

**BAZALT SKORİASININ
TAŞIYICI YARI HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI**

Hatice GÖNÜL

**DOKTORA TEZİ
MİMARLIK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2008
ANKARA**

Hatice GÖNÜL tarafından hazırlanan BAZALT SKORİASININ TAŞIYICI YARI HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Gülser ÇELEBİ
Tez Danışmanı, Mimarlık Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Mimarlık Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Metin ARSLAN
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.
Prof. Dr. Gülser ÇELEBİ
Mimarlık Anabilim Dalı, G.Ü.
Prof. Dr. A. Samet ARSLAN
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, G.Ü.
Prof. Dr. M. Emin Tuna
Mimarlık Anabilim Dalı, G.Ü.
Doç. Dr. Soofia Tahira Elias ÖZKAN
Mimarlık Anabilim Dalı, O.D.T.Ü.

Tarih: 03 / 01 / 2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki tüm bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hatice GÖNÜL

**BAZALT SKORİASININ
TAŞIYICI YARI HAFİF BETON ÜRETİMİNDE KULLANIMI**

(Doktora Tezi)

Hatice GÖNÜL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2008**

ÖZET

Tezde skoria ve hiper akışkanlaştırıcı kullanılarak, “yüksek dayanım sınıfı”nda olan onbeş farklı taşıyıcı yarı hafif beton serisi üretilmiştir. Araştırmanın öncelikli amacı; bu betonlarda, üretim bileşenleri, betonun özellikleri ve ara yüzey bölgesinin kristal morfolojisi arasındaki sayısal ilişkilerin belirlenmesidir. Ayrıca, yapay hafif agregalar yerine doğal bir agrega olan skoria kullanılarak; ekonomik ve çevresel yarar açısından taşıyıcı yarı hafif betonların kullanımının artmasını sağlamaktır.

Bu amaçlar doğrultusunda; standart deney prosedürleri ve önceki araştırmalardan elde edilen bilgiler kullanılarak, sorgulanan betonların özellikleri sayısal olarak belirlenmiştir.

Üretimde kullanılan agregaların ve çimentonun hacimsel oranları ilişkilendirilerek, üretim bileşenleri ile ilgili sayısal veriler elde edilmiştir.

Ara yüzey bölgelerinin kristal morfolojisi; kalsiyum hidroksit (portlandit) kristallerinin en büyük boyutu ile sorgulanmıştır. Bu sorgulamalar için; on bin kez büyütülen taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden yararlanılmıştır.

Bu görüntülerden, belirtilen sorgulama için; “parçacık sınırlarını belirleme” yöntemi ile kristal sınırları belirlenerek sayısal veri elde edilmiştir.

Tüm sayısal veriler; betonların özelliklerini temsilen seçilen, iki önemli özellik olan; “etüv kurusu yoğunluk” ve “basınç dayanım değeri” aracılığıyla ilişkilendirilmiştir. Tezde bu özellikler, röper noktası olarak kullanılmış, üretim bileşenlerine göre farklılaşan grafiksel sına serilerinde, ikili regresyonlar aracılığıyla sayısal olarak ilişkilendirilmiştir.

Elde edilen sayısal verilerin çoğu, yüksek korelasyonda sayısal olarak ilişkilendirilmiş, skorla kullanılarak; yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonların üretilebileceği ve güvenle kullanılabilceği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 804.1.143
Anahtar Kelimeler : Skoria, taşıyıcı yarı hafif beton, ara yüzey bölgesi, CH (kalsiyum hidroksit), TEM.
Sayfa Adedi : 212
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Gülser ÇELEBİ

**USE OF BAZALTIC SCORIA
FOR PRODUCE OF SEMI LIGHTWEIGHT CONCRETE
(Ph. D. Thesis)**

Hatice GÖNÜL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
January 2008**

ABSTRACT

In thesis, fifteen different structural semi lightweight concrete series that are classified as “high strength class” were produced by using scoria and high-range-water-reducing admixture. The first aim of the research is to determine the numerical relation between production components, properties of concrete and crystal morphology of interfacial transition zone for these concretes. It is also aimed to supply the increasing usage of structural semi lightweight concretes for which scoria that is a natural aggregate is used instead of artificial lightweight aggregates for the economical and environmental benefit.

In the direction of these aims; the properties of querying concretes were determined numerically by using standard experiment procedures and knowledge gained from previous researches.

The numerical data about the production components were obtained by relating the volumetric ratios of aggregates and cement that were used in production.

The crystal morphology of interfacial transition zones were queried by the biggest size of calcium hydroxide (portlandite) crystals, Scanning electron microscope images which were magnified ten thousand times were referred for these queries.

The numerical data were obtained by determining the borders of crystals in these images using “grain boundary determination” method for the specified queries.

All numerical data were related by oven-dry density and compressive strength value which are two significant properties that were chosen as representative of the properties of concretes. In thesis, these properties used as benchmark and were related numerically by dual regressions at graphical trial series that were differentiating according to production components.

The most of the numerical data obtained were related numerically at high correlation and it was concluded that high strength structural semi lightweight concretes can be produced by using scoria and can be used confidentially.

Science Code : 804.1.143

Key Words : Scoria, structural semi lightweight concrete, interfacial transition zone, CH (calcium hydroxide), SEM.

Page Number: 212

Adviser : Prof. Dr. Gülser ÇELEBİ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli Hocam Prof. Dr. Gülser ÇELEBİ'ye, kıymetli tecrübelerinden yararlandığım Hocalarım; Prof. Dr. A.Samet ARSLAN ve Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA'ya, Dicle Üniversitesi'nde, Fırat Üniversitesi'nde, Erciyes Üniversitesi'nde, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nda, MTA'da görev yapan, bu doktora tezinde, tecrübelerinden yararlandığım, fiili ve manevi desteklerini gördüğüm ve adını sayamadığım tüm değerli hocalarıma ve teknik personele, beton üretimi için, malzeme temininde yardım eden "YKS Sanayi A.Ş"ne, "Mardin Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş"ne, ve bana yardım eden değerli görevlilerine, Enstitü ile ilgili tüm resmi işlemlerde yardımını esirgemeyen başta Emine TÜTÜNCÜ olmak üzere tüm değerli Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanlarına, ayrıca; manevi desteklerinin benden esirgemeyen, annem; Zehra ÇİÇEK'e, eşim; İsmail Ağa GÖNÜL'e, kızlarım; Şebnem GÖNÜL ve Şevval GÖNÜL'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xv
RESİMLERİN LİSTESİ	xxi
HARİTALARIN LİSTESİ	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	11
2.1. Literatür Özeti Bölüm Girişi	11
2.2. Skoria ile Üretilen Betonlar	11
2.3. Taşıyıcı Yarı Hafif Betonlar	13
2.4. Beton Özellikleri ve Kavramlar	15
2.4.1. Taze beton yoğunluğu	15
2.4.2. Taze beton kıvamı	15
2.4.3. Etüv kurusu yoğunluk, su emme oranı ve porozite oranı	17
2.4.4. Isı iletkenlik değeri	18
2.4.5. Ultrases geçiş hızı	20
2.4.6. Schmidt sertlik değeri	20
2.4.7. Basınç dayanım değeri	21

Sayfa

2.4.8. Elastiklik modülü değeri	23
2.4.9. Basınç gerilimi altında boyuna birim deformasyon ve maksimum birim deformasyon	25
2.4.10. Eğilme dayanım değeri	28
2.4.11. Aderans dayanım değeri	30
2.4.12. Donatıda Maksimum birim deformasyon değeri	32
2.5. Ara Yüzey Bölgesinde Kristal Morfolojisi ve Kavramlar	33
2.5.1. Genel olarak TEM analizleri, ara yüzey bölgesi ve bu bölgedeki kristal morfolojisi ile ilgili kavramlar	33
2.5.2. CH boyutu	37
3. MALZEME VE YÖNTEM	38
3.1. Malzeme	38
3.1.1. Çimento bileşeni	38
3.1.2. Agrega bileşeni	38
3.1.3. Katkı bileşeni	41
3.1.4. Karışım suyu bileşeni	41
3.2. Yöntem ve Yöntemin Tezin İçeriğine Yansıması	42
3.2.1. Yöntem özeti	42
3.2.2. Karışım oranlarının belirlenmesine ilişkin detaylar	44
3.2.3. Deneysel yönteme (beton özelliklerinin belirlenmesine) ilişkin detaylar	47
3.2.4. Analiz yöntemine (CH boyutunun belirlenmesine) ilişkin detaylar ..	56
3.2.5. Sayısal ilişkilerin ve bu ilişkileri içeren grafiksel sınama serilerinin organizasyonuna ilişkin detaylar	57

Sayfa

4. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
4.1. Beton Özelliklerine İlişkin Bulgular ve Tartışma	61
4.1.1. Taze beton yoğunluğu	61
4.1.2. Taze beton kıvamı	61
4.1.3. Etüv kurusu yoğunluk, su emme oranı ve porozite oranı	65
4.1.4. Isı iletkenlik değeri.....	69
4.1.5. Ultrases geçiş hızı	74
4.1.6. Schmidt sertlik değeri	76
4.1.7. Basınç dayanım değerleri	78
4.1.8. Elastiklik modülü değeri	82
4.1.9. Basınç gerilimi altında boyuna birim deformasyon ve maksimum birim deformasyon	84
4.1.10. Eğilme dayanım değeri	90
4.1.11. Aderans dayanım değeri	93
4.1.12. Donatıda maksimum birim deformasyon değeri	96
4.2. CH boyutu ile İlgili Bulgular ve Tartışma	98
4.2.1. CH görüntüleri	98
4.2.2. CH boyutu	102
4.3. Beton Özelliklerinin Etüv Kuru Yoğunluk ile İlişkisi ve Tartışma	105
4.3.1. Taze beton yoğunluğu – etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	105
4.3.2. Taze beton kıvamı - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	107
4.3.3. Su emme oranı - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	109
4.3.4. Porozite oranı - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	111

Sayfa

4.3.5. Isı iletkenlik değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	111
4.3.6. Ultrases geçiş hızı - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	116
4.3.7. Schmidt sertlik değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	118
4.3.8. Elastiklik modülü değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	118
4.3.9. Basınç gerilimi altında maksimum birim deformasyon - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	120
4.3.10. Eğilme dayanım değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	122
4.3.11. Aderans dayanım değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	125
4.3.12. Donatıda maksimum birim deformasyon değeri – etüv kurusu yoğunluk ilişkisi	129
4.4. Beton Özelliklerinin Basınç Dayanım Değeri ile İlişkisi ve Tartışma	129
4.4.1. Taze beton yoğunluğu - basınç dayanım değeri ilişkisi	129
4.4.2. Taze beton kıvamı - basınç dayanım değeri ilişkisi	131
4.4.3. Etüv kurusu yoğunluk - basınç dayanım değeri ilişkisi	135
4.4.4. Su emme oranı - basınç dayanım değeri ilişkisi	136
4.4.5. Porozite oranı - basınç dayanım değeri ilişkisi	140
4.4.6. Isı iletkenlik değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi	141
4.4.7. Ultrases geçiş hızı - basınç dayanım değeri ilişkisi	143
4.4.8. Schmidt sertlik değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi	147
4.4.9. Elastiklik modülü değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi	148
4.4.10. Basınç gerilimi altında maksimum birim deformasyon – basınç dayanım değeri ilişkisi	152
4.4.11. Eğilme dayanım değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi	155
4.4.12. Aderans dayanım değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi	158

Sayfa

4.4.13. Donatıda maksimum birim deformasyon değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi	160
4.5. Ara Yüzey Bölgesinde CH boyutu - Etüv Kuru Yoğunluk ile İlişkisi ve Tartışma	162
4.6. Ara Yüzey Bölgesinde CH boyutu - Basınç Dayanım Değeri ile İlişkisi ve Tartışma	164
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	166
KAYNAKLAR	170
EKLER	184
EK-1. Agrega deneylerine ait ayrıntılı bulgular	185
EK-2. Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular	188
EK-3. TEM analizlerine ait ayrıntılı bulgular ve görüntüler	199
EK-4. Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler	200
ÖZGEÇMİŞ	211

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Skoria (bazik ponza) ve ponza (asidik ponza) arasındaki farklar	3
Çizelge 2.1. Skoria kullanılarak üretilen taşıyıcı hafif betonlara bir örnek	12
Çizelge 2.2. Moufti ve ark. tarafından skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar ...	12
Çizelge 2.3. Kılıç ve ark. tarafından skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar	12
Çizelge 2.4. Yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlara literatürden bir örnek	14
Çizelge 2.5. Nolan ve ark.'nın yapay hafif agregalar ile ürettikleri yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlara ait sayısal veriler	14
Çizelge 2.6. Yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlara ait bir örnek	15
Çizelge 2.7. “TS EN 206-1”e göre, “kıvam sınıfları” ve literatürde geliştirilen “kıvam tanımlamaları”	16
Çizelge 2.8. Hafif agregalı betonların fonksiyonel sınıflandırılması	18
Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun üretici firmadan elde edilen teknik özellikleri	38
Çizelge 3.2. Kullanılan skorinin üretici firmadan elde edilen kimyasal özellikleri	38
Çizelge 3.3. Agregâ özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneysel yöntemin detayları, kullanılan standartlar ve verilerin ayrıntılı olarak sunulduğu tez bölümleri	39
Çizelge 3.4. Tezde kullanılan agregaların özelliklerini belirlemek için yapılan agregâ deneyleri ve elde edilen deney sonuçları	39
Çizelge 3.5. Üretilen beton serileri, karışım oranları ve bileşen miktarları	45
Çizelge 3.6. Beton özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneysel yöntemin detayları, kullanılan standartlar ve verilerin ayrıntılı olarak sunulduğu tez bölümleri	48
Çizelge 3.7. Tezde, beton özelliklerini belirlemek için kullanılan numune tipleri, üretilen numune sayıları, yapılan deney, ölçüm ve hesaplamalar	49
Çizelge 5.1. Tezde elde edilen deney, analiz sonuçları ve kontrol betonlarına göre belirlenen oransal farklar	168

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1	Çökme biçimi – kararlılık arasındaki ilişki 16
Şekil 2.2.	Betonda boşluk – su emme ilişkisi 17
Şekil 2.3	Agregalarda bağlantılı ve bağlantısız boşlukların sembolik gösterimi, porozite ve geçirgenlik arasındaki ilişki 17
Şekil 2.4.	Hafif agregalı betonun etüv kurusu yoğunluğu ve basınç arasındaki ilişki 22
Şekil 2.5	Hafif ve normal agrega ile üretilen betonların elastiklik modülü ve diğer özellikleri arasındaki ilişkilere örnekler 24
Şekil 2.6.	Normal agregalı betonlarda basınç gerilimi altında çatlak gelişimi, kırılma mekanizması ve gerilim – birim deformasyon ilişkisi 26
Şekil 2.7	Betonun basınç dayanımı ve deformasyon davranışı arasındaki ilişkiye literatürden örnekler 26
Şekil 2.8.	Hafif agregalı betonlarda gerilim - birim deformasyon arasındaki ilişki 27
Şekil 2.9	Basınç dayanım değeri ve maksimum birim deformasyon arasındaki ilişkiye literatürden örnekler 27
Şekil 2.10.	“TS EN 12390-3”e göre, silindir numunelerin, tatmin edici kırılma şekilleri 28
Şekil 2.11	Aderans dayanımının belirlenmesinde gerilim dağılımı ve hasar mekanizmasına ilişkin literatürden örnekler 31
Şekil 2.12.	Betona gömülü olan donatının akması sonucunda oluşan donatı deformasyonu 32
Şekil 2.13.	Tem cihazının çalışma prensibine ilişkin görüntüler 33
Şekil 2.14.	Betonun mikrostrüktürel yapısının şematik gösterimi 34
Şekil 2.15.	“Kohesif” kuvvetlerin şematik gösterimi 34
Şekil 3.1.	Taşıyıcı hafif betonlar için önerilen ideal agrega tane boyu dağılımı eğrisi ve tezde kullanılan agregaların dağılım eğrilerinin karşılaştırılması 40

Şekil		Sayfa
Şekil 3.2.	Süper ve hiper akışkanlaştırıcıların etki mekanizması	41
Şekil 3.3.	Tezde kullanılan yöntem özeti	43
Şekil 3.4.	Tezin yöntemi kapsamında sayısal ilişkilerin kurulması	43
Şekil 3.5.	Ultrases geçiş hızlarının belirlenebilmesi için silindir numunelerde işaretlenerek, ölçüm alınan yerler	50
Şekil 3.6.	“TS EN 12390–5” standardına göre oluşturulan ve üretilen numunelerin eğilme dayanım değerlerinin belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği	52
Şekil 3.7.	Tezde, aderans dayanımını çekme kuvveti ile belirleme deney düzeneği ve numune üretiminde kullanılan kalıp tasarımı	52
Şekil 3.8.	Tezde, aderans değerlerinin belirlenmesi için, literatürden yol gösterici olarak kullanılan deney tasarımları	54
Şekil 3.8.	(Devam) Tezde, aderans değerlerinin belirlenmesi için, literatürden yol gösterici olarak kullanılan deney tasarımları	55
Şekil 3.9.	Tem analizi numunelerinin, giriş numunelerden alındıkları yerler ...	56
Şekil 3.10.	Tezde kullanılan çoklu grafiklerde “ana” grafik ve grafiksel sınama serilerinin konumları	59
Şekil 4.1.	Taze beton yoğunluğu ve A/Ç arasındaki ilişki	62
Şekil 4.2.	Taze beton kıvamı ve A/Ç arasındaki ilişki	63
Şekil 4.3.	Etüv kurusu yoğunluk ve A/Ç arasındaki ilişki	66
Şekil 4.4.	Su emme oranı ve A/Ç arasındaki ilişki	68
Şekil 4.5.	Porozite oranı ve A/Ç arasındaki ilişki	70
Şekil 4.6.	Isı iletkenlik değeri ve A/Ç arasındaki ilişki	71
Şekil 4.7.	Ultrases geçiş hızı ve A/Ç arasındaki ilişki	75
Şekil 4.8.	Schmidt sertlik değeri ve A/Ç arasındaki ilişki	77
Şekil 4.9.	Agrega tipi – agrega hacimsel oranı – basınç dayanım değeri ilişkisi	79

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Normal agrega, skoria oranı – katkı oranı – basınç dayanım değeri ilişkisi	79
Şekil 4.11. Basınç dayanım değeri ve A/Ç arasındaki ilişki	80
Şekil 4.12. Elastiklik modülü değeri ve A/Ç arasındaki ilişki	83
Şekil 4.13. Tezde, üretilen beton serilerinde basınç gerilimi – birim deformasyon ilişkisi	86
Şekil 4.13. (Devam) Tezde üretilen beton serilerinde basınç gerilimi – birim deformasyon ilişkisi	87
Şekil 4.14. Maksimum birim deformasyon ve A/Ç arasındaki ilişki	89
Şekil 4.15. Eğilme dayanım değeri ve A/Ç arasındaki ilişki	91
Şekil 4.16. Aderans dayanım değeri ve A/Ç arasındaki ilişki	95
Şekil 4.17. Donatıda maksimum birim deformasyon ve A/Ç arasındaki ilişki ...	97
Şekil 4.18. CH boyutu ve A/Ç arasındaki ilişki	104
Şekil 4.19. Taze beton yoğunluğu ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	106
Şekil 4.20. Taze beton yoğunluğu ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	107
Şekil 4.21. Taze beton kıvamı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	108
Şekil 4.22. Taze beton kıvamı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	109
Şekil 4.23. Su emme oranı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	110
Şekil 4.24. Su emme oranı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	111
Şekil 4.25. Porozite oranı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	112
Şekil 4.26. Isı iletkenlik değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	113
Şekil 4.27. Isı iletkenlik değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	114

Şekil	Sayfa
Şekil 4.28. Ultrases geçiş hızı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	115
Şekil 4.29. Ultrases geçiş hızı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	116
Şekil 4.30. Schmidt sertlik değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	117
Şekil 4.31. Elastiklik modülü değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki .	119
Şekil 4.32. Elastiklik modülü değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	120
Şekil 4.33. Maksimum birim deformasyon ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	121
Şekil 4.34. Eğilme dayanım değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki ...	123
Şekil 4.35. Eğilme dayanım değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	124
Şekil 4.36. Aderans dayanım değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki ..	126
Şekil 4.37. Aderans dayanım değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	127
Şekil 4.38. Donatıda maksimum birim deformasyon ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	128
Şekil 4.39. Taze beton yoğunluğu ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki ...	130
Şekil 4.40. Taze beton yoğunluğu ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	131
Şekil 4.41. Taze beton kıvamı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	132
Şekil 4.42. Taze beton kıvamı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	133
Şekil 4.43. Etüv kurusu yoğunluk ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki ...	134
Şekil 4.44. Etüv kurusu yoğunluk ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	136
Şekil 4.45. Su emme oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	137

Şekil	Sayfa
Şekil 4.46. Su emme oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	138
Şekil 4.47. Porozite oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	139
Şekil 4.48. Porozite oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	140
Şekil 4.49. Isı iletkenlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	142
Şekil 4.50. Isı iletkenlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	143
Şekil 4.51. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	144
Şekil 4.52. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	145
Şekil 4.53. Schmidt sertlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki ...	146
Şekil 4.54. Schmidt sertlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	147
Şekil 4.55. Elastiklik modülü değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	149
Şekil 4.56. Elastiklik modülü değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	150
Şekil 4.57. Maksimum birim deformasyon ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	153
Şekil 4.58. Maksimum birim deformasyon ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	154
Şekil 4.59. Eğilme dayanım değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki ..	156
Şekil 4.60. Eğilme dayanım değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	157
Şekil 4.61. Aderans dayanım değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	159
Şekil 4.62. Aderans dayanım değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması	160

Şekil	Sayfa
Şekil 4.63. Donatıda maksimum birim deformasyon ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	161
Şekil 4.64. CH boyutu ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki	163
Şekil 4.65. CH boyutu ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki	165

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1 Bazalt skoriası	2
Resim 2.1 Yüksek dayanımlı normal ve hafif betonlarda basınç gerilimi nedeniyle betonun kırılma şekillerine literatürden örnekler	28
Resim 2.2. Hidratasyon sonucunda oluşmuş kristaller ve morfolojik yapılaşmalarına ilişkin örnekler	35
Resim 2.3. “İdeal” olarak tanımlanan ve ponza kumlu harçta oluşan ara yüzeyde oluşmuş CH kristallerinin morfolojik yapılaşmasına örnekler	35
Resim 2.4. CH kristallerinin morfolojik yapılaşmalarına ilişkin olarak literatürden elde edilmiş örnekler	36
Resim 4.1. Basınç gerilimi sonucunda numunelerde görülen hasar biçimleri	85
Resim 4.2. Deneyler esnasında tahripkâr bir biçimde patlayarak kırılan KS060- 37,5 nolu numunelere ilişkin görüntüler	94
Resim 4.3. Beton – donatı aderans bölgesine ait görüntüler	94
Resim 4.4. CH görüntüleri – 1	99
Resim 4.5. CH görüntüleri – 2	100
Resim 4.6. CH görüntüleri – 3	101
Resim 4.7. CH görüntüleri – 4	102

HARİTALARIN LİSTESİ**Harita****Sayfa**

Harita 1.1. GAB’nde bazalt lavları ile örtülü alan ve Türkiye deprem haritası 7

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
ΔT	Yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkı (K), (“ λ ” için)
A/Ç	Agrega / çimento hacimsel oranı
A_b	Numunenin üzerine basınç yük. uygulandığı en kesit alanı (mm ²)
A_i	Isıtıcı plaka alanı (m ²), (“ λ ” için)
CH	CaO-H ₂ O [Ca(OH) ₂] (kalsiyum hidrat)
CSH	CaO- SiO ₂ - H ₂ O (Kalsiyum silikat hidrat – hidrate kalsiyum silikat)
ζ_m	Çökme miktarı (cm)
d	Donatının çapı (mm) (“T _ç ” için)
d_1	Minimum gerilimdeki dikey boy değişimi (mm) (“E” için)
d_{1e} ve d_{2e}	Numunenin en kesit boyutları, (mm), (“f _e ” için)
d_2	% 40 gerilimdeki dikey boy değişimi (mm) (“E” için)
D_{eth}	Agreganın en büyük tane boyutu (mm)
d_{eth}	Agreganın en küçük tane boyutu (mm)
d_{md}	Maksimum gerilimdeki dikey boy değişimi (mm) (“ ϵ_0 ” için)
E	Elastiklik modülü (Gpa) (sekant modülü)
F_b	Basınç belirlenirken kırılma anında ulaşılan en büyük yük (N)
F_e	Eğilme belirlenirken kırılma anında ulaşılan en büyük yük (N)
f_e	Eğilme dayanım değeri (Mpa)
$f_{kb, küp}$	Karakteristik küp basınç dayanım değeri (Mpa)
$f_{kb, sil}$	Karakteristik silindir basınç dayanım değeri (Mpa)
$f_{küp}$	Küp numuneden elde edilen basınç dayanım değeri (Mpa)
f_{sil}	Referans silindir numuneden elde edilen basınç dayanım değeri (Mpa)
g	Gözeneklilik, porozite oranı (%)
Gpa	Gipapaskal (paskal x 10 ⁹)

Simgeler	Açıklama
K	Kelvin
l	Donatının betonda gömülü olduğu boy (mm) (“T _ç ” için)
L₀	İlk boy (mm) (“E” için, araştırmada elde edilen değer 225 mm’dir)
l_{çb}	Çökme yapan betonun boyu (cm), (“Ç _m ” için)
l_{çh}	Çökme hunisinin boyu (cm), (“Ç _m ” için)
l_d	Betona gömülü ve dışındaki donatının toplam boyu (mm) (“S _{max} ” için)
L_e	Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, (mm), (“f _e ” için)
l_i	Numune kalınlığı (m), (“λ” için)
L_u	Ses dalgasının aldığı yol – numune boyu- (cm) (“V _u ” için)
m_{ekk}	Numunenin etüv kurusu kütlesi (kg)
Mg	Megagram (gram x 10 ⁶ , ton)
Mpa	Megapaskal (paskal x 10 ⁶ , N/mm ²)
m_s	Suya doymuş numunenin, su içindeki görünür kütlesi (kg)
m_{sdykk}	Suya doymuş, yüzeyi kuru numunenin, havadaki kütlesi (kg)
m_{tbk}	Taze beton kütlesi (kg)
P₂₀	20 °C suyun yoğunluğu (998 kg/m ³)
p_{bha}	Birim hacim yoğunluğu (Kg/m ³)
p_{eky}	Etüv kurusu yoğunluk (Kg/m ³)
p_{gyy}	Gevşek yığın yoğunluğu (Kg/m ³)
P_{max}	Maksimum sıyrılma kuvveti (N) (“T _ç ” için)
p_{sd}	Hesaplanan suya doymuş yoğunluk değeri (kg/m ³)
p_{tby}	Taze beton yoğunluğu (Kg/m ³)
Q	Isıtıcı plakaya beslenen elektrik gücü (W), (“λ” için)
r	Schmidt sertlik değeri (vuruş sayısı veya geri tepkime sayısı)
R_e	Gerekli yükleme hızı, (N/sn) (“f _e ” için)
S	Net deformasyon değeri (mm), (“S _{max} ” için)
S₁	İlk deformasyon – başlangıç deformasyonu (mm), (“S _{max} ” için)
S₂	Son deformasyon (mm), (“S _{max} ” için)
S_e	Gerilim artış hızı, (Mpa/sn) (“f _e ” için)

Simgeler	Açıklama
SI	Agrega şekil indisi (%)
S_{max}	Donatıda maksimum birim deformasyon (%), (T_{ϕ} belirlenirken oluşan)
t	Ses dalgasının yolu kat ettiği süre (μsn) (“ V_u ” için)
T_{ϕ}	Çekme kuvveti etkisinde beton donatı aderans dayanımı (Mpa)
V_b	Boşlukların hacmi (m^3) (“g” için)
V_k	Kumpas kullanılarak, tayin edilen numune hacmi (m^3) (“ m_{bha} ” için)
$V_{\ddot{o}}$	Özel metot ile tayin edilen numune hacmi (m^3)
$V_{\ddot{o}k}$	Özel metot ile tayin edilen kap hacmi (m^3), (“ P_{tby} ” için)
V_u	Ultrases hızı (km/sn)
W/C	Su / çimento oranı
W_A	Agreganın su muhtevası (%)
$W_{A0,5}$	Agreganın 0,5 saat daldırma sonunda, su muhtevası (%)
W_{A24}	Agreganın 24 saat daldırma sonunda, su muhtevası (%)
W_{seo}	Betonun su emme oranı (%)
ϵ_0	Maksimum boyuna birim def. ($\times 10^{-3}$ mm/mm, max. gerilimde)
ϵ_1	Minimum gerilimdeki birim def.($0,05 \times 10^{-3}$ mm/mm, “E”, “ ϵ_0 ” için)
ϵ_2	% 40 gerilimdeki birim deformasyon (mm/mm) (“E” için)
ϵ_{md}	Maksimum gerilimdeki birim deformasyon ($\times 10^{-3}$ mm/mm) (“ ϵ_0 ” için)
λ	Isı iletkenlik değeri (W/mK)
σ_1	Minimum boy değimine denk gelen gerilim değeri (Mpa) (“E” için)
σ_2	Mak. gerilmesinin % 40’ına denk gelen gerilim değ.(Mpa) (“E” için)
Ψ_m	Mikrometre (metrenin milyonda biri)

Kısaltmalar Açıklama

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society of Testing and Materials
CEB	Comité Euro-international du Beton

Kısaltmalar Açıklama

CEN	Comité Européen de Normalisation
CUR	Centre for Civil Engineering Research and Codes
Eurolightcon	European Lightweight Concrete
FIB	Federation Internationale du Beton
gss	Grafiksel sınaama serisi / serileri
hab	Hafif agregalı beton (dayanım sınıfı gözetilmeden, hafif agregalı ile üretilen tüm betonlar)
IAEA	International atomic energy agency
nab	Normal agregalı beton (dayanım sınıfı gözetilmeden, normal agregalı ile üretilen tüm betonlar)
NIST	National Institute of Standards and Technology
NS	Norwegian Standard
RILEM	The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
sts	Standart sapma
TEM	Taramalı elektron mikroskobu
thb	Taşıyıcı hafif beton
tnb	Taşıyıcı normal beton
tyhb	Taşıyıcı yarı hafif beton
yd	Yüksek dayanım ($f_b \geq 40$ Mpa)
ydthb	Yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif beton
ydtb	Yüksek dayanımlı taşıyıcı normal beton
ydyhb	Yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif beton

1. GİRİŞ

Çevresel sorunların oluşmasında ve oluşan sorunların çözümünde, yapılaşmanın ve yapı malzemelerinin önemi son derece büyüktür. Çünkü yapılar; yaşam döngülerinin her aşamasında, çevre üzerinde olumlu veya olumsuz çeşitli etkilerin oluşmasına neden olurlar. Bu etkiler daha çok enerji ve doğal kaynak kullanımı ile bunların sonucunda ortama bırakılan gaz ve katı atıklar nedeniyle oluşur [1].

Bu doğrultuda, yapı malzemelerinin üretiminde, doğal ve yöresel malzeme kullanımı yaygın kabul gören bir çözümdür. Çünkü toplam enerji tüketiminin büyük bir oranını yapılaşma süreci kapsar. Yapılardaki toplam enerji tüketiminin büyük bir bölümünü ise; yapıda kullanılan malzemelerin üretimi ve nakledilmesi için gerekli olan enerji oluşturur [1]. Bu bağlamda, doğal ve yöresel malzeme kullanımı; yapı malzemesi üretimi ve nakliyesi açısından enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca bu malzemelerin kullanımı, doğaya zarar veren kimyasal içerikli atıkların oluşmaması açısından, yapay ürünlere göre “çevresel” ve “ekonomik” açıdan daha yararlıdır.

Çevresel açıdan, yapı malzemelerinin, üretim sürecinde olduğu gibi kullanım sürecinde de enerji tüketimine katkısı sorgulanmalıdır. Bunun için; malzemesinin ısı yalıtım performansı irdelenmelidir. Isı iletkenliği azaltılmış yapı elemanlarında; ısı köprülerinin oluşumu engellenir veya en aza indirilir, yapının kullanım ömrünün ve kullanıcının konforunun artması ve genişleme hasarlarının azalması sağlanır. Bu da; yine az kaynak tüketimi, insana saygı, çevresel ve ekonomik yarar demektir.

Birçok araştırmacıya göre; “doğal hafif agregalar” belirtilen hususlarda geleceğin çağdaş yapı malzemesi olarak nitelendirilebilir ve ülkemiz, bu malzemeler açısından zengin kaynaklara sahiptir [2,3]. Söz konusu olan bu malzemeler ile yalıtım özelliği iyileştirilmiş olan taşıyıcı hafif ve taşıyıcı yarı hafif betonların üretimi mümkündür.

Yapı elemanı tasarımında öncelikli amaç, optimum faydadır. Bu açıdan bakılınca, taşıyıcı yarı hafif beton (tyhb) gibi yapı malzemelerinin; normal betona göre ısı yalıtımı, enerji, ekonomi ve çevre kavramları açısından daha yararlı olduğu görülür.

Birçok araştırmacıya göre; taşıyıcı hafif betonlar; strüktürün toplam ağırlığını azaltarak, strüktürel elemanların kesitlerinin incelmelerine ve donatı gibi yapı malzemesi tasarrufuna neden olurlar. Bu durum, yüksek ve geniş açıklıklı yapıların üretilmesi, deprem yüklerinin azaltılması, açısından çok önemli ve gereklidir [4-10].

ACI 213R-87'e göre hafif beton kullanımı, malzeme tasarrufu sağlayarak maliyetin düşmesine neden olur. Prefabrik beton eleman üretiminde ise, hafiflik; taşıma, nakliye, montaj ücretlerini düşüreceği için, yapı ekonomisi açısından yararlıdır [9,10]

Doğal hafif agregası olan ponza; asidik ve bazik karakterli olmak üzere ikiye ayrılır. Asidik karakterli ponza; asidik ponza, bazik karakterdeki ponza (Resim 1.1), yerli literatürde; bazaltik veya bazik ponza, lav curufu, volkanik curuf, skoria; yabancı literatürde ise; scoria, bazaltic pumice ve volcanic slag denir [4, 11]. Asidik karakterdeki ponza, yerli ve yabancı literatürde yaygın olarak araştırılan doğal agregası çeşidi olduğu için, çoğunlukla sadece ponza denilmektedir. Bu nedenle, literatürdeki bu kabul, bu araştırmada da onay görmüştür. Ancak, bu durum, bazaltik ponzanın tanımlanması açısından kavram karmaşası yaratmaktadır. Bu nedenle, tezde; sadece bazaltik ponzayı tanımlayan bir kavram olan “skoria” kullanılmıştır.



Resim 1.1. Bazalt skoriası

Skoria, beton üretiminde kullanımının yararlı olduğu bildirilen bir agregadır [9, 10]. Skorianın tanınabilmesi ve bilimsel araştırmalara konu olabilmesi için öncelikle özelliklerinin ve ponzadan farklılaşan yönlerinin bilinmesi gerekir (Çizelge 1.1). Skoria; yoğunluğu (daha yoğun), boşluk yapısı (daha küresel, bağlantısız boşluklar) ve dayanımı (daha yüksek dayanım) ile ponzadan farklıdır [13, 14].

Çizelge 1.1. Skoria (bazik ponza) ve ponza (asidik ponza) arasındaki farklar [12]

Asidik ponza	Kimyasal Bileşim	Asidik Pomza	Bazik Pomza	Bazik ponza (Skoria)
*Asidik karakterli volkanizma ürünüdür.	SiO ₂	%60-70	%45-50	*Bazik karakterli volkanizma ürünüdür.
*Silis oranı yüksektir.	Al ₂ O ₃	%12-17	%13-15	*Asidik pomzaya göre silis oranı daha düşük, ancak demir, kalsiyum ve magnezyum oranları daha yüksektir.
*Renkleri beyaz, kirli beyaz, gri ve bejdir.	Fe ₂ O ₃	%1-3	%6-10	*Renkleri; siyah, kahve, kiremit kırmızısı ve bunların tonlarındadır.
*Birim ağırlıkları 0,5-1 Mg/n ³ arasında değişir.	CaO	%1-2	%8-10	*Birim ağırlıkları, asidik pomzadan daha yüksektir (1-2 Mg/n ³).
*Yoğunlukları; 2,2 - 2,5 Mg/n ³ tür.	MgO	%0,5-2,5	%6-7	*Asidik pomza gibi suda yüzmeleri, ayırıcı fiziksel bir özellikleridir.
	Na ₂ O+K ₂ O	%7-9	%5-6	
	Cl	Eser	-	
	SO ₃	Eser	-	
	TiO ₂	Eser	%2,5	

Ponza ve skoria gibi hafif agregalar, İsa'dan önce, özellikle Yunan ve Roma mimarisinden günümüze değin kullanılmış, doğal yapı malzemeleridir. Bazı Roma marina yapılarında (örneğin İtalya'nın batısında olan ve hala hizmet veren "Port of Cosa" gibi); ponza ve skoria kullanılarak üretilen yapılar aracılığıyla tarih; bize doğal hafif agrega kullanarak nasıl dayanıklı yapı üretilceğini göstermiştir [15, 16]. Ayrıca bu malzemelerin, dayanımı düşük malzemeler olduğu tezini de çürütmektedir.

Strüktürel amaçla kullanılan hafif agregalı betonlar; 20 yüzyılda, yapay hafif agregaların üretilmesiyle geliştirilmiştir. İlk olarak yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar; yapay hafif agregalar ile üretilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkıların gelişmesi ile birlikte, normal veya yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar, doğal hafif agregalar kullanılarak ta üretilmeye başlanmıştır.

Yapay hafif agregalar; beton üretiminde çok başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak, bu agregaların üretimi; enerji tüketimini gerektirir, yenilenemez kaynak tüketimine neden olur ve yapının maliyetini yükseltir. Bu nedenle yapay hafif agregalar; doğal hafif agregalar ile karşılaştırıldıklarında, ekonomik ve ekolojik malzemeler değildir. Bu doğrultuda, doğal hafif agregalardan, özellikle kaliteli olanlarının, kullanımına yönelik araştırmaların ve uygulamaların artması gerekir [9, 10]. Yukarı sunulan bilgilerden de anlaşılacağı gibi, skoria; taşıyıcılık, dayanım ve "dayanıklılık" açılarından ponzadan üstün, araştırılması gereken bir yapı malzemesidir.

Betonun en çok sorgulanan özelliği; basınç dayanım değerleridir. Birçok araştırmacıya göre; 40 Mpa'dan fazla basınç dayanım değerine sahip olan betonlar “yüksek dayanımlı” (yd) betonlardır [4, 9, 10, 16, 17].

Holm'a göre (20-35) Mpa basınç dayanımına sahip olan hafif beton üretimi için doğal hafif agregalar kullanılabilir. Ancak, yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonların üretilmesi için; genleşmiş kil gibi yapay hafif agregalar, uçucu kül gibi mikro incelikteki mineral katkıları ve akışkanlaştırıcı katkıların kullanılması ve yoğunluğun artırılması (yaklaşık 2,0 Mg/m³) gerekir [16]. Holm'un fikirleri yapılan bilimsel araştırmalar ve uygulamadaki genel kanıyı yansıtmaktadır. Öte yandan, yeri gelmişken belirtmek gerekirse, bu araştırmanın alt amaçlarından biri de, bu yaygın kanının aksine, doğal agregalar (skoria) kullanarak ve mineral katkı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilebileceği yönündedir.

Yüksek performanslı ve dayanımlı beton üretimi amaçlanıyorsa, W/C oranının 0,38'i geçmemesi gerekir [18]. Düşük W/C oranlarında, betonların üretilmesi; akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile mümkündür. Bunlar içerisinde, en son geliştirilmiş olanlar, “hiper” akışkanlaştırıcılardır. Bu kimyasallar henüz çok yeni olduğu için, skoria ile üretilen betonlardaki performansı net olarak bilinmemektedir.

Hafif betonların sınıflandırılması ve tanımlanması genellikle, betonun etüv kurusu yoğunluğuna (kısaca; yoğunluğuna) göre yapılır. “TS EN 206-1” [19] ve başka birçok standartta; yoğunluğu 2,0 Mg/m³'ü geçmeyen betonlar hafif beton olarak tanımlanır [15]. Normal agregalar ile üretilen betonların yoğunluğu; genellikle (2,3-2,4) Mg/m³ arasındadır. TS EN 206-1'e göre; hafif betonun yoğunluğu, aynı zamanda, hedef değerle de tarif edilebilir [19]. Sadece “NS 3473/1992” kodlu Norveç ulusal standardında, strüktürel amaçla ve hafif agregalar kullanılarak üretilen, (1,2-2,2) Mg/m³ yoğunluğa sahip olan betonlar, “hafif beton” olarak tanımlanmıştır [15, 20].

Taşıyıcı amaçla, hafif agregalar kullanılan ve hafif betonlar ile modifiye edilmiş betonlar arasında kalan, (2,0-2,2) Mg/m³ yoğunluğa sahip betonlar; taşıyıcı yarı hafif betonlar olarak tanımlanmıştır [13, 21, 22]. CSA'ya (Canadian Standard Association)

göre ise; (1,85-2,15) Mg/m^3 yoğunlukta olan betonlar; tyhb olarak sınıflandırılmıştır [23]. Tezde; normal veya hafif agregalar ile üretilen betonlar arasında sınıflandırma farkı olması gerektiği düşünülerek, CSA'nın tanımı kullanılmıştır.

Normal agregalı betonlar; yüksek dayanımlı olsalar bile, zemin, yapının ağırlığını taşıyamayacağı için; 35 kattan fazla yapı üretmek mümkün değildir. Ancak 40 Mpa dayanım değerinin üstünde olan hafif betonlar ile 30 kattan fazla olan yapılar üretilir [9]. Bu betonların en önemli sorunları; taze haldeyken ayrışma, sertleşmiş haldeyken elastiklik modüllerinin düşük olmasıdır. Bu; hafif betonların taşıyıcı beton olarak kullanılmasını zorlaştıran iki unsurdur. Birçok araştırmacının ortak görüşü; belirtilen olumsuzlukları azaltmak ve taşıyıcılıktan ödün vermeden yapıyı hafifletmek için, taşıyıcı yarı hafif betonların kullanılması gerektiği yönündedir [24].

Bazı araştırmacılara göre; sertleşmiş betonun anlaşılabilmesi için, onu kompozit malzeme kurallarına göre ve mezo düzeyde modellemenin en basit yolu malzemenin iki fazdan oluştuğunu varsaymaktır; matris fazı ve parçacık fazı. Bu ayrıma göre, sürekli faz olan matris fazı; çimento hamurudur. Agregalar ise; sürekli fazda yer alan parçacık fazını oluşturur. Bu doğrultuda; kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri bu iki faza ve bu fazlar arasındaki etkileşime bağlıdır [15].

Bazılarına göre ise; betonun anlaşılabilmesi için; mikro düzeyde incelenmesi şarttır. Beton, mikro düzeyde incelendiği zaman, sadece iki fazdan oluşmadığı, üç ana fazdan oluştuğu ve bu ana fazlarında kendi içlerinde birçok alt fazları içeren, oldukça heterojen bir malzeme olduğu anlaşılır. Mikro düzeyde belirlenen üçüncü faz; literatürde kullanılan birçok farklı başka tanım (ara yüzey geçiş bölgesi, bağ bölgesi, birleşim bölgesi, geçiş bölgesi, aderans bölgesi) dışında, en çok ; “ara yüzey bölgesi” olarak tanımlanan bölgedir [9, 15, 25-27].

Ara yüzey bölgesi; betonun özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Çünkü yaklaşık 40 μm 'lik bir ara yüzey; çimento hamurunun % (20-40)'ı kadar bir hacmi kaplar [27]. Hidratasyon sonucunda bu bölgede oluşan kristallerin morfolojisi ise; ara yüzey bölgesinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir.

Ara yüzey bölgesini, çimento hamuruna göre karakterize eden iki önemli özellik; boşluk oranının ve kristal boyutlarının daha fazla olmasıdır. Bu durumun öncelikli nedeni; taze halde olan betonda, iri agrega çevresinde, “kanama” olarak adlandırılan, su birikimi olayının gerçekleşmesidir. Kanama olayı; ara yüzey bölgesinin su / çimento (W/C) oranının yükselmesine neden olur. Yükselen W/C oranı ise; bu bölgede kristal boyutlarının artmasına yol açar. Kristal boyutları arttıkça; boşluk miktarı artar, kristallerin yüzey alanı ve çimento hamuru ile agrega arasındaki kohesif kuvvetler azalır ayrıca ara yüzeyin dayanımı düşer. Sonuçta, bu durum; betonun dayanım ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkiler [9, 10, 28-34].

“CH kristalleri” (portlandit) hidrasyon olayı sonucunda ara yüzey bölgesinde oluşan üç kristalden biridir. Bu kristaller genel olarak, morfolojik açıdan; altıgen-levha formundadır ve ara yüzey bölgesindeki en büyük boyutlu kristallerdir. Bu nedenle, betonun özellikleri açısından en önemli kristaller olduğu bildirilmiştir. CH kristallerinin morfolojisi (biçim, boyutu) ve betonun özellikleri arasında ilişki vardır. Taramalı elektron mikroskobu (TEM) aracılığıyla, ara yüzey bölgesinin görüntüsü; 10000 kez büyütülebilir. Bu durumda; CH morfolojisi detaylı olarak incelenebilir.

Güneydoğu Anadolu Projesi kalkınma planı raporuna göre [35]; maden kaynaklarının mevcut potansiyellerinin kullanılması, bölge ekonomisinin kalkınması açısından gereklidir ve bu konuda çalışmalar yapılmalıdır. Harita 1.1, a’da görüldüğü gibi; Karacadağ Platosu içerisinde yer alan çok büyük bir bölümü, bazalt lavları ve dolayısıyla skorja ile kaplıdır. Raporda da önerildiği gibi bu maden kaynağının değerlendirilmesi, bölge ve ülke ekonomisi açısından yararlı olacaktır.

Bayındırlık Bakanlığı’na göre (Harita 1.1,b); Güneydoğu Anadolu Bölgesinin çoğu; deprem kuşağındadır. Ayrıca, aktif haldeki fayların bulunması, deprem riskini daha da arttırmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi, yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonların kullanımı; deprem yüklerini azaltması açısından yararlıdır. Öte yandan gelişmekte olan bölgede, özellikle geniş açıklıklı yapı ve prefabrik yapı elemanı ihtiyacı vardır. Bu durumda; prefabrik yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonların kullanımı tasarım esnekliği, malzeme tasarrufu ve çevresel açılardan yararlı olacaktır

yüksek dozajlarda çimento (600-700 doz gibi), kilolarca uçucu kül, silika fûme, akışkanlaştırıcı katkı ve bazen çelik tel ve propilen lif gibi katkıları kullanılmıştır. Malzeme kullanımı açısından, yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar ile ilgili durum da yukarıdakine benzerdir.

Uçucu kül, silika fûme gibi mineral katkıların betonda kullanımının; dayanım, dayanıklılık ve çevresel açıdan açıdan yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Çünkü ultra incelikteki tanecikler, betonun boşluklarını doldurarak, sıkı bir yapı sergilemesine neden olur. Ancak silika fûme gibi katkıları, az miktarda bulunan, kaynağına göre beton özelliklerini farklı yönde etkileyen ve çimentodan yüksek maliyete sahip olan katkılarıdır. Ayrıca; betonda, yapay agrega ve çelik tel kullanımı da çevresel açıdan sakıncalı olduğu gibi, ekonomik olarak da maliyeti önemli miktarda yükseltirler.

Durum böyle olunca, “yüksek dayanımlı” ve “taşıyıcı” hafif beton üretiminde; yapıyı biraz daha ağırlaştırarak, sadece hiper akışkanlaştırıcı katkı ve skoria kullanarak yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif beton üretmek daha makul görünmektedir. Taşıyıcılık açısından üstün özellikler sergileyen bu betonlar ile ilgili araştırmalar, önerilerin aksine, son derecede azdır (Bkz. 2. Bölüm, s.11). Ancak; skoria ile üretilen yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonun kullanılabilmesi; doğal kaynak kullanımı, kaynak ve yapı ekonomisi, deprem, tasarım esnekliği, enerji tasarrufu, çevre gibi birçok açılardan gereklidir.

Söz konusu yapı malzemesine güvenilmesi ve uygulamada kullanımının artması;

- Bu beton tipinin; kolay ulaşılır ve ekonomik bileşenler ile üretilmesine,
- Tasarım esnekliği sağlayabilecek ve ihtiyaca cevap verebilecek düzeyde üretim alternatiflerine sahip olmasına (katkılı – katkısız, kuru - plastik gibi),
- Üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesin ve sayısal veriler ile ortaya konulmasına,
- Betonun üçüncü fazı olan ara yüzey bölgesinin ve bununla ilişkili olarak kristal morfolojisinin anlaşılması ve betonun özellikleri ile ilişkilendirilmesine bağlıdır.

Tezin hipotezine göre; yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlarda; TEM analizleri yardımıyla, kristal morfolojisi; “CH boyutu sayısallaştırılarak”, sayısal verilere dönüştürülebilir. Bu veriler ile betonun özelliklerini saptamaya yönelik olarak yapılmış olan deneylerden edinilen veriler ve üretim bileşenleri arasında sayısal ilişkiler kurulabilir (yöntemin detayları için; Bkz. Bölüm 3, s.42-60). Literatür taramasında, skoria ile üretilen yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlar ile ilişkili, bu hipotezi temel alan bir araştırmaya rastlanılmamıştır.

