	10.0	S8	0.625	0.456	0.73
5	AlZn4.5Mg1	10.0	S9	0.625	0.457	0.73
5	AlZn4.5Mg1	10.0	S10	0.625	0.460	0.74
6	AlMgSi1	8.0	S11	0.625	0.395	0.63
6	AlMgSi1	8.0	S12	0.625	0.393	0.63
7	AlMgSi1	8.0	S13	0.625	0.399	0.64
7	AlMgSi1	8.0	S14	0.625	0.392	0.63
8	AlZn4.5Mg1	5.0	S15	0.550	0.386	0.70
8	AlZn4.5Mg1	5.0	S16	0.550	0.454	0.83
9	AlZn4.5Mg1	10.0	S17	0.625	0.389	0.62
9	AlZn4.5Mg1	10.0	S18	0.625	0.391	0.63
10	AlZn4.5Mg1	10.0	S19	0.625	0.390	0.62
10	AlZn4.5Mg1	10.0	S20	0.625	0.387	0.62
11	AlMgSi1	9.7	S21	0.625	0.299	0.48
11	AlMgSi1	9.7	S22	0.625	0.302	0.48
12	AlMgSi1	8.0	S23	0.625	0.298	0.48
12	AlMgSi1	8.0	S24	0.625	0.303	0.48
13	AlMgSi1	8.0	S25	0.625	0.302	0.48
13	AlMgSi1	8.0	S26	0.625	0.305	0.49
14	AlZn4.5Mg1	5.0	S27	0.550	0.303	0.55
14	AlZn4.5Mg1	5.0	S28	0.550	0.301	0.55
15	AlZn4.5Mg1	5.0	S29	0.550	0.302	0.55
15	AlZn4.5Mg1	5.0	S30	0.550	0.304	0.55

Çerçeve içindeki boy=1850mm

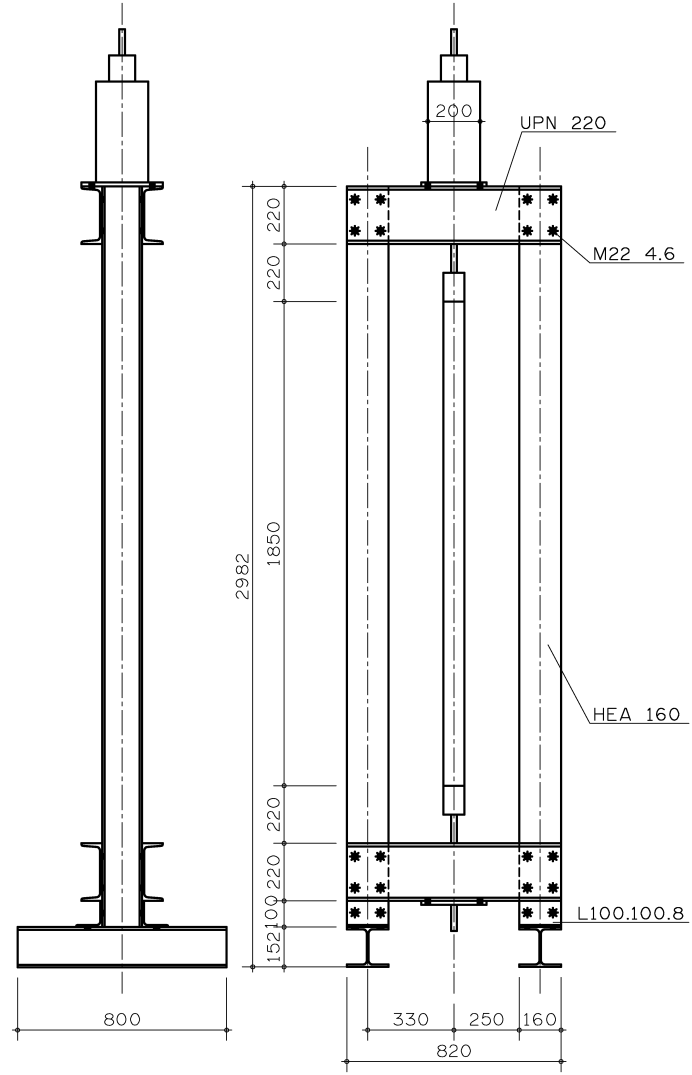
Bir numunenin boyu=310mm



Şekil 3.2 : Tipik uzun süreli deney numunesi.

3.5 Çerçeve Yüklerinin Belirlenmesi

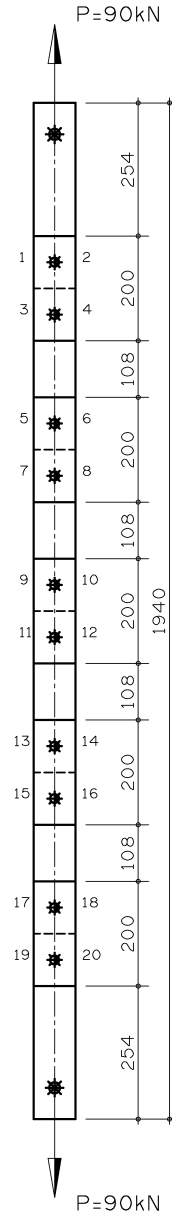
Çerçeve yükleri üç çerçeve için farklı olarak seçilmiştir. Elde edilen statik yükleme deney sonuçlarına bağlı olarak uzun süreli yükler, deney numunelerinde μ_{st} 'nin (Şekil 2.7) %75, %65 ve %50'si olacak şekilde, $P_{Ç1}=90$ kN, $P_{Ç2}=78$ kN ve $P_{Ç3}=60$ kN olarak seçilmiştir.



Şekil 3.3 : Uzun süreli deney çerçevesi.

Çerçeve 1

$F_v=90\text{kN}$

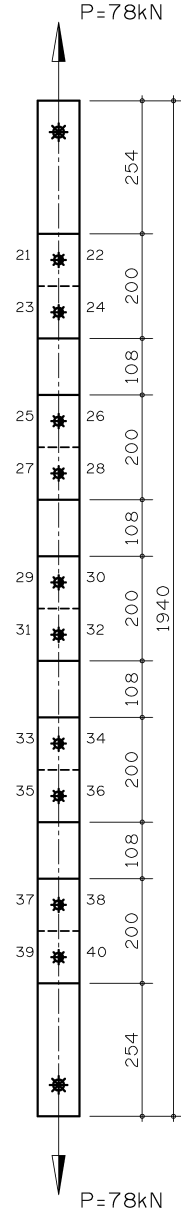


Şekil 3.4 : 1 numaralı çerçeve (yerdeğiştirme saat numaraları ve yükleme $P_{Ç1}=90\text{ kN}$).

Şekil 3.4-3.6, herbir çerçevedeki numuneye boyutları, uygulanan çekme yükünü ve yerdeğiştirme ölçerlerin numaralarını göstermektedir.

Çerçeve 2

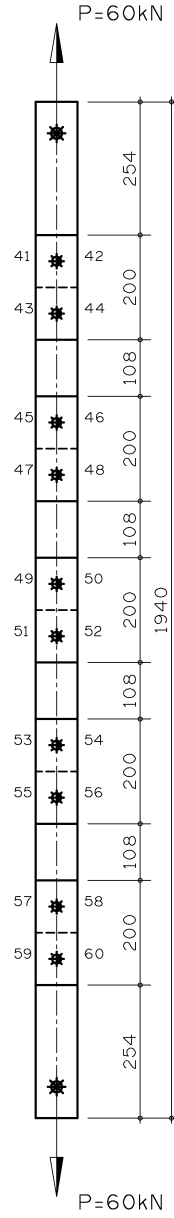
$F_v=100\text{kN}$



Şekil 3.5 : 2 numaralı çerçeve (yerdeğiştirme saat numaraları ve yükleme $P_{Ç2}=78\text{ kN}$).

Çerçeve 3

$F_v=100\text{kN}$



Şekil 3.6 : 3 numaralı çerçeve (yerdeğiştirme saat numaraları ve yükleme $P_{Ç3}=60\text{ kN}$).

Şekil 3.7, TUHH'da hazırlanan deney çerçevesini ve beş adet deney numunesini göstermektedir (Çerçeve no 1).



Şekil 3.7 : Uzun süreli deney çerçevesi (aşağıda görülen sülyen boyalı U profil, M30 luk çerçeve şaftına kuvvet yüklenmesi sırasında numunelerin burulmasını engellemek içindir).

3.6 Deney Adımları

Numune grubu her bir çerçeveye yerleştirildikten sonra, çerçevelere yük vermede kullanılan M30'luk bulonlar, uzun süreli yükleme miktarları kadar sıkılmıştır. Bulonlara ait öngerilme kuvvetleri, elektronik olarak bir yıl boyunca kaydedilmiştir. Yerdeğiştirmeler herbir yerdeğiştirme saati için tek tek okunmuştur. Okuma işlemi sabah 7:00'dan akşam 20:00 saatine kadar yapılmıştır. Bu okuma işlemi; deney başlangıcında sık aralıklarla olmasına rağmen, bir yıl süre sonuna doğru daha az aralıkla yapılmıştır. Her bir çerçevede sıcaklık, test numunesi yüzeyinden ölçülmüştür. Elle yapılan okumalar, hazırlanan kayıt formuna işlenmiş ve herbir çerçeve için ayrıca hesap tablosu programına işlenmiştir. Belirli aralıklarla çerçeve yük değerleri kontrol edilmiş, çerçeve uzun süreli yükünün maksimum %5 azalması durumunda çerçevelere etkimesi gereken yük tekrar başlangıç değerine M30 şaft sıkıştırılmak suretiyle getirilmiştir. Laboratuvar ortamında ani sıcaklık değişimlerinin olmamasına özen gösterilmiştir. Ölçme bir yıl boyunca yapılmıştır. Deney sırasında bilgisayarda gün ışığından daha fazla faydalanmak için yapılan saat ayarlamasına izin verilmemiştir. Böylece okumalar arasında saat değişimi oluşmamıştır. Kullanılan mekanik yerdeğiştirme ölçerlerin ölçüm hassasiyeti 1/100'dür [37, 38].

3.7 Deney Sonuçları

Deney sonuçları zaman-yerdeğiştirme ve zaman-sürtünme kuvvetine göre düzenlenmiştir. Hazırlanan grafikler ile kayma kritik birleşimin uzun süreli yük etkisi altında verilen yükü taşıyabileceğini göstermek için, maksimum yerdeğiştirme sınırı $v_{lim}=0.30$ mm ve maksimum zaman sınırı $t_{lim}= 50$ yıl olarak alınmıştır.

Herbir deney numunesi için toplam dört adet saatten okuma yapılmış ve bir bulon hizasındaki iki yerdeğiştirme saatinden elde edilen okumaların ortalaması alınmıştır. Sürtünme katsayısının hesabında, birleşimde o anki öngerilme kuvveti dikkate alınmıştır.

Hazırlanan grafikler herbir numune içindir (Şekil 3.8-3.22). 1 ve 3 nolu saatler, numunenin üst kısmındaki bulonu, 2 ve 4 nolu saatler ise numunenin alt kısmındaki bulonu göstermektedir.

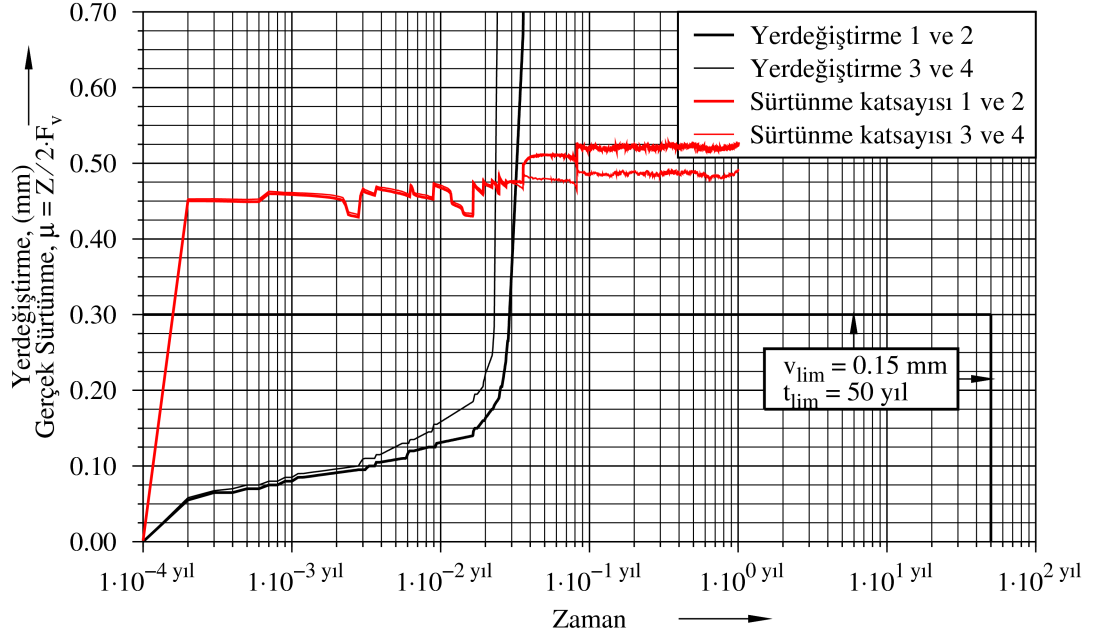
Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, sistemde levhaların birbirlerine göre hareketi 0.30 mm sınırını aşmamış ise, regresyon analizi yapılmıştır. Burada analiz sırasında dikkat edilmesi gereken, okumaların deney süresine bağlı olarak azalmasıdır. Bu ise regresyon analizinde başlangıçta yapılan okumaların çokluğu sebebiyle, yanlış ve gerçekten uzak sonuçlar vermektedir. Bu sebeple, deney verisi sabit zaman aralıklı deney verisi haline getirilmiştir. Bunun için; bir program C programlama dilinde [39] yazılmak suretiyle, her iki okuma arasındaki değer doğrusal olarak elde edilmiş ve sabit zaman aralıklı olarak türetilmiştir. Okumada başlangıçta oluşan hareketten sonra elde edilen değerler kullanılmıştır. Bu ise eğimin daima düzenli olduğu orta bölge dikkate alınarak yapılmıştır. Regresyon doğrusunun limit kabul edilen 50 yıl boyunca 0.30 mm sınırı içerisinde kalması, uzun süreli yükleme halinde birleşimin kuvveti aktarabileceğini göstermektedir.

Numunelerde farklı kalınlıkta alüminyum lamaların kullanılması sonucu, uzun süreli yük etkisi altında levhaların birbirlerine göre kayması, ince alüminyum lamalı birleşimlerde daha erken görülmüştür.

Bulona verilen öngerilme kuvveti, ince lamalarda daha küçük bir yüzeyden sürtünme kuvvetinin aktarılmasını sağlar. Bu ise, ince lamaların uzun süreli yük etkisinde neden daha erken kayma sınırı olan 0.30 mm'yi aştığını açıklamaktadır. Ayrıca, alüminyumun kendi özellikleri ve elastisite modülünün (E_{Al}) çeliğin elastisite modülünün (E_{St}) 1/3'ü kadar olması da etkindir.

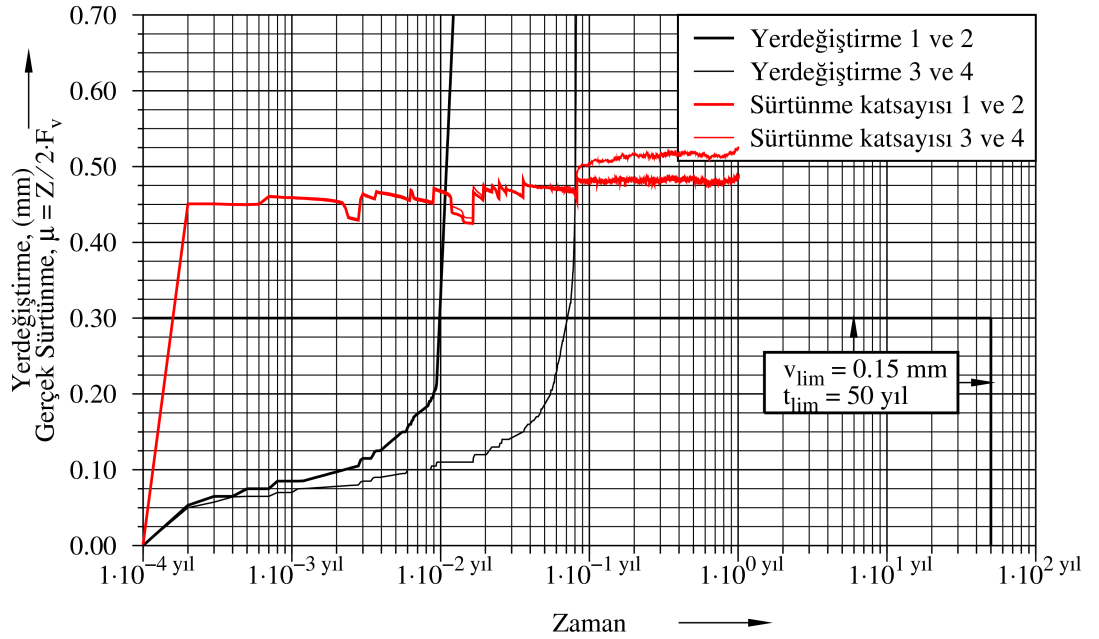
Şekil 3.8–3.22 arasında toplam 15 adet numuneye ait bir yıllık gözlemler grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 3.23'de herbir çerçeveye sürekli olarak verilen yük için, bir yıl boyunca elde edilen sonuçlar görülebilir.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 1-LO, 1-LU)



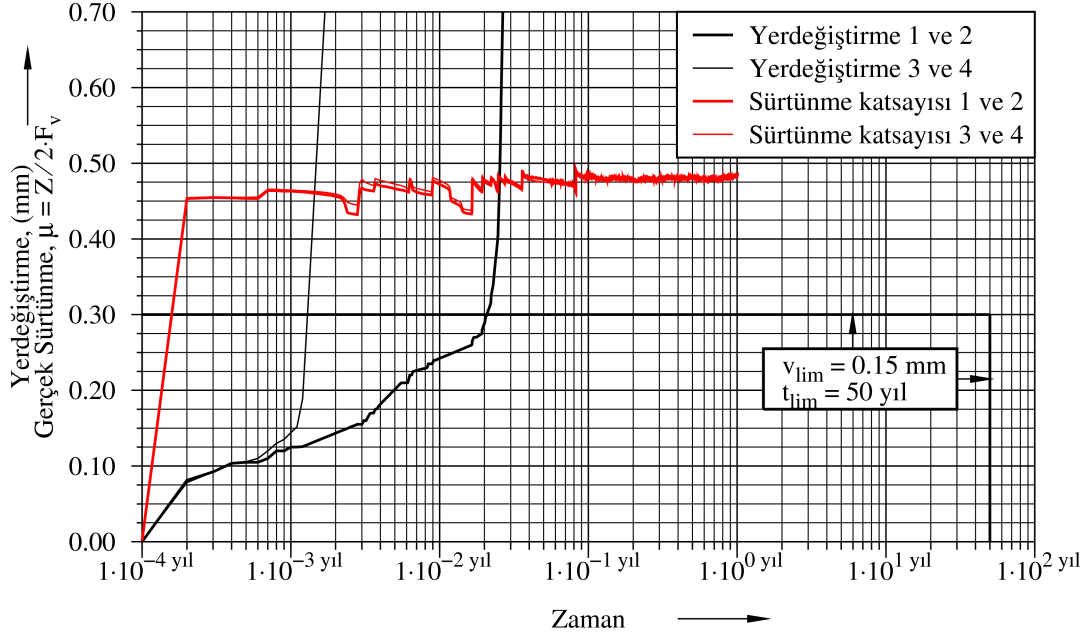
Şekil 3.8 : Deney çerçevesi 1, $\mu = 0.75 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C1} = 90 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 1 : 2 lama $t = 9.7 \text{ mm}$ [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 2-LO, 2-LU)



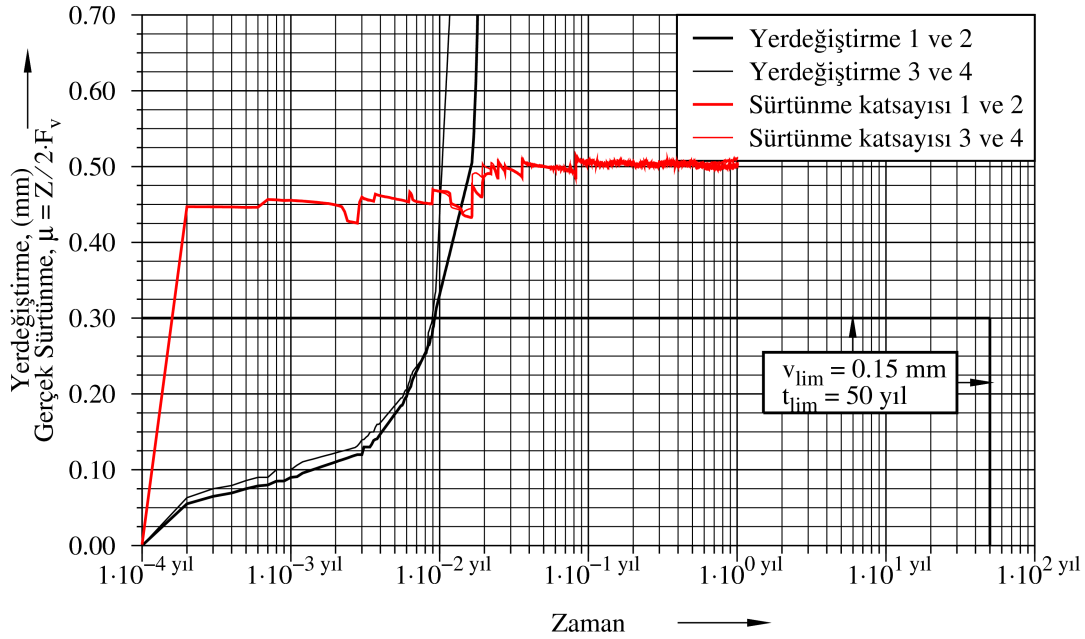
Şekil 3.9 : Deney çerçevesi 1, $\mu = 0.75 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{C1} = 90 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 2 : 2 lama $t = 9.7 \text{ mm}$ [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 3-LO, 3-LU)



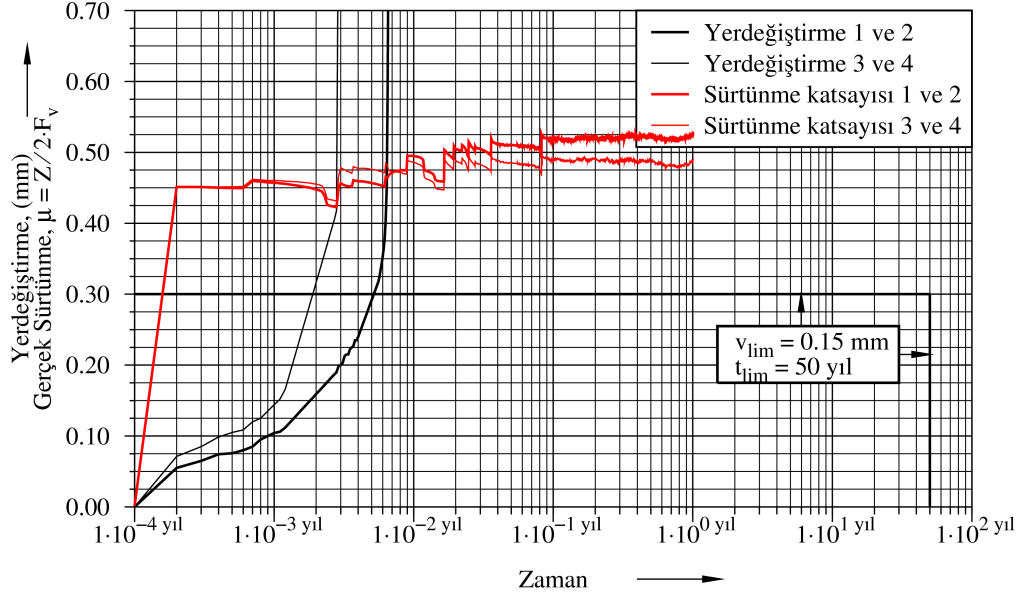
şekil 3.10 : Deney çerçevesi 1, $\mu = 0.75 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç1} = 90 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 3 : 2 lama $t = 8.0 \text{ mm}$ [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 4-LO, 4-LU)



şekil 3.11 : Deney çerçevesi 1, $\mu = 0.75 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç1} = 90 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 4 : 2 lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

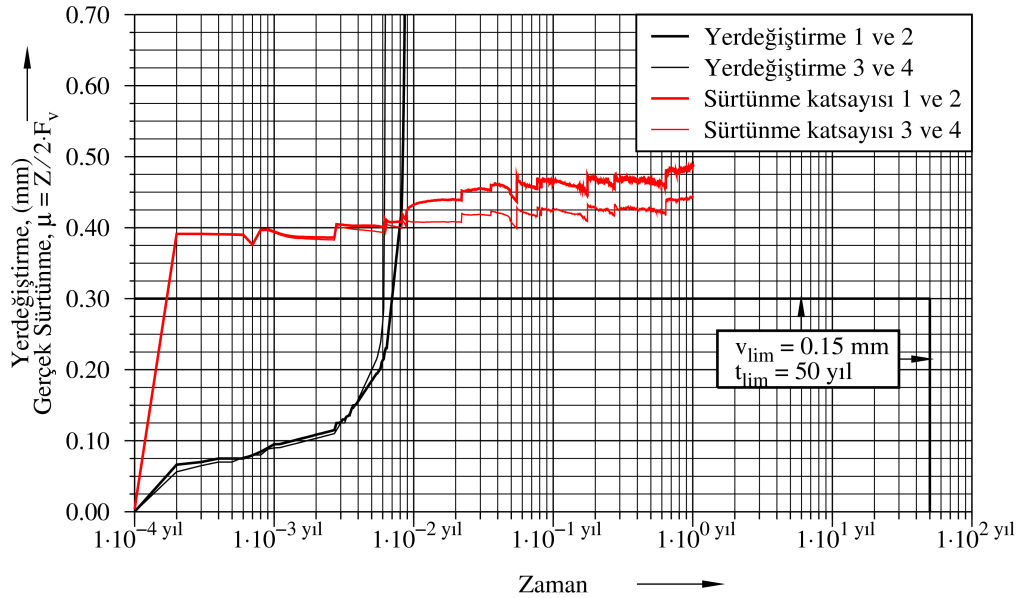
Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 5-LO, 5-LU)



Şekil 3.12 : Deney çerçevesi 1, $\mu = 0.75 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç1} = 90 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 5 : 2 lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

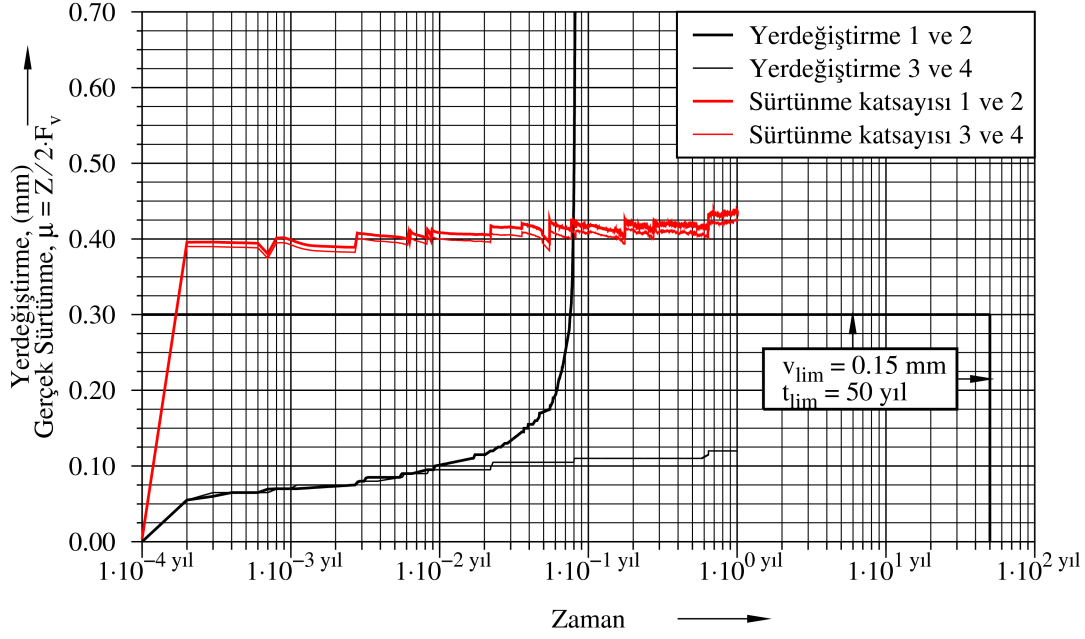
Şekil 3.8-3.12, 90 kN yük etkisi altındaki birinci çerçevedeki uzun süreli deney sonuçlarını göstermektedir.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 6-LO, 6-LU)



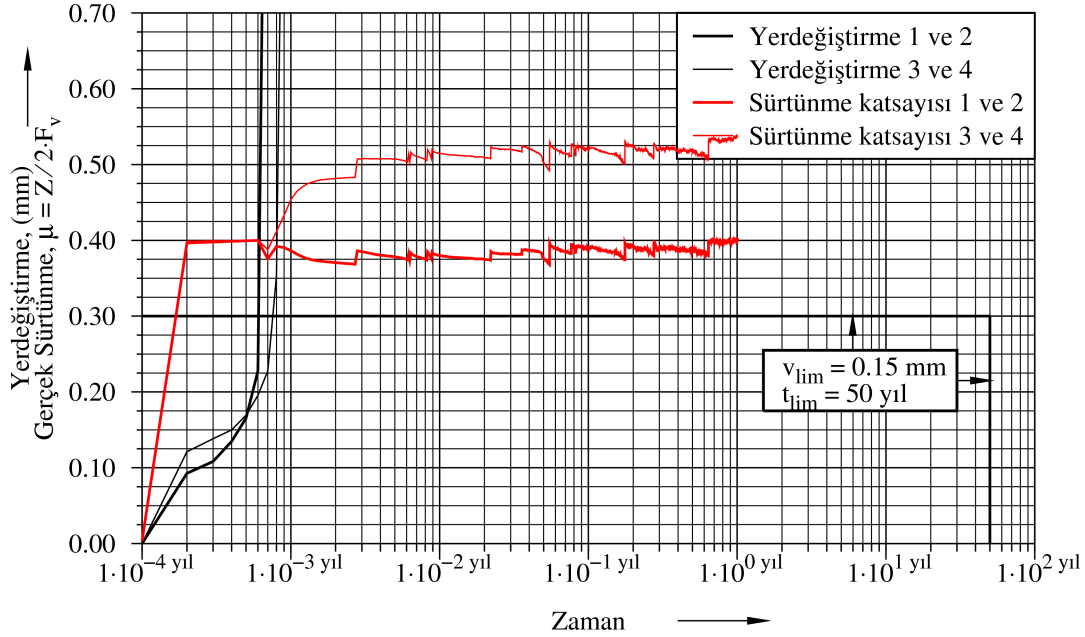
Şekil 3.13 : Deney çerçevesi 2, $\mu = 0.65 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç2} = 78 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 6 : 2 lama $t = 8.0 \text{ mm}$ [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 7-LO, 7-LU)



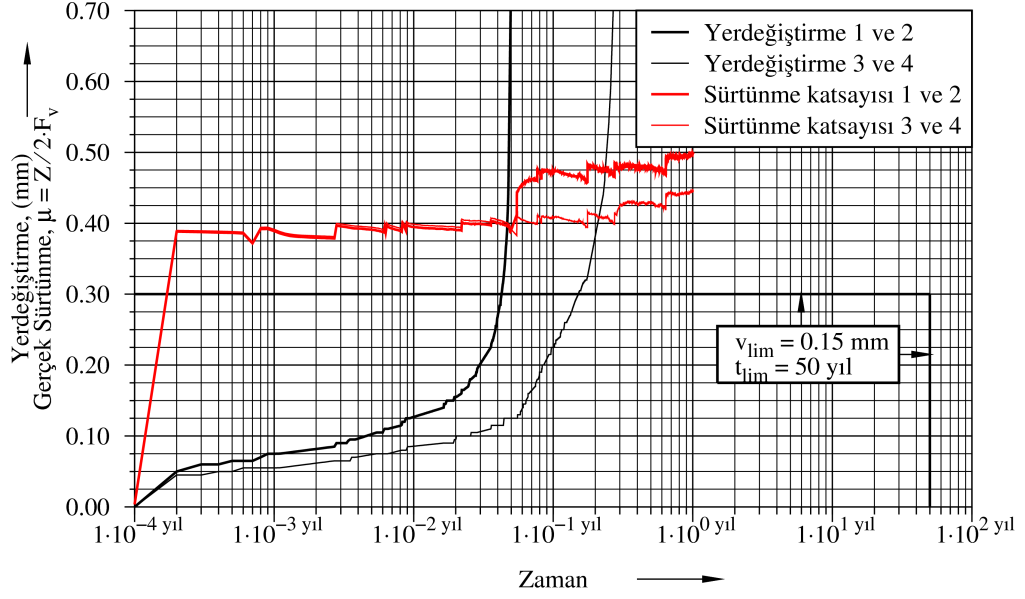
Şekil 3.14 : Deney çerçevesi 2, $\mu = 0.65 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç2} = 78 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 7 : 2 lama $t = 8.0 \text{ mm}$ [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 8-LO, 8-LU)



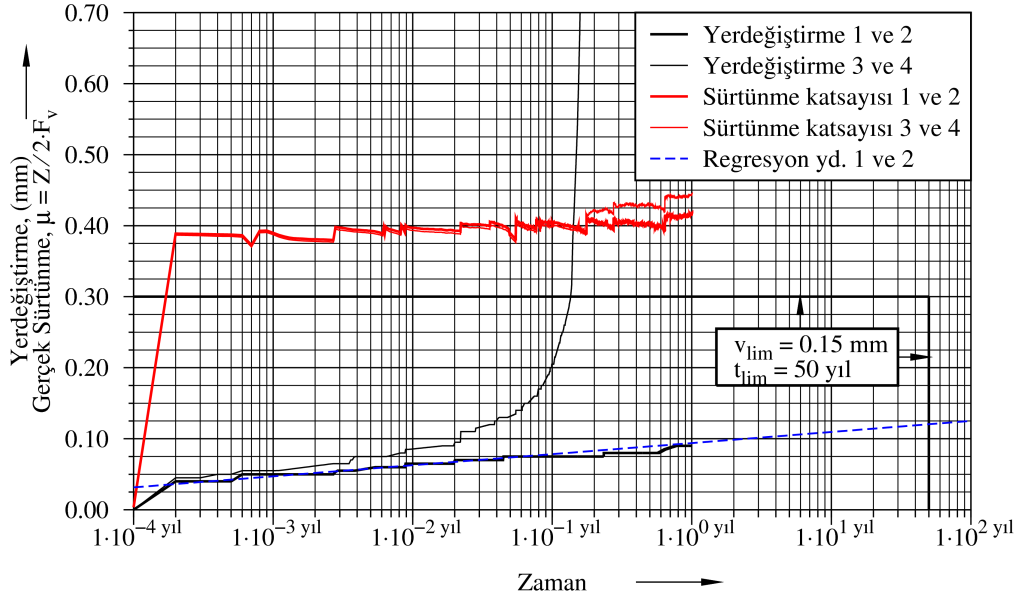
Şekil 3.15 : Deney çerçevesi 2, $\mu = 0.65 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç2} = 78 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 8 : 2 lama $t = 5.0 \text{ mm}$ [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 9-LO, 9-LU)



Şekil 3.16 : Deney çerçevesi 2, $\mu = 0.65 \times \mu_{st}$ çekme kuvveti $F_{C2} = 78$ kN, HVM16 öngerilme $F_v = 100$ kN. Deney numune no 9 : 2 lama $t = 10.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0$ mm [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

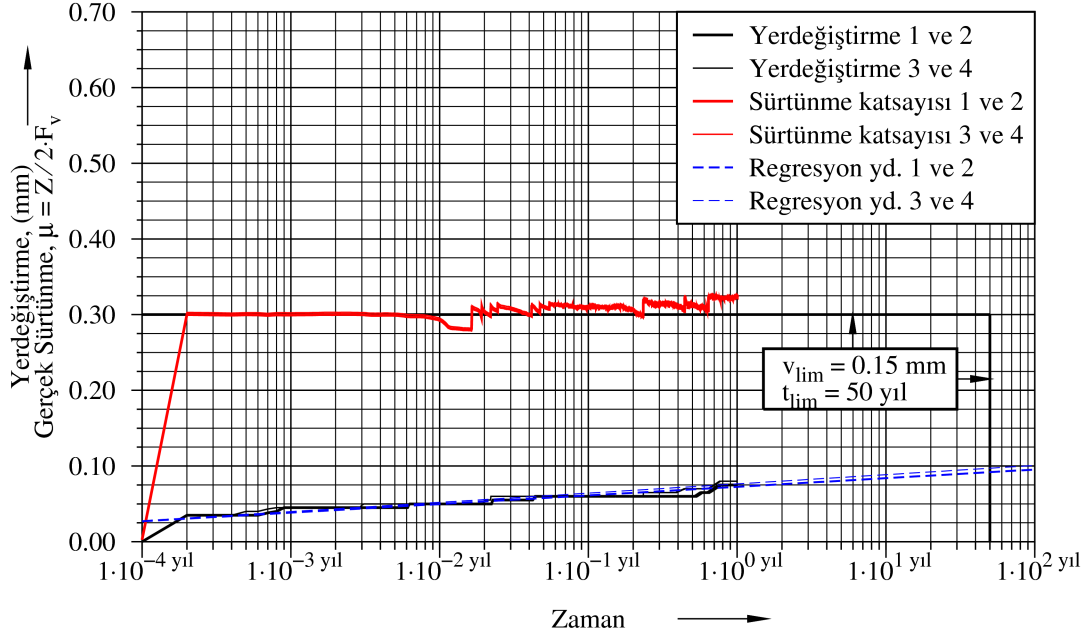
Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 10-LO, 10-LU)



Şekil 3.17 : Deney çerçevesi 2, $\mu = 0.65 \times \mu_{st}$ çekme kuvveti $F_{C2} = 78$ kN, HVM16 öngerilme $F_v = 100$ kN. Deney numune no 10 : 2 lama $t = 10.0$ mm [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0$ mm [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

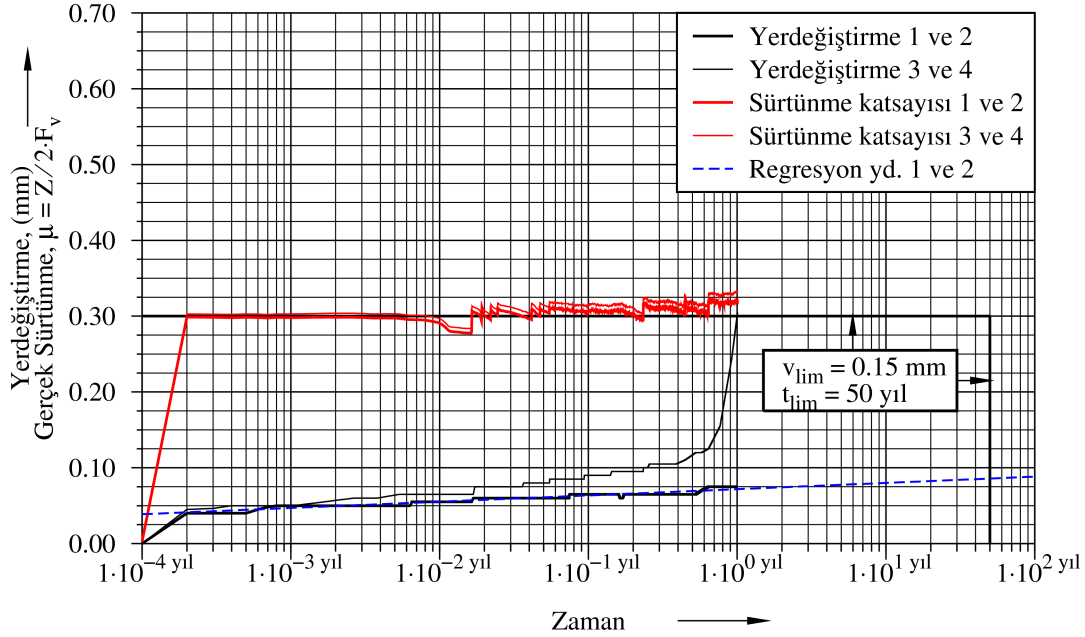
Şekil 3.13-3.17, 78 kN yük etkisi altındaki ikinci çerçevedeki uzun süreli deney sonuçlarını göstermektedir.

Zaman–Yerdeğiştirme ve Zaman–Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 11–LO, 11–LU)



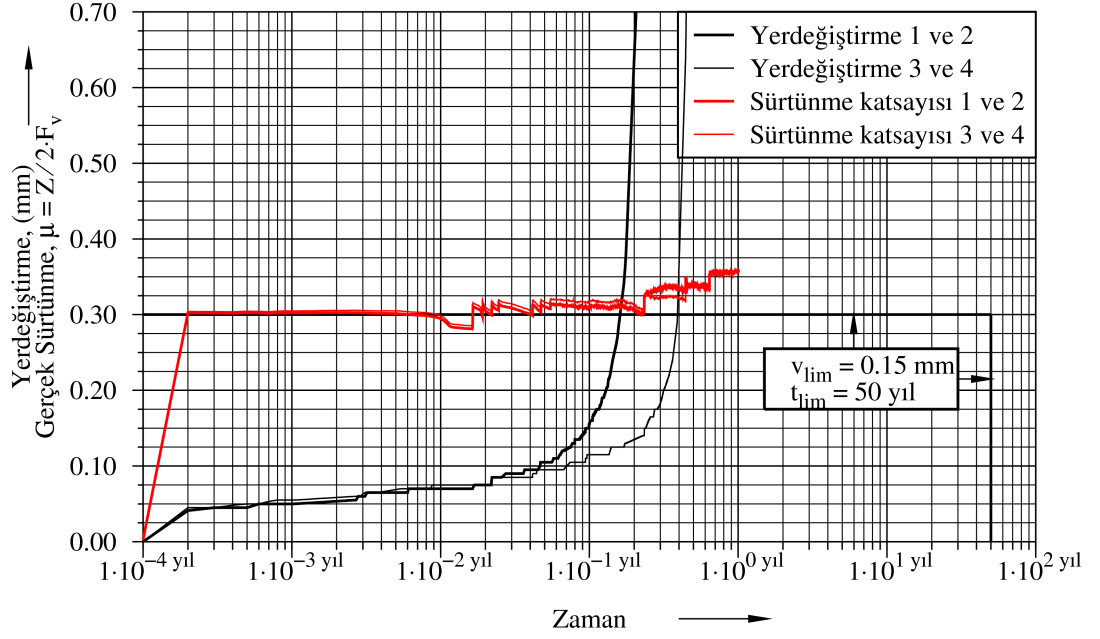
Şekil 3.18 : Deney çerçevesi 3, $\mu = 0.50 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç3} = 60$ kN, HVM16 öngerilme $F_v = 100$ kN. Deney numune no 11 : 2 lama $t = 9.7$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0$ mm [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman–Yerdeğiştirme ve Zaman–Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 12–LO, 12–LU)



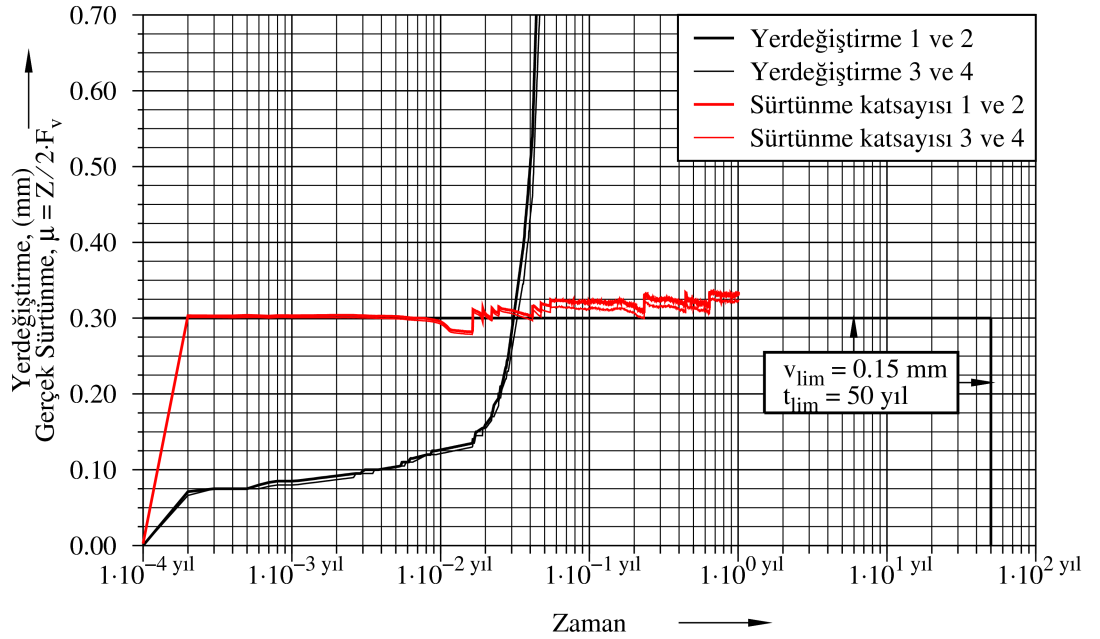
Şekil 3.19 : Deney çerçevesi 3, $\mu = 0.50 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç3} = 60$ kN, HVM16 öngerilme $F_v = 100$ kN. Deney numune no 12 : 2 lama $t = 8.0$ mm [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0$ mm [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 13-LO, 13-LU)



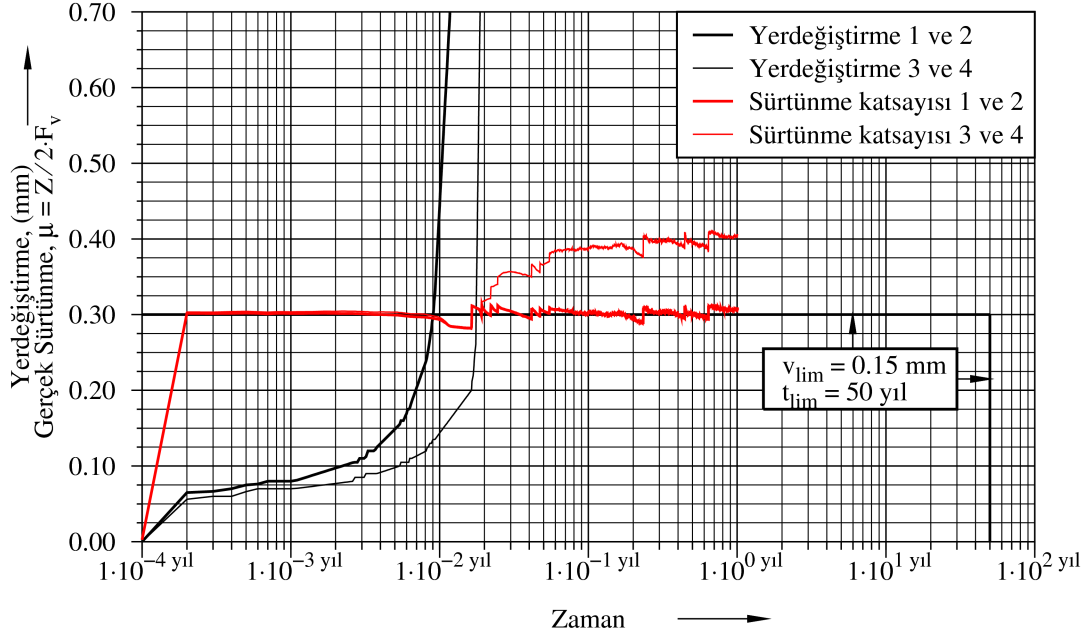
Şekil 3.20 : Deney çerçevesi 3, $\mu = 0.50 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{\text{Ç3}} = 60 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 13 : 2 lama $t = 8.0 \text{ mm}$ [AlMgSi1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman-Yerdeğiştirme ve Zaman-Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 14-LO, 14-LU)



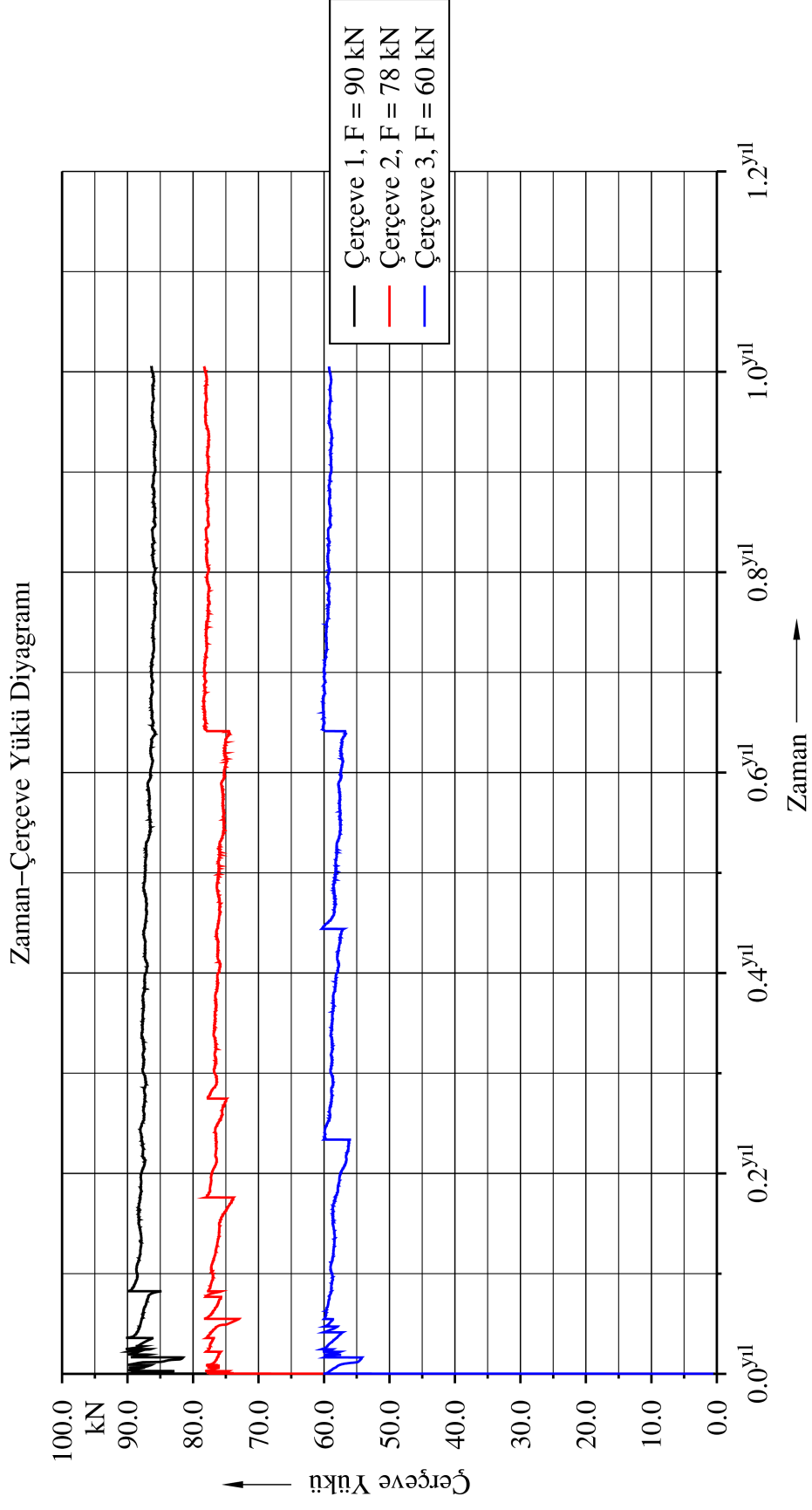
Şekil 3.21 : Deney çerçevesi 3, $\mu = 0.50 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{\text{Ç3}} = 60 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 14 : 2 lama $t = 5.0 \text{ mm}$ [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Zaman–Yerdeğiştirme ve Zaman–Gerçek Sürtünme Diyagramı (Deney No: 15–LO, 15–LU)



Şekil 3.22 : Deney çerçevesi 3, $\mu = 0.50 \times \mu_{st}$, çekme kuvveti $F_{Ç3} = 60 \text{ kN}$, HVM16 öngerilme $F_v = 100 \text{ kN}$. Deney numune no 15 : 2 lama $t = 5.0 \text{ mm}$ [AlZn4.5Mg1] ve galvanizli çelik lama $t = 10.0 \text{ mm}$ [S235], kontak yüzeyleri yağdan arındırılmış ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış.

Şekil 3.18-3.22, 60 kN yük etkisi altındaki üçüncü çerçevedeki uzun süreli deney sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 3.23 : Çerçeve yüklemeleri – Zaman diyagramı, $F_{C1} = 90$ kN, $F_{C2} = 78$ kN, $F_{C3} = 60$ kN ($\mu_{C1} = 0.75 \times \mu_{st}$, $\mu_{C2} = 0.65 \times \mu_{st}$, $\mu_{C3} = 0.50 \times \mu_{st}$)

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE İSTATİSTİK ANALİZİ

Bölüm 2’de verilen deney sonuçları sürtünme yüzeylerinin hazırlanması bakımından gruplanmış ve istatistik analizi yapılmıştır. Bu analizde logaritmik doğrusal dağılım kullanılmıştır. Sonuçların işaret farklılığı içermeyecek olması, bu yöntemin seçilmesini gerektirmektedir.

Deney sonuçları aynı zamanda alüminyum malzeme akma sınırları da dikkate alınmak suretiyle gruplanmış ve incelenmiştir.

Kısa süreli deneylerin değerlendirilmesinde kullanılan istatistik parametrelerin bağıntıları (4.1)-(4.4)’de sırasıyla verilmiştir. Burada, C_{vX} değişim katsayısı ile boyutsuz olarak deney sonuçları için dağılım elde edilmiş ve deney serisinin sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) / N \quad (4.1)$$

$$Var(X) = \left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right] / N \quad (4.2)$$

$$s_X = [Var(X)]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$C_{vX} = s_X / \bar{x} \quad (4.4)$$

Burada; $\bar{x}$ aritmetik ortalama, N numune adedi, x_i i . numunenin deney sonucu, $Var(X)$ değişim miktarı, s_X , standart sapma, C_{vX} ise değişim katsayısıdır.

Bölüm 3’te yapılan uzun süreli deneyler bir yıl boyunca gözlemlenmiş ve deney verisi ardışık ayrıklaştırma ile sürekli olarak ifade edilecek şekilde güncellenmiştir. Böylece amaçlanan, deney grafiklerinden de görülen, levhaların birbirlerine göre hareketinin, elli yıl boyunca 0.30 mm sınırı içerisinde kalıp kalmadığını tahmin etmektir.

Uzun süreli deneylerde elde edilen sonuçların çoğunluğunda, alüminyum malzemedeki sünme ve numune kalınlıklarına bağlı olarak sürtünme yüzeyinde oluşan temas gerilmelerinin yüksekliği sebebiyle, numuneler 50 yıl süre sınırına erişmeden 0.30 mm'lik yerdeğiştirme yapmışlardır. Burada 10 mm kalınlığında alüminyum levhalardan hazırlanmış numuneler, bir yıl sonunda yapılan analiz sonucunda 0.30 mm sınırının altında kalmıştır. Tavsiye olunan, uzun süreli yükleme etkisi altında birleşimlerde malzeme kalınlığına bağlı olarak sürtünme katsayısının azaltılmasıdır. Kısa süreli kayma deneylerinde böyle bir olayla karşılaşılmamış, numune kalınlığına sürtünme katsayısının etkisinin belirgin bir sonucu gözlenmemiştir.

Uzun süreli deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, yükleme başlangıcından 8.76 saat (1/1000 yıl) sonraki veriler esas alınmıştır. Böylece sabit değişen kayma okumaları için deney sonuçları değerlendirilmiştir. Okumalar bir yıl süre ile yapıldığından analog yerdeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Uzun süreli deneylerde yükleme başlangıcında daha sık ölçüm yapılmıştır. İlerleyen aylarda değişim azaldığından dolayı ise ölçüm sıklığı azalmıştır. Verilerin değerlendirilmesinde ölçüm sıklığındaki bu değişkenlik, başlangıçta verilerin çokluğu sebebiyle bu bölge ağırlıklı sonuçlar vermektedir. Bunu düzeltmek amacıyla deney okumaları hazırlanan bir programda işlenmek suretiyle, 0.001 yıl aralıkla yeniden üretilmiştir. Program komut satırından çalıştırılmakta ve girdi olarak veri dosyasını, çıktı dosyası adını ve zaman aralığını almaktadır. Çıktı dosyası veri dosyasının verilen adımlardaki değerlerini üretmiştir. Çıktı dosyası, verilerin istatistik analizinde kullanılmıştır.

(4.5) bağıntısı ile doğrusal fonksiyon tanımlanmıştır. Hataların karekökünün sıfıra eşit olması düşünülerek [40] gerekli hesaplar yapılmıştır.

$$y = ax + b \quad (4.5)$$

$$\min \sum_{i=1}^N e_{yi}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i - b)^2 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^N e_{yi}^2}{\partial a} = 0 \quad \frac{\partial \sum_{i=1}^N e_{yi}^2}{\partial b} = 0 \quad (4.7)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (4.8)$$

Uzun süreli deney sonuçları sınırları aşmıyor ise regresyon analizi yapılmıştır. Bu analizin yapılmasında kullanılan bağıntılar (4.5)-(4.8)'de verilmiştir. Uzun süreli analiz sonuçları Bölüm 3'te verilen Şekil 3.8-3.22'de 0.30 mm sınır yerdeğiştirme değerini aşmayan numuneler için hesaplanmıştır. Çizelge 4.3'te uzun süreli deney sonuçları verilmiştir.

Kısa ve uzun süreli kayma deneyleri için özet çizelgeler oluşturulmuştur. Kısa süreli kayma deneyleri sonuçları Ek C'de, uzun süreli kayma deneyleri sonuçları ise Ek D'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Kısa süreli kayma deneyi sürtünme katsayısı sonuçları.

Gerçek Sürtünme									
Yerdeğiştirme [150 µm]									
Test No	Galvanizli [hepsi]		Boya uyg.[hepsi]		Boya uyg.[malz.5 hariç]		Boya uyg. [malz. 1, 4]		
	üst	alt	üst	alt	üst	alt	üst	alt	alt
1-2	0.1797	0.1868							
2-2	0.2225	0.2366							
3-2	0.1726	0.2123							
4-2	0.3659	0.3092							
5-2	0.3412	0.3668							
6-2			0.5825	0.5754	0.5825	0.5754			
7-2			0.6119	0.6180	0.6119	0.6180			
8-2			0.5539	0.5905	0.5539	0.5905			
9-2			0.6608	0.6840					
10-2			0.6910	0.6862					
11-2			0.6815	0.7004	0.6815	0.7004	0.6815	0.7004	
12-2			0.6580	0.6788	0.6580	0.6788	0.6580	0.6788	
13-2	0.6538	0.7341	0.6538	0.7341	0.6538	0.7341			
14-2	0.6383	0.6585	0.6383	0.6585	0.6383	0.6585	0.6383	0.6585	
ortalama	0.2593		0.6476		0.6383		0.6754		
Min.	0.1726		0.5539		0.5539		0.6383		
Maks.	0.3668		0.7341		0.7341		0.7341		
St-sapma.	0.0784		0.0493		0.0520		0.0306		
V.Coef%	30.2236		7.6052		8.1473		4.5276		
5% norm	0.1304		0.5666		0.5527		0.6251		
Fg[100%]					82.91		93.77		

Çizelge 4.2 : Kısa süreli kayma deneyi sürtünme katsayısı sonuçları (alüminyum alaşımına göre).

Gerçek Sürtünme														
Yerdeğiştirme [150 µm]														
Test No	Galvanizli			Boya uygulanmış										
	üst	alt	üst	alt	üst	alt	üst	alt	üst	alt	üst	alt		
1-2	0.1797	0.1868												
2-2	0.2225	0.2366												
3-2	0.1726	0.2123												
4-2		0.3659	0.3092											
5-2		0.3412	0.3668											
6-2					0.5825	0.5754								
7-2					0.6119	0.6180								
8-2					0.5539	0.5905								
9-2						0.6608	0.6840							
10-2						0.6910	0.6862							
11-2								0.6815	0.7004					
12-2								0.6580	0.6788					
13-2														
14-2														
ortalama	0.2017		0.3458		0.5887		0.6805		0.6797		0.6538	0.7341		
Min.	0.1726		0.3092		0.5539		0.6608		0.6580		0.6383			
Maks.	0.2366		0.3668		0.6180		0.6910		0.7004		0.7341			
St-sapma.	0.0258		0.0271		0.0238		0.0134		0.0173		0.0428			
V.Coef%	12.7668		7.8381		4.0398		1.9738		2.5482		6.3802			
5% norm	0.1594		0.3012		0.5496		0.6584		0.6512		0.6007			
Fg[100%]	31.87		48.19		82.44		65.84		97.68		90.11			

Çizelge 4.3 : Uzun süreli deney sonuçları.

Numune				y = a log x + b			... yıl sonra yerdeğiştirme [mm]					
no	mat	t [mm]	bulon	a	b	R ²	0.1		50		100	
1	AlMgSi1	9.7	S1	---	---	---	M		R		R	
1	AlMgSi1	9.7	S2	---	---	---	M		R		R	
2	AlMgSi1	9.7	S3	---	---	---	M		R		R	
2	AlMgSi1	9.7	S4	0.040	0.290	0.903	R	0.197	R	0.448	R	0.476
3	AlMgSi1	8.0	S5	---	---	---	M		R		R	
3	AlMgSi1	8.0	S6	---	---	---	M		R		R	
4	AlZn4.5Mg1	10.0	S7	---	---	---	M		R		R	
4	AlZn4.5Mg1	10.0	S8	---	---	---	M		R		R	
5	AlZn4.5Mg1	10.0	S9	---	---	---	M		R		R	
5	AlZn4.5Mg1	10.0	S10	---	---	---	M		R		R	
6	AlMgSi1	8.0	S11	---	---	---	M		R		R	
6	AlMgSi1	8.0	S12	---	---	---	M		R		R	
7	AlMgSi1	8.0	S13	0.033	0.255	0.880	M	0.180	R	0.383	R	0.405
7	AlMgSi1	8.0	S14	0.009	0.134	0.910	M	0.113	R	0.170	R	0.176
8	AlZn4.5Mg1	5.0	S15	---	---	---	M		R		R	
8	AlZn4.5Mg1	5.0	S16	---	---	---	M		R		R	
9	AlZn4.5Mg1	10.0	S17	---	---	---	M		R		R	
9	AlZn4.5Mg1	10.0	S18	---	---	---	M		R		R	
10	AlZn4.5Mg1	10.0	S19	0.007	0.094	0.934	M	0.078	R	0.120	R	0.125
10	AlZn4.5Mg1	10.0	S20	0.025	0.202	0.915	M	0.145	R	0.299	R	0.316
11	AlMgSi1	9.7	S21	0.005	0.073	0.826	M	0.061	R	0.092	R	0.095
11	AlMgSi1	9.7	S22	0.005	0.076	0.782	M	0.064	R	0.097	R	0.101
12	AlMgSi1	8.0	S23	0.004	0.072	0.833	M	0.064	R	0.086	R	0.088
12	AlMgSi1	8.0	S24	0.008	0.104	0.901	M	0.086	R	0.135	R	0.141
13	AlMgSi1	8.0	S25	0.015	0.145	0.874	M	0.110	R	0.206	R	0.216
13	AlMgSi1	8.0	S26	0.011	0.124	0.894	M	0.099	R	0.166	R	0.174
14	AlZn4.5Mg1	5.0	S27	---	---	---	M		R		R	
14	AlZn4.5Mg1	5.0	S28	---	---	---	M		R		R	
15	AlZn4.5Mg1	5.0	S29	---	---	---	M		R		R	
15	AlZn4.5Mg1	5.0	S30	---	---	---	M		R		R	

M : Ölçülen

R : Regresyon ile elde edilen

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPILAN ARAŞTIRMALAR

Çalışmanın bu bölümünde sonlu elemanlar yöntemi ile, alüminyum ve çelik elemanların öngerilmeli yüksek mukavemetli bulon ile sürtünme aktarır birleşimlerinde, alüminyum ve çelik elemanların temas yüzeylerinde oluşan kontak basınç gerilmesinin kalınlıkla değişimi incelenmiştir. Birleşimde kalınlığa bağlı olarak sürtünme katsayısının, çekme kuvveti etkisi altında değişimi araştırılmıştır. Birleşimin öngerilme kuvveti uygulanan sıcaklık sonrasında, sıcaklık farklılıklarına bağlı davranışı araştırılmıştır. Birleşimi oluşturan levhaların toplam kalınlıklarının sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Uzun süreli deneylerden elde edilen $v_{lim}=0.30$ mm’lik levhaların birbirlerine göre kaymasının gözlemlendiği zaman ile hesaplarda elde edilen kontak basıncı ve dolayısıyla kayma gerilmeleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çözümleme

Yukarıda genel hatları ile belirtilen sayısal çözümlemede sonlu elemanlar yazılımı olarak ANSYS Classic 10.0 Sp1A “University” lisansı ile kullanılmıştır. Programda yapılacak parametrik hesaplar için ayrılaştırılmış model ve geometrinin oluşturulması amacıyla APDL (ANSYS Parametric Design Language) [41-43] kullanılarak makrolar hazırlanmıştır. Sonuçların değerlendirilmesi için yazılan makrolar ile hesaplarda kullanılacak sonuç değerleri elde edilmiştir. Hazırlanan makroların sadece bu çalışmada değil, diğer birleşim modellerinde de kullanılabilmesi ile birleşim modellemede bir standart ve modüler yapı oluşturulması düşünülmüştür.

Sonlu eleman modellerinde, 3 boyutlu modeller düzgün sekizyüzlüler ile elde edilmiş ve ayrılaştırmanın düzenli bir şekilde yapılması amaçlanmıştır. ANSYS yazılımında birleşim modelinde elemanlar Solid45, Prets179, Conta173 ve Targe170 olarak seçilmiştir [44, 45]. Burada Solid45, 8 düğüm noktalı doğrusal yapısal modellemede kullanılan elemandır. Prets179 yazılıma ait öngerilme algoritması içerisinde kullanılmaktadır [46, 47]. ANSYS öngerilme algoritması, ayrılaştırılmış sistemde

öngerilme verilecek kesitte ayırklaştırmayı iki kısma bölmekte ve yeni oluşan noktaları birbirlerine link elemanlar ile bağlamaktadır. Öngerilme ise bu doğrusal elemanlara öngerilme kuvvetini uygulamak suretiyle yapılmaktadır. Öngerilme yüklemesi iki adımda gerçekleştirilmektedir. Birinci adım yüklemenin verilmesi, ikinci adım ise oluşan deplasmanın sabitlenmesini içermektedir. Conta173 ve Targe170 [48, 49] elemanları temas yüzeyindeki sınır şartlarının değişmesini sağlamak üzere kullanılmıştır. Burada kontak yüzeyleri oluşturulurken elastisite modülü yüksek olan çelik elemanın kontak yüzeyi ve hedef yüzeyi olarak ise alüminyum elemanların yüzeyi dikkate alınmıştır.

Kontak yüzeylerinin oluşturulmasında geometrik modelde temas durumunda olan veya yükleme sırasında olacak alanlar isimlendirilmiş ve bu alanlarda bulunan katı elemanların dış yüzey noktalarında kontak elemanları tariflenmiştir.

Hazırlanan model makrolarında sadece geometri oluşturulmayıp, aynı zamanda geometrik ayırklaştırmaya makro parametreleri içerisinde yer verilmiştir. Model parçalarının oluşturulmasında öncelikle koordinat sistemleri tanımlanmıştır. Tanımlanan koordinat sistem numarası ile çağrılan makro ile modelin parçaları gerekli yerlerde oluşturulmuştur. Bu şekilde hazırlanan makrolara kullanım esnekliği sağlanmış ve diğer çalışmalarda, örneğin bulon modellemesinde, adımlar sadeleştirilmiştir. Bulon modellemede kullanılacak geometrik özellikler bir dosya içerisinde hazırlanmış ve makroya oluşturulacak bulona ait parametreleri içeren dosya adı giriş bilgisi olarak verilmiştir.

Hazırlanan makrolar ile amaçlanan, bu çalışmanın dışında başka birleşim sayısal modellerinde de oluşturulan bu algoritmaların kullanılmasıdır. Böylece sistemli bir şekilde farklı çalışmalar için de birleşim modelleri hazırlanabilecektir.

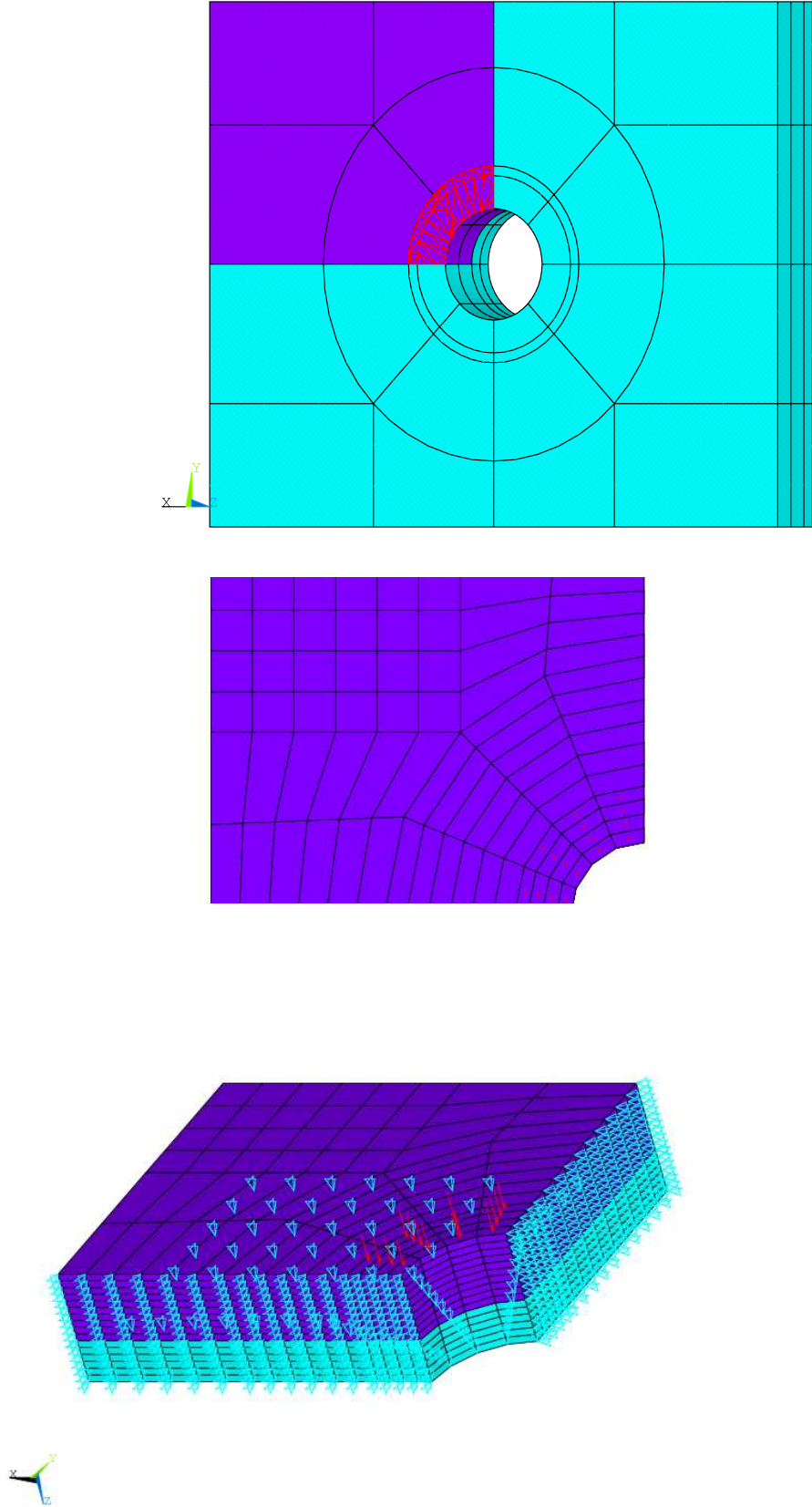
5.2 Kontak Basınç Gerilmesinin Alüminyum Laşe Kalınlığına Bağlı Değişimi

Birleşim levhaları arasındaki sürtünme kuvveti, levhalar arasındaki yüzeye dik basınç gerilmesi ile oluşmaktadır. Levhaların birbirleri ile temas ettiği yüzeylerde kontak basınç gerilmeleri, birleşim levhalarının toplam kalınlığına bağlıdır ve öngerilme kuvvetinin uygulandığı delik çevresinden uzaklaştıkça azalır. Levhalar arasındaki kontak basınç dağılımının değişimini incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi ile deneylerde kullanılan numuneler, alüminyum laşe kalınlıkları parametre olarak alınmak suretiyle incelenmiştir. Kontak basınç gerilmelerinin alüminyum laşe

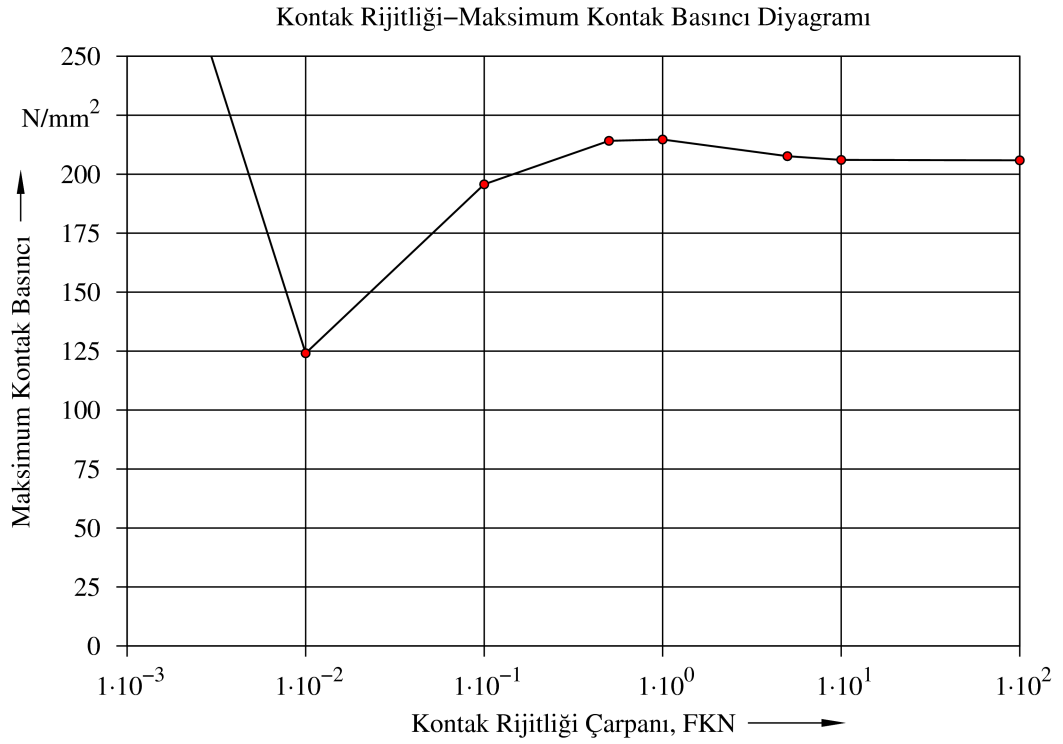
kalınlığına bağılı değişimi, uzun süreli uygulanan yükleme deneylerinde, $t_{Al}=5.0$ ve 8.0 mm kalınlıklı numunelerin sınır durumlara erişmeden kayma sebebini açıklamaktadır.

Bu incelemede, bulon öngerilme kuvveti sadece pul alt yüzeyinden (Şekil 5.1) düzgün yayılı yük olarak üstte görülen alüminyum levhaya etkitilmiş ve böylece kontak yüzeyindeki basınç gerilmelerinin dağılımı araştırılmıştır.

Modelde herhangi bir bulon kullanılmamıştır. Elastisite modülü yüksek olan elemanlar kontak, diğer temas yüzeyi ise hedef elemanlar olarak modellenmiştir. Bu araştırma sırasında temas yüzeyinde yüzey-yüzeye kontak tanımlanmıştır [48]. Bunun sebebi bu modelde farklı bir kontak modelinin kullanılamayacağı değil (ki noktadan-noktaya veya noktadan-yüzeye kontak modellemesi yapılabilir), daha sonra hazırlanacak modellere temel teşkil etmesidir. Eleman boyutları kontak yüzeyi boyunca aynı olmadığından, delik çevresindeki ayrıklaştırmada farklılık gösterdiğinden kontak yüzeyini tariflemeye kullanılan rijitliğin öncelikle araştırılması düşünülmüştür. Bunun için deneylerde kullanılan geometrik boyutlar ve dış alüminyum laşe kalınlığı $t_{Al}=8.0$ mm kullanılarak, alüminyum ve çelik levhalar arasındaki kontak rijitliği, $FKN=1E-3, 1E-2, 1E-1, 1, 10, 100$ değerleri verilerek çözümleme yapılmıştır. Model ve ayrıklaştırması, sınır şartları ve uygulanan kuvvet Şekil 5.1’de görölmektedir. Yükleme elastik sınır içerisinde kaldığından malzeme modeli olarak elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Elastisite modülü alüminyum için $E_{Al}=68500$ N/mm², çelik için ise $E_{St}=210000$ N/mm² olarak alınmıştır. Her iki malzemede Poisson oranı $\nu=0.3$ olarak modelde kullanılmıştır. Simetri şartları gözönünde tutularak ve fiziksel modelin 1/8’i düşünülerek sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.



Şekil 5.1 : Alüminyum ve çelik levhalarda öngerilme kuvvetinden dolayı iki levha arasında oluşan basınç dağılımının belirlenmesinde kullanılan model, yükler ve sınır şartları (üstten ve perspektif görünüş).

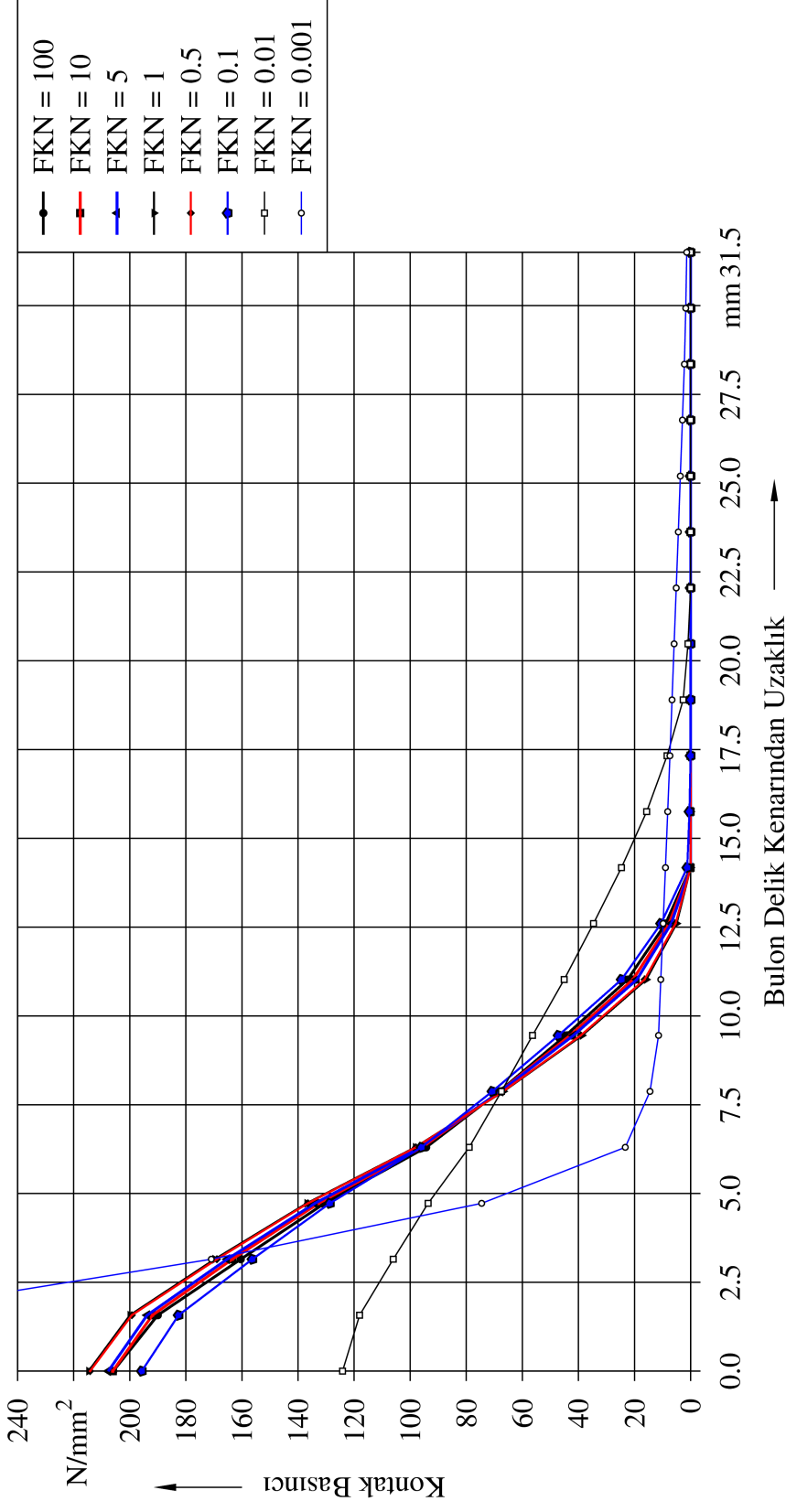


Şekil 5.2 : $t_{Al}=8.0$ mm, $t_{St}=10.0$ mm, 1/8 sonlu eleman modelinde, alüminyum-elik kontak rijitliğinin, maksimum kontak yüzeyi basıncına etkisi.