Böyle bir araştırmanın sonucunda olumlu ilişki kurulması ile;

- Betonun özelliklerini saptamaya yönelik olarak yapılan, tahribatlı ve tahribatsız beton deneylerinin, doğruluğunun sınanması,
- Skorianın hacimce kullanım oranına göre beton özelliklerinin tahmini,
- Beton özelliklerine göre “CH boyutu”nun ve buna bağlı olarak ara yüzey bölgesinin morfolojik yapılaşmasının tahmini veya
- TEM analizleri ile elde edilen, “CH boyutundan”; beton özelliklerinin ve üretim bileşenlerinin tahmini mümkün olacaktır.
- Özetle bu durum betonun üretim bileşenleri, buna bağlı olarak gelişen özellikleri ve “CH boyutu” aracılığıyla ara yüzey bölgesi morfolojisi arasındaki ilişkiler ağının açığa kavuşması demektir.

Bu durum araştırmanın önemi açısından;

- Skoria ile üretilen yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlara “taşıyıcılık” açısından olan güvenin artması,
- Araştırılan malzemenin anlaşılması ve geliştirilebilmesi,
- Uygulamada bu betonların daha çok kullanılması ve
- Bu bölümün başında sıralanan birçok kazancın elde edilmesi anlamına gelir.

Olumsuz ilişki kurulması ise; yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif beton tasarımında ve üretiminde; betonun özelliklerini belirlemek için kullanılan deneysel prosedürlerin ve TEM analizlerinin nasıl kullanılacağı ve yorumlanacağı konularında yol gösterici olacaktır. Bu da bilimsel açıdan bir ilerleyişin ifadesidir.

Tezde üretilen taşıyıcı yarı hafif betonlar; daha önce de belirtildiği gibi; geniş açıklık geçmek veya yüksek katlı yapı üretmek amacıyla, prefabrik eleman üretme kaygısı gösterilerek hazırlanmıştır. Bu nedenle, tezin sınırlıkları doğrultusunda; üretimde daha farklı hassasiyetleri gerektiren, “hazır beton üretimi” ve incelemeye alınan katkı dışındaki diğer tüm kakılar kapsam dışında tutulmuştur. Ayrıca; özellikle normal dayanım sınıfına ait taşıyıcı yarı hafif betonlar için de aynı ifade kullanılabilir.

Burada belirtilmek istenen diğer bir husus, tezin ana amaçlarından birinin; mimari gelişime katkıda bulunmak olduğudur. Bilindiği gibi; mimarlık tarihinin gelişimi, malzeme biliminin gelişimiyle paraleldir. Mimaride, fonksiyonel veya anlamsal kaygılar güdülürken ve bu doğrultuda mekânların tasarımında veya yapı üretme eyleminde her zaman yapı malzemesi bir araç olarak kullanılmıştır. Tarih, güçlü mimari ifadelerin ancak doğru araçlar kullanılarak elde edilebileceğini göstermiştir. Araştırmacının buradaki sorumluluğu; bu ifadelerin somutlaşmasında, günümüzde yaygın olarak kullanılan ve güçlü bir mimari araç olan “betonun” çevresel ve ekonomik yarar gözetilerek geliştirilebilmesidir.

Mimarlık ana bilim dalı, yapı kürsüsünde yapılan bu tezde; tezin sınırlılıklarından biri de bu amaç ile ilişkilidir. Belirtilen bu aracın yapı ve mekân üretme eyleminde nasıl kullanılacağı bu araştırmanın sınırlılıkları dışındadır. Birçok değişkene göre (yer, yapı tipi, yapı ihtiyaçları, iklim gibi) çok farklı kriterleri içeren ve farklı şekilde anlam bulan yapı üretme eyleminin ekonomik analiz veya tasarım ile ilgili olan hususları, kapsam dışında bırakılmıştır. Ayrıca ara yüzey bölgesinin kristal morfolojisi sayısallaştırılmaya çalışılırken, bu bölgede oluşan üç kristalden, boşluk oluşumuna neden olduğu için beton özellikleri açısından en önemli sayılabilecek olan “CH” kristali incelemeye alınmıştır.

Bilimsel bir araştırmadan edinilen bulgular, paralel doğrultularda yapılmış olan diğer araştırmalardan elde edilenler ile ilişkilendirilmesi aracılığıyla anlam bulur. Ayrıca bu; araştırmanın bilime yaptığı katkının somutlaştırılması için de gereklidir. Tezde edinilen sayısal veriler ve ilişkilere dair sorgulamalar; literatürden edinilen veriler (Bkz. EK-4) ile kıyaslanmış ve edinilen sonuçlar bu bilgilere göre tanımlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Literatür Özeti Bölüm Girişi

Tezin amaçlarından biri; Tezde üretilen yüksek dayanımlı tyhb'ların, diğer beton tiplerine göre literatürde tanımlanabilecek bir yer edinebilmesidir. Araştırmacıya göre, bunun için Tezin; tez başlığında yer alan kavramlara ilişkin araştırmalar ile ilişkilendirilmesi gerekir. Bu görüş doğrultusunda, ilgili kaynaklar, gruplandırılarak incelenmiştir. Ayrıca aynı amaç doğrultusunda; araştırma kapsamında irdelenen, beton özelliklerine, TEM analizine, ara yüzey bölgesindeki kristal morfolojisi ile CH boyutuna ilişkin kavramlar ve yapılan bilimsel araştırmalar da incelenmiştir. Literatür araştırmasından edinilen veriler; “Bulgular ve Tartışma” bölümünde, Tezden edinilen veriler ile ilişkilendirilerek belirtilen amaca ulaşılmaya çalışılmıştır.

2.2. Skoria ile Üretilen Betonlar

IBRI (Icelandic Building Research Institute) tarafından, skorianın betondaki performansını sorgulayan bir dizi araştırma yapılmıştır. Skorianın yüzey yapısı nedeniyle betonun karıştırılması zorlaştığı için, skoria, kum ile kombine edilerek kullanılmıştır. Skoriaların, gevşek yığın yoğunlukları; $(0,5-1,1) \text{ Mg/m}^3$, üretilen hafif beton yoğunlukları; $(1,1-1,8) \text{ Mg/m}^3$ arasındadır. Araştırmalarda; $(120-470)$ doz çimento kullanılmıştır. En yüksek dayanımlı betonun; 30 Mpa basınç dayanım değerine ulaşabildiği bildirilmiştir [13].

Eurolightcon'un doğal hafif agrega kullanılarak, ekonomik ve performansı yüksek hafif agregalı beton üretmek amacıyla yürüttüğü araştırma projesinde [38]; 12'sinde ponza, 4'ünde ise skoria kullanılarak 18 beton serisi üretilmiştir (Çizelge 2.1).

Moufti ve ark.'nın araştırmasında [39]; skoria kullanılarak üç farklı taşıyıcı hafif beton serisi üretilmiş ve bunların; etüv kurusu yoğunluk, basınç dayanım ve ısı iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre; skoria, hafif beton üretiminde agrega olarak, çimento üretiminde (%20'ye kadar) puzzolanik katkı

maddesi olarak, ayrıca yalıtım amaçlı yapı bloğu üretiminde kullanılabilir. Ayrıca, skorianın yalıtım ve taşıyıcı beton üretiminde kullanımının; doğal kaynakların değerlendirilmesi açısından uygun olduğu bildirilmiştir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.1. Skoria kullanılarak üretilen taşıyıcı hafif betonlara bir örnek [38]

Skorianın ile üretilen betonlarda karışım oranları							Beton özellikleri				
Kar. no	Su mik. (lt)	%7 silika ve Çim. mik. (kg)	İri ag. mik. (kg)	İnce ag. mik. (kg)	Akışkan-laştırıcı (FM-375)	Hava sür. (SS-Air)	Taze beton yoğ. (Mg/m ³)	Basınç day. (Mpa) (28 gün)	Yarmada ² Çekme day. (Mpa)	Eğilme ³ day. (Mpa)	Tanjant ⁴ elastiklik mod. (Gpa)
200	187	511	412	159	5,862	0,203	1,827	32,4	3,0	5,6	18,9
201	158	547	453	177	9,712	0,126	1,927	40,7	3,4	6,2	21,6
202	173	395	434	158	2,167	0,158	1,718	22,3	2,0	3,9	13,4
203	172	357	455	166	1,280	0,144	1,767	20,6	2,2	3,7	14,1

1,4 =Referans silindir numune (Q = 150 mm, h = 300 mm) 2 =Silindir numune (Q = 100 mm, h = 200 mm) 3 =(10x10x50) cm

Çizelge 2.2. Moufti ve ark. tarafından skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar [39]

Skorianın iri ve ince agrega olarak kullanıldığı betonlarda karışım oranları							Beton özellikleri		
Karışım no	Su mik. (lt)	Çimento mik. (kg)	İri ag. mik. (kg)	İn. ag. mik. (kg)	Silika füme (kg)	Akış. (lt)	Yoğunluk değeri (Mg/m ³)	Basınç dayanımı (Mpa)	Isı iletkenliği (W/mK)
M1	315	350	500	800	35	3,5	1,74	35,8	0,195
M2	340	400	500	750	40	4,0	1,63	37,2	0,183
M3	350	450	500	720	45	4,5	1,71	38,2	0,168

Kılıç ve ark. tarafından yapılan araştırmalarda [4, 5]; skoria, uçucu kül, silika füme ve her iki katkı birlikte kullanılarak, normal ve yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar üretilmiş ve bu betonların özellikleri incelenmiştir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Kılıç ve ark. tarafından skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar [4,5]

Skorianın ile üretilen betonlarda karışım oranları							Beton özellikleri				
Karışım no	Su mik. (lt)	PÇ 42,5 Çimento mik. (kg)	İri ag. mik. (kg)	İnce ag. mik. (kg)	Uçucu kül mik. (kg)	Silika füme mik. (kg)	Hava kur. yoğunluk (Mg/m ³)	Basınç day. (Mpa) (28 ve 90 günde)	Eğilme day. (Mpa) (28 ve 90 günde)		
M1	275	500	550	700	0	0	1,86	28,0	30,0	6,7	7,4
M2	275	400	550	700	100	0	1,85	29,2	32,4	6,8	7,1
M3	275	450	550	700	0	50	1,82	38,9	43,8	8,2	8,9
M4	275	350	550	700	100	50	1,80	36,8	40,0	8,3	8,3
KM1	275	500	715	910	-	-	2,26	27,9	29,0	7,3	7,7
KM2	275	500	715	910	-	-	2,29	35,0	37,0	7,7	8,1

2.3. Taşıyıcı Yarı Hafif Betonlar

Topçu'nun araştırmasında [6]; beş farklı “en büyük tane boyutuna sahip olan hafif agrega karışımı” ve “hacimsel oran” kullanılarak; $(1,8-2,4) \text{ Mg/m}^3$ birim hacim ağırlığına sahip beton serileri üretilmiştir. Serilerin performanslarını belirlemek için; ultrases hızı, schmidt sertlik değerleri, basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Yaklaşık 1,9 birim hacim ağırlığına, $(16-25) \text{ Mpa}$ basınç dayanımına, $(1,25-3) \text{ Mpa}$ eğilme dayanımına sahip olan betonların, tyhb olarak kullanılabileceği bildirilmiştir.

Eurolightcon'nun yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar ile ilgili raporunda; “liapor”, “leca” gibi adlar ile anılan genleştirilmiş kil ile üretilen betonlar incelenmiştir. Yaklaşık $1,95 \text{ Mg/m}^3$ taze beton yoğunluğundaki bu betonlarda (bu araştırmada yapılan tanıma göre yüksek dayanımlı tyhb olarak ta tanımlanabilirler); 60 Mpa basınç dayanımı elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, 1989–1998 yılları arasında belirtilen betonlar kullanılarak; $(374-1246) \text{ m}$ uzunluğunda bir çok köprü yapıldığı ve bu betonların çok yüksek dayanıklılığa sahip olduğu bildirilmiştir [13].

Al-Khaiat ve Haque'nin araştırmasında [40]; tüm agregası lytag olan tek bir yüksek dayanımlı tyhb ve kontrol serileri üretilerek, farklı kür koşullarında içsel kür gelişimi ve yıpratıcı deniz kenarı havasında dayanıklılığı araştırılmıştır (Çizelge 2.4). İnce agrega olarak kum kullanılan hafif betonda; içsel kür nedeniyle, normal betona göre, kür eksikliğinin dayanımı olumsuz yönde etkilemediği belirtilmiştir.

Nolan ve Bamforth'un gerçekleştirdiği araştırmada [41]; liapor ve lytag kullanılarak, üç farklı yüksek dayanımlı tyhb üretilmiş ve özellikleri araştırılmıştır (Çizelge 2.5).

Taşdemir ve ark. tarafından yapılan araştırmada [21, 22]; liapor ile üretilen tyhb'larda, agreganın hacimsel oranının ve kullanım amacının (ince veya iri agrega olarak) betonun kırılma mekanizmalarını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bunun için; iki referans tane boyutu dağılımı eğrisi kullanılarak, sırayla ince ve iri agrega kısımları liapor agregası ile değiştirilerek, dört farklı tyhb üretilmiştir. Betonlarda; üretim bileşenleri ve agreganın en büyük tane boyutu sabit tutulmuştur (Çizelge 2.6)

Çizelge 2.4. Yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlara literatürden bir örnek [40]

KARIŞIM ORANLARI												
BİLEŞENLER (kg/m ³)	Cimento doz.	Katkı mik. (kg)		Lytag iri hafif agregası		Lytag ince hafif agregası		Toplam su içeriği				
YDTHB 50 ¹	500	Silika füme; 50 + Süper akışkan.; 6		528		333		274				
FARKLI KOŞULLARDA KÜR EDİLMİŞ, FARKLI YAŞLARDAKİ YDTHB'LARIN ÖZELLİKLERİ												
Çökme (mm)				90 (yaklaşık olarak verilmiş ortalama değer)								
Taze beton yoğunluğu (Mg/m ³)				1,815 (yaklaşık olarak verilmiş ortalama değer)								
SINANAN BETON ÖZELLİKLERİ	Suda kür edilmiş		Deniz kenarında, çatı üstünde bekletilmiş numuneler						Deniz kenarında 28 gün bekletilmiş numuneler			
			Suda kür edilmeden kalıptan çıkarılan		Kalıptan çıkarıldıktan sonra 2 gün kür edilen		Kalıptan çıkarıldıktan sonra 6 gün kür edilen		Suda kür edilmeden kalıptan çıkarılan		Kalıptan çıkarıldıktan sonra 2 gün kür edilen	
	28 gün	91 gün	28 gün	91 gün	28 gün	91 gün	28 gün	91 gün	28 gün	91 gün	28 gün	91 gün
Basınç d. ¹ (Mpa)	51,0	55,8	48,2	46,8	50,2	48,9	55,0	53,8	51,5	55,9	60,7	
Basınç d. ^{1*} (Mpa)	40,8	44,64	38,56	37,44	40,16	39,12	44	43,04	41,2	44,72	48,56	
Elastiklik ² (Gpa)	26,1	-	25,4	-	26,0	-	26,3	-	26,3	-	26,9	
Yarmada çekme day. ³ (Mpa)	3,30	3,70	3,20	3,25	3,40	3,45	3,55	3,70	3,15	3,45	3,60	
Eğilme (Mpa) ⁴	4,40	-	3,65	-	3,85	-	4,05	-	4,00	4,30	4,35	
Su geçirgenliği ⁵ (mm)	19,6	-	36,0	-	29,1	-	26,8	-	38,2	32,0	28,6	
Karbonatlaşma derinliği ⁶ (mm)	-	-	1,0	4,0	0,3	1,7	0,0	1,0	0,7	0,3	0,2	
1 =Basınç dayanımı; bir ayrıtı 100 mm olan küp numunede 50 Mpa olarak bulunmuştur. 1* = Referans numune degerlerinin edinilebilmesi için, araştırmada sunulan değerler, 0,8 katsayısı ile azaltılarak küçültülmüştür. 2, 3 = Deneylerde referans numuneler kullanılmıştır. 4, 6 = (100x100x500) numune kullanılmıştır 5 = (200x200x120) mm plaka numune kullanılmıştır.												

Çizelge 2.5. Nolan ve ark.'nın yapay hafif agregalar ile ürettikleri yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlara ait sayısal veriler [41]

BETON KARIŞIM ORANLARI (kg/m ³) – (Not: hafif agregalara 30 dakika su emdirilerek kullanılmıştır)				
BİLEŞENLER	GRANİT	LIAPOR	LYTAG -1	LYTAG -2
Portland çimentosu	370	450	640	645
İri agrega	1184	730	621	626
İnce agrega (kum)	726	721	633	638
Karışım suyu	170	157	128	129
S. akışkanlaştırıcı	-	4,52	18	17
Su/çimento oranı	0,46	0,35	0,20	0,20
YÜKSEK DAYANIMLI TAŞIYICI YARI HAFİF BETONLARIN ÖZELLİKLERİ				
Beton yaşı	Üretilen beton serilerinin, ıslak, yüzeyi kuru yoğunlukları (Mg/m ³)			
28	2,40	1,98	2,04	2,05
98	2,41	1,96	2,04	2,06
Beton yaşı	Üretilen beton serilerinin, basınç dayanım değerleri (Mpa)			
28	74,5	69,0	68,2	65,5
98	79,5	74,0	71,2	68,3
Beton yaşı	Üretilen beton serilerinin, çekme dayanım değerleri (Mpa)			
28	4,32	4,45	4,73	4,52
98	4,40	4,43	5,27	4,63
Beton yaşı	Üretilen beton serilerinin, elastiklik modülü değerleri (Gpa)			
28	34,93	25,37	27,37	27,33
98	38,30	25,80	28,30	29,50

Çizelge 2.6. Yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlara ait bir örnek [21, 22]

Agrega olarak; liapor hafif agregası ve normal agrega kullanılarak üretilen beton serilerinin özellikleri						
DENEYLER	Normal kontrol betonu (A tane boyu dağılımı)	Taşıyıcı yarı hafif beton – A (2-4 değişimi)	Taşıyıcı yarı hafif beton – A (8-12 değişimi)	Normal kontrol betonu (B tane boyu dağılımı)	Taşıyıcı yarı hafif beton – B (2-4 değişimi)	Taşıyıcı yarı hafif beton – B (8-12 değişimi)
Silindir basınç dayanımı (Mpa)	98,0	65,0	52,0	99,0	73,0	56,2
Yarmada çekme dayanımı (Mpa)	5,78	3,7	2,94	5,7	4,14	3,51
Elastiklik modülü değeri (Gpa)	50,3	34,0	33,3	49,0	41,0	40,0
Eğilme dayanımı (Mpa)	6,4	4,68	4,35	6,85	5,09	4,58
Maksimum birim deformasyon ($\times 10^{-3}$ mm/mm)	2,135	2,086	1,841	2,682	2,118	1,822
Birim hacim ağırlığı (Mg/m ³)	2,415	2,168	2,074	2,404	2,195	2,131

2.4. Beton Özellikleri ve Kavramlar

2.4.1. Taze beton yoğunluğu

Akışkanlaştırıcılar; hafif agregalı betonun mikrostrüktürel yapısında yoğunluk artışına neden olarak, dayanıklılığın artmasını sağlarlar [42, 43].

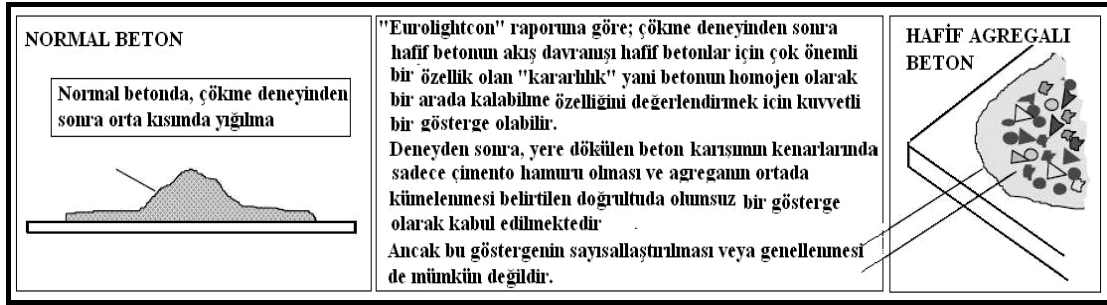
Birçok araştırmalarda, betonun yoğunluğunu temsilen, etüv kurusu yoğunluk yerine, taze beton yoğunluğunun yanı sıra, sertleşmiş betonun yüzeyi kuru, nemli veya hava kurusu yoğunluğunun verildiği belirlenmiştir [4, 5, 38, 40, 41, 44, 45]. Araştırmacıya göre; betonun özellikle taze beton yoğunluğu; aradaki ilişki belirlenmemişse, etüv kurusu yoğunluk yerine kullanılmamalıdır. Çünkü beton üretiminde kullanılan bileşenlerin, özellikle agregaların ve mineral katkı maddelerinin, doydukları su miktarı çok farklıdır ve bileşenler değiştikçe, iki değer arasındaki ilişkide değişir.

2.4.2. Taze beton kıvamı

Literatüre göre, çok hızlı ve pratik uygulanan “çökme deneyi”; kıvamın belirlenmesi için en uygun deney metodudur [10]. Ayrıca; Çökme biçimi ile betonun kararlılığı tahmin edilebilir (Şekil 2.1)

Çökme değeri, kullanılan agreganın cinsine ve yüzey yapısına göre büyük oranda değişir. Skorialar, pürüzlü yüzeye sahip, karıştırılması zor ve çökmesi düşüktür [38,

46]. Çökmesi düşük olan betonların işlenmesi, sıkıştırılması zor olduğu için, boşluklar oluşabilir ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılması gerekebilir [47]. Topçu; skorla ile ürettiği tyhb'larda; agreganın tane boyutu ve hacimsel oranı arttıkça, çökme miktarının azaldığını bildirmiştir [6].



Şekil 2.1. Çökme biçimi – kararlılık arasındaki ilişki [48]

Literatüre göre; taze haldeki hafif agregalı betonlarda ayrışma olmaması için, çökmenin, en fazla 10 cm olması gerekir. Bunun için; % 5-7 oranında hava sürükleyici katkı kullanımı, W/C oranının azaltılması önerilmiştir [9]. TS EN 206-1'de [19], çökme sınıfları belirlenmiştir. Ayrıca literatürde de çökme miktarı esas alınarak, çeşitli tanımlamalar yapılmıştır (Çizelge 2.7).

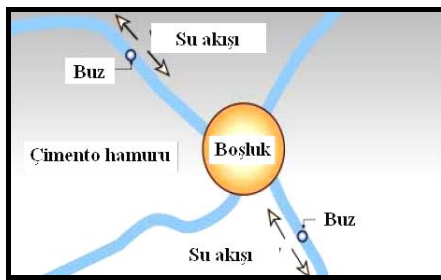
Çizelge 2.7. “TS EN 206-1”e göre, “kıvam sınıfları” ve literatürde geliştirilen “kıvam tanımlamaları” [19]

“TS EN 206-1”E GÖRE KIVAM SINIFI	ÇÖKME, CM	KIVAM TANIMLAMASI	ÇÖKME, CM
S1	1-4	Kuru (K)	2-6
S2	5-9	Plastik (P)	7-12
S3	10-15	Akıcı (A)	≥ 13
S4	16-21	Akıcı (A)	
S5	≥ 22	Akıcı (A)	

Düşük W/C oranı ile üretilen yüksek dayanımlı tyhb'larda yüksek oranda çimento kullanıldığı için; hidrasyon sürecinin tamamlanması için gereken süre fazladır. Ayrıca; taze betonun sertleşme sürecinde, hidrasyon için gerekli olan suyun elde edilememesi sonucunda plastik rötre oluşur. Bu olumsuzluğun önlenmesi için; beton üretiminde kullanılan agregaların bir kısmı ıslatılarak kullanılabilir [22].

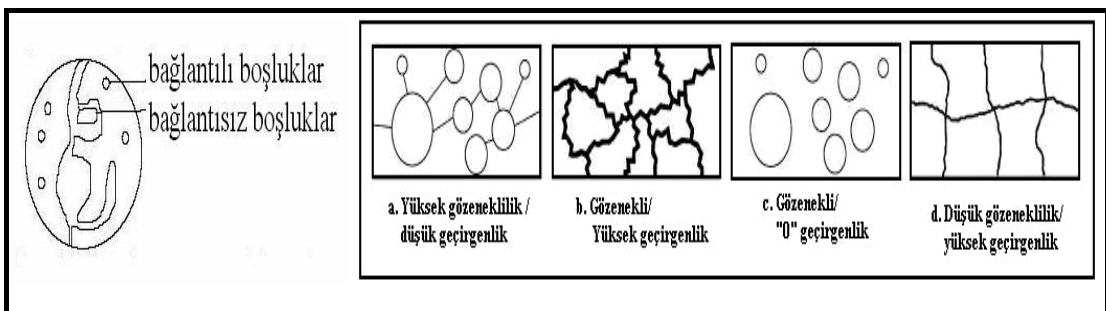
2.4.3. Etüv kurusu yoğunluk, su emme oranı ve porozite oranı

Etüv kurusu yoğunluk; etüvde kurutulmuş olan kütlenin hacme bölünmesi sonucunda elde edilen değerdir. Betonun su emmesi; suyun betonun, geçirimli boşluklarına doğru hareket ederek bu boşlukları doldurması (Şekil 2.2) olayıdır. Bu su; etüv kurusu yoğunluğun bir yüzdesi olarak ifade edilir. Bu şekilde elde edilen değere; “su emme oranı” denir. Porozite oranı ise; betonun boşluk hacmini ifade eder.



Şekil 2.2. Betonda boşluk – su emme ilişkisi [10]

Hafif agregalı betonlarda; hafif agreganın yoğunluğu, üretimde kullanılan çimento dozajı arttıkça ve agrega oranı azaldıkça; yoğunluk ve dayanım artar, su emme ve porozite azalır. Genel kaniya göre; yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonların; “dayanım / yoğunluk” oranları normal betonlara göre daha yüksektir [4, 6, 8-10, 15].



Şekil 2.3. Agregalarda bağlantılı ve bağlantısız boşlukların sembolik gösterimi, porozite ve geçirgenlik arasındaki ilişki [7, 49]

W/C oranının düşük olması; porozite açısından çok önemlidir. Sahu ve ark.’na göre; bu oranın % 40’tan 60’a yükselmesi ile kapiler porozite dört kat artar [50]. Taşıyıcı

eleman üretiminde kullanılacak olan betonların porozitesinin düşük olması önemlidir. Çünkü genellikle betonarme elemanda hasar oluşumu; porozitenin ve geçirimsizliğin yüksek olması nedeniyle, betona gömülü olan donatıda başlar. Ancak; geçirimsizlik olayı sadece betonun porozitesi ile değil, agrega ve betonda bağlantılı boşluk oranı ile de ilişkilidir (Bkz. Şekil 2.3).

2.4.4. Isı iletkenlik değeri

Isı iletkenliği; birim kalınlıktaki bir malzemenin birim alanından birim sıcaklık farkında geçen ısı miktarıdır. Yapı malzemesinin ısı iletme kabiliyeti ısı iletkenlik değeri ile belirtilir. Bu değer; ısı etkisine maruz kalan beton elemanların tasarımında önemlidir [51, 52]. Hafif betonlarda, ısı iletkenliğinin belirlenmesinde en güvenilir sonuçlar; etüv kurusu numunelerin mahfazalı sıcak plaka cihazında veya suya doygun numunelerin ise ısı akış ölçer cihazı ile ölçülmesi sonucunda elde edilebilir [6]. Literatürde, hafif agrega ile üretilen betonlar, ısı iletkenlik değeri kullanılarak ve betonun diğer özellikleri ile ilişkilendirilerek, sınıflandırılmıştır (Çizelge 2.8).

Çizelge 2.8. Hafif agregalı betonların fonksiyonel sınıflandırılması [8]

Hafif agregalı beton sınıfı	I	II	III
Hafif agregalı beton tipi	Strüktürel amaçlı	Strüktürel ve yalıtım amaçlı	Yalıtım amaçlı
Basınç dayanımı (Mpa)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Etüv kurusu yoğunluk (kg/m ³)	< 2000	Sınıflandırılmamıştır	Sınıflandırılmamıştır
Isı iletkenlik değeri (W/mK)	-	< 0,75	< 0,30

Hafif agregalı betonların üretilmesinde iki temel kaygı vardır; biri strüktürel, diğeri yalıtım ile ilgilidir. Strüktürel kaygıda ana amaç; olabildiğince düşük yoğunlukta olabildiğince yüksek dayanım performansı sağlamaktır [13]. Yüksek dayanımlı hafif agregalı betonlar; yüksek çimento içeriği ve düşük W/C oranı ile oluşan sıkı yapısı nedeniyle, “ısı yalıtımı” açısından, orta düzeyde iyileştirilmiş betonlardır [16].

Hafif betonun nem içeriğinin artması; ısı iletkenliğinin yüksek oranda artmasına neden olur [16]. Çünkü suyun iletkenliği; havanınkinden 25 kat daha fazladır [53].

Düşük yoğunluklu betonların ($1,84 \text{ Mg/m}^3$ 'ün altında olan betonlar); kullanım sürecindeki gerçek ısı iletkenlik değerlerinin elde edilebilmesi için; etüv kurusu kütleden elde edilen değer, %20 arttırılarak kullanılması gerekir [15, 16]. Birçok araştırmacıya göre; su emme ile betonun birim ağırlığının %1 oranında artması; ısı iletkenliğinin, % 5 oranında artmasına neden olur [15, 53, 54]. Bu düzeltme faktörü; Almanya'da; %6, Fransa ve İngiltere'de ise; %11 olarak belirlenmiştir [15].

Kayaçların ısı iletkenliği; öncelikle kristalizasyon derecesine bağlıdır. Kristal yapıli kayaçlar; aynı kompozisyondaki amorf veya camsı kayaçlardan daha yüksek iletkenliğe sahiptir. Hafif agregalarda; boşluklu yapılaşmanın yanı sıra, amorf ve camsı yapılaşma, bu agregalarda iletkenliğin çok düşük olmasına neden olur [53-57].

Hafif agregalı betonun ısıl genleşme katsayısı, normal agregalı betona göre daha azdır. Sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenir. Ayrıca, taşıyıcı ve bölücü elemanlar arasındaki derzlerde, hasar ve deformasyonlar daha az oluşur [58].

Ponza ile üretilen hafif betonları irdeleyen araştırmalarda, karışıma giren ponza oranının artması ile birlikte, ısı iletkenlik değerinin azaldığı bildirilmiştir [8, 51, 54]. Skoria için de aynı saptamada bulunulmuştur [39].

Moufti ve ark.'nın araştırmasında; skoria kullanılarak; ($1,63-1,74 \text{ Mg/m}^3$) yoğunlukta, ($0,168-0,195 \text{ W/mK}$) ısı iletkenliğine sahip olan hafif agregalı betonlar üretilmiştir [39]. Bir analitik araştırmaya göre; yaklaşık $1,85 \text{ Mg/m}^3$ yoğunluk, (20-50) Mpa basınç dayanımı, (17-28) Gpa elastiklik modülü değerlerine sahip olan hafif agregalı betonların ısı iletkenlik değeri; ($0,58-0,86 \text{ W/mK}$) arasında değişir. Öte yandan yaklaşık $2,4 \text{ Mg/m}^3$ yoğunluğa, (20-70) Mpa basınç dayanımına, (20-40) Gpa elastiklik modülüne sahip olan normal agregalı betonlarda ise bu değeri; ($1,4-2,9 \text{ W/mK}$) arasındadır. Hoff'a göre; yoğunluğu $1,92 \text{ Mg/m}^3$ olan taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenliği; ($0,81-0,90 \text{ W/mK}$) ve yoğunluğu $2,05 \text{ Mg/m}^3$ olan taşıyıcı hafif betonların ısı iletkenliği; ($1,07-1,10 \text{ W/mK}$) arasında değişir. Newman'a göre ise; $2,0 \text{ Mg/m}^3$ yoğunluğa sahip olan betonlar; $1,0 \text{ W/mK}$ ısı iletkenliğine sahiptir [16].

2.4.5. Ultrases geçiş hızı

Ses, yoğun maddeler içerisinde daha hızlı geçer. Betonun kalitesi sıklık ile doğru orantılı olarak artar. Bu nedenle ultrases geçiş hızı; beton özelliklerinin belirlenmesi için kullanılabilir [59, 60]. Beton özelliklerinin belirlenmesinde tahribatlı yöntemler, tahribatsız olanlara göre daha güvenilir sonuçlar verir. Ancak, bu yöntemler; zaman, ekonomik harcama gerektirirler. Bu nedenle, ultrases gibi tahribatsız yöntemlerin güvenilirliklerinin artırılarak uygulanması; gerçek koşullar altında, veri elde edilmesine yardımcı olabilir.

Neville'ye göre; ultrases hızı, 4,5 km/sn'nin üstünde olan betonların beton kalitesi, beton özelliklerini tanımlama açısından, "mükemmel"dir. Literatürde, betonun ultrases hızı ve özellikleri arasında ilişki olmadığını ileri süren [61] ve ilişki olduğunu bildiren araştırmalar mevcuttur. Ancak ortak görüş; karışım oranları bilinen ve üretim bileşenlerinin fazla değişkenlik göstermediği betonlarda belirtilen ilişkinin kurulabileceği yönündedir [60, 62-67]. Ultrases hızını etkileyen birçok parametre vardır. Bu nedenle, ortalama değerler için çok miktarda ölçüm yapılması daha sağlıklı sonuçlar verir [68, 69].

2.4.6. Schmidt sertlik değeri

Schmidt sertlik değeri; schmidt çekici kullanılarak belirlenir. Çekicinin çalışma prensibi; biri sabit, diğeri hareketli olan iki cismin çarpışma problemidir. Çekiç; yüzeye bastırılarak, kilitli durumdaki demir pistonu serbest bırakılır. Okunan değere; vuruş sayısı denir. Bu yöntem; sadece, beton yüzeyinin yaklaşık olarak, 30 mm'si için bilgi verebilir [61, 68, 70]. Sertlik değeri; numune yüzeyinin pürüzlülüğüne, şekil, boyut ve sabitleme oranına, yaşına, nemlilik durumuna, agregaya, çimento tipine, numune yüzeyinde karbonatlaşma oranına göre değişir [9, 10, 60, 61, 68, 70].

Sertlik değerlerinin betonun diğeri nitelikleri ile ilişkisi; aynı koşullarda daha önce yapılan deneylerin sonuçları ile yorumlanabilir [71]. Malhotra'ya, DIN 4240'a göre;

Belli limitler dâhilinde sertlik değeri ile betonun dayanım özellikleri arasında ilişki kurulabilir [60, 61]. Babu'ya göre ise sorgulanan ilişki oldukça yüksektir [57].

Topçu; hafif agrega oranı artışının; sertlik değerini azalttığı ve bu durumun, agreganın rijitliğinin, çimento hamurununkinden az olmasından kaynaklandığını bildirmiştir [6].

2.4.7. Basınç dayanım değeri

Üretimde kullanılan çimento tipi ve dayanımı betonun basınç dayanımını önemli oranda etkiler. Genelde W/C oranı düştükçe, basınç dayanımı yükselir. Ancak, katkı kullanılmayan ve yüksek dozajda çimento kullanılan betonlarda, düşük W/C oranı; çimentonun hidrasyon derecesini olumsuz yönde etkiler. Yüksek W/C oranlarında; hidrasyon derecesi daha fazladır. Bu durum doğal olarak basınç dayanımını etkiler.

Literatürde, genelde basınç dayanım değeri olarak, 28 günlük değerler kullanılır. Ancak; bu değerlerde 90. güne kadar belirgin, bir yıla kadar ise 90. güne göre çok az miktarda bir artışın, olduğu birçok araştırmanın ortak sonucudur [4, 8, 72-74].

Agreganın minerolojik içeriği; basınç dayanımı üzerinde, çok etkilidir. Bazalt agregası ile diğerler agregalara göre; daha yüksek değerler elde edilebilir [46, 75]

Genelde; agreganın yoğunluğu arttıkça, basınç dayanımı da artar. Doğal hafif agregalı betonlarda yoğunluk ve basınç dayanımı arasında kuvvetli ilişkiler olduğu belirlenmiştir [38, 76]. Ponzadan daha yüksek yoğunluk ve dayanıma sahip olan skorialar ile üretilen betonların basınç dayanımı daha yüksektir [14, 76, 77]. ACI 213'teki sınıflandırmaya göre; skoria ile üretilen hafif agregalı betonların yoğunluğu; yaklaşık $1,55 \text{ Mg/m}^3$ ve basınç dayanımı; 20 Mpa civarındadır (Şekil 2.4). Ancak 40 Mpa'ya kadar basınç dayanımı elde edilebilir [14]. Topçu'nun araştırmasında, skoria kullanılarak; yaklaşık $1,9 \text{ Mg/m}^3$ birim hacim ağırlığında, (16-25) Mpa basınç dayanım değerleri elde edilmiştir [6]

Hafif beton									
ACI, 213'e göre	Düşük - dayanım			Orta - dayanım			Strüktürel		
Yoğunluk (kg/m)	250	500	750	1000	1250	1400	1500	1750	2000
Dayanım (N/mm)	(0,7-2)			(2-14)			(17-41)		
Agrega	Vermikülit			Pomza			Uçucu kül		
	Perlit			Skoria			Genleşmiş kil		
							Genleşmiş cu		
	Gaz beton								

Şekil 2.4. Hafif agregalı betonun etüv kur. yoğunluğu ve basınç arasındaki ilişki [77]

Porozite ile basınç dayanımı arasında kuvvetli ters orantılı polinomal ilişki vardır [10]. Birçok araştırmaya göre İri agrega oranı arttıkça porozite artar ve basınç dayanımı düşer [62].

Beton üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı katkı, tanecikleri sararak, istenilen performansı sağlar. Betonda; tüm taneciklerin sarılması için gerekli olan katkı miktarının kullanılması ile “kritik doyum noktası” olarak tanımlanan katkı seviyesine ulaşılır. Bu seviyeyi aşan betonlarda; basınç dayanımının düştüğü bildirilmiştir. Çünkü bu seviyeyi aşan katkı; ortamda serbest kalır ve betonun viskozitesini (malzemenin şekil değişikliğine karşı gösterdiği direnç) bozar. Bu durumda; çimento hamuru katı parçacıkları süspansiyonda tutamaz ve beton ayrışır [78].

Eurolightcon'un araştırmasında; doğal hafif agrega, 450 doz çimento, akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen (1,26-1,84) Mg/m³ yoğunluktaki betonların basınç dayanımları; 16 ve 25 Mpa olarak bulunmuştur [79] Holm ve Bremner'e göre; yapay hafif agrega ile üretilen, 1,85 Mg/m³ yoğunluktaki yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı; 40 Mpa civarındadır ve 50 Mpa'ya kadar çıkarılabilir. Ancak (50-69) Mpa dayanım istenildiğinde; betonun yoğunluğunu arttırmak şarttır ve bu değer 2 Mg/m³'e kadar çıkabilir [16]. Mehta ve Monteiro'ya göre ise; agreganın en büyük tane boyutunu küçülterek, çimento dozajını arttırarak, iyi kalitede agrega kullanarak (40-48) Mpa basınç dayanımına sahip kaliteli prefabrik taşıyıcı hafif betonlar üretilebilir. Ayrıca, W/C oranının azaltılması ve ara yüzeyin boşluk oranının kontrol edilmesiyle, (70-75) Mpa basınç dayanımına sahip taşıyıcı hafif betonlar üretilebilir [9, 10].

2.4.8. Elastiklik modülü değeri

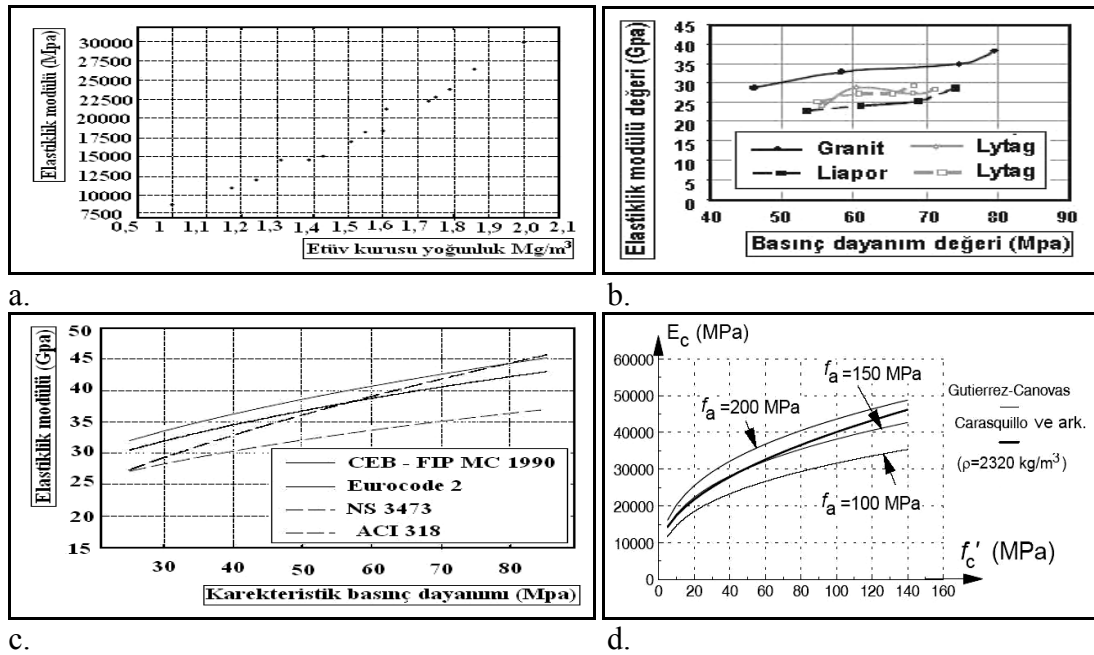
Elastiklik modülü değeri; betonun, deformasyona karşı dayanımını ifade eden bir değerdir. Elastik bölgede uygulanan kuvvetin oluşturduğu basınç gerilimlerinin, numunelerde meydana gelen, birim kısaltmaya oranıdır. Bu oran, elastik bölgede, maksimum gerilimin %40'ına kadar çizilen, gerilim - deformasyon doğrusunun eğimi ile elde edilir [80].

Elastiklik modülünü en çok etkileyen parametreler; bileşenlerin elastiklik modülleri, kullanım oranları ve ara yüzey bölgesinin yapılaşmasıdır. Agregada, diğer bileşenlere göre daha çok hacme sahip olduğu için, bu değer belirlenmesinde etkin rol oynar. Özellikle, yüksek dayanımlı betonlarda agreganın, elastiklik modülü üzerindeki etkisi daha fazladır. Dayanımı azaldıkça, agreganın etkisi de azalır [9, 16, 46, 81-83]. Kullanılan agreganın minerolojik içeriği de, elastiklik modülünün belirlenmesinde çok önemlidir [75, 84]. Yapılan bir araştırmaya göre; incelenen 8 tip kayaç içerisinde, bazalt ile üretilen betonun elastiklik modülü; çok az farkla en yüksek ikinci sırada yer almıştır [75]. Normal agreganın elastiklik modülü; hafif agreganınkinden daha yüksektir. Bu durum doğal olarak betona yansır [16]. Öte yandan, agreganın tane boyu dağılımının ideale yaklaşması elastiklik modülünün yükselmesine neden olur [85]. Çünkü beton ve bileşenlerinin boşluk yapısı, boyutu ve sürekliliği, basınç dayanımını ve elastiklik modülünü önemli ölçüde etkiler [26].

Normal agregalı betonlarda, agrega ile çimento hamurunun elastiklik modülü arasındaki oran; 2-2,5 iken, bu oran hafif agregalı betonlarda 0,5-1 arasındadır. Her iki betonun elastiklik modülleri arasındaki farkın ise fazla olmaması; hafif agregalı betonların, agrega özelliklerinden daha az etkilendiğini göstergesidir [86]. Ayrıca, yüzeyi pürüzlü, kırılmış agregalar ile üretilen betonlarda, ani yüklemde edinilen elastiklik değeri; düzgün yüzeyli agregalar ile üretilenlere göre daha fazladır. Her iki saptama da; hafif betonların ara yüzey bölgelerinin normal betondan farklı yapılaşmasının (hafif agreganın yüzey yapısının daha pürüzlü ve su emme oranının daha yüksek olması nedeniyle) ve betonun davranışında önemli olduğunun göstergesidir [9].

Hafif agregalı betonlarda, hafif agrega oranının ve buna bağı olarak yoğunluğun azalması; basınç dayanımının ve elastiklik modülünün düşmesine neden olur. Ancak; elastiklik modülündeki azalma; basınç dayanımına göre daha fazladır [58, 84]. Hafiflik ve yüksek mekanik performansın bir arada istenildiği durumlarda taşıyıcı yarı hafif beton üretilmelidir [58].

Birçok araştırmaya ve standarda göre [75, 80, 82, 87]; elastiklik modülü değerleri ve betonun diğer özellikleri arasında kuvvetli ilişkiler vardır (Şekil 2.5). Ancak, literatürde önerilen eşitlikler ile hesaplanan değerler; kullanılan agregaya ve betonun nemlilik durumuna bağı olmak üzere $\pm$ %25 oranında gerçek değerlerden farklı olabilir [6]. Kesin verilerin elde edilebilmesi için deney yapılması şarttır [80].



Şekil 2.5. Hafif ve normal agregalı betonların elastiklik modülü ve diğer özellikleri arasındaki ilişkilere örnekler (a. Hafif agregalı [76], b. Yapay hafif ve normal agregalı c., d. Normal agregalı [80, 82] örnekleri)

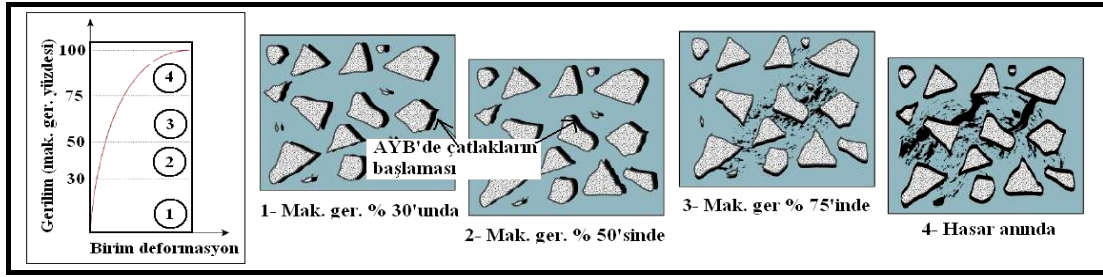
Bir örneğe göre; 75 Mpa basınç dayanımına, $2,3 \text{ Mg/m}^3$ yoğunluğa sahip yüksek dayanımlı normal betonlarda; elastiklik modülü 38,9 Gpa iken, aynı basınç dayanımına, $1,7 \text{ Mg/m}^3$ yoğunluğa sahip, yapay hafif agregalı ile üretilmiş yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlarda, bu değer; 24,7 Gpa olduğu bildirilmiştir

[87]. Bir analitik araştırmaya göre genellikle; yaklaşık $1,85 \text{ Mg/m}^3$ yoğunluğa, (20-50) Mpa basınç dayanım değerine sahip olan taşıyıcı hafif betonlarda, elastiklik modülü; (17-28) Gpa arasında değişir. Öte yandan yaklaşık $2,4 \text{ Mg/m}^3$ yoğunluğa, (20-70) Mpa basınç dayanımına sahip olan normal betonlarda ise be değer; (20-40) Gpa arasındadır [16]. Holm ve Bremner'in yaptığı araştırmada ise; 0,33 W/C oranı ile üretilen, $2,17 \text{ Mg/m}^3$ taze beton yoğunluğuna, 79,9 Mpa basınç dayanımına sahip olan taşıyıcı hafif betonun elastiklik modülü; 30,5 Gpa olarak bulunmuştur [16]. Bluic'in yaptığı araştırmada, uçucu kül ve silika fume kullanılan, yüksek dayanımlı normal betonlarda; (62,5-91,5) Mpa basınç dayanımı, (28,350-38,219) Gpa elastiklik modülü, (5,4-7,2) Mpa eğilme dayam değeri elde edilmiştir.

2.4.9. Basınç gerilimi altında boyuna birim deformasyon ve maksimum birim deformasyon

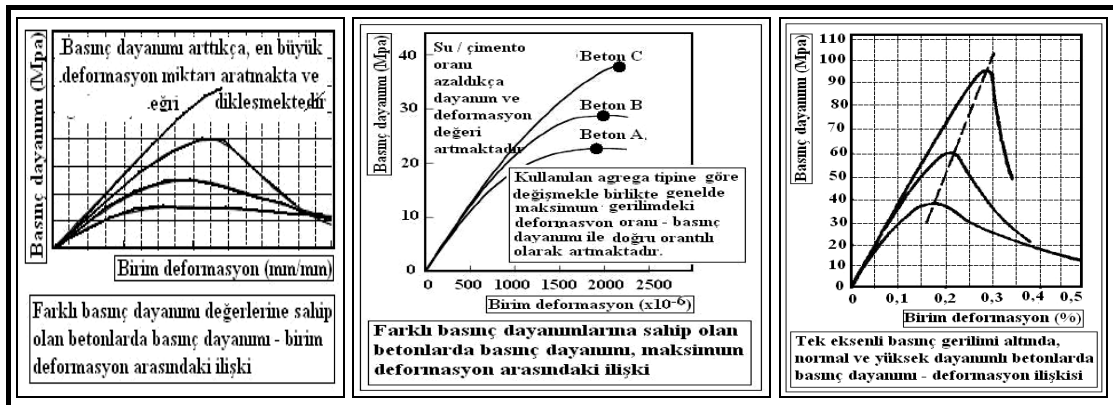
Tezde, “basınç gerilimi altında boyuna birim deformasyon” kavramı; betonun herhangi bir gerilimindeki birim deformasyon değerini (ilk boya oranlanarak belirtilen gerilimdeki boyuna kısalma) ifade etmektedir. Tezde sorgulanan “maksimum birim deformasyon” kavramı ise (ϵ_0); betonun maksimum gerilimde, (tepe noktasında) elde edilen birim deformasyon değerini (ilk boya oranlanarak elde edilen maksimum boyuna kısalma değerini) ifade etmektedir.

Normal dayanımlı, normal agregalı betonların; yüksek dayanımlı betonlara göre çimento hamuru daha boşluklu olduğu için; hasar sürecinde, çatlakların çoğu, çimento hamuru içerisinde, boşluk gibi düzensizliklerin çevresinde gelişir. Bu nedenle, bu betonların gerilim-deformasyon eğrileri, bileşenlere göre daha az doğrusal bir yapıdadır. Hasarın gerçekleştiği maksimum yükün % 30'unda, ara yüzey bölgesindeki çatlakların miktarı fazlalaşmaya, var olan çatlakların en ve boyu artmaya başlar (Şekil 2.6). Maksimum yükün % 70-90'ına ulaşıldığında; ara yüzey bölgesindeki çatlaklar, çimento hamuruna, düzensizliklerin çevresinde oluşan çatlaklar ise ara yüzey bölgesine doğru ilerler. Çatlaklar birleştiğine maksimum yüke ulaşılır ve hasar oluşur [88-90]. Agreganın minerolojik kökeni ve gösterdiği deformasyon davranışı betonun deformasyon davranışını etkiler [82].



Şekil 2.6. Normal agregalı betonlarda basınç gerilimi altında çatlak gelişimi, kırılma mekanizması ve gerilim - birim deformasyon ilişkisi [10]

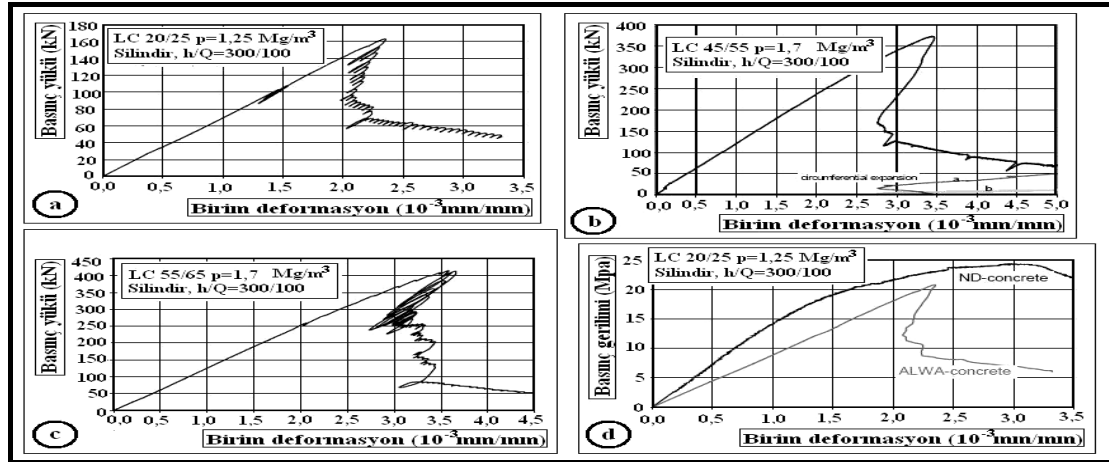
Yüksek dayanımlı betonlar, normal olanlara göre çok daha heterojen yapıdadırlar. Bu betonlarda çimento hamuru ve ara yüzey bölgesi; normal betonlara göre, daha az boşluk ve çatlak içerir. Bu nedenle, gerilim - deformasyon eğrileri, normal betona göre çok daha dik, doğrusaldır ve hasar anında, az genleşme ile aşırı ve ani kırılmalı bir yapı sergilerler (Şekil 2.7). Ayrıca; bu betonların eksenel deformasyon kapasiteleri yüksektir ve bu doğrultuda “maksimum birim deformasyon” artar. Buna göre kısaca; betonun basınç dayanımı yükseldikçe maksimum birim deformasyon artar denilebilir [82,91]. Yüksek dayanımlı betonlarda maksimum birim deformasyonun ortalama 3 birim ($\times 10^{-3}$ mm/mm) olduğu bildirilmiştir [91].



Şekil 2.7. Betonun basınç dayanımı ve deformasyon davranışı arasındaki ilişkiye literatürden örnekler [9, 10, 91]

Hafif betonlarda ise; gerilim - deformasyon eğrisinde, son deformasyon bölgesinde süneklik azdır. Bu durum, dayanımın yükselip, yoğunluğun azaldığı durumlarda daha

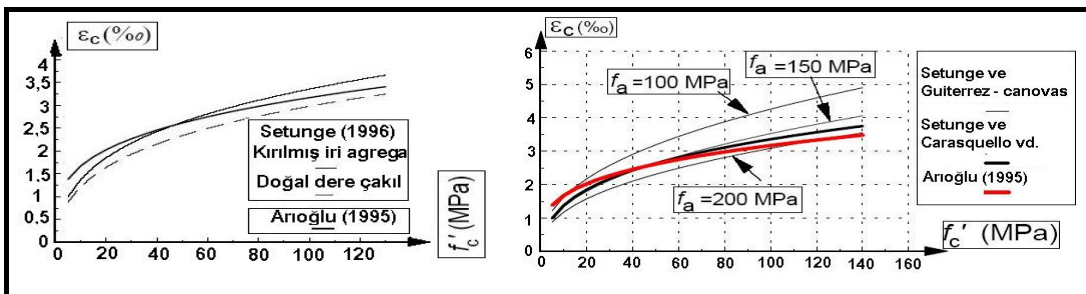
belirgindir [92, 93]. Normal dayanım sınıfında bile hafif agregalı betonların deformasyon eğrileri, normal agregalı betonlara göre daha doğrusaldır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Hafif agregalı betonlarda gerilim - birim deformasyon arasındaki ilişki [93]

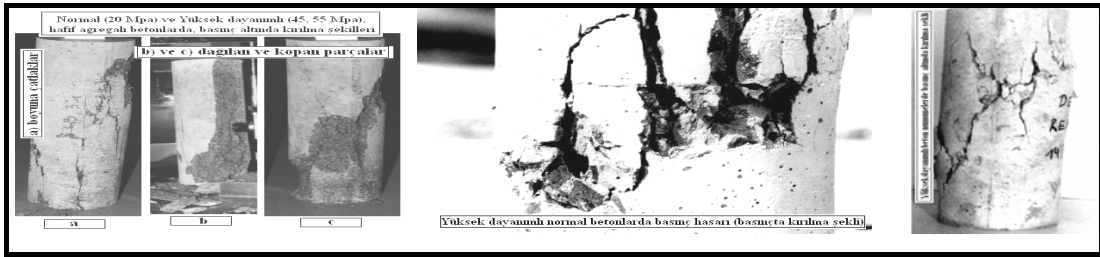
Rossignolo ve Faust'un araştırmasına [93, 94] göre; yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlarda; gerilim - deformasyon ilişkisi maksimum yükün %80'ine kadar neredeyse tamamen doğrusaldır ve maksimum birim deformasyon; üretim bileşenlerine göre (2,6-3) birim arasında değişir. Bu değer, yüksek dayanımlı, normal agregalı betonların maksimum birim deformasyonundan fazladır [86, 94].

Çeşitli bilimsel araştırmalardan edinilen veriler aracılığıyla betonun basınç dayanımı ve maksimum birim deformasyonu arasındaki ilişki Şekil 2.9.'da sunulduğu gibi özetlenmiştir [82].

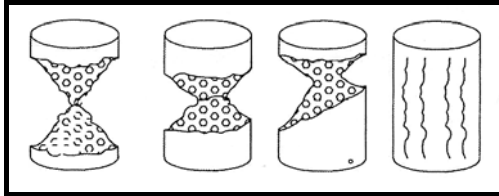


Şekil 2.9. Basınç dayanım değeri ve maksimum birim deformasyon arasındaki ilişkiye literatürden örnekler [82]

Betonların; gerilim - deformasyon davranışları; basınç kuvvetinden dolayı numunede meydana gelen hasar ile de tanımlanabilir. Normal ve yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar ve yüksek dayanımlı normal betonlarda; bu tanımlı yapmak daha kolaydır, çünkü kırılma ani ve tahripkardır (Resim 2.1). TS EN 12390-3'e göre ise; basınç gerilimi altında hasara uğrayan beton numunelerden elde edilen verilerin güvenilir olabilmesi için; "referans" kırılma biçimlerine sahip olması gerekir (Şekil 2.10).



Resim 2.1. Yüksek dayanımlı normal ve hafif betonlarda basınç gerilimi nedeniyle betonun kırılma şekillerine literatürden örnekler [93, 95, 96]



Şekil 2.10. "TS EN 12390-3'e göre, silindirik numunelerin, tatmin edici kırılma [97]

2.4.10. Eğilme dayanım değeri

Eğilme dayanım değeri; katı bir elemanın, eğilmeye karşı koyma gücünü ifade eder. Eğilme yüküne maruz kalan taşıyıcı elemanlarda, yük altında çatlak gelişiminin kontrol edilebilmesi için eğilme dayanım değerinin bilinmesi gerekir [98]. Bu değer; kullanılan deney yöntemine, çimentonun kalitesine, kullanılan agreganın özelliklerine (çimento hamuru ile etkileşime girmesi, yüzey yapısı gibi) ve katkılara göre değişir [9, 99]. Birçok kaynağa göre çekme dayanımının belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem; eğilmede çekme yöntemidir. Eğilme deneyi; eğilmeye çalışan elemanların çekme dayanımını en doğru tahmin eden deneydir [98].

Birçok araştırmacıya göre; agreganın pürüzlü yüzey yapısına sahip olması, betonun eğilme dayanımını önemli derecede artırır. Çünkü pürüzlü yüzey yapısı, agrega ve çimento hamuru arasındaki yüzey alanını, kilitlenme bölgelerini arttırarak fiziksel bağın artmasına neden olur. Ayrıca; agrega ile çimento hamuru arasında, yavaş ilerleyen kimyasal bir bağ oluşumu varsa; bu etki süreç içerisinde daha da kuvvetli bir hal alır. Yuvarlak şekilli agregaların bu performansı ise; daha azdır [9, 10, 61, 72]

Beton üretiminde kullanılan W/C oranının düşmesi; çekme, dolayısıyla eğilmede çekme dayanımının artmasında çok etkilidir [46]. Eğilme dayanım değeri; numune boyutlarının artması ile azalır [100].

Topçu'nun araştırmasına göre; tyhb'larda kullanılan agrega oranının artması sonucunda eğilme dayanımı azalır. Yaklaşık $1,9 \text{ Mg/m}^3$ birim hacim değerlerinde (1,25 -3) Mpa eğilme dayanımı elde edilmiştir [6]. Kılıç ve ark.'nın araştırmasında; skoria kullanılan taşıyıcı hafif betonlarda; süreç içerisinde eğilme dayanımının arttığı, mineral katkı kullanımının bu değeri olumlu yönde etkilediği bildirilmiştir. (1,8-1,86) Mg/m^3 hava kurusu yoğunlukta, 28. günde (28-29) Mpa basınç dayanımı, (6,7-8,3) Mpa eğilme dayanımı elde edilmiştir. 90. günde ise; (30-44) Mpa basınç dayanımına, (7,1-8,3) Mpa eğilme dayanımına ulaşılmıştır [4, 5].

Birçok araştırmacıya göre; basınç dayanımı arttıkça, eğilme dayanımı da artar. Ancak, bu ilişki her zaman doğrusal olmayabilir [98]. Birçok araştırma sonucuna göre; yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonların eğilmeye karşı gösterdiği direnç; en az aynı olmak üzere, çoğu zaman normal agregalı betonlardan üstündür. Bu durumun ise, hafif agrega ile çimento hamurunun elastik uyumundan, ara yüzey bölgesinin sıkı yapılaşması ve daha az mikro çatlak içermesinden kaynaklandığı bildirilmiştir [16].

Skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımlarının; ponza ile üretilen betonlarınkinden fazladır olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlarda; çimento içeriği arttıkça, eğilme dayanımının arttığı, bununla doğru orantılı olarak; yoğunluk, basınç dayanımı ve elastiklik modülünün de arttığı ve bu özellikler arasında kuvvetli ilişkilerin olduğu belirlenmiştir [38].

2.4.11. Aderans dayanım değeri

Betonarmede, donatının kaymasını önleyen ve kenetlemeyi sağlayan kuvvetlere “aderans” denir [101]. Betonarme elemanlarda, gerilim transferi; betonun basınç dayanımı ve donatının çekme kapasitesinin kombinasyonu ile sağlanır. Bunun gerçekleştirilebilmesi için, donatı ve beton arasındaki aderansın yüksek olması şarttır [102]. Basit olarak, betonarme elemanın yük taşıma kapasitesi; beton - donatı aderansına bağlıdır [103]. Beton ile nervürlü donatı arasındaki aderans (Şekil 2.11); kimyasal bağ, sürtünme ve mekanik diş (mekanik kilitlenme) kuvveti olmak üzere, üç mekanizmanın bileşkesidir [102]. Bunlar içerisinde dayanımı en fazla etkileyen, üçüncüsüdür. Ortak bilimsel görüşe göre; bu donatılar ile üretilen betonlarda, düz donatıların dayanımında önemli olan ilk iki bileşen göz ardı edilebilir [104].

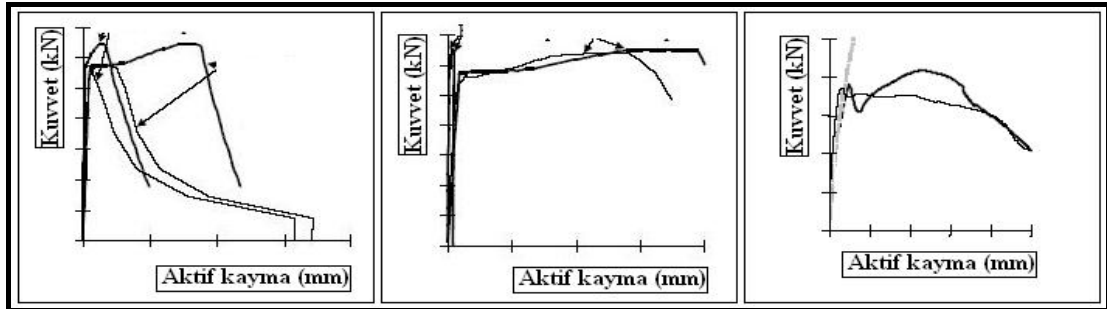
Nervürlü donatı ve beton arasındaki aderansı etkileyen birçok parametre vardır (Şekil 2.11). Bunlar içerisinde en önemlileri; donatıyı çevreleyen betonun kalınlığı, donatının gömülme boyu ve donatının akma sınırıdır. Aderans deneylerinin sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi ve aderans- kayma ilişkisinin ortaya konulabilmesi için; bu parametrelerin iyi ayarlanması gerekir. Donatının deney esnasında akmaması veya numunenin yarılarak patlamaması, özellikle buna bağlıdır [102-104].

Betona gömülü donatının boyunun gerekenden fazla olması donatının akma sınırına ulaşmasına, hatta kopmasına neden olur. Öte yandan, betondan çıkarılmaya çalışılan donatıdan numunenin yanal yüzeyine doğru radyal olarak yayılan çekme gerilmeleri oluşur. Yeterli olmayan beton kalınlığı veya beton dayanımına sahip olan numunelerde veya çekme yükünün numuneye ve donatıya doğrusal olarak uygulanmaması sonucunda, radyal gerilim, çatlak oluşumu ile birlikte artar. Bu çekme gerilmesi, betonun çekme gerilmesini aşınca; numunenin yarılmasına neden olur. Her iki durumda da “aderans dayanımı” ölçülemez [102-104]. Özellikle yüksek dayanımlı betonlarda; aderans dayanımı belirlenirken, hasar oluşma riski yüksektir. Bunun önlenmesi için; uygun deney tasarımı, özenli numune üretimi, gerekli olan durumlarda özel donatı kullanımı ve kuvvetin, orantılı ve yavaş uygulanması önemlidir [105, 106].

Birçok araştırmacıya göre; hafif agregalar ile üretilen taşıyıcı hafif betonlarda aderans dayanımı; yaygın kanının aksine normal betonlardan daha iyidir [112]. İyi üretilmiş bu betonlarda aderans dayanımları (20-30) Mpa arasında değişebilir [16].

2.4.12. Donatıda Maksimum birim deformasyon değeri

Donatıda maksimum birim deformasyon; aderans deneyi esnasında, maksimum kuvvette, donatıda oluşan maksimum birim deformasyonu ifade eder. Literatürde, bu doğrultudaki sorgulamalarda deformasyon; kuvvet uygulanan yöne ters doğrultudaki, numune bitiminde bırakılan donatı parçasının deformasyonunun ölçülmesi ile bulunmuştur. Tezde, önceki araştırmalardan farklı bir sorgulama yapılmıştır. Ancak, literatürde bu sorgulama ile ilgili teorik bilgi vardır. Buna göre; donatı deformasyonu belirlenirken kuvvet doğrultusunda donatının deformasyonu Şekil 2.12'deki gibidir. Şekilde görüldüğü gibi, bu ilişki; donatının akma sınırına kadar tamamen doğrusaldır. Ancak deney esnasında akma olması durumunda kullanılan donatıların özelliklerine göre, detayda bazı farklılık içerebilir [102].



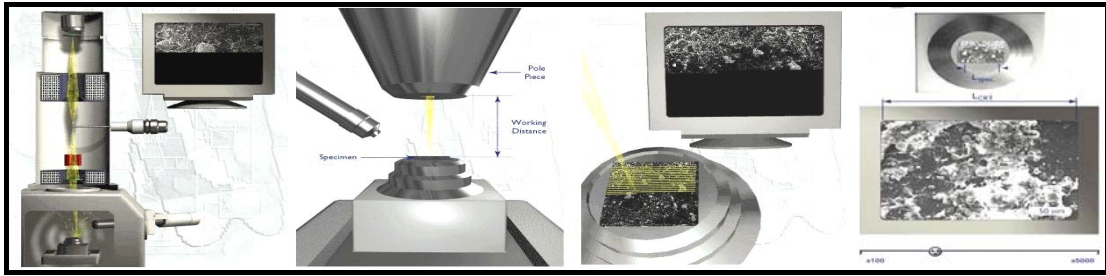
Şekil 2.12. Betona gömülü olan donatının akması sonucunda oluşan donatı deformasyonu [102]

Aderans belirlenirken, donatının kesit alanı azaldığı için; aderans dayanımı azalır ve donatının deformasyonu artar [109]. Beton numune genişliği / donatı çapı oranının artması ile donatı deformasyonu artar ve aderans azalır [115]. Aderans deneylerinde, donatı gömülme boyu az olan ve çatlama olmayan numunelerde donatının, kuvvet – deformasyon ilişkisi daha doğrusaldır [102].

2.5. Ara Yüzey Bölgesinde Kristal Morfolojisi ve Kavramlar

2.5.1. Genel olarak TEM analizleri, ara yüzey bölgesi ve bu bölgedeki kristal morfolojisi ile ilgili kavramlar

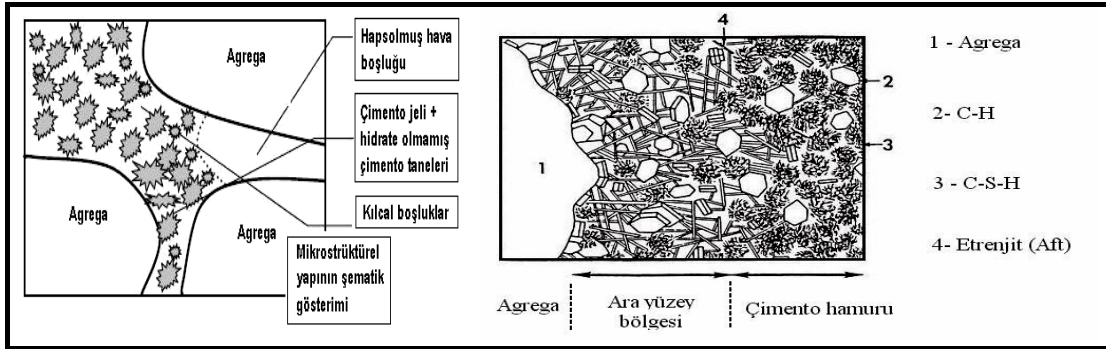
TEM cihazının çalışma prensibi, Şekil 2.13'te özetlendiği gibidir. Tem cihazından iki çeşit görüntü elde edilebilir. Bunlardan biri "Secondary Image" (seı) diğeri ise "Backscatter Image" (beı) olarak adlandırılan görüntülerdir.



Şekil 2.13. Tem cihazının çalışma prensibine ilişkin görüntüler

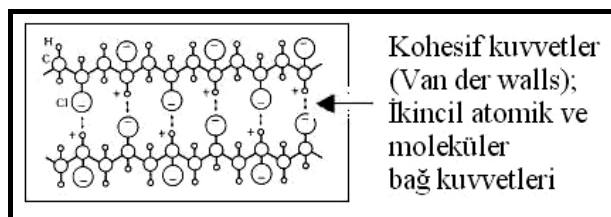
“Seı” (secondary image); cihazın yan taraflarında bulunan algılayıcılar aracılığıyla elde edilen görüntülerdir. Bu görüntüler; üç boyut etkisi verir ve görüntü kalitesi daha yüksektir. Bu nedenle “seı” görüntüleri, morfolojinin belirlenmesinde tercih edilen görüntülerdir. “beı” (backscatter image); elementlerin atomik numaralarına karşı duyarlı olma esasına dayananır. Düşük atomik numaraları olan fazlar, koyu renkli, yüksek olanlar, daha açık renkte ve parlak görünürler [42].

Beton; agrega, çimento hamuru ve ara yüzey bölgesi olmak üzere üç ana fazdan oluşan, heterojen bir malzemedir (Şekil 2.14). Betonu oluşturan bileşenler, ara yüzey bölgesi ve betonun kendisi hakkındaki bilgilerin ayrıca bunlar arasındaki ilişkilerin belirlenmesi; bileşen ve beton özelliklerinin kontrol edilmesi açısından önemlidir. Günümüzde betonun mikrostrüktürü ve özellikleri arasındaki ilişki tamamen çözülememiştir. Buna rağmen genel bilimsel görüş; betonun ara yüzey bölgesi ile beton özellikleri arasında oldukça kuvvetli ilişkilerin olduğu yönündedir. Mehta ve Monteiro'ya göre; bu konuda yapılmış araştırmaların sayısı çok azdır [9, 10].



Şekil 2.14. Betonun mikrostrüktürel yapısının şematik gösterimi [29, 116]

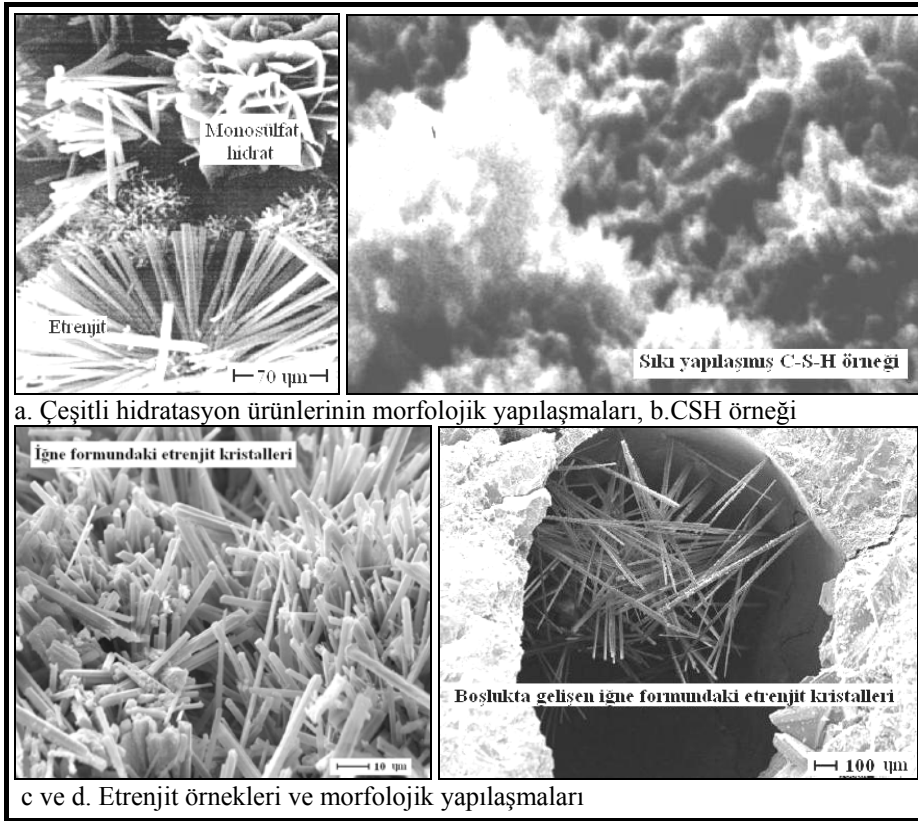
Ara yüzey bölgesinin dayanımını; bu bölgedeki kristaller (“CSH”, “CH” ve “etrenjit”) ve agregalar arasında olan kohesif kuvvetler belirler (Şekil 2.15). Bu kuvvetlerin oluşma oranı ise; boşluk miktarı ve boyutuna bağlıdır [9, 10, 29, 30]. Öte yandan ara yüzey bölgesinde, boşluk miktarı ve oluşumu, CH (portlandit, kalsiyum hidrat), CSH (kalsiyum silikat hidrat) veya etrenjit gibi kristallerin morfolojisi ve oluşum oranları ile yakından ilişkilidir (Resim 2.2-2.4). Etrenjit kristalleri; süreç içerisinde Afm (mono sülfat hidrat) olarak adlandırılan kristale dönüşür. Genel olarak normal betonlarda; dayanım ve dayanıklılığı belirleyen CSH, kristallerin; %(50-60)’ını, CH; %25’ini, etrenjit ise; % (15-20)’sini oluşturur [9, 10, 31].



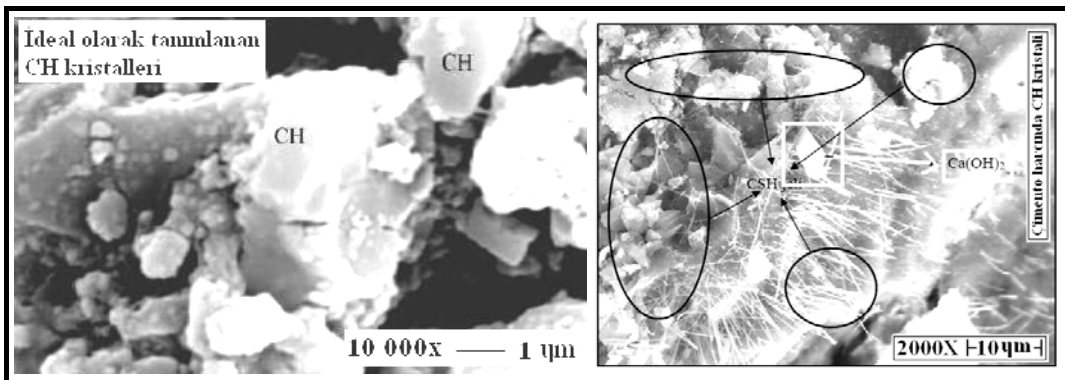
Şekil 2.15. “Kohesif” kuvvetlerin şematik gösterimi [10]

CH Kristalleri (Resim 2.3-2.4); genel olarak, morfolojik açıdan altıgen-levha formunda olan (hegzagonal-plate) kristallerdir. Bu kristaller, formları ve büyük boyutları nedeniyle, ara yüzey bölgesinde boşlukların oluşmasına ve dayanımın düşmesine neden olurlar. CH boyutu ve oranı arttıkça, boşluk miktarı artar. Bunun ile ilişkili olarak ara yüzey bölgesinin ve betonun dayanımı azalır. Kristalin boyutu ve

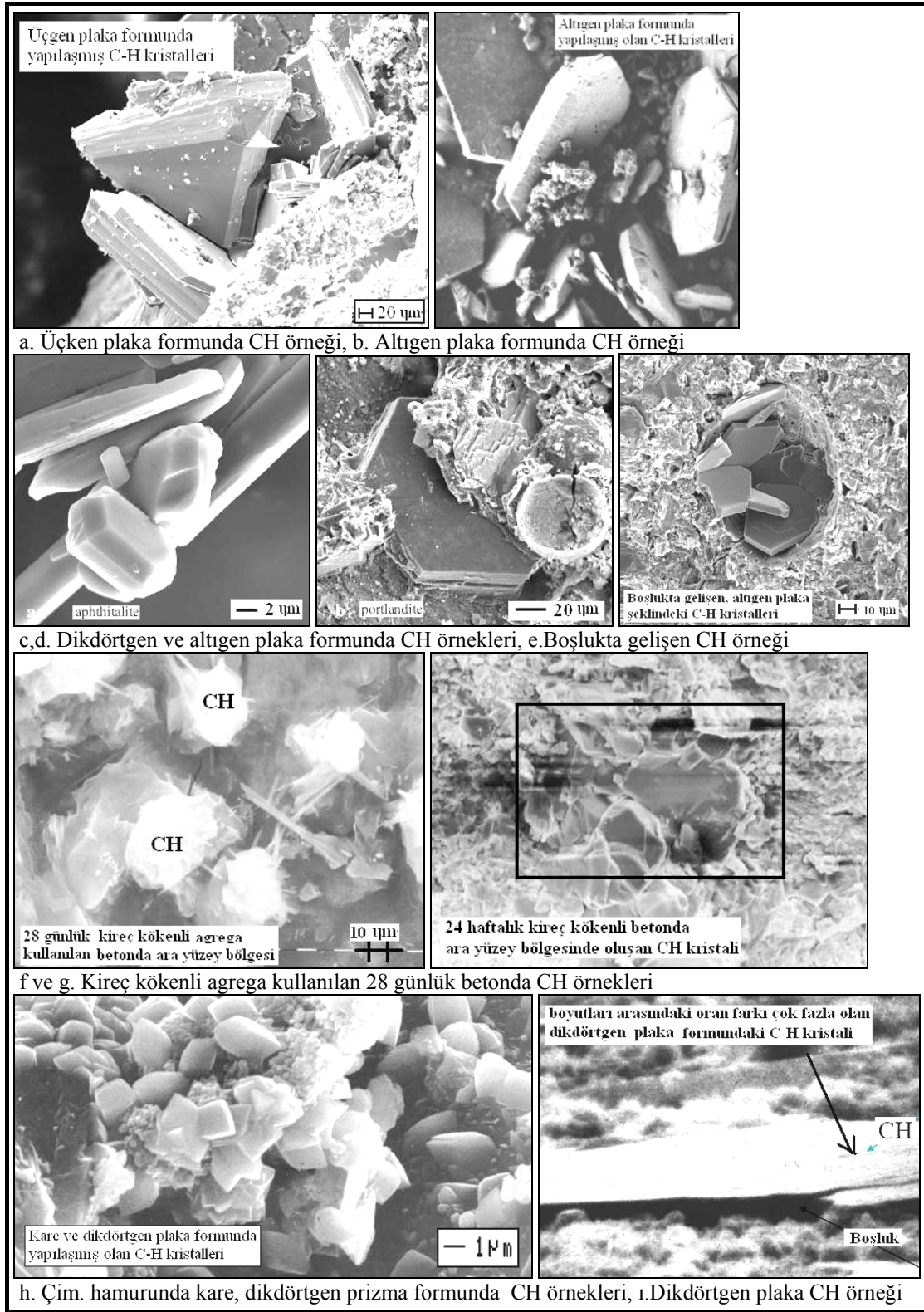
oranı hidratasyon yaşı ve dayanım ile ters orantılıdır. Morfolojik olarak; kristalin üç boyutu arasındaki ölçüsel farklılaşmanın azalması; dayanımı artırır.



Resim 2.2. Hidratasyon sonucunda oluşmuş kristaller ve morfolojik yapılaşmalarına ilişkin örnekler [9, 10, 117]



Resim 2.3. “İdeal” olarak tanımlanan ve ponza kumlu harçta oluşan ara yüzeyde oluşmuş CH kristallerinin morfolojik yapılaşmasına örnekler [42, 51]



Resim 2.4. CH kristallerinin morfolojik yapılaşmalarına ilişkin olarak literatürden elde edilmiş örnekler [9, 10, 36, 118]

2.5.2. CH boyutu

Muethel'in araştırmalarına göre; CH içeriğinin ve boyutunun artması, geçirgenliği artırır. Ayrıca; çatlak, boşluk, birleşim yerleri gibi betonda hassas sayılan bölgelerde alkaliniteyi azaltır ve alkali agrega reaktivitesi riski artar.

Jiang'ın yaptığı araştırma sonuçlarına göre; ara yüzey bölgesinde yer alan CH kristallerinin miktarı ve boyutu; çimento hamurunda olan kristallerden fazladır. Ayrıca, agrega yüzeyinden, çimento hamuruna doğru, her iki değer de hiyerarşik bir azalma vardır [33, 34]. Literatüre göre; CH kristallerinin iyi hidrate olmuş, çimento hamurunda ortalama boy dağılımı 1 μm 'dir. Birçok araştırmacıya göre ise normal betonda, ara yüzey bölgesinde tipik CH boyutu; 10-15 μm civarındadır [32].

Gao ve ark.'nın agrega olarak yüksek fırın cürufu kullanarak ürettikleri betonlarda, ortalama CH boyutu; (3-4) μm , en büyük CH boyutunun ise; 5 μm olduğu belirlenmiştir. CH boyutu ve morfolojik yapılaşmasına (Bkz. Resim 2.3, a, s.35) göre; agrega – çimento hamuru arasındaki etkileşim nedeniyle, hidrasyonun çok güçlü geliştiği ve bunun ara yüzey bölgesinin çok sıkı yapılaştığının bir göstergesi olduğu belirtilmiştir [42]. Aydın'ın araştırmasında; ponza kumu kullanılarak harç geliştirilmiş, kumu çevreleyen ara yüzey bölgesinden TEM görüntüleri (Bkz. Resim 2.3, b, s.35) alınmıştır ve 5-6 μm CH boyutu belirlenmiştir [51].

Özellikle 0,3 ve altında W/C oranının kullanılması; ara yüzey bölgesinde W/C oranını azaltarak, ortalama CH boyutunun küçülmesine, bunun sonucunda, betonun daha sıkı ve daha geçirimsiz bir yapıda olmasına neden olur [9, 10].

Jiang, Tasong ve ark.'na göre; genelde, CH kristallerinin uzun olan boyutu, ara yüzey bölgesine paralel olarak yönelir. Bu yönelmenin oranı "CH indeksi" ile ifade edilir. Ara yüzey bölgesinden çimento hamuruna doğru gidildikçe, CH indeksi düşer. Bu indeksin düşük olması; CH kristallerinin, belirli bir yönelmesinin olmadığını, kristalin her iki boyutu arasındaki farkın azaldığını ve betonun dayanımının yüksek olduğunu ifade eder [33, 119].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

3.1.1. Çimento bileşeni

Tezde; çimento seçiminde; ilgili standarda uygunluk aranmış ve 42,5 Mpa basınca sahip, normal erken dayanımlı, katkısız portland çimentosu kullanılmıştır [120]. Tezde kullanılan çimento bileşeni (Çizelge 3.1); “Mardin Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.”den elde edilmiştir. Çimentonun kalitesinde değişiklik olmaması için, gerekli çimento miktarı iş programına uygun olacak şekilde, harmanlanarak, nem içeriği ve dayanımının değişmemesi sağlanarak depolanmıştır [121].

Çizelge 3.1. Kullanılan çimentonun üretici firmadan elde edilen teknik özellikleri

PORTLAND ÇİMENTOSU (TS EN 197-1 CEM I 42,5 N)					
DAYANIM ÖZELLİKLERİ		FİZİKSEL ÖZELLİKLER		KİMYASAL ÖZELLİKLER	
2 günlük basınç day.	31,0 Mpa	Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,12	Erimez kalıntı (%)	0,55
7 günlük basınç day.	39,5 Mpa	Priz başlangıcı (saat)	2,15	SO ₃ (%)	2,38
28 günlük basınç da.	46,5 Mpa	Priz bitişi (saat)	3,35	Cl (%)	0,0085
		Hacim sabitliği (mm)	1,2	Kızdırma kaybı (%)	2,65
		Özgül yüzey (cm ² /g)	3395		

3.1.2. Agrega bileşeni

Tezde, ince agrega olarak; dere kumu, iri agrega olarak; dere çakılı ve skoria kullanılmıştır. Skorianın kimyasal içeriği, üreticiden (Mardin Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.) edinilen bilgilere göre, Çizelge 3.2’te sunulduğu gibidir.

Çizelge 3.2. Kullanılan skorianın üretici firmadan elde edilen kimyasal özellikleri

KİMYASAL İÇERİK	KİMYASAL İÇERİK ORANLARI (%)
SiO ₂ (toplam - total)	45,06
Erimez Kalıntı (Insoluble residue)	59,53
Al ₂ O ₃	13,34
Fe ₂ O ₃	12,80
CaO	12,05
MgO	7,41
SO ₃	0,36
Kızdırma kaybı (Loss on ignition)	1,01
Na ₂ O	2,88
K ₂ O	1,32

Bu araştırmada; agreganın özelliklerinin belirlenmesi için; Çizelge 3.3'te sunulan deneysel yöntem takip edilmiş ve Çizelge 3.4'te sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 3.3. Agreganın özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneysel yöntemin detayları, kullanılan standartlar ve verilerin ayrıntılı olarak sunulduğu tez bölümleri

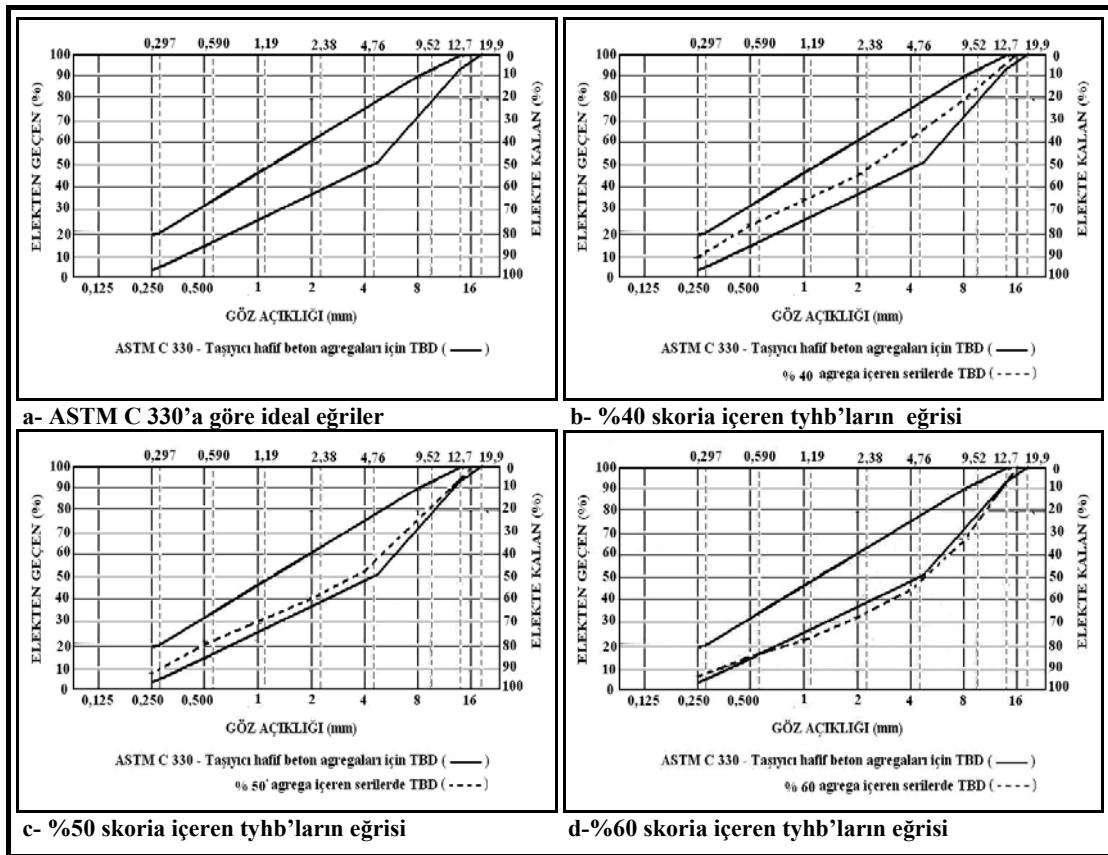
No	YAPILAN AGREGA DENEYLERİN ADLARI VE SEMBOLLERİ	Agrega deneylerinde kullanılan prosedürler, standartların kodları ve tezde kullanılan kaynak numaraları	Ayrıntılı verilerin sunulduğu tez bölümleri
AGREGA DENEYLERİ REF. STANDART; “TS 706 EN 12620” [122] ve “TS 1114 EN 13055-1” [148]			
1.	Agregalardan numune alma ve laboratuvar numunelerinin azaltılması	“TS EN 932-1” “TS EN 932-2”	[124] [125]
2.	Agregaların en büyük tane boyutunun ve tane boyutu dağılımının belirlenmesi	“TS EN 206-1” “ASTM C 330” “TS 3530 EN 933-1” “TS EN 933-2”	[19] [126] [127] [128] EK-1, s.196-197
3.	Agregaların gevşek yığın yoğunluğunun belirlenmesi	“TS 1114 EN 13055-1” “TS EN 1097-3”	[123] [129] EK-1, s.197-198
4.	Agregaların su muhtevasının belirlenmesi	“TS 1114 EN 13055-1” “TS EN 1097-5”	[123] [130]
5.	Agregaların tane yoğunluğu ve su emme değerlerinin belirlenmesi	“TS 1114 EN 13055-1” “TS EN 1097-6”	[123] [131] EK-1, s.198
6.	Agregaların şekil indisinin belirlenmesi	“TS 3814 EN 933-4”	[132] EK-1, s.198

Çizelge 3.4. Tezde kullanılan agregaların özelliklerini belirlemek için yapılan agreganın deneyleri ve elde edilen deney sonuçları

AGREGA DENEYLERİ							
Üretimde kullanılan agreganın tipleri	En büyük tane boyutu (mm)	Tane boyutu dağılımı	Gevşek yığın yoğunluğu (Mg/m ³)	Su muhtevası (%)	Tane yoğunluğu (Mg/m ³)	24 saat sonunda su emme değerleri (%)	Şekil indis
İnce agreganın (dere kumu)	4	Bkz. Şekil 3.1	1,707	1,96	2,538	2,538	-
Normal iri agreganın (dere çakılı)	16		1,659	1,54	2,583	1,389	11
Tyhb üretimi için hafif agreganın (skoria)	16		0,864	0,89	1,819	10,884	10

Dayanımı ve dayanıklılığı yüksek hafif agregalar; düşük “en büyük tane boyutu değerine”, düzgün “tane boyutu dağılımına”, sahip olmalıdır [15]. Tezde kullanılan iri agregaların en büyük tane boyutu değeri; 16 mm’dir. Agreganın karışımlarının, ideal tane boyutu dağılımına sahip olmaları sağlanmıştır (Şekil 3.1). Ayrıca incelik modülleri de (f: 63 mikronluk elekten geçen ince madde kütlesi) üretim için idealdir.

Skoria, elde edilen gevşek yığın ve tane yoğunluğu bakımından, TS EN 206-1 göre; “hafif agrega” sınıfına dahildir. Skorinin yarım saat daldırma sonunda su emme değeri; %7,4; 24 saat daldırma sonunda, %10,9’tür. Bu değerler arasındaki farkın az olması, kapalı gözeneklerin çok olduğunu gösterir. Literatürde araştırılan skoriaların 24 saat suda bekletilmesi sonucunda ölçülen değerleri; % (6,3-37) ve yoğunlukları (1,1-1,8) Mg/m³ gibi farklı uçlardadır [49, 133-135]. Bu doğrultuda, Tezde kullanılan skoria için; su emme değeri düşük, yoğunluğu fazla, dayanım ve dayanıklılığı yüksek, yüksek dayanımlı “tyhb” üretimi için uygun bir agregadır denilebilir.

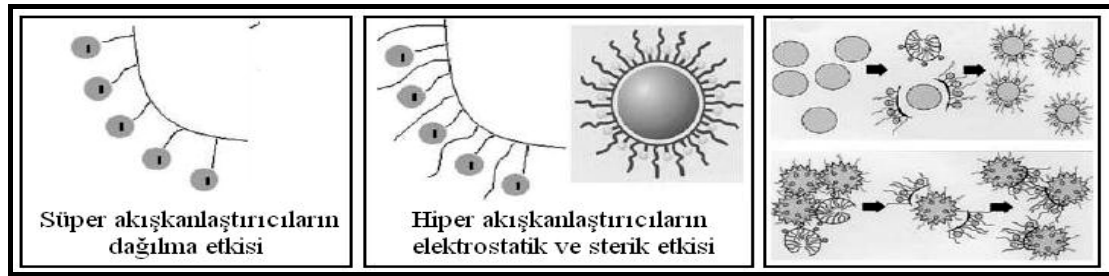


Şekil 3.1. Taşıyıcı hafif betonlar için önerilen ideal agrega tane boyu dağılımı eğrisi ve tezde kullanılan agregaların dağılım eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil indisi değeri (SI) beton özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir [72]. Tezde kullanılan normal iri agregaların bu değeri 11, skorinin ise 10 olarak bulunmuştur. TS 706 EN 12620'ye göre; bu tezde kullanılan her iki agreganın da şekil indisi kategorisi; aynı ve bu sınamada olabilecek en ideal kategori olan (SI₁₅) tir

3.1.3. Katkı bileşeni

Hiper akışkanlaştırıcılar; diğer akışkanlaştırıcıların, betonda oluşturduğu elektriksel etkinin yanı sıra, uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde, tanecikler çevresinde birbirini iten fiziksel bir etki ile (sterik etki) ince tanecikli malzemeyi dağıtıp, betonu daha kararlı hale getirir (Şekil 3.2). Bu malzeme; bileşenler tarafından emilerek, yüzey gerilimini azaltır. Bu da betona yüksek oranda su indirgeme, daha fazla akışkanlık, yüksek ayrışma direnci, oldukça homojen bir yapı, vibrasyon gerektirmeden uygulama gibi özellikler kazandırır [136-138].



Şekil 3.2. Süper ve hiper akışkanlaştırıcıların etki mekanizması [138]

Tezde; “YKS” firmasının, prefabrik eleman üretimi için ürettiği, polikarboksilat kökenli, “TS EN 934-2”e uygun, “Glenium ACE 32” [139] adlı hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Katkının, normal agregalar ve taş tozu gibi malzemeler kullanılarak, yüksek akışkanlık kabiliyetine sahip olan “reodinamik” ve “kendiliğinden yerleşen” beton tiplerinde yapılan uygulamalarda, çok olumlu sonuçlar verdiği bildirilmiştir [140]. Ancak, skoria ile yüksek dayanımlı tyhb üretimindeki performansına ilişkin veri yoktur. Tezin amaçlarından biri de bu veriyi elde etmektir.

3.1.4. Karışım suyu bileşeni

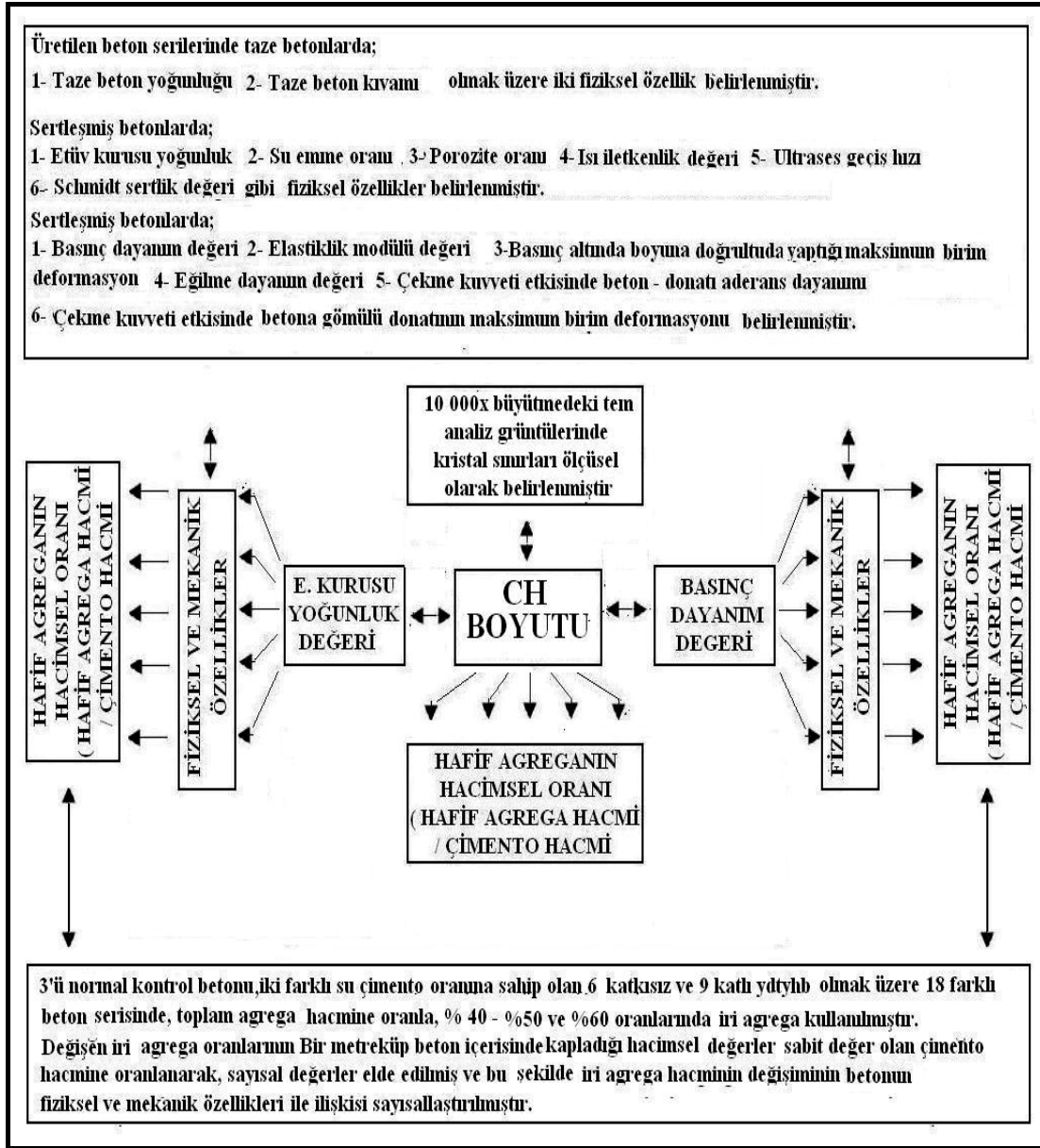
TS EN 206-1’e ve TS 1247’ ye göre; betonda karışım suyu olarak kullanılabilen, en iyi su, içilebilir nitelikteki sulardır. Bu suların beton üretiminde kullanımı durumunda, karışım suyu deneylerinin yapılmasına gerek yoktur [19]. Tezde, karışım suyu olarak, içme suyu kullanıldığı için, herhangi bir analiz yapılmamıştır.