Toplam sekiz farklı kontak rijitliği değerı için çözümlene yapılmış ve buna bağlı olarak Şekil 5.2 ve 5.3’de verilen iki diyagram oluşturulmuştur. Şekil 5.2 kontak rijitliğinin, en büyük kontak basınç gerilmesine bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 5.3 ise levhadaki delik yüzünden levha dış kenarına dik kontak yüzeyinde alınan bir çizgide kontak basınç gerilmesinin dağılımını farklı kontak rijitliği değerleri için gösterilmiştir.

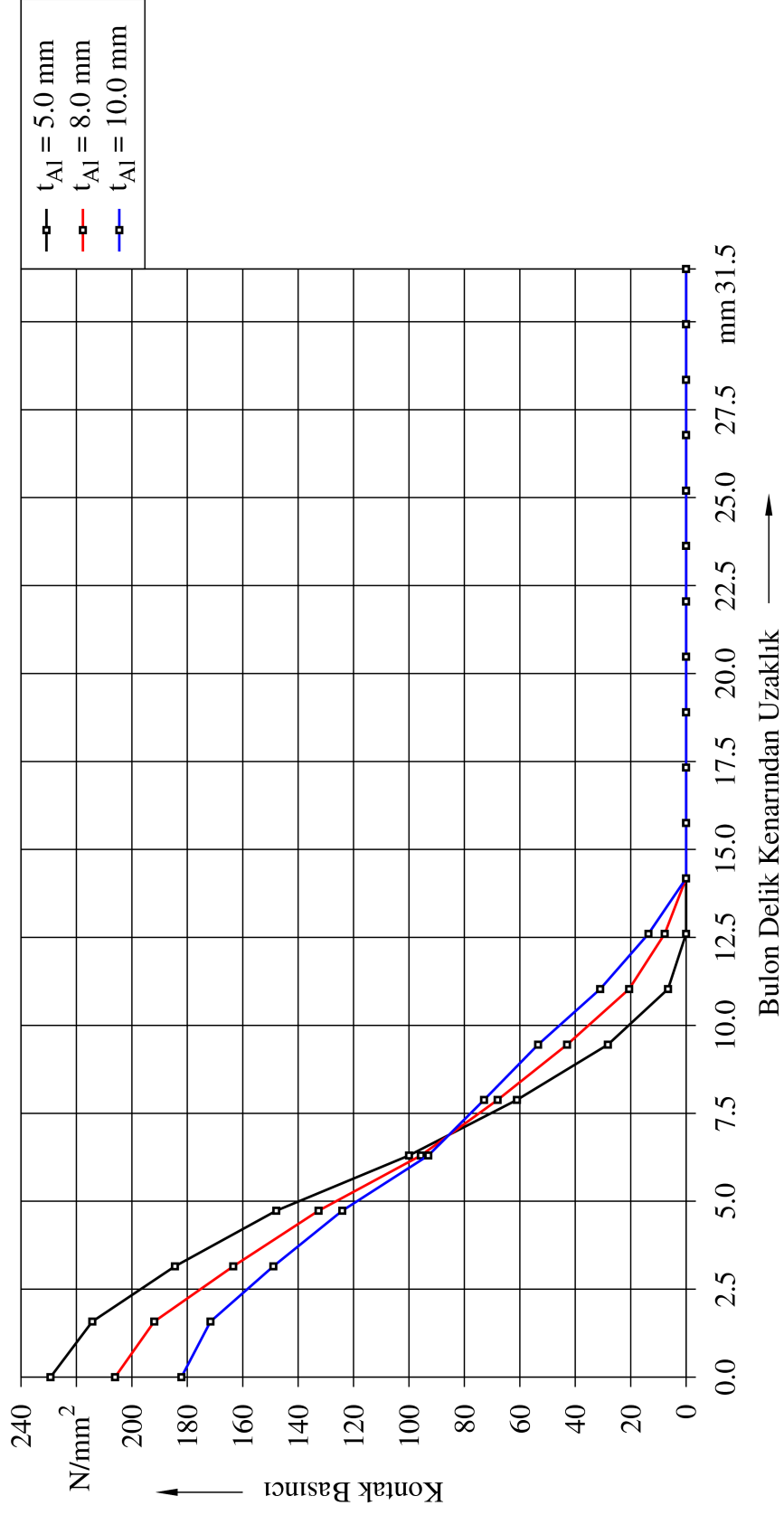
Buradan görüldüğü gibi küçük kontak rijitliği değerleri ile elde edilen sonuçlar gerçekten uzak olmakta, $FKN=0.1$ ve daha büyük değerlerde kontak basıncı dağılımında kararlılık görülmektedir.

Sürtünme Yüzeyinde Kontak Basıncı Dağılımı Diyagramı



Şekil 5.3 : $t_{AI}=8.0$ mm, $t_{SI}=10.0$ mm, 1/8 sonlu eleman modeli için FKN, kontak rijitliği değerlerine bağlı olarak kontak basıncı değişimi.

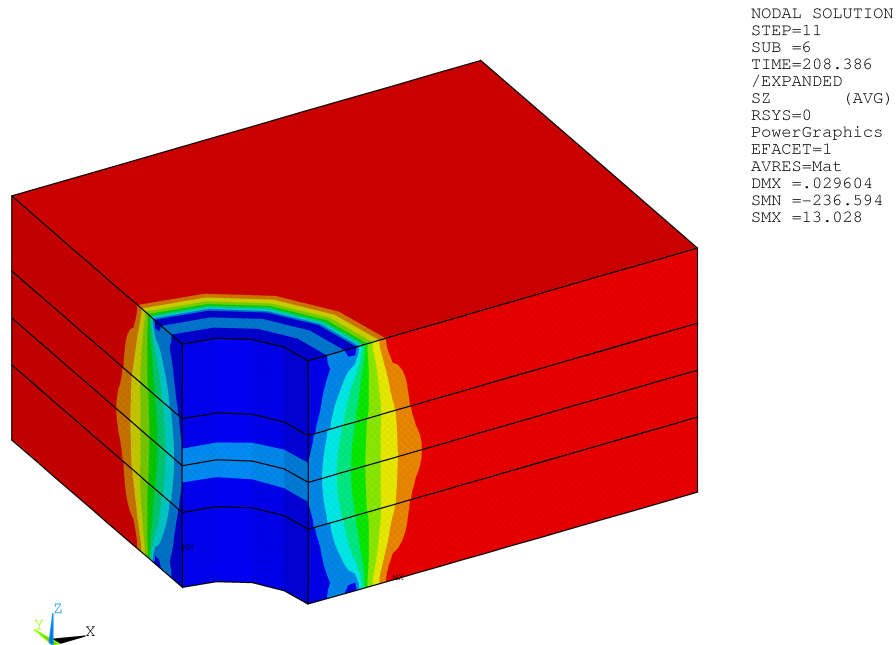
Sürtünme Yüzeyinde Kontak Basıncı Dağılımı Diyagramı



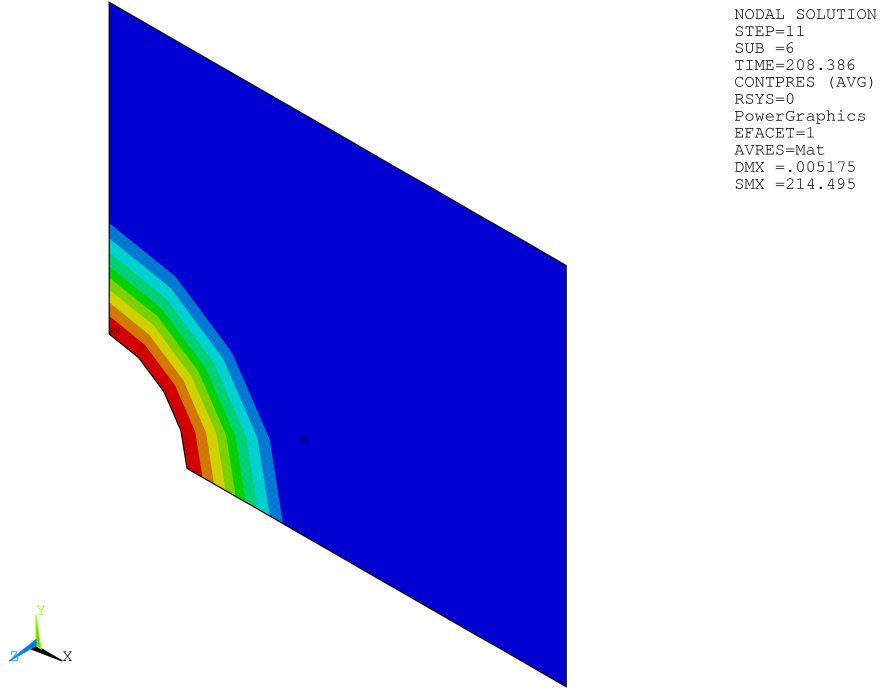
Şekil 5.4 : Alüminyum ve çelik birleşim yüzeyinde $t_{Al}=5, 8, 10$ mm ve $t_{st}=10$ mm için 1/8 sonlu eleman modelinde (kontak rijitliği $FKN=10.0$) delik kesitinde kuvvette dik doğrultuda kontak basıncı dağılımı.

Kontak basınç gerilmesinin kalınlığa bağlı değişiminde kontak yay katsayısı olarak $FKN=10.0$ alınmıştır. Bu değer kullanılmak suretiyle $t_{Al}=5.0, 8.0$ ve 10.0 mm için elde edilen sonuç kontak basınç dayanımları Şekil 5.4’de görülmektedir.

Öngerilme kuvvetinin uygulandığı z eksenini doğrultusunda gerilme dağılımının örneği ($t_{Al}=8.0$ mm) Şekil 5.5’ten görülebilir. Şekilde görüntü düşey simetri ekseninde de oluşturulmuştur. Şekil 5.6 ise alüminyum ve çelik yüzeyler arasında kalan kontak yüzeyinde basınç gerilmelerinin dağılımını göstermektedir. Her iki şekildeki sonuçlar öngerilme kuvvetinin $F_v=100$ kN’a karşılık gelen pul altındaki yayılı yükün simetri koşulu dolayısıyla $\frac{1}{4}$ ’ünün etkidiği duruma aittir.



Şekil 5.5 : Düzgün yayılı yük olarak pul alt yüzü alanına verilen öngerilme kuvvetinin birleşim içerisinde z eksenini yönünde gerilme olarak dağılımı.



Şekil 5.6 : Kontak yüzeyindeki basınç gerilmesi dağılımı.

5.3 Birleşim Davranış Hesaplarında Kullanılacak Yarım Bulon Modeli

Literatürde çok çeşitli bulon modeline rastlanmıştır [50-53]. Modelin gerçekliği, birleşimin davranışına etki edecektir. Birleşimin sürtünme ile aktarabildiği yükün belirlenmesinde öngerilme kuvvetinin ve bu kuvvetin yükleme sırasındaki değişiminin önemi büyüktür. Bu sebeple, Gebbeken [54, 55] tarafından yapılan yaklaşımla, bulon yük etkisi altındaki davranışı model içerisinde gerçekleştirebilmek için yarım bulon modeli oluşturulmuştur. Burada amaç, eleman adedini düşürmek ve modeli basitleştirmektir. Uygulanan geometrik yaklaşımda bulon eksenı boyunca enkesit değiştirilmeden bulon şaftı ve yiv açılmış kısmı ve şaft ile yiv arasındaki bölgenin bulon eksenı boyunca olan uzunluklarının yarısı kullanılmıştır. Sadece bulon başlık kısmı modellenmiş diğer uçta ise simetrik sınır koşulları kullanılmıştır.

Steurer[56, 57] çalışmasında kullanmak üzere 10.9 kalitesinde HV öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar üzerinde çekme deneyleri yapmış, bu deneylerde farklı çapta bulonlar kullanmıştır. Deneylerde kullanılan bulonlar aynı çap olması

durumunda, bulon uzunluğu ve bulonun sıkıştırdığı levha paketinin farklı olması hallerini de gözönüne almıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde vermiştir. Çizelgelerde bulon çekme kuvveti – yerdeğiştirme değerleri verilmiştir. Bulon üretici firması da verilen bilgiler arasındadır.

Bu çalışmada kullanılan bulonlar ile Steurer [56] çalışmasında kullanılan bulonlar aynı firmaya aittir (Peiner GmbH günümüzde Textron firması bünyesindedir).

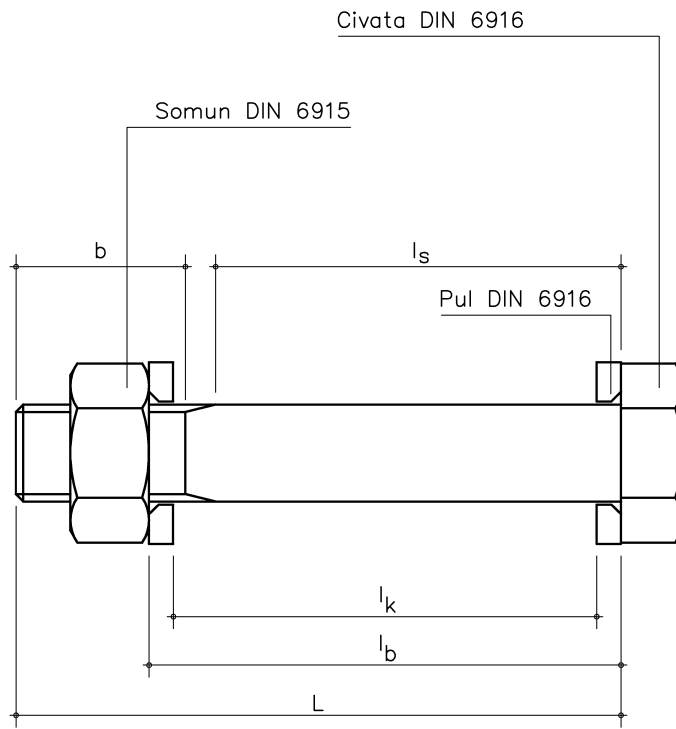
M. Zajdel [58] ise çalışmasında ayrıntılı bir bulon modeli oluşturmuştur. Bu modelde pul rijitliği 10000 Gpa gibi çok yüksek bir değer olarak alınmıştır. 10.9 kalitesindeki elasto-plastik malzeme modeli O.S. Bursi'nin [59-61] “COST C1 Numerical Simulation Working Group” çalışması dahilinde elde ettiği malzeme modelinden alınmıştır. Gebbeken [54] bulon modelinde kullanılacak eleman tipi ve boyutlarını da araştırmıştır. Düzgün sekiz kenarlı bir bulon modeli ile yeterli yaklaşıklıkla bulonun modellenebileceğini belirtmiştir.

Bu bölümde yapılan çalışmalarda bulon modeli öngerilme kuvvetinin ve sonuçlarının daha gerçekçi gözlemlenmesi amacıyla bulon dairesel geometrisi 16 kenarlı olarak düzenlenmiştir.

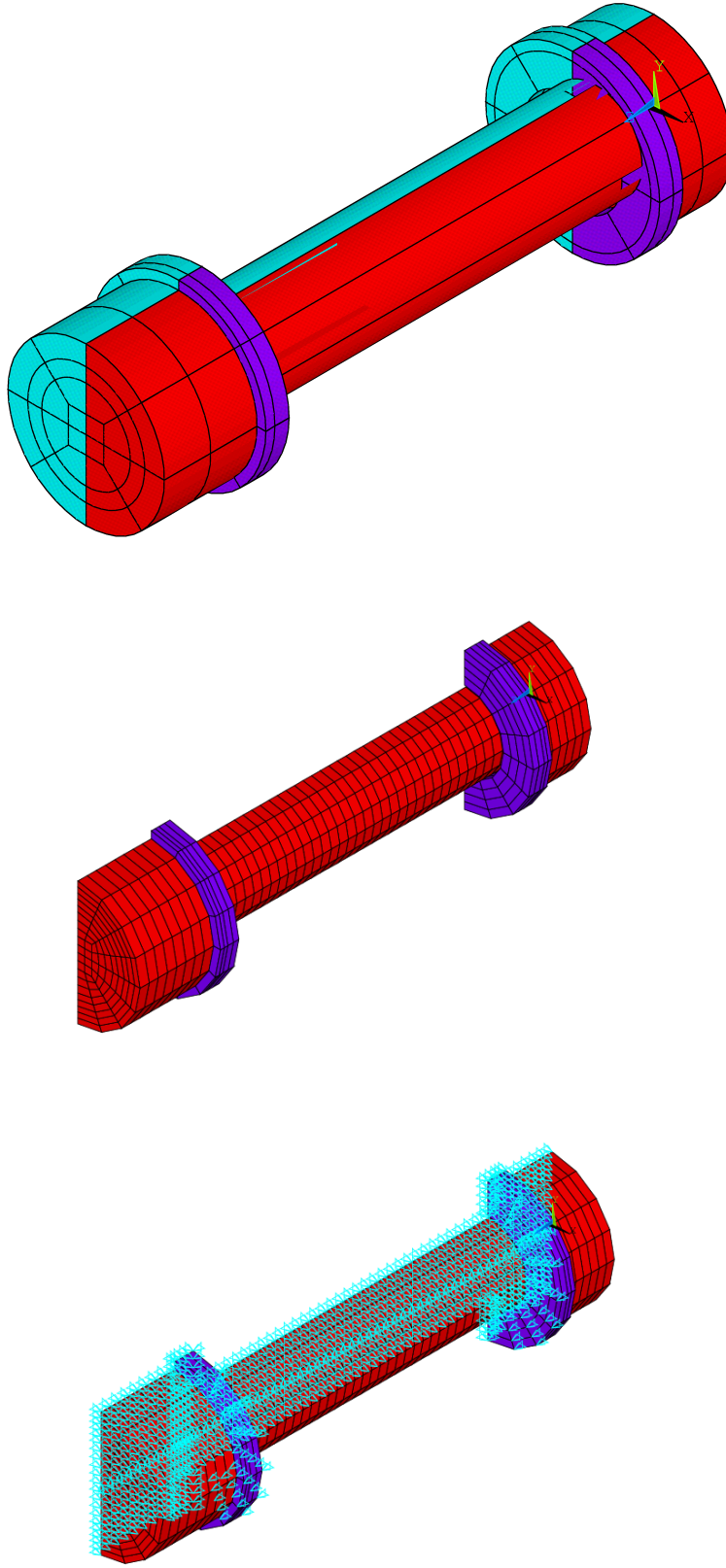
Tam bulon modeli, yarım bulon modelini oluşturmak amacıyla hazırlanmıştır. Bulon boyutları ile ilgili parametreler Şekil 5.7 da görülebilir. Simetri şartları kullanılmak suretiyle tam bulon modelinin yarısı oluşturulmuştur. ½ tam bulon modeli ve sınır şartları Şekil 5.8’de verilmiştir. Yükleme, yerdeğiştirme olarak her iki pul alt yüzlerinden eşit olarak yapılmıştır.

Steurer'in çalışmasında [56] yer alan deney sonuçlarından HV M16x100 için ½ tam bulon modeli oluşturulmuştur. Bu modellerde bulon başlığı alt yüzü ile somun üst yüzü arasındaki mesafe olarak belirtilen $l_b=72.0, 76.0$ ve 80.0 mm olarak alınmıştır. Malzeme modelleri olarak toplam 5 ayrı kombinasyon kullanılmıştır. Geometrik iki farklı bölge farklı malzeme modelleri ile tariflenmiştir. Bunlar bulon ve pul olmak üzere iki farklı bölgedir. Bulon imalatı sırasında bulon başlık ve yiv açılmış bölgeleri, bulon şaftı ile aynı malzeme özelliğinde değildir. Bulon ve somun üretiminde adımlar birbirlerinden farklıdır. Malzeme modelleri için önce bulon ve pul malzemesinin elasto-plastik olması hali gözönüne alınmıştır. Elasto-plastik malzeme özellikleri 10.9 kalitesinde bulon için [58]’de verilen değerler ile hazırlanmıştır. Daha sonra bulon malzemesi elasto-plastik olarak aynen kullanılmış

fakat pul malzemesi elastik olarak modellenmiştir. Oluşturulan bu farklı modelde pul elastisite modülü önce $E_{pul}=10000$ GPA ve daha sonra hazırlanan modelde $E_{pul}=210000$ N/mm² olarak alınmıştır. Son olarak hazırlanan modellerde bulon malzeme özellikleri de elastik olarak $E_{bulon}=210000$ N/mm² değerinde ve pul elastisite modülleri ise yukarıda belirtildiği gibi iki farklı şekilde hazırlanmıştır. Böylece bir geometri için malzeme özellikleri dolayısıyla toplam beş farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu modeller yukarıda [56] verilen deneylerde M16-100 öngerilmeli yüksek mukavemetli bulon için kullanılan boyutlarda ($l_b=72.0$, 76.0 ve 80.0 mm) toplam üç farklı bulon geometrisi için hazırlanmıştır.

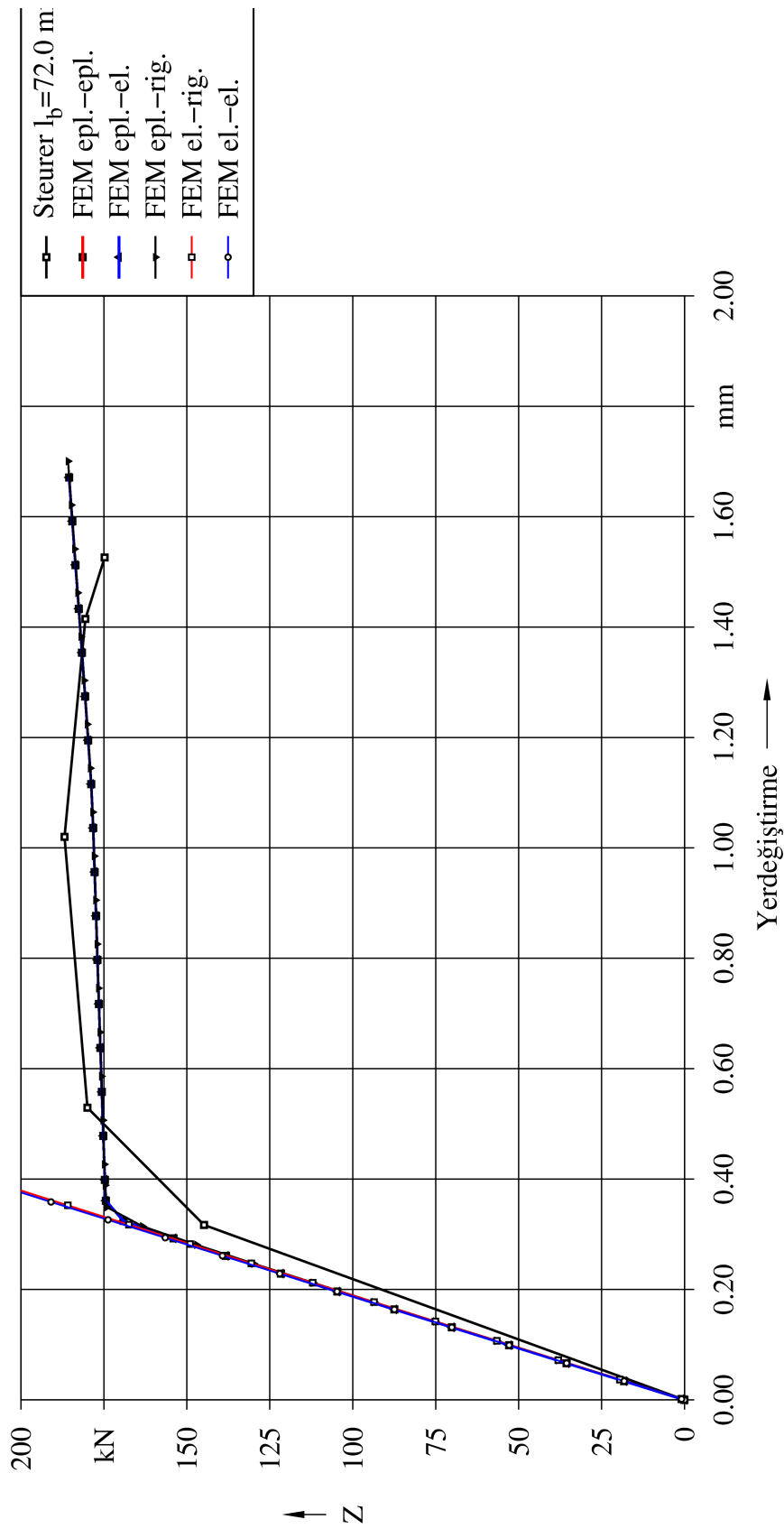


Şekil 5.7 : Öngerilmeli bulon modeli geometrik parametreleri.

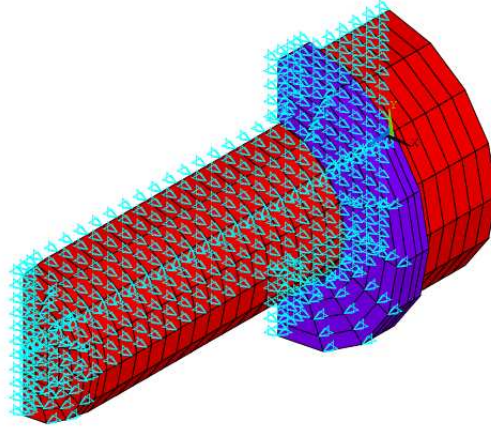
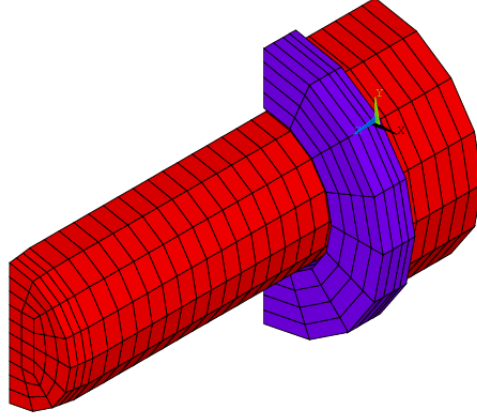


Şekil 5.8 : Tam bulon modeli ve sınır şartları.

Bulonda Çekme Kuvveti–Yerdeğiştirme Diyagramı



Şekil 5.9 : HVM16 DIN6914 10.9 $l_b=72$ mm, öngerilmeli bulon çekme deneyi (A. Steurer) ve sonlu eleman modeli sonuçları.



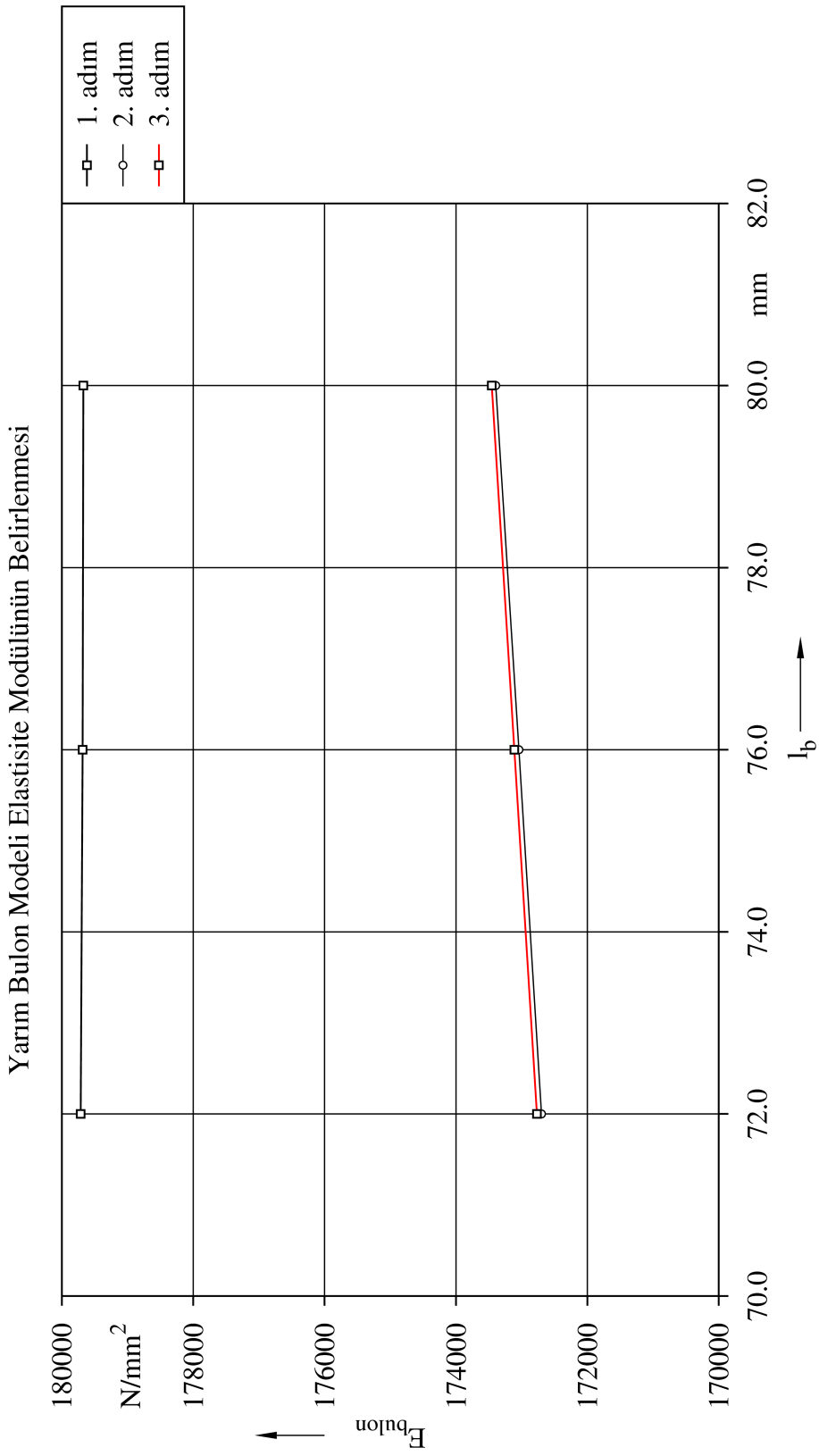
Şekil 5.10 : Yarım bulon modeli ve sınır şartları.

Hazırlanan bu modellerden $l_b=72.0$ mm için elde edilen sonuçlar ile Steurer[56] tarafından verilen bulon çekme deneyi sonuçları Şekil 5.9’da verilmiştir. Burada kalın siyah eğri deney sonucudur. Yapılan modellerden elde edilen sonuçların EA rijitliği deneyden elde edilen değere göre daha fazladır.

Sürtünme ile yük aktaran öngerilmeli yüksek mukavemetli birleşim deneylerinde bulonlara uygulanan öngerilme kuvveti $F_v=100$ kN’dur. Şekil 5.9’de bu değer,

bulon çekme deneyinde elastik sınır içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu yüzden yarım bulon modeli hazırlamak için bulon ve pul malzeme modelleri elastik ve her ikisi için de elastisite modülü başlangıçta 210000 N/mm^2 olarak alınmıştır. Tam bulon çözümlerinden $l_b = 72.0, 76.0$ ve 80.0 mm için $0-100 \text{ kN}$ arasındaki yüklemede elde edilen rijitlik değerinin deneyde verilen rijitlik değerine oranı, yarım bulon malzeme modelinde elastisite modülünü düzeltmek için kullanılmıştır. Şaft ve yiv açılmış bulon bölgesi çapları yarım modelde değiştirilmeden kullanılmıştır. $\frac{1}{2}$ yarım bulon modeli çözülmüş ve $0-100 \text{ kN}$ yükleme bölgesindeki rijitliği, deneyler[56] ile karşılaştırılmış ve düzeltilen E_{bulon} elastisite modülü ile 2.adımda yeni bulon rijitliği elde edilmiştir. Aynı işlem yeni bulunan elastisite modülü ile tekrarlanmıştır. 3.adım sonunda deney ile sonlu elemanlar modeli rijitliğinde oluşan değişimin küçüklüğü, elde edilen elastisite modülünün hesaplarda yeterli yaklaşıklıkla kullanılabileceğini göstermiştir. Her adımda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. Üçüncü adımda elde edilen değerler sadece bulon için kullanılıp (Şekil 5.10), yarım bulon modeli hazırlanmıştır. Yarım bulon modeli için, bulon şaft uzunluğunun yarısı, yiv açılmış kısım ile somun arasındaki uzunluğun yarısı, ve bu iki ara bölge arasındaki uzunluğun yarısı kullanılarak geometrik model oluşturulmuştur. Burada Schaumann vd. [62] çalışmalarında yarım bulon modelini bulon şaft eksenine boyunca uzunlukların yarısını almak yerine şaft ile yiv bölgesi arasındaki kısmı çok küçük olarak (0.5 mm) tarif etmişlerdir. Bu şekilde bir düzenleme sıcaklık değişimi durumunda kullanılacak bulonda farklı eksenel uzamalar eldesine sebep olacağından uygulanmamıştır.

Bulon için elde edilen elastisite modülleri $t_{Al}=5.0 \text{ mm}$ için kullanılan bulonun sıkıştırdığı paket kalınlığı $l_b=76.0 \text{ mm}$ için, $t_{Al}=8.0 \text{ mm}$ için, $l_b=78.0 \text{ mm}$ ve $t_{Al}=10.0 \text{ mm}$ için $l_b=82.0 \text{ mm}$ birleşim paketi uzunlukları dikkate alınmak suretiyle, Şekil 5.11’den ilerde hazırlanacak modellerde kullanılmak amacıyla alınmıştır. $l_b=82.0 \text{ mm}$ değeri için doğrusal ekstrapolasyon yapılmıştır. Bu değerler birbirine mertebe olarak çok yakın olmasına rağmen (yaklaşık $E_{\text{bulon}}=173000 \text{ N/mm}^2$) her farklı levha paketi için sonlu eleman modellerinde l_b boyuna bağlı olarak hesaplardan elde edilen (Şekil 5.11) değerler kullanılmıştır. Şekil 5.11 de grafik olarak görülen sonuçlar Çizelge 5.2’de ayrıntılı olarak özetlenmiştir.



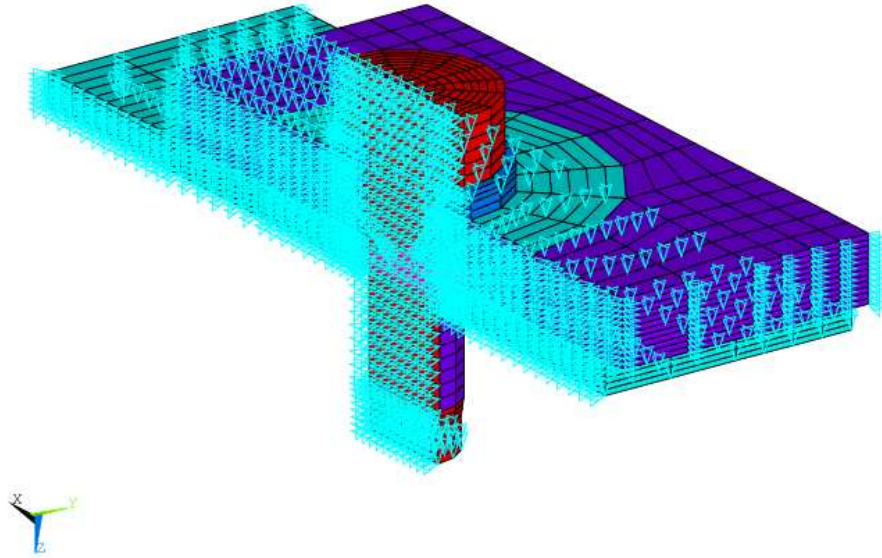
Şekil 5.11 : $l_b = 72, 76, 80$ mm için sonlu eleman bulon modeli Elastisite modülü düzeltilmesi.

Çizelge 5.1: Bulon rijitliğinin düzeltilmesi hesap adımları.

		1.Adım		
I_b	$EA_{Stuerer}$ [kN]	EA_{Hesap} [kN]	EA_S/EA_H	$\alpha \times E_i$ [N/mm ²]
72	32846.3	38382.0	0.8558	179713
76	32789.3	38321.4	0.8556	179684
80	32761.3	38291.1	0.8556	179673
		2.Adım		
		EA_{Hesap} [kN]	EA_S/EA_H	$\alpha \times E_i$ [N/mm ²]
		34180.6	0.9610	172698
		34048.8	0.9630	173038
		33947.5	0.9651	173395
		3.Adım		
		EA_{Hesap} [kN]	EA_S/EA_{1H}	$\alpha \times E_i$ [N/mm ²]
		32832.8	1.0004	172769
		32776.2	1.0004	173107
		32749.9	1.0003	173456

5.4 Alüminyum Laşe Kalınlıklarının Sürtünme Katsayısına Etkisi

Yukarıda hazırlanan sonlu eleman modelleri, birleşim modelinin hazırlanması için kullanılmıştır. Bulon modeli, birleşim modeline dahil edilmiş ve model simetriden dolayı fiziksel modelin 1/8'i olarak hazırlanmıştır (Şekil 5.12). Bu şekilde modelde bilinmeyen sayısı önemli ölçüde azaltılmış ve sonuçların değerlendirilmesi de daha kolaylaşmıştır.

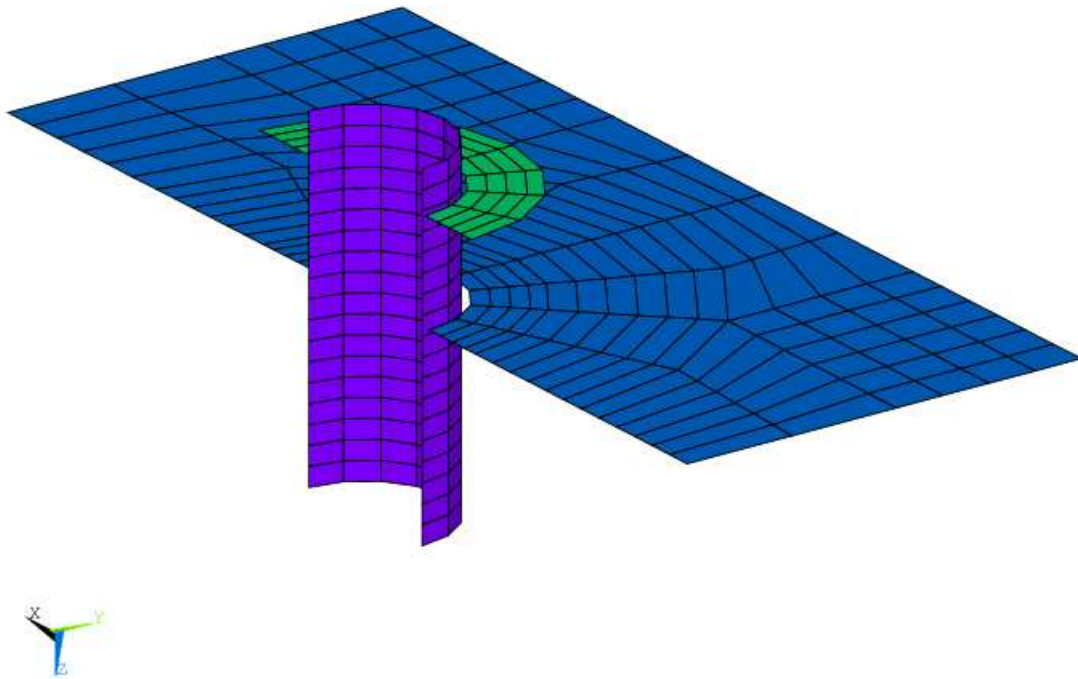


Şekil 5.12 : Kalınlık değişiminin sürtünme katsayısına etkisini incelemede kullanılan 1/8 birleşim modeli ve sınır şartları.