3.2. Yöntem ve Yöntemin Tezin İçeriğine Yansıması

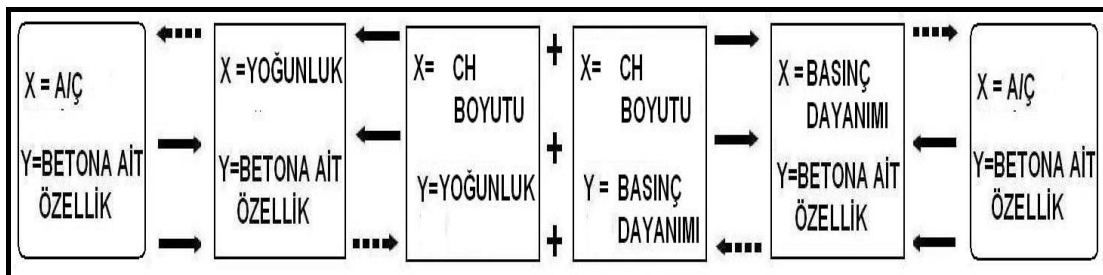
3.2.1. Yöntem özeti

Tezin yöntemi; Şekil 3.3'te ve Şekil 3.4'te özetlendiği gibidir. Tezde geliştirilen bu yöntem ana hatlarıyla, aşağıda sunulduğu gibidir.

1. Agregada deneyleri yapılmış (Bkz. Bölüm 3.1.2, s.38). Üretim çeşitliliği gözetilerek, karışım oranları belirlenmiş, karışım hesapları yapılmış ve beton üretimi gerçekleştirilmiştir (Bkz. Bölüm 3.2.2, s.44).
2. Betonun özellikleri belirlenmiştir (Bkz. Bölüm 3.2.3, s.47 ve Bölüm 4.1, s.61).
3. TEM analizleri yardımıyla, ara yüzey bölgesinin kristal morfolojisi; “CH boyutu sayısallaştırılarak”, sayısal verilere dönüştürülmüştür. Ayrıca CH kristallerinin biçimi yarı analitik düzeyde irdelenmiştir (Bkz. Bölüm 3.2.4, s.56, Bölüm 4.2, s.98).
4. Üretim bileşenlerinin, beton özellikleri ve CH boyutu ile sayısal olarak ilişkilendirilebilmesi için; sabit değer olan çimento hacimsel oranları, değişken değer olan agregada hacimsel oranlarına bölünmüş ve her beton serisini temsil eden “agregada/çimento” hacimsel oranları (A/Ç) elde edilmiştir.
5. Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini temsil eden iki önemli özellik röper noktası olarak kullanılmıştır. Bunlar; fiziksel özellikleri temsilen; “etüv kurusu yoğunluk” ve mekanik özellikleri temsilen; “basınç dayanım değeri”dir.
6. Agregada / çimento hacimsel oranları; betonun fiziksel özellikleri ile sayısal olarak ilişkilendirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.1, s.61).
7. Agregada / çimento hacimsel oranları; CH boyutu ile sayısal olarak ilişkilendirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.2, s.98).
8. Tüm deney sonuçları; etüv kurusu yoğunluk ile sayısal olarak ilişkilendirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.3, s.105).
9. Tüm deney sonuçları basınç dayanım değeri ile sayısal olarak ilişkilendirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.4, s.129).
10. CH boyutu; etüv kurusu yoğunluk ile sayısal olarak ilişkilendirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.5, s.162).
11. CH boyutu; basınç dayanım değeri ile sayısal olarak ilişkilendirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.6, s.164).



Şekil 3.3. Tezde kullanılan yöntem özeti



Şekil 3.4. Tezin yöntemi kapsamında sayısal ilişkilerin kurulması

12. Sayısal ilişkilerin kurulmasında; Şekil 3.4'te özetlenen yöntem geliştirilmiştir. Şekilde grafiklerin ortalarında yer alan oklar; Tezde kurulan sayısal ilişkilerin yönlerini belirtmektedir. Kesikli oklar ise; Tezden elde edilen eşitliklerin ters çevrilerek ("y"den "x"i bularak veya "y" değerini "x"; "x" değerini de "y"ye dönüştürerek) kullanılabileceğini göstermektedir.

13. Tezde; bu ilişkiler ağı, ilgili grafikler ve bu ilişkilerin ağıının tez formatına uygun olarak sunumu organize edilmiştir (Bkz. Bölüm 3.2.5, s.57).

14. Literatürden ve Tezden elde edilen sayısal ilişkiler (Bkz. EK-4, s.211-221 ve Bölüm 4.3-4.4 s.105-160) aracılığıyla; Tezde üretilen tyhb'ların özellikleri, diğer beton tiplerine ile kıyaslanarak irdelenmiştir.

Şekil 3.4'te özetlenen ve türetilebilecek sayısal ilişkilere bir örnek vererek somutlaştırabiliriz. Örneğin; CH boyutu ile betonun özelliklerini temsilen; taze beton yoğunluğu, betonun fiziksel özelliklerini temsilen; etüv kurusu yoğunluğu ilişkilendirmek istediğimizi varsayalım. Bu durumda (Bkz. Şekil 5.4, s.171);

- Tem analizlerinden elde edilen CH boyunu kullanarak; üretilen betonun etüv kurusu yoğunluk değerini tahmin edebiliriz (kesintisiz oklar).
- Elde edilen etüv kurusu yoğunluk değerinden veya agrega çimento hacimsel oranından; taze beton yoğunluğunu tahmin edebiliriz (kesintisiz oklar).
- Ayrıca; Elde edilen taze beton yoğunluk değerini ilgili eşitlikte "y"nin olduğu yere koyarak agrega çimento hacimsel oranını tahmin edebiliriz (kesikli oklar).

3.2.2. Karışım oranlarının belirlenmesi ve karışım hesaplarının yapılması

Karışım hesaplarının yapılabilmesi için; karışım oranlarının belirlenmesi gerekir. Birçok standarda göre; malzemenin karışım oranları, laboratuvar deneme karışımları ile saptanmalı ve uygulama amaçlarına göre ayarlanmalıdır [19, 141-143]. Bu doğrultuda Tezde; en az minimum çökme (2,5 cm) ve yüksek dayanım hedeflenerek öncelikle karışım oranları belirlenmiştir. Nihai karışım oranlarının belirlenebilmesi ve karışım hesaplarının yapılabilmesi için ise deneme karışımları hazırlanmış ve sınanmıştır. Nihai karışım oranları; "Çizelge 3.5"te sunulduğu gibidir.

Çizelge 3.5. Üretilen beton serileri, karışım oranları ve bileşen miktarları

N	ÜRETİLEN O SERİLER	Kullanılan agrega tipi ve tüm agr. içerisindeki hacimsel oranı (%)	Hiper akış. çimentoya göre yüzdesi - 1 m ³ 'teki miktarı (%) - (kg)	Su / çimento oranı (W/C)	Çimento miktarı (dozajı) (kg)	Çimento hacmi (dm ³)	İri agrega miktarı (kg)	İri agrega hacmi (dm ³)	İnce agrega (dere kumu) miktarı (kg)	İnce agrega (dere kumu) hacmi (dm ³)	Net karışım su + hiper akışkan.. miktarı (kg)	İri agrega doyma su + hiper akışkan.. miktarı (kg)	İnce agrega doyma su + hiper akışkan.. miktarı (kg)
1	KS040 - 37,5	çakıl, 40	-	37,5	500	160,256	673,117	260,898	994,019	391,346	187,5	9,424	14,910
2	KS050 - 37,5	çakıl, 50	-	37,5	500	160,256	841,395	326,122	828,350	326,122	187,5	11,780	12,425
3	KS060 - 37,5	çakıl, 60	-	37,5	500	160,256	1009,67	391,346	662,681	260,898	187,5	14,135	9,940
4	KS40 - 37,5	skoria, 40	-	37,5	500	160,256	474,834	260,898	994,019	391,346	187,5	35,280	14,910
5	KS50 - 37,5	skoria, 50	-	37,5	500	160,256	593,542	326,122	828,350	326,122	187,5	44,100	12,425
6	KS60 - 37,5	skoria, 60	-	37,5	500	160,256	712,250	391,346	662,681	260,898	187,5	52,920	9,940
7	KS40 - 45	skoria, 40	-	45	500	160,256	447,534	245,898	936,869	368,846	225	33,256	14,053
8	KS50 - 45	skoria, 50	-	45	500	160,256	559,417	307,372	780,725	307,372	225	41,565	11,711
9	KS60 - 45	skoria, 60	-	45	500	160,256	671,300	368,846	624,580	245,898	225	49,880	9,370
10	S40 - I	skoria, 40	1,00 - 5,00	30	500	160,256	502,134	275,898	1051,169	413,846	150	37,310	15,768
11	S40 - 1,25	skoria, 40	1,25 - 6,25	30	500	160,256	502,134	275,898	1051,169	413,846	150	37,310	15,768
12	S40 - 1,50	skoria, 40	1,50 - 7,50	30	500	160,256	502,134	275,898	1051,169	413,846	150	37,310	15,768
13	S50 - I	skoria, 50	1,00 - 5,00	30	500	160,256	627,670	344,872	876	344,872	150	46,640	13,140
14	S50 - 1,25	skoria, 50	1,25 - 6,25	30	500	160,256	627,670	344,872	876	344,872	150	46,640	13,140
15	S50 - 1,50	skoria, 50	1,50 - 7,50	30	500	160,256	627,670	344,872	876	344,872	150	46,640	13,140
16	S60 - I	skoria, 60	1,00 - 5,00	30	500	160,256	753,200	413,846	700,780	275,898	150	55,960	10,510
17	S60 - 1,25	skoria, 60	1,25 - 6,25	30	500	160,256	753,200	413,846	700,780	275,898	150	55,960	10,510
18	S60 - 1,50	skoria, 60	1,50 - 7,50	30	500	160,256	753,200	413,846	700,780	275,898	150	55,960	10,510

Tezde karışım oranları belirlenirken sabit olarak alınan değerler şunlardır;

- Çimento tipi (PÇ42,5),
- Çimento dozajı (500 kg/m^3),
- Tane boyu dağılımları (normal beton ve tyhb'ların tane boyu dağılımları)
- İri agregaların şekil indisleri (SI_{15})
- İri agregaların en büyük tane boyutu değerleri ($D_{\text{en çok}} = 16 \text{ mm}$, $d_{\text{en çok}} = 4 \text{ mm}$)
- İnce agrega tipi ve özellikleri (Kum, $D_{\text{en çok}} = 4 \text{ mm}$, $d_{\text{en çok}} = 0,163 \text{ mm}$)
- Hiper akışkanlaştırıcı tipi (GLENİUM ACE 32)

Tezde karışım oranları belirlenirken değişken olarak alınan değerler şunlardır;

- İri agrega tipi (normal ve hafif),
- İri agrega, kullanım oranları (%40, %50, %60, paralel olarak tane boyu dağılımı değerleri de),
- Hiper akışkanlaştırıcı katkı oranları (çimento'ya göre; %0; %1; %1,25; %1,50),
- Katkısız yüksek dayanımlı tyhb'larda, su / çimento oranları (% 37,5 ve %45),
- Tüm yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlarda (%30, % 37,5 ve %45).

Bu doğrultuda Tezde üretilen ve sorgulanan betonlar aşağıdaki gibidir;

- Üç farklı iri agrega hacimsel oranına sahip, normal iri agrega (çakıl) ve normal ince agrega (dere kumu) ile referans niteliğindeki, üç adet normal katkısız beton,
- Üç farklı iri agrega oranı, iki farklı su/çimento oranına sahip, iri agrega olarak skorla ve ince agrega olarak kum kullanılan 6 adet katkısız yüksek dayanımlı tyhb,
- Ayrıca; tek su/çimento oranı, üç farklı iri agrega hacimsel oranı ve üç farklı hiper akışkanlaştırıcı oranı ile 9 adet katkılı, yüksek dayanımlı tyhb serisi üretilmiştir.
- Toplamda; 3 normal, 15 yüksek dayanımlı tyhb serisi üretilmiştir.

Karışım hesapları yapılırken “mutlak hacim” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre hafif agregalara, üretimde kullanılmadan önce 10 dakika su emdirilmelidir. Ancak; yüksek dozajda çimento kullanıldığı ve $(30-35) ^\circ\text{C}$ 'lik ortam sıcaklığında beton üretimi gerçekleştirildiği için, bu sürenin yeterli olmayacağı öngörülmüş ve ilgili hesaplamalarda, 30 dakikalık su emme değeri kullanılmıştır.

“Mutlak hacim yöntemi”ne göre; serbest karışım suyu miktarı belirlendikten sonra, malzemeler kuru halde karışıma giriyorlarsa, doyma sularını eklemenin veya malzemeleri doymun halde beton üretiminde kullanmanın; dayanım açısından bir sakıncası yoktur [72]. Çünkü doyma suyu, süreç içerisinde malzemenin bünyesinden, çevresel neme bağılı olarak, buharlaşarak çıkar.

Hafif agregalı betonların üretim sürecinde, hafif agregaların, değişkenlik gösterme riski taşıyan, nem oranları sürekli kontrol altında tutulmalıdır. Aksi durumda; istenilenden farklı nitelik ve performansa sahip beton üretme riski çok fazladır [144]. Bu nedenle, üretimde kullanılan skori; etüv kurusu yoğunluğa gelene kadar kurutulmuş ve doyma suları sonradan eklenmiştir. Bu durum doğal olarak karışım hesaplarına ve üretim sürecine yansımıştır.

3.2.3. Deneysel yöntem (beton özelliklerinin belirlenmesine) ilişkin detaylar

Tezin yöntemi oluşturulurken; deneysel yöntem için; “TS EN 206-1” [19] standardı; uygulamada yer alan tüm beton çeşitlerini (normal, hafif gibi) kapsadığı ve gerekli olan yerlerde ulusal standartları öneren esnek bir standart olduğu için referans olarak belirlenmiştir. Tezde, bu standartta önerilen diğer standartlar, gerekli görülen yerlerde ulusal standartlar ve uluslararası standartlardan yararlanılmıştır. Tezde kullanılan deneysel yöntemle ilişkin detaylar; Çizelge 3.6’da, özetlenmiştir. Ayrıca; beton özelliklerini belirlemek için yapılan deney adları, üretilen numune tip ve boyutları; Çizelge 3.7’de özetlendiği gibidir.

Yüksek dayanımlı betonların yapı tasarımında kullanılan özellikleri; normal betonda standart olarak kabul edilen 28 gün yerine 56. günde belirlenmelidir. Bu süre, düşük W/C oranına sahip olan betonlarda kullanılan yüksek dozdeki çimentonun veya mineral katkıların aktivitesinin ölçülebilmesi açısından şarttır [91].

Yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar ile ilgili olarak yapılan ciddi araştırmalarda, hedef dayanım değerinin belirlenmesi gereken yaşın 90. gün olduğu bildirilmiştir [16]. Bu betonlar ile ilgili birçok araştırmada, hafif agregalı betonların, uzun dönem

performanslarının, normal agregalı betonlardan farklı olduğu belirtilmiş, 28 yerine; 56, 60, 90, 100 gün kür uygulanmıştır [9, 10, 98, 145, 146].

Bu doğrultuda, Tezde, yüksek dayanımlı tyhb'ların uzun dönem performanslarının sorgulanması için; numuneler 56 gün kirece doygun suda kür edilmiş ve 90. güne kadar da doğal ortamda bekletildikten sonra deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.6. Beton özelliklerinin belirlenmesine ilişkin deneysel yöntemin detayları, kullanılan standartlar ve verilerin ayrıntılı olarak sunulduğu tez bölümleri

DENEYSEL YÖNTEM İÇİN REFERANS STANDART; “TS EN 206-1” [19]				
No	BETON ÖZELLİKLERİNİ BELİRLEMEK İÇİN YAPILAN DENEYLERİN ADLARI VE SEMBOLLERİ	Deneysel yöntemde kullanılan prosedürler, standartların kodları ve tezde kullanılan kaynak numaraları	Ayrıntılı verilerin sunulduğu bölümler	
TAZE BETON DENEYLERİ				
1.	Taze betondan numune alma ve numunelerin hazırlanması	• “TS EN 12350-1”	[147]	
2.	Taze beton yoğunluğunun belirlenmesi	• “TS EN 12350-6”	[148]	EK-2, s.199
3.	Taze beton kıvamının (çökme mik.) belirlenmesi	• “TS EN 12350-2”	[149]	
SERTLEŞMİŞ BETONUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ				
1.	Sertleşmiş beton deney numunelerinin hazırlanması, bakımı ve kürü	• “TS EN 12390-1” • “TS EN 12390-2”	[150] [151]	
2.	Sertleşmiş betonlarda etüv kuru su yoğunluk, su emme oranı ,	• “TS EN 12390-7,”	[152]	EK-2, s.199-200
3.	Porozite oranı ve	• Literatür		
4.	birim hacim ağırlığı değerlerinin belirlenmesi			
6.	Sertleşmiş betonlarda ısı iletkenlik değerlerinin belirlenmesi	• “TS ISO 8302” • “TS 415”	[153] [154]	EK-2, s.200-201
7.	Sertleşmiş betonlarda ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi	• “BS 1881: Part 203”	[155]	EK-2, s.201
8.	Sertleşmiş betonlarda schmidt sertlik değerlerinin belirlenmesi	• “ASTM C 805”	[156]	EK-2, s.201
SERTLEŞMİŞ BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ				
1.	Sertleşmiş betonlarda basınç dayanım değerlerinin belirlenmesi	• “TS EN 12390-3” • “TS EN 12390-4”	[97] [157]	EK-2, s.202
2.	Sertleşmiş betonlarda elastiklik modülü değerlerinin belirlenmesi	• “ASTM C469”	[158]	EK-2, s.202
3.	Sertleşmiş betonlarda basınç gerilimi altında gerilim – boyuna maksimum birim deformasyon ilişkisinin belirlenmesi	• “ASTM C469”	[158]	EK-2, s.203
4.	Sertleşmiş betonlarda eğilme dayanım değerlerinin belirlenmesi	• “TS EN 12390-5”	[159]	EK-2, s.203
5.	Sertleşmiş betonlarda, çekme kuvveti etkisinde beton – donatı aderans dayanım değerlerinin belirlenmesi	• Literatür + • araştırmacının yorumu ⁰ • (Bkz. Şekil 3.8 (s. 54-55))	[103, 105, 106, 109, 111, 113-115, 160-162]	EK-2, s.204
6.	Aderans dayanımı belirlenirken, betona gömülü olan donatının çekme kuvveti etkisinde maksimum birim deformasyonu	• “TS 138 EN 10002-1” • “TS 708” • Literatür + • araştırmacının yorumu	[163] [164]	EK-2, s.204-209
0 = Tüm deneysel prosedürler, ana yönetime bağlı kalınmakla birlikte araştırmacı tarafından yorumlanarak kullanılmıştır. Ancak, ilgili deneysel prosedürü olmayan ve literatürde doğrudan referans olabilecek kaynağın bulunmadığı durumlarda, alakalı olabilecek bir çok araştırma incelenmiş ve araştırmacının yorumu katılarak, deneysel yöntem tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Yukarıdaki çizelgede, bu tür durumlarda; “literatür + araştırmacının yorumu” ibaresi kullanılmıştır.				

Çizelge 3.7. Tezde, beton özelliklerini belirlemek için kullanılan numune tipleri, üretilen numune sayıları, yapılan deney, ölçüm ve hesaplamalar

SORGULANAN BETON ÖZELLİĞİ	NUMUNE BİÇİMİ ve NUMUNE BOYUTLARI (mm)	KULLANILAN NUMUNE SAYISI*
Etüv kuru yoğunluk, Su emme ve Porozite oranı	Küp (100x100x100)	54 (18x3)
Isı iletkenlik değeri	Kare plaka (240x240x45)	54 (18x3)
Ultrases geçiş hızı	Silindir (150x300),	54 (18x3)
Schmidt sertlik değeri	Küp (200x200x200)	54 (18x3)
Basınç dayanım değeri, Elastiklik modülü değeri, Maksimum birim deformasyon	Silindir (150x300)	54 (18x3)
Eğilme dayanım değeri	Kiriş (100x100x500)	54 (18x3)
Aderans dayanımı, Donatıda max.birim deformasyon	Küp (150x150x150)	54 (18x3)
- Tüm sertleşmiş beton deneyleri için toplam olarak üretilen numune sayısı = 324 adettir. - Toplamda 432 olmak üzere; 324 tahribatlı deney, 108 tahribatsız deney yapılmıştır. - Tahribatsız deneyler yapılırken aşırı sapma gösteren sonuçlar hesaplamalara dahil edilmemiştir. - Bu doğrultuda tahribatsız deney sonuçlarının elde edilebilmesi için; 486 ultrases geçiş hızı ölçümü, 1296 schmidt sertlik değeri ölçümü olmak üzere 1782 ölçüm alınmıştır. - Beton özelliklerini belirlemek için; tahribatlı deneyler için 594 ve tahribatsız deneyler için 108 olmak üzere toplamda; 702 hesaplama yapılmıştır.		

Taze beton yoğunluğu; taze beton kütlelerinin, hacme bölünmesi sonucunda elde edilmiştir (Eş. 3.1). Kıvam ise; çökme miktarı ölçülerek belirlenmiştir (Eş. 3.2)

$$p_{tby} = \frac{m_{tbk}}{V_{ök}} \quad (3.1)$$

$$C_m = l_{çh} - l_{çb} \quad (3.2)$$

Tezde etüv kuru yoğunluk; Eş.3.3 kullanılarak elde edilmiştir.

$$p_{eky} = \frac{m_{ekk}}{V_{ö}} \quad (3.3)$$

Su emme oranı ve porozite oranı değerleri; Eş.3.4-Eş.3.7 kullanılarak elde edilmiştir.

$$p_{sd} = \frac{m_{sdykk}}{V_{ö}} \quad (3.4)$$

$$w_{seo} = \frac{(p_{sd} - p_{eky})}{p_{eky}} \quad (3.5)$$

$$V_b = \frac{(m_{sdykk} - m_{ekk})}{p_{20}} \quad (3.6)$$

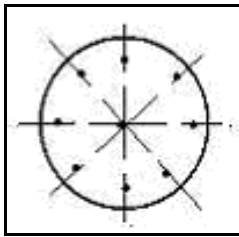
$$g = \frac{V_b}{V_k} \times 100 \quad (3.7)$$

Tezde ısı iletkenlik değerleri; Eş.3.8'den yararlanılarak elde edilmiştir.

$$\lambda = \frac{Q \times l_1}{2 \times A_1 \times \Delta T} \quad (3.8)$$

Ultrases geçiş hızları; Eş.3.9 kullanılarak elde edilmiştir. Bu ölçümler; Şekil 3.5'te belirtilen noktalardan, başlıklanan, gres yağı sürülen numunenin karşılıklı yüzeyleri işaretlenerek alınmıştır. Her üçlü seriye geçişte ve gerek görüldükçe; cihaz kalibre edilmiştir. Her bir numune için; 9 ölçüm alınmış, büyüklük dağılımına göre dizilmiştir. İki üst, bir alt değer çıkarıldıktan sonra 6 ölçümün ortalaması alınmıştır.

$$V_u = \frac{L_u}{t} \times 10 \quad (3.9)$$



Şekil 3.5. Ultrases geçiş hızlarının belirlenebilmesi için silindir numunelerde işaretlenerek, ölçüm alınan yerler

Schmidt sertlik değerlerinin belirlenmesi için; küp numunelerin dört yüzeyinden ölçüm alınmıştır. Boşluğa, agregaya denk gelerek veya vuruş açısının değişmesi nedeniyle aşırı sapma gösteren ölçümler alınmamıştır. Bir numuneden alınan ölçüm sayısı 26'dır. Sonuçlar; büyüklük dağılımına göre dizilmiş; seride sapma gösteren 3 alt ve 3 üst değer çıkarılarak 20 değerin ortalaması alınmıştır.

Basınç dayanım değerlerinin belirlenebilmesi için; 3.10 nolu Eş.’ten yararlanılmıştır.

$$f_{sil} = \frac{F_b}{A_b} \quad (3.10)$$

Tezde “sekant modülü” olarak tanımlanan elastiklik modülü değerleri; Eş. 3.11-3.15 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan %40 gerilim değeri; enterpolasyon yöntemi ile bulunmuştur.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

$$\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{d_2}{L_0} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{d_1}{L_0} \quad (3.15)$$

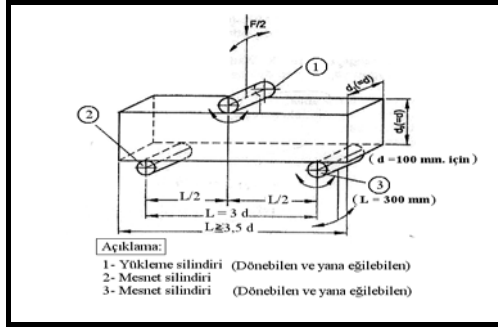
Basınç gerilimi altında maksimum birim deformasyon değerlerinin elde edilebilmesi için; Eş.3.15 – Eş.3.17’den yararlanılmıştır. Değerler belirlenirken kamera kullanılmıştır. Kameraya alınan deney görüntüleri; yavaş çekimde izlenerek, son deformasyon değerlerinin tam olarak belirlenmesi sağlanmıştır.

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{md} - \varepsilon_1 \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{md} = \frac{d_{md}}{L_0} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{d_1}{L_0} \quad (3.15)$$

Eğilme dayanım değerleri; Şekil 3.6’da sunulan düzenek yardımıyla ve Eş.3.18 – Eş.3.19 kullanılarak elde edilmiştir.

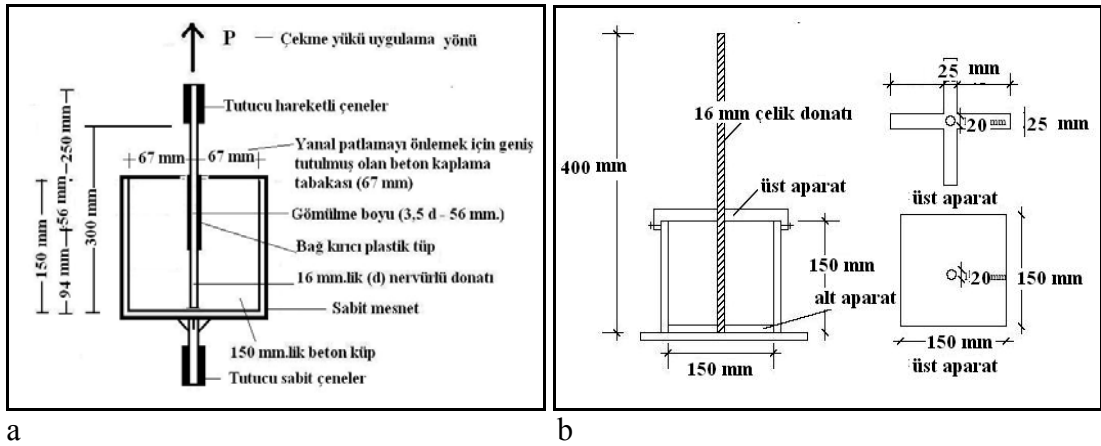


Şekil 3.6. “TS EN 12390–5” standardına göre oluşturulan ve üretilen numunelerin eğilme dayanım değerlerinin belirlenmesi için kullanılan deney düzeneği

$$R_e = \frac{2 \times d_{le} \times d_{2e}^2 \times s_e}{3 \times L_e} \quad (3.18)$$

$$f_e = \frac{3 \times F_e \times L_e}{2 \times d_{le} \times d_{2e}^2} \quad (3.19)$$

Tezde; aderans numuneleri üretilirken kullanılan özel olarak tasarlanmış kalıp, aparat ve ilgili deney düzeneği Şekil 3.7’de görüldüğü gibidir. Hesaplamalarda Eş.3.20’den yararlanılmıştır.



Şekil 3.7. Tezde, aderans dayanımını çekme kuvveti ile belirleme deney düzeneği ve numune üretiminde kullanılan kalıp tasarımı (b.[103])

$$T_{\phi} = \frac{P_{max}}{\Pi \times l \times d} \quad (3.20)$$

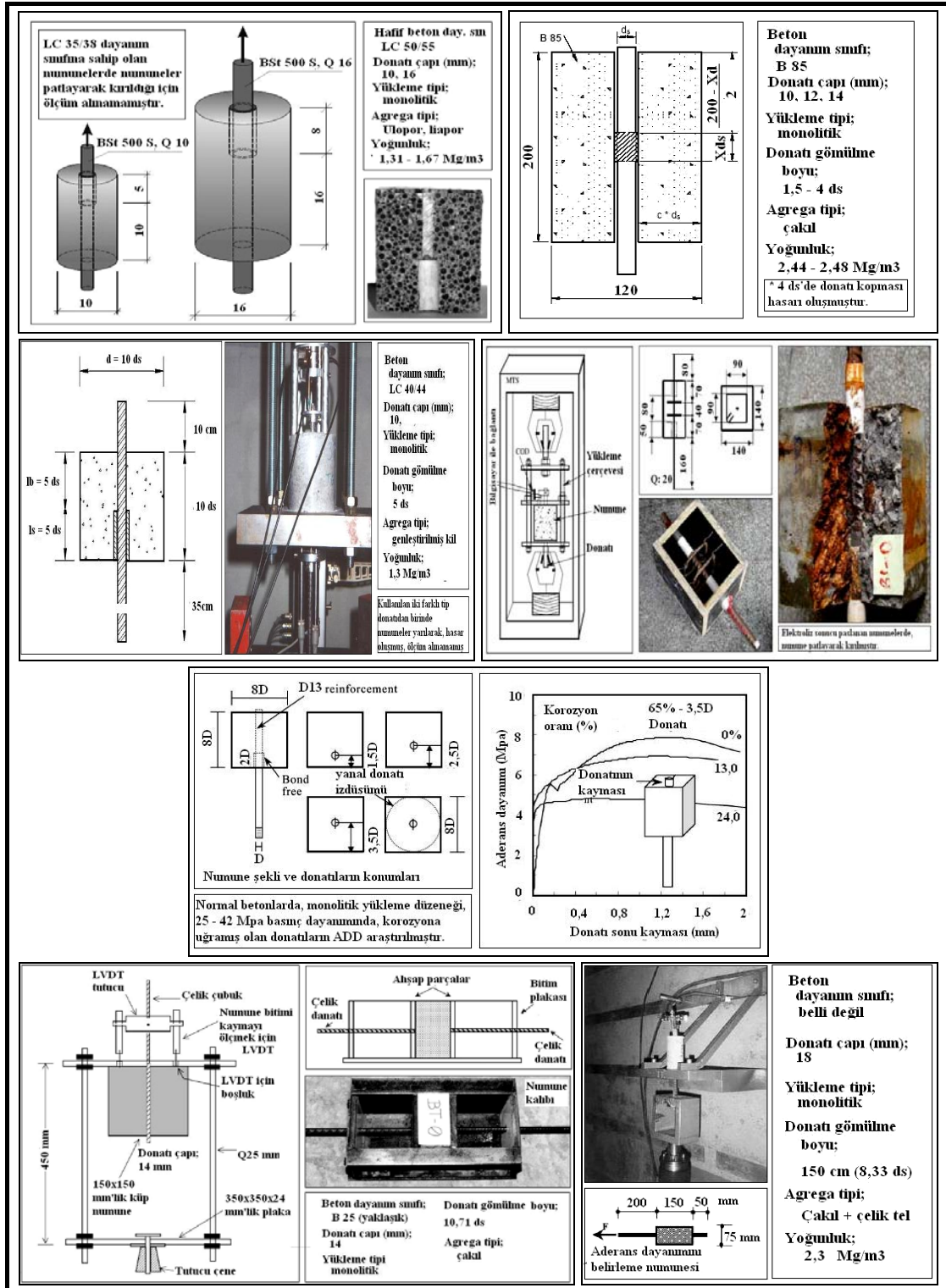
Literatürde aderans deneyleri ile ilgili, ortak bir dil oluşturulamamıştır. Bunun nedeni; beton tiplerinin, üretim bileşenlerinin ve dayanım sınıflarının çeşitliliğidir. Ayrıca, araştırılan yapı malzemesi ile ilgili bir veriye de rastlanılmamıştır. Bu nedenle, Tezde; deney tasarımlarının (Şekil 3.78) yapılabilmesi için çekip çıkarma deneyinin uygulandığı diğer beton tiplerine ilişkin deney tasarımları ve sonuçları incelenerek, elde edilen veriler kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 3.8).

Tezde; çekme kuvveti etkisindeki donatıda maksimum birim deformasyon değerleri belirlenirken, üretilen beton serilerinde; uygulanan kuvvet ile donatıda kuvvetin uygulandığı yönde oluşan birim deformasyon ve maksimum birim deformasyon arasında ilişkinin varlığı sorgulanmıştır (Bkz. EK-2., Çizelge 2.1-2.5 s.205-209).

Aderans numuneleri; deney esnasında hasar oluşabileceği (donatı kopması veya numunenin patlaması) kaygısı doğrultusunda hassasiyetle üretilmiştir. Buna rağmen, numunelerin, bazı yüzeysel farklılıklarının olduğu ve farklılıkların deformasyon sonuçlarını olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bu durum; özellikle kuvvetin uygulandığı başlangıç bölgesinde belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, sorgulamanın başında deformasyon değerleri belirlenememiş ve farklı bir yöntem geliştirilmiştir.

Bu doğrultuda; her numune için, kuvvet-donatı deformasyon grafiği çizilmiştir (Bkz. EK-2, Şekil 2.1-2.5 s.205-209). Grafiklerin doğrusallaştığı bölgede, ilişki formüle edilmiştir. Her bir numunede, bu eşitlikler kullanılarak ve tüm ilişkinin doğrusal olduğu kabul edilerek “İlk deformasyon değeri” (kuvvetin sıfır olduğu andaki deformasyon değeri) olarak tanımlanan değer hesaplanmıştır. Bunun için, elde edilen eşitlikte “y” değeri yerine “0” değeri konularak, ilk deformasyon bulunmuştur.

“Net deformasyon değeri”leri; son deformasyon değerinden, ilk deformasyon değerleri çıkarılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan “net deformasyon değerleri” ilk donatı boyuna (300 mm) oranlanıp, yüz ile çarpılınca; betona gömülü olan donatıda, çekme kuvveti etkisinde maksimum birim deformasyon değerleri, yüzde olarak bulunmuştur. Sayısal sorgulamalarda bu değerler kullanılmıştır (Eş. 3.21 - 3.22).



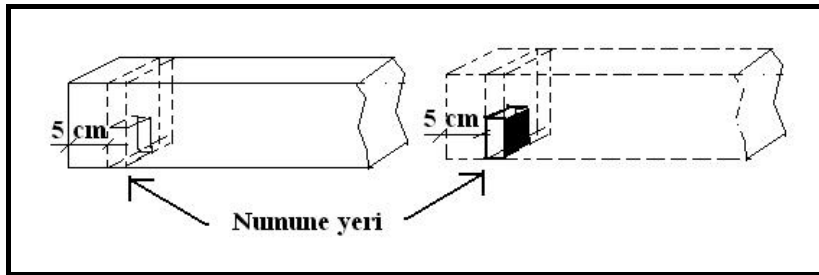
Şekil 3.8. Tezde, aderans değerlerinin belirlenmesi için, literatürden yol gösterici olarak kullanılan deney tasarımları [105, 106, 109, 114, 160-163]

3.2.4. Analiz yöntemine (CH boyutunun belirlenmesine) ilişkin detaylar

TEM analizleri için; ara yüzey bölgesindeki, kanamanın en az gözlemlendiği ve değişkenliğin en az olduğu agreganın üst bölgesi inceleme alanı olarak seçilmiştir. Tezde üretilen tüm beton serileri (18 beton serisi) inceleme kapsamına alınmıştır.

Tezde; skorianın çimento hamuru ile süreç içerisinde etkileşimde bulunabileceği ihtimali gözlemlenmiştir. Bu nedenle analiz numuneleri; uzun dönem performanslarının belirlenebilmesi için bir yıllık olana kadar, laboratuvar, doğal çevre nemi ve ortamında bekletilmiş olan beton numunelerinden elde edilmiştir. Beton özelliklerinin belirlendiği numune boyutlarından daha küçük boyutta üretilen analiz numunelerinden elde edilen veriler; deneylerden elde edilen beton özelliklerini temsil edemez. Çünkü numune boyutları beton özelliklerini etkiler. Bu doğrultuda; analiz numuneleri; büyük boyutlu giriş numunelerden alınmıştır (Şekil 3.9).

Tüm numunelerde beton döküm yönü ve konumu gözlemlenmiştir. Bu numuneler, aynı konumdan, 50 mm'lik büyük küpler şeklinde alınmıştır (Şekil 3.9). Elde edilen bu büyük boyutlu küpler, yağlı kesim yapan elmas uçlu testere ile iki kez, küçültülerek (10x25x50) mm boyutuna getirilmiştir. Numunelerde kesimden kaynaklanabilecek çatlakların oluşmaması için, kullanılan numune boyutları, literatürdeki benzerlerine göre “devasa” olarak tabir edilebilecek boyutlarda tutulmuştur.



Şekil 3.9. Tem analizi numunelerinin, giriş numunelerden alındıkları yerler

Tezde, “CH boyutu”nun belirlenebilmesi için; her bir beton serisi için 6 adet olmak üzere toplam; 108 sei (secondary image) alınmıştır (Bkz. Bölüm 4.2.1, s.98-102).

Sayısal veriler belirlenirken, görüntülerden direkt ölçüm ile kristal sınırlarını (grain boundry) belirleme yöntemi kullanılmıştır. Analizlerin doğası gereği sapmaya neden olabilecek ikincil bir yöntem kullanılmamıştır. Tezde, her bir beton serisi için CH boyutu belirlenirken; 6 görüntü yan yana getirilmiş en büyük üç adet CH kristali belirlenmiştir. Belirlenen bu kristallerde; bir birine dik iki doğrultuda, en büyük boyutsal değerler ölçülmüştür. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak, kristallerin “CH boyutu” belirlenmiştir. Belirlenen üç kristalin “CH boyutu” ortalaması alınarak; sorgulanan beton serisine ait “CH boyutu” değeri elde edilmiştir.

3.2.5. Sayısal ilişkilerin ve bu ilişkileri içeren grafiksel sınaama serilerinin organizasyonuna ilişkin detaylar

Betonun özellikleri ile ilgili sayısal ilişkiler genel düzeyde ele alınıyorsa, ön tahmin için kullanılabilir. Öte yandan; detaylı ilişkilerin kurulabilmesi ve güvenilir tahminlerin yapılabilmesi amacıyla, sayısal veri elde etmek için daha hassas davranılmalıdır. Bunun için; kullanılan deneysel prosedürler, beton dayanım sınıfları (düşük, orta, yüksek dayanımlı olması gibi), kullanılan agrega özellikleri (kimyasal yapısı, yüzey yapısı, yoğunluğu gibi) ve katkı kullanım durumu gibi üretim ile ilgili detayların göz önünde bulundurulması gerekir [9, 10].

Araştırmaya başlanılmadan önce belirtilen görüş göz önüne alınmıştır. Bu tezin eylemsel sürecinde de bu görüşü destekleyen gözlemler elde edilmiştir. Ayrıca veriler arasındaki ilişkilerin sorgulanması sürecinde ise; bu görüşün, Tezden elde edilen bulgular aracılığıyla da desteklendiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda edinilen bulgular, tezin yazım aşamasında, bölümlerin oluşturulmasından, grafiksel sınaama serilerinin belirlenmesine ve literatürden elde edilen verilerin grafiklere yansımaya kadar, tüm araştırma metninin oluşumunu şekillendirmede etkili olmuştur.

Üretim değişkenlerinin, karışım oranlarının (Bkz. Çizelge 3.5) ve belirlenmeye çalışılan ilişkilerin (Çizelge 3.6 – Çizelge 3.8) sayıca fazla olması, tek bir ilişkiyi değil, bir sistem mantığı içerisinde, bir çok özelliği içeren, ilişkiler ağının sunulmasını zorunlu kılmıştır. Bu durum; belirtilen ilişkiler ağının da bir sistem

mantığı içerisinde organize edilerek sunulmasını gerektirmiştir. Bu doğrultuda, herhangi iki özelliğin ilişkilendirilmesi değişkenler gözetilerek, 1 ana çubuk grafik ve 9 alt ikili ilişki grafiği aracılığıyla yapılmıştır (Bkz. Çizelge 3.8 ve Şekil 3.10).

Tezde, grafiksel sına serileri (gss) üretim değişkenlerinin sorgulanan ilişkiyi nasıl etkilediğinin belirlenebilmesi için oluşturulmuştur. Bu doğrultuda;

- “S1” grafiksel sına serisi; tüm katkılı veya katkısız taşıyıcı yarı hafif beton serilerinde, farklılaşan (skoria + katkı + W/C) oranlarının,
- “S2” grafiksel sına serisi; tüm katkılı taşıyıcı yarı hafif beton serilerinde, farklılaşan (skoria + katkı) oranlarının,
- “S3” grafiksel sına serisi; katkısız taşıyıcı yarı hafif beton serilerinde, farklılaşan (skoria + W/C) oranlarının,
- “S4” grafiksel sına serisi; tüm katkısız normal agrega ve skoria kullanılarak üretilen betonlarda, farklılaşan agrega tiplerinin,
- “S5”ve “s6” grafiksel sına serileri; %37,5 ve %45 su / çimento oranına sahip olan katkısız taşıyıcı yarı hafif betonlarda sadece skoria oranı değişiminin,
- “S7”, “s8” ve “s9” grafiksel sına serileri; %40, %50 ve %60 skoria oranı ile katkı kullanılarak üretilen taşıyıcı yarı hafif betonlarda, sadece farklılaşan katkı oranlarının (bunun ile ilişkili olarak W/C oranlarının),
- Sorgulanan ikili ilişkiyi nasıl etkilediğinin belirlenmesi amacıyla oluşturulmuştur

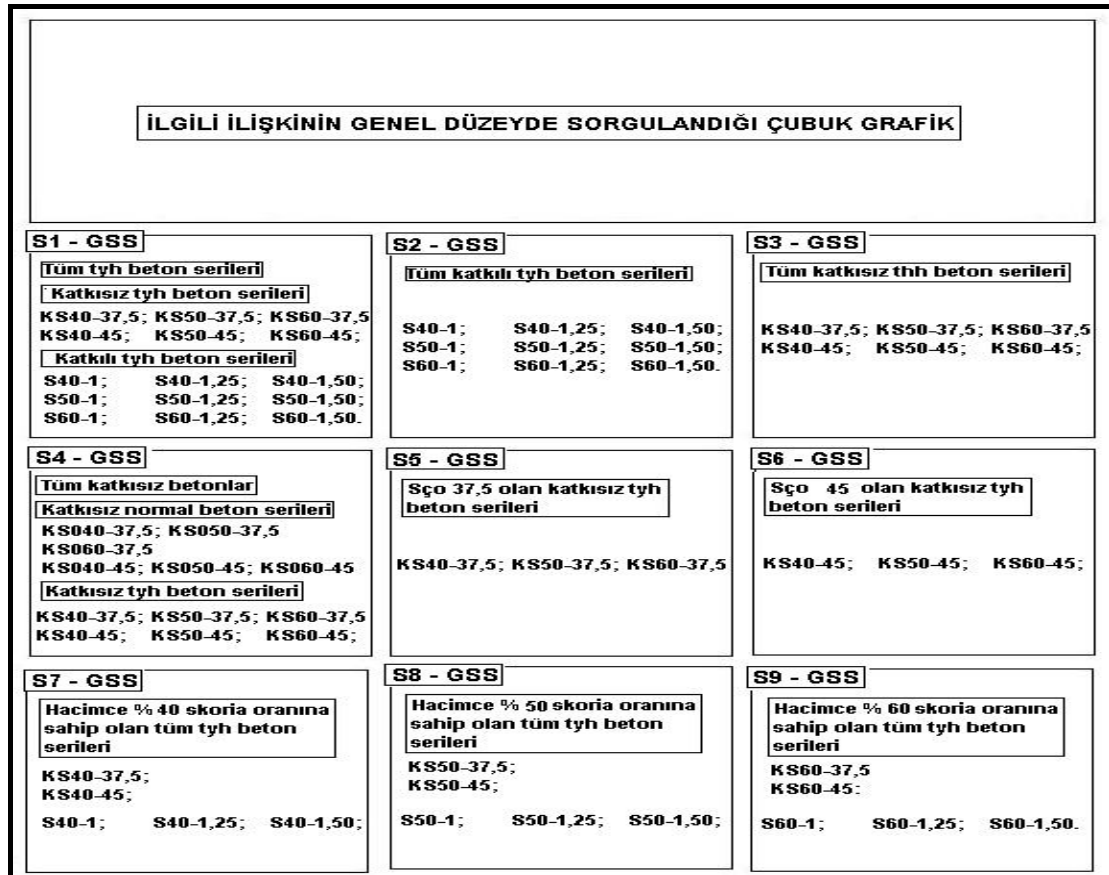
Tezde, sayısal ilişkilerin incelenmesinde ve yorum yapılırken, ilişki düzeyleri;

- $R^2=0,90$ ve üstü değerde olan grafiksel sına serileri (gss); “yüksek”
- $R^2 = (0,80 - 0,89)$ değerde olan grafiksel sına serileri; “iyi”,
- $R^2 = (0,70-0,79)$ değerde olan grafiksel sına serileri; “orta”, düzeyde “sayısal ilişkiye sahiptir” şeklinde tanımlanmıştır.

Tezden edinilen ve literatürden edinilen sayısal verilerin ve eşitliklerin karşılaştırılmasında ve somutlaştırılmasında, “sorgulama grafikleri”nden yararlanılmıştır. Bu doğrultuda, literatürden, sayısal ilişki içeren verilerin elde edilebilmesi için genel olarak üç yöntem izlenmiştir.

Çizelge 3.8. Tezde kullanılan grafiksel sına serilerinde (gss'nde) kullanılan seri kodları ve temsil ettiği beton serileri

BETON SERİLERİ		GRAFİKLERDE KULLANILAN SERİ KODLARI - TEMSİL ETTİĞİ BETON SERİLERİ								
NO	KODLAR	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
1.	KS040 – 37,5				4					
2.	KS050 – 37,5				4					
3.	KS060 – 37,5				4					
4.	KS40 – 37,5	1		3	4	5		7		
5.	KS50 – 37,5	1		3	4	5			8	
6.	KS60 – 37,5	1		3	4	5				9
7.	KS40 – 45	1		3	4		6	7		
8.	KS50 – 45	1		3	4		6		8	
9.	KS60 – 45	1		3	4		6			9
10.	S40 – 1	1	2					7		
11.	S40 – 1,25	1	2					7		
12.	S40 – 1,50	1	2					7		
13.	S50 – 1	1	2						8	
14.	S50 – 1,25	1	2						8	
15.	S50 – 1,50	1	2						8	
16.	S60 – 1	1	2							9
17.	S60 – 1,25	1	2							9
18.	S60 – 1,50	1	2							9



Şekil 3.10. Tezde kullanılan çoklu grafiklerde “ana” grafik ve grafiksel sına serilerinin konumları

Belirtilen bu yöntemler aşağıda sıralandığı gibidir;

1. İncelenen her bir araştırmada, edinilen sayısal veriler arasında ilişki olup olmadığı irdelenmiştir. Tanımlanabilecek düzeyde ilişki olanların, sayısal verileri; “türetilmiş” ifadesi kullanılarak ve referans gösterilerek, “eşitlik” formuna dönüştürülmüştür.
2. Her sorgulama düzeyinde, farklı araştırmalardan ve farklı beton tiplerinden elde edilen tekil veriler arasında ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Tanımlanabilecek düzeyde ilişki olanların sayısal verileri; “türetilmiş” ifadesi kullanılarak ve verilerin alındığı “kaynaklar” referans gösterilerek, “eşitlik” formuna dönüştürülmüştür.
3. Daha önce, ilgili araştırmalarda, yapılmış olan sorgulamalardan edinilen “eşitlik”ler; “kaynaktan” ifadesi kullanılarak ve referans gösterilerek kullanılmıştır.

Sorgulama grafikleri oluşturulurken; eşitliklerin elde ediliş biçimi göz önüne alınmıştır. “Türetilen” eşitliklerde; irdelenen araştırmanın orijinal araştırma verileri kullanılmış ve bu veriler grafiklere doğrudan yansımıştır. “Kaynaktan” elde edilen eşitliklerde ise; tezde elde edilen basınç dayanım veya etüv kurusu yoğunluk değerleri; ilgili eşitliklerde kullanılmış ve ilgili grafiksel eğriler oluşturulmuştur. Bu nedenle; “türetilmiş” ve “kaynaktan” elde edilmiş olan eşitliklerin kullanıldığı sorgulama grafikleri ayrı ayrı oluşturulmuştur.