Kontak yüzeyleri bu modelde 3 adettir. Bunlar:

- Pul alt yüzü ile alüminyum laşe dış yüzü arasında,
- Bulon şaftı ile birleşimi oluşturan levhalardaki delik iç yüzeyleri arasında,
- Alüminyum laşe ile çelik levha arasındadır.

Şekil 5.13, yukarıda verilen bu kontak yüzeylerinin CONTA173 ile oluşturulan elemanlarını göstermektedir.

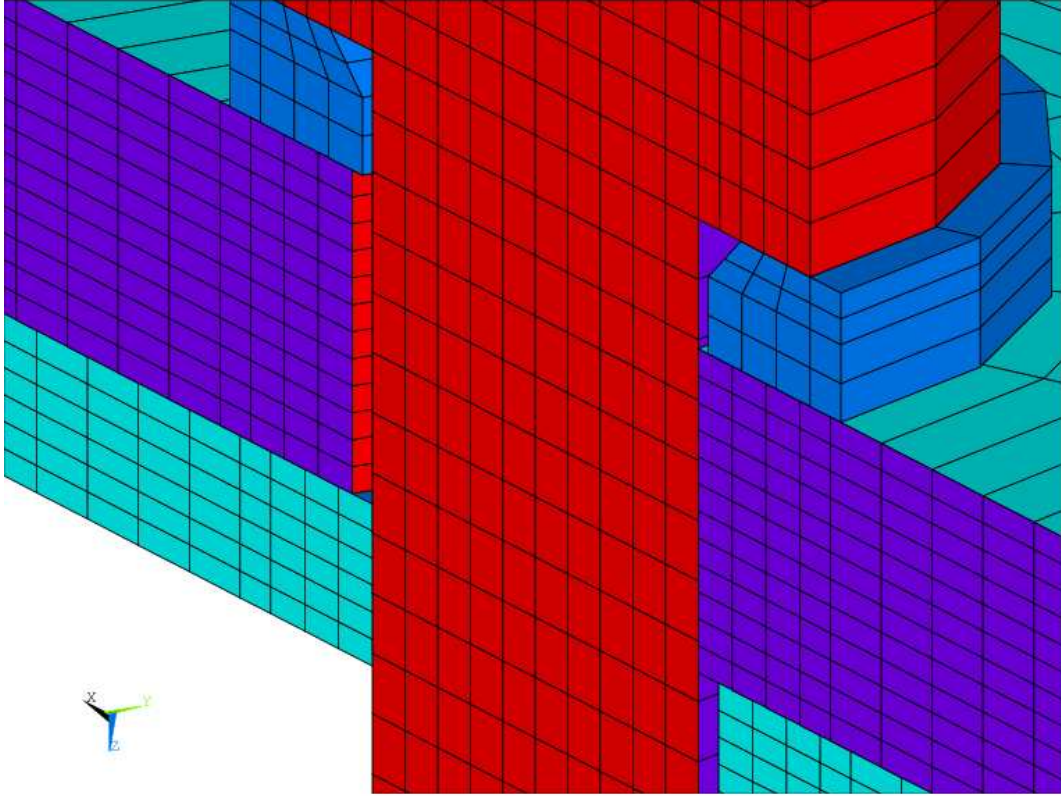


Şekil 5.13 : Birleşimde kontak yüzeylerinde oluşturulan kontak elemanları.

Panait et. al. [63], çalışmalarında sürtünme katsayısını zamana bağlı olarak modellemişlerdir. Burada ise, alüminyum laşe ile çelik levha arasındaki sürtünme katsayısı yapılan deneylerde alkali-silikat sürtünme arttırıcı boya kullanılması halinde elde edilen $\mu=0.65$ olarak alınmıştır. Pul alt yüzü ile laşe arasındaki sürtünme katsayısı $\mu=0.5$ [54] ve şaft ile delik iç yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı ise $\mu=0.1$ olarak alınmıştır. Delik iç yüzeyi ile şaft arasındaki kontak yüzeyi kayma gerçekleşikten sonra etkin olacağından, araştırılacak konu için sonuçları irdelenmeyecektir.

Alüminyum ve çelik yüzeyleri arasındaki kontak rijitliği olarak $FKN=10.0$ kullanılmıştır. Levhaların birbirine göreceli hareketini sağlamak amacıyla levha

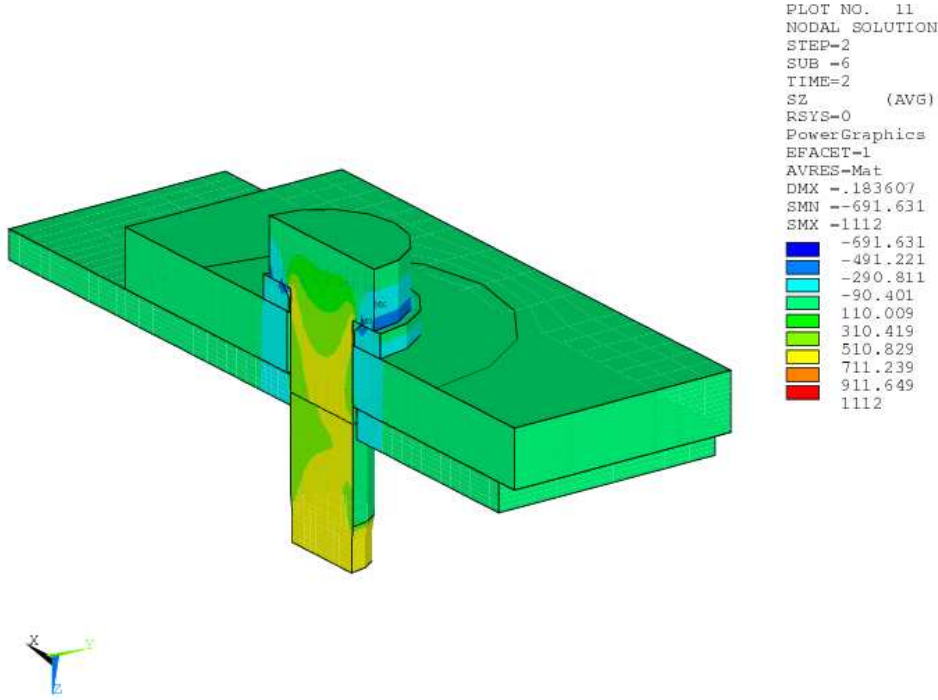
delikleri 1 mm eksende şaşırtılmıştır. Bu şekilde çelik levhaya uygulanacak yükleme sonucunda, alüminyum ve çelik levhanın bulon şaftına kadar 1 mm hareketi yapabilmesi sağlanmıştır (Şekil 5.14). Hazırlanan makrolarda bu işlem için üç farklı koordinat sistemi tariflenmiş ve bulon ve levhalar bu şekilde modellenmiştir.



Şekil 5.14 : Alüminyum ve çelik levha delik eksenleri x ekseninde 1 mm farklıdır.

Çözümlemede ANSYS yazılımında kontak davranışının modellenmesi ve kullanılacak model katsayıları incelenmiştir. Hareketin sağlanması için program tarafından çok yüksek olarak kullanılan maksimum kayma gerilmesi olarak, kontak yüzeylerinden akma gerilmesi küçük olan malzeme için hesaplanan en büyük kayma gerilmesi kullanılmıştır.

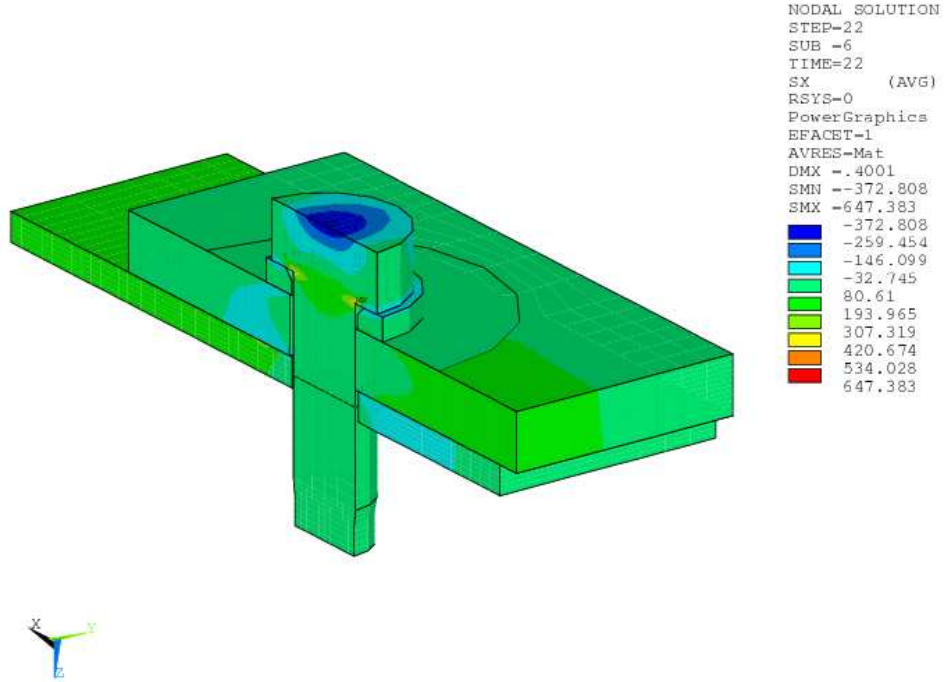
Yükleme öncelikle öngerilme kuvvetinin bulona verilmesi ile başlamış, sonrasında ise çelik levha uç kısmındaki noktalara yerdeğiştirme verilerek ardışık yükleme yapılmıştır. Doğrusal olmayan şekil değiştirmeler her ardışık yükleme adımında dikkate alınmıştır. Bu yüklemeler üç farklı alüminyum laşe kalınlığı için yapılmıştır ($t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm).



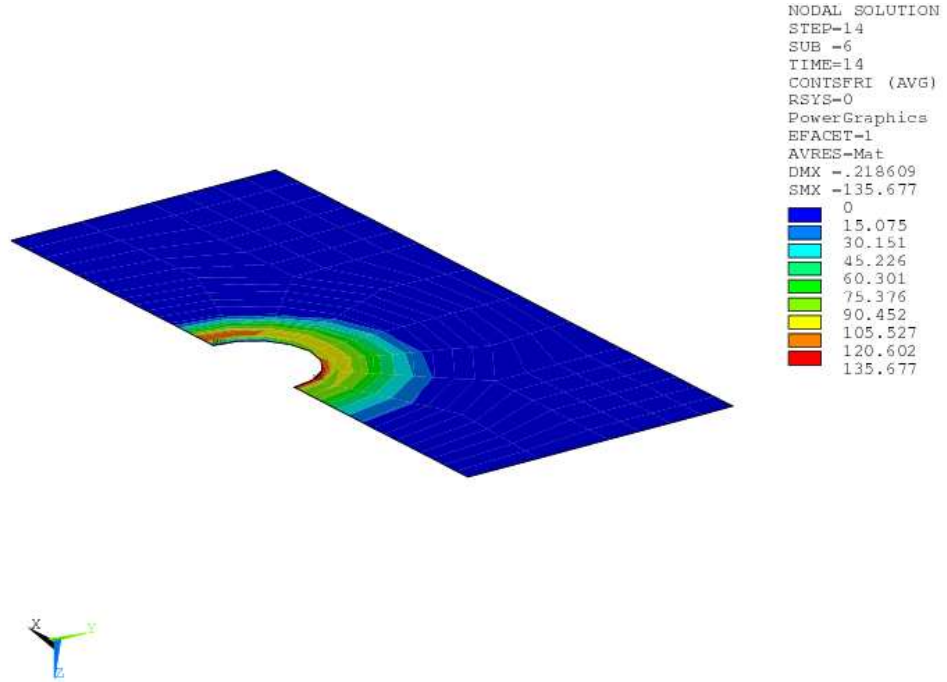
Şekil 5.15 : $t_{Al}=8.0$ mm birleşim modeli öngerilme yüklemesi sonrasında z ekseninde gerilme dağılımı.

Şekil 5.15’de $t_{Al}=8.0$ mm örneği alınarak, öngerilme verildikten sonraki yükleme adımında z ekseninde bulundaki gerilme dağılımı görülmektedir. İlerleyen yükleme adımında levhalardaki gerilme dağılımını gözlemleyebilmek için yüklemenin uygulandığı x eksen yönünde gerilme dağılımı örnek olarak verilmiştir (Şekil 5.16).

Kontak yüzeyinde sürtünme katsayısı ve kontak yüzeyi basınç gerilmesi ile belirlenen kontak yüzeyi kayma gerilmesi sadece alüminyum ve çelik elemanların birleşimindeki kontak yüzeyi dikkate alınmak suretiyle Şekil 5.17’de verilmiştir. Burada kayma gerilmesinin deliğe yakın bölgelerde üst sınıra eriştiği ve levhaların birbirlerine göre kaymaya başladığı görülmektedir. 14 no’lu yükleme adımının seçilmesinin sebebi, 0.15 mm’lik levhaların göreceli yerdeğıştirmesinin gözlemlendiği yükleme adımı olmasıdır.



Şekil 5.16 : $t_{Al}=8.0$ mm birleşim modeli yerdeğiştirme yüklemesi sonrası x ekseninde gerilme dağılımı.



Şekil 5.17 : $t_{Al}=8.0$ mm birleşim modeli kontak yüzeyi kayma gerilmesi dağılımı.

Ardışık yapılan yerdeğiştirme yüklemelerinin ardından çözümler her adım için bir dosyada saklanmıştır. Hazırlanan makro ile yarım bulon alt ucundaki z eksen yönünde oluşan kuvvet ile öngerilme kuvvetinin modeldeki değeri elde edilmiştir. Alüminyum levha simetri ekseninde oluşan kuvvet ile her adımda uygulanan çekme kuvveti bulunmuştur. Alüminyum levha dış yüzünde, delik ekseninde oluşan x eksenindeki hareket ve çelik levha dış yüzünde, delik eksen hizasında oluşan x eksenindeki hareket değerleri toplanmış ve levhaların birbirlerine göre bağıl hareketi hesaplanmıştır. Kısa süreli kayma deneylerinde yapıldığı şekilde elde edilen bu sonuçlar ile anlık sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen değerler düzenlenerek, yerdeğiştirme ile her bir alüminyum laşe kalınlığı için anlık sürtünme diyagramları hazırlanmıştır. Şekil 5.18’de Poisson oranı, $\nu=0.3$ ve $\nu=0$ değerleri için bu eğriler görülmektedir. Şekil 5.19’da ise Poisson oranına ve kalınlığa bağlı olarak öngerilme kuvvetindeki değişimin çok küçük olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2: Sürtünme katsayısına kalınlığın etkisi.

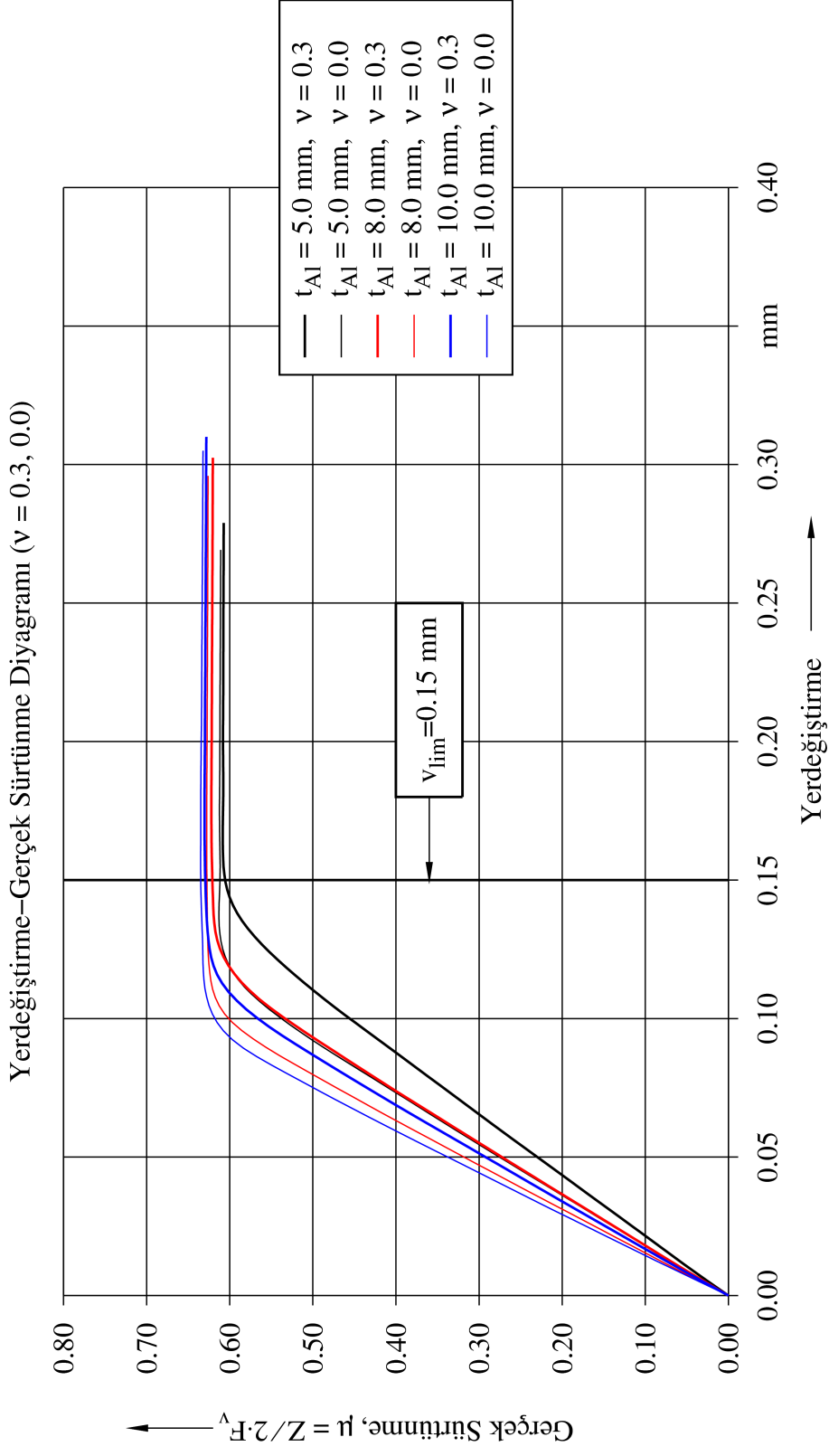
t_{Al} [mm]	t_{St} [mm]	E_{Al} [kN/mm ²]	E_{St} [kN/mm ²]	sürtünme katsayısı		değişim %
				Poisson oranı		
				0.3	0	$\mu_{0.3}/\mu_0$
5	10	68500	210000	0.6023	0.6118	0.98
8	10	68500	210000	0.6208	0.6274	0.99
10	10	68500	210000	0.6294	0.6347	0.99

Çizelge 5.2’de elde edilen bulgular $v_{lim}=0.15$ mm kayma sınırı dikkate alınarak özetlenmiştir. Burada, Poisson oranı sıfır olarak alınan elemanlar, x ekseninde yüklemeye maruz çelik ve alüminyum levhadır.

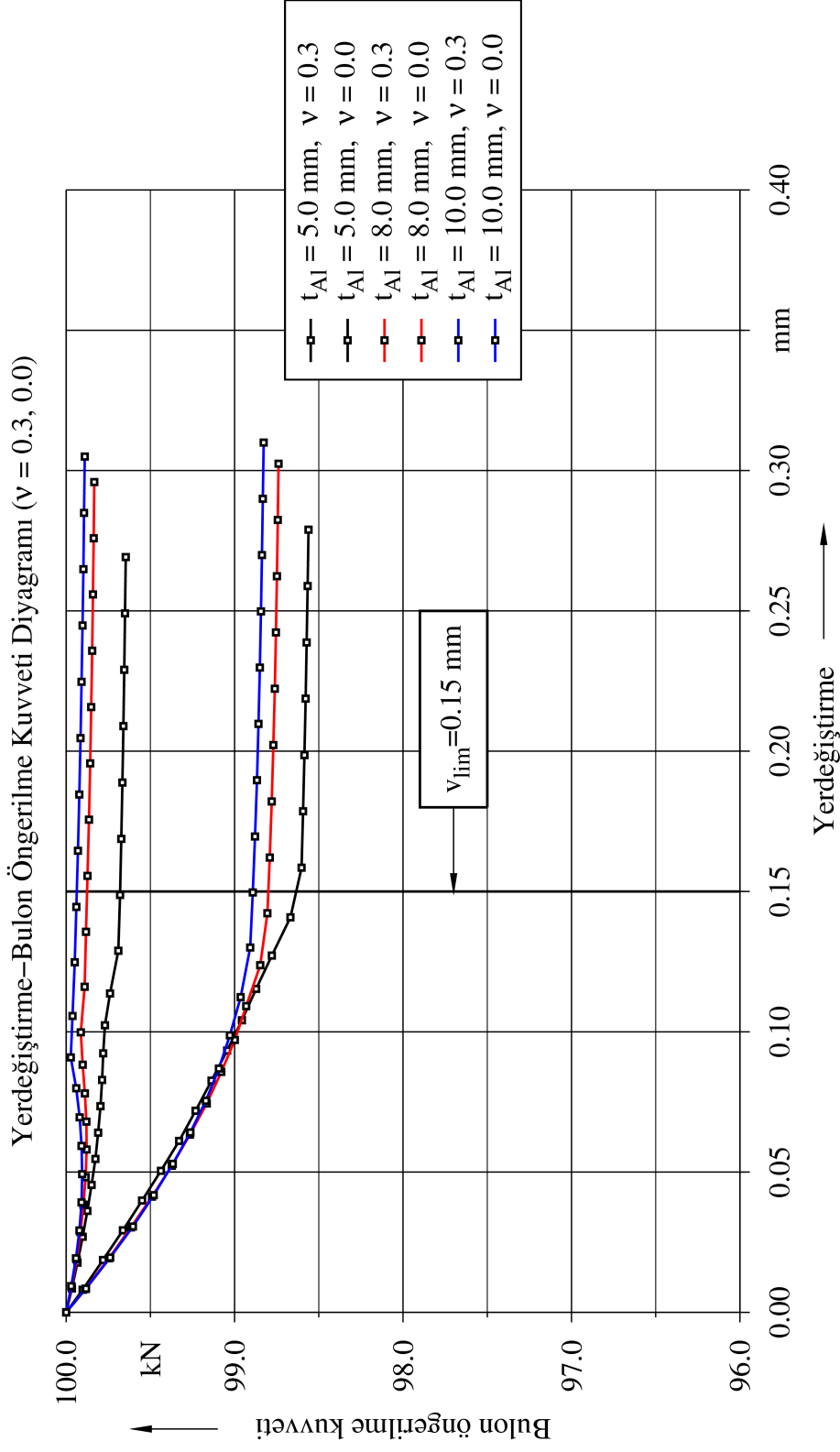
Bu aşamada 0.10 mm’lik yerdeğiştirme durumunda oluşan sürtünme katsayılarının da incelenmeye değer olduğu düşünülmüş ve Çizelge 5.3 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.3: $\nu=0.10$ mm için anlık sürtünme katsayısına kalınlığın etkisi.

t _{Al} [mm]	t _{St} [mm]	E _{Al} [kN/mm ²]	E _{St} [kN/mm ²]	R anlık sürtünme [v=0.1mm]		değişim % μ _{0.3} /μ ₀
				Poisson oranı		
				0.3	0	
5	10	68500	210000	0.4553	0.5372	0.85
8	10	68500	210000	0.5323	0.6010	0.89
10	10	68500	210000	0.5651	0.6124	0.92



Şekil 5.18 : $t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm için sürtünme katsayısına kalınlığın etkisi.



Şekil 5.19 : $t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm için bulon öngerilme kuvvetinde değişim.

5.5 Sıcaklık Değişiminin Sürtünme Katsayısına Etkisi

Araştırmada deneyler +20°C sabit sıcaklıkta yapılmıştır. Sıcaklık farklılıklarının deneylerin sonucuna etkisini araştırmak için önceki bölümde hazırlanan modelde öngerilme kuvvetinin ardından sıcaklık değişimi yüklemesi yapılmıştır. Sonrasında yerdeğiştirme yüklemesi çelik elemana ardışık olarak yapılmış ve sürtünme katsayıları sıcaklık farklarına bağlı olarak $t_{Al}=5.0, 8.0$ ve 10.0 mm alüminyum laşe kalınlıkları için incelenmiştir. Sıcaklık değişimi olarak $temp_2=-20^\circ\text{C}, 0.0^\circ\text{C}$ ve $+40^\circ\text{C}$ dikkate alınmıştır.

Şekil 5.20-5.22’de incelenen herbir laşe kalınlığı için verilen bu sıcaklık değişimleri için, elde edilen yerdeğiştirme – anlık sürtünme katsayılarını gösteren eğriler hazırlanmıştır.

Çizelge 5.4 : Sürtünme katsayısına sıcaklığın etkisi

t_{Al} [mm]	t_{St} [mm]	E_{Al} [kN/mm ²]	E_{St} [kN/mm ²]	sürtünme katsayısı			
				$t_1[^\circ\text{C}]$			$t_0[^\circ\text{C}]$
				-20	0	40	20
5	10	68500	210000	0.5988	0.6007	0.6036	0.6023
8	10	68500	210000	0.6200	0.6204	0.6211	0.6208
10	10	68500	210000	0.6289	0.6293	0.6296	0.6294

$$\mu=0.65$$

$$\alpha_{Al}=2.3e-5$$

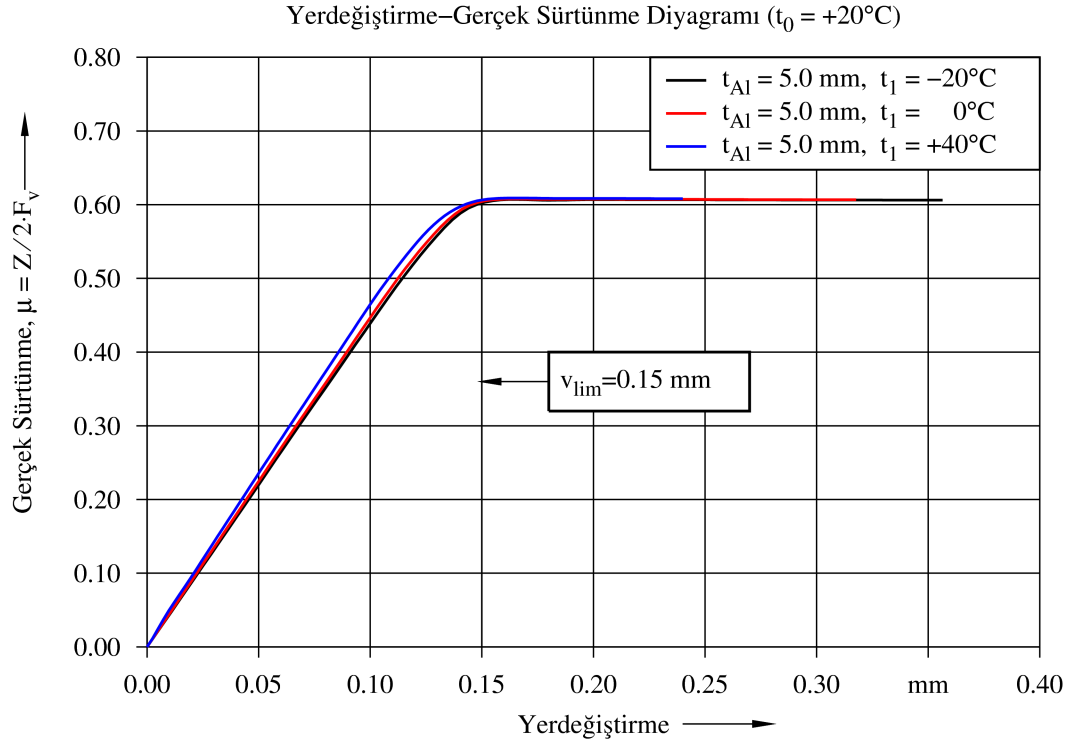
$$\alpha_{St}=1.2e-5$$

Çizelge 5.5 : Sürtünme katsayısına sıcaklığın etkisinde değişim miktarı

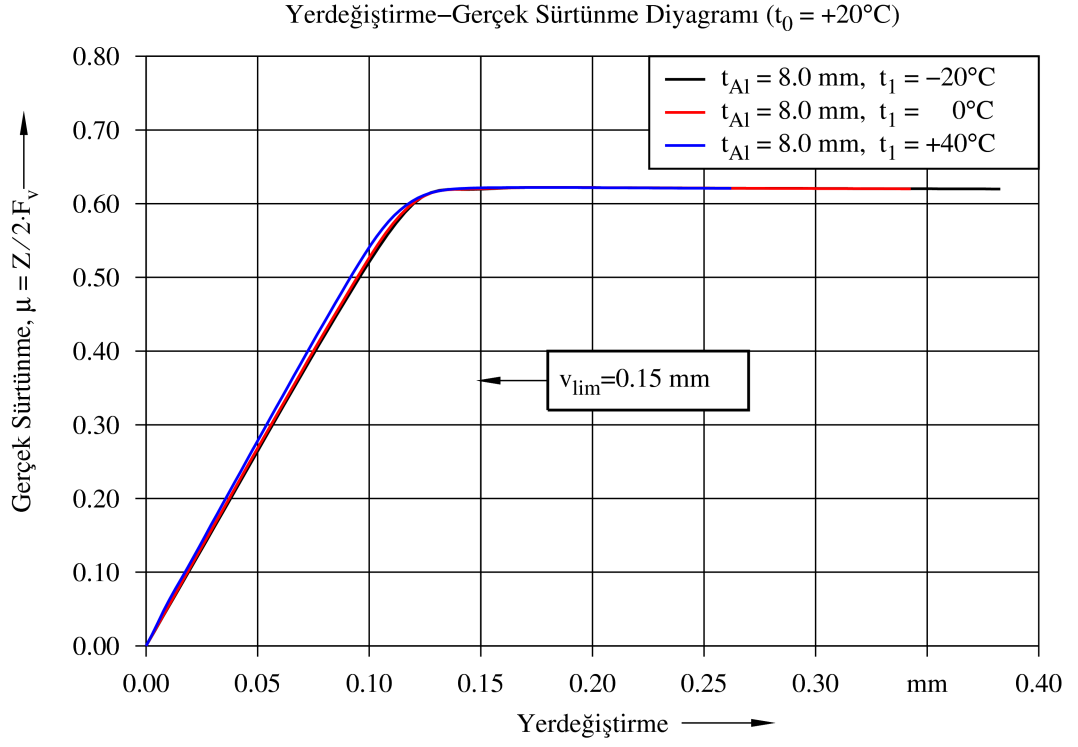
t_{Al} [mm]	t_{St} [mm]	E_{Al} [kN/mm ²]	E_{St} [kN/mm ²]	değişim % $\mu_{t=-20^\circ\text{C}}/\mu_{t=40^\circ\text{C}}$
5	10	68500	210000	0.99
8	10	68500	210000	1.00
10	10	68500	210000	1.00

Çizelge 5.4, yukarıda bahsedilen hesapların sonucunda oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlardan görülmektedir ki (Çizelge 5.5), ısı değişiminin sürtünme katsayısına etkisi belirgin olmaktan uzaktır. Öngerilmeli bulonun sıcaklık değişimleri durumunda davranışı Steurer [56] tarafından verilmiştir.

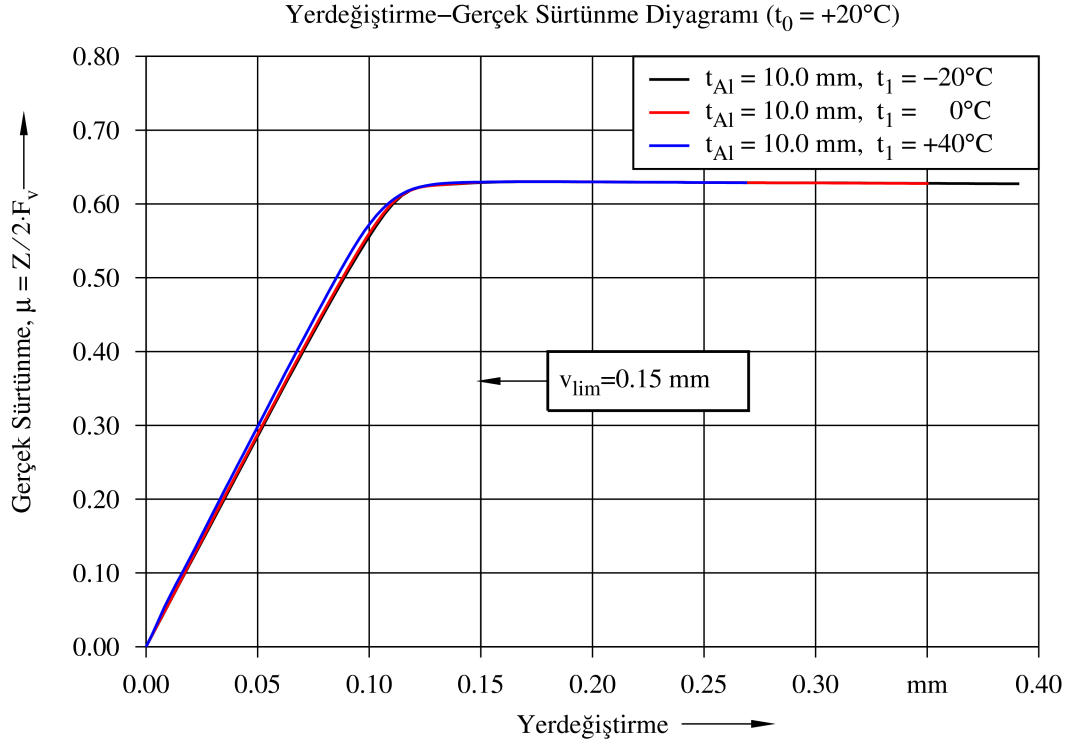
Bu değerin çok küçük olduğu ve bulon davranışına etkisinin en fazla %3 civarında gözlemlendiği söylenmiştir. Bu, elastik sınır içerisinde öngerilme kuvveti ile yüklenmiş bulonda çok daha küçük olacağından, modelde sıcaklığa bağlı bulon çekme davranışındaki değişim ihmal edilmiş ve elastisite modülü değiştirilmemiştir.



Şekil 5.20 : $t_{Al}=5.0\text{mm}$ için sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi ($t_0=+20^\circ\text{C}$)



Şekil 5.21 : $t_{Al}=8.0\text{mm}$ için sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi ($t_0=+20^\circ\text{C}$)



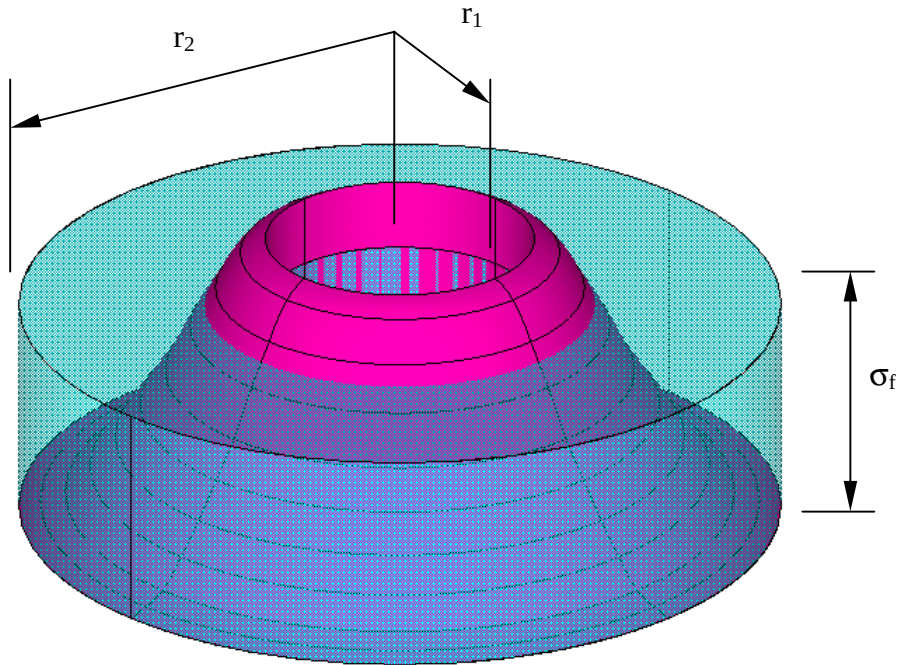
Şekil 5.22 : $t_{Al}=10.0\text{mm}$ için sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi ($t_0=+20^\circ\text{C}$)

5.6 Kayma Gerilmesinin Zamana Bağlı Değişiminin Araştırılması

Burada uzun süreli kayma deneylerinde elde edilen sonuçlar, kalınlık ve sürtünme katsayısının yüzdesine bağlı olarak düzenlenmiştir. Levhalar arasındaki hareketin 0.30 mm'ye ulaştığı zaman yıl olarak dikkate alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.6'da özetlenmiştir.

Yapılan sayısal hesaplardan kontak yüzey basıncı değerleri elde edilmiştir. Bu değerlere bakıldığında, delik merkezinden uzaklaştıkça basınç dağılımı kalınlık arttıkça daha geniş bir alana yayılmakta ve maksimum basınç değeri de azalmaktadır. Bu ise yükleme altında oluşan kayma gerilmelerinin küçük kalınlıklı levhalarda belirli bir bölgede etkimesine ve sadece burada kayma gerilmelerinin sınır değerine erişilmesine sebep olmaktadır.

Şekil 2.23 ve 2.24, 5.0 mm ve 10.0 mm kalınlığındaki alüminyum levhaların sürtünme yüzeylerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, burada kalın alüminyum levhada deney sonrasında oluşan parlak sürtünme yüzeyi daha büyük ve kayma gerilmelerinin dağılımı ince levhaya göre daha düzgündür. İnce levhada ise küçük dairesel yüzey söz konusudur.



Şekil 5.23 : Sayısal analiz sonucunda kontak basınç gerilmesi ve tanımlanan fiktif üniform kontak basınç gerilmesinin delik çevresinde gösterimi.

Bütün bu verileri kalınlığa bağlı değerlendirmek için fiktif bir kritik kayma gerilmesi tanımlanmıştır (Şekil 5.23). Hesaplamalarda kontak basıncının dağılımı sonlu elemanlar modelinden alınmıştır (Şekil 5.24). Hesaplamalarda kullanılmak üzere üniform bir kontak basıncı dağılımı tariflenmiştir. Bu üniform sabit gerilmenin birincisi pul iç çapında olan halka, ikincisi ise sonlu elemanlar modelinde kontak basıncının sıfır olduğu mesafedeki halkayı göstermek üzere, iki halka arasındaki silindir üzerinde etkidiği düşünülmüş ve hesaplanmıştır.

Çizelge 5.5’de, kontak yüzeyinde farklı kalınlıklar için sonlu elemanlar modeli ile elde edilen değişken kontak basıncı dağılımları, yukarıda tariflenen iki halka arasındaki alana üniform olarak yayıldığı düşüncesi ile hesaplanmış ve sürtünme yüzeyinin deneylerdeki yüklenme oranı ile çarpılmak suretiyle ilgili deney için τ kayma gerilmesi değeri bulunmuştur. Bu hesaplar farklı kalınlıkta deney sonuçları için tekrarlanmıştır ve sonuçları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

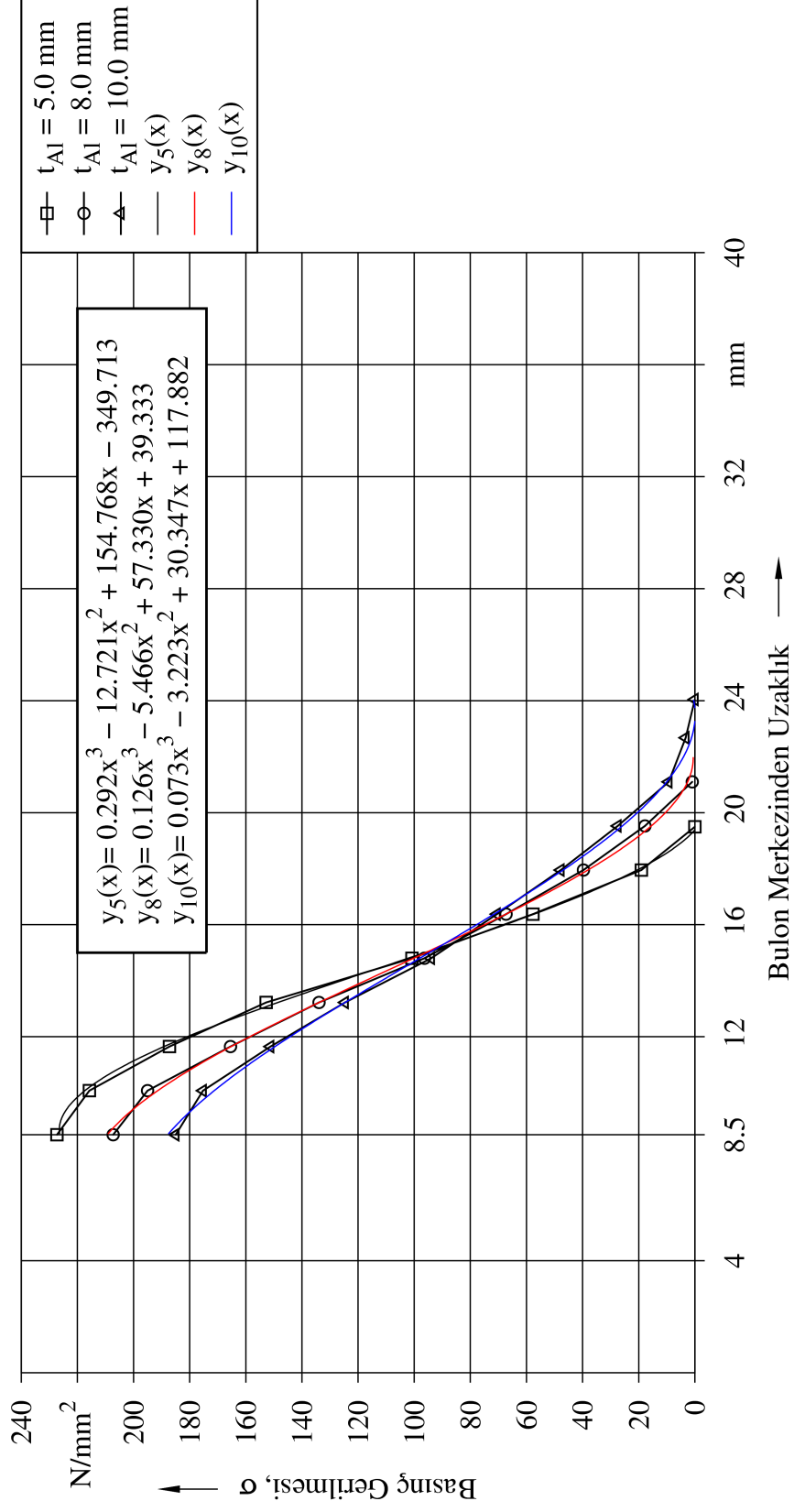
Çizelge 5.6’da boş olan satırlar kaymanın gözlemlenmediği numunelere aittir ve bu deney sonuçlarına ait sayısal işlemler yapılmamıştır.

Sonlu eleman modellerinden farklı kalınlıklar için de benzer şekilde τ kayma gerilmesi değerinin hesaplanması mümkündür. Burada yükleme oranı statik sürtünme katsayısına bağlı olduğu hatırlatılır. Çizelgenin grafik olarak değerlendirilmesi ile mevcut bir birleşimdeki kayma gerilmesi değeri hesaplandığında, davranışının elli yıl boyunca 0.30 mm’lik görelî hareket sınırı içerisinde olup olmadığı anlaşılabilir. Şekil 5.25’den kayma gerilmesine bağlı olarak uzun süreli yükleme deneylerinde birleşimin nasıl davranacağı tayin edilebilir.

Çizelge 5.6 : Uzun süreli deney sonuçları ve fiktif kayma gerilmeleri

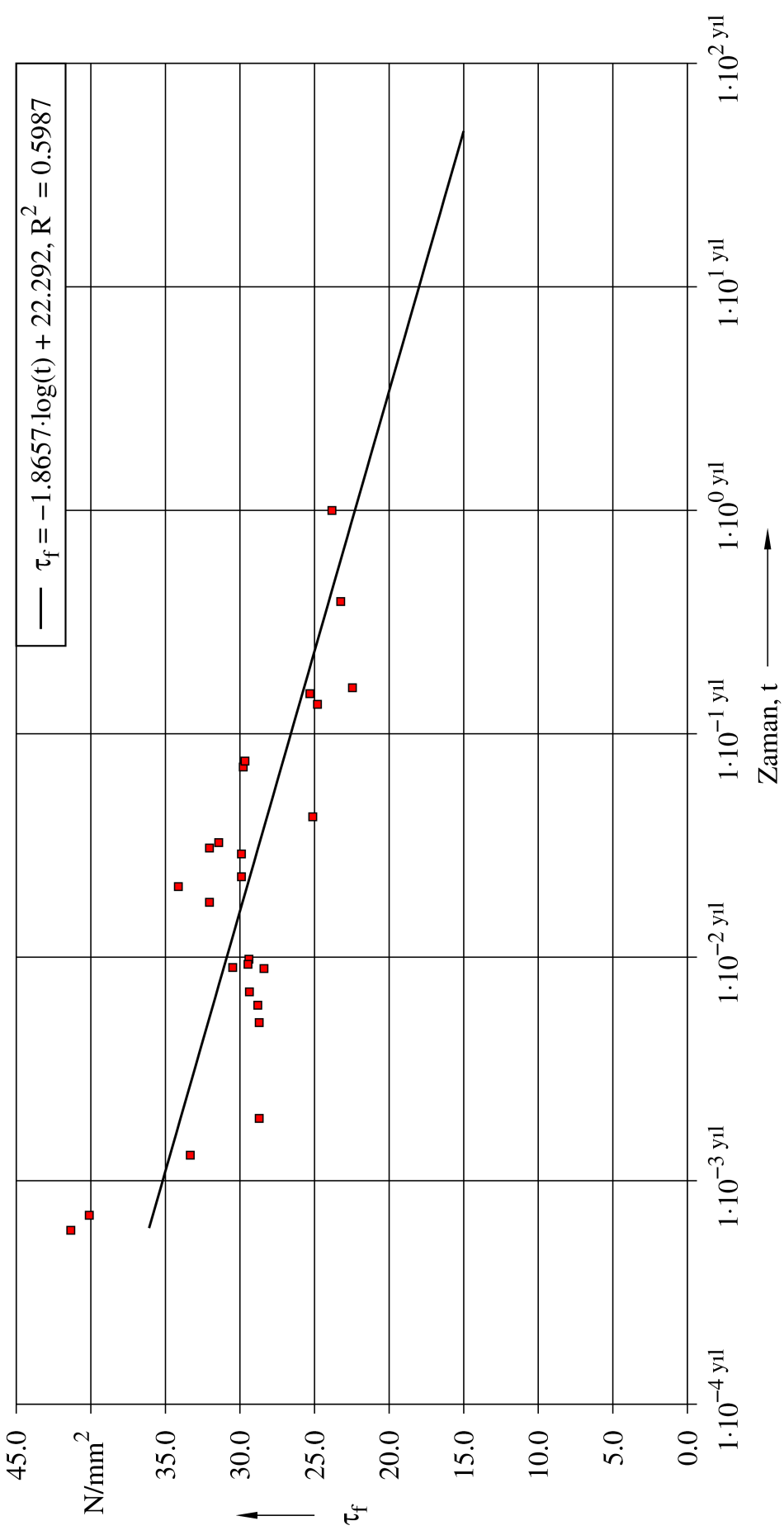
		t_{Al} [mm]	t [yıl]	w [mm]	R [anlık sürtünme]	σ_{maks}	τ_{kr}
1	AlMgSi1	9.7	0.0290	0.2974	0.475	62.95	29.90
1	AlMgSi1	9.7	0.0229	0.2838	0.475	62.95	29.90
2	AlMgSi1	9.7	0.0098	0.2911	0.467	62.95	29.40
2	AlMgSi1	9.7	0.0710	0.2997	0.473	62.95	29.78
3	AlMgSi1	8.0	0.0207	0.2997	0.474	71.99	34.13
3	AlMgSi1	8.0	0.0013	0.3073	0.463	71.99	33.33
4	AlZn4.5Mg1	10.0	0.0093	0.3000	0.468	62.95	29.46
4	AlZn4.5Mg1	10.0	0.0089	0.2965	0.451	62.95	28.39
5	AlZn4.5Mg1	10.0	0.0051	0.2964	0.456	62.95	28.71
5	AlZn4.5Mg1	10.0	0.0019	0.3014	0.456	62.95	28.71
6	AlMgSi1	8.0	0.0070	0.3008	0.408	71.99	29.37
6	AlMgSi1	8.0	0.0061	0.2852	0.400	71.99	28.80
7	AlMgSi1	8.0	0.0755	0.2999	0.412	71.99	29.66
7	AlMgSi1	8.0					
8	AlZn4.5Mg1	5.0	0.0006	0.2278	0.400	103.35	41.34
8	AlZn4.5Mg1	5.0	0.0007	0.2277	0.388	103.35	40.10
9	AlZn4.5Mg1	10.0	0.0425	0.2986	0.399	62.95	25.12
9	AlZn4.5Mg1	10.0	0.1511	0.2999	0.402	62.95	25.31
10	AlZn4.5Mg1	10.0					
10	AlZn4.5Mg1	10.0	0.1354	0.2999	0.394	62.95	24.80
11	AlMgSi1	9.7					
11	AlMgSi1	9.7					
12	AlMgSi1	8.0					
12	AlMgSi1	8.0	0.9978	0.3000	0.331	71.99	23.83
13	AlMgSi1	8.0	0.1607	0.2997	0.312	71.99	22.46
13	AlMgSi1	8.0	0.3906	0.2994	0.323	71.99	23.25
14	AlZn4.5Mg1	5.0	0.0308	0.2983	0.310	103.35	32.04
14	AlZn4.5Mg1	5.0	0.0326	0.2988	0.304	103.35	31.42
15	AlZn4.5Mg1	5.0	0.0090	0.2962	0.295	103.35	30.49
15	AlZn4.5Mg1	5.0	0.0176	0.2990	0.310	103.35	32.04

Kontak Basıncı Dağılımı Diyagramı



Şekil 5.24 : $t_{AI}=5.0, 8.0, 10.0$ mm $t_{SI}=10.0$ mm için 1/8 sonlu eleman modelinde elde edilen kontak basıncı ve kontak basıncını tarifleyen fonksiyonlar.

Kayma Etkisi Diyagramı



Şekil 5.25 : Sonlu eleman modeli ve uzun süreli deney sonuçları ile kayma etkisinin belirlenmesi.

5.7 Birleşimin Toplam Kalınlığının Sürtünme Katsayısına Etkisi

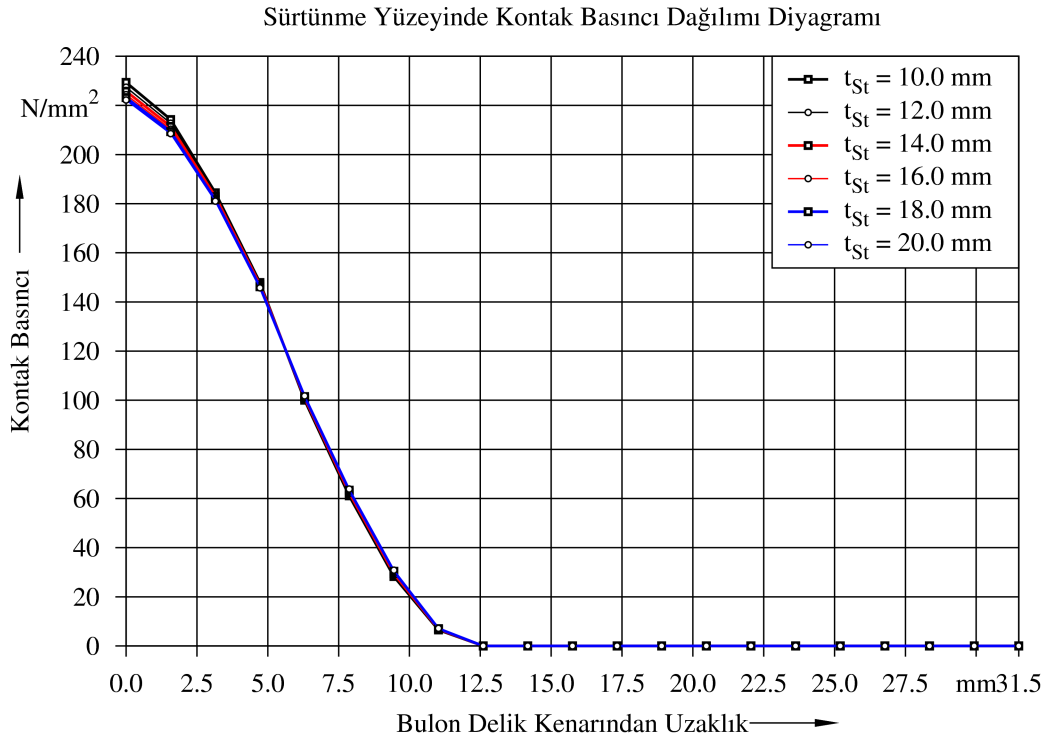
Burada daha önce deneylerde kullanılan boyutlardan farklı olarak, dış alüminyum levha kalınlıkları sabit tutulmuş buna karşın ortada bulunan çelik levha kalınlığı değiştirilmiştir. Çelik levha kalınlığı $t_{St} = 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0$ ve 20.0 mm kalınlık için, alüminyum levha kalınlığı $t_{Al} = 5.0, 8.0$ ve 10.0 mm alınmak suretiyle kontak basıncındaki değişimi gözlemlemek için çözümleme yapılmıştır.

Geometrik model kalınlık parametreleri hariç, dış levha kalınlığının sürtünme katsayısına etkisi için hazırlanan model ile aynıdır. Hesaplamalarda malzeme elastik izotrop olarak tanımlanmıştır.

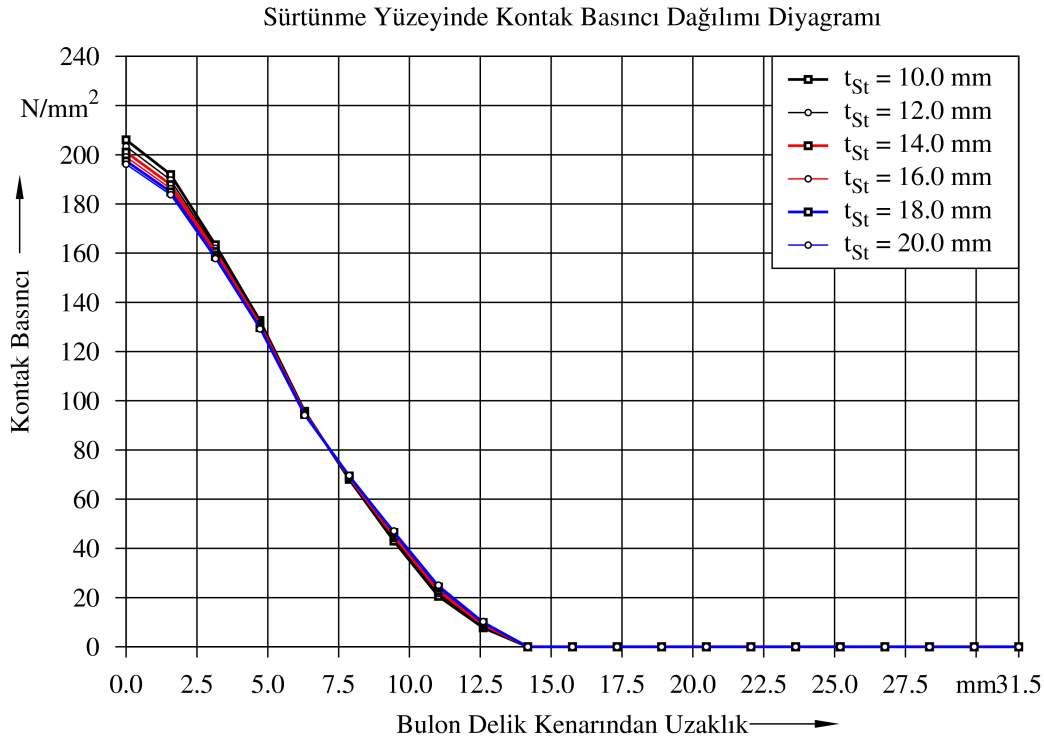
Ayrıklaştırma levha kalınlıkları boyunca oluşturulan eleman kenar uzunlukları sabit olacak şekilde yapılmıştır. Levha düzleminde ayrıklaştırma her bir modelde aynı şekilde modellenmiştir. Bu şekilde ayrıklaştırmadan doğacak farklılıkların sonuçlara etkisinin en aza indirileceği düşünülmüştür.

Sayısal analizde sonlu eleman olarak Solid45 üç boyutlu 8 noktalı dikdörtgen prizma elemanlar kullanılmıştır. Temas yüzeylerindeki kontak elemanları Bölüm 5.2’de verildiği gibi CONTA173 ve TARGE 170 elemanları ile oluşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlar Şekil 5.26 – 5.28’de özetlenmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, kontak basıncının temas yüzeyindeki dağılımı çelik levha kalınlığının değişmesine bağlı olarak büyük farklılık göstermemektedir. Buradan toplam birleşim kalınlığı yerine dış levha kalınlıklarının kontak basıncına etkisinin daha fazla olduğu açıktır. Bu sonuç literatürde çelik malzeme için belirtilen sürtünme katsayısı sonuçlarının toplam kalınlık ile ilişkili olması gözlemi ile uyuşmamaktadır. Birleşen levha kalınlıklarının birbirlerine yakın seçilmesi durumunda toplam birleşim kalınlığında levhalar arasında belirgin bir fark oluşmayacaktır, fakat levhalar arasında kalınlık oranı arttığında bu sürtünme yüzeyindeki davranışa etki edecektir.

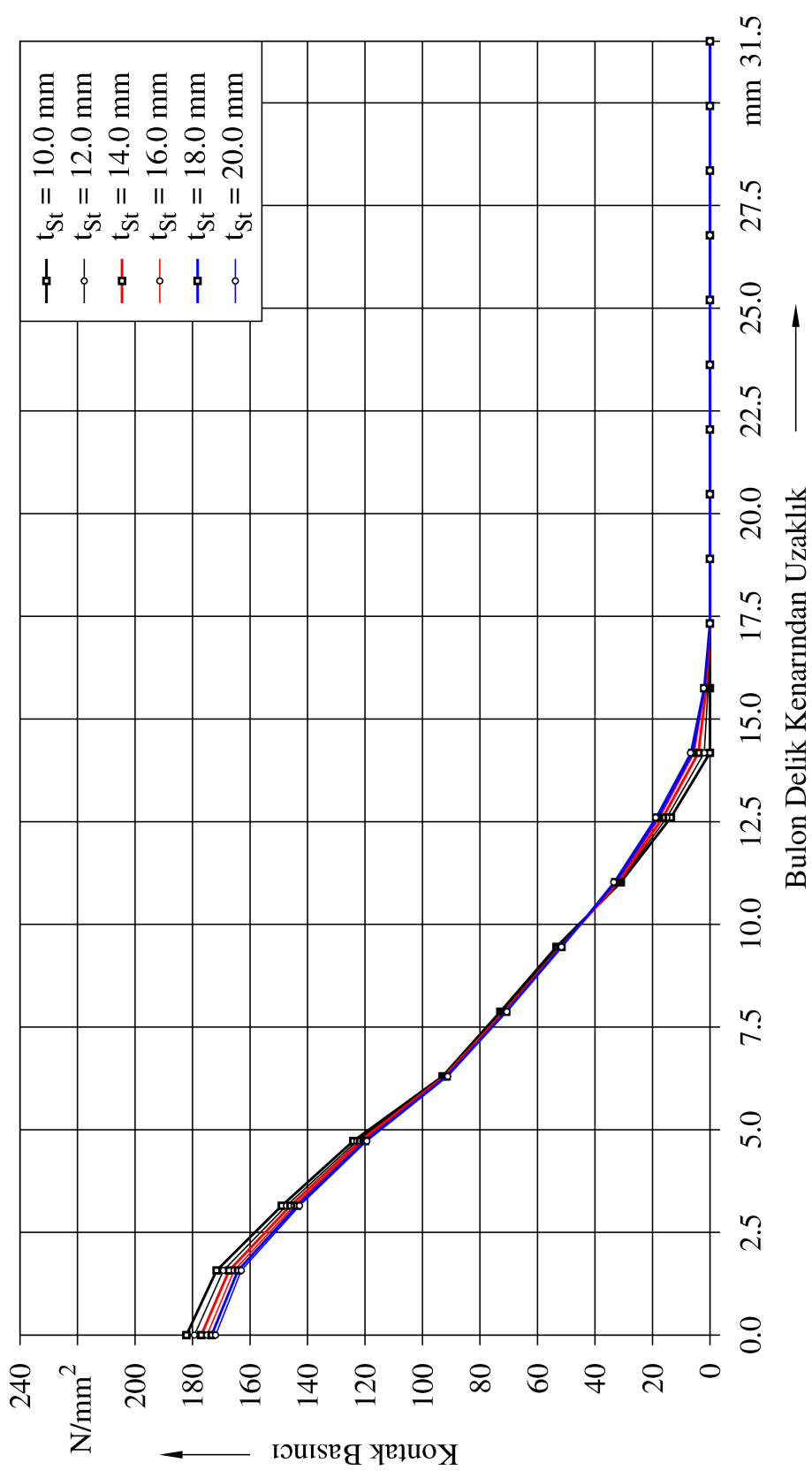


Şekil 5.26 : İç levha kalınlığının $t_{St}=10, 12, 14, 16, 18$ ve 20 mm olması durumunda $t_{Al}=5$ mm için kontak basıncı dağılımı.



Şekil 5.27 : İç levha kalınlığının $t_{St}=10, 12, 14, 16, 18$ ve 20 mm olması durumunda $t_{Al}=8$ mm için kontak basıncı dağılımı.

Sürtünme Yüzeyinde KONTAK BASINCI DAĞILIMI DİYAGRAMI

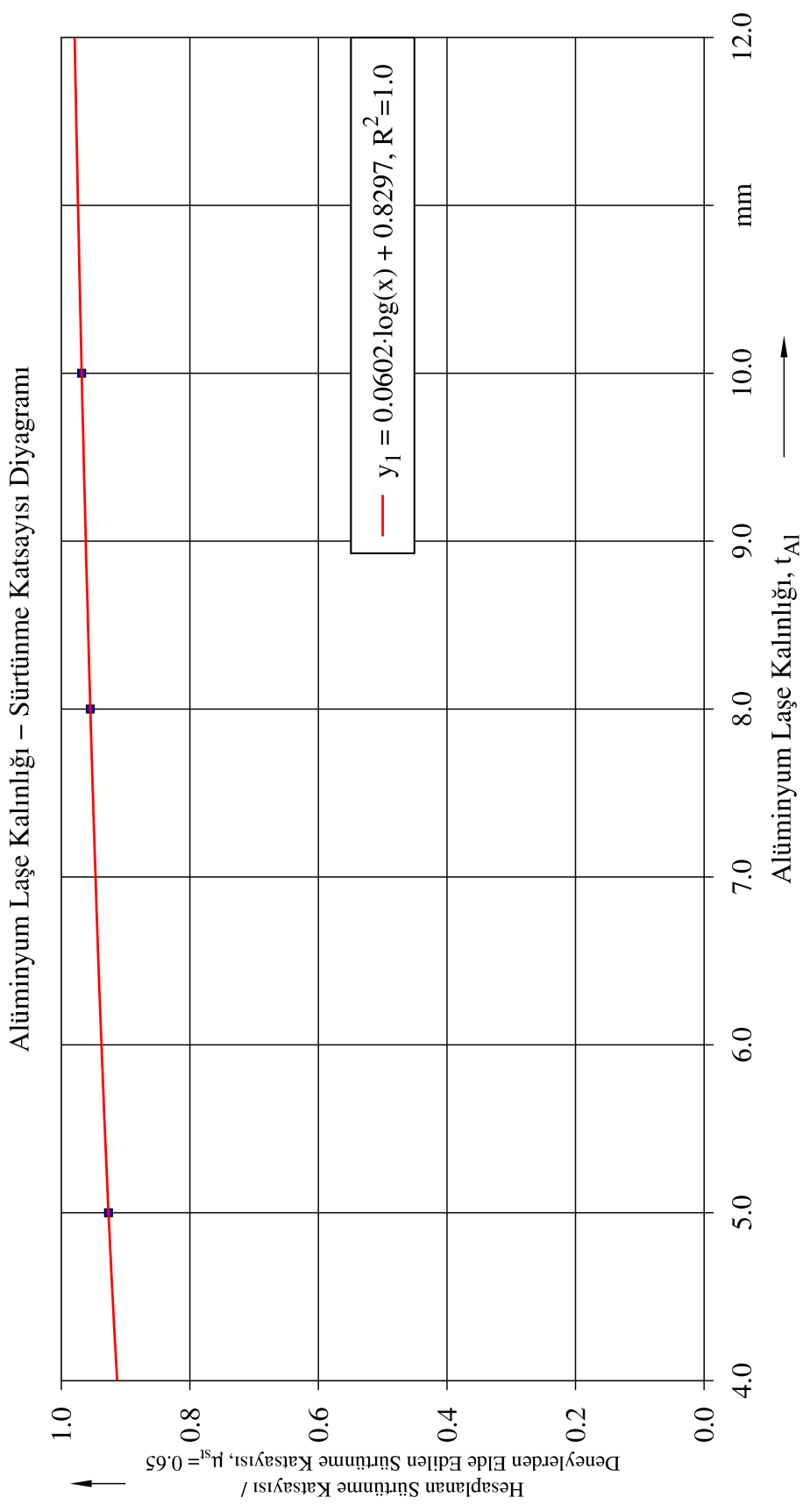


Şekil 5.28 : İç levha kalınlığının $t_{st}=10, 12, 14, 16, 18$ ve 20 mm olması durumunda $t_{Al}=10 \text{ mm}$ için kontak basıncı dağılımı.

5.8 Sayısal Çözümlerlerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde tariflenen ve yapılan hesaplardan elde edilen sonuçlar ile aşağıdaki bulgulara varılmıştır.

1. Alüminyum laşe kalınlığı azaldıkça iki farklı malzeme arasındaki kontak yüzeyinde oluşan basınç gerilmesi artmaktadır. Bu ise uzun süreli deneylerde $t_{AI}=5.0$ ve 8.0 mm'lik elemanlarda gözlemlenen kaymayı açıklamaktadır. Kalınlığın artması ile yüzeylerde oluşan en büyük basınç gerilmesi azalmakta ve birleşimin uzun süreli yük etkisi altında kaymasını engellemektedir.
2. Kaymanın görüldüğü parlak yüzeyler (bkz. Bölüm 2, sayfa 35, 36), temas yüzeylerinden boyanın sıyrıldığını levha yüzlerindeki en büyük kayma gerilmesine erişildiğini göstermektedir. Bu ise, kaymayı kontrol eden etkenlerden birinin birleşimdeki malzemelerden en büyük kayma gerilmesi küçük olan eleman olduğunu göstermektedir. Bu belirtilen husus, arada oluşan sürtünmeyi aktaracak ortamın olması halinde mümkündür. Sürtünme artırıcı alkali silikat çinko boya bunu sağlamaktadır.
3. Kalınlığa bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim, Şekil 5.18'de özetlenmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, kalınlığın azalması ile hesaplarda alınan sabit sürtünme katsayısının yapılan çözümleme sonucunda belirlenen sürtünme katsayısı ile karşılaştırılması durumunda, alüminyum dış levha kalınlığının azalması ile anlık sürtünme katsayısı azalmaktadır. Yüklemin uygulandığı düzleme dik düzlemde oluşan şekil değiştirmenin etkisini incelemek amacıyla Poisson oranı sadece levhalarda sıfır olarak alınmıştır. Elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları iki farklı çözüm arasında belirgin bir farklılık göstermemektedir. Bu durumda ideal bir kalınlık tanımından bahsedilebilir: Çözümlemede kullanılan sürtünme katsayısı $\mu=0.65$ alınmıştır. Bu değere hiçbir çözümlemede ulaşamamıştır. Fakat kalınlığın artması ile çözümlemede kullanılan sürtünme katsayısının tam olarak elde edileceği bir kalınlık değerinin bulunacağı düşünülmektedir (Şekil 5.29). Anlık sürtünme katsayısının eğimi kalınlıkla birlikte kayma sınırı olarak verilen $v_{lim}=0.15$ mm değerine kadar artmaktadır.



Şekil 5.29 : $t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm için, hesap ile elde edilen sürtünme katsayısının, deneylerden elde edilen sürtünme katsayısına oranı.

4. Sıcaklık değişiminde elde edilen sürtünme katsayılarındaki fark, incelenen her kalınlıktaki $t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm'lik alüminyum laşeler için çok küçüktür. Bu birleşimdeki levhalar ile birlikte aynı zamanda bulonda da uzamaların görülmesinden ve bundan dolayı sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan değerlerin yaklaşık olarak aynı oranda değişmesinden kaynaklanmaktadır
5. Uzun süreli deneylerden elde edilen sonuçlar ve sonlu eleman modelinde kalınlık değişiminin incelenmesi ile elde edilen sonuçlar birlikte kullanılmış ve farklı kalınlık için uzun süreli davranışın tahmin edilmesi için bir yaklaşım yapılmıştır.
6. Literatürde elik malzeme için birleşimin toplam kalınlığı için verilen sürtünme katsayısını incelemek için, alüminyum ve elik levhadan oluşan birleşimde dış levha kalınlıkları sabit kalmak suretiyle i levha kalınlığı arttırılmış ve kontak yüzeyinde oluşan basınç gerilmesi dağılımı incelenmiştir. Bu değişimin dış levha kalınlıklarının değişmesi durumuna göre ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Alüminyum ve çelik yapı elemanlarının neden öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlarla birleşiminin gerektiği, Bölüm 1’de ayrıntıları ile açıklanmıştı. Bu amaçla iki farklı grup deney gerçekleştirilmiştir. Bunlar, kısa süreli ve uzun süreli deneylerdir. Deneyler 10.0 mm, 9.7 mm, 8.0 mm ve 5.0 mm’lik dört farklı kalınlıkta alüminyum elemanlar için hazırlanmıştır. Araştırma, üç farklı alüminyum alaşımı AlMgSi1 (6082), AlMgSi0.5 (6063) ve AlZn4.5Mg1 (7020) üzerinde yapılmıştır. Çelik elemanlar galvanizlenmek suretiyle korozyona karşı korunmuştur. Bulonlar ölçme bulonu olarak hazırlanmış ve kalibre edilmiştir. Kısa süreli deneylerde sürtünme yüzeyleri ilk beş adet deneyde sadece yağdan arındırılmış, sonraki dokuz adet deney numunesinde ise alkali silikat çinko boya ile boyanmıştır. Yapılan on dört adet kısa süreli deneyden elde edilen verilerden yararlanılmak suretiyle, uzun süreli deney sistemi hazırlanmıştır. Toplam onbeş adet uzun süreli birleşim numunesi bir yıl boyunca üç farklı çerçevede $F_{Ç1}=90$ kN, $F_{Ç2}=78$ kN ve $F_{Ç3}=60$ kN’luk sürekli yük altında gözlenmiştir. Uzun süreli deneylerde sürtünme yüzeyinin hazırlanmasında sadece alkali silikat çinko boya kullanılmıştır. Uzun süreli deneylerde her numune için öngerilme kuvveti M16 bulonlara $F_v=100$ kN olarak verilmiştir.

Alüminyum alaşımın akma sınırının çelik malzemeden düşük olması halinde alüminyum malzemede ezilme oluşmuş ve öngerilme kuvvetinin daha geniş bir yüzeye aktarılması gerektiği gözlenmiştir. Bunun için daha kalın ve genişçe bir pul kullanılabilir. Bu gözlem AlMgSi0.5(6063) alaşımında belirgindir.

Kısa süreli deneylerde yüklemeye başlamadan önce, bulonlara verilen öngerilme kuvveti 30 dakika boyunca gözlenmiş ve öngerilme kuvvetindeki azalmanın kuvvetin %10’undan daha az olduğu ve öngerilme kuvvetinde büyük değişimler olmadığı gözlenmiştir.

Kısa süreli deneyler sırasında, öngerilme kuvvetinde zaman içerisinde alüminyum malzemenin sünme özelliğinden dolayı büyük bir azalma gözlemlenmemiştir. Kısa süreli deneylerde sürtünme yüzeylerine alkali silikat çinko boyanın kullanılmaması

durumunda, birleşimler ekonomik olmaktan uzaktır. Yüzeylerin sadece yağdan arındırıldığı durumda elde edilen sürtünme katsayısı çok düşük bulunmuş, bu sebeple araştırma alkali silikat çinko boya ile yüzeyleri hazırlanmış birleşimler üzerinde yoğunlaşmıştır. Sürtünme arttırıcı alkali silikat çinko boya kullanılması durumunda bir bulonun sürtünme ile aktarabildiği kuvvet yaklaşık olarak 3.5 kat daha fazladır. Kısa süreli deneylerde sürtünme katsayısına kalınlığın azaltıcı etkisi gözlemlenmemiştir.

Kısa süreli deney sonuçlarının istatistik incelenmesi ile elde edilen sürtünme katsayısı dağılımının standart sapmasının %10'luk sınır içerisinde kaldığı ve ilgili deney sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Uzun süreli deneylerde kalınlık etkisi, birleşim yüzeylerinin zaman içerisinde kaymasına sebep olmuştur. Bu gözlem kalınlığın azalması ile belirgin olarak gözlenmiştir. Uzun süreli deney sonuçlarının irdelenmesinde daha önce literatürde rastlanmayan sabit aralıklı ayrıklaştırma uygulanmak suretiyle, elli yıl sonundaki davranış tahmin edilmeye çalışılmıştır. Alüminyum levha kalınlığı 10 mm olan numuneler bir yıl sonunda yapılan değerlendirme ile elli yıl içerisinde 0.30 mm'lik kayma sınırı içerisinde kalmaktadır. Bu numunelerde uzun süreli yükleme altında sürtünme ile yük aktarma sözkonusudur. Çalışma ile sadece çelik malzeme kullanılan birleşimler için değil, aynı zamanda alkali silikat çinko boyanın sürtünme katsayısını arttırdığı alüminyum ve çelikten oluşan farklı iki malzemenin birleşimi için gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak birleşimin incelenmesi sonucunda, kalınlığa bağlı olarak sürtünme yüzeyinde oluşan normal ve kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Yapılan sayısal hesap sonucunda, alüminyum laşe kalınlığı arttıkça iki farklı malzeme arasındaki kontak yüzeyinde oluşan basınç gerilmesinin en büyük değeri azalmakta ve gerilmeler daha geniş bir yüzeye etki etmektedir. Bu ise kalın alüminyum levhaların kullanıldığı birleşimlerin uzun süreli yük etkisi altındaki davranışında, kaymayı engelleyici yönde etki etmektedir.

Kaymanın görüldüğü parlak yüzeyler (bkz. Bölüm 2, sayfa 39-40), temas yüzeylerinden boyanın sıyrıldığını ve levha yüzlerindeki en büyük kayma gerilmesine erişildiğini göstermektedir. Bu gözlem sırasında levha kalınlığı ile birlikte temas yüzeyinde oluşan parlak alan artmakta ve sürtünme kuvvetinin daha büyük bir alandan iletilildiğini göstermektedir. Kayma gerilmelerinin etki ettiği temas

yüzeyinde üniform olarak yayıldığı düşünüldüğünde; uzun süreli deneylerde kaymanın oluştuğu zamana bağlı olarak, grafik hazırlanmıştır (Şekil 5.25). Bu grafikte dış levha kalınlığına ve uygulanan yüke bağlı olarak belirlenen fiktif kayma gerilmesi yardımı ile, birleşimin uzun süreli yük etkisi altında kayma ile aktarabileceği yük belirlenebilir.

Sıcaklık değişimi yüklemeleri ile elde edilen sürtünme katsayılarındaki fark, incelenen her kalınlıktaki $t_{Al}=5.0, 8.0, 10.0$ mm'lik alüminyum laşeler için çok küçüktür. Bu birleşimdeki levhalar ile birlikte aynı zamanda bulonda da uzamaların görülmesinden ve sonuç olarak sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan değerlerin yaklaşık olarak aynı oranda değişmesinden kaynaklanmaktadır. Levhaların çekme kuvvetine dik yöndeki şekil değiştirmesinin, sürtünme katsayısına etkisinin olmadığı, levhalarda Poisson oranı 0.3 ve 0.0 alınmak suretiyle gösterilmiştir.

Kısa süreli deney sonuçları ile sonlu elemanlar ile yapılan sayısal çözümler, birbirlerine çok yakın sürtünme katsayısı değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Kısa süreli deney sonuçlarının Çizelge 4.1'deki özetinden de görüldüğü üzere, sayısal hesaplarda kullanılan sürtünme katsayısı hesap sonucunda elde edilen sürtünme katsayısına çok yakındır. Sürtünme katsayısındaki değişimin hesaplarda dış levha kalınlığına bağlı olduğu görülmüştür. Çizelge 5.28'de kalınlığa bağlı olarak bu değişim verilmiştir.

Sayısal hesaplarda elde edilen sonuçların deneyler ile büyük ölçüde aynı sonuçları vermesi yapılan modellemenin gerçek davranışı tanımlamadaki yakınlığı ile elde edilmiştir. Deney ile sayısal analiz arasındaki bu uyum parametrik olarak yapılan hesaplar ile deney sonuçlarına etki eden sebeplerin gerçekçi şekilde bulunmasını sağlamıştır.

Dış levha kalınlıklarının sabit tutulması, fakat iç levhada kalınlığın artırılması ile yapılan parametrik hesaplar sonucunda, kontak yüzeyinde oluşan basınçta büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Bu şekildeki birleşimlerde kalın levhaların dış yüzlerde kullanılması ile sürtünme kuvvetlerinin daha geniş bir temas yüzeyinden yayılacağı sonucu elde edilmiştir.

Birleşimin dinamik yükler etkisi altında davranışını incelemek için yapılacak deneyler ile tez konusu geliştirilebilir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlara bağlı olarak, uzun süreli yükler altında öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde levhaların birbirlerine göre hareketinin zamana bağlı sayısal olarak incelenmesi sonraki çalışmalar için mümkündür.

Ülkemizde yaygın olarak kullanımı geçtiğimiz on yıl içerisinde gelişen çelik yapılarda, öngerilmeli bulon kullanımı için çalışmanın konu ile ilgili çalışan mühendis ve akademisyenlere uygulamada faydalı olması umulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Valtinat, G.**, 1993. *Stahlbau Handbuch*, Band 1 /Tl, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, Köln.
- [2] **Deren, H., Uzgider, E. ve Piroğlu, F.**, 2005. *Çelik Yapılar, Emniyet Gerilmeleri Esasına göre Hesap*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [3] **McCormac, J.C.**, 1992. *Structural Steel Design ASD Method*, 4th Edition, Harper Collins, New York.
- [4] **Specification for Structural Steel Buildings**, 2005. *AISC*, Chicago.
- [5] **Valtinat, G., Albrecht, F. und Dangelmaier, P.**, 1993. Gleitfeste Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und reibfesten Beschichtungen oder anderen reibbeiwert erhöhenden Maßnahmen- Teil 1 und Teil 2, TUHH Schriftenreihe, Heft 3, Hamburg.
- [6] **Zimmermann, W. und Rostasy, F.S.**, 1975. Der Reibbeiwert feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Nachbehandlung der Zinkschicht, *Der Stahlbau*, **44**, 3, 82-84.
- [7] **Zimmermann, W. und Rostasy, F.S.**, 1977. Der Reibbeiwert belasteter und unbelasteter feuerverzinkter Hv-Verbindungen in Abhängigkeit von der Zeit, *Der Stahlbau*, **46**, 3, 91-94.
- [8] **Fortin, D., Beaulieu, D. and Bastien, J.**, 2001. Experimental investigation of aluminum friction-type connections, *The 8th INALCO*, München, Germany, 28-30 March.
- [9] **Eurocode 9**, 1998. Design of aluminium structures, Part 1.1, General Design, *European Committee of Standardisation*, Brussels.
- [10] **Nakagomi, T., Yamada, T., Ichikawa, Y., Kosaka, Y. and Inokumo, T.**, 2001. Experimental study on behavior in case of hot heating of friction joints with high-strength bolts in aluminum alloy structure, *The 8th INALCO*, München, Germany, 28-30 March.
- [11] **Yamada, T. and Tadao, N.**, 2001. Experimental study on the way of surface treatment of friction joints with high-strength bolts in aluminum alloy structure, *The 8th INALCO*, München, Germany, 28-30 March.
- [12] **Çağlayan, B.Ö. ve Uzgider, E.**, 2005. Yüksek mukavemetli bulonlarda etkin sürtünme katsayısının belirlenmesi, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Çelik yapılar Sempozyumu*, Ankara, 21-22 Nisan, s. 55-66.
- [13] **Valtinat, G., Piraprez, E. and Greff, E.**, 1998. International Tightening Tests with High Strength Bolts M20x100 of the Systems HR and HV, TUHH Schriftenreihe, Heft 4, Hamburg.
- [14] **Valtinat, G.**, 2002. Kişisel görüşme.