Bu doğrultuda, literatür sorgulamalarında kullanılan tekli grafikler; sadece “türetilmiş” ilişkileri içeren grafiklerdir (Bkz. EK-4, s.211-221 ve Bölüm 4.3-4.4, s.107, 109, 111, 116, 120, 124, 127, 131, 133, 136, 138, 140, 143). İkili sorgulama grafiklerinde ise, birinci grafikte (a); “türetilmiş” ilişkileri içeren eşitlikler, İkinci grafikte (b); “kaynaktan” elde edilmiş olan eşitlikler sunulmuştur (Bkz. EK-4, s.211-221 ve Bölüm 4.3-4.4, s.114, 145, 147, 150, 154, 157, 160).

“CH boyutu” ve “etüv kurusu yoğunluk” ayrıca “CH boyutu” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişkiyi sayısal olarak sorgulayan herhangi bir araştırma belirlenemediği için; Tezde elde edilen ilişkiler, literatür ile ilişkilendirilememiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Beton Özelliklerine İlişkin Bulgular ve Tartışma

4.1.1. Taze beton yoğunluğu

Genel düzeyde aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.1, ana grafik).

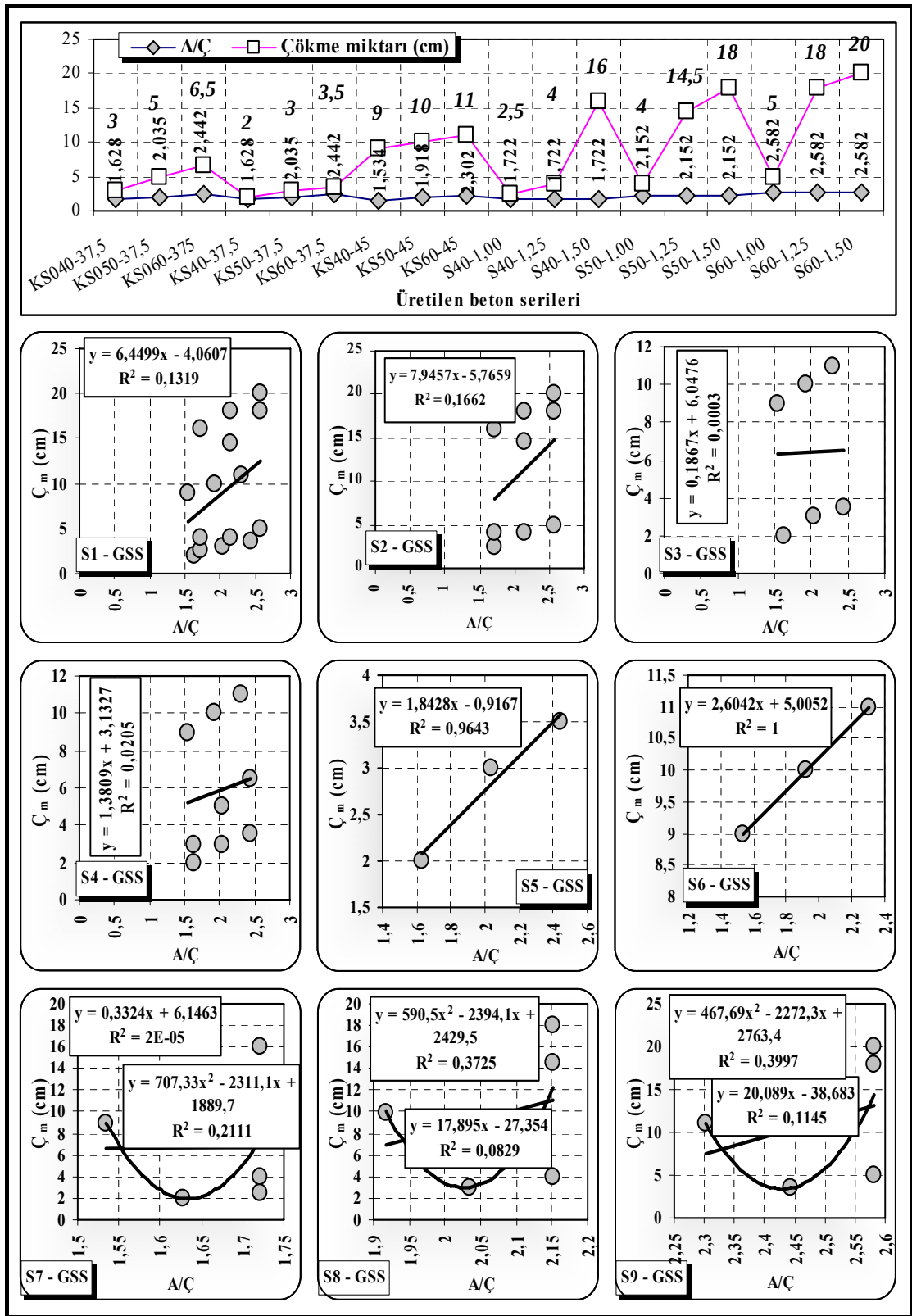
- Normal betonlarında, karışıma giren iri agreg a yüzdesi arttıkça; taze beton yoğunluğu artmıştır. Öte yandan, tüm tyhb'larda ise; durum tam tersidir.
- Karışıma giren W/C oranı arttıkça; tyhb'larda yoğunluğun azaldığı belirlenmiştir.
- Katkının bileşenler arasında sterik etki oluşturm ası ve oran arttıkça bu etkinin de artması nedeniyle; bir miktar yoğunluk azalması olduğu belirlenmiştir.

“Taze beton yoğunluğu” ve “A/Ç ” arasındaki ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sayısal olarak sorgulanması (Şekil 4.1,gss) ile aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Katkı kullanımının; farklı skoria oranlarındaki tyhb'ları farklı yönde etkilediği ve bu serilerde, taze beton yoğunluğu ve A/Ç arasında ilişki olmadığı belirlenmiştir (s1).
- Farklı skoria oranı içeren serilerde; katkılı olanlar arasındaki ilişki, katkısız olanlar arasındaki ilişkiden daha kuvvetlidir (s2, s3). Bu durum, katkı kullanımının; W/C oranını ve taze beton yoğunluk değerleri arasındaki farkı azalttığını gösterir.
- Normal betonlar ve tyhb'larda; A/Ç ile taze beton yoğunluğu arasındaki ilişkinin çok farklı olduğu ve bu betonların bir arada sorgulanamayacağı belirlenmiştir (s4).
- Aynı W/C oranlarında; yüksek düzeyde, doğrusal ilişki vardır (s5 ve s6).
- Katkı oranlarının sorgulandığı tyhb'larda; A/Ç ile taze beton yoğunluğu arasında doğrusal ilişki yoktur. Ancak kuvvetli polinomal ilişkiler belirlenmiştir (s7, s8, s9).
- “katkı oranı arttıkça, taze beton yoğunluğu artar” şeklinde yapılan tespitler “katkı kullanımı; W/C oranını azalttığı için, yoğunluk artar” şeklinde değiştirilmelidir.

4.1.2. Taze beton kıvamı

Tezde “çökme miktarı” (kısaca çökme) ve “üretim değişkenleri” ile ilişkili olarak genel düzeyde aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 4.2, ana grafik).



Şekil 4.2. Taze beton kıvamı ve A/Ç arasındaki ilişki

- Normal beton ve tyhb'larda; agrega oranı arttıkça; çökme artmıştır.
- W/C oranı ve katkı oranı arttıkça; çökme de artmıştır.
- Aynı W/C oranlarındaki normal betonların çökmesi; tyhb'lardan daha fazladır.
- Genellikle; "plastik" çökme sonuçlarının % 1,25 katkı oranında elde edildiği ortak sonucuna ulaşılmıştır.
- Skoria oranı ile birlikte, katkının; çökmeye etkisinin farklılaştığı belirlenmiştir.

Tezde, çok farklı ihtiyaçlara cevap verebilecek kıvamlarda tyhb'lar üretilmiştir. Örneğin; ince ve yoğun donatılı prefabrik elemanların üretiminde, betonun kıvamının plastik veya akıcı olması istenen bir durumdur. Prefabrik eleman üretiminde vibratörler kalıba bağlı olduğu veya sarsma tablası kullanılması nedeniyle, çok sık donatılı olmayan elemanlarda, yüksek dayanım ve kuru kıvam tercih edilebilir.

Üretilen betonlarda; vibratör olarak sarsma tablası kullanıldığı için, sıkıştırma ile ilgili olarak, katkısız betonlarda bile kıvam açısından bir sorun yaşanmamıştır. Bu araştırmada tyhb'larda; literatürde bildirilenin aksine, skoria oranı arttıkça, agregalar doyurularak kullanıldığı için, normal agrega gibi davranmışlar ve çökme de artmıştır.

Normal betonların çökmesi; literatürde bildirildiği gibi, hafif agregalı betonların çökme değerlerinden fazladır ve kullanılan agreganın cinsine, yüzey yapısına göre farklılaşmıştır. Ancak bu fark, skoria doyurularak kullanıldığı için azdır. Ayrıca, %45 W/C oranı kullanılan tyhb'lardaki çökme; literatürdeki örneklere göre çok fazladır. Bu da yine aynı gerekçe ile açıklanabilir.

Literatürde, ayrışma olması kaygısıyla, hafif agregalı betonlar için, önerilen maksimum çökme; 10 cm'dir. Tezde; bu sınır aşılmıştır ve ayrışma gözlenmemiştir. Bu durumda; taşıyıcı hafif betonlar için önerilen çökme sınırlamasının, su ile doyurulan skoria ile üretilen tyhb'lar için geçerli olmadığı ve bu betonların; çökme davranışı açısından, normal betonlara yakın olduğu söylenebilir. Ayrıca tyhb'ların hiçbirinde, betonun kararlılığını kaybettiği gözlenmemiştir. Yalnızca, "S60-1,50"de ayrışmaya ve terlemeye yatkınlık (Bkz. Şekil 2.1, s.16) gözlemlenmiştir.

Tyhb'larda; literatürde bildirildiği gibi, agregalar, doyurularak kullanıldıkları için taze betonlarda plastik rötre olayına rastlanılmamıştır. Bunun nedeni, doyurulmuş agregaların, hidratasyon gelişimi için su kaynağı olmaları ile açıklanabilir.

“Çökme miktarı” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.2, gss) ile aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

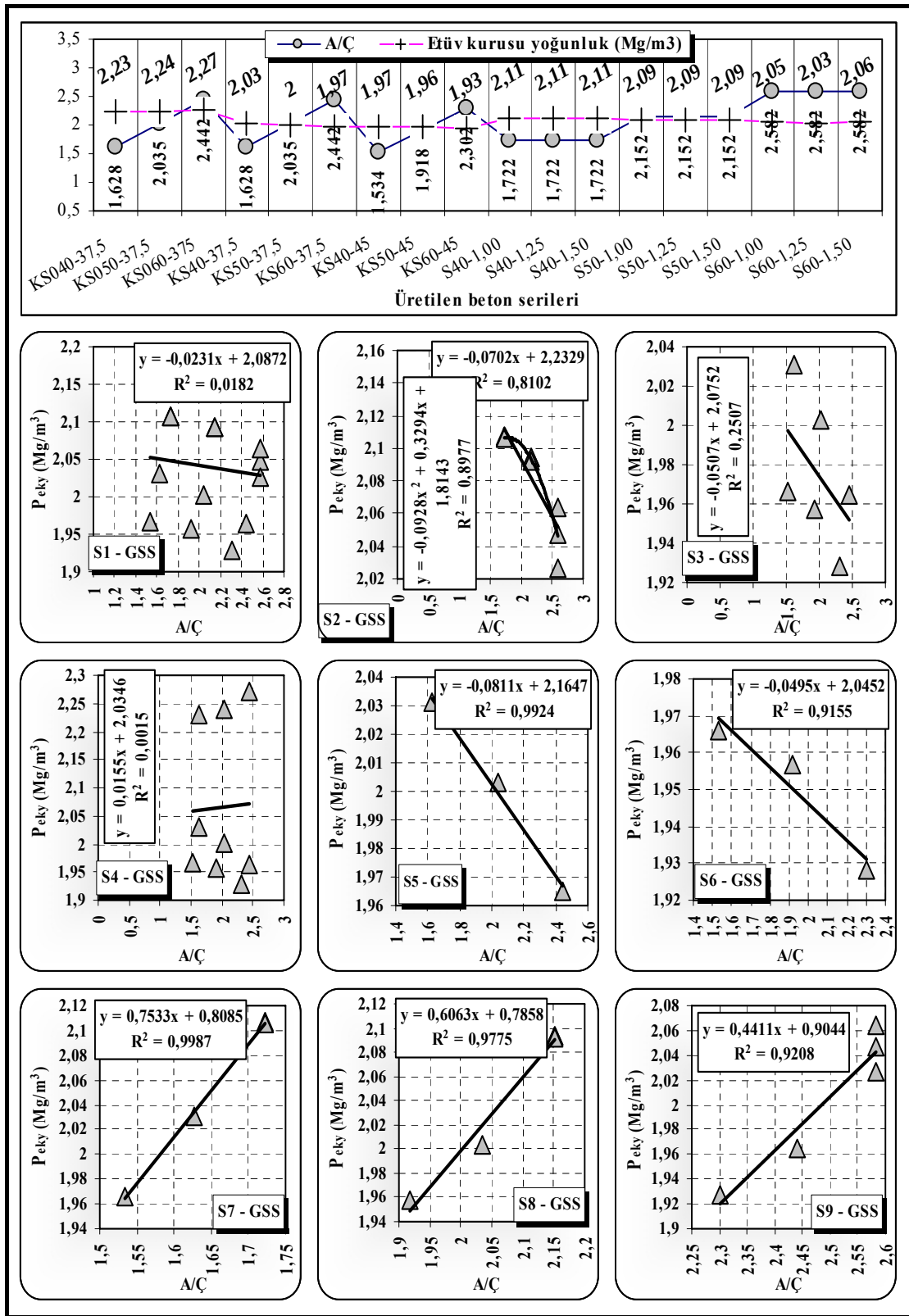
- “Çökme miktarı” ve “A/Ç” oranı arasında sayısal ilişki kurulabilmesi için; kullanılan agrega oranı dışında tüm değişkenlerin aynı olması gerekir.
- W/C oranı %37,5 ve %45 olan tyhb'larda; skoria oranının değişimi ile çökme miktarları arasında, çok kuvvetli doğrusal ilişkiler belirlenmiştir (s5 ve s6).
- Diğer hiçbir grafikte sayısal ilişki yoktur.

4.1.3. Etüv kuru su yoğunluk, su emme oranı ve porozite oranı

“Etüv kuru su yoğunluk” ve “beton bileşenleri” arasındaki ilişki

- Tezde, “tyhb” tanımı için gerekli olan “etüv kuru su yoğunluk” değerleri (kısaca; yoğunluk) elde edilmiş, (1,928-2,107) Mg/m³ arasında yoğunluk değerine sahip olan 15 farklı tyhb serisi üretilmiştir. Elde edilen bu değerler, Tezin amacı doğrultusunda, hafif ve normal agregalı betonların yoğunluk değerleri arasındadır. Tezde genel düzeyde aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.3, ana grafik).

- Normal betonlarda; iri agrega oranı arttıkça yoğunluk artmıştır.
- Literatürdeki bilgiye paralel olarak, kullanılan skoria ve W/C oranları arttıkça; yoğunluk azalmıştır.
- Katkılı tyhb'larda, aynı skoria oranlarında; en yüksek yoğunluk değerleri; %1,25 katkı oranında elde edilmiştir. Literatüre göre; az katkı kullanımında, betonun yeterli sıkışamamasından dolayı, çok kullanımında ise; doyma noktasını aşması nedeniyle, betonda boşluk miktarı artar. Bu bilgiye de dayanarak; üretilen beton serilerinde en yüksek sıkışmayı sağlayan (ideal) katkı oranı; orta değer olan % 1,25'tir sonucuna ulaşılmıştır. Tezde elde edilen diğer veriler bu bulguyu desteklemektedir.



Şekil 4.3. Etüv kuru yoğunluk ve A/Ç arasındaki ilişki

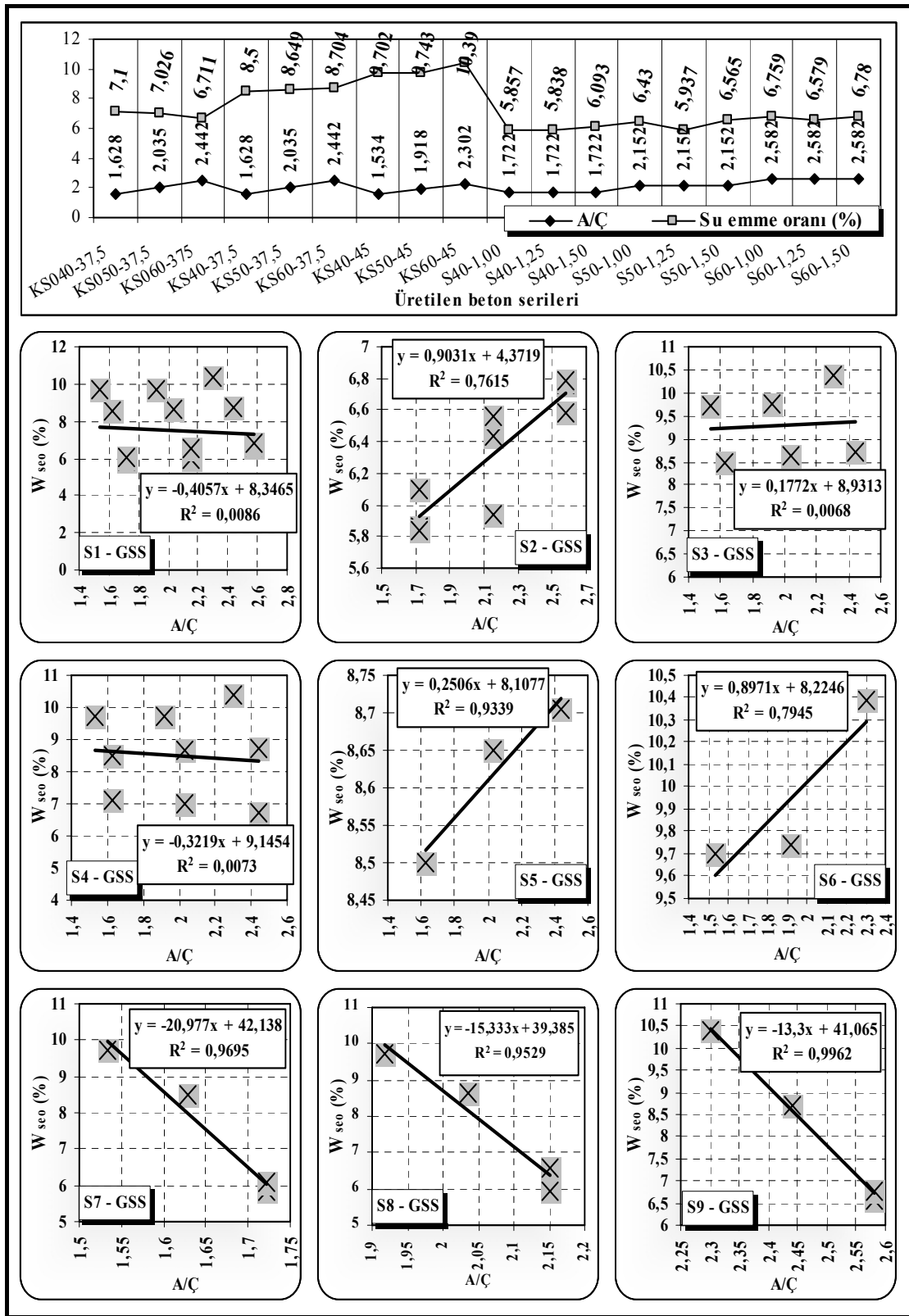
“Etüv kurusu yoğunluk” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.3, gss) ile aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tüm tyhb’larda, bileşen farklılaşması; yoğunluk ve A/Ç arasındaki ilişkiyi olumsuz yönde etkilemiştir (s1). Ancak katkısız tyhb’larda; W/C oranının değişmesine rağmen iyi düzeyde ($R^2=0,81$ ve $0,89$) ilişkiler belirlenmiştir (s2).
- Sınanan ilişki açısından tyhb’lar; normal betonlardan çok farklıdır. Bu nedenle, bu sınamada, tyhb’lar ve normal betonlar arasında bir ilişki yoktur denebilir (s4).
- Sadece skoria oranının farklılaştırıldığı tyhb’larda; yüksek düzeyde ters orantılı ilişkiler mevcuttur (s5, s6).
- Sadece katkı oranının (veya W/C oranının) değiştiği tyhb’larda; yüksek düzeyde doğrusal ilişkiler belirlenmiştir (s7, s8, s9).

“Su emme oranı” ve “beton bileşenleri” arasındaki ilişki

Genel ve sayısal sorgulamalarda aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.4).

- Normal betonlarda, su emme değeri daha az olan iri agrega oranı arttıkça; su emme oranı azalmıştır.
- Tyhb’da ise; W/C ve skoria oranları arttıkça; su emme doğrusal olarak artmıştır.
- Katkılı tyhb’larda; su emme oranının; katkısız tyhb’lara ve normal betonlara göre önemli miktarda azaldığı belirlenmiştir. Bu durum; katkı kullanımının, tyhb’ların çimento hamuru ve özellikle ara yüzey bölgesinin çok sıkı yapılaşmasına neden olduğu, betonun dayanım ve dayanıklılığını büyük oranda arttırdığı ile açıklanabilir.
- Katkılı tyhb’larda, en düşük değerler; genelde % 1,25 oranında elde edilmiştir.
- Katkı kullanımı tyhb’ların su emmesini büyük oranda etkilemektedir. Katkı kullanılan ve kullanılmayan tyhb’larda; su emme oranları arasında belirgin farklılıklar mevcuttur. Bu nedenle; “s1”de ilişki belirlenememiştir.
- Katkılı tyhb’larda; skoria ve su emme oranları arasında iyi sayılabilecek düzeyde ($R^2=0,76$) doğrusal ilişki vardır (s2). Ancak; aynı ilişki katkı kullanılmayanlarda yoktur (s3). Bu durumda; katkısız tyhb’larda, kullanılan skoria oranının, su emme oranının belirlenmesinde etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 4.4. Su emme oranı ve A/Ç arasındaki ilişki

- Tyhb'lar ile normal betonlar arasında; “su emme” davranışı açıdan belirgin farklılıklar vardır. Bu nedenle, bir arada sorgulandıkları seride ilişki yoktur (s4).
- Katkısız tyhb'larda, W/C oranının aynı olması durumunda, su emme ve skoria oranları arasında; yüksek düzeyde ilişkiler vardır (s5, s6).
- Aynı skoria oranındaki katkılı tyhb'larda; katkı oranının farklılaşmasına rağmen tyhb'lar arasında yüksek düzeyde doğrusal ilişkiler belirlenmiştir (s7,s8,s9).

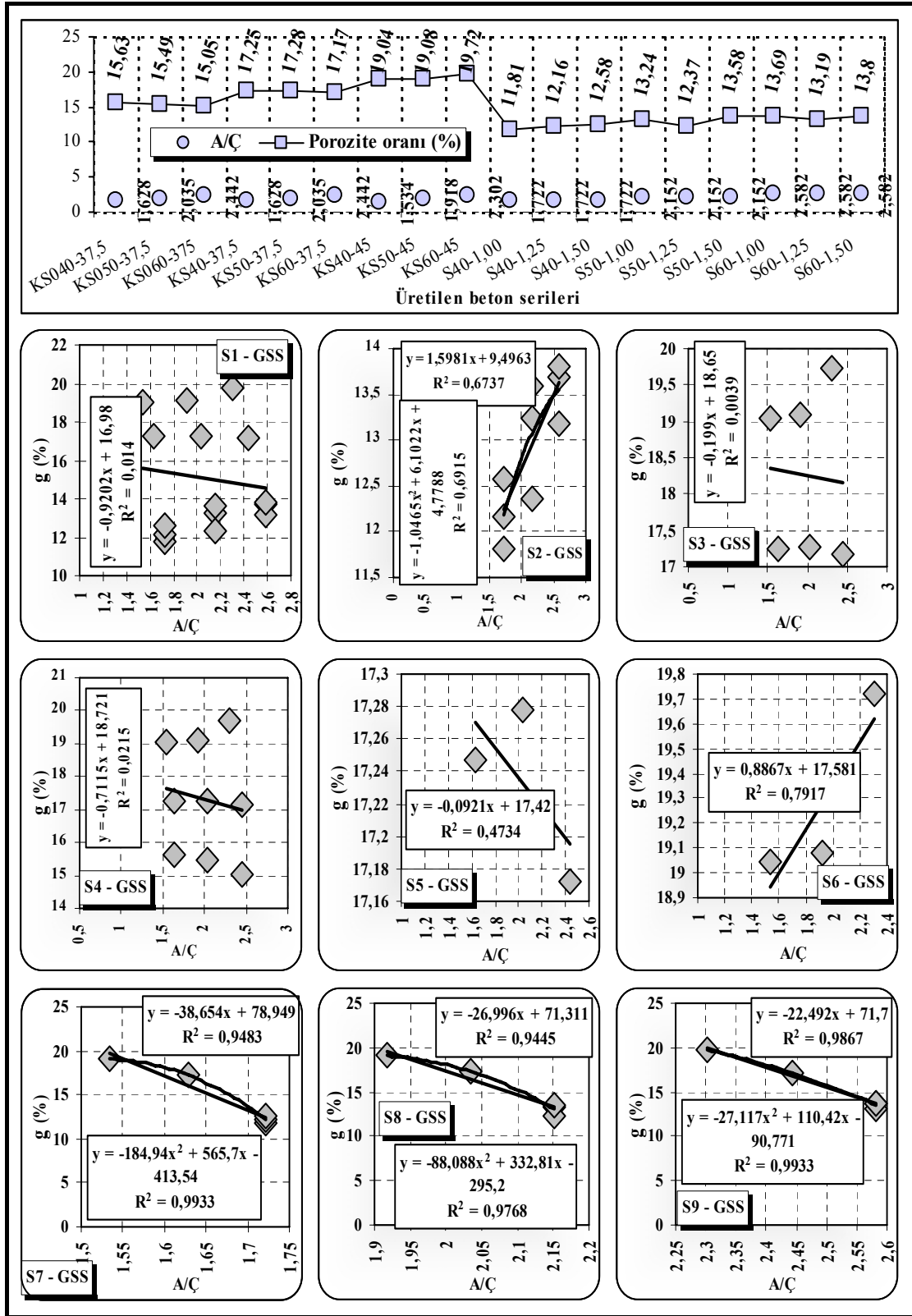
“Porozite oranı” ve “beton bileşenleri” arasındaki ilişki

Porozite oranları ve “beton bileşenleri” arasındaki ilişki; “Şekil 4.5”te sorgulandığı gibidir. Genel olarak, “su emme oranı” ve “beton bileşenleri” için yapılan saptamalar; bu sorgulama için de geçerlidir. Ancak; sayısal değerler farklılaşmıştır. Tezde, betonun özelliklerini büyük oranda etkileyen su emme ve porozite oranları ile ilgili, literatür ile kıyaslamalı olarak genel düzeyde aşağıdaki yargılara ulaşılmıştır.

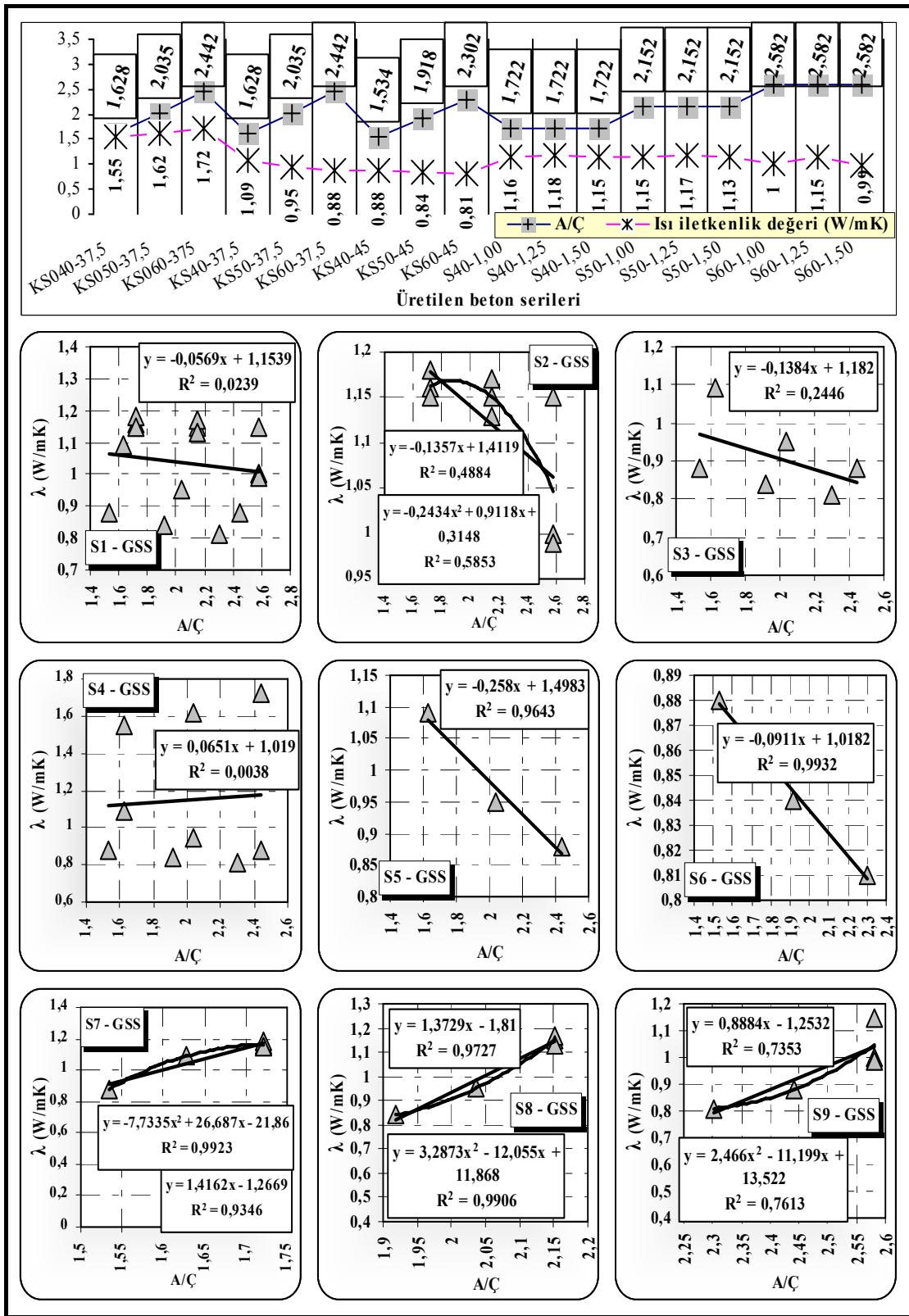
- Katkısız tyhb'larda; bu oranlar normal betonlardan bir miktar fazladır. Bu saptama; literatürde belirtildiği gibi, üretilen beton serilerinin geçirimsizliğini doğrudan etkileyen parametreler değildir (Bkz. Bölüm 2, ilgili çizelgeler).
- Katkı kullanılan tyhb'ların, su emme oranlarının skorianın boşluklu yapısına rağmen; üretilen normal betonlardan ve literatürde incelenen örneklerin çoğundan az olduğu belirlenmiştir. Üretilen normal betonlarda ve tyhb'larda aynı agrega oranının kullanılmış olması ve normal agreganın skoriadan çok daha az boşluklu yapılaştığının bilinmesine rağmen bu sonucun elde edilmesi; katkı kullanımı ile birlikte düşen W/C oranına, ara yüzey bölgesinin sıkı yapılaşmasına ve bunun ile ilişkili olarak CH boyutunun küçük olmasına atfedilebilir.

4.1.4. Isı iletkenlik değeri

Tezde üretilen normal betonlarda; (1,55-1,72) W/mK ve tyhb'larda (0,81-1,18) W/mK arasında ısı iletkenlik değerleri (kısaca; iletkenlik) elde edilmiştir. Tezde “ısı iletkenliği” ve “üretim değişkenleri” ile ilişkili olarak genel düzeyde aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 4.6, ana grafik).



Şekil 4.5. Porozite oranı ve A/Ç arasındaki ilişki



Şekil 4.6. Isı iletkenlik değeri ve A/C arasındaki ilişki

- Normal betonlarda iri agrega oranı arttıkça; iletkenlik yüksek oranda artmıştır. Bu durum, iri agreganın, boşluksuz ve kristal yapısına sahip olması ile açıklanabilir.
- Tyhb'larda, W/C oranı arttıkça; boşluk miktarı arttığı için iletkenlik azalmıştır.
- Tüm tyhb'larda skoria oranı arttıkça; ters orantılı olarak iletkenlik azalmıştır. Bu durum; skorianın camsı kristal yapısı ve boşluklarının bağlantısız olması ile açıklanabilir. Kullanılan skorianın su emme değerleri bu tespiti desteklemektedir.
- Katkılı tüm tyhb'larda, en yüksek iletkenlikler; %1,25 oranda elde edilmiştir.
- % 1,50 katkı oranında elde edilen değerlerin ise; % 1,00 oranında elde edilen değerlerden bir miktar daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, % 1,50 oranında katkının doyma noktasını aşarak, tyhb'larda, aşırı sterik etki nedeniyle daha fazla boşluk ve bir miktar daha düşük yoğunluk değerine sahip olması ile açıklanabilir.

Literatürden ve Tezde yapılan deneylerden edinilen bilgiler ve veriler aracılığıyla aşağıdaki sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Araştırmada, yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar için önerilen [16] ve kullanılan yöntemler içerisinde çok düşük hata payına sahip olduğu bildirilen ($\pm 0,01$) mahfazalı sıcak plaka cihazı ile değerler belirlenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır.
- Tezde; yüksek dayanım değerine sahip tyhb üretimi hedeflendiği için, literatürdeki diğer yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar gibi [13] strüktürel kaygı ön planda tutulmuştur. Çizelge 2.8'de de (Bkz. s.18) görüldüğü gibi; 17 Mpa basınç dayanımına sahip normal dayanımlı hafif agregalı betonlarda bile, ısı iletkenlik değerine herhangi bir standart veya literatürde, sınırlama getirilmemiştir. Bu tezde kullanılan skoria yoğunluk spektrumunun sonunda yer almaktadır [9]. Bu nedenle; yüksek mekanik performans ve iyileştirilmiş ısı iletkenlik değeri amaçlanmıştır.
- Buna rağmen 0,81 W/mK ısı iletkenlik değerine kadar inilerek, beklenilenin çok altında iletkenlik elde edilmiştir. Bu değer RILEM'in 3,5 Mpa basınç dayanımına sahip yalıtım betonları için sınır değer olarak belirlediği; 0,75 W/mK ısı iletkenlik değerine çok yakındır (Bkz. Çizelge 2.8, 18).
- Aynı karışım oranlarında üretilen normal betonlar ve tyhb'lar kıyaslandığında; % (40-50-60) agrega oranlarında, normal agreganın yerine skorianın kullanılması

durumunda, ısı iletkenlik değeri; normal betonlara göre % (29,68 - 41,36 - 48,84) oranlarında azaldığı belirlenmiştir.

- %45 W/C oranı, %60 skoria oranına sahip “S60-45” tyhb’u ile “%37,5 W/C oranı, %60 çakıl kullanılan, “KS060-37,5”kodlu normal beton kıyaslandığında; ısı iletkenlik değeri, %52,91 oranında azalma belirlenmiştir.
- Isı iletkenlik değeri ile ilgili olarak elde edilen bu sonuçlar; skorianın camısı yapısına ve bağlantısız boşluklara sahip olması ile açıklanabilir.
- Öte yandan 0,3 W/C oranı ile üretilen katkılı tyhb’larda ısı iletkenlik değeri; 1,18’e kadar çıkmıştır. Elde edilen bu değer; normal betonlara göre düşük sayılabilir.
- Tezde elde edilen sonuçlar; yapay hafif agregası veya ponza kullanılarak üretilen hafif agregalı betonlara göre çok yüksektir. Ayrıca; Moufty’nin skoria kullanarak ürettiği düşük yoğunluklu ($1,63-1,74 \text{ Mg/m}^3$) betonlarda elde ettiği değerlerden ($0,168-0,195 \text{ W/mK}$) çok uzaktır. Öte yandan Holm, Bremner’in, yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlar için bildirdiği değerlere ($0,9-1,1 \text{ W/mK}$) yakın sayılabilir [16].
- Tezde, kullanılan skoriaların su emme değerleri; literatürdeki diğer agregalara göre çok düşüktür. Bu nedenle; Tezde üretilen tyhb’ların, ponza veya yapay hafif agregası kullanılarak üretilen diğer hafif betonlara göre, uygulamadaki “ısı yalıtım” performansının daha yüksek olacağı düşünülmektedir.
- Tezde; genel olarak, iletkenliği orta düzeyde iyileştirilmiş tyhb’lar üretilmiştir. Bu betonlar ile üretilecek olan yapı elemanlarının, ısı genleşmeler nedeniyle oluşabilecek hasarlara karşı dayanımlarının yüksek olacağı, ısı köprülerinin büyük oranda azalacağı, yapının ömrünün ve konfor koşullarının artacağı söylenebilir.

“Isı iletkenlik değeri” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil. 4.6, gss) ile aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tüm tyhb’lar arasında belirtilen sınaama açısından bir ilişki yoktur (s1).
- Katkı kullanılan serilerde düşük düzeyde polinomal ilişki belirlenmiştir (s2).
- Farklı agregası, W/C ve skoria oranları kullanılan, katkısız tyhb’larda ilişki belirlenememiştir (s3, s4).

- Sadece skoria oranlarının değiştiği serilerde, aynı W/C oranında “ısı iletkenlik değeri” ve “A/Ç” arasında yüksek düzeyde ters orantılı ilişkiler saptanmıştır (s5, s6).
- Katkı oranlarının sorgulandığı serilerde; A/Ç ile iletkenlik arasında kuvvetli doğrusal ve polinomal ilişkilerin olduğu belirlenmiştir (s7, s8, s9).

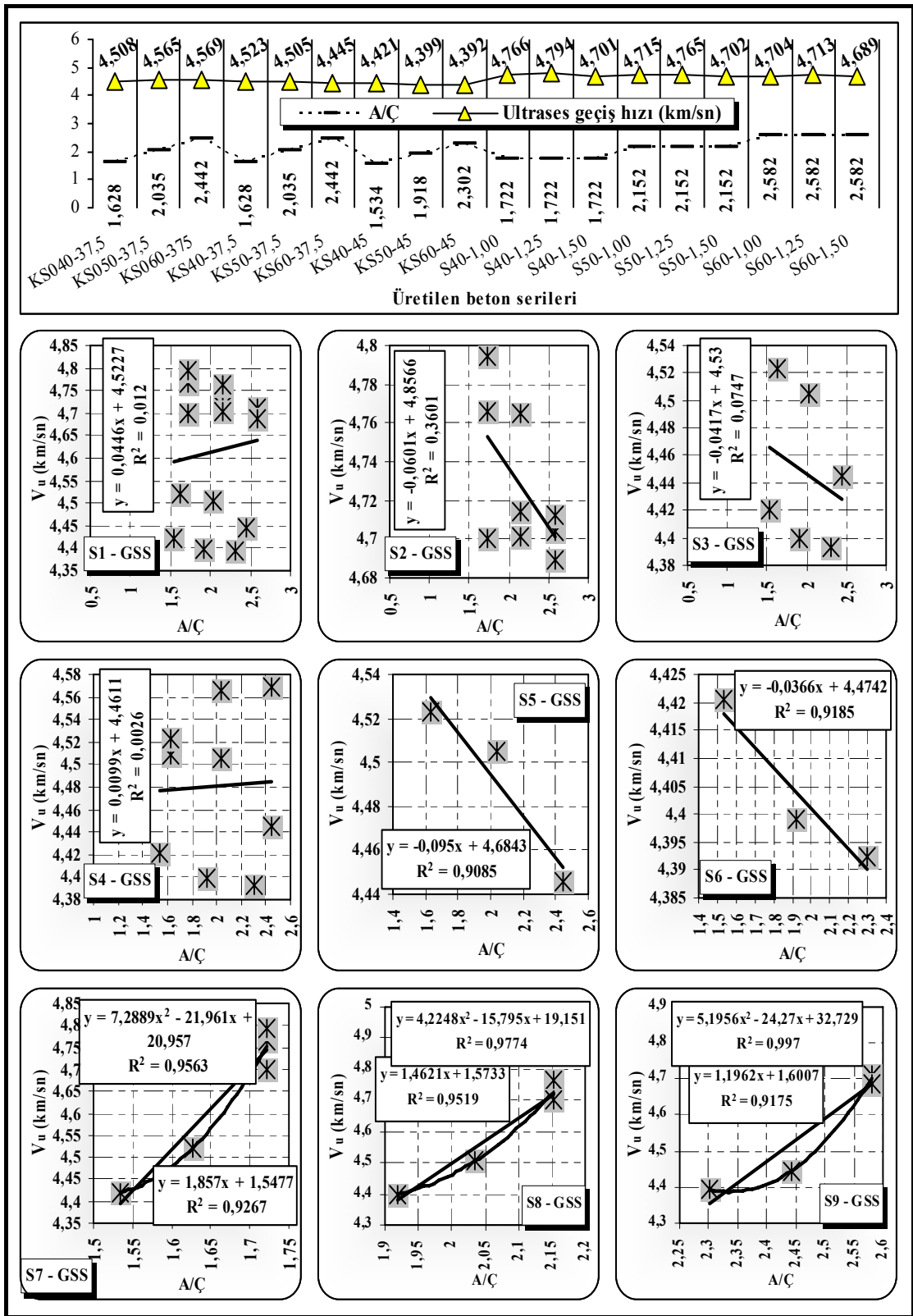
4.1.5. Ultrases geçiş hızı

Genel olarak aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.7, ana grafik).

- Tezde % 45 W/C oranı ile üretilen tyhb’ların ultrases hızı; (4,39, 4,40 ve 4,42) km/sn’dir. Tezde üretilen diğer tüm betonların ultrases hızı; 4,5 km/sn’nin üzerindedir. Neville’nin tanımına göre; Tezde, %45 W/C oranı ile üretilen tyhb’lar “mükemmel” sınırına çok yakın olan “iyi” kalitede, diğerlerinin tümü ise “mükemmel” kalitede olan betonlardır. Bu sonuçların edinilmesi, Tezde özenle oluşturulan ve kullanılan agreganın ideal agrega tane boyu dağılımlarına atfedilebilir.
- Normal betonların ultrases hızlarının, çok az farkla katkısız tyhb’lardan fazla olduğu belirlenmiştir. Öte yandan %40 skoria kullanılan karışımda tyhb’nun ultrases hızı normal betondan yüksek çıkmıştır.
- Skorianın, normal agregadan daha boşluklu olan yapısı ve her iki beton tipinde de çimento hamurunun aynı olduğu düşünülecek olursa, bu sonuç; skoria ile üretilen tyhb’larda ara yüzeyin daha sıkı ve CH boyutunun daha küçük olmasına atfedilebilir.
- Tyhb’larda W/C oranı arttıkça; ultrases hızı belirgin olarak azalmıştır.
- Katkılı tyhb’ların ultrases hızı; normal betonlarda dahil olmak üzere, katkının olumlu etkisi nedeniyle, diğer betonlardan belirgin bir şekilde yüksek çıkmıştır.
- En yüksek ultrases hızları; %1,25 katkı oranlarında elde edilmiştir.
- %1,00 katkı oranında edinilen değerler, genelde %1,50 oranından yüksektir.

Ultrases hızı ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Şekil 4.7, gss) ile aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Farklı karışım oranlarındaki tyhb’larda; “ultrases hızı” ve “A/Ç” arasında bir ilişki belirlenememiştir (s1, s2, s3, s4). Çünkü karışım suyu, katkı, agrega tipi gibi üretim değişkenleri; A/Ç oranının dışında, betonun sıkılığını etkileyen faktörlerdir.



Şekil 4.7. Ultrases geçiş hızı ve A/Ç arasındaki ilişki

- Sadece skoria oranının sorgulandığı serilerde; “ultrases geçiş hızı” ve “A/Ç” arasında yüksek düzeyde ters orantılı ilişkiler belirlenmiştir (s5, s6).
- Katkı oranlarının sorgulandığı serilerde; “ultrases geçiş hızı” ve “A/Ç” arasında yüksek düzeyde doğrusal ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir (s5, s6). Bu sonuçlar; incelenen araştırma sonuçları tarafından desteklenmektedir [61, 63, 65-69].

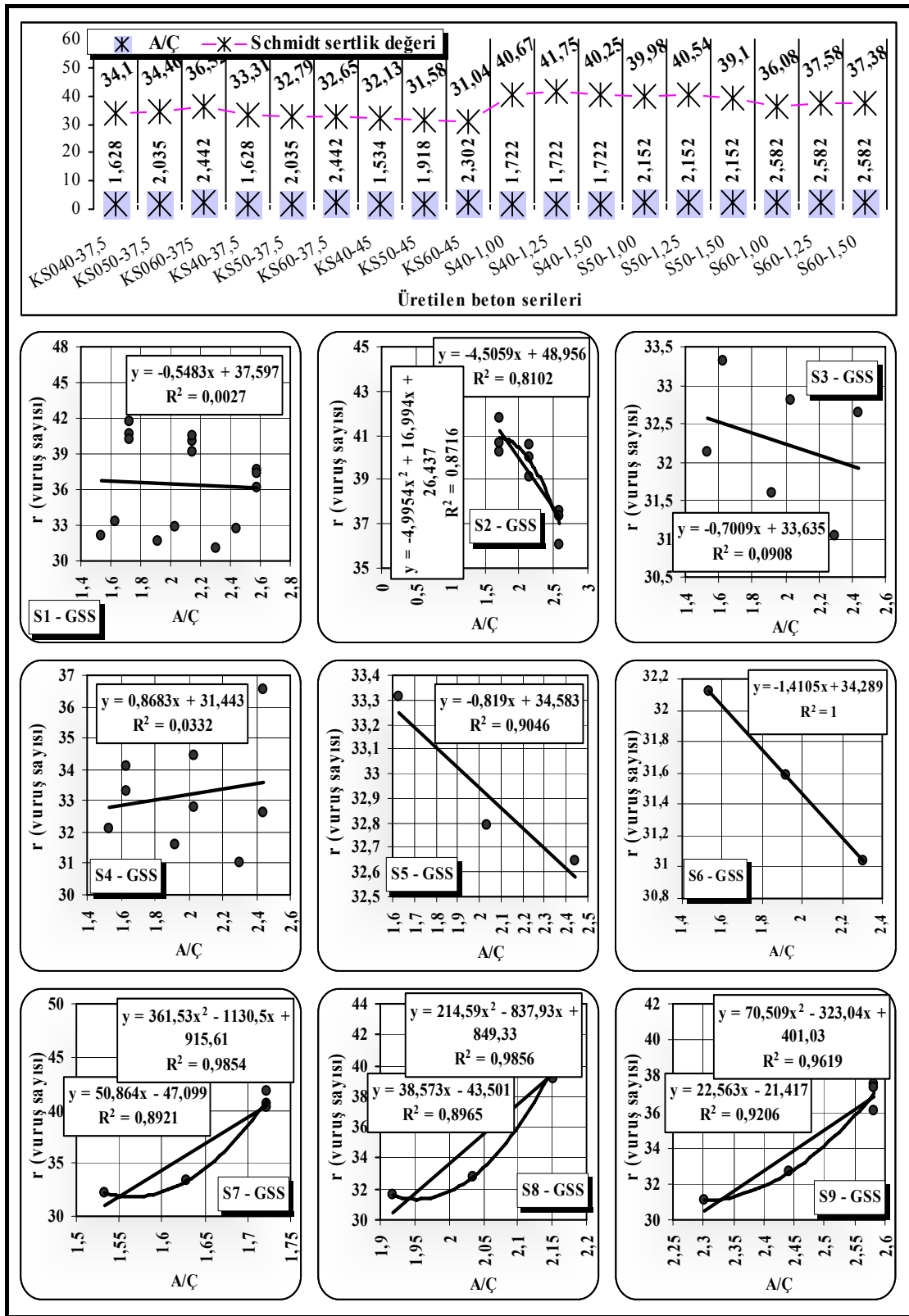
4.1.6. Schmidt sertlik değeri

Tezde, normal betonlardan; (34,105-36,521), normal betonlar ile aynı karışım oranlarında üretilen tyhb’lardan; (32,646-33,313); tüm tyhb’lardan; (31,042-41,750) schmidt sertlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.8, ana grafik). Genel düzeyde aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.8, ana grafik).

- Normal betonlardan; aynı karışım oranlarında üretilen tyhb’lara göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu sonuç; agrega tipi ile ilişkilendirilebilir.
- Normal betonlarda agrega oranı arttıkça, sertlik değeri artmıştır. Ancak tyhb’larda skoria oranı arttıkça, sertlik değeri; -Topçu’nun bildirdiği gibi-, agreganın rijitliğinin az olması nedeniyle azalmıştır.
- Tyhb’larda W/C oranı arttıkça; boşluk oranı arttığı için sertlik değeri azalmıştır.
- Katkılı tüm tyhb’larda, edinilen değerler; normal betonlarınkinden daha yüksektir. Bu durum; skoria kullanımına rağmen, ara yüz bölgesindeki boşluk oranının ve CH boyutunun az, kohesif kuvvetlerin fazla olmasından dolayı çimento hamuru ile skorianın test çekicine birlikte tepki verdiğinin iyi bir göstergesidir.

“Schmidt sertlik değeri” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Şekil 4.8, gss) ile aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Üretim değişkenlerinin çoğalması durumunda; tyhb’larda, “schmidt sertlik değeri” ve “A/Ç” arasında ilişki belirlenememiştir (s1, s3 ve s4).
- Ancak, katkı oranlarının değişiminin, sorgulanan ilişkiyi fazla etkilemediği söylenebilir (s2). Ayrıca; aynı skoria oranında, yüksek düzeyde doğrusal ilişkiler elde edilmiştir. (s5, s6, s7, s8 ve s9). Katkı kullanılmayan serilerde (s5, s6) bu ilişki; doğru orantılı, kullanılanlarda (s7, s8, s9) ise ters orantılıdır.



Şekil 4.8. Schmidt sertlik değeri ve A/Ç arasındaki ilişki

4.1.7. Basınç dayanım değerleri

Normal betonlarda; (30,38-44,09) Mpa, aynı karışım oranlarındaki tyhb'larda; (46,32-50,99) Mpa, tüm tyhb'larda; (44,09-66,26) Mpa dayanım elde edilmiştir.

Tyhb'ların basınç dayanımlarının aynı karışım oranlarına sahip olan normal betonlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11). Bu durum;

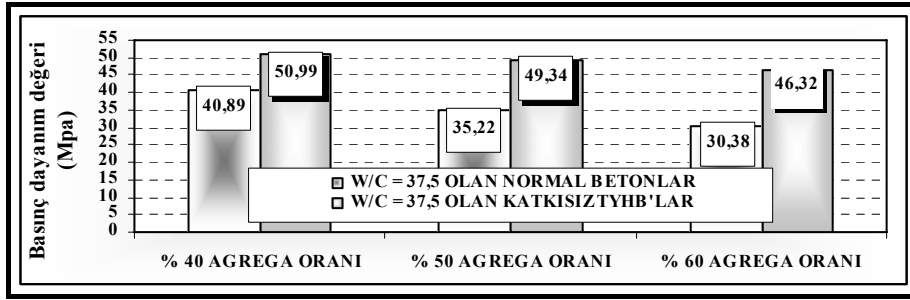
- Skorianın; su emme değerinin normal agregadan daha fazla olması ve skoria çevresindeki W/C oranının azalması ile birlikte CH boyutunun küçülmesi ve ara yüzey bölgesinin sıkı yapılaşması,
- Skorianın yüksek su emme değeri nedeniyle, ara yüzey bölgesinde su birikimi ve buna bağlı olarak CH boyutu ve boşluk ile ilgili olarak heterojen yapılaşmanın daha az oluşması, ayrıca kuvvetin skoria çevresinde daha homojen dağılması,
- Skorianın, normal agregaya göre girintili çıkıntılı olan yapısı nedeniyle agrega ile çimento hamuru arasında kilitlenme bölgelerinin oluşması,
- Skoria ile çimento hamuru arasında zamanla gelişen bir kimyasal etkileşim gerçekleşmesi ve su emdirilerek kullanılan skorianın; hidrasyon gelişimi için nem kaynağı olması ile açıklanabilir.

Skoria ve W/C oranlarının artması; dayanımın düşmesine neden olmuştur Bu sonuç;

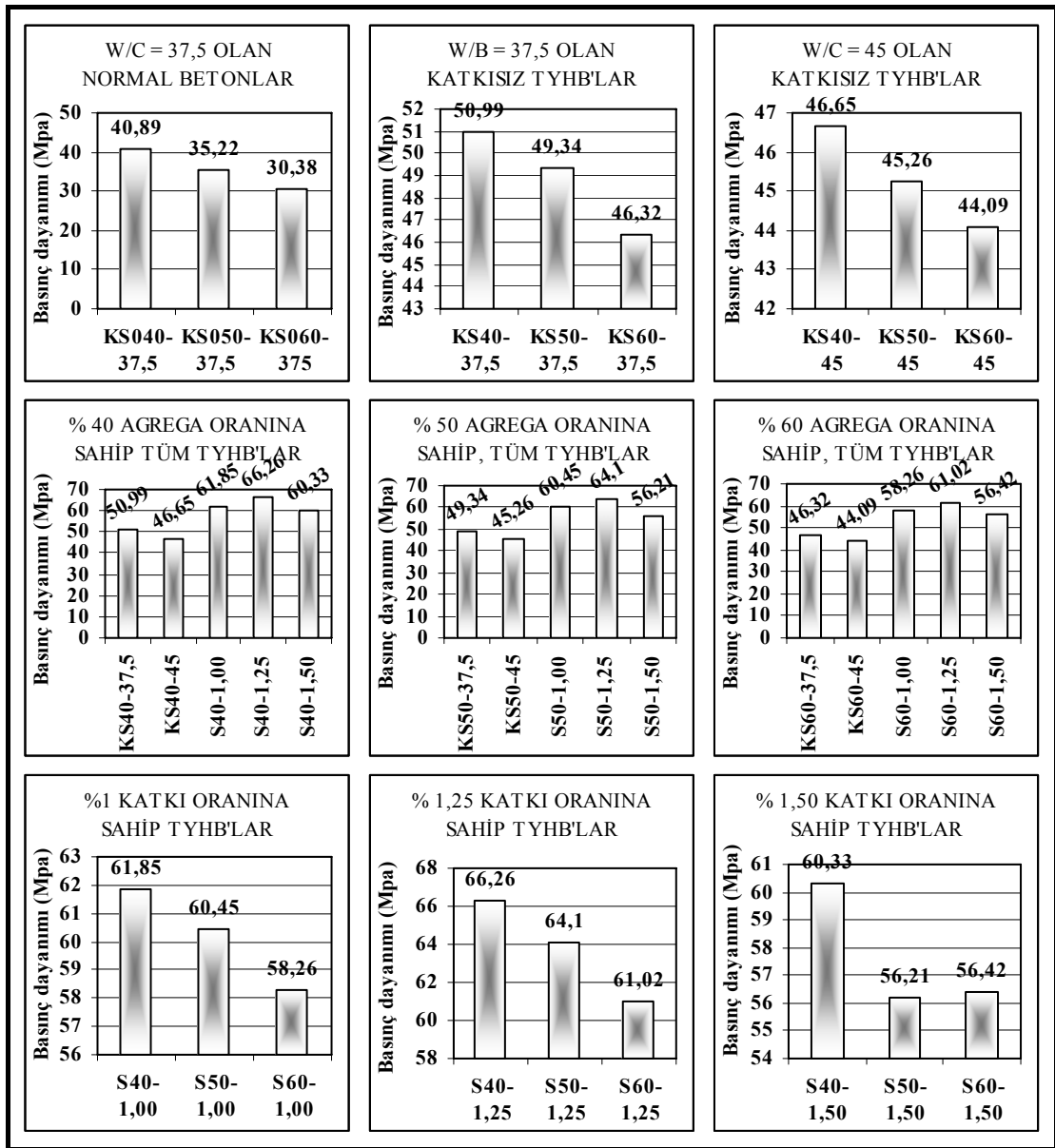
- Literatür bilgisi ile uyumludur. Ancak, araştırmacıya göre bu sonucun sebebi, yaygın olarak ileri sürülen gerekçeden farklıdır. Skoria oranının yükselmesi ile basınç dayanımının düşmesi, skorianın dayanımının normal agregadan düşük olmasından çok; agrega karışımlarının (ince kum + skoria) idealden sapan tane boyu dağılımları ile ilişkilidir (Şekil 3.1., s.40).

W/C oranının artması ile dayanımlardaki düşüş beklenilenden azdır. Bu sonuç;

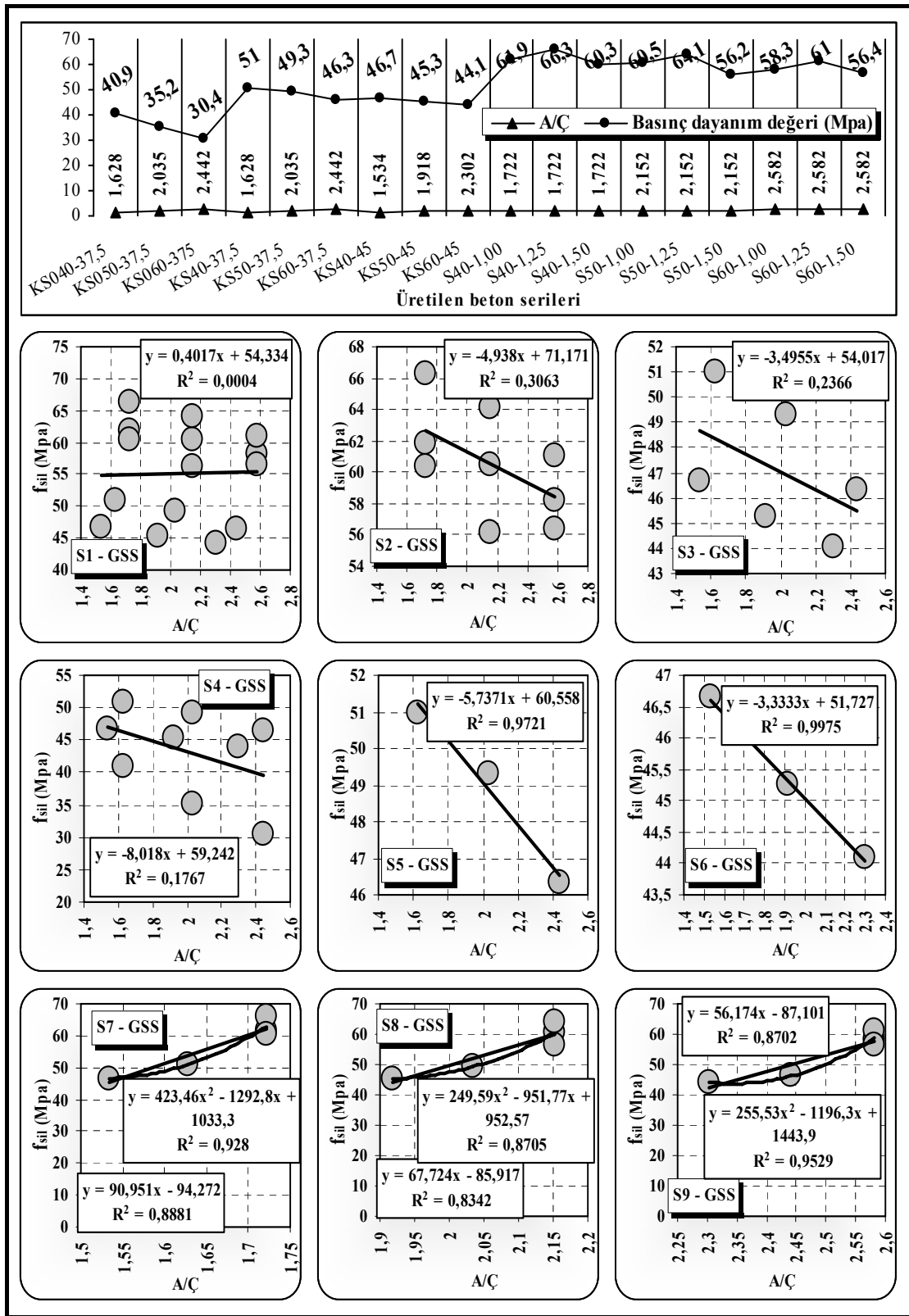
- Kullanılan su oranının artması ile birlikte daha fazla suyu depolayan skoriada içsel hidrasyonun etkin olması ve çimentonun hidrasyon oranının yükselmesi,
- Artan taze beton kıvamı ile birlikte, boşlukların, %37,5 W/C oranı kullanılan tyhb'lara göre daha fazla ancak düzgün yayılı olarak dağılımı ile açıklanabilir.



Şekil 4.9. Agrega tipi – agrega hacimsel oranı – basınç dayanım değeri ilişkisi



Şekil 4.10. Normal agrega, skoria oranı – katkı oranı – basınç dayanım değeri ilişkisi



Şekil 4.11. Basınç dayanım değeri ve A/Ç arasındaki ilişki

Tyhb'lardan edinilen basınç dayanım değerleri; literatürde skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonların basınç dayanım değerlerinden yüksektir. Bu sonuç;

- Kullanılan çimentonun yüksek dayanımda ve kalitede olması,
- Tüm serilerde düşük W/C oranlarının kullanılmış olması,
- Katkı kullanılan serilerde katkının çok yüksek oranda su azaltma kabiliyeti,
- Kür süresi ve deneyler için belirlenen yaşın, tyhb'ların gerçek performansını ortaya koymak için doğru seçilmiş olması,
- Agregası karışımlarında uygun en büyük tane boyutu (16 mm) ve ideal tane boyutu dağılımlarının kullanılması,
- Skorianın sahip olduğu diğer üstün özellikler (minerolojik içeriği, ideal şekil indisi, yüksek yoğunluk, yüksek dayanım, pürüzlü yüzey yapısı, reaktivitesi gibi) ve
- Tyhb'ların; malzemelerin doğası gözetilerek tasarlanıp üretilmesi ile açıklanabilir

En yüksek basınç dayanımları; katkı kullanılan serilerden elde edilmiştir. Çünkü:

- Katkı kullanılan tyhb'larda; W/C oranı, %30'a düşürülmüş ve ayrışma olmadan yüksek dayanımlı tyhb'lar üretilebilmiştir. Sonuç olarak; kullanılan katkı sayesinde, başka hiçbir katkı malzemesi kullanılmadan tyhb'ların; akışkanlık ve dayanım performansı yükselmiştir.

Katkı oranlarının basınç dayanım değerlerini farklı oranlarda etkilediği belirlenmiştir

- Katkılı serilerde en yüksek basınç dayanım değerlerine; %1,25 katkı oranında ulaşılmıştır. Bu serilerde (s7, s8, s9); %1,00 katkı oranlarında edinilen basınç dayanım değerleri; %1,50'de edinilen basınç dayanım değerlerinden büyüktür.
- Farkın en az olduğu seri %40 skoria oranının kullanıldığı serilerdir. Bu durum; yukarıda açıklanan "katkının doyma noktası" kavramı ile açıklanabilir.
- Katkılı tyhb'larda, en az katkı oranında (%1,00); "yetersiz çökme", orta oranda (%1,25); "ideal çökme" ve en fazla oranda (%1,50); "aşırı çökme" belirlenmiştir.

Katkı kullanılmadan üretilen tyhb'larda ise;

- Katkısız tyhb'larda %37,5 W/C oranında; yüksek basınç dayanım değerleri ve düşük kıvam elde edilmiştir.

- Tezde, W/C oranının tyhb'ların özelliklerine olan etkisini araştırmak ve plastik kıvamda katkısız tyhb'lar elde edebilmek için %45 W/C oranı kullanılmıştır. Bu serilerde de; akışkan kıvam ve yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşılmıştır.

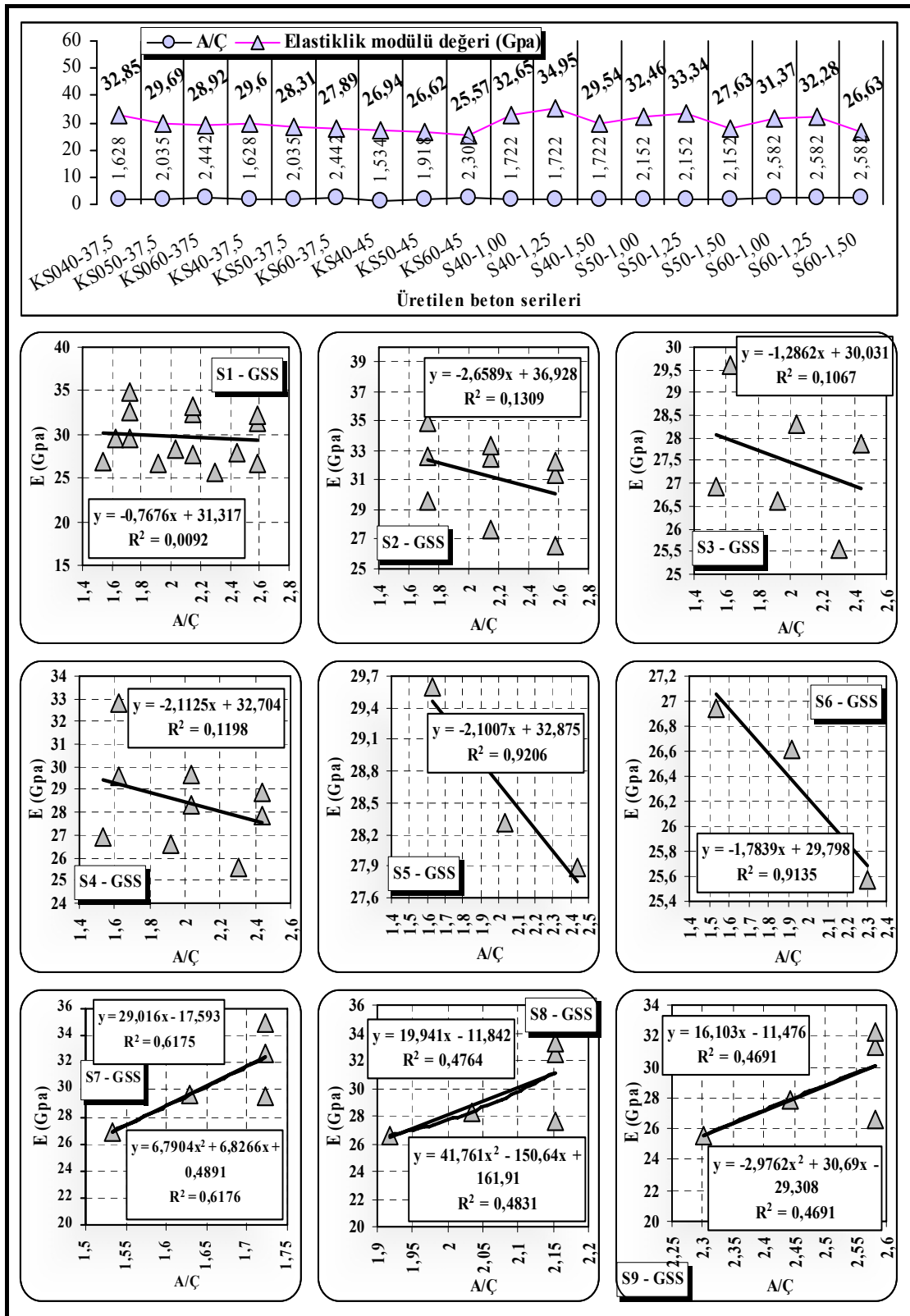
“Basınç dayanım değeri” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.11, gss) ile sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Üretim değişkenlerinin, bu ilişkiyi büyük oranda olumsuz yönde etkilediği ve “basınç dayanımı” ve “A/Ç” arasında ilişki kurulamayacağı sonucuna ulaşılmıştır (s1, s2, s3, s4).
- Sadece skoria oranının değiştiği katkısız tyhb'larda; “basınç dayanımı” ve “A/Ç” arasında çok yüksek düzeyde ters orantılı ilişkiler belirlenmiştir (s5 ve s6).
- Katkı oranlarının değiştiği tyhb'larda; “basınç dayanımı” ve “A/Ç” arasında yüksek düzeyde doğru orantılı ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir (s7, s8, ve s9).
- Elde edilen polinomal ilişkilerin güvenilirlik düzeyleri daha yüksektir.

4.1.8. Elastiklik modülü değeri

Tezde üretilen normal betonlarda; (32,85-28,92) Gpa, normal betonlar ile aynı karışım oranlarında üretilen katkısız tyhb'larda; (29,6-27,8) Gpa ve tüm tyhb'larda; (25,57-34,95) Gpa elastiklik modülü değerleri elde edilmiştir. Tezde “elastiklik modülü değeri” ve “üretim değişkenleri” ile ilişkili olarak genel düzeyde verilen sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.12, ana grafik).

- Aynı karışım oranlarında, normal betonların elastiklik modülü; tyhb'ların elastiklik modülünden fazladır. Tyhb'larda skoria nedeniyle; betonun yoğunluğunun azalması, elastiklik modülünün de azalmasına neden olmuştur. Ancak bu azalma; literatürdeki hafif agregalı beton örneklerine göre çok düşük bir orandadır. Bu durum; kullanılan skorianın olumlu özellikleri ve ara yüzey bölgesi ile açıklanabilir.
- Tezde üretilen normal betonlarda iri agrega oranı arttıkça; elastiklik modülü, tyhb'lara göre belirgin bir şekilde azalmıştır. Bu durum da diğer deneysel veriler gibi, skoria ile üretilen tyhb'larda; CH boyutunun küçüldüğünün, ara yüzey



Şekil 4.12. Elastiklik modülü değeri ve A/Ç arasındaki ilişki

bölgesinin daha iyi yapılaştığının ve agreganın pürüzlü yüzey yapısından dolayı kohesif kuvvetlerin fazla olduğunun bir göstergesidir.

- Literatürde bildirildiği gibi; skoria ve W/C oranlarının artması elastiklik modülünün azalmasına neden olmuştur. Ancak belirtilen azalma oranı çok azdır.
- Katkısız tyhb'larda, skoria oranındaki artışın; elastiklik modülü değerleri arasındaki farkı fazla etkilememesi; skorianın yoğunluğunun fazla olması ve tyhb yoğunlukları arasındaki farkın az olması ile açıklanabilir.
- W/C oranındaki artışın; elastiklik modülü değerlerini fazla etkilememesi; daha önce açıklanan "içsel hidratasyon" ve "hidratasyon oranı" kavramları ile açıklanabilir

Katkılı serilerde; normal betonlara göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Genelde;

- %1,25 katkı oranında sahip olan tyhb'larda; kendi agrega hacimsel oranına sahip olan normal betonlardan daha yüksek elastiklik modülü değerleri,
- %1,50'de, normal betonlardan daha düşük elastiklik modülü değerleri,
- %1,00'de ise; normal betonlara göre farklı değerler elde edilmiştir.

"Elastiklik modülü" ve "A/Ç" arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.12, gss) ile belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Üretim değişkenlerinin farklılaşmasından dolayı; "s1, s2, s3 ve "s4" grafiklerinde "elastiklik modülü" ve "A/Ç" arasında hiçbir ilişki olmadığı belirlenmiştir.
- Sadece skoria oranının değiştiği "s5", "s6"da; "elastiklik modülü" ile "A/Ç" arasında, yüksek düzeyde ($R^2=0,921$ ve $0,914$) ters orantılı ilişki belirlenmiştir.
- Katkı oranlarının sorgulandığı grafiklerde ilişki belirlenememiştir. Bu durum; katkı oranlarının "elastiklik modülü"nü farklı etkilediğinin göstergesidir (s7, s8, s9).

4.1.9. Basınç gerilimi altında boyuna birim deformasyon ve maksimum birim deformasyon

Basınç gerilimi altında, numunelerde oluşan hasarlar

Kırılma şekillerinin hepsi (Resim 4.1), literatür ile uyumlu (Bkz. Resim 2.1, s.28),

ilgili standarda göre makbuldür (Bkz. Şekil 2.10, s.28). Genel dağılım içerisinde;

- En yüksek dayanıma sahip olan numuneler; parçalanarak,
- Orta dayanıma sahip olan numuneler; ikiye ayrılarak, derin bir şekilde fakat parçalanmadan yarılarak veya numuneden parçacıklar koparak,
- Alt dayanımda olanlar; dikey doğrultuda çatlayarak hasar gerçekleşmiştir.
- Tüm bu kırılma şekilleri; üretilen beton serilerinin, dayanımları, gerilim – deformasyon ilişkileri ve enerji yutma kapasitelerinin de bir göstergesidir.
- Literatürde verilen kırılma şekilleri genellikle; yüzeyi kuru, nemli numunelere ilişkin kırılma şekilleridir. Bu Tezde kullanılan numuneler; hava kurusu numuneler olduğu için, elde edilen sonuçlar değerlendirilirken bu durum göz önüne alınmalıdır.

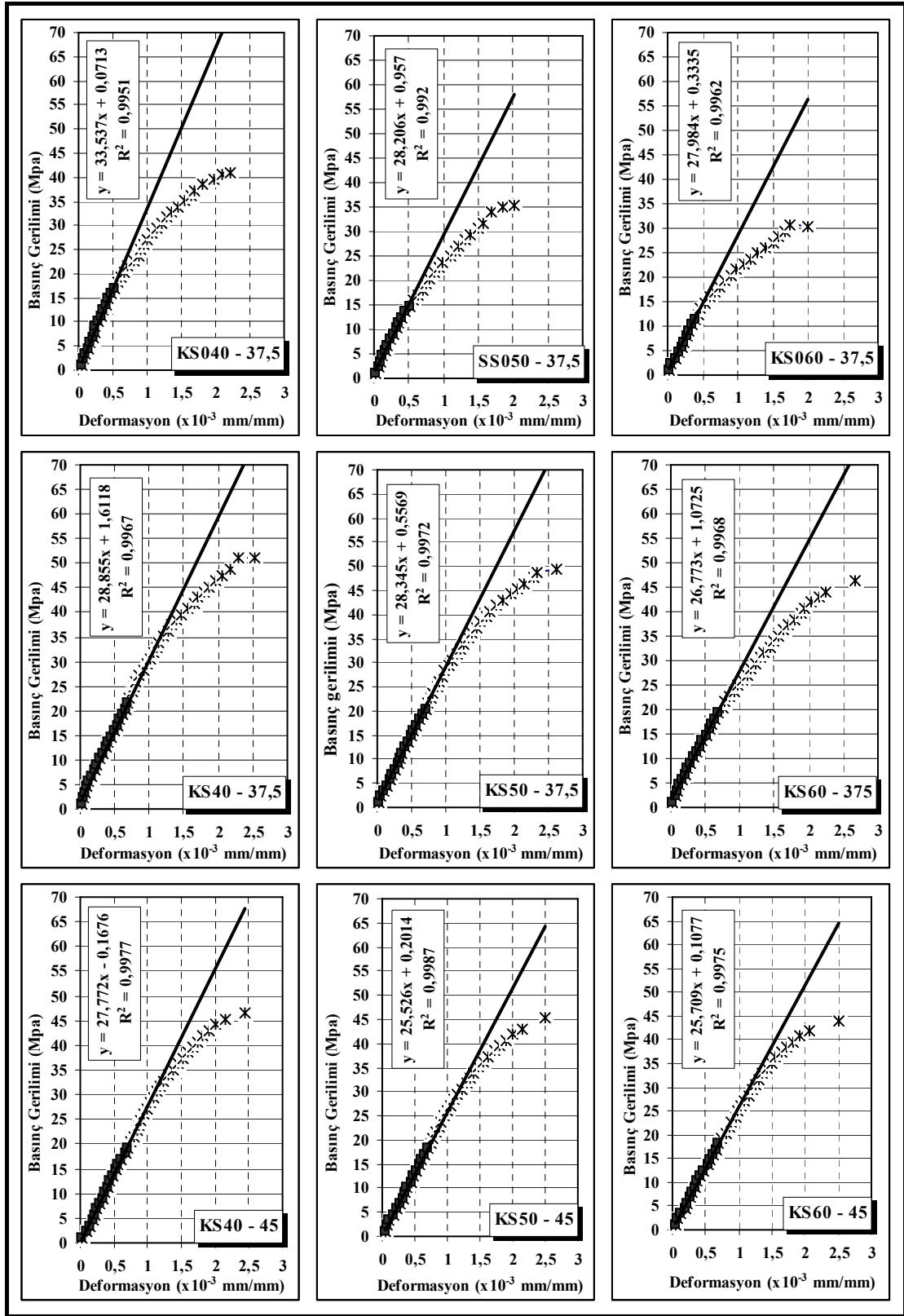


Resim 4.1. Basınç gerilimi sonucunda numunelerde görülen hasar biçimleri

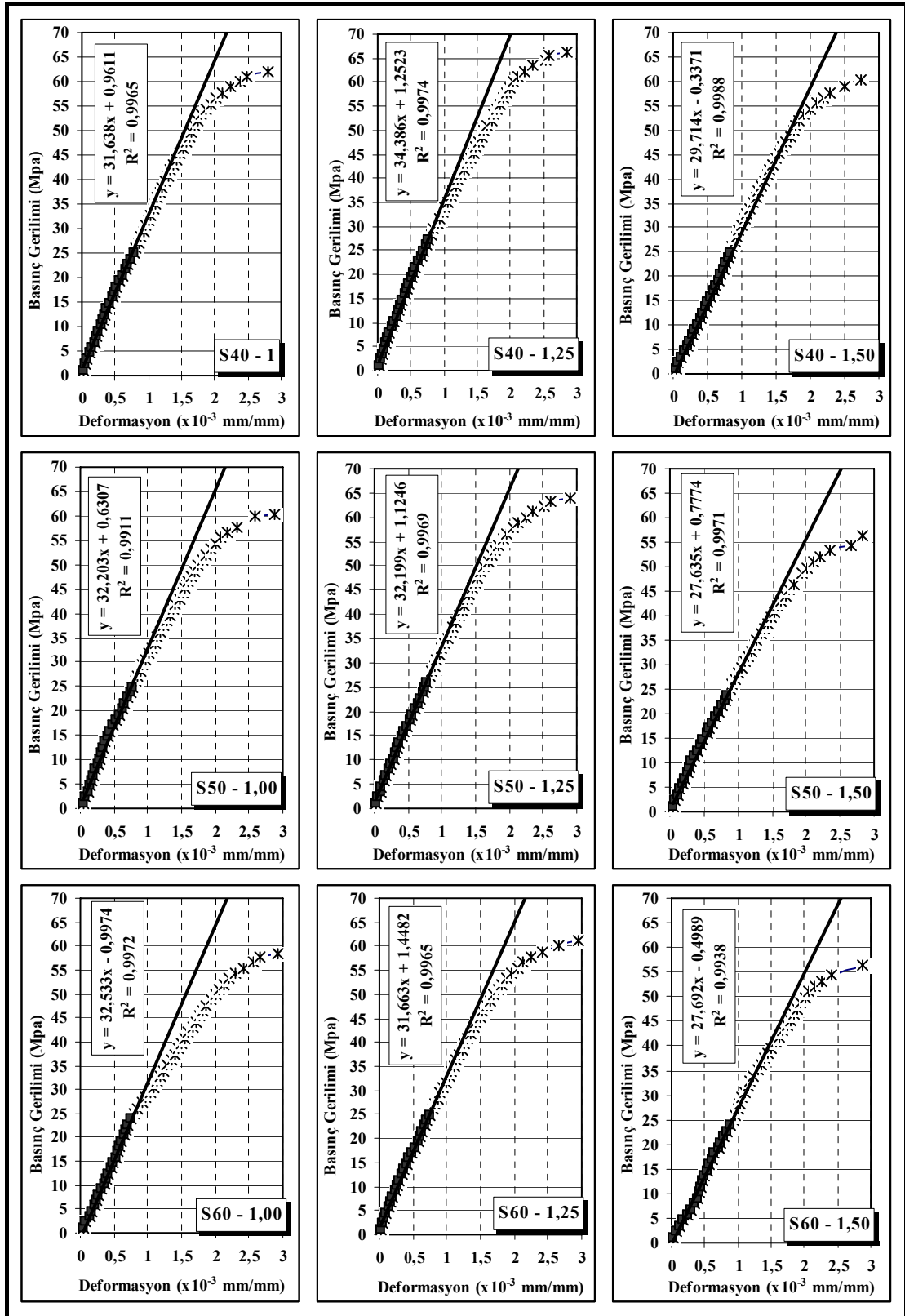
Basınç gerilimi altında boyuna birim deformasyon – basınç gerilimi ilişkisi

Tezde belirtilen ilişki; Şekil 4.13'te sorgulandığı gibidir. Bu şekilde ayrıca; elastiklik modüllerinin hesaplandığı doğrular da sunulmuştur. Sunulan eğrilerin ne kadar doğrusal davranış gösterdiği, bu doğrular kullanılarak, belirlenebilir. Bu doğrultuda şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- İlgili eğriler, normal betonlarda; daha parabolik, tyhb'larda; daha diktir.
- Özellikle katkıli tyhb'larda; dayanım artışıyla birlikte, eğri daha da dikleşmiştir.
- Tüm tyhb'larda; skoria ve W/C oranları arttıkça, diklikten sapma da artmıştır. Özellikle katkı kullanılmayan serilerde bu durum daha da belirgindir.



Şekil 4.13. Tezde, üretilen beton serilerinde basınç gerilimi – birim deformasyon ilişkisi

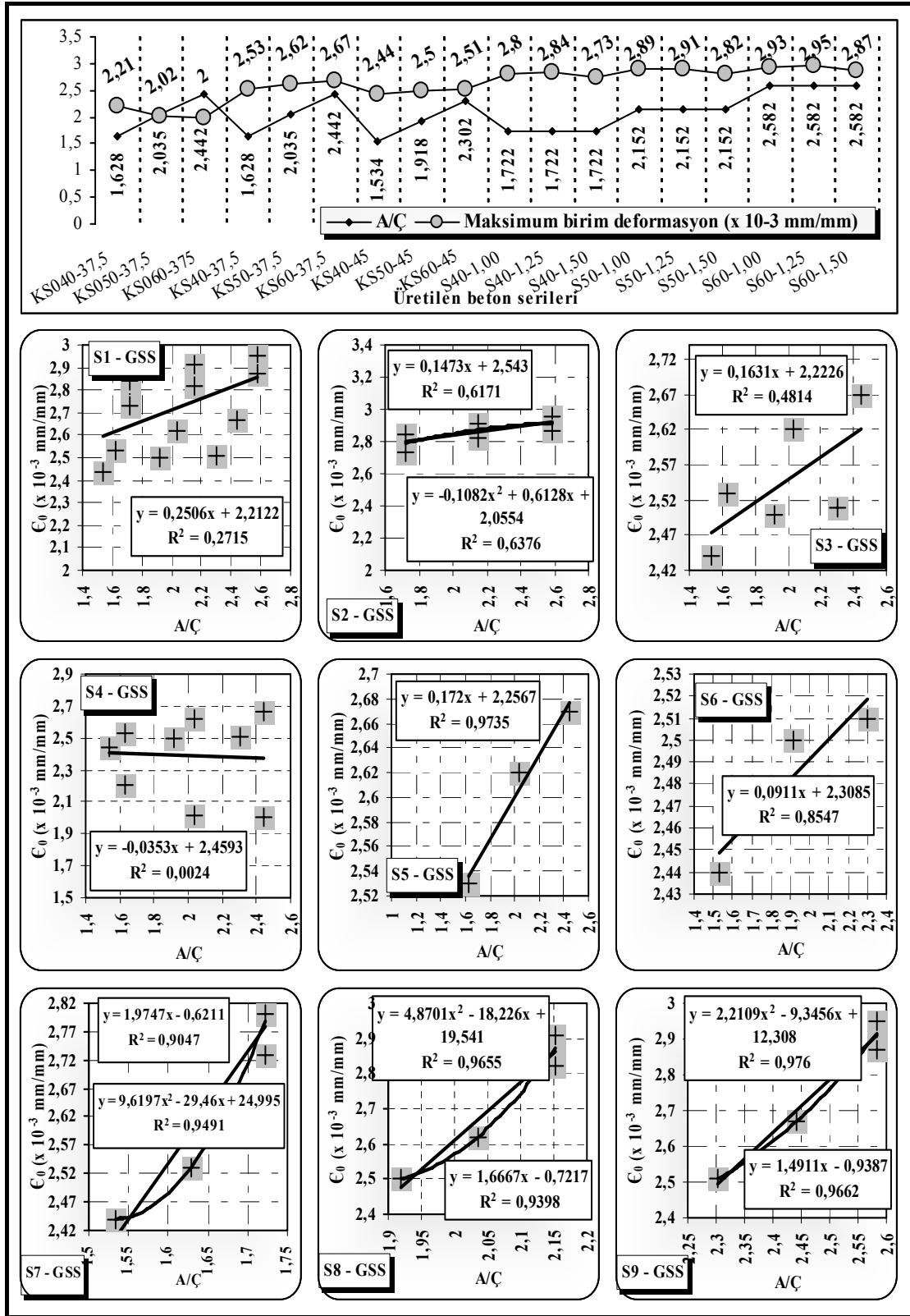


Şekil 4.13. (Devam) Tezde üretilen beton serilerinde basınç gerilimi – birim deformasyon ilişkisi

“Maksimum birim deformasyon ” ve “üretim değişkenleri” arasındaki ilişki

Normal betonlardan edinilen maksimum birim deformasyonlar; (2,21-2,00), aynı karışım oranlarında üretilen tyhb’lardan elde edilen maksimum birim deformasyonlar; (2,53-2,67); tüm tyhb’lardan elde edilen maksimum birim deformasyonlar ise; (2,44-2,95) birim arasında değişmektedir. “Maksimum birim deformasyon” ve “beton bileşenleri” ile ilişkili olarak, aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.14).

- Normal betonlarda iri agrega oranı arttıkça; “maksimum birim deformasyon” azalmıştır. Aynı karışım oranlarındaki tyhb’larda ise durum tam tersidir. Skoria oranı arttıkça, maksimum birim deformasyon değerleri de artmıştır.
- Aynı karışım oranlarında, normal betonların maksimum birim deformasyonları; skoria ile üretilen tyhb’lardan düşüktür.
- Bu sonuç; literatürdeki; “betonda kullanılan agreganın dayanımı arttıkça, maksimum birim deformasyon azalır” veya “hafif agrega oranı arttıkça maksimum birim deformasyon artar” sonuçları ile uyumludur. Ancak tyhb’ların, maksimum birim deformasyonları; literatürdeki taşıyıcı hafif beton örneklerindeki değerlerden azdır. Bu durum; skorianın, örneklerde kullanılan agregalardan daha yüksek “yoğunluk” ve “basınç dayanım” değerlerine sahip olması ile açıklanabilir.
- Sadece skoria oranlarının sorgulandığı tyhb’larda; “maksimum birim deformasyon” ve “A/Ç” doğru orantılı olarak artmıştır.
- Katkısız tyhb’larda; W/C oranı arttıkça, ters orantılı olarak maksimum birim deformasyon değeri azalmıştır.
- Katkı oranlarının sorgulandığı serilerde de; “maksimum birim deformasyon” ve “A/Ç” ilişkisi doğru orantılıdır. Bu serilerde; katkısız tyhb’lara göre daha yüksek deformasyon değerlerine ulaşılmıştır.
- Bu doğrultuda % (40 - 50 - 60) skoria oranlarında; literatür ile uyumlu olarak; “A/Ç” arttıkça, maksimum birim deformasyon değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.
- Katkılı serilerde; en büyük maksimum birim deformasyon değerleri %1,25 oranında elde edilmiştir.

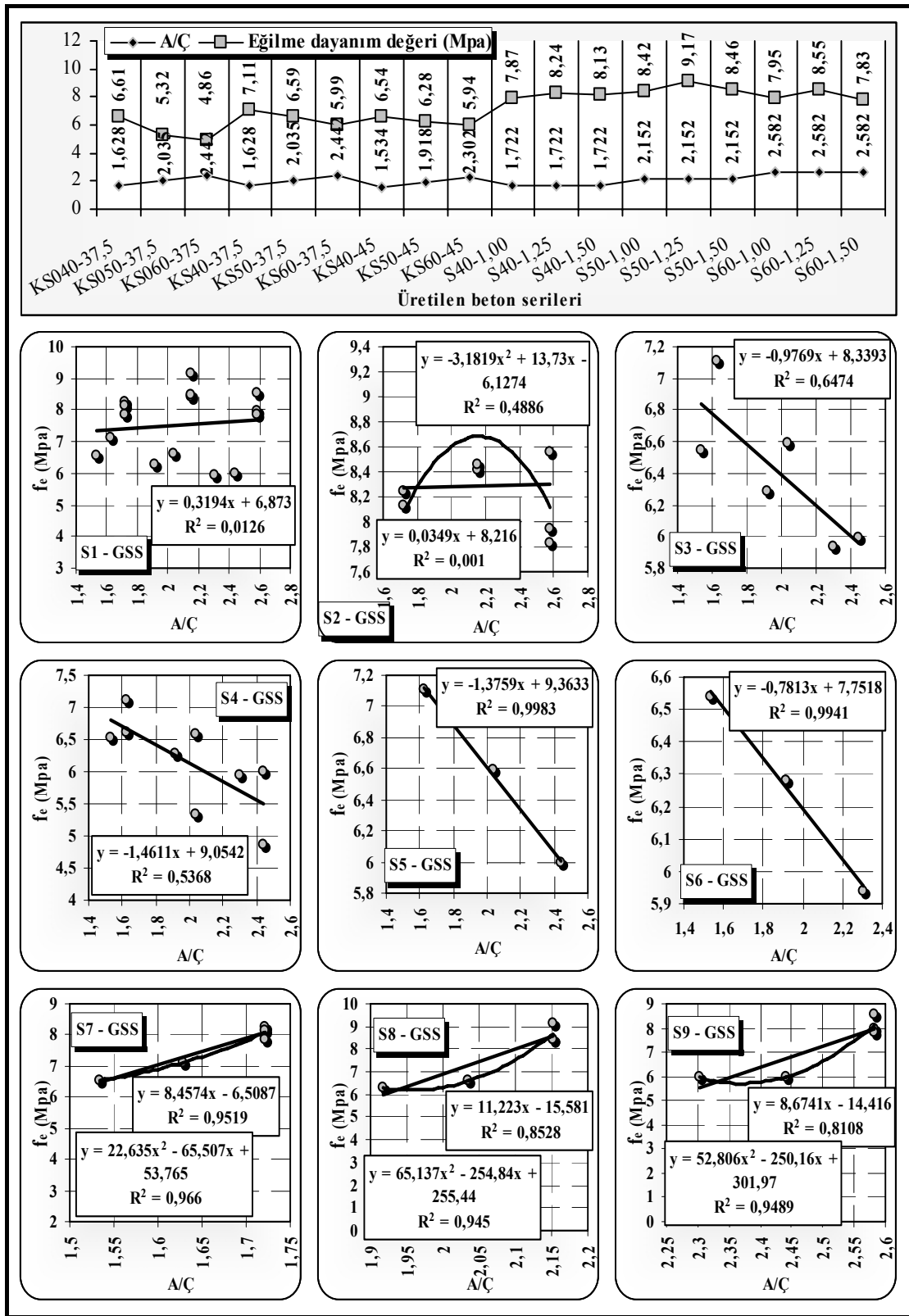


Şekil 4.14. Maksimum birim deformasyon ve A/Ç arasındaki ilişki

4.1.10. Eğilme dayanım değeri

Normal betonlarda; (6,61-4,86) Mpa, aynı karışım oranlarında üretilen tyhb'larda; (7,11-5,99) Mpa, tüm tyhb'larda; (5,94-9,17) Mpa eğilme dayanım değerleri elde edilmiştir. Tezde “eğilme dayanım değeri” ve “üretim değişkenleri” ile ilişkili olarak genel düzeyde aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.15, ana grafik).

- Katkısız normal betonlarda ve tyhb'larda, iri agrega oranı arttıkça; eğilme dayanımı, azalmıştır. Ancak normal betonlarda bu azalma oransal olarak daha fazladır. Bu durum; tyhb'larda ara yüzeyin daha sıkı yapılaşması ile açıklanabilir.
- Normal beton ile aynı karışım oranlarındaki tyhb'ların eğilme dayanımları; normal betonlarınkinden daha yüksektir. Skorianın yüzey yapısı; eğilme dayanım değerlerini, literatürde bildirildiği gibi olumlu yönde etkilemiştir.
- Tyhb'larda W/C oranı arttıkça; tyhb'ların eğilme dayanımları, yapılan diğer araştırmalar ile uyumlu olarak azalmıştır. Ancak %45 W/C oranında bile tyhb'lardan elde edilen eğilme dayanımları; % 37,5 W/C oranı ile üretilen normal betonlardan fazladır. Bu durum; skorianın yüzey yapısı dışında, literatürde bildirildiği gibi skoria ile çimento hamuru arasındaki kimyasal etkileşime de atfedilebilir.
- En yüksek eğilme dayanımları, %1,25 oranında edinilmiştir. Diğer deney sonuçlarının aksine genelde; %40 ve %50 skoria oranı kullanılan serilerde 1,50 oranında edinilen değerler; %1,00 oranında elde edilenlerden fazladır (s7, s8, s9).
- %40 skoria oranı kullanılan katkılı tyhb'larda; bu durum daha belirgindir ve bu veri doğrultusunda; %1,00 katkı oranının, “eğilme dayanımı” açısından, kuru kıvamda olan beton için yetersiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Eğilme deneyinde kırılma çok ani olduğu için, homojen olarak dağılmayan boşluklar da eğilme dayanımını, basınç dayanımına göre daha çok etkiler. Kuru kıvamlı tyhb'da bu tür boşluklar oluşmuş olabilir.
- %50 skoria oranının kullanıldığı seride edinilen değerler ise; birbirine çok yakındır. Bu durum, deneysel bir sapmanın olduğu yönünde yorumlanabilir.
- Katkılı tyhb'larda; diğer deney sonuçlarının aksine; skoria oranı arttıkça, eğilme dayanımlarında düşüş gözlenmemiş olması, dikkat çekicidir. Bu serilerde, %40



Şekil 4.15. Eğilme dayanım değeri ve A/Ç arasındaki ilişki

skoria oranından, %50 skoria oranına geçişte, belirgin bir artma olmuştur. %60 skoria oranına geçişte ise bir miktar azalma gerçekleşmiştir. Ancak buna rağmen; eğilme dayanımı, en yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği %40 skoria oranının kullanıldığı seriden bir miktar daha fazladır.

Eğilme dayanım değerleri ile ilişkili olarak saptanan bu karmaşık durum, aşağıda sıralanan farklı gerekçeler aracılığıyla yorumlanabilir;

- Katkının; skoria ile çimento hamuru arasındaki kimyasal etkileşimi arttırdığı (1),
- Daha sıkı yapılaşan katkılı serilerde; skoria - çimento hamuru arasında olan kimyasal ve fiziksel etkileşiminin yakın temas nedeniyle daha yüksek olduğu (2),
- %40 oranında ara yüzey bölgesi; ölçüsel olarak %50 ve %60 skoria oranına göre daha dar yapılaştığı için, kuvvetin fazla dağılmadan daha hızlı akması ve hasarın daha çabuk gerçekleşmesi (3) veya
- Artan agrega yüzey alanı nedeniyle aktarılan kuvvetin daha fazla yol alması (4)
- Dördüncü yargının doğru olduğunu kabul edersek; katkısız tyhb'larda; hasar, katkılı betonların aksine boşluk gibi homojen olmayan yapılaşmalar yüzünden oluşur. Katkılı tyhb'larda ise, özellikle % 50 skoria oranında, dengeli iri skoria dağılımı ve çimento hamurunun sıkı yapılaşma nedeniyle; kuvvetin daha fazla ara yüzey bölgesine yöneldiği ve çoğunlukla ara yüzey bölgesinde hareket etmesi nedeniyle daha fazla yol aldığı söylenebilir.
- Öte yandan; %50 skoria oranından, %60 skoria oranına geçişte tekrar eğilme dayanımlarının azalması; bu mekanizma çerçevesinde, düzenli boşluk yapılaşmalarının oluştuğunun bir göstergesi olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

“Eğilme dayanım değeri” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.15, gss) ile belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- “S1”de bir ilişkinin belirlenmemiş olması; tyhb'larda karışım oranlarının, eğilme dayanımı - A/Ç ilişkisini büyük oranda etkilediğinin bir göstergesidir.
- “S2”de ilişkinin olmaması; yukarıda açıklanmaya çalışıldığı gibi farklı skoria oranlarında katkıının farklı etki göstermesi ile açıklanabilir.

- Katkısız tyhb'larda; zayıf düzeyde ilişki belirlenmiştir (s3). Bu durum; W/C oranlarının, eğilme dayanımlarını farklı oranlarda etkilemesi nedeniyle oluşmuştur.
- Tek değişkenin skoria oranı olduğu serilerde yüksek korelasyonda ($R^2 = 0,998$ ve $0,994$) ters orantılı ilişkiler belirlenmiştir (s5 ve s6).
- Skoria oranının sabit değer olduğu katkılı serilerde (s7, s8, s9); değişen katkı oranlarının “eğilme dayanımı” ve “A/Ç” arasındaki ilişkiyi etkilemediği ($R^2 = 0,966$, $0,945$ ve $0,949$), belirtilen serilerde, yüksek düzeyde, doğru orantılı polinomal ilişkiler olduğu belirlenmiştir.

4.1.11. Aderans dayanım değeri

Normal betonlarda; (18,67, 19,3) Mpa, aynı karışım oranlarında üretilen tyhb'larda; (20,08-17,08) Mpa, tüm tyhb'larda; (15-31,67) Mpa aderans değerleri elde edilmiştir. Aderans dayanımının çekme kuvveti ile belirlendiği numunelerde, bir seri hariç (Resim 4.2), tüm numunelerde deney başarı ile gerçekleştirilmiş ve sıyrılma hasarı elde edilerek, bu hasarın oluştuğu kuvvetlerden, aderans dayanımları hesaplanmıştır.

Deney tasarımı yapılırken, birkaç seride aderans dayanımının ölçülemeyebileceği riski göz önüne alınmıştır. Çünkü serilerden kıyaslanabilir veriler edinilebilmesi için; tek bir tasarı yapılmıştır. Literatürde de bildirildiği gibi deney tasarımlarına bağlı olarak; düşük dayanımlarda patlama, yüksekte ise, donatı akması veya kopması hasarlarının oluşması ve aderans dayanımının ölçülememesi riski olasıdır. Tezde; geniş bir literatür taramasının yardımıyla, belirtilen hususlar göz önünde bulundurulmuştur. Bağ kırıcı kullanılarak, gömülme boyu azaltılmış ve donatı örtü tabakası geniş tutulmuştur. Sonuçta; deneylerin çoğu başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Tezde “Aderans dayanımı” ve “üretim değişkenleri” ile ilişkili olarak genel olarak sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 4.16, ana grafik).