- [15] **Bickford, J.H.**, 1990. *An Introduction to the Design and Behaviour of Bolted Joints*, Marcel Dekker Inc., New York.
- [16] **Vogt, W.**, 1993. Vorgespannte Schraubenverbverbindungen in dynamisch beanspruchten Baukonstruktionen, *PhD Thesis*, Universität Bundeswehr München, München.
- [17] **Mazzolani, F.M.**, 1985. *Aluminium Alloy Structures*, University Press Ltd., Belfast.
- [18] **European Recommendations of Aluminium Alloy Structures**, 1978. *ECCS Committee T2 European Convention for Constructional Steelwork*, Liege.
- [19] **Kissel, J.R. and Ferry, R.L.**, 1995. *Aluminium Structures, A Guide to their Specifications and Design*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [20] **Sharp, M.L.**, 1993. *Behaviour and Design of Aluminum Structures*, McGraw-Hill Inc., New York.
- [21] **Kulak, G.L., Fisher, J.W. and Struik, J.H.A.**, 2001. *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, American Institute of Steel Construction Inc. Chicago.
- [22] **DIN 6914**, 1989. Sechskantschrauben mit großen Schlüsselweiten für HV-Schrauben in Stahlkonstruktionen, *Deutsches Institut für Normung*, Berlin.
- [23] **DIN 6915**, 1989. Sechskantmuttern mit großen Schlüsselweiten für HV-Schrauben in Stahlkonstruktionen, *Deutsches Institut für Normung*, Berlin.
- [24] **DIN 6916**, 1989. Scheiben, rund für HV-Schrauben in Stahlkonstruktionen *Deutsches Institut für Normung*, Berlin.
- [25] **Peiner HV-Schrauben-Garnituren für den Stahlbau**, 2001. Textron Verbindungstechnik, Peine.
- [26] **HV-Verbindungen nach DIN 18 800**, 1999. August Friedberg GmbH, Gelsenkirchen.
- [27] **DIN 18 800**, 1990. Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion Teil 1, *Deutsches Institut für Normung*, Berlin.
- [28] **Valtinat, G.**, 2003. *Aluminium im Konstruktiven Ingenieurbau*, Ernst & Sohn, Berlin.
- [29] **Weynand, K., Start, S. und Sedlacek, G.**, 2001. Merkblatt 322, Anwendungen von Schrauben im Stahlbau, Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf.
- [30] **Valtinat, G.**, 1975. *Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau- im Hinblick auf Schraubenverbindungen*, Beratung Feuerverzinken, Hagen.
- [31] **Textron Verbindungstechnik**, 1998. Einführung in die neuzeitliche Schraubenberechnung, 23. Auflage, Nuess.
- [32] **Valtinat, G.**, 2001. Aluminium im Konstruktiven Ingenieurbau, Vorlesung, Hamburg.

- [33] **DIN 4113**, 1980. Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 1, *Deutsches Institut für Normung*, Berlin.
- [34] **DIN 4113**, 1993. Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 2, *Deutsches Institut für Normung*, Berlin.
- [35] **prEN 1090-1**, 1994. Annex A, A Procedure Tests for Preloading Bolts and Determination of Slip Factor, *European Committee of Standardisation*, Brussels.
- [36] **Valtinat, G., Karaman, S.G. and Petersen, S.**, 2001. Bolted connections of aluminium members with steel members, *The 8th INALCO*, München, Germany, 28-30 March.
- [37] **Akman, S.**, 1974. *Yapıların Muayenesi ve Ölçme Tekniği*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Ders Notları, İstanbul.
- [38] **Hofmann, K.**, 1978. *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [39] **Kernighan, B.W. and Ritchie, D.M.**, 1978. *The C Programming Language*, Prentice-Hall Software Series, New Jersey.
- [40] **Bayazıt, M. ve Oğuz, B.**, 1998. *Probability and Statistics for Engineers*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [41] **ANSYS APDL Programmers Guide**, Release 10.0.
- [42] **Müller, G., Rehfeld, I. and Katheder, W.**, 1995. *FEM für Praktiker*, Expert Verlag, Renningen, Malmsheim.
- [43] **Crawford, J.**, 2000. Inquiry Functions, *Ansys Solutions Magazine*, 2, number 3.
- [44] **ANSYS Theory Reference**, Release 10.0.
- [45] **ANSYS Structural Analysis Guide**, Release 10.0.
- [46] **Imaoka, S.**, 2000. *Modeling Preloaded Fasteners*. Collaborative Solutions Inc, Redondo Beach, CA.
- [47] **Gebhardt, C.**, 2005, Korrekte Schraubenberechnung durch Praxisnahes Modell, p.64, Cadfem GmbH.
- [48] **Johnson, D.H.**, 2001. *Principles of Simulating Contact Between Parts using ANSYS*. Erie, Pennsylvania, USA.
- [49] **Stolarski, T.A., Nakasone, Y. and Yoshimoto, S.**, 2006. *Engineering analysis with ANSYS Software*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [50] **Pirmoz, A., Daryan, A.S., Mazaheri, A. and Darbandi, H.E.**, 2008. Behavior of Bolted Angle Connections Subjected to Combined Shear Force and Moment, *J. Construct. Steel Res.*, 64, no: 4, 436-446.
- [51] **Shi, G., Shi, Y., Wang, Y. And Bradford, M.A.**, 2008. Numerical Simulation of Steel Pretensioned Bolted End-Plate Connections of Different Types and Details, *Engineering Structures*, 30, no: 10, 2677-2686.
- [52] **Kim, T.S. and Kuwamura, H.**, 2007. Finite Element Modeling of Bolted Connections in Thin-Walled Stainless Steel Plates under Static Shear, *Thin Walled Structures*, 45, no: 4, 407-421.

- [53] **Kim, J., Yoon, J.-C. and Kang, B.-S.,** 2007. Finite Element Analysis and Modeling of Structure with Bolted Joints, *Applied Mathematical Modelling*, **31**, no: 5, 895-911.
- [54] **Gebbeken, N., Rothert, H. und Wanzek, T.,** 1998. Zur Theorie und Finite-Element-Berechnung des Tragverhaltens von Verformbaren Anschlusskonstruktionen im Stahlbau. Abschlussbericht DFG GE611/8-2, Universitaet der Bundeswehr München. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Neubiberg.
- [55] **Gebbeken, N., Binder, B. und Rothert, H.,** 1992. Zur numerischen Analyse von Kopfplatten-Verbindungen. Stahlbau, **61**, Heft 9, 265-274.
- [56] **Steurer, A.,** 1996. *Trag- und Verformungsverhalten von auf Zug beanspruchten Schrauben*. IBK Bericht, ETH Zürich. Birkhaeuser Verlag, Basel.
- [57] **Steurer, A.,** 1999. Das rotationsverhalten geschraubter Stirnplattenverbindungen. Dissertation, ETH Zürich.
- [58] **Zajdel, M.,** 1997, Numerical Analysis of Bolted Tee-Stub Connections, *Delft University of Technology TNO Report*, **Number 97-CON-R-1223**, Delft.
- [59] **Bursi, O.S.,** 1995. A Refined Finite Element Model for Tee-stub Steel Connections: COST C1, Numerical Simulation Working Group. Doc. C1WD6/95-07.
- [60] **Bursi, O.S. and Jaspart, J.P.,** 1997, Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections, *J. Construct Steel Res.*, **44**, no: 3, 225-262.
- [61] **Bursi, O.S. and Jaspart, J.P.,** 1997. Benchmarks for Finite Element Modelling of Bolted Steel Connections, *J. Construct. Steel Res.*, **43**, no: 1-3, 17-42.
- [62] **Schaumann, P., Kleinedam P. and Seidel, M.,** 2002. *Zur FE-Modellierung von zugbeanspruchten Schraubenverbindungen*, Beitrag von Universitaet Hannover, Institut für Stahlbau, Hannover.
- [63] **Panait, A., He, Q.-C., Bary, B., Cossavella, M. And Morcant, K.,** 2007. A Coupled Experimental and Numerical Approach to the Integrity of Friction-Grip Connections in Glass Structures, *Engineering Failure Analysis*, **14**, no: 1, 23-35.

EKLER

EK A : Uzun Süreli Deney Montaj Adımları

EK B : Uzun Süreli Deneyler için Bilgisayar Programı

EK C : Kısa Süreli Deney Sonuçları

EK D : Uzun Süreli Deney Sonuçları

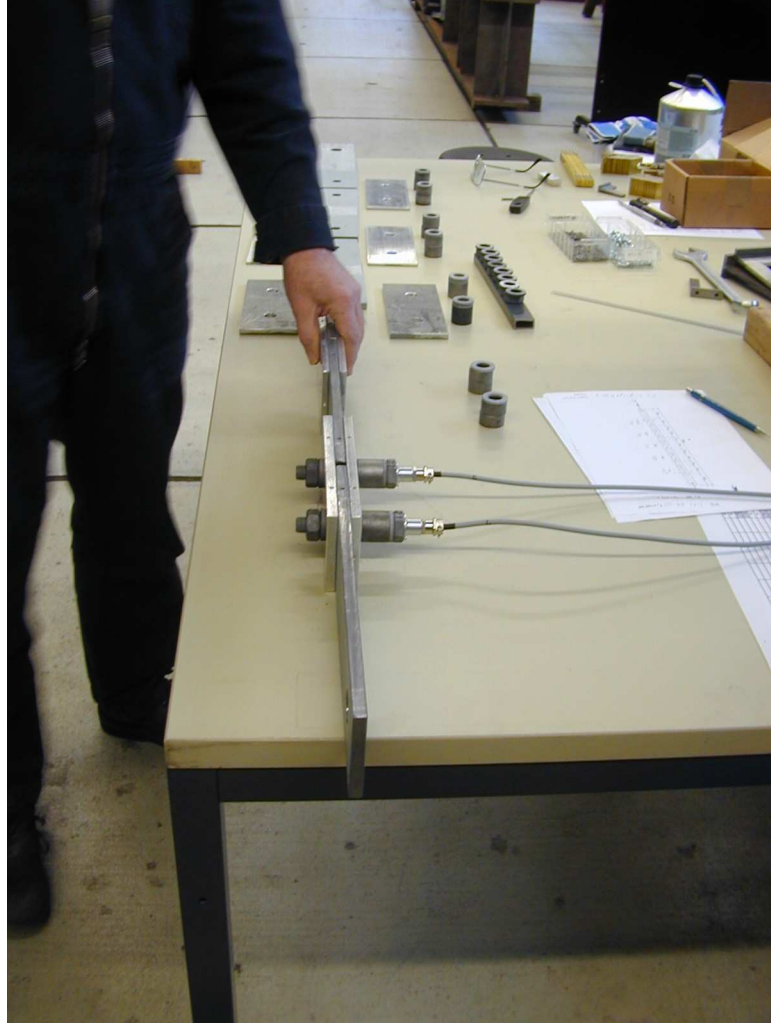
EK A : Uzun Süreli Deney Montaj Adımları



Şekil A.1 : Alüminyum ve çelik levhalar, montaj öncesi.



Şekil A.2 : Öngerilmeli yüksek mukavemetli ölçüm bulonları.



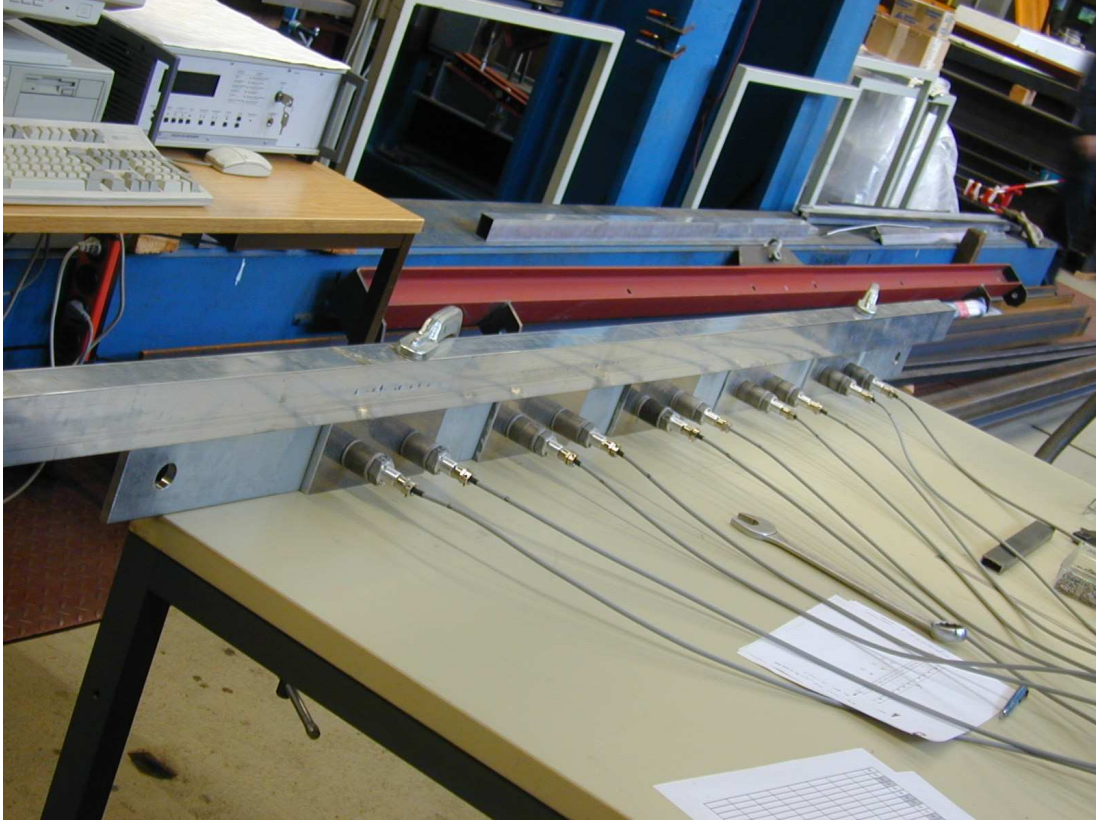
Şekil A.3 : Deney numunesi grubunun ilk elemanı.



Şekil A.4 : Öngerilmeli bulonların montajı sırasında çelik levhaların birbirlerine yaklaştırılması.



Şekil A.5 : Levhaların öngerilmeli bulonlarla ilk montajı.



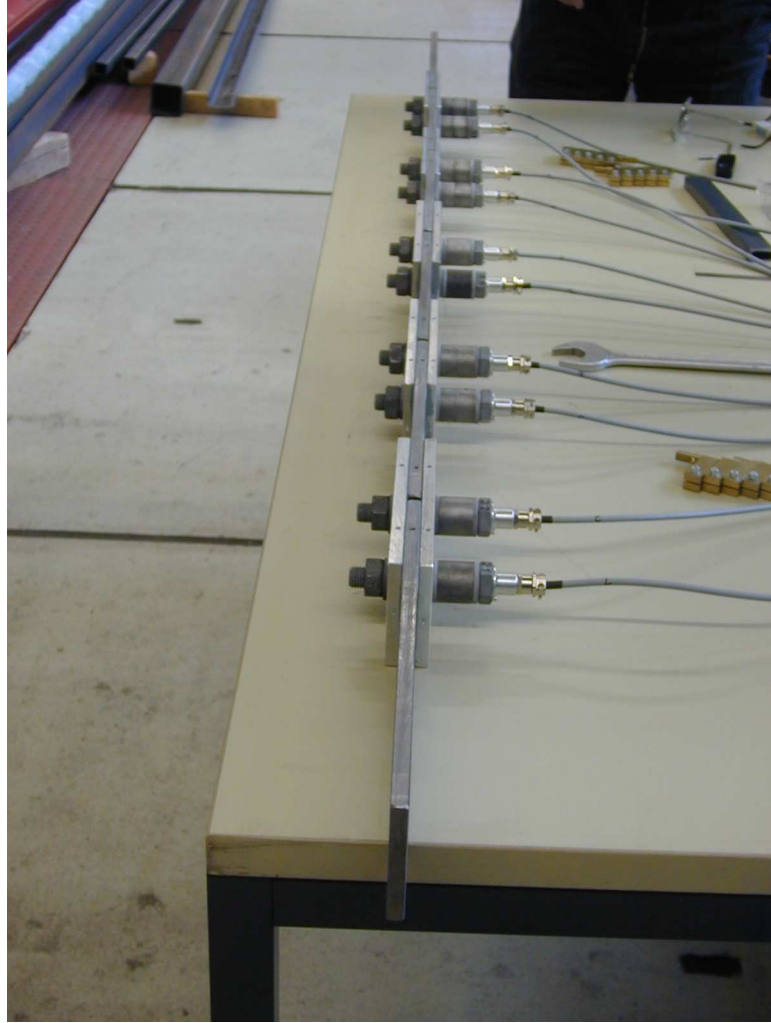
Şekil A.6 : Bulonlara öngerilme kuvvetinin verilmesi için hazırlık.



Şekil A.7 : Bulonlara öngerilme kuvvetinin verilmesi.



Şekil A.8 : Bulonlara öngerilme kuvvetinin verilmesinde son aşama.



Şekil A.9 : Alüminyum-çelik levhalardan oluşan deney düzeni çerçeveye yerleştirilmek için hazır.

EK B : Uzun Süreli Deneyler için Bilgisayar Programı

EK B : Uzun Süreli Deneyler için Bilgisayar Programı

```
/*
 *
 * File   : daydis.c
 * By    : S. Gokhan Karaman
 * 29.10.02
 *
 */
#include "tools.h"
#include "geometry.h"

int lin_dis(FILE *infp, FILE *outfp, double stepval)
{
    char line1[MAXLINE];
    char line2[MAXLINE];
    char line1_temp[MAXLINE];
    char *words1[MAX_WORDS];
    char *words2[MAX_WORDS];
    double *temp_data;

    KOORDS p1;
    KOORDS p2;

    int nwords1, nwords2;

    int nr_data_points = 0;
    int i = 0;
    double clock = 0.0001;

    fseek(infp, 0L, SEEK_SET);
    /* first line check */
    /* ----- */

    if(fgets(line1, MAXLINE, infp) == NULL)
        _error("data is empty.\n");
    nwords1 = getwords(line1, words1, MAX_WORDS);
```

```

        if((temp_data = (double *) malloc(nwords1 * sizeof(double)))
== NULL)
            _error("block not allocated.");

        p1.x = atof(words1[0]);

        /*clock = stepval / 2;*/

        while(fgets(line2, MAXLINE, infp)) {

            strcpy(line1_temp, line2);
            nwords2 = getwords(line2, words2, MAX_WORDS);
            if(nwords1 != nwords2)
                _error("illegal number of elements in data
lines");

            p2.x = atof(words2[0]);

            while(1) {
                if((clock >= p1.x) && (clock <= p2.x)) {

                    nr_data_points++;

                    temp_data[0] = clock;
                    for(i = 1; i < nwords2; i++) {
                        p1.y = atof(words1[i]);
                        p2.y = atof(words2[i]);
                        if((ABS(p1.y - p2.y)) == 0.) {
                            temp_data[i] =
linear_interpolation(&p1, &p2, clock);
                        }
                        else {
                            temp_data[i] =
loglinear_interpolation(&p1, &p2, clock);
                        }
                    }

                    for(i = 0; i < nwords2; i++) {
                        fprintf(outfp, "%-16.8lf",
temp_data[i]);

                    }
                    fprintf(outfp, "\n");
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        clock += stepval;
    }
    else
        break;
}
strcpy(line1, line1_temp);
getwords(line1, words1, MAX_WORDS);
p1.x = atof(words1[0]);
}
fprintf(stdout, "\n\tnumber of data columns: %d\n", nwords1);
return nr_data_points;
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    FILE *infp, *outfp;
    int nr_data;
    double stepval;

    if(argc != 4) {
        fprintf(stdout, "Usage : %s <source> <target> <step
value>\n", argv[0]);
        exit(EXIT_FAILURE);
    }

    if((infp = fopen(argv[1], "r")) == NULL) {
        fprintf(stdout, "Source File cannot be opened.\n");
        exit(EXIT_FAILURE);
    }

    if((outfp = fopen(argv[2], "r")) != NULL) {
        fprintf(stdout, "Target File already exist.\n");
        if(!wantcont())
            return 0;
    }

    if((outfp = fopen(argv[2], "w")) == NULL) {
        fprintf(stdout, "Source file cannot be created.\n");
        exit(EXIT_FAILURE);
    }

    if(!strcmp(argv[3], "-def"))

```

```

        stepval = 24. / ((365. * 24.) + 6.);
    else
        stepval = atof(argv[3]);

    nr_data = lin_dis(infp, outfp, stepval);

    fprintf(stdout, "\t%d data points.\n", nr_data);
    fprintf(stdout, "\tfile created succesfully...\n");

    fclose(infp);
    fclose(outfp);
    return 0;
}

/* linear interpolation */
double linear_interpolation(const KOORDS *p1, const KOORDS *p2,
double val_x)
{
    double val_y;

    /* parameters must be checked before function call */
    val_y = (p2->y - p1->y) / (p2->x - p1->x) * (val_x - p1->x) +
p1->y;
    return val_y;
}

/* log linear interpolation */
double loglinear_interpolation(const KOORDS *p1, const KOORDS *p2,
double val_x)
{
    double val_y;
    double logp1x, logp2x, logvalx;
    /* parameters must be checked before function call */
    /* y = a * log(x) + b */
    logp1x = log(p1->x);
    logp2x = log(p2->x);
    logvalx = log(val_x);
    fprintf(stdout, "%lf %lf %lf\n", p1->x, p2->x, val_x);
    fprintf(stdout, "%lf %lf %lf\n", logp1x, logp2x, logvalx);
    val_y = (p2->y - p1->y) / (logp2x - logp1x) * (logvalx -
logp1x) + p1->y;
    return val_y;
}

```


EK C : Kısa Süreli Deney Sonuçları

EK C : Kısa Süreli Deney Sonuçları**Çizelge C.1 : Deney No 1-2**

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
26.600	0.920	-0.080	101.914	102.281	0.002	0.000	0.005	0.004
27.600	1.960	-0.070	101.906	102.273	0.002	0.000	0.010	0.010
28.600	2.960	-0.060	101.898	102.264	0.002	0.002	0.015	0.014
29.600	4.000	-0.060	101.881	102.247	0.004	0.002	0.020	0.020
30.600	4.940	-0.050	101.872	102.239	0.004	0.002	0.024	0.024
31.600	5.940	-0.040	101.855	102.222	0.004	0.003	0.029	0.029
32.600	6.920	-0.040	101.838	102.205	0.006	0.003	0.034	0.034
33.600	7.920	-0.025	101.830	102.196	0.006	0.004	0.039	0.039
34.600	8.960	-0.020	101.813	102.179	0.006	0.006	0.044	0.044
35.600	9.960	-0.010	101.804	102.171	0.008	0.006	0.049	0.049
36.600	10.940	-0.005	101.787	102.154	0.008	0.006	0.054	0.054
37.600	11.960	0.000	101.770	102.136	0.008	0.007	0.059	0.059
38.600	12.940	0.010	101.753	102.128	0.011	0.008	0.064	0.063
39.600	13.900	0.015	101.745	102.111	0.011	0.008	0.068	0.068
40.600	14.940	0.025	101.728	102.102	0.011	0.009	0.073	0.073
41.600	15.940	0.030	101.711	102.085	0.012	0.009	0.078	0.078
42.600	16.940	0.035	101.694	102.077	0.013	0.010	0.083	0.083
43.600	17.920	0.050	101.677	102.060	0.013	0.012	0.088	0.088
44.600	18.900	0.060	101.652	102.043	0.014	0.012	0.093	0.093
45.600	19.940	0.070	101.635	102.026	0.016	0.013	0.098	0.098
46.600	20.900	0.075	101.609	102.017	0.017	0.014	0.103	0.102
47.600	21.900	0.080	101.593	102.000	0.018	0.015	0.108	0.107
48.600	22.920	0.085	101.567	101.983	0.018	0.015	0.113	0.112
49.600	23.900	0.095	101.533	101.966	0.019	0.015	0.118	0.117
50.600	24.920	0.105	101.508	101.949	0.021	0.018	0.123	0.122
51.600	25.900	0.105	101.474	101.932	0.022	0.018	0.128	0.127
52.600	26.900	0.120	101.440	101.906	0.023	0.020	0.133	0.132
53.600	27.880	0.125	101.406	101.889	0.024	0.020	0.137	0.137
54.600	28.900	0.140	101.364	101.864	0.025	0.020	0.143	0.142
55.600	29.920	0.140	101.313	101.838	0.027	0.023	0.148	0.147
56.600	30.920	0.155	101.262	101.804	0.028	0.023	0.153	0.152
57.600	31.920	0.160	101.211	101.778	0.030	0.025	0.158	0.157
58.600	32.880	0.170	101.152	101.744	0.032	0.027	0.163	0.162
59.600	33.880	0.180	101.076	101.710	0.034	0.028	0.168	0.167
60.600	34.880	0.190	100.999	101.668	0.037	0.029	0.173	0.172
61.600	35.900	0.205	100.898	101.633	0.041	0.030	0.178	0.177
62.600	36.880	0.215	100.737	101.582	0.049	0.032	0.183	0.182
63.600	37.840	0.240	100.432	101.548	0.064	0.036	0.188	0.186
64.600	39.200	1.180	97.188	101.506	0.971	0.037	0.202	0.193
65.600	40.500	1.230	96.882	101.454	1.003	0.042	0.209	0.200
66.600	37.560	1.335	96.771	101.301	1.013	0.158	0.194	0.185

Çizelge C.2 : Deney No 2-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6.900	1.100	0.000	101.601	102.119	0.000	0.000	0.005	0.005
8.100	2.340	0.005	101.593	102.111	0.000	0.000	0.012	0.011
9.300	3.520	0.020	101.576	102.085	0.000	0.002	0.017	0.017
10.500	4.720	0.020	101.567	102.085	0.000	0.003	0.023	0.023
11.700	5.900	0.030	101.542	102.060	0.002	0.003	0.029	0.029
12.900	7.080	0.040	101.533	102.051	0.002	0.004	0.035	0.035
14.100	8.320	0.055	101.516	102.034	0.002	0.004	0.041	0.041
15.300	9.480	0.060	101.508	102.026	0.003	0.005	0.047	0.046
16.500	10.700	0.070	101.491	102.009	0.004	0.007	0.053	0.052
17.700	11.900	0.075	101.474	102.000	0.004	0.007	0.059	0.058
18.900	13.100	0.090	101.457	101.974	0.006	0.007	0.065	0.064
20.100	14.300	0.095	101.440	101.957	0.007	0.008	0.070	0.070
21.300	15.480	0.105	101.432	101.949	0.007	0.009	0.076	0.076
22.500	16.700	0.120	101.406	101.923	0.008	0.011	0.082	0.082
23.700	17.900	0.130	101.398	101.915	0.009	0.011	0.088	0.088
24.900	19.080	0.135	101.372	101.881	0.009	0.013	0.094	0.094
26.100	20.300	0.145	101.355	101.864	0.011	0.013	0.100	0.100
27.300	21.480	0.155	101.338	101.847	0.012	0.014	0.106	0.105
28.500	22.700	0.165	101.321	101.830	0.013	0.016	0.112	0.111
29.700	23.900	0.165	101.296	101.804	0.014	0.016	0.118	0.117
30.900	25.100	0.180	101.271	101.770	0.014	0.017	0.124	0.123
32.100	26.280	0.185	101.245	101.744	0.017	0.018	0.130	0.129
33.300	27.460	0.195	101.228	101.719	0.017	0.019	0.136	0.135
34.500	28.660	0.205	101.211	101.702	0.019	0.022	0.142	0.141
35.700	29.860	0.215	101.177	101.659	0.019	0.022	0.148	0.147
36.900	31.080	0.220	101.152	101.625	0.020	0.023	0.154	0.153
38.100	32.260	0.235	101.110	101.582	0.022	0.024	0.160	0.159
39.300	33.460	0.240	101.093	101.565	0.023	0.025	0.165	0.165
40.500	34.680	0.255	101.050	101.514	0.024	0.027	0.172	0.171
41.700	35.840	0.255	101.008	101.454	0.025	0.028	0.177	0.177
42.900	37.060	0.275	100.974	101.420	0.027	0.030	0.184	0.183
44.100	38.260	0.285	100.932	101.369	0.028	0.030	0.190	0.189
45.300	39.460	0.290	100.889	101.327	0.030	0.033	0.196	0.195
46.500	40.660	0.300	100.838	101.267	0.030	0.034	0.202	0.201
47.700	41.860	0.315	100.779	101.199	0.033	0.037	0.208	0.207
48.900	43.060	0.325	100.711	101.122	0.035	0.038	0.214	0.213
50.100	44.220	0.330	100.635	101.045	0.039	0.041	0.220	0.219
51.300	45.440	0.350	100.550	100.951	0.043	0.043	0.226	0.225
52.500	46.540	1.110	96.133	100.815	0.768	0.031	0.242	0.231
53.700	47.940	1.180	95.529	100.687	0.823	0.035	0.251	0.238
54.900	48.520	2.755	95.367	97.788	0.866	1.547	0.254	0.248

Çizelge C.3 : Deney No 3-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16.500	1.060	0.005	99.618	99.425	0.000	0.000	0.005	0.005
17.600	2.140	0.020	99.610	99.408	0.000	0.000	0.011	0.011
18.700	3.240	0.030	99.593	99.400	0.000	0.002	0.016	0.016
19.800	4.320	0.035	99.585	99.383	0.000	0.002	0.022	0.022
20.900	5.460	0.040	99.576	99.366	0.002	0.002	0.027	0.027
22.000	6.540	0.050	99.559	99.357	0.002	0.002	0.033	0.033
23.100	7.660	0.055	99.551	99.340	0.002	0.003	0.038	0.039
24.200	8.700	0.070	99.534	99.332	0.002	0.003	0.044	0.044
25.300	9.840	0.070	99.525	99.314	0.003	0.003	0.049	0.050
26.400	10.940	0.080	99.508	99.297	0.004	0.003	0.055	0.055
27.500	12.040	0.085	99.500	99.280	0.004	0.004	0.061	0.061
28.600	13.140	0.095	99.483	99.263	0.007	0.004	0.066	0.066
29.700	14.240	0.105	99.466	99.246	0.007	0.006	0.072	0.072
30.800	15.320	0.110	99.458	99.229	0.008	0.007	0.077	0.077
31.900	16.400	0.120	99.441	99.212	0.009	0.008	0.082	0.083
33.000	17.520	0.125	99.424	99.195	0.009	0.008	0.088	0.088
34.100	18.600	0.140	99.407	99.178	0.010	0.009	0.094	0.094
35.200	19.720	0.145	99.390	99.161	0.012	0.011	0.099	0.099
36.300	20.800	0.150	99.373	99.144	0.013	0.011	0.105	0.105
37.400	21.900	0.165	99.356	99.127	0.013	0.013	0.110	0.110
38.500	23.020	0.175	99.330	99.118	0.015	0.013	0.116	0.116
39.600	24.120	0.180	99.313	99.101	0.015	0.013	0.121	0.122
40.700	25.200	0.190	99.297	99.084	0.017	0.016	0.127	0.127
41.800	26.340	0.200	99.271	99.067	0.018	0.016	0.133	0.133
42.900	27.420	0.210	99.246	99.042	0.020	0.017	0.138	0.138
44.000	28.520	0.220	99.212	99.016	0.020	0.018	0.144	0.144
45.100	29.640	0.225	99.169	98.999	0.023	0.019	0.149	0.150
46.200	30.740	0.240	99.119	98.973	0.023	0.021	0.155	0.155
47.300	31.840	0.250	99.068	98.948	0.025	0.022	0.161	0.161
48.400	32.880	0.255	99.000	98.922	0.028	0.022	0.166	0.166
49.500	34.000	0.265	98.932	98.888	0.030	0.024	0.172	0.172
50.600	35.120	0.280	98.838	98.846	0.035	0.025	0.178	0.178
51.700	31.260	0.770	98.107	98.846	0.545	0.024	0.159	0.158
52.800	37.400	1.535	94.423	98.743	1.246	0.026	0.198	0.189
53.900	38.520	1.570	94.151	98.692	1.273	0.028	0.205	0.195
55.000	39.640	1.590	93.972	98.641	1.291	0.029	0.211	0.201
56.100	40.740	1.610	93.819	98.590	1.306	0.032	0.217	0.207
57.200	41.800	1.635	93.691	98.539	1.319	0.033	0.223	0.212
58.300	42.900	1.655	93.564	98.470	1.332	0.037	0.229	0.218
59.400	43.420	1.700	93.428	98.453	1.346	0.063	0.232	0.221
60.500	45.060	3.600	93.206	93.705	1.362	1.913	0.242	0.240

Çizelge C.4 : Deney No 4-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7.500	1.680	-0.075	100.025	99.809	0.000	-0.002	0.008	0.008
9.200	3.380	-0.055	100.008	99.783	0.000	-0.002	0.017	0.017
10.900	5.100	-0.050	99.991	99.766	0.000	-0.002	0.026	0.026
12.600	6.800	-0.035	99.966	99.741	0.000	-0.002	0.034	0.034
14.300	8.500	-0.025	99.940	99.715	0.003	0.002	0.043	0.043
16.000	10.180	-0.015	99.923	99.690	0.003	0.002	0.051	0.051
17.700	11.920	-0.005	99.898	99.664	0.003	0.003	0.060	0.060
19.400	13.620	0.010	99.873	99.638	0.005	0.003	0.068	0.068
21.100	15.300	0.020	99.847	99.604	0.005	0.003	0.077	0.077
22.800	16.980	0.035	99.813	99.579	0.008	0.006	0.085	0.085
24.500	18.660	0.050	99.788	99.545	0.008	0.007	0.093	0.094
26.200	20.380	0.055	99.754	99.502	0.009	0.009	0.102	0.102
27.900	22.080	0.070	99.712	99.459	0.012	0.009	0.111	0.111
29.600	23.760	0.090	99.669	99.408	0.012	0.010	0.119	0.120
31.300	25.460	0.100	99.618	99.357	0.014	0.012	0.128	0.128
33.000	27.180	0.110	99.568	99.289	0.014	0.014	0.136	0.137
34.700	28.880	0.130	99.500	99.212	0.017	0.015	0.145	0.146
36.400	30.580	0.135	99.432	99.127	0.018	0.017	0.154	0.154
38.100	32.260	0.155	99.356	99.025	0.019	0.018	0.162	0.163
39.800	33.960	0.165	99.263	98.914	0.021	0.020	0.171	0.172
41.500	35.660	0.185	99.161	98.777	0.023	0.020	0.180	0.181
43.200	37.360	0.195	99.042	98.632	0.024	0.023	0.189	0.189
44.900	39.060	0.205	98.915	98.470	0.027	0.024	0.197	0.198
46.600	40.740	0.235	98.779	98.300	0.028	0.027	0.206	0.207
48.300	42.460	0.240	98.626	98.112	0.031	0.029	0.215	0.216
50.000	44.140	0.255	98.456	97.899	0.032	0.031	0.224	0.225
51.700	45.840	0.270	98.268	97.669	0.034	0.033	0.233	0.235
53.400	47.540	0.280	98.073	97.422	0.037	0.034	0.242	0.244
55.100	49.200	0.300	97.860	97.149	0.039	0.038	0.251	0.253
56.800	50.920	0.315	97.630	96.859	0.042	0.042	0.261	0.263
58.500	52.620	0.330	97.384	96.527	0.044	0.045	0.270	0.273
60.200	54.320	0.350	97.120	96.160	0.047	0.052	0.280	0.282
61.900	55.980	0.395	96.805	95.700	0.051	0.072	0.289	0.292
63.600	57.680	0.460	96.218	94.736	0.058	0.127	0.300	0.304
65.300	59.380	0.540	95.742	94.080	0.064	0.185	0.310	0.316
67.000	61.020	0.650	95.274	93.662	0.073	0.278	0.320	0.326
68.700	62.740	2.335	94.627	83.005	0.088	1.918	0.332	0.378
70.400	64.640	2.490	93.776	81.402	0.116	2.022	0.345	0.397
72.100	66.360	2.580	93.343	80.541	0.133	2.085	0.355	0.412
73.800	68.020	2.665	92.960	79.740	0.150	2.144	0.366	0.427

Çizelge C.5 : Deney No 5-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9.040	1.460	0.010	79.795	80.072	0.000	0.002	0.009	0.009
10.480	2.860	0.015	79.778	80.055	0.002	0.002	0.018	0.018
11.920	4.340	0.030	79.761	80.038	0.002	0.002	0.027	0.027
13.360	5.780	0.040	79.744	80.021	0.002	0.002	0.036	0.036
14.800	7.200	0.050	79.726	80.004	0.003	0.002	0.045	0.045
16.240	8.620	0.055	79.709	79.996	0.003	0.002	0.054	0.054
17.680	10.060	0.070	79.684	79.978	0.003	0.003	0.063	0.063
19.120	11.500	0.085	79.675	79.961	0.004	0.004	0.072	0.072
20.560	12.940	0.095	79.649	79.944	0.007	0.004	0.081	0.081
22.000	14.380	0.105	79.632	79.927	0.007	0.007	0.090	0.090
23.440	15.800	0.115	79.615	79.910	0.008	0.007	0.099	0.099
24.880	17.260	0.125	79.590	79.893	0.009	0.009	0.108	0.108
26.320	18.680	0.135	79.572	79.876	0.010	0.009	0.117	0.117
27.760	20.140	0.145	79.555	79.859	0.012	0.012	0.127	0.126
29.200	21.600	0.165	79.538	79.834	0.013	0.013	0.136	0.135
30.640	23.000	0.165	79.513	79.816	0.013	0.016	0.145	0.144
32.080	24.440	0.180	79.495	79.799	0.014	0.017	0.154	0.153
33.520	25.880	0.190	79.478	79.782	0.015	0.018	0.163	0.162
34.960	27.320	0.200	79.453	79.757	0.017	0.021	0.172	0.171
36.400	28.740	0.210	79.436	79.740	0.018	0.021	0.181	0.180
37.840	30.220	0.220	79.410	79.714	0.018	0.023	0.190	0.190
39.280	31.640	0.230	79.384	79.697	0.020	0.024	0.199	0.199
40.720	33.080	0.245	79.359	79.672	0.020	0.026	0.208	0.208
42.160	34.480	0.255	79.333	79.646	0.023	0.027	0.217	0.216
43.600	35.960	0.270	79.307	79.620	0.023	0.029	0.227	0.226
45.040	37.380	0.280	79.273	79.586	0.025	0.031	0.236	0.235
46.480	38.820	0.290	79.239	79.552	0.028	0.032	0.245	0.244
47.920	40.260	0.305	79.196	79.518	0.028	0.034	0.254	0.253
49.360	41.700	0.320	79.153	79.475	0.030	0.036	0.263	0.262
50.800	43.120	0.330	79.110	79.424	0.032	0.038	0.273	0.271
52.240	44.580	0.345	79.051	79.373	0.034	0.041	0.282	0.281
53.680	46.040	0.360	78.991	79.313	0.038	0.042	0.291	0.290
55.120	47.420	0.365	78.931	79.254	0.041	0.044	0.300	0.299
56.560	48.920	0.390	78.854	79.186	0.047	0.048	0.310	0.309
58.000	50.320	0.410	78.802	79.109	0.057	0.052	0.319	0.318
59.440	51.700	0.450	78.811	79.015	0.084	0.057	0.328	0.327
60.880	53.120	0.510	78.811	78.930	0.129	0.064	0.337	0.337
62.320	54.580	0.585	78.820	78.862	0.182	0.073	0.346	0.346
63.760	55.920	0.705	78.871	78.802	0.267	0.087	0.355	0.355
65.200	56.940	1.785	75.811	78.717	1.292	0.132	0.376	0.362
66.640	58.960	2.010	74.207	78.938	1.368	0.274	0.397	0.373