- Normal betonlarda; %50 iri agrega kullanılan seriden, %40 iri agrega kullanılan seriye göre daha yüksek değer elde edilmiştir.
- Normal betonlar ile aynı karışım oranlarında üretilen tyhb'ların aderans değerlerinin; normal betonlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



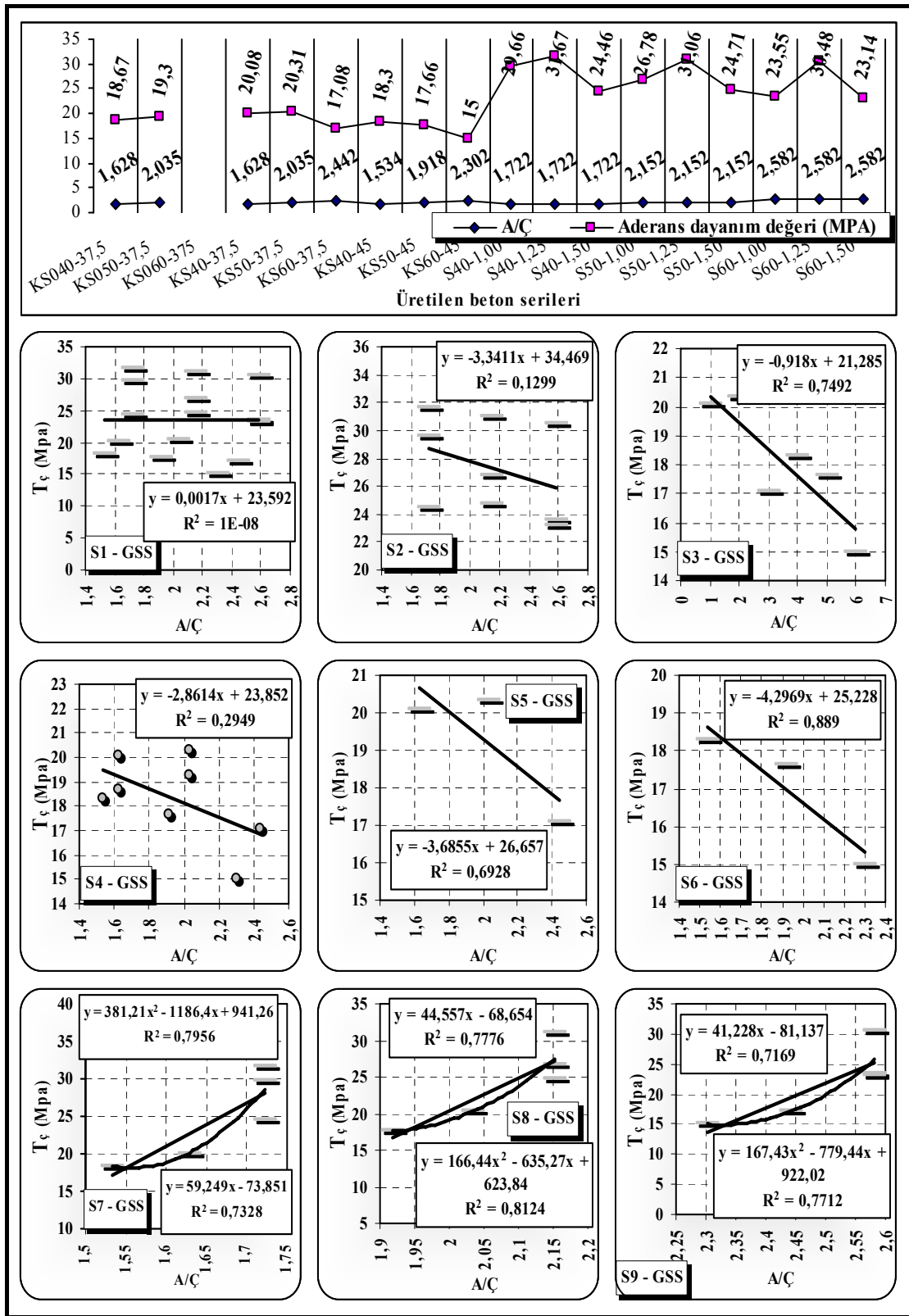
Resim 4.2. Deneyler esnasında tahripkâr bir biçimde patlayarak kırılan KS060-37,5 nolu numunelere ilişkin görüntüler



Yüzeyinde çatlak gözlenen KS60-45 - 2 nolu numunenin keser ile bir kısmının kırılması sonucunda donatı çevresinde yapılan beton bölgesi ve donatı ile ilişkili olarak elde edilen görüntüler

Resim 4.3. Beton – donatı aderans bölgesine ait görüntüler

- Katkısız tyhb'larda; skoria ve W/C oranlarının artması aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur. W/C oranının artması nedeniyle gerçekleşen düşüş; ilgili betonun diğer mekanik özelliklerine göre oransal olarak daha fazladır.
- Katkısız tyhb'larda; %40 ve %50 skoria oranlarında birbirlerine yakın değerler edinilmiştir. %60 skoria oranında ise; belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu düşüş; agreganın tane boyu dağılımı değerinin idealden uzaklaşmış olması ile açıklanabilir. Normal betonlarda hasarın gerçekleştiği serinin %60 iri agregâ oranına sahip olması bu görüşü destekler niteliktedir.
- Katkılı serilerde elde edilen aderans değerleri; diğer tüm değerlerden çok belirgin bir şekilde yüksektir. Skorianın pürüzlü yapısı ve katkının etkisiyle, tyhb'ların çok sıkı bir yapı sergilemesi; aderansın yükselmesine neden olmuştur.
- Katkı oranının değişimi; tyhb'ları diğer mekanik özellikler ile uyumlu olarak etkilemiştir. Katkı oranlarının sorgulandığı bu grafiklerde (s7, s8, s9); aderans değerleri, birbirine çok yakındır. Bu durum; katkı kullanımı sonucunda, W/C oranının düşmesi, betonun sıkılaşması ve serilerdeki farklılıkların azalması ile açıklanabilir.



Şekil 4.16. Aderans dayanım değeri ve A/Ç arasındaki ilişki

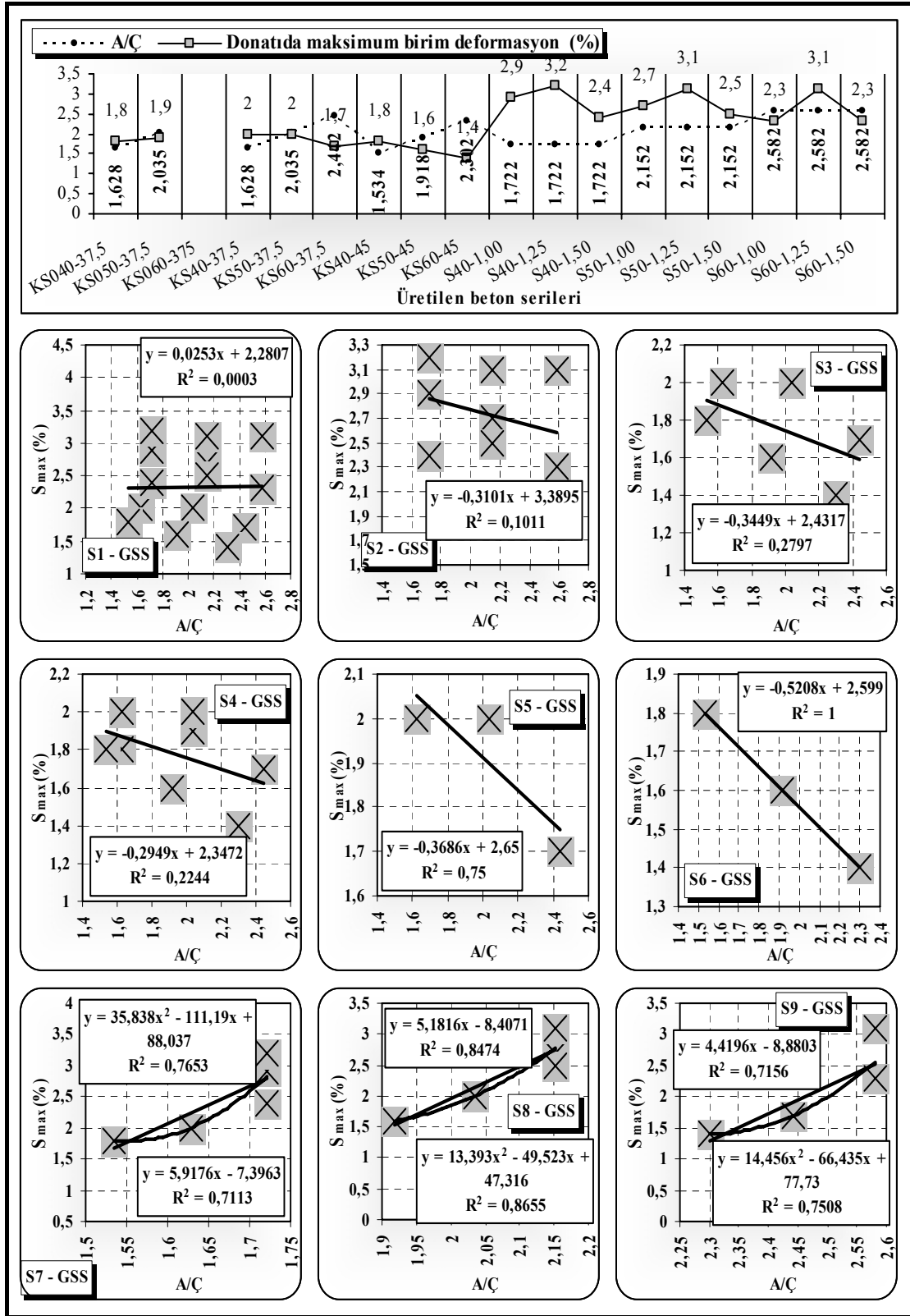
“Aderans dayanımı” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin “sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.16, gss) ile aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Üretim değişkenlerinin, normal betonlar ve tyhb’larda; aderansı önemli ölçüde, farklı oranlarda etkilediği ve bu doğrultuda farklı değişimleri içeren grafiklerde (s1, s2, s4); aderans dayanımı ve “A/Ç” arasında ilişki olmadığı belirlenmiştir.
- Katkısız serilerde; “aderans” ve “A/Ç” arasında iyi sayılabilecek düzeyde ($R^2 = 0,749$) ilişki olduğu belirlenmiştir (s3). Diğer ilişkiler; yaklaşık, belirtilen düzeydedir.
- Genelde, “s5” ve “s6” grafiklerinde; “A/Ç” ile beton özellikleri arasında çok yüksek düzeyde ilişkiler belirlenirken bu sınamada belirtilen düzeyde bir ilişkinin elde edilmemiş olması; agreganın tane boyu dağılımı değerlerinin aderans değerlerini önemli ölçüde etkilediğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

4.1.12. Donatıda maksimum birim deformasyon değeri

Tezde; donatının akma sınırına kadar doğrusal olarak yaptığı deformasyon davranışı, donatıda maksimum birim deformasyon değerlerine (kısaca; donatı deformasyonu) yansımıştır (Şekil 4.17). Tezde, üretilen normal betonlarda; % (1,8-1,5), aynı karışım oranlarında üretilen tyhb’larda; % (2-1,7), tüm tyhb’larda; % (1,4-3,2) oranlarında donatı deformasyon değerleri belirlenmiştir. Tezde “donatıda maksimum birim deformasyon” ve “üretim değişkenleri” ile ilişkili olarak genel düzeyde aşağıda açıklanan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.17, ana grafik);

- %50 iri agregada kullanılan normal betonlarda; %40’a oranına göre daha yüksek maksimum birim deformasyon değeri belirlenmiştir. Bu durum; iri agreganın yoğun yapısı nedeniyle, nervürlü donatının sıyrılmasını zorlaştırdığı ve daha fazla deformasyon yapmasına neden olduğu şeklinde açıklanabilir.
- Aynı karışım oranlarında, tyhb’lardan edinilen değerler; normal betonlardan daha fazladır. Skorianın normal agregadan daha düşük yoğunlukta olmasına rağmen bu sonucun edinilmiş olması; küçük CH boyutu ve sıkı yapılaşan ara yüzey bölgesi nedeniyle, betonun daha fazla yükte, donatının sıyrılmasına izin vermesi ve donatının daha fazla deforme olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.17. Donatıda maksimum birim deformasyon ve A/Ç arasındaki ilişki

- Tyhb’larda skoria ve W/C oranları arttıkça; donatı deformasyon değerleri azalmıştır. Bu durum da yukarıda yapılan yorumlar doğrultusunda açıklanabilir.
- En yüksek deformasyon değerleri; katkılı tyhb’lardan elde edilmiştir. Katkı sayesinde tyhb’larda betonun sıkılaşması; donatının sıyrılması için daha fazla kuvveti gerektirmiş, bununla doğru orantılı olarak ta deformasyon oranları artmıştır. Bu tyhb’larda elde edilen değerler, aynı gerekçe doğrultusunda birbirine çok yakındır.
- En düşük değerler; %60 skoria oranı ve % 1,00 ve 1,50 katkı oranına sahip olan tyhb’larda belirlenmiştir. Bu durum, bu serilerde, çimento hamurunun boşluk yapılaşmasının; diğer serilere göre, daha fazla veya düzensiz olması ile açıklanabilir.

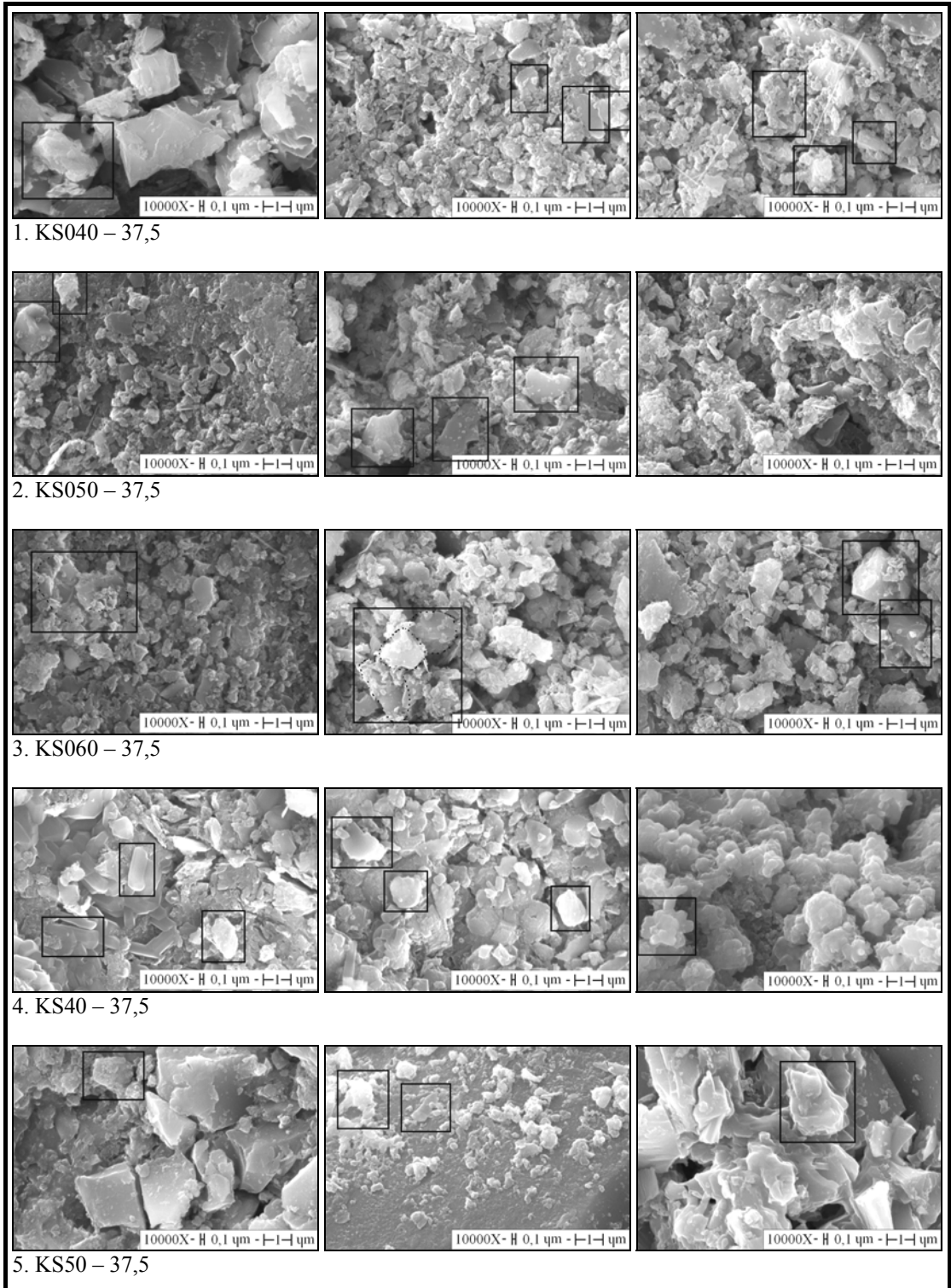
“Donatıda maksimum birim deformasyon” ve “A/Ç” arasındaki ilişkinin sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.17, gss) ile aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- İlk dört seride, değişkenlerin farklılaşması nedeniyle belirtilen ilişki yoktur.
- Katkı oranlarının sorgulandığı serilerde; iyi sayılabilecek düzeyde ve tutarlı, doğrusal ve polinomal ilişkiler elde edilmiştir ($R^2=0,711$; 0,847; 0,716). Bu değerler, aynı sınamalarda, diğer özelliklerden edinilenlerden biraz düşüktür. Bu; katkı oranlarının donatı deformasyon değerlerini farklı etkilediğinin göstergesi sayılabilir.
- Skoria oranlarının sorgulandığı serilerde (s5, s6) “donatı deformasyonu” ve “A/Ç” arasında, ters orantı belirlenmiştir. Korelasyonlar arasındaki tutarsızlık, veri hatasından kaynaklanmış olabilir.
- Katkılı serilerde, ilişkinin; doğrusal nitelik kazanması; kullanılan katkının beton özellikleri üzerinde etkisinin önemli olduğunun bir göstergesi sayılabilir.

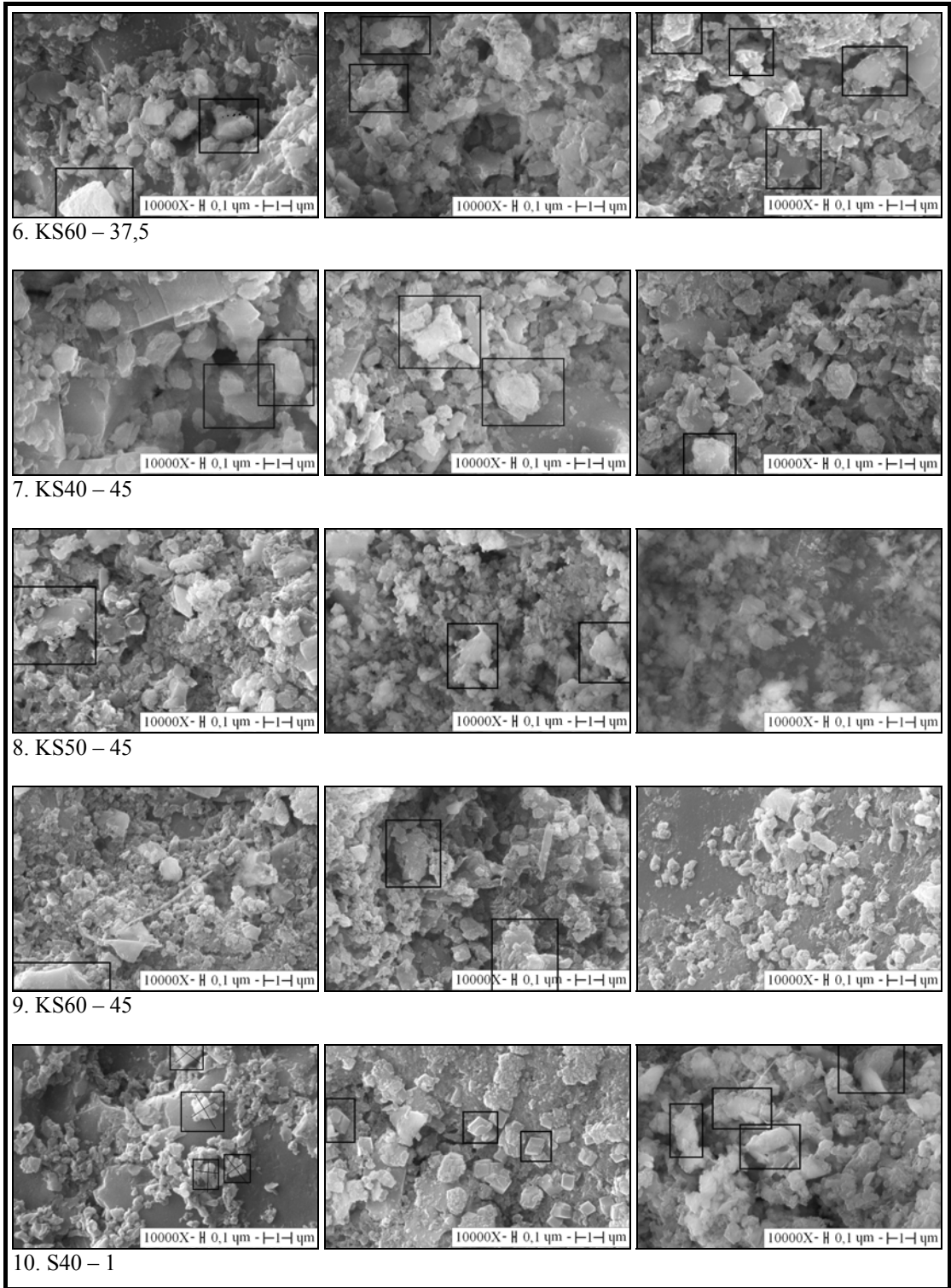
4.2. CH boyutu ile İlgili Bulgular ve Tartışma

4.2.1. CH görüntüleri

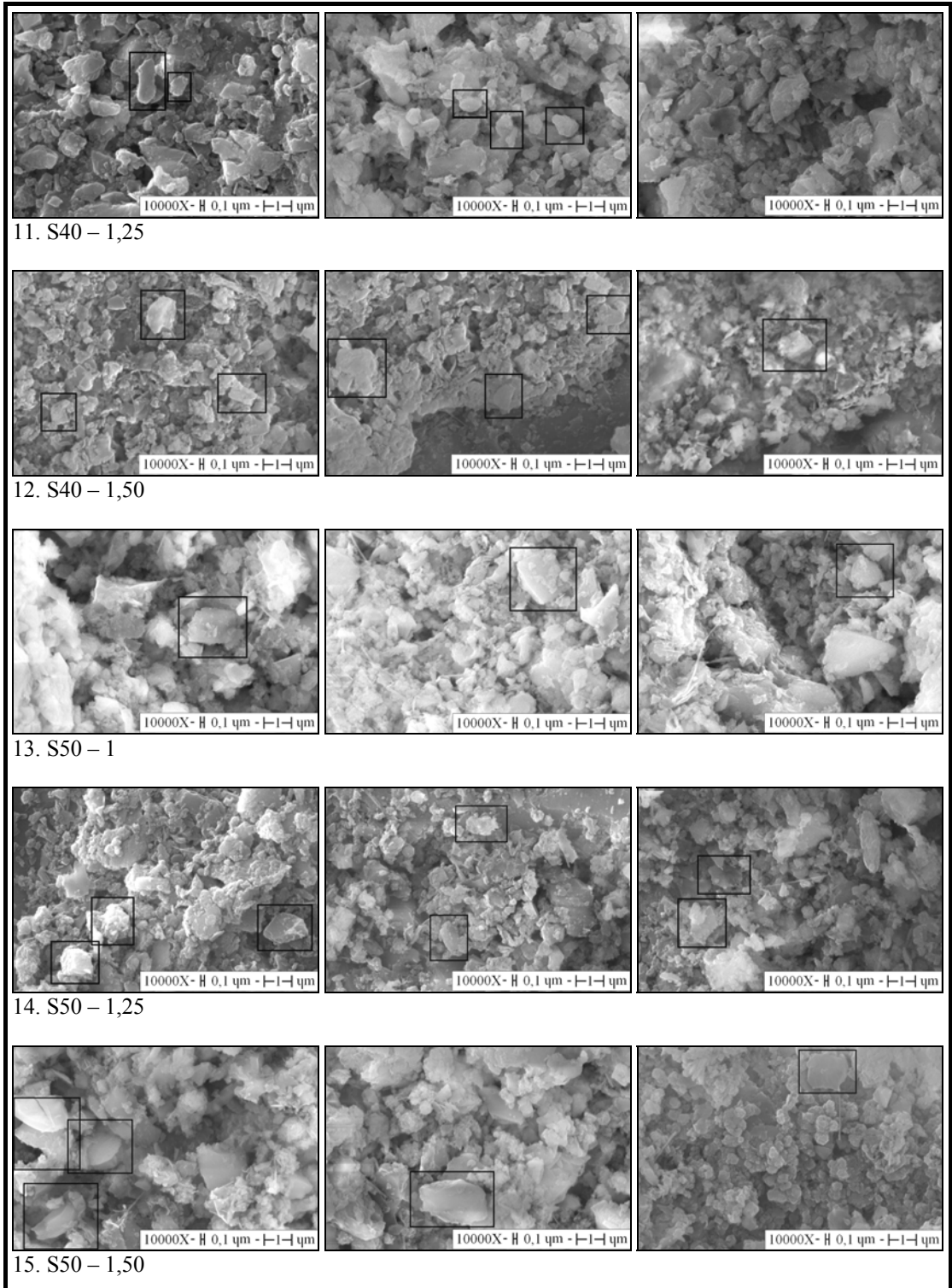
Tezde, analiz edilen 18 beton serisinin ara yüzey bölgesindeki ait en büyük CH kristallerini içeren “se1” (secondary electron image) görüntüleri; Resim 4.4 – Resim 4.7’de (Bkz.s. 99- 102) sunulduğu gibidir.



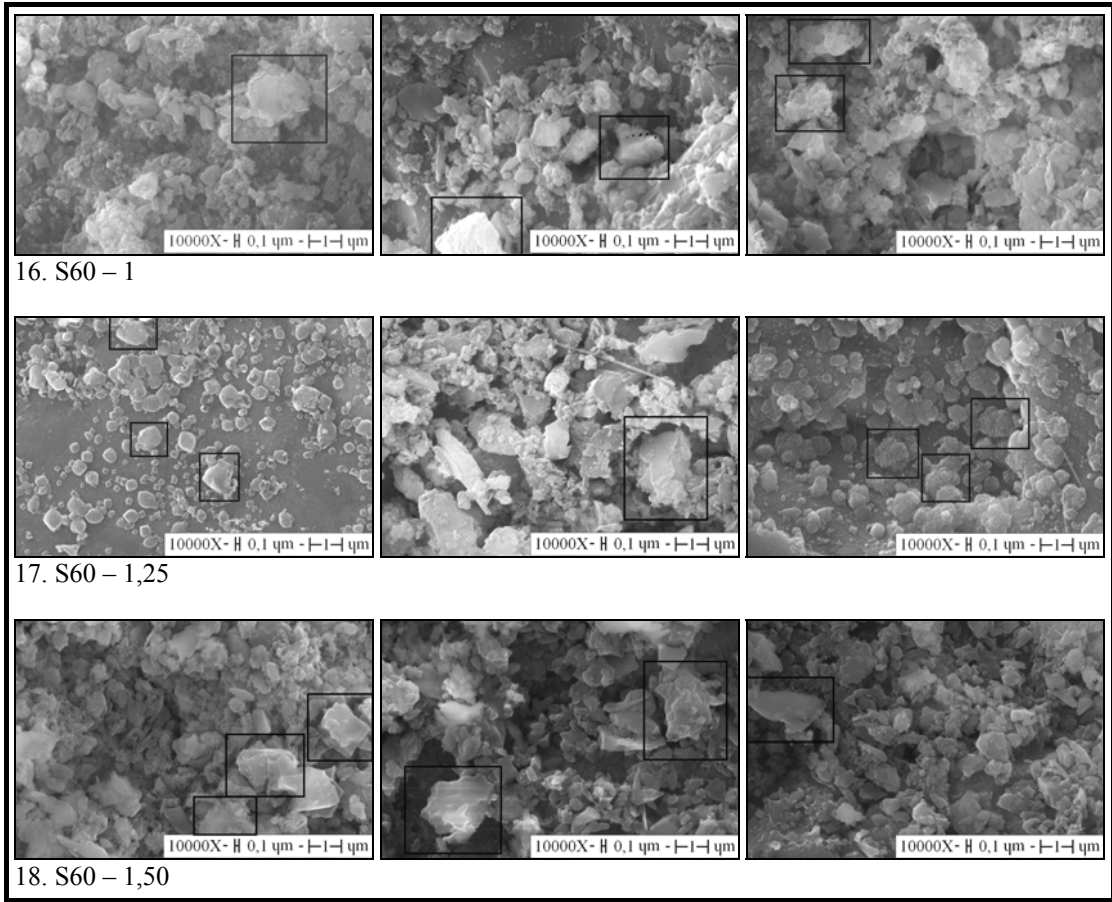
Resim 4.4. CH görüntüleri – 1



Resim 4.5. CH görüntüleri – 2



Resim 4.6. CH görüntüleri – 3



Resim 4.7. CH görüntüleri - 4

4.2.2. CH boyutu

Tezde üretilen normal betonlarda; (1,640-2,050) μm , aynı karışım oranlarında üretilen tyhb'larda; (1,533-1,860) μm , tüm tyhb'larda; (0,910-2,047) μm CH boyutu değerleri elde edilmiştir.

CH görüntülerine göre (Bkz. Resim 4.4 – 4.7) şu yargılara ulaşılmıştır;

- Tezdeki tüm beton serilerindeki CH boyutu ve morfolojisi literatüre göre mükemmeldir. CH morfolojisi, biçimsel olarak; küpe yakın köşeleri yuvarlak, çakıl taşı formundadır. CH kristalindeki morfolojik açıdan bu yapılaşma; ara yüzey bölgesinin morfolojik olarak, çok sıkı yapılaşmasının bir göstergesidir.
- Literatüre göre, genelde ara yüzey bölgesinde oluşan CH kristalleri agrega yüzeyine paralel olacak şekilde yönlenir (CH index), çimento hamurunda bu

yönlenme kaybolur. Tezde üretilen betonların tümünde; ara yüzey bölgesinde CH yönlenmesi belirlenmemiştir. Bu sonuç ta ara yüzeyin sıkı yapılaştığını gösterir.

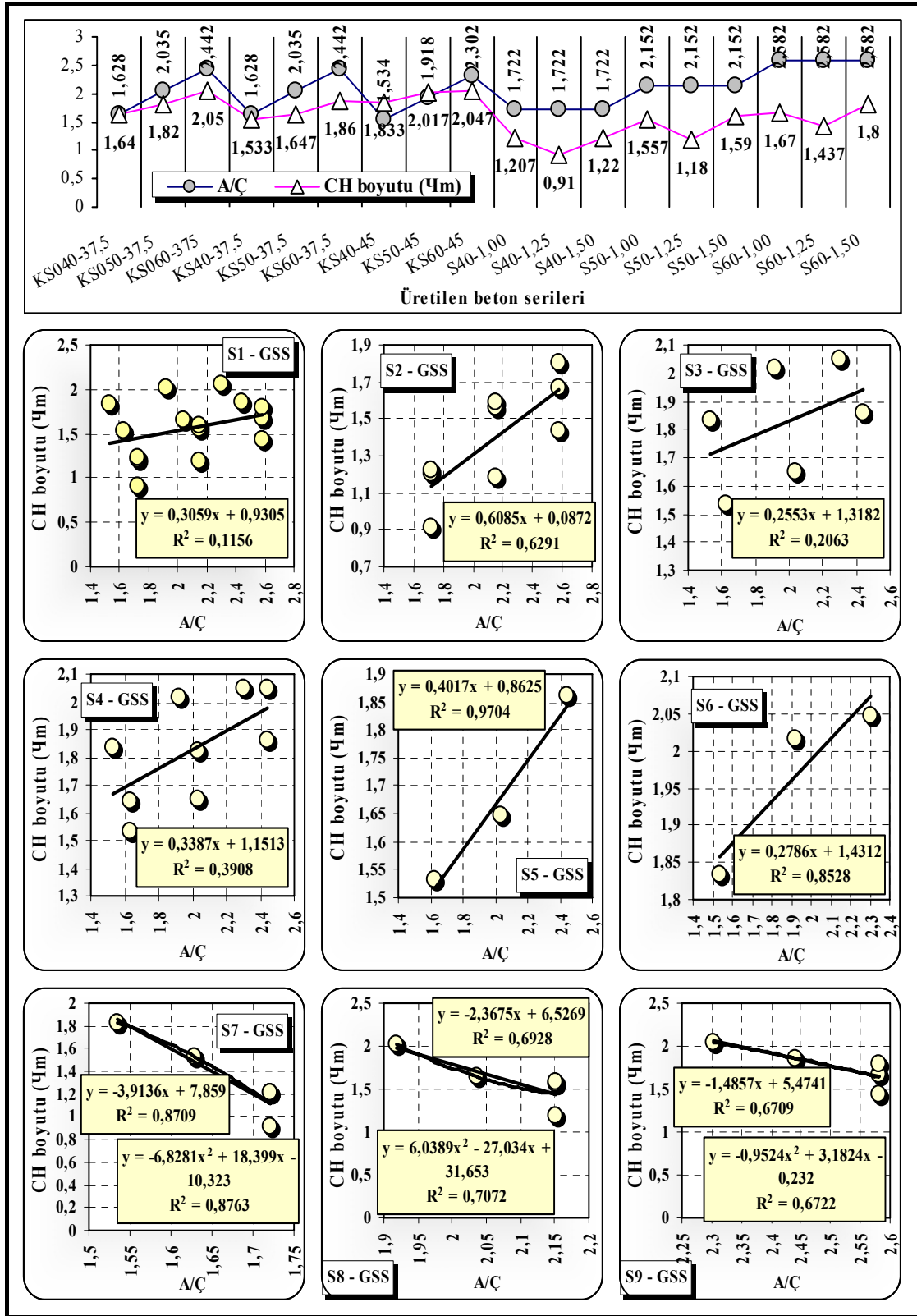
- Literatüre göre, ara yüzeyde bölgesinde; genelde belirlenen en büyük CH boyutu; (10-15) ҫm'dir. Yaklaşık 120, 300 ҫm'ye varan uç örneklerle veya yaklaşık 50, 60 ҫm gibi daha ılımlı örneklerle de rastlanılmıştır (Bkz. Resim 2.4, s.36).
- Gao, ve ark.'nın araştırmasında [42]; 5 ҫm olan CH boyutu; “ideal” olarak tanımlanmıştır. Aydın'ın araştırmasında ise ponza kumu kullanılan harç karışımında bu boyut 5-6 ҫm civarındadır (Bkz. Resim 2.3, s.35).
- Tezde, normal betonlarda belirlenen maksimum CH boyutu; yaklaşık 2 ҫm'dir. Literatürde bildirilen en düşük değerler bile; bu Tezde edinilen en büyük boyutun iki buçuk katıdır. Edinilen en küçük boyutun (0, 91 ҫm) ise; yaklaşık beş buçuk katıdır.

Tezde CH boyutu ile ilgili olarak elde edilen bu çarpıcı sonuç;

- Skoria – çimento hamuru arasında olabilecek kimyasal etkileşim ve hidrasyon gelişimi ile açıklanabilir.
- Ayrıca, bu sonucun elde edilmesinde etkili olan bir başka unsur; TEM numunelerinin üretildiği beton numunenin boyutları olabilir. Tezde, TEM numuneleri (100x100x500) mm boyutlarındaki kiriş numunelerden küçültülerek oluşturulmuştur. Literatürde ise; genelde tem analizleri için kullanılan numuneler; (25x25x50) mm gibi çok küçük boyutlarda üretilip, bunlardan kesilerek incelenen numunelerdir. Büyük boyutlardaki numunelerde, betonun, daha iyi sıkışacağı açıktır. İyi sıkışan numunelerde; CH boyutu doğal olarak daha düşük olacaktır. Bunun, literatüre göre edinilen farka katkısı olabilir.

Tezde “CH boyutu” ve “üretim değişkenleri” ile ilişkili olarak genel düzeyde aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 4.18, ana grafik).

- Normal betonlarda iri agrega oranı arttıkça; “kanama” ile ilişkili olarak CH boyutunun arttığı belirlenmiştir. Katkısız tyhb'larda da skoria oranı arttıkça, CH boyutunun arttığı belirlenmiştir. Su emdirilen skoriadan edinilen bu sonuç; büyük oranda doygun olan agreganın, daha fazla su emmediği için, normal agrega ile aynı tepkiyi göstermesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.18. CH boyutu ve A/Ç arasındaki ilişki

- Aynı karışım oranlarında, tyhb'larda, CH boyutunun; normal betondan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç; kullanılan skorianın puzzolanik davranışının bir sonucudur.
- Katkısız tyhb'larda W/C oranı arttıkça, CH boyutunun arttığı belirlenmiştir.
- Düşük W/C oranına sahip olan katkılı tyhb'lardan elde edilen CH boyutu; genellikle katkısız tyhb'lardan daha küçüktür.
- Ancak, W/C oranı arttıkça; aradaki farkın azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuç, "CH boyutu" değerinin belirlenmesinde, agrega oranının etkin olduğunun göstergesidir.
- Katkılı tüm tyhb'larda; en düşük CH boyutu; %1,25 oranında elde edilmiştir. Bu durum; CH boyutu ve dayanım arasında kuvvetli ilişkilerin olduğunu gösterir.

"CH boyutu" ve "A/Ç" arasındaki ilişkinin "üretim değişkenleri"ne göre sayısal olarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.18, gss) ile aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır;

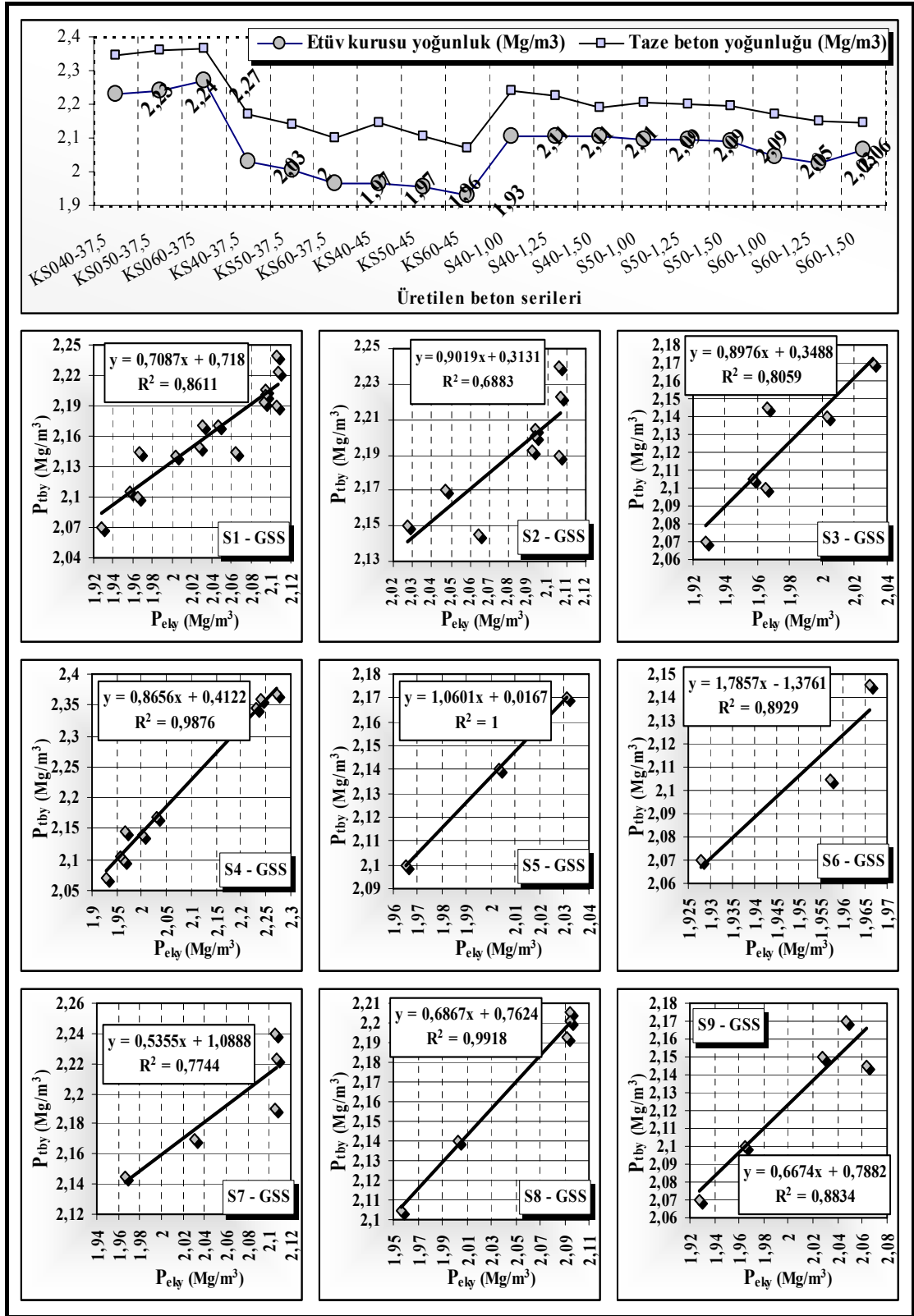
- "S1, s3, s4"de değişkenlerin çeşitliliği nedeniyle hiçbir ilişki belirlenememiştir.
- Skoria oranlarının sorgulandığı s5, s6'da yüksek ve iyi düzeyde doğrusal ilişkiler belirlenmiştir.
- Katkı oranlarının sorgulandığı, tyhb'larda; orta ve iyi sayılabilecek düzeylerde, ters orantılı polinomal ilişkiler belirlenmiştir (s7, s8, s9).

4.3. Beton Özelliklerinin Etüv Kuru Yoğunluk ile İlişkisi ve Tartışma

4.3.1. Taze beton yoğunluğu – etüv kuru yoğunluk ilişkisi

"Taze beton yoğunluğu" ve "etüv kuru yoğunluk" arasındaki ilişkinin sorgulanması ile (Şekil 4.19) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

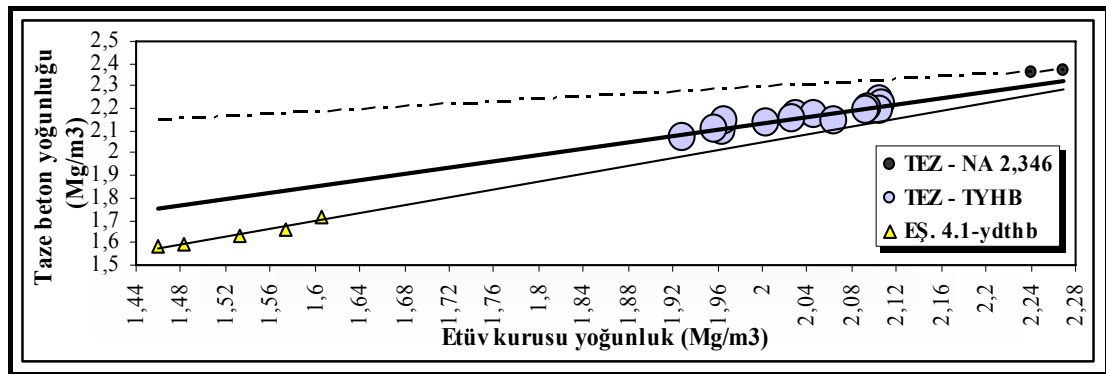
- Tüm grafiklerde (s2 hariç); iyi veya yüksek düzeyde doğrusal ilişki belirlenmiştir. "s2"de ise ilişki; katkı oranı ve skoria oranının yoğunluk değerlerini farklı oranlarda etkilemesi nedeniyle, orta düzeydedir.



Şekil 4.19. Taze beton yoğunluğu ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

Tezde; “taze beton yoğunluğu” ve “etüv kurusu yoğunluk” arasındaki ilişkinin literatüre ile karşılaştırılması aracılığıyla (Şekil 4.20) aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır

- Literatürden “türetilmiş” tek bir ilişki elde edilebilmiştir (Eş.4.1). Hafif agrega olarak ponza kullanılan örnekte; beton bileşenleri orantılı olarak değiştiği için her iki yoğunluk değeri arasında yüksek düzeyde ilişki olduğu belirlenmiştir [94].



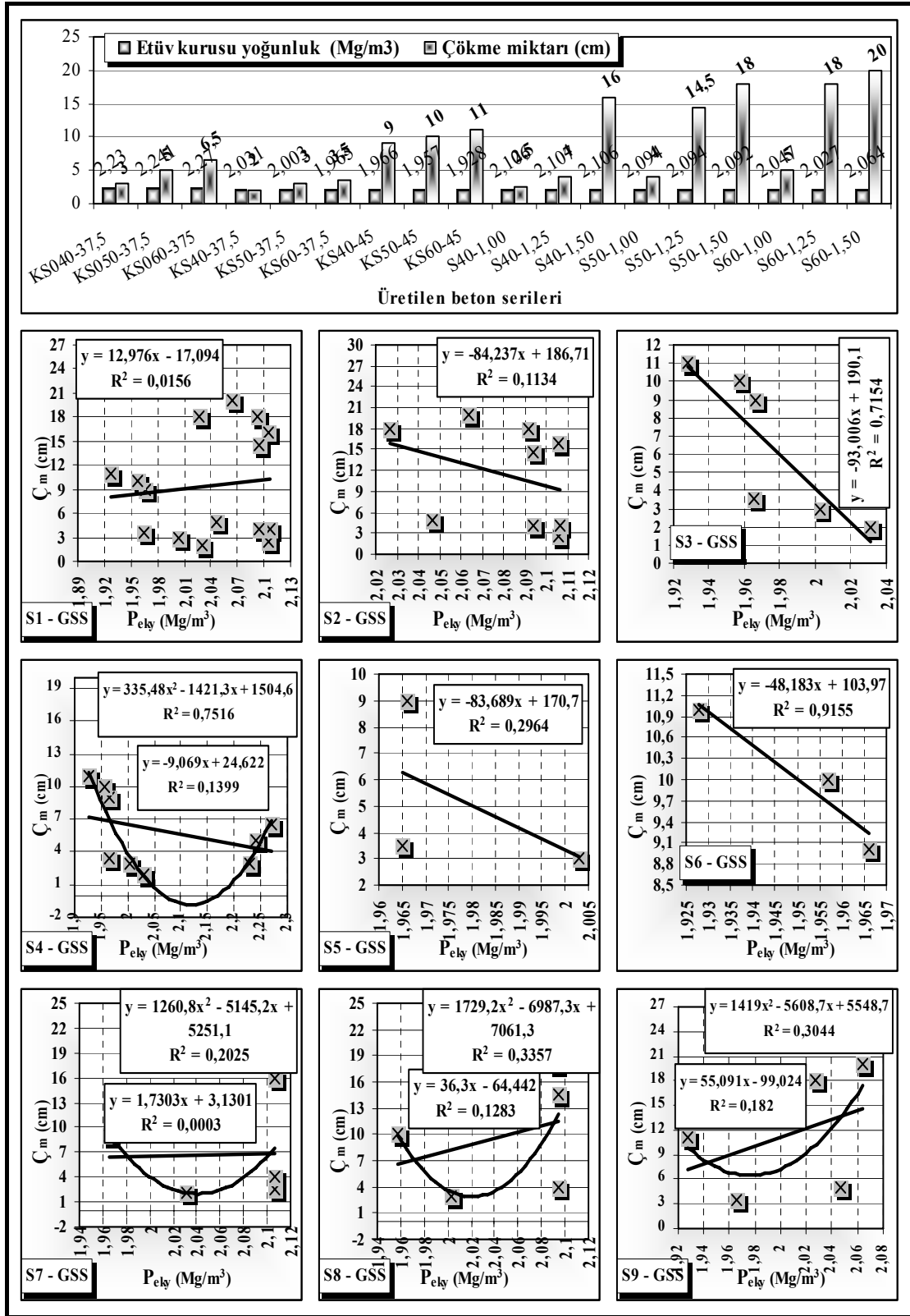
Şekil 4.20. Taze beton yoğunluğu ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

4.3.2. Taze beton kıvamı - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

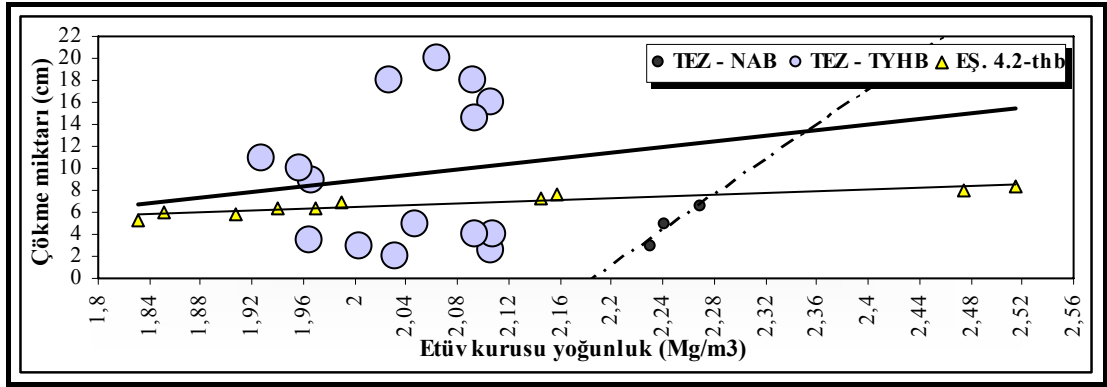
“Taze beton kıvamı” ve “etüv kurusu yoğunluk” arasındaki ilişkinin sorgulanması ile (Şekil 4.21) aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- “Çökme” değeri, beton bileşenlerinden büyük oranda etkilenen bir değerdir.
- Bu nedenle araştırmada, “s1”, “s2” ve “s4” grafiklerinde ilişki elde edilmemiştir.
- Skoria ve W/C oranlarının değiştiği “s3”, “s5” ve “s6”da; sorgulanan ilişki; ters orantılıdır. Yani; çökme miktarı arttıkça, etüv kurusu yoğunluk (kısaca; yoğunluk) değeri azalmıştır.
- Katkısız normal betonlar ve tyhb’lar arasında; ilişki belirlenmiştir (s4). Bu durum; daha önce sunulan, “doğru halde kullanılan skoria, çökme davranışı açısından normal agregaya benzer davranış sergilemektedir” savını desteklemektedir.