Çizelge C.6 : Deney No 6-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13.300	2.060	0.005	75.658	76.534	0.000	0.000	0.014	0.013
15.400	4.180	0.015	75.641	76.509	0.000	0.000	0.028	0.027
17.500	6.280	0.030	75.615	76.492	0.003	0.001	0.042	0.041
19.600	8.360	0.045	75.598	76.466	0.003	0.001	0.055	0.055
21.700	10.480	0.065	75.572	76.449	0.003	0.003	0.069	0.069
23.800	12.580	0.075	75.547	76.423	0.005	0.003	0.083	0.082
25.900	14.680	0.090	75.521	76.398	0.005	0.005	0.097	0.096
28.000	16.740	0.105	75.504	76.372	0.008	0.005	0.111	0.110
30.100	18.820	0.125	75.470	76.347	0.008	0.008	0.125	0.123
32.200	20.940	0.140	75.444	76.312	0.010	0.009	0.139	0.137
34.300	23.060	0.160	75.419	76.287	0.012	0.010	0.153	0.151
36.400	25.140	0.180	75.385	76.253	0.013	0.013	0.167	0.165
38.500	27.240	0.185	75.350	76.219	0.015	0.014	0.181	0.179
40.600	29.360	0.205	75.316	76.185	0.017	0.015	0.195	0.193
42.700	31.440	0.220	75.282	76.150	0.019	0.017	0.209	0.206
44.800	33.540	0.235	75.248	76.099	0.019	0.019	0.223	0.220
46.900	35.620	0.250	75.205	76.057	0.022	0.022	0.237	0.234
49.000	37.720	0.270	75.154	76.014	0.024	0.023	0.251	0.248
51.100	39.820	0.290	75.112	75.954	0.027	0.024	0.265	0.262
53.200	41.920	0.305	75.060	75.903	0.027	0.027	0.279	0.276
55.300	44.020	0.320	75.001	75.835	0.029	0.029	0.293	0.290
57.400	46.120	0.340	74.941	75.775	0.032	0.032	0.308	0.304
59.500	48.220	0.355	74.873	75.699	0.034	0.034	0.322	0.318
61.600	50.300	0.370	74.804	75.622	0.037	0.034	0.336	0.333
63.700	52.420	0.390	74.719	75.528	0.039	0.037	0.351	0.347
65.800	54.520	0.405	74.634	75.434	0.042	0.039	0.365	0.361
67.900	56.580	0.435	74.540	75.332	0.044	0.042	0.380	0.376
70.000	58.660	0.445	74.438	75.221	0.047	0.045	0.394	0.390
72.100	60.780	0.465	74.327	75.093	0.049	0.049	0.409	0.405
74.200	62.900	0.480	74.207	74.965	0.053	0.052	0.424	0.420
76.300	64.980	0.500	74.071	74.829	0.056	0.054	0.439	0.434
78.400	67.080	0.520	73.934	74.676	0.061	0.058	0.454	0.449
80.500	69.220	0.540	73.772	74.514	0.063	0.062	0.469	0.464
82.600	71.260	0.560	73.602	74.343	0.068	0.065	0.484	0.479
84.700	73.380	0.585	73.414	74.164	0.073	0.070	0.500	0.495
86.800	75.440	0.605	73.218	73.985	0.081	0.075	0.515	0.510
88.900	77.560	0.630	73.013	73.789	0.087	0.080	0.531	0.526
91.000	79.640	0.670	72.800	73.584	0.097	0.089	0.547	0.541
93.100	81.720	0.705	72.586	73.371	0.109	0.101	0.563	0.557
95.200	83.820	0.770	72.441	73.235	0.133	0.128	0.579	0.572
97.300	85.700	1.020	72.569	73.866	0.230	0.269	0.590	0.580

Çizelge C.7 : Deney No 7-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11.700	2.160	0.020	74.898	74.948	0.000	0.002	0.014	0.014
13.900	4.380	0.040	74.873	74.931	0.002	0.002	0.029	0.029
16.100	6.580	0.050	74.847	74.914	0.002	0.003	0.044	0.044
18.300	8.740	0.060	74.813	74.897	0.003	0.004	0.058	0.058
20.500	10.960	0.080	74.787	74.872	0.004	0.004	0.073	0.073
22.700	13.160	0.095	74.753	74.846	0.006	0.005	0.088	0.088
24.900	15.360	0.110	74.719	74.821	0.007	0.008	0.103	0.103
27.100	17.540	0.130	74.685	74.803	0.008	0.010	0.117	0.117
29.300	19.720	0.145	74.651	74.769	0.011	0.012	0.132	0.132
31.500	21.960	0.165	74.617	74.744	0.011	0.014	0.147	0.147
33.700	24.140	0.180	74.574	74.718	0.013	0.017	0.162	0.162
35.900	26.320	0.195	74.531	74.684	0.014	0.018	0.177	0.176
38.100	28.520	0.210	74.489	74.650	0.016	0.019	0.191	0.191
40.300	30.760	0.230	74.438	74.616	0.017	0.022	0.207	0.206
42.500	32.920	0.245	74.386	74.573	0.019	0.023	0.221	0.221
44.700	35.100	0.265	74.335	74.522	0.020	0.024	0.236	0.236
46.900	37.300	0.280	74.276	74.479	0.023	0.027	0.251	0.250
49.100	39.520	0.300	74.207	74.420	0.025	0.029	0.266	0.266
51.300	41.720	0.315	74.139	74.369	0.027	0.032	0.281	0.280
53.500	43.920	0.335	74.062	74.300	0.029	0.034	0.297	0.296
55.700	46.100	0.350	73.977	74.224	0.032	0.035	0.312	0.311
57.900	48.300	0.375	73.883	74.138	0.034	0.038	0.327	0.326
60.100	50.500	0.390	73.789	74.045	0.036	0.042	0.342	0.341
62.300	52.680	0.405	73.687	73.942	0.038	0.044	0.357	0.356
64.500	54.880	0.425	73.576	73.823	0.042	0.047	0.373	0.372
66.700	57.060	0.440	73.457	73.695	0.044	0.052	0.388	0.387
68.900	59.260	0.465	73.320	73.550	0.048	0.056	0.404	0.403
71.100	61.480	0.485	73.175	73.397	0.050	0.058	0.420	0.419
73.300	63.700	0.510	73.013	73.218	0.054	0.062	0.436	0.435
75.500	65.860	0.535	72.825	73.022	0.059	0.065	0.452	0.451
77.700	68.080	0.550	72.620	72.817	0.064	0.067	0.469	0.467
79.900	70.220	0.575	72.390	72.587	0.069	0.069	0.485	0.484
82.100	72.480	0.605	72.143	72.340	0.076	0.068	0.502	0.501
84.300	74.640	0.630	71.878	72.084	0.083	0.084	0.519	0.518
86.500	76.840	0.660	71.588	71.811	0.090	0.099	0.537	0.535
88.700	79.040	0.690	71.272	71.530	0.101	0.099	0.554	0.552
90.900	81.200	0.730	70.931	71.240	0.112	0.097	0.572	0.570
93.100	83.440	0.770	70.547	70.924	0.128	0.116	0.591	0.588
95.300	85.600	0.830	70.087	70.541	0.149	0.134	0.611	0.607
97.500	87.760	0.930	69.455	70.055	0.189	0.183	0.632	0.626

Çizelge C.8 : Deney No 8-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9.880	2.080	0.010	75.086	74.701	0.000	0.000	0.014	0.014
11.960	4.160	0.025	75.060	74.676	0.000	0.000	0.028	0.028
14.040	6.260	0.040	75.043	74.659	0.000	0.002	0.042	0.042
16.120	8.320	0.050	75.018	74.641	0.000	0.000	0.055	0.056
18.200	10.380	0.075	74.992	74.616	0.000	0.002	0.069	0.070
20.280	12.480	0.085	74.967	74.599	0.000	0.005	0.083	0.084
22.360	14.560	0.100	74.941	74.573	0.002	0.009	0.097	0.098
24.440	16.640	0.115	74.907	74.548	0.003	0.013	0.111	0.112
26.520	18.680	0.130	74.881	74.522	0.004	0.016	0.125	0.125
28.600	20.780	0.150	74.847	74.497	0.006	0.017	0.139	0.139
30.680	22.900	0.160	74.822	74.479	0.007	0.020	0.153	0.154
32.760	24.920	0.175	74.787	74.445	0.009	0.022	0.167	0.167
34.840	27.020	0.190	74.753	74.428	0.009	0.024	0.181	0.182
36.920	29.100	0.210	74.719	74.394	0.012	0.025	0.195	0.196
39.000	31.160	0.225	74.677	74.369	0.013	0.027	0.209	0.209
41.080	33.260	0.245	74.634	74.335	0.015	0.028	0.223	0.224
43.160	35.340	0.260	74.591	74.300	0.018	0.028	0.237	0.238
45.240	37.380	0.275	74.549	74.258	0.019	0.029	0.251	0.252
47.320	39.480	0.285	74.497	74.215	0.022	0.029	0.265	0.266
49.400	41.580	0.305	74.438	74.173	0.023	0.028	0.279	0.280
51.480	43.640	0.320	74.378	74.121	0.026	0.027	0.293	0.294
53.560	45.720	0.340	74.318	74.070	0.028	0.025	0.308	0.309
55.640	47.780	0.350	74.241	74.011	0.029	0.027	0.322	0.323
57.720	49.880	0.375	74.165	73.942	0.032	0.027	0.336	0.337
59.800	51.940	0.390	74.079	73.866	0.034	0.028	0.351	0.352
61.880	54.020	0.405	73.985	73.789	0.037	0.029	0.365	0.366
63.960	56.080	0.420	73.875	73.695	0.039	0.030	0.380	0.380
66.040	58.160	0.440	73.764	73.601	0.043	0.031	0.394	0.395
68.120	60.240	0.460	73.636	73.499	0.045	0.032	0.409	0.410
70.200	62.320	0.480	73.491	73.371	0.049	0.034	0.424	0.425
72.280	64.400	0.495	73.337	73.243	0.052	0.037	0.439	0.440
74.360	66.460	0.525	73.158	73.107	0.058	0.041	0.454	0.455
76.440	68.560	0.545	72.953	72.945	0.062	0.045	0.470	0.470
78.520	70.600	0.570	72.723	72.774	0.068	0.049	0.485	0.485
80.600	72.720	0.595	72.458	72.587	0.075	0.055	0.502	0.501
82.680	74.740	0.625	72.126	72.374	0.086	0.063	0.518	0.516
84.760	76.840	0.665	71.682	72.135	0.103	0.072	0.536	0.533
86.840	78.840	0.745	70.914	71.854	0.160	0.097	0.556	0.549
88.920	81.200	2.310	65.408	71.402	1.661	0.103	0.621	0.569
91.000	83.260	2.370	65.168	70.873	1.665	0.138	0.639	0.587
93.080	85.460	5.075	64.945	70.600	1.717	2.732	0.658	0.605

Çizelge C.9 : Deney No 9-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7.800	1.600	0.015	50.407	50.003	0.000	0.002	0.016	0.016
9.400	3.220	0.030	50.399	49.985	0.000	0.003	0.032	0.032
11.000	4.800	0.040	50.390	49.977	0.000	0.003	0.048	0.048
12.600	6.440	0.055	50.373	49.960	0.002	0.003	0.064	0.064
14.200	8.020	0.070	50.356	49.943	0.003	0.004	0.080	0.080
15.800	9.580	0.075	50.347	49.926	0.003	0.004	0.095	0.096
17.400	11.220	0.090	50.321	49.909	0.004	0.006	0.111	0.112
19.000	12.800	0.105	50.304	49.892	0.005	0.007	0.127	0.128
20.600	14.380	0.110	50.278	49.866	0.007	0.008	0.143	0.144
22.200	16.000	0.125	50.253	49.841	0.008	0.008	0.159	0.161
23.800	17.600	0.140	50.227	49.823	0.009	0.009	0.175	0.177
25.400	19.180	0.145	50.184	49.789	0.011	0.009	0.191	0.193
27.000	20.740	0.160	50.150	49.755	0.013	0.010	0.207	0.208
28.600	22.400	0.175	50.098	49.721	0.014	0.013	0.224	0.225
30.200	23.960	0.185	50.055	49.687	0.014	0.013	0.239	0.241
31.800	25.560	0.200	49.995	49.644	0.017	0.015	0.256	0.257
33.400	27.180	0.215	49.935	49.602	0.018	0.017	0.272	0.274
35.000	28.780	0.225	49.866	49.551	0.020	0.019	0.289	0.290
36.600	30.360	0.240	49.789	49.491	0.023	0.022	0.305	0.307
38.200	31.940	0.270	49.703	49.431	0.024	0.023	0.321	0.323
39.800	33.580	0.275	49.609	49.372	0.027	0.024	0.338	0.340
41.400	35.140	0.280	49.514	49.295	0.029	0.027	0.355	0.356
43.000	36.740	0.295	49.403	49.218	0.031	0.029	0.372	0.373
44.600	38.340	0.310	49.291	49.124	0.033	0.032	0.389	0.390
46.200	39.940	0.325	49.162	49.031	0.036	0.033	0.406	0.407
47.800	41.520	0.330	49.025	48.928	0.038	0.035	0.423	0.424
49.400	43.120	0.355	48.879	48.817	0.042	0.038	0.441	0.442
51.000	44.740	0.370	48.716	48.698	0.044	0.040	0.459	0.459
52.600	46.260	0.385	48.544	48.570	0.049	0.043	0.476	0.476
54.200	47.940	0.405	48.355	48.425	0.053	0.048	0.496	0.495
55.800	49.520	0.425	48.149	48.272	0.059	0.050	0.514	0.513
57.400	51.100	0.440	47.926	48.118	0.063	0.053	0.533	0.531
59.000	52.680	0.460	47.686	47.939	0.072	0.058	0.552	0.549
60.600	54.300	0.480	47.420	47.752	0.078	0.063	0.573	0.569
62.200	55.920	0.515	47.136	47.547	0.089	0.068	0.593	0.588
63.800	57.520	0.540	46.819	47.326	0.101	0.074	0.614	0.608
65.400	59.140	0.575	46.458	47.087	0.118	0.082	0.636	0.628
67.000	60.680	0.615	46.037	46.831	0.148	0.091	0.659	0.648
68.600	61.700	0.735	45.608	46.575	0.246	0.101	0.676	0.662
70.200	64.000	2.375	41.365	46.848	1.735	0.183	0.774	0.683

Çizelge C.10 : Deney No 10-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7.880	1.660	0.010	50.639	50.625	0.000	0.000	0.016	0.016
9.520	3.300	0.015	50.622	50.616	0.000	0.000	0.033	0.033
11.160	4.920	0.030	50.596	50.599	0.000	0.003	0.049	0.049
12.800	6.600	0.045	50.579	50.582	0.000	0.003	0.065	0.065
14.440	8.220	0.055	50.562	50.565	0.000	0.003	0.081	0.081
16.080	9.840	0.065	50.536	50.548	0.000	0.003	0.097	0.097
17.720	11.500	0.080	50.510	50.531	0.003	0.003	0.114	0.114
19.360	13.140	0.090	50.484	50.514	0.003	0.004	0.130	0.130
21.000	14.740	0.100	50.459	50.488	0.003	0.004	0.146	0.146
22.640	16.420	0.110	50.433	50.463	0.004	0.005	0.163	0.163
24.280	18.020	0.125	50.399	50.437	0.005	0.007	0.179	0.179
25.920	19.680	0.140	50.364	50.403	0.005	0.008	0.195	0.195
27.560	21.320	0.150	50.321	50.369	0.008	0.008	0.212	0.212
29.200	22.980	0.160	50.270	50.335	0.008	0.010	0.229	0.228
30.840	24.580	0.175	50.227	50.292	0.010	0.012	0.245	0.244
32.480	26.260	0.180	50.167	50.250	0.012	0.012	0.262	0.261
34.120	27.860	0.200	50.115	50.190	0.012	0.014	0.278	0.278
35.760	29.520	0.210	50.047	50.139	0.014	0.014	0.295	0.294
37.400	31.140	0.220	49.978	50.079	0.016	0.017	0.312	0.311
39.040	32.760	0.235	49.901	50.011	0.017	0.018	0.328	0.328
40.680	34.400	0.250	49.823	49.934	0.018	0.021	0.345	0.344
42.320	36.040	0.265	49.737	49.858	0.021	0.021	0.362	0.361
43.960	37.680	0.275	49.643	49.772	0.023	0.023	0.380	0.379
45.600	39.340	0.285	49.549	49.679	0.024	0.026	0.397	0.396
47.240	40.980	0.305	49.437	49.576	0.027	0.027	0.414	0.413
48.880	42.580	0.320	49.325	49.465	0.029	0.029	0.432	0.430
50.520	44.240	0.325	49.205	49.346	0.030	0.032	0.450	0.448
52.160	45.840	0.350	49.076	49.218	0.033	0.034	0.467	0.466
53.800	47.500	0.365	48.939	49.082	0.035	0.037	0.485	0.484
55.440	49.140	0.380	48.793	48.928	0.039	0.039	0.504	0.502
57.080	50.800	0.395	48.639	48.766	0.042	0.043	0.522	0.521
58.720	52.400	0.415	48.476	48.596	0.047	0.048	0.540	0.539
60.360	54.080	0.435	48.304	48.417	0.051	0.052	0.560	0.558
62.000	55.700	0.455	48.115	48.221	0.057	0.057	0.579	0.578
63.640	57.360	0.475	47.918	48.016	0.063	0.063	0.599	0.597
65.280	59.000	0.505	47.711	47.786	0.071	0.071	0.618	0.617
66.920	60.640	0.530	47.480	47.530	0.080	0.080	0.639	0.638
68.560	62.220	0.570	47.196	47.206	0.093	0.094	0.659	0.659
70.200	63.740	0.655	46.759	46.541	0.119	0.138	0.682	0.685
71.840	65.720	5.505	40.922	43.719	1.885	3.097	0.803	0.752

Çizelge C.11 : Deney No 11-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9.600	2.640	0.015	76.297	76.534	0.002	0.003	0.017	0.017
12.260	5.340	0.025	76.246	76.483	0.002	0.003	0.035	0.035
14.920	8.000	0.040	76.204	76.432	0.002	0.003	0.052	0.052
17.580	10.640	0.055	76.170	76.415	0.002	0.004	0.070	0.070
20.240	13.300	0.075	76.170	76.398	0.002	0.004	0.087	0.087
22.900	15.980	0.090	76.178	76.415	0.002	0.004	0.105	0.105
25.560	18.600	0.105	76.135	76.372	0.002	0.005	0.122	0.122
28.220	21.280	0.125	76.161	76.423	0.002	0.005	0.140	0.139
30.880	23.920	0.140	76.076	76.338	0.004	0.007	0.157	0.157
33.540	26.600	0.150	76.076	76.347	0.004	0.008	0.175	0.174
36.200	29.220	0.165	76.024	76.278	0.004	0.008	0.192	0.192
38.860	31.900	0.180	76.050	76.338	0.004	0.009	0.210	0.209
41.520	34.520	0.200	76.033	76.338	0.007	0.010	0.227	0.226
44.180	37.180	0.220	76.024	76.338	0.007	0.010	0.245	0.244
46.840	39.860	0.235	76.016	76.330	0.007	0.013	0.262	0.261
49.500	42.500	0.250	75.990	76.295	0.009	0.013	0.280	0.279
52.160	45.200	0.265	75.973	76.278	0.009	0.014	0.297	0.296
54.820	47.820	0.285	75.973	76.278	0.009	0.015	0.315	0.313
57.480	50.500	0.305	75.973	76.278	0.012	0.015	0.332	0.331
60.140	53.140	0.315	75.931	76.227	0.012	0.018	0.350	0.349
62.800	55.780	0.335	75.854	76.159	0.014	0.019	0.368	0.366
65.460	58.440	0.350	75.914	76.210	0.014	0.020	0.385	0.383
68.120	61.100	0.375	75.897	76.185	0.016	0.022	0.403	0.401
70.780	63.760	0.385	75.888	76.185	0.017	0.023	0.420	0.418
73.440	66.420	0.410	75.871	76.159	0.018	0.024	0.438	0.436
76.100	69.100	0.420	75.854	76.142	0.019	0.027	0.455	0.454
78.760	71.720	0.445	75.879	76.159	0.021	0.029	0.473	0.471
81.420	74.380	0.460	75.871	76.150	0.023	0.029	0.490	0.488
84.080	77.040	0.480	75.811	76.099	0.024	0.032	0.508	0.506
86.740	79.660	0.490	75.777	76.048	0.026	0.034	0.526	0.524
89.400	82.340	0.520	75.743	76.031	0.028	0.036	0.544	0.541
92.060	85.020	0.535	75.760	76.031	0.029	0.038	0.561	0.559
94.720	87.680	0.555	75.734	76.006	0.032	0.041	0.579	0.577
97.380	90.320	0.575	75.751	76.023	0.035	0.043	0.596	0.594
100.040	92.960	0.600	75.786	76.065	0.038	0.044	0.613	0.611
102.700	95.580	0.615	75.658	75.929	0.043	0.049	0.632	0.629
105.360	98.280	0.645	75.547	75.861	0.052	0.054	0.650	0.648
108.020	100.900	0.690	75.478	75.827	0.074	0.061	0.668	0.665
110.680	104.280	2.610	71.341	75.827	1.917	0.088	0.731	0.688
113.340	106.380	2.720	71.068	75.792	1.920	0.179	0.748	0.702

Çizelge C.12 : Deney No 12-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8.060	2.460	0.010	73.840	73.763	0.000	0.000	0.017	0.017
10.480	4.880	0.030	73.798	73.729	0.000	0.000	0.033	0.033
12.900	7.260	0.045	73.764	73.704	0.000	0.000	0.049	0.049
15.320	9.700	0.055	73.806	73.738	0.000	0.000	0.066	0.066
17.740	12.160	0.075	73.687	73.652	0.000	0.000	0.083	0.083
20.160	14.540	0.080	73.704	73.661	0.000	0.000	0.099	0.099
22.580	16.960	0.095	73.653	73.618	0.002	0.000	0.115	0.115
25.000	19.360	0.110	73.610	73.584	0.003	0.000	0.132	0.132
27.420	21.820	0.120	73.584	73.559	0.003	0.000	0.148	0.148
29.840	24.220	0.135	73.602	73.593	0.003	0.000	0.165	0.165
32.260	26.640	0.155	73.602	73.601	0.003	0.000	0.181	0.181
34.680	29.060	0.165	73.474	73.491	0.003	0.000	0.198	0.198
37.100	31.460	0.185	73.491	73.508	0.003	0.000	0.214	0.214
39.520	33.860	0.195	73.431	73.473	0.005	0.000	0.231	0.230
41.940	36.260	0.210	73.448	73.482	0.005	0.000	0.247	0.247
44.360	38.660	0.225	73.371	73.414	0.008	0.000	0.263	0.263
46.780	41.120	0.240	73.414	73.473	0.008	0.000	0.280	0.280
49.200	43.520	0.260	73.269	73.337	0.008	0.000	0.297	0.297
51.620	45.960	0.270	73.286	73.371	0.010	0.002	0.314	0.313
54.040	48.400	0.290	73.235	73.320	0.010	0.003	0.330	0.330
56.460	50.760	0.300	73.201	73.320	0.013	0.003	0.347	0.346
58.880	53.180	0.325	73.141	73.269	0.014	0.003	0.364	0.363
61.300	55.620	0.340	73.056	73.201	0.017	0.003	0.381	0.380
63.720	58.000	0.355	72.996	73.149	0.017	0.003	0.397	0.396
66.140	60.440	0.370	72.979	73.132	0.019	0.004	0.414	0.413
68.560	62.880	0.390	72.902	73.056	0.021	0.006	0.431	0.430
70.980	65.300	0.410	72.868	73.030	0.023	0.007	0.448	0.447
73.400	67.680	0.420	72.774	72.936	0.024	0.009	0.465	0.464
75.820	70.120	0.445	72.731	72.894	0.028	0.012	0.482	0.481
78.240	72.560	0.455	72.620	72.783	0.031	0.015	0.500	0.498
80.660	74.920	0.480	72.535	72.698	0.033	0.018	0.516	0.515
83.080	77.360	0.495	72.416	72.587	0.037	0.020	0.534	0.533
85.500	79.760	0.520	72.364	72.527	0.041	0.023	0.551	0.550
87.920	82.200	0.535	72.245	72.399	0.047	0.027	0.569	0.568
90.340	84.580	0.555	72.100	72.263	0.054	0.032	0.587	0.585
92.760	87.000	0.585	71.972	72.118	0.063	0.038	0.604	0.603
95.180	89.420	0.620	71.827	71.956	0.077	0.044	0.622	0.621
97.600	91.840	0.665	71.690	71.794	0.100	0.057	0.641	0.640
100.020	94.220	0.750	71.580	71.598	0.148	0.082	0.658	0.658
102.440	97.100	2.530	65.176	71.555	1.806	0.146	0.745	0.678
104.860	99.920	5.255	63.803	71.078	2.338	2.214	0.783	0.703

Çizelge C.13 : Deney No 13-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19.460	2.580	0.020	74.813	74.786	0.002	0.000	0.017	0.017
22.040	5.160	0.025	74.711	74.684	0.002	0.000	0.035	0.035
24.620	7.760	0.045	74.762	74.735	0.002	0.000	0.052	0.052
27.200	10.300	0.060	74.728	74.701	0.002	0.000	0.069	0.069
29.780	12.900	0.075	74.677	74.641	0.002	0.002	0.086	0.086
32.360	15.460	0.095	74.659	74.616	0.002	0.002	0.104	0.104
34.940	18.040	0.100	74.685	74.624	0.002	0.002	0.121	0.121
37.520	20.620	0.130	74.583	74.514	0.003	0.002	0.138	0.138
40.100	23.180	0.140	74.574	74.488	0.004	0.003	0.155	0.156
42.680	25.760	0.155	74.557	74.454	0.004	0.003	0.173	0.173
45.260	28.360	0.175	74.566	74.454	0.004	0.003	0.190	0.190
47.840	30.960	0.190	74.455	74.326	0.005	0.004	0.208	0.208
50.420	33.520	0.205	74.472	74.317	0.007	0.006	0.225	0.226
53.000	36.100	0.215	74.386	74.224	0.008	0.007	0.243	0.243
55.580	38.640	0.235	74.352	74.156	0.008	0.007	0.260	0.261
58.160	41.220	0.250	74.335	74.121	0.010	0.008	0.277	0.278
60.740	43.800	0.270	74.301	74.062	0.010	0.008	0.295	0.296
63.320	46.400	0.295	74.267	74.002	0.013	0.010	0.312	0.314
65.900	48.960	0.300	74.207	73.917	0.013	0.010	0.330	0.331
68.480	51.500	0.320	74.105	73.780	0.015	0.012	0.347	0.349
71.060	54.140	0.335	74.130	73.789	0.017	0.012	0.365	0.367
73.640	56.660	0.355	74.054	73.678	0.018	0.014	0.383	0.385
76.220	59.240	0.370	74.003	73.610	0.019	0.016	0.400	0.402
78.800	61.840	0.390	73.977	73.559	0.022	0.017	0.418	0.420
81.380	64.400	0.410	73.840	73.405	0.026	0.018	0.436	0.439
83.960	66.960	0.420	73.747	73.311	0.027	0.019	0.454	0.457
86.540	69.580	0.445	73.687	73.252	0.029	0.022	0.472	0.475
89.120	72.160	0.465	73.550	73.107	0.033	0.023	0.491	0.494
91.700	74.720	0.485	73.414	72.979	0.037	0.024	0.509	0.512
94.280	77.300	0.505	73.277	72.877	0.042	0.028	0.527	0.530
96.860	79.860	0.525	73.056	72.706	0.049	0.029	0.547	0.549
99.440	82.480	0.555	72.825	72.536	0.057	0.033	0.566	0.569
102.020	85.020	0.585	72.552	72.365	0.068	0.037	0.586	0.587
104.600	87.600	0.615	72.279	72.237	0.083	0.041	0.606	0.606
107.180	90.160	0.655	71.912	71.999	0.102	0.047	0.627	0.626
109.760	92.760	0.710	71.409	71.743	0.137	0.054	0.649	0.646
112.340	95.820	2.290	67.348	71.436	1.651	0.047	0.711	0.671
114.920	98.180	2.320	67.007	71.027	1.654	0.064	0.733	0.691
117.500	100.620	2.355	66.887	70.634	1.657	0.088	0.752	0.712
120.080	102.980	2.440	67.032	70.200	1.670	0.144	0.768	0.733
122.660	106.080	5.030	64.464	70.472	1.736	2.537	0.823	0.753

Çizelge C.14 : Deney No 14-2

Zaman	Z [kN]	W _m [mm]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
			üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7.240	2.440	0.015	75.444	76.236	0.002	0.000	0.016	0.016
9.660	4.840	0.035	75.444	76.227	0.002	0.000	0.032	0.032
12.080	7.260	0.045	75.427	76.210	0.002	0.000	0.048	0.048
14.500	9.640	0.065	75.402	76.185	0.002	0.000	0.064	0.063
16.920	12.100	0.080	75.368	76.159	0.002	0.000	0.080	0.079
19.340	14.500	0.095	75.350	76.142	0.002	0.000	0.096	0.095
21.760	16.900	0.110	75.316	76.125	0.002	0.000	0.112	0.111
24.180	19.340	0.130	75.240	76.023	0.003	0.000	0.129	0.127
26.600	21.760	0.140	75.154	75.954	0.003	0.002	0.145	0.143
29.020	24.160	0.165	75.257	76.057	0.003	0.003	0.161	0.159
31.440	26.600	0.175	75.154	75.963	0.004	0.003	0.177	0.175
33.860	28.960	0.200	75.146	75.963	0.006	0.003	0.193	0.191
36.280	31.440	0.215	75.120	75.937	0.007	0.005	0.209	0.207
38.700	33.800	0.230	75.077	75.912	0.008	0.005	0.225	0.223
41.120	36.220	0.245	75.043	75.878	0.009	0.007	0.241	0.239
43.540	38.660	0.265	75.009	75.844	0.010	0.008	0.258	0.255
45.960	41.060	0.280	74.950	75.792	0.012	0.009	0.274	0.271
48.380	43.540	0.300	74.941	75.827	0.013	0.010	0.290	0.287
50.800	45.880	0.315	74.898	75.784	0.015	0.012	0.306	0.303
53.220	48.340	0.340	74.864	75.750	0.015	0.013	0.323	0.319
55.640	50.740	0.355	74.813	75.699	0.018	0.015	0.339	0.335
58.060	53.180	0.375	74.711	75.622	0.019	0.015	0.356	0.352
60.480	55.540	0.390	74.659	75.596	0.022	0.018	0.372	0.367
62.900	57.960	0.410	74.591	75.545	0.024	0.020	0.389	0.384
65.320	60.440	0.425	74.523	75.494	0.026	0.022	0.406	0.400
67.740	62.840	0.450	74.446	75.451	0.028	0.024	0.422	0.416
70.160	65.280	0.465	74.335	75.375	0.031	0.027	0.439	0.433
72.580	67.660	0.485	74.258	75.341	0.033	0.028	0.456	0.449
75.000	70.080	0.500	74.088	75.213	0.037	0.032	0.473	0.466
77.420	72.460	0.525	73.968	75.127	0.039	0.034	0.490	0.482
79.840	74.880	0.545	73.764	74.991	0.043	0.037	0.508	0.499
82.260	77.320	0.570	73.661	74.948	0.048	0.039	0.525	0.516
84.680	79.740	0.595	73.457	74.803	0.053	0.044	0.543	0.533
87.100	82.160	0.630	73.235	74.667	0.059	0.048	0.561	0.550
89.520	84.500	0.650	72.987	74.522	0.069	0.053	0.579	0.567
91.940	86.980	0.685	72.697	74.369	0.081	0.061	0.598	0.585
94.360	89.380	0.725	72.330	74.198	0.098	0.069	0.618	0.602
96.780	91.720	0.820	71.563	74.028	0.164	0.083	0.641	0.619
99.200	94.560	2.135	66.810	73.900	1.388	0.108	0.708	0.640
101.620	96.820	2.185	66.683	73.635	1.390	0.147	0.726	0.657
104.040	99.800	4.950	66.179	70.200	1.493	2.702	0.754	0.711

EK D : Uzun Süreli Deney Sonuçları

EK D : Uzun Süreli Deney Sonuçları**Çizelge D.1 : Uzun süreli deney no 1**

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	89.200	99.046	98.472	0.050	0.060	0.450	0.453
0.0253	89.629	93.972	93.280	0.200	1.040	0.477	0.480
0.0504	87.997	86.090	91.708	1.040	1.270	0.511	0.480
0.0755	86.870	85.510	91.506	1.060	1.320	0.508	0.475
0.1006	88.538	85.145	90.972	1.070	1.330	0.520	0.487
0.1257	88.000	84.828	90.731	1.070	1.330	0.519	0.485
0.1508	88.331	84.721	90.578	1.070	1.330	0.521	0.488
0.1759	88.020	84.500	90.680	1.070	1.330	0.521	0.485
0.2010	87.859	84.150	89.859	1.070	1.330	0.522	0.489
0.2261	87.660	84.167	90.049	1.070	1.330	0.521	0.487
0.2512	87.688	84.084	90.156	1.070	1.330	0.521	0.486
0.2763	87.348	83.988	90.075	1.070	1.330	0.520	0.485
0.3014	87.660	83.810	89.557	1.070	1.330	0.523	0.489
0.3265	87.543	83.920	90.095	1.070	1.330	0.522	0.486
0.3516	87.641	83.916	90.204	1.070	1.330	0.522	0.486
0.3767	87.670	83.645	89.510	1.070	1.330	0.524	0.490
0.4018	87.095	83.605	89.589	1.070	1.330	0.521	0.486
0.4269	87.330	83.556	89.490	1.070	1.330	0.523	0.488
0.4520	87.243	83.460	89.367	1.070	1.330	0.523	0.488
0.4771	87.292	83.590	89.812	1.070	1.330	0.522	0.486
0.5022	87.255	83.453	89.623	1.070	1.330	0.523	0.487
0.5273	87.160	83.331	89.429	1.070	1.330	0.523	0.487
0.5524	86.540	83.210	89.180	1.070	1.330	0.520	0.485
0.5775	86.690	83.194	89.222	1.070	1.330	0.521	0.486
0.6026	86.500	83.149	89.127	1.070	1.330	0.520	0.485
0.6277	86.352	83.230	89.570	1.070	1.330	0.519	0.482
0.6528	86.180	83.162	89.728	1.070	1.330	0.518	0.480
0.6779	86.230	83.070	89.415	1.070	1.330	0.519	0.482
0.7030	86.364	82.994	89.365	1.070	1.330	0.520	0.483
0.7281	86.004	82.856	89.020	1.070	1.330	0.519	0.483
0.7532	85.880	82.865	89.251	1.070	1.330	0.518	0.481
0.7783	85.860	82.688	89.150	1.070	1.330	0.519	0.482
0.8034	85.750	82.740	89.380	1.070	1.330	0.518	0.480
0.8285	86.041	82.671	89.305	1.070	1.330	0.520	0.482
0.8536	85.909	82.481	88.866	1.070	1.330	0.521	0.483
0.8787	85.969	82.360	88.452	1.070	1.330	0.522	0.486
0.9038	85.810	82.332	88.460	1.070	1.330	0.521	0.485
0.9289	85.840	82.348	88.632	1.070	1.330	0.521	0.484
0.9540	86.207	82.261	88.396	1.070	1.330	0.524	0.488
0.9791	86.110	82.130	88.069	1.070	1.330	0.524	0.489
1.0042	86.334	82.076	87.842	1.070	1.330	0.526	0.491

Çizelge D.2 : Uzun süreli deney no 2

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	89.200	98.956	98.810	0.050	0.050	0.451	0.451
0.0253	89.629	94.449	94.131	1.551	0.135	0.474	0.476
0.0504	87.997	93.099	93.034	1.758	0.187	0.473	0.473
0.0755	86.870	93.030	92.310	1.830	0.330	0.467	0.471
0.1006	88.538	92.059	87.773	1.885	1.250	0.481	0.504
0.1257	88.000	91.612	86.710	1.916	1.320	0.480	0.507
0.1508	88.331	91.468	86.396	1.930	1.330	0.483	0.511
0.1759	88.020	91.440	85.990	1.930	1.330	0.481	0.512
0.2010	87.859	90.979	85.059	1.930	1.330	0.483	0.516
0.2261	87.660	91.034	85.180	1.930	1.330	0.481	0.515
0.2512	87.688	90.936	85.194	1.930	1.330	0.482	0.515
0.2763	87.348	90.893	85.038	1.930	1.330	0.480	0.514
0.3014	87.660	90.609	84.529	1.930	1.330	0.484	0.519
0.3265	87.543	90.795	85.044	1.930	1.330	0.482	0.515
0.3516	87.641	90.783	85.133	1.930	1.330	0.483	0.515
0.3767	87.670	90.415	84.420	1.930	1.330	0.485	0.519
0.4018	87.095	90.395	84.444	1.930	1.330	0.482	0.516
0.4269	87.330	90.358	84.292	1.930	1.330	0.483	0.518
0.4520	87.243	90.263	84.160	1.930	1.330	0.483	0.518
0.4771	87.292	90.478	84.680	1.930	1.330	0.482	0.515
0.5022	87.255	90.349	84.472	1.930	1.330	0.483	0.516
0.5273	87.160	90.189	84.269	1.930	1.330	0.483	0.517
0.5524	86.540	90.120	83.950	1.930	1.330	0.480	0.515
0.5775	86.690	90.091	83.981	1.930	1.330	0.481	0.516
0.6026	86.500	90.031	83.867	1.930	1.330	0.480	0.516
0.6277	86.352	90.180	84.172	1.930	1.330	0.479	0.513
0.6528	86.180	90.215	84.275	1.930	1.330	0.478	0.511
0.6779	86.230	90.000	83.983	1.930	1.330	0.479	0.513
0.7030	86.364	89.963	83.907	1.930	1.330	0.480	0.515
0.7281	86.004	89.740	83.560	1.930	1.330	0.479	0.515
0.7532	85.880	89.794	83.736	1.930	1.330	0.478	0.513
0.7783	85.860	89.636	83.586	1.930	1.330	0.479	0.514
0.8034	85.750	89.696	83.753	1.930	1.330	0.478	0.512
0.8285	86.041	89.600	83.698	1.930	1.330	0.480	0.514
0.8536	85.909	89.294	83.229	1.930	1.330	0.481	0.516
0.8787	85.969	89.139	82.864	1.930	1.330	0.482	0.519
0.9038	85.810	89.128	82.842	1.930	1.330	0.481	0.518
0.9289	85.840	89.152	82.925	1.930	1.330	0.481	0.518
0.9540	86.207	89.036	82.757	1.930	1.330	0.484	0.521
0.9791	86.110	88.840	82.409	1.930	1.330	0.485	0.522
1.0042	86.334	88.742	82.173	1.930	1.330	0.486	0.525

Çizelge D.3 : Uzun süreli deney no 3

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	89.200	98.380	98.150	0.080	0.080	0.453	0.454
0.0253	89.629	93.145	93.029	0.480	1.780	0.481	0.482
0.0504	87.997	91.902	92.599	0.990	1.820	0.479	0.475
0.0755	86.870	91.850	92.395	1.010	1.835	0.473	0.470
0.1006	88.538	91.755	92.273	1.010	1.855	0.482	0.480
0.1257	88.000	91.702	92.078	1.015	1.860	0.480	0.478
0.1508	88.331	91.641	91.999	1.015	1.865	0.482	0.480
0.1759	88.020	91.670	91.980	1.015	1.865	0.480	0.478
0.2010	87.859	91.909	91.586	1.015	1.865	0.478	0.480
0.2261	87.660	91.719	91.525	1.015	1.865	0.478	0.479
0.2512	87.688	91.423	91.529	1.015	1.865	0.480	0.479
0.2763	87.348	91.268	91.440	1.015	1.865	0.479	0.478
0.3014	87.660	91.430	91.190	1.015	1.865	0.479	0.481
0.3265	87.543	91.067	91.320	1.015	1.865	0.481	0.479
0.3516	87.641	90.899	91.307	1.015	1.865	0.482	0.480
0.3767	87.670	91.075	91.000	1.015	1.865	0.481	0.482
0.4018	87.095	90.895	90.928	1.015	1.865	0.479	0.479
0.4269	87.330	90.890	90.886	1.015	1.865	0.480	0.480
0.4520	87.243	90.820	90.747	1.015	1.865	0.480	0.481
0.4771	87.292	90.562	90.855	1.015	1.865	0.482	0.480
0.5022	87.255	90.488	90.761	1.015	1.865	0.482	0.481
0.5273	87.160	90.439	90.659	1.015	1.865	0.482	0.481
0.5524	86.540	90.480	90.510	1.015	1.865	0.478	0.478
0.5775	86.690	90.362	90.499	1.015	1.865	0.480	0.479
0.6026	86.500	90.278	90.398	1.015	1.865	0.479	0.478
0.6277	86.352	90.050	90.462	1.015	1.865	0.479	0.477
0.6528	86.180	89.775	90.405	1.015	1.865	0.480	0.477
0.6779	86.230	89.816	90.324	1.015	1.865	0.480	0.477
0.7030	86.364	89.734	90.266	1.015	1.865	0.481	0.478
0.7281	86.004	89.780	90.077	1.015	1.865	0.479	0.477
0.7532	85.880	89.545	90.095	1.015	1.865	0.480	0.477
0.7783	85.860	89.322	89.920	1.015	1.865	0.481	0.477
0.8034	85.750	89.110	89.926	1.015	1.865	0.481	0.477
0.8285	86.041	88.997	89.865	1.015	1.865	0.483	0.479
0.8536	85.909	89.091	89.651	1.015	1.865	0.482	0.479
0.8787	85.969	89.216	89.441	1.015	1.865	0.482	0.481
0.9038	85.810	89.092	89.434	1.015	1.865	0.482	0.480
0.9289	85.840	88.963	89.440	1.015	1.865	0.482	0.480
0.9540	86.207	89.016	89.326	1.015	1.865	0.484	0.483
0.9791	86.110	89.091	89.150	1.015	1.865	0.483	0.483
1.0042	86.334	89.198	89.056	1.015	1.865	0.484	0.485

Çizelge D.4 : Uzun süreli deney no 4

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	89.200	99.780	99.728	0.050	0.060	0.447	0.447
0.0253	89.629	88.933	88.693	1.190	1.490	0.504	0.505
0.0504	87.997	87.965	88.195	1.230	1.527	0.500	0.499
0.0755	86.870	87.745	87.921	1.235	1.540	0.495	0.494
0.1006	88.538	87.517	87.679	1.240	1.545	0.506	0.505
0.1257	88.000	87.399	87.502	1.239	1.550	0.503	0.503
0.1508	88.331	87.368	87.412	1.240	1.555	0.506	0.505
0.1759	88.020	87.250	87.270	1.240	1.555	0.504	0.504
0.2010	87.859	87.181	87.187	1.240	1.555	0.504	0.504
0.2261	87.660	87.166	87.049	1.240	1.555	0.503	0.504
0.2512	87.688	87.019	86.908	1.240	1.555	0.504	0.504
0.2763	87.348	86.965	86.805	1.240	1.555	0.502	0.503
0.3014	87.660	86.929	86.712	1.240	1.555	0.504	0.505
0.3265	87.543	86.896	86.624	1.240	1.555	0.504	0.505
0.3516	87.641	86.834	86.546	1.240	1.555	0.505	0.506
0.3767	87.670	86.765	86.460	1.240	1.555	0.505	0.507
0.4018	87.095	86.770	86.409	1.240	1.555	0.502	0.504
0.4269	87.330	86.730	86.366	1.240	1.555	0.503	0.506
0.4520	87.243	86.657	86.267	1.240	1.555	0.503	0.506
0.4771	87.292	86.651	86.176	1.240	1.555	0.504	0.506
0.5022	87.255	86.595	86.119	1.240	1.555	0.504	0.507
0.5273	87.160	86.580	86.058	1.240	1.555	0.503	0.506
0.5524	86.540	86.540	85.990	1.240	1.555	0.500	0.503
0.5775	86.690	86.529	85.923	1.240	1.555	0.501	0.504
0.6026	86.500	86.485	85.815	1.240	1.555	0.500	0.504
0.6277	86.352	86.442	85.738	1.240	1.555	0.499	0.504
0.6528	86.180	86.380	85.578	1.240	1.555	0.499	0.504
0.6779	86.230	86.358	85.550	1.240	1.555	0.499	0.504
0.7030	86.364	86.326	85.466	1.240	1.555	0.500	0.505
0.7281	86.004	86.282	85.373	1.240	1.555	0.498	0.504
0.7532	85.880	86.250	85.240	1.240	1.555	0.498	0.504
0.7783	85.860	86.100	85.005	1.240	1.555	0.499	0.505
0.8034	85.750	86.027	84.917	1.240	1.555	0.498	0.505
0.8285	86.041	86.008	84.808	1.240	1.555	0.500	0.507
0.8536	85.909	85.979	84.731	1.240	1.555	0.500	0.507
0.8787	85.969	85.954	84.656	1.240	1.555	0.500	0.508
0.9038	85.810	85.968	84.590	1.240	1.555	0.499	0.507
0.9289	85.840	85.917	84.543	1.240	1.555	0.500	0.508
0.9540	86.207	85.908	84.510	1.240	1.555	0.502	0.510
0.9791	86.110	85.860	84.450	1.240	1.555	0.501	0.510
1.0042	86.334	85.864	84.366	1.240	1.555	0.503	0.512

Çizelge D.5 : Uzun süreli deney no 5

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	89.200	98.826	98.934	0.050	0.070	0.451	0.451
0.0253	89.629	87.607	91.300	1.130	1.710	0.512	0.491
0.0504	87.997	86.225	90.681	1.165	1.725	0.510	0.485
0.0755	86.870	85.831	90.625	1.170	1.730	0.506	0.479
0.1006	88.538	85.335	90.312	1.180	1.735	0.519	0.490
0.1257	88.000	85.062	90.161	1.185	1.735	0.517	0.488
0.1508	88.331	84.879	89.986	1.185	1.735	0.520	0.491
0.1759	88.020	84.840	90.100	1.185	1.735	0.519	0.488
0.2010	87.859	84.409	89.459	1.185	1.735	0.520	0.491
0.2261	87.660	84.359	89.596	1.185	1.735	0.520	0.489
0.2512	87.688	84.271	89.750	1.185	1.735	0.520	0.489
0.2763	87.348	84.193	89.728	1.185	1.735	0.519	0.487
0.3014	87.660	83.892	89.289	1.185	1.735	0.522	0.491
0.3265	87.543	84.053	89.753	1.185	1.735	0.521	0.488
0.3516	87.641	84.020	89.896	1.185	1.735	0.522	0.487
0.3767	87.670	83.710	89.410	1.185	1.735	0.524	0.490
0.4018	87.095	83.694	89.541	1.185	1.735	0.520	0.486
0.4269	87.330	83.584	89.460	1.185	1.735	0.522	0.488
0.4520	87.243	83.493	89.387	1.185	1.735	0.522	0.488
0.4771	87.292	83.535	89.641	1.185	1.735	0.522	0.487
0.5022	87.255	83.488	89.620	1.185	1.735	0.523	0.487
0.5273	87.160	83.379	89.531	1.185	1.735	0.523	0.487
0.5524	86.540	83.270	89.340	1.185	1.735	0.520	0.484
0.5775	86.690	83.270	89.439	1.185	1.735	0.521	0.485
0.6026	86.500	83.171	89.394	1.185	1.735	0.520	0.484
0.6277	86.352	83.274	89.642	1.185	1.735	0.518	0.482
0.6528	86.180	83.302	89.828	1.185	1.735	0.517	0.480
0.6779	86.230	83.178	89.590	1.185	1.735	0.518	0.481
0.7030	86.364	83.063	89.569	1.185	1.735	0.520	0.482
0.7281	86.004	82.906	89.326	1.185	1.735	0.519	0.481
0.7532	85.880	82.959	89.496	1.185	1.735	0.518	0.480
0.7783	85.860	82.818	89.378	1.185	1.735	0.518	0.480
0.8034	85.750	82.860	89.543	1.185	1.735	0.517	0.479
0.8285	86.041	82.825	89.484	1.185	1.735	0.519	0.481
0.8536	85.909	82.581	89.178	1.185	1.735	0.520	0.482
0.8787	85.969	82.391	88.882	1.185	1.735	0.522	0.484
0.9038	85.810	82.398	88.864	1.185	1.735	0.521	0.483
0.9289	85.840	82.382	88.945	1.185	1.735	0.521	0.483
0.9540	86.207	82.287	88.786	1.185	1.735	0.524	0.485
0.9791	86.110	82.139	88.588	1.185	1.735	0.524	0.486
1.0042	86.334	82.014	88.392	1.185	1.735	0.526	0.488

Çizelge D.6 : Uzun süreli deney no 6

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	77.596	99.156	99.273	0.070	0.060	0.391	0.391
0.0253	77.505	85.558	92.741	1.364	1.624	0.453	0.418
0.0504	74.471	83.606	91.505	1.420	1.680	0.445	0.407
0.0755	75.757	83.284	91.031	1.435	1.710	0.455	0.416
0.1006	77.073	82.781	90.694	1.455	1.725	0.466	0.425
0.1257	76.440	82.880	90.680	1.455	1.735	0.461	0.421
0.1508	75.982	82.880	90.680	1.455	1.735	0.458	0.419
0.1759	73.824	82.498	90.230	1.455	1.740	0.447	0.409
0.2010	77.091	82.078	89.987	1.455	1.745	0.470	0.428
0.2261	76.459	82.159	89.961	1.455	1.750	0.465	0.425
0.2512	76.090	82.110	89.890	1.460	1.755	0.463	0.423
0.2763	77.710	82.001	89.791	1.465	1.755	0.474	0.433
0.3014	76.771	81.775	89.683	1.465	1.755	0.469	0.428
0.3265	76.515	81.948	89.728	1.465	1.765	0.467	0.426
0.3516	76.568	81.950	89.661	1.465	1.765	0.467	0.427
0.3767	76.620	81.616	89.474	1.465	1.765	0.469	0.428
0.4018	76.003	81.667	89.414	1.465	1.765	0.465	0.425
0.4269	76.220	81.618	89.386	1.465	1.765	0.467	0.426
0.4520	76.140	81.564	89.344	1.465	1.765	0.467	0.426
0.4771	76.024	81.883	89.496	1.465	1.765	0.464	0.425
0.5022	76.010	81.653	89.258	1.467	1.767	0.465	0.426
0.5273	75.927	81.518	89.187	1.470	1.770	0.466	0.426
0.5524	75.310	81.386	89.114	1.470	1.770	0.463	0.423
0.5775	75.430	81.405	89.059	1.470	1.770	0.463	0.423
0.6026	75.250	81.358	89.017	1.470	1.772	0.462	0.423
0.6277	75.010	81.661	89.131	1.470	1.774	0.459	0.421
0.6528	78.110	81.488	88.952	1.470	1.775	0.479	0.439
0.6779	78.170	81.288	88.848	1.472	1.777	0.481	0.440
0.7030	78.292	81.207	88.750	1.473	1.778	0.482	0.441
0.7281	77.930	81.028	88.668	1.474	1.779	0.481	0.439
0.7532	77.777	81.091	88.663	1.474	1.779	0.480	0.439
0.7783	77.708	80.968	88.490	1.475	1.780	0.480	0.439
0.8034	77.535	81.081	88.505	1.475	1.781	0.478	0.438
0.8285	77.849	80.974	88.389	1.475	1.782	0.481	0.440
0.8536	77.749	80.740	88.299	1.475	1.783	0.481	0.440
0.8787	77.840	80.553	88.211	1.475	1.784	0.483	0.441
0.9038	77.660	80.560	88.171	1.475	1.784	0.482	0.440
0.9289	77.650	80.601	88.239	1.475	1.785	0.482	0.440
0.9540	78.070	80.447	88.132	1.475	1.785	0.485	0.443
0.9791	78.002	80.370	88.103	1.475	1.785	0.485	0.443
1.0042	78.262	80.248	88.068	1.475	1.785	0.488	0.444

Çizelge D.7 : Uzun süreli deney no 7

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	77.596	98.040	99.470	0.050	0.050	0.396	0.390
0.0253	77.505	93.320	95.632	0.125	0.105	0.415	0.405
0.0504	74.471	92.334	94.900	0.172	0.105	0.403	0.392
0.0755	75.757	91.921	94.600	0.300	0.105	0.412	0.400
0.1006	77.073	92.361	94.287	1.020	0.110	0.417	0.409
0.1257	76.440	92.370	94.390	1.030	0.110	0.414	0.405
0.1508	75.982	92.370	94.390	1.030	0.110	0.411	0.402
0.1759	73.824	91.840	93.954	1.030	0.110	0.402	0.393
0.2010	77.091	91.821	93.673	1.033	0.110	0.420	0.411
0.2261	76.459	91.760	93.718	1.035	0.110	0.417	0.408
0.2512	76.090	91.630	93.650	1.035	0.110	0.415	0.406
0.2763	77.710	91.500	93.540	1.040	0.110	0.425	0.415
0.3014	76.771	91.409	93.419	1.040	0.110	0.420	0.411
0.3265	76.515	91.380	93.488	1.040	0.110	0.419	0.409
0.3516	76.568	91.302	93.510	1.040	0.110	0.419	0.409
0.3767	76.620	91.173	93.246	1.040	0.110	0.420	0.411
0.4018	76.003	91.113	93.273	1.040	0.110	0.417	0.407
0.4269	76.220	91.012	93.214	1.040	0.110	0.419	0.409
0.4520	76.140	90.965	93.185	1.040	0.110	0.419	0.409
0.4771	76.024	91.049	93.359	1.040	0.110	0.417	0.407
0.5022	76.010	90.883	93.183	1.040	0.110	0.418	0.408
0.5273	75.927	90.795	93.087	1.040	0.110	0.418	0.408
0.5524	75.310	90.720	92.964	1.040	0.110	0.415	0.405
0.5775	75.430	90.636	92.956	1.040	0.110	0.416	0.406
0.6026	75.250	90.571	92.880	1.044	0.112	0.415	0.405
0.6277	75.010	90.610	93.060	1.048	0.114	0.414	0.403
0.6528	78.110	90.390	92.832	1.050	0.120	0.432	0.421
0.6779	78.170	90.264	92.735	1.050	0.120	0.433	0.421
0.7030	78.292	90.223	92.660	1.050	0.120	0.434	0.422
0.7281	77.930	90.155	92.515	1.050	0.120	0.432	0.421
0.7532	77.777	90.073	92.549	1.050	0.120	0.432	0.420
0.7783	77.708	89.924	92.344	1.050	0.120	0.432	0.421
0.8034	77.535	89.834	92.400	1.050	0.120	0.432	0.420
0.8285	77.849	89.760	92.319	1.050	0.120	0.434	0.422
0.8536	77.749	89.701	92.169	1.050	0.120	0.433	0.422
0.8787	77.840	89.613	92.012	1.050	0.120	0.434	0.423
0.9038	77.660	89.610	92.030	1.050	0.120	0.433	0.422
0.9289	77.650	89.630	92.042	1.050	0.120	0.433	0.422
0.9540	78.070	89.541	91.974	1.050	0.120	0.436	0.424
0.9791	78.002	89.510	91.910	1.050	0.120	0.436	0.424
1.0042	78.262	89.529	91.832	1.050	0.120	0.437	0.426

Çizelge D.8 : Uzun süreli deney no 8

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	77.596	97.819	97.309	0.090	0.120	0.397	0.399
0.0253	77.505	101.383	74.471	1.934	2.045	0.382	0.520
0.0504	74.471	99.110	74.215	2.172	2.090	0.376	0.502
0.0755	75.757	98.953	74.098	2.195	2.105	0.383	0.511
0.1006	77.073	98.721	73.882	2.200	2.108	0.390	0.522
0.1257	76.440	98.790	73.930	2.205	2.105	0.387	0.517
0.1508	75.982	98.790	73.930	2.205	2.105	0.385	0.514
0.1759	73.824	98.612	73.794	2.200	2.110	0.374	0.500
0.2010	77.091	98.403	73.534	2.205	2.110	0.392	0.524
0.2261	76.459	98.497	73.611	2.205	2.110	0.388	0.519
0.2512	76.090	98.460	73.620	2.205	2.110	0.386	0.517
0.2763	77.710	98.402	73.600	2.210	2.110	0.395	0.528
0.3014	76.771	98.308	73.451	2.210	2.110	0.390	0.523
0.3265	76.515	98.367	73.595	2.210	2.110	0.389	0.520
0.3516	76.568	98.380	73.585	2.210	2.110	0.389	0.520
0.3767	76.620	98.243	73.433	2.210	2.110	0.390	0.522
0.4018	76.003	98.250	73.467	2.210	2.110	0.387	0.517
0.4269	76.220	98.218	73.440	2.210	2.110	0.388	0.519
0.4520	76.140	98.200	73.417	2.210	2.110	0.388	0.519
0.4771	76.024	98.300	73.579	2.210	2.110	0.387	0.517
0.5022	76.010	98.206	73.493	2.210	2.110	0.387	0.517
0.5273	75.927	98.170	73.433	2.210	2.110	0.387	0.517
0.5524	75.310	98.104	73.380	2.210	2.110	0.384	0.513
0.5775	75.430	98.095	73.385	2.210	2.110	0.384	0.514
0.6026	75.250	98.070	73.379	2.210	2.110	0.384	0.513
0.6277	75.010	98.240	73.541	2.210	2.110	0.382	0.510
0.6528	78.110	98.051	73.391	2.215	2.110	0.398	0.532
0.6779	78.170	97.970	73.301	2.215	2.110	0.399	0.533
0.7030	78.292	97.957	73.247	2.215	2.110	0.400	0.534
0.7281	77.930	97.855	73.145	2.215	2.110	0.398	0.533
0.7532	77.777	97.883	73.177	2.215	2.110	0.397	0.531
0.7783	77.708	97.752	73.074	2.215	2.110	0.397	0.532
0.8034	77.535	97.770	73.095	2.215	2.110	0.397	0.530
0.8285	77.849	97.741	73.054	2.215	2.110	0.398	0.533
0.8536	77.749	97.617	72.941	2.215	2.110	0.398	0.533
0.8787	77.840	97.531	72.786	2.215	2.110	0.399	0.535
0.9038	77.660	97.580	72.870	2.215	2.110	0.398	0.533
0.9289	77.650	97.590	72.900	2.215	2.110	0.398	0.533
0.9540	78.070	97.487	72.822	2.215	2.110	0.400	0.536
0.9791	78.002	97.508	72.738	2.215	2.110	0.400	0.536
1.0042	78.262	97.468	72.690	2.215	2.110	0.401	0.538

Çizelge D.9 : Uzun süreli deney no 9

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	77.596	99.926	99.503	0.050	0.040	0.388	0.390
0.0253	77.505	97.110	96.060	0.179	0.100	0.399	0.403
0.0504	74.471	94.802	95.365	0.823	0.125	0.393	0.390
0.0755	75.757	82.297	94.987	1.857	0.176	0.460	0.399
0.1006	77.073	81.374	94.297	1.910	0.225	0.474	0.409
0.1257	76.440	81.500	94.380	1.920	0.262	0.469	0.405
0.1508	75.982	81.500	94.380	1.925	0.300	0.466	0.403
0.1759	73.824	80.828	93.786	1.930	0.325	0.457	0.394
0.2010	77.091	80.359	93.551	1.933	0.384	0.480	0.412
0.2261	76.459	80.398	93.661	1.935	0.436	0.476	0.408
0.2512	76.090	80.320	93.730	1.945	0.548	0.474	0.406
0.2763	77.710	80.120	93.780	1.950	0.822	0.485	0.414
0.3014	76.771	79.797	90.100	1.952	1.157	0.481	0.426
0.3265	76.515	79.847	89.615	1.960	1.181	0.479	0.427
0.3516	76.568	79.839	89.405	1.960	1.187	0.480	0.428
0.3767	76.620	79.526	89.037	1.960	1.190	0.482	0.430
0.4018	76.003	79.617	88.997	1.962	1.192	0.477	0.427
0.4269	76.220	79.546	88.880	1.967	1.197	0.479	0.429
0.4520	76.140	79.475	88.791	1.970	1.200	0.479	0.429
0.4771	76.024	79.579	88.919	1.970	1.200	0.478	0.427
0.5022	76.010	79.480	88.819	1.970	1.200	0.478	0.428
0.5273	75.927	79.395	88.770	1.970	1.200	0.478	0.428
0.5524	75.310	79.258	88.632	1.975	1.200	0.475	0.425
0.5775	75.430	79.269	88.652	1.980	1.200	0.476	0.425
0.6026	75.250	79.222	88.569	1.980	1.204	0.475	0.425
0.6277	75.010	79.483	88.772	1.980	1.208	0.472	0.422
0.6528	78.110	79.300	88.542	1.981	1.210	0.492	0.441
0.6779	78.170	79.144	88.401	1.985	1.212	0.494	0.442
0.7030	78.292	79.040	88.360	1.988	1.213	0.495	0.443
0.7281	77.930	78.865	88.215	1.991	1.214	0.494	0.442
0.7532	77.777	78.924	88.276	1.993	1.214	0.493	0.441
0.7783	77.708	78.784	88.154	1.995	1.215	0.493	0.441
0.8034	77.535	78.866	88.220	1.996	1.215	0.492	0.439
0.8285	77.849	78.789	88.149	1.997	1.215	0.494	0.442
0.8536	77.749	78.739	87.990	1.998	1.215	0.494	0.442
0.8787	77.840	78.573	87.813	1.999	1.215	0.495	0.443
0.9038	77.660	78.570	87.850	1.999	1.215	0.494	0.442
0.9289	77.650	78.641	87.920	2.000	1.215	0.494	0.442
0.9540	78.070	78.516	87.795	2.000	1.215	0.497	0.445
0.9791	78.002	78.407	87.735	2.000	1.215	0.497	0.445
1.0042	78.262	78.335	87.670	2.000	1.215	0.500	0.446

Çizelge D.10 : Uzun süreli deney no 10

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	77.596	99.770	100.353	0.040	0.040	0.389	0.387
0.0253	77.505	96.513	97.550	0.070	0.110	0.402	0.397
0.0504	74.471	95.841	96.986	0.075	0.132	0.389	0.384
0.0755	75.757	95.720	96.770	0.075	0.160	0.396	0.391
0.1006	77.073	95.334	96.390	0.075	0.205	0.404	0.400
0.1257	76.440	95.480	96.500	0.075	0.268	0.400	0.396
0.1508	75.982	95.480	96.500	0.075	0.530	0.398	0.394
0.1759	73.824	95.118	94.374	0.075	1.138	0.388	0.391
0.2010	77.091	94.647	91.503	0.075	1.201	0.407	0.421
0.2261	76.459	94.789	90.721	0.075	1.256	0.403	0.421
0.2512	76.090	94.890	90.230	0.080	1.386	0.401	0.422
0.2763	77.710	94.791	89.860	0.080	1.417	0.410	0.432
0.3014	76.771	94.508	89.398	0.080	1.437	0.406	0.429
0.3265	76.515	94.722	89.302	0.080	1.456	0.404	0.428
0.3516	76.568	94.830	89.226	0.080	1.467	0.404	0.429
0.3767	76.620	94.531	88.934	0.080	1.475	0.405	0.431
0.4018	76.003	94.610	88.870	0.080	1.482	0.402	0.428
0.4269	76.220	94.504	88.744	0.080	1.487	0.403	0.429
0.4520	76.140	94.469	88.660	0.080	1.491	0.403	0.429
0.4771	76.024	94.650	88.711	0.080	1.494	0.402	0.428
0.5022	76.010	94.646	88.670	0.080	1.497	0.402	0.429
0.5273	75.927	94.583	88.587	0.080	1.500	0.401	0.429
0.5524	75.310	94.446	88.484	0.080	1.505	0.399	0.426
0.5775	75.430	94.420	88.497	0.080	1.510	0.399	0.426
0.6026	75.250	94.429	88.461	0.082	1.510	0.398	0.425
0.6277	75.010	94.722	88.712	0.084	1.510	0.396	0.423
0.6528	78.110	94.551	88.572	0.085	1.511	0.413	0.441
0.6779	78.170	94.459	88.451	0.087	1.515	0.414	0.442
0.7030	78.292	94.378	88.442	0.088	1.518	0.415	0.443
0.7281	77.930	94.190	88.288	0.089	1.521	0.414	0.441
0.7532	77.777	94.359	88.346	0.089	1.523	0.412	0.440
0.7783	77.708	94.248	88.283	0.090	1.525	0.412	0.440
0.8034	77.535	94.355	88.370	0.090	1.525	0.411	0.439
0.8285	77.849	94.350	88.389	0.090	1.525	0.413	0.440
0.8536	77.749	94.064	88.229	0.090	1.525	0.413	0.441
0.8787	77.840	93.862	88.054	0.090	1.525	0.415	0.442
0.9038	77.660	93.940	88.081	0.090	1.525	0.413	0.441
0.9289	77.650	94.012	88.160	0.090	1.525	0.413	0.440
0.9540	78.070	93.891	88.074	0.090	1.525	0.416	0.443
0.9791	78.002	93.732	87.990	0.090	1.525	0.416	0.443
1.0042	78.262	93.660	87.915	0.090	1.525	0.418	0.445

Çizelge D.11 : Uzun süreli deney no 11

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	60.107	100.159	99.194	0.030	0.030	0.300	0.303
0.0253	60.010	96.695	95.699	0.055	0.060	0.310	0.314
0.0504	59.181	95.673	94.840	0.060	0.060	0.309	0.312
0.0755	59.160	95.392	94.556	0.060	0.060	0.310	0.313
0.1006	58.859	94.950	94.130	0.060	0.060	0.310	0.313
0.1257	58.510	94.640	93.851	0.060	0.060	0.309	0.312
0.1508	58.650	94.623	93.785	0.060	0.060	0.310	0.313
0.1759	58.220	94.509	93.655	0.060	0.060	0.308	0.311
0.2010	57.408	93.890	93.240	0.060	0.060	0.306	0.308
0.2261	56.290	94.077	93.268	0.060	0.060	0.299	0.302
0.2512	59.410	94.027	93.203	0.060	0.065	0.316	0.319
0.2763	58.830	93.962	93.100	0.060	0.065	0.313	0.316
0.3014	59.000	93.569	92.837	0.060	0.065	0.315	0.318
0.3265	58.705	93.965	93.115	0.060	0.065	0.312	0.315
0.3516	58.666	93.922	93.017	0.060	0.065	0.312	0.315
0.3767	58.610	93.445	92.669	0.060	0.065	0.314	0.316
0.4018	57.910	93.509	92.686	0.060	0.066	0.310	0.312
0.4269	57.703	93.385	92.597	0.060	0.069	0.309	0.312
0.4520	59.212	93.465	92.614	0.060	0.070	0.317	0.320
0.4771	58.319	93.705	92.777	0.060	0.070	0.311	0.314
0.5022	58.150	93.340	92.529	0.060	0.070	0.311	0.314
0.5273	58.041	93.171	92.341	0.060	0.070	0.311	0.314
0.5524	57.541	92.963	92.193	0.063	0.070	0.309	0.312
0.5775	57.602	92.904	92.224	0.065	0.070	0.310	0.312
0.6026	57.420	92.900	92.185	0.065	0.070	0.309	0.311
0.6277	57.240	93.184	92.394	0.065	0.070	0.307	0.310
0.6528	60.018	92.990	92.272	0.066	0.071	0.323	0.325
0.6779	59.950	92.643	92.063	0.068	0.073	0.324	0.326
0.7030	60.010	92.565	92.020	0.070	0.075	0.324	0.326
0.7281	59.620	92.276	91.780	0.072	0.077	0.323	0.325
0.7532	59.448	92.533	92.008	0.074	0.079	0.321	0.323
0.7783	59.333	92.227	91.762	0.075	0.080	0.322	0.323
0.8034	59.130	92.290	91.802	0.075	0.080	0.320	0.322
0.8285	59.223	92.150	91.671	0.075	0.080	0.321	0.323
0.8536	59.110	91.816	91.402	0.075	0.080	0.322	0.323
0.8787	59.130	91.540	91.207	0.075	0.080	0.323	0.324
0.9038	58.910	91.532	91.189	0.075	0.080	0.322	0.323
0.9289	58.854	91.692	91.319	0.075	0.080	0.321	0.322
0.9540	59.164	91.403	91.103	0.075	0.080	0.324	0.325
0.9791	59.045	91.185	90.945	0.075	0.080	0.324	0.325
1.0042	59.210	91.031	90.847	0.075	0.080	0.325	0.326

Çizelge D.12 : Uzun süreli deney no 12

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	60.107	100.556	99.217	0.040	0.040	0.299	0.303
0.0253	60.010	97.309	95.135	0.060	0.075	0.308	0.315
0.0504	59.181	96.481	94.133	0.060	0.080	0.307	0.314
0.0755	59.160	96.158	93.770	0.065	0.085	0.308	0.315
0.1006	58.859	95.780	93.320	0.065	0.090	0.307	0.315
0.1257	58.510	95.550	93.041	0.065	0.090	0.306	0.314
0.1508	58.650	95.511	93.002	0.065	0.095	0.307	0.315
0.1759	58.220	95.388	92.865	0.065	0.095	0.305	0.313
0.2010	57.408	94.922	92.346	0.065	0.095	0.302	0.311
0.2261	56.290	95.020	92.480	0.065	0.095	0.296	0.304
0.2512	59.410	94.907	92.373	0.065	0.101	0.313	0.322
0.2763	58.830	94.846	92.235	0.065	0.105	0.310	0.319
0.3014	59.000	94.560	91.942	0.065	0.105	0.312	0.321
0.3265	58.705	94.840	92.255	0.065	0.105	0.309	0.318
0.3516	58.666	94.768	92.164	0.065	0.105	0.310	0.318
0.3767	58.610	94.426	91.758	0.065	0.105	0.310	0.319
0.4018	57.910	94.450	91.806	0.065	0.106	0.307	0.315
0.4269	57.703	94.372	91.692	0.065	0.109	0.306	0.315
0.4520	59.212	94.326	91.656	0.065	0.111	0.314	0.323
0.4771	58.319	94.546	91.856	0.065	0.114	0.308	0.317
0.5022	58.150	94.309	91.560	0.065	0.117	0.308	0.318
0.5273	58.041	94.148	91.403	0.065	0.120	0.308	0.317
0.5524	57.541	94.000	91.266	0.068	0.120	0.306	0.315
0.5775	57.602	94.012	91.228	0.070	0.120	0.306	0.316
0.6026	57.420	93.963	91.190	0.072	0.122	0.306	0.315
0.6277	57.240	94.173	91.394	0.074	0.124	0.304	0.313
0.6528	60.018	94.030	91.281	0.075	0.128	0.319	0.329
0.6779	59.950	93.797	90.957	0.075	0.134	0.320	0.330
0.7030	60.010	93.710	90.810	0.075	0.140	0.320	0.330
0.7281	59.620	93.494	90.554	0.075	0.146	0.319	0.329
0.7532	59.448	93.705	90.733	0.075	0.152	0.317	0.328
0.7783	59.333	93.412	90.410	0.075	0.162	0.318	0.328
0.8034	59.130	93.454	90.392	0.075	0.178	0.316	0.327
0.8285	59.223	93.311	90.011	0.075	0.193	0.317	0.329
0.8536	59.110	93.064	89.776	0.075	0.208	0.318	0.329
0.8787	59.130	92.842	89.548	0.075	0.222	0.318	0.330
0.9038	58.910	92.810	89.483	0.075	0.236	0.317	0.329
0.9289	58.854	92.900	89.655	0.075	0.251	0.317	0.328
0.9540	59.164	92.688	89.334	0.075	0.269	0.319	0.331
0.9791	59.045	92.495	89.090	0.075	0.287	0.319	0.331
1.0042	59.210	92.368	88.964	0.075	0.304	0.321	0.333

Çizelge D.13 : Uzun süreli deney no 13

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	60.107	99.393	98.806	0.040	0.040	0.302	0.304
0.0253	60.010	96.015	94.445	0.085	0.085	0.313	0.318
0.0504	59.181	95.327	93.528	0.105	0.095	0.310	0.316
0.0755	59.160	95.071	93.068	0.126	0.105	0.311	0.318
0.1006	58.859	94.720	92.620	0.158	0.115	0.311	0.318
0.1257	58.510	94.461	92.340	0.193	0.115	0.310	0.317
0.1508	58.650	94.296	92.152	0.259	0.125	0.311	0.318
0.1759	58.220	94.029	91.956	0.379	0.130	0.310	0.317
0.2010	57.408	93.654	91.644	0.649	0.135	0.306	0.313
0.2261	56.290	93.323	91.680	0.888	0.140	0.302	0.307
0.2512	59.410	90.287	91.460	1.065	0.161	0.329	0.325
0.2763	58.830	88.734	91.296	1.132	0.175	0.331	0.322
0.3014	59.000	87.861	91.046	1.165	0.185	0.336	0.324
0.3265	58.705	87.575	91.045	1.182	0.207	0.335	0.322
0.3516	58.666	87.268	90.813	1.200	0.229	0.336	0.323
0.3767	58.610	86.844	90.370	1.210	0.267	0.337	0.324
0.4018	57.910	86.750	90.146	1.217	0.375	0.334	0.321
0.4269	57.703	86.617	89.937	1.222	0.539	0.333	0.321
0.4520	59.212	86.462	89.852	1.227	0.761	0.342	0.329
0.4771	58.319	86.345	86.015	1.233	1.101	0.338	0.339
0.5022	58.150	86.059	85.350	1.237	1.220	0.338	0.341
0.5273	58.041	85.732	84.971	1.240	1.241	0.339	0.342
0.5524	57.541	85.520	84.806	1.245	1.251	0.336	0.339
0.5775	57.602	85.324	84.590	1.250	1.261	0.338	0.340
0.6026	57.420	85.218	84.485	1.250	1.268	0.337	0.340
0.6277	57.240	85.211	84.481	1.250	1.276	0.336	0.339
0.6528	60.018	84.860	84.200	1.257	1.285	0.354	0.356
0.6779	59.950	84.534	83.937	1.261	1.295	0.355	0.357
0.7030	60.010	84.280	83.730	1.265	1.306	0.356	0.358
0.7281	59.620	84.014	83.534	1.269	1.315	0.355	0.357
0.7532	59.448	83.911	83.466	1.273	1.325	0.354	0.356
0.7783	59.333	83.627	83.203	1.275	1.332	0.355	0.357
0.8034	59.130	83.496	83.118	1.276	1.336	0.354	0.356
0.8285	59.223	83.281	82.989	1.277	1.341	0.356	0.357
0.8536	59.110	83.156	82.890	1.278	1.345	0.355	0.357
0.8787	59.130	82.980	82.765	1.279	1.349	0.356	0.357
0.9038	58.910	82.940	82.703	1.280	1.353	0.355	0.356
0.9289	58.854	82.968	82.728	1.280	1.355	0.355	0.356
0.9540	59.164	82.808	82.600	1.280	1.355	0.357	0.358
0.9791	59.045	82.705	82.515	1.280	1.355	0.357	0.358
1.0042	59.210	82.624	82.482	1.280	1.355	0.358	0.359

Çizelge D.14 : Uzun süreli deney no 14

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	60.107	99.096	99.869	0.070	0.070	0.303	0.301
0.0253	60.010	95.730	96.832	0.210	0.195	0.313	0.310
0.0504	59.181	93.118	95.617	0.919	0.871	0.318	0.309
0.0755	59.160	91.856	94.378	1.055	1.090	0.322	0.313
0.1006	58.859	91.390	94.089	1.065	1.090	0.322	0.313
0.1257	58.510	91.190	93.911	1.065	1.090	0.321	0.312
0.1508	58.650	91.178	93.772	1.065	1.090	0.322	0.313
0.1759	58.220	91.082	93.702	1.065	1.090	0.320	0.311
0.2010	57.408	90.694	93.612	1.062	1.090	0.316	0.307
0.2261	56.290	90.795	93.557	1.060	1.090	0.310	0.301
0.2512	59.410	90.700	93.373	1.070	1.095	0.328	0.318
0.2763	58.830	90.668	93.289	1.070	1.095	0.324	0.315
0.3014	59.000	90.416	93.201	1.070	1.095	0.326	0.317
0.3265	58.705	90.620	93.190	1.070	1.095	0.324	0.315
0.3516	58.666	90.599	93.150	1.070	1.095	0.324	0.315
0.3767	58.610	90.330	93.062	1.070	1.095	0.324	0.315
0.4018	57.910	90.400	93.060	1.070	1.095	0.320	0.311
0.4269	57.703	90.333	93.020	1.070	1.095	0.319	0.310
0.4520	59.212	90.274	92.942	1.070	1.095	0.328	0.319
0.4771	58.319	90.414	92.932	1.070	1.095	0.323	0.314
0.5022	58.150	90.319	92.860	1.070	1.095	0.322	0.313
0.5273	58.041	90.239	92.792	1.070	1.095	0.322	0.313
0.5524	57.541	90.117	92.720	1.073	1.095	0.319	0.310
0.5775	57.602	90.112	92.696	1.075	1.095	0.320	0.311
0.6026	57.420	90.063	92.633	1.075	1.099	0.319	0.310
0.6277	57.240	90.262	92.644	1.075	1.103	0.317	0.309
0.6528	60.018	90.112	92.449	1.080	1.105	0.333	0.325
0.6779	59.950	89.944	92.357	1.082	1.107	0.333	0.325
0.7030	60.010	89.880	92.270	1.083	1.108	0.334	0.325
0.7281	59.620	89.703	92.181	1.084	1.109	0.332	0.323
0.7532	59.448	89.798	92.132	1.084	1.109	0.331	0.323
0.7783	59.333	89.657	91.977	1.085	1.110	0.331	0.323
0.8034	59.130	89.720	91.934	1.085	1.110	0.330	0.322
0.8285	59.223	89.614	91.813	1.085	1.110	0.330	0.323
0.8536	59.110	89.436	91.744	1.085	1.110	0.330	0.322
0.8787	59.130	89.240	91.663	1.085	1.110	0.331	0.323
0.9038	58.910	89.230	91.616	1.085	1.110	0.330	0.322
0.9289	58.854	89.309	91.622	1.085	1.110	0.329	0.321
0.9540	59.164	89.178	91.550	1.085	1.110	0.332	0.323
0.9791	59.045	89.000	91.490	1.085	1.110	0.332	0.323
1.0042	59.210	88.916	91.468	1.085	1.110	0.333	0.324

Çizelge D.15 : Uzun süreli deney no 15

Zaman [Yıl]	FR [kN]	S1 [kN]		W [mm] (ortalama)		R, sürtünme	
		üst	alt	üst	alt	üst	alt
0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.0002	60.107	99.604	99.054	0.060	0.060	0.302	0.303
0.0253	60.010	96.854	85.347	1.570	1.779	0.310	0.352
0.0504	59.181	97.227	80.673	1.728	1.912	0.304	0.367
0.0755	59.160	97.419	76.684	1.796	1.925	0.304	0.386
0.1006	58.859	97.340	75.719	1.830	1.935	0.302	0.389
0.1257	58.510	97.271	75.221	1.846	1.935	0.301	0.389
0.1508	58.650	97.261	74.970	1.855	1.935	0.302	0.391
0.1759	58.220	97.316	74.791	1.860	1.935	0.299	0.389
0.2010	57.408	97.130	74.252	1.860	1.935	0.296	0.387
0.2261	56.290	97.150	74.340	1.860	1.935	0.290	0.379
0.2512	59.410	97.054	74.257	1.890	1.950	0.306	0.400
0.2763	58.830	97.000	74.184	1.896	1.955	0.303	0.397
0.3014	59.000	96.887	73.797	1.900	1.955	0.304	0.400
0.3265	58.705	96.930	73.985	1.906	1.955	0.303	0.397
0.3516	58.666	97.002	74.043	1.910	1.955	0.302	0.396
0.3767	58.610	96.830	73.702	1.910	1.955	0.303	0.398
0.4018	57.910	96.843	73.776	1.910	1.955	0.299	0.392
0.4269	57.703	96.808	73.705	1.910	1.955	0.298	0.391
0.4520	59.212	96.800	73.560	1.915	1.955	0.306	0.402
0.4771	58.319	96.862	73.712	1.915	1.955	0.301	0.396
0.5022	58.150	96.840	73.720	1.917	1.955	0.300	0.394
0.5273	58.041	96.774	73.643	1.920	1.955	0.300	0.394
0.5524	57.541	96.726	73.435	1.920	1.955	0.297	0.392
0.5775	57.602	96.720	73.458	1.920	1.955	0.298	0.392
0.6026	57.420	96.710	73.475	1.922	1.957	0.297	0.391
0.6277	57.240	96.827	73.748	1.924	1.959	0.296	0.388
0.6528	60.018	96.750	73.622	1.926	1.961	0.310	0.408
0.6779	59.950	96.660	73.360	1.930	1.963	0.310	0.409
0.7030	60.010	96.650	73.375	1.933	1.965	0.310	0.409
0.7281	59.620	96.591	73.212	1.936	1.967	0.309	0.407
0.7532	59.448	96.618	73.391	1.938	1.969	0.308	0.405
0.7783	59.333	96.463	73.382	1.940	1.970	0.308	0.404
0.8034	59.130	96.520	73.564	1.940	1.970	0.306	0.402
0.8285	59.223	96.457	73.623	1.940	1.970	0.307	0.402
0.8536	59.110	96.414	73.422	1.940	1.970	0.307	0.403
0.8787	59.130	96.322	73.185	1.940	1.970	0.307	0.404
0.9038	58.910	96.296	73.229	1.940	1.970	0.306	0.402
0.9289	58.854	96.334	73.338	1.940	1.970	0.305	0.401
0.9540	59.164	96.271	73.273	1.940	1.970	0.307	0.404
0.9791	59.045	96.200	73.085	1.940	1.970	0.307	0.404
1.0042	59.210	96.149	72.996	1.940	1.970	0.308	0.406

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:	S. Gökhan Karaman
Doğum Yeri ve Tarihi:	Aksaray, 27 Mayıs 1972
Adres:	İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Yapı Anabilim Dalı, Ayazağa Kampüsü, 34469, Maslak-İstanbul.
Lise:	İstanbul Cağaloğlu Anadolu Lisesi (1983-1990), (6.97/10).
Lisans:	Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (1990-1994), (80.31/100).
Yüksek Lisans:	İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği (1994-1997), (3.76/4.00).