Tezde; “taze beton kıvamı” ve yoğunluk arasındaki ilişkinin literatüre göre olan konumunun sorgulanması (Bkz.Şekil 4.22) ile aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 4.21. Taze beton kıvamı ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki



Şekil 4.22. Taze beton kıvamı ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- İncelenen araştırmalarda, bu ilişkiyi sorgulayan bir örneğe rastlanılmamıştır.
- Hossain'in, ponza agregası kullanarak ürettiği taşıyıcı hafif betonlardan edinilen veriler; üretim bileşenlerinin orantı değişmesi koşuluyla; “çökme miktarı” – “etüv kurusu yoğunluk” arasında, yüksek korelasyonda, ilişki olabileceği yönündedir [23]. Örnekte, ponza kullanılarak elde edilen çökmenin, aynı etüv kurusu yoğunluk değerlerinde, tezdeki katkılı tyhb'lardan edinilen değerlerden düşük olduğu belirlenmiştir.

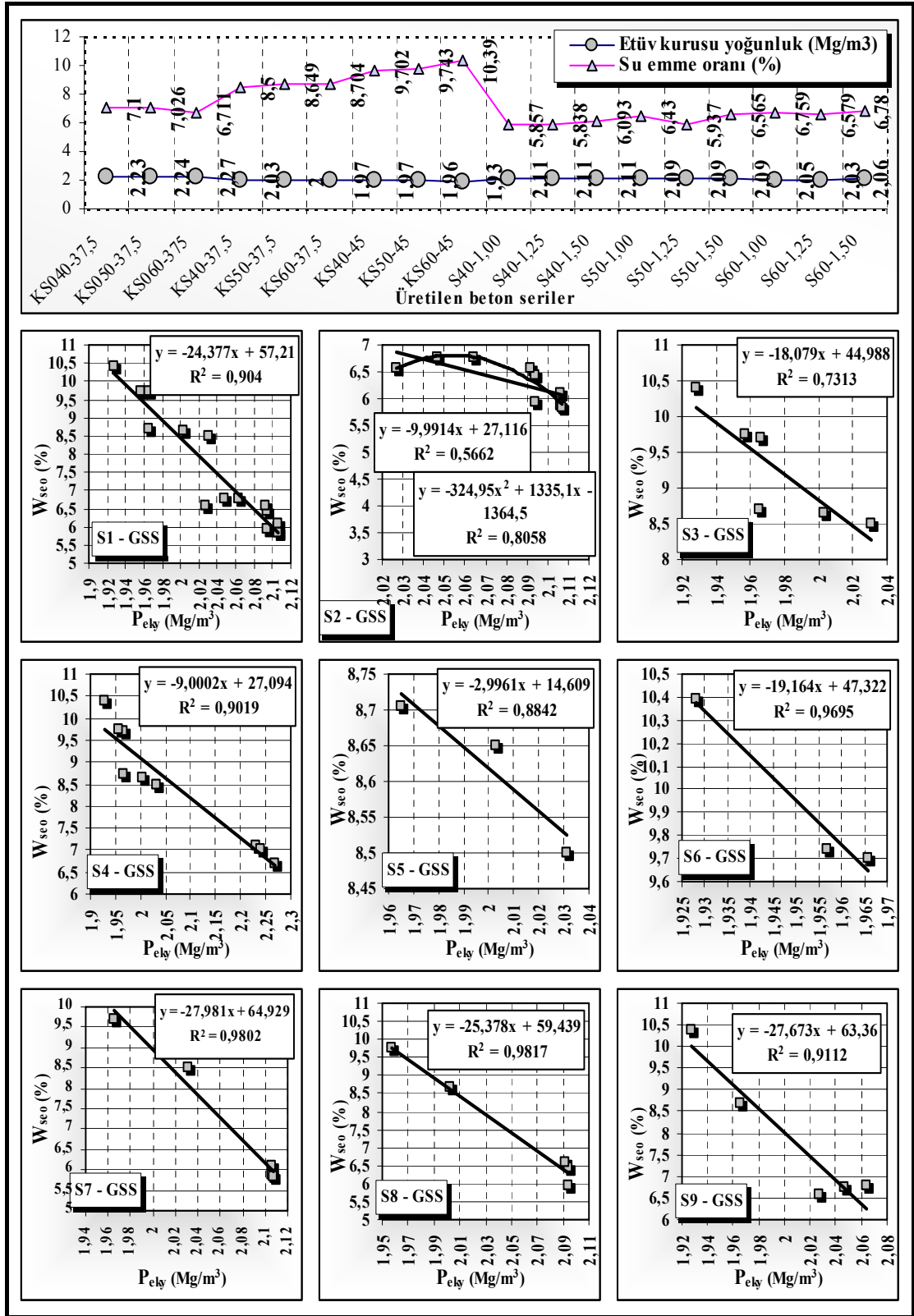
4.3.3. Su emme oranı - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

“Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.23) aşağıda sunulan yargılara ulaşılmıştır;

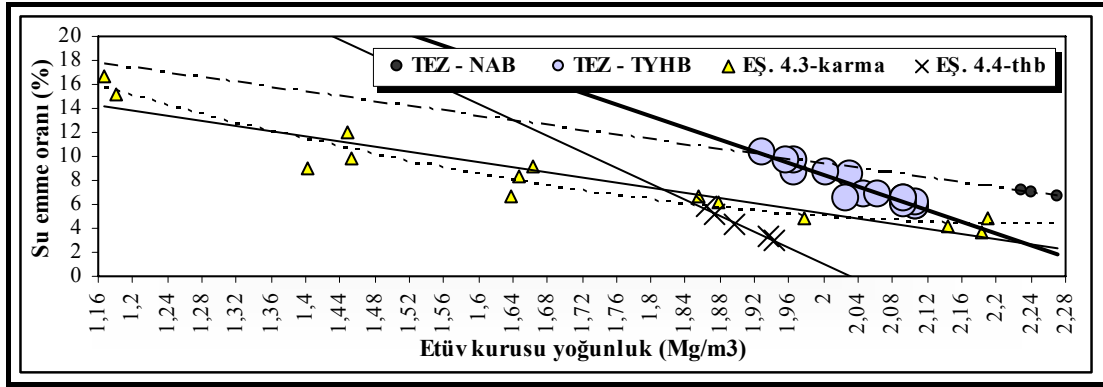
- Farklı bileşen oranlarının sınıandığı tüm grafiklerde; su emme oranı ile yoğunluk değerleri arasında, yüksek düzeyde, ters orantılı ilişkiler olduğu belirlenmiştir.
- Tezde edinilen bu sonuç, literatürde ortak kabul gören ve desteklenen bir sonuçtur. Ancak, tyhb'larda, bu ilişkinin varlığı sayısal olarak somutlaştırılmıştır.

“Su emme oranı” ve “etüv kurusu yoğunluk” ilişkisinin literatüre ile karşılaştırılarak sorgulanması (Bkz. Şekil 4.24) ile yapılan saptamalar aşağıdaki gibidir.

- Şahin ve ark.'nın ponza ile ürettikleri taşıyıcı hafif betonlarda [92]; yüksek düzeyde ilişkiler belirlenmiştir (Eş.4.3 ve 4.4). Bu sonuç araştırma ile uyumludur.



Şekil 4.23. Su emme oranı ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki



Şekil 4.24. Su emme oranı ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- Ancak, Tezde üretilen tyhb'lardan çok daha düşük yoğunlukta olan taşıyıcı hafif betonlarda; yaklaşık aynı değerlerde "su emme oranları" elde edilmiştir. Bu durum; taşıyıcı hafif betonların üretiminde, yüksek oranda uçucu kül mineral katkı malzemesi kullanılmış olması ile açıklanabilir.

4.3.4. Porozite oranı - etüv kuru yoğunluk ilişkisi

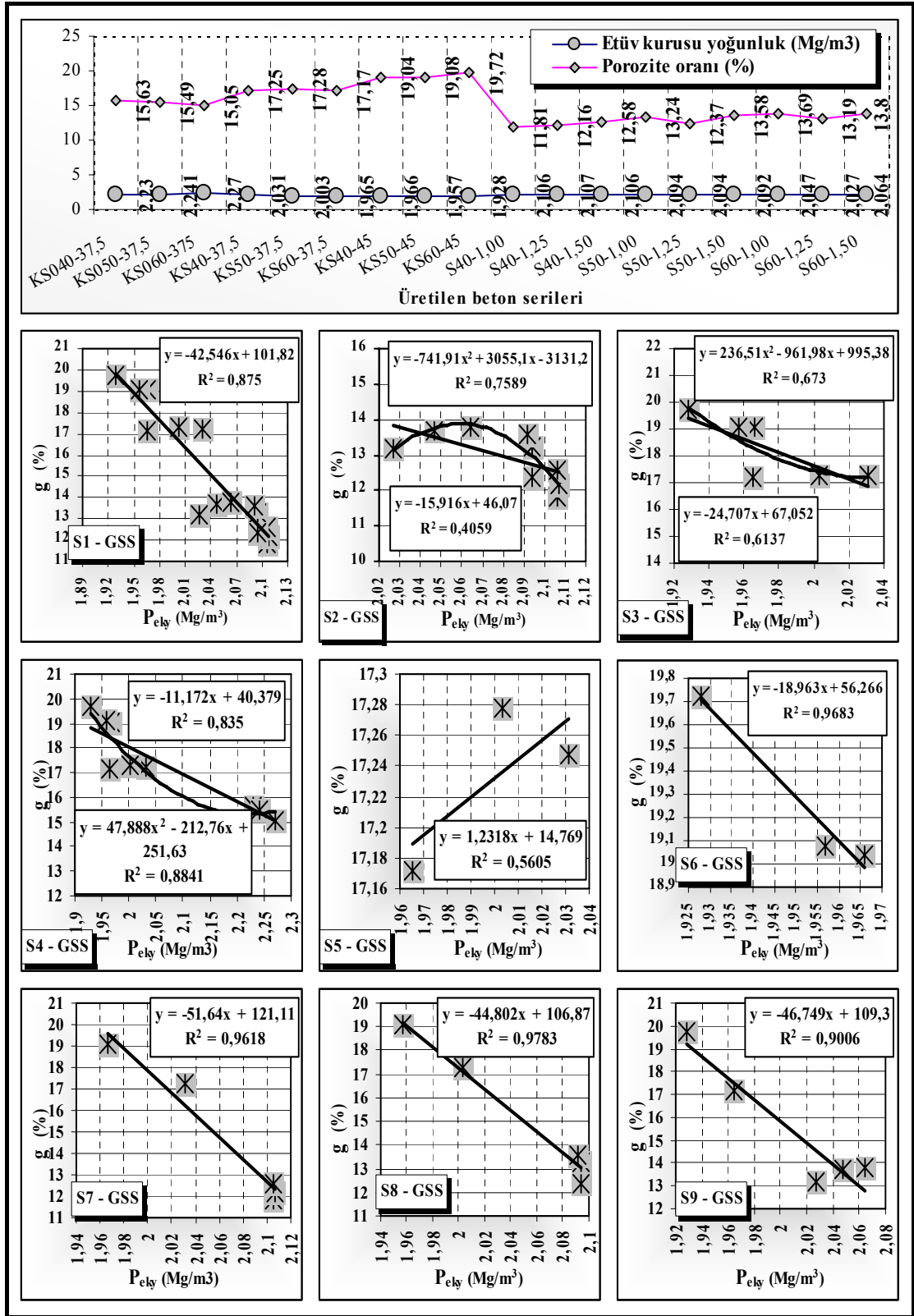
Sorgulanan ilişki ile ilgi olarak (Şekil 4.25) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tezde; "porozite" ile "yoğunluk" arasında, yüksek düzeyde (s5 hariç), ters orantılı ilişkiler olduğu belirlenmiştir. "s5"deki sonuç; veri hatası ile açıklanabilir.
- Literatürde; yoğunluk ve porozite arasında; yüksek düzeyde, ters orantılı ilişkinin olduğu belirtilmektedir. Literatürden, çok sayıda örnek, incelenmiş olmasına rağmen; irdelenen ilişkiyi sayısal olarak sorgulayan bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Bunlarda; "birim hacim ağırlık", "hava kuru" veya "suya doymuş, yüzeyi kuru" yoğunluk değerlerinin kullanıldığı belirlenmiş ve konu ile ilgili veri edinilememiştir.

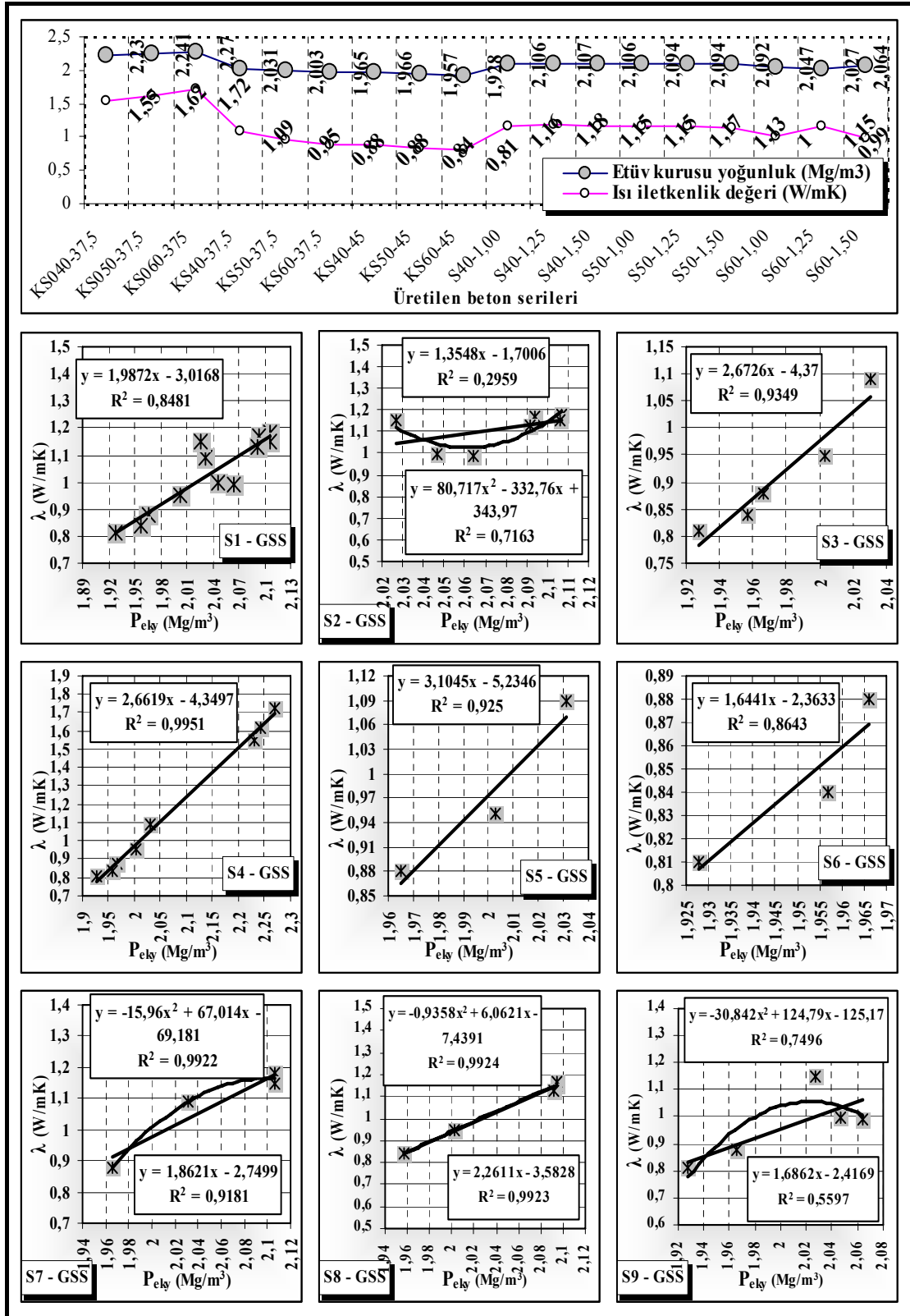
4.3.5. Isı iletkenlik değeri - etüv kuru yoğunluk ilişkisi

Belirtilen ilişkinin sorgulanması ile (Bkz. Şekil 4.26) şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Sorgulanan ilişki seviyelerinde; iyi, yüksek düzeyde, doğru orantılı veya polinomal ilişkiler belirlenmiştir. Yani yoğunluk arttıkça, "ısı iletkenliği" de artmıştır.



Şekil 4.25. Porozite oranı ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

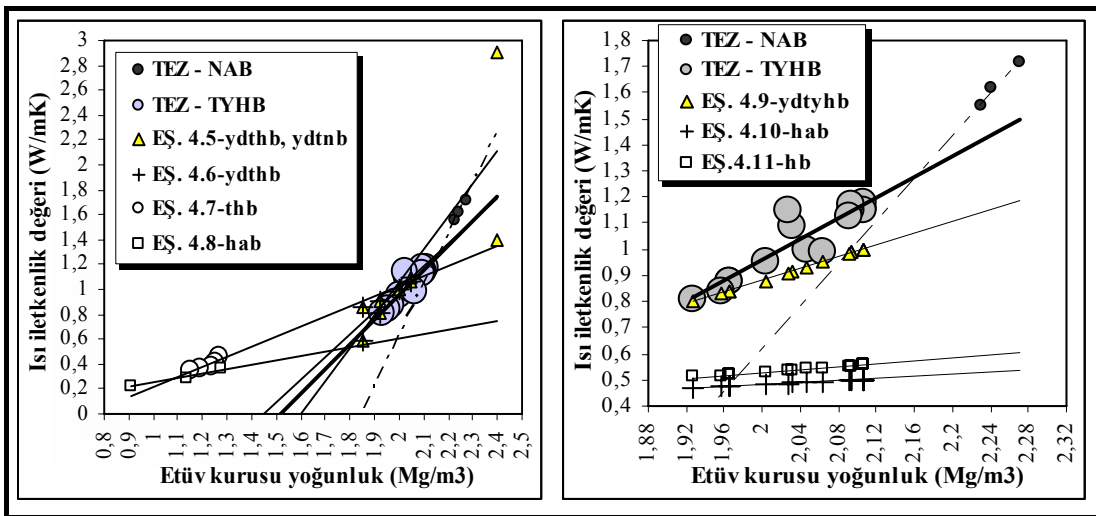


Şekil 4.26. Isı iletkenlik değeri ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

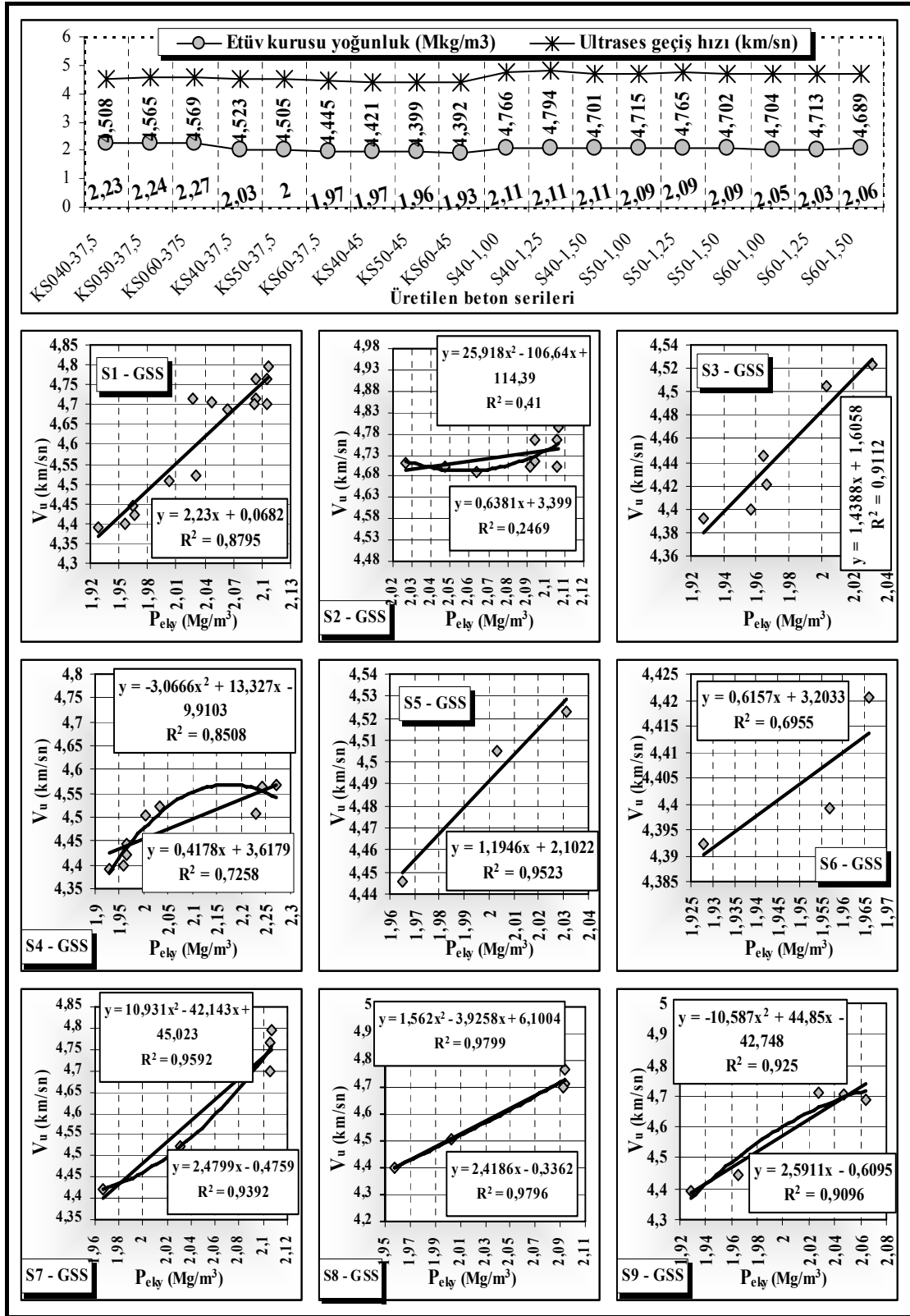
- Katkılı tyhb'larda, yani "s2" sınavasında; orta düzeyde ($R^2=0,716$) polinomal ilişki belirlenmiştir. Ancak, belirlenen polinomal ilişkinin doğrusal ilişkiden çok daha yüksek güvenilirlikte olması dikkat çekicidir. Bu sonuç, katkı kullanımının boşluk dağılımını etkileyerek; ısı iletkenliğini, yoğunluk değerinden farklı oranda etkilediğinin bir göstergesidir.

Tezde; "Isı iletkenlik değeri" ve "etüv kuru yoğunluk" ilişkisinin literatür ile karşılaştırılarak sorgulanması (Şekil 4.27) ile belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Isı iletkenliği ve yoğunluk arasındaki ilişki, yaygın olarak araştırılan bir konudur (Eş.4.5-4.11). Bu nedenle, Şekil 4.27'de iki ayrı grafik sunulmuştur (türetilmiş ve kaynaktan). Bunlara göre; üretilen tyhb'ların ısı iletkenliği; normal betonlardan düşük, ancak diğer tüm hafif beton tiplerinden çok yüksektir [8, 16, 165, 166].
- Tezde, tyhb'lara en yakın ısı iletkenlik sonuçları; yapay hafif agrega ve uçucu kül kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı tyhb'lardan elde edilmiştir (Eş.4.5 ve 4.9). Ancak, bu betonlar, "ısı iletkenlik" ve "etüv kuru yoğunluk" değerleri açısından, Tezde üretilen tyhb'lardan daha düşük değerlere sahiptir.
- Tezde üretilen tyhb'lar ve örnekler kıyaslanacak olursa; ısı iletkenlikleri arasındaki farkın; yoğunluk değerleri arasındaki farkın artması ile belirginleştiği (Eş.4.8) ve fark azaldıkça, değerlerin birbirine yaklaştığı (Eş. 4.9) tespit edilmiştir.



Şekil 4.27. Isı iletkenlik değeri ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması



Şekil 4.28. Ultrases geçiş hızı ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

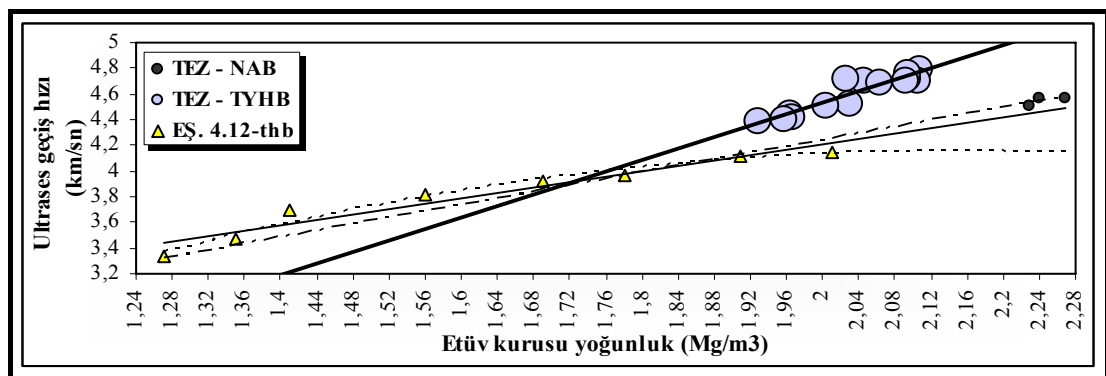
4.3.6. Ultrases geçiş hızı - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

Belirtilen ilişkinin sorgulanması ile (Bkz. Şekil 4.28) sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

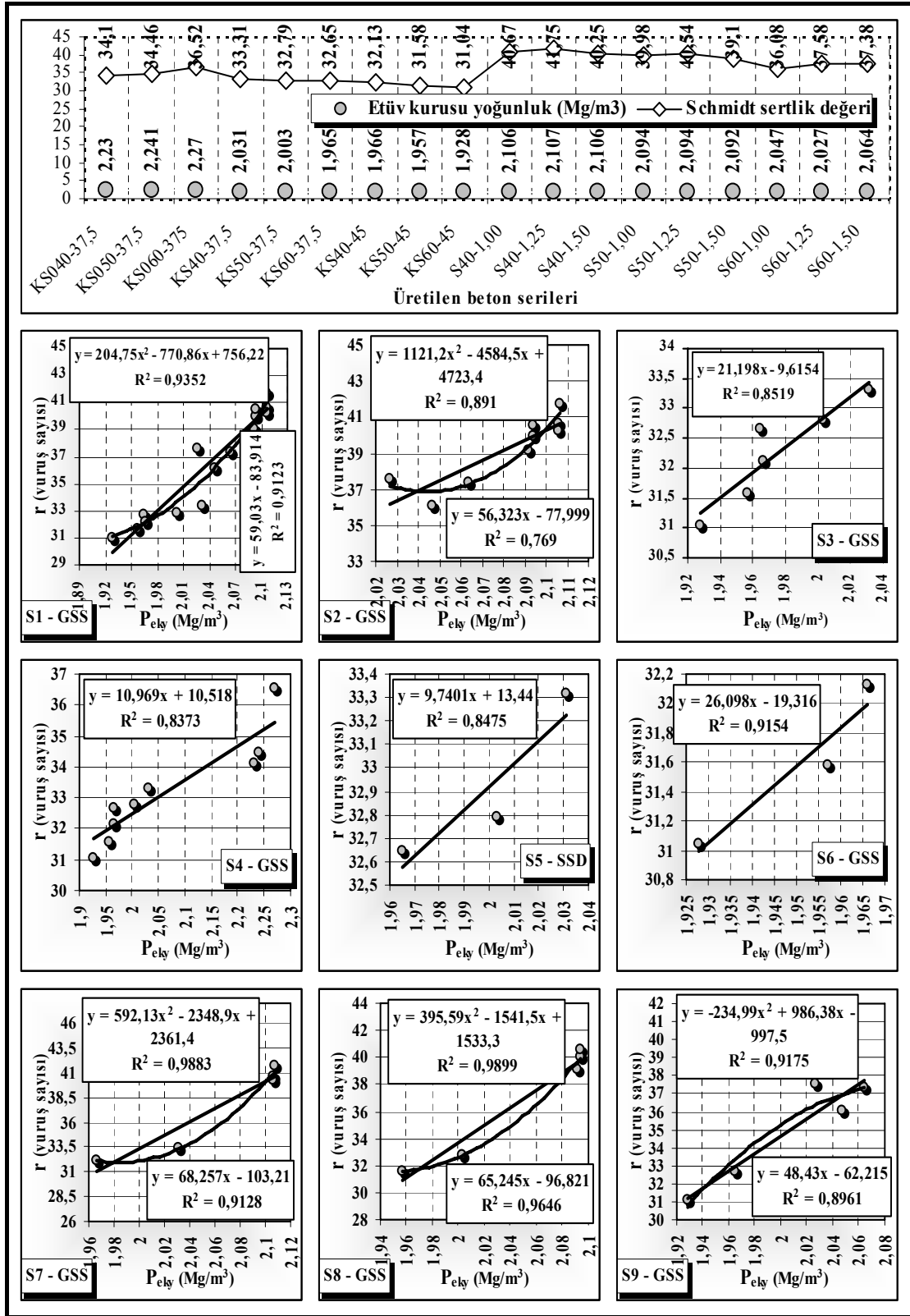
- “S2” ve “s6” hariç, yüksek düzeyde, doğrusal veya polinomal ilişkiler belirlenmiştir. Yoğunluk arttıkça, “ultrases hızı” da artmıştır.
- Skoria ve W/C oranlarının sorgulandığı “s3, s5”te yüksek düzeyde ilişkiler belirlenirken, “s6”da; orta düzeyde ilişki olması, veri hatası ile açıklanabilir.
- Skoria ve normal agreganın birlikte sorgulandığı “s4”te ilişki belirlenmiş olması; tyhb’ların, en az normal betonlar kadar sıkı ve boşluksuz yapılaştığının göstergesidir.

Tezde; “ultrases hızı” ve yoğunluk arasındaki ilişkinin literatüre göre konumunun sorgulanması (Şekil 4.29) ile aşığıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Literatürde, genelde; “ultrases geçiş hızı” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişki daha çok araştırılmıştır. Bu nedenle, literatürden tek bir örnek belirlenebilmiştir [65]. Verilen rnek, ponza ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar ilgilidir.
- Bu örnekte genel olarak edinilen yoğunluk ve ultrases hızı değeri; Tezdekilerden daha düşüktür. Ancak; yoğunluğun kesiştiği iki değerde verilen rneğe göre daha yüksek “ultrases hızları” elde edilmiştir. Bu durum; skorianın düzenli boşluk yapısı ve tyhb’ların imento hamuru fazında, düzgün dağılmış boşluk yapılaşmasının oluşması ile açıklanabilir. Boşluk morfolojisinin ve boşluk dağılımında oluşan bozulmasının; ultrases dalgalarının aşırı kırılmasına ve bu doğrultuda daha yavaş ilerlemesine neden olduğı bildirilmiştir.



Şekil 4.29. Ultrases hızı ve yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması



Şekil 4.30. Schmidt sertlik değeri ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

4.3.7. Schmidt sertlik değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

“Schmidt sertlik değeri” ve “etüv kurusu yoğunluk” ilişkisinin sorgulanması ile (Bkz. Şekil 4.30) aşağıda sunulan yargılara ulaşılmıştır.

- Tüm serilerde; iyi, yüksek düzeyde doğrusal ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir.
- Üretim değişkenlerinin arttığı tyhb’larda; doğrusallıktan sapma daha fazladır ve polinomal ilişkilerin, daha yüksek güvenilirlikte olduğu belirlenmiştir (s1 ve s2).
- Ayrıca, katkı oranlarının sorgulandığı serilerde de benzer saptamalar yapılabilir (s7, s8 ve s9). En yüksek düzeydeki ilişkiler de bu serilerden elde edilmiştir. Bu durum; tyhb’larda; katkı kullanımının betonu sıkılaştırması ve sonuçların daha az sapması ile açıklanabilir.
- Literatürde bu ilişkiyi sorgulayan bir araştırmaya rastlanılmamıştır.

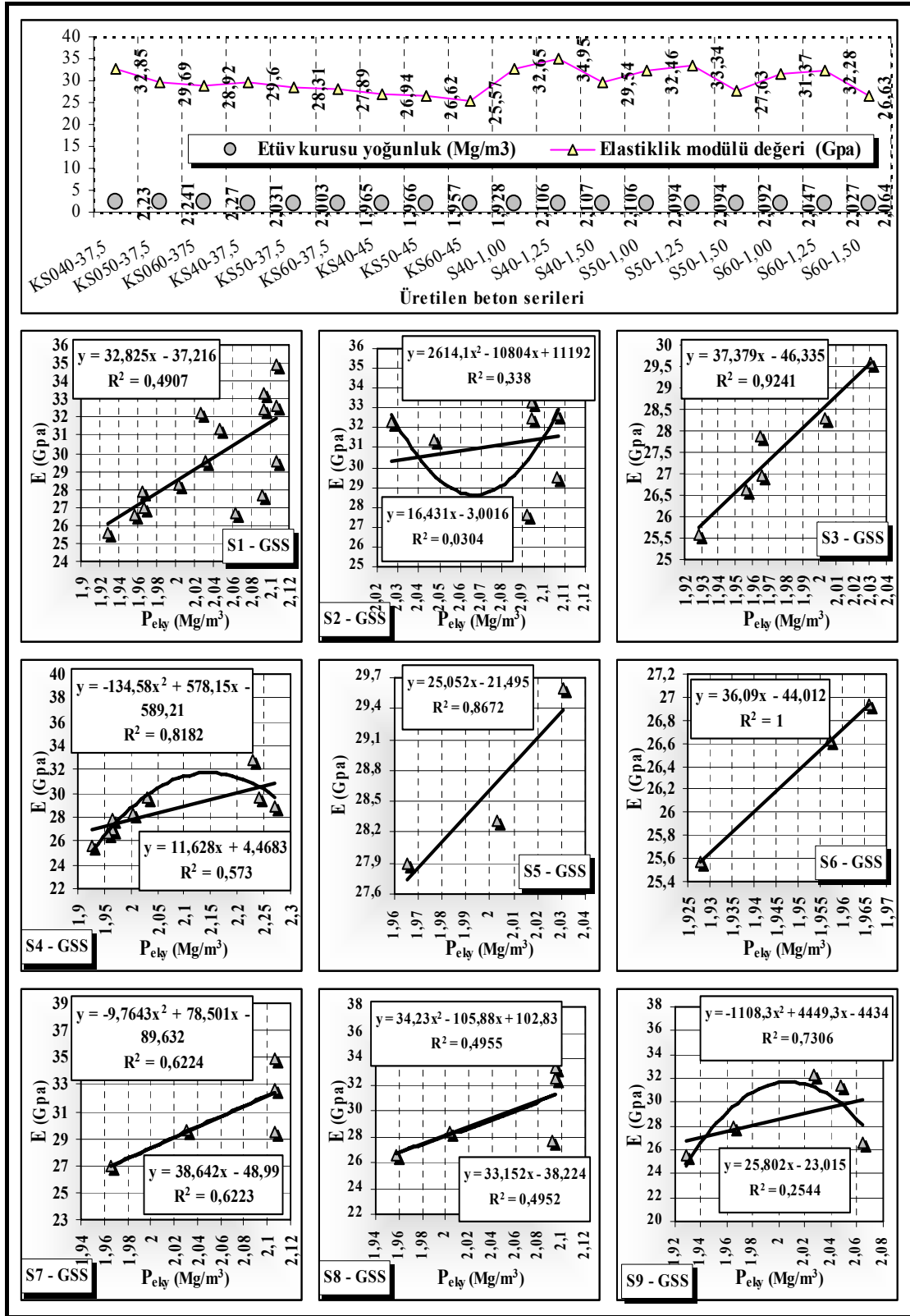
4.3.8. Elastiklik modülü değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

Belirtilen ilişkinin sorgulanması ile (Şekil 4.31) sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

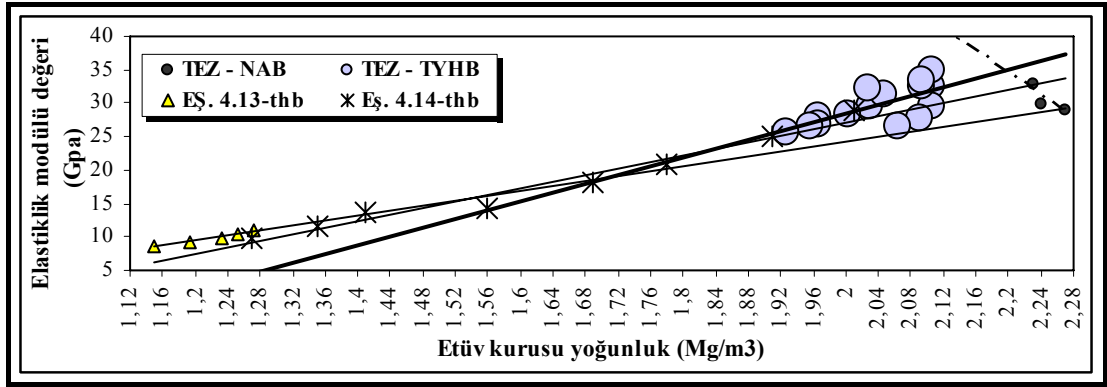
- Skoria ve W/C oranlarının değiştiği serilerde; elastiklik modülü ve yoğunluk arasında yüksek düzeyde doğru orantılı ilişkiler belirlenmiştir. Yoğunluk arttıkça; elastiklik modülü değeri de artmıştır. Diğer serilerde ise; sorgulanan ilişkinin varlığı saptanamamıştır. Bu durumda; beton bileşenlerinin ve bunların oluşturduğu mikrostrüktürel yapıların belirtilen ilişkiyi önemli derecede etkilediği söylenebilir.
- Öte yandan; tüm katkısız betonlar arasında, agregada değişkenine rağmen, iyi düzeyde ($R^2=0,818$) polinomal ilişki elde edilmiş olması (s4); yoğunluk değerinin elastiklik modülü değerinin belirlenmesinde etkili olduğunun bir göstergesidir.

Tezde; elastiklik modülü ve yoğunluk ilişkisinin literatüre göre olan konumunun sorgulanması (Bkz.Şekil 4.32) ile aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Literatürde, elastiklik modülü ve yoğunluk arasındaki ikili ilişkinin, özellikle sorgulandığı bir örneğe rastlanılmamıştır. Genelde elastiklik modülü, yoğunluk ve basınç dayanımı ilişkisi bir arada ele alınmıştır. Bu konuyla ilgili bilgiler; Tezin “EK-4” nolu bölümünde (s.217-219) sorgulandığı gibidir.



Şekil 4.31. Elastiklik modülü değeri ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki



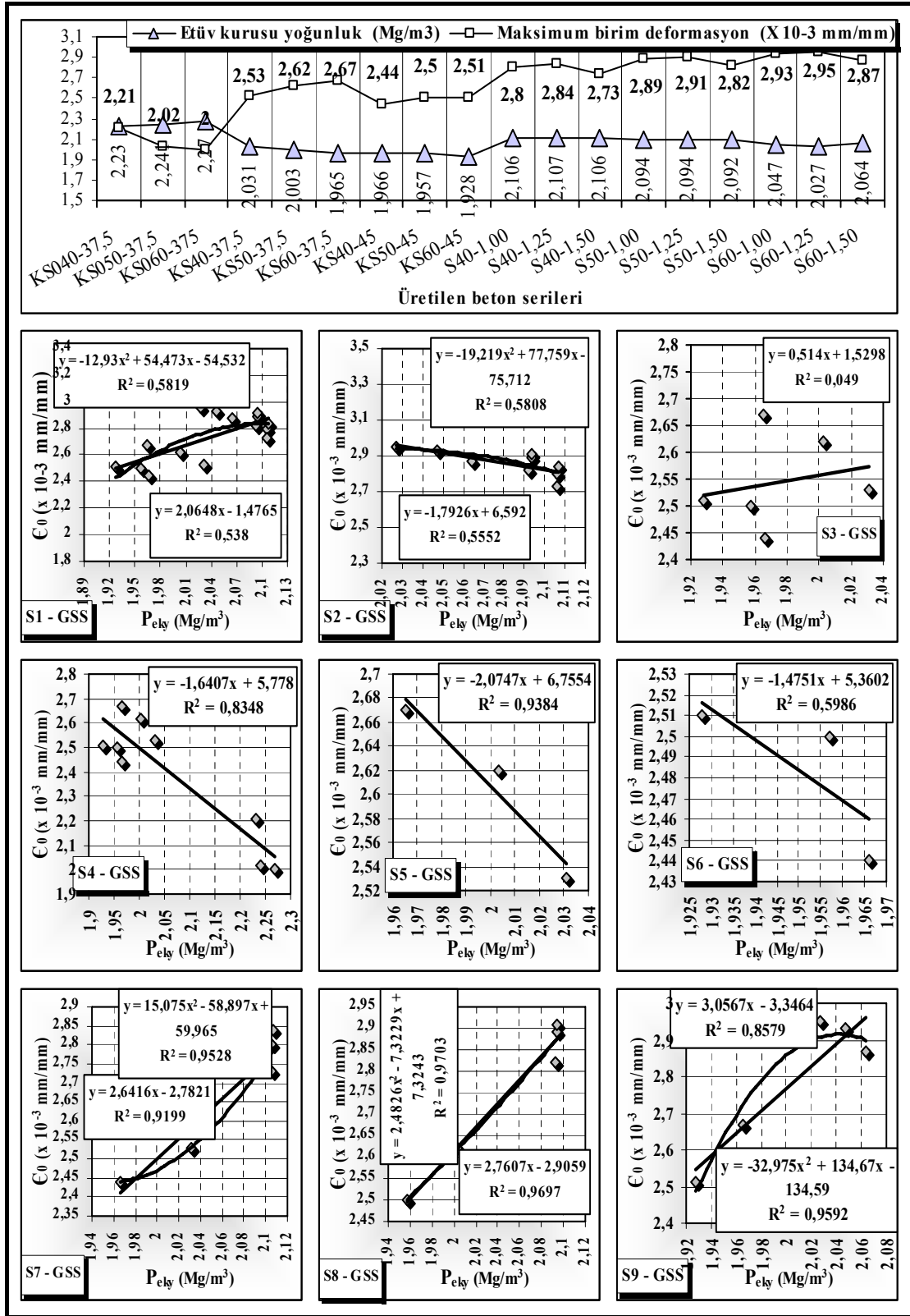
Şekil 4.32.Elastiklik modülü değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- Tezde, literatürdeki iki örnekte [8, 65] sunulan sayısal veriler aracılığıyla; belirtilen ilişkinin varlığı sorgulanmaya çalışılmış. Bu örneklerde, ponza ile üretilen taşıyıcı hafif betonlarda, elastiklik modülü ve yoğunluk arasında yüksek düzeyde ($R^2=0,9$ 'un üstünde) doğrusal ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir (Eş.4.13 - 4.14).
- Tezde üretilen tyhb'larda, verilen örneklere göre; daha yüksek yoğunluk ve elastiklik modülü değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.32'de, agrega farklılaşmasının sorgulanan ilişkiyi etkilediği görülebilir.

4.3.9. Basınç gerilimi altında maksimum birim deformasyon - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

“Maksimum birim deformasyon” ve “etüv kurusu yoğunluk” ilişkisinin sorgulanması ile (Şekil 4.33) belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- “S4, s5, s7, s8, s9” serilerinde; orta, iyi, yüksek düzeyde ilişkiler belirlenmiştir.
- Diğer serilerde ise; “maksimum birim deformasyon” ve yoğunluk arasında herhangi bir ilişki belirlenememiştir
- “S1”de tüm tyhb'ların birlikte sorgulandığı seride, ilişki belirlenmemiş olması; üretim bileşenlerinin, maksimum birim deformasyon üzerinde önemli derecede etkili olduğunu gösterir.
- Katkılı tyhb'ların sorgulandığı, “s2”de ilişki düzeyinin düşük olması; katkı oranlarının sorgulanan ilişkiyi farklı oranlarda etkilemesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.33. Maksimum birim deformasyon ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

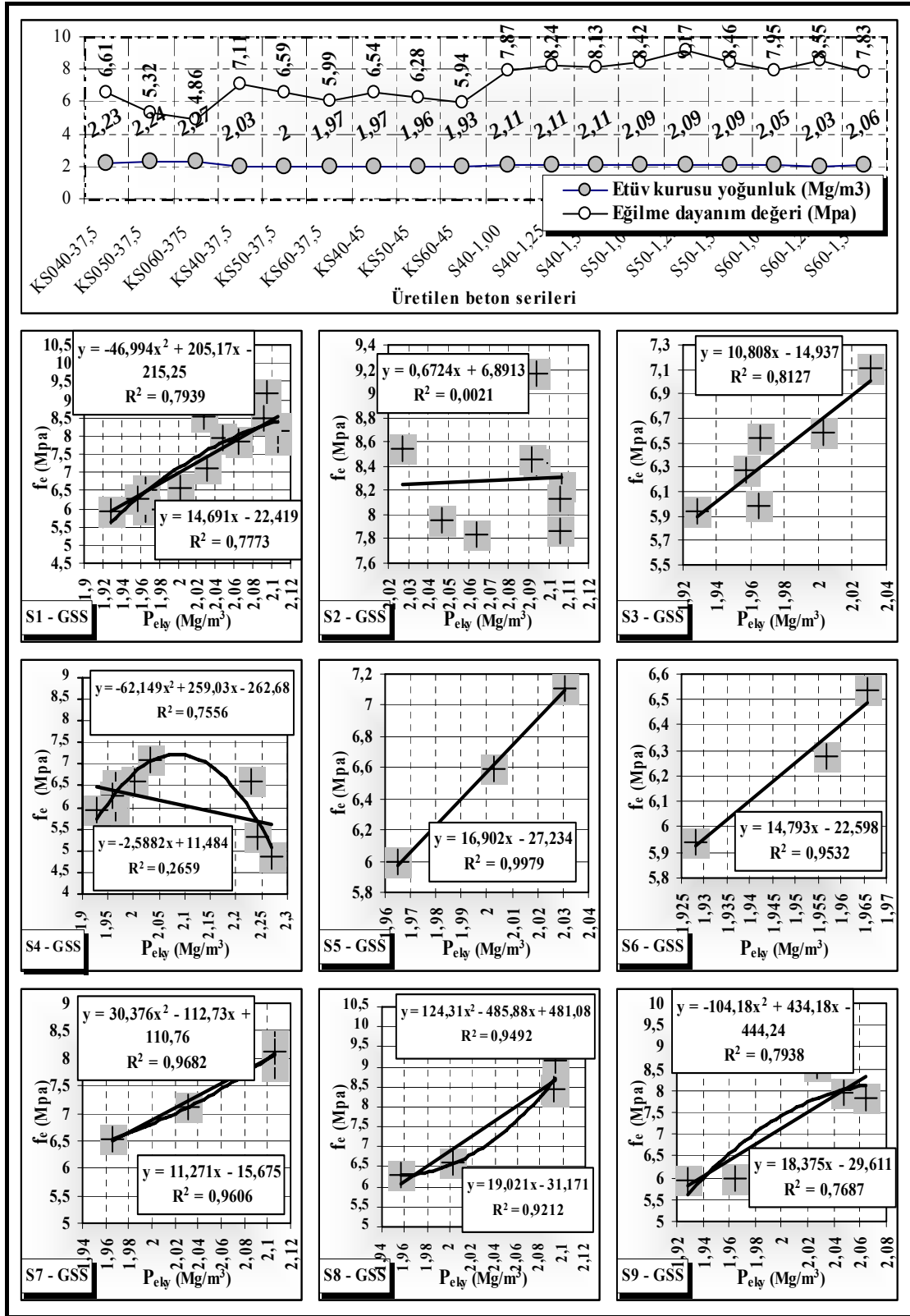
- “S3”te hiçbir ilişkinin olmaması; kullanılan skoria oranının “maksimum birim deformasyon” değerleri üzerinde önemli oranda etkili olduğunu gösterir.
- “S5”te; yüksek düzeyde ilişki elde edilmiş olması da bu görüşü desteklemektedir. Ancak, “s5”e paralel düzeyde ilişki beklenen “s6”da; elde edilen orta düzeydeki ilişki; deneysel sapma ile açıklanabilir.
- “S7, s8 ve “s9” serilerinden yüksek düzeyde ilişki belirlenmesi; skoria oranının “maksimum birim deformasyon” değeri üzerinde önemli derecede etkili olduğu görüşünü destekler niteliktedir.
- Tezde; normal betonlar ve katkısız tyhb’lar arasında iyi düzeydeki ($R^2=0,835$) ilişki; yine kullanılan agregaların bir sonucudur. Daha düşük yoğunluğa sahip olan tüm tyhb’larda, normal betonlara göre, belirgin bir farkla, daha yüksek maksimum birim deformasyon değerleri elde edilmiş ve her iki beton tipi arasında ters orantılı ilişkinin oluşmasına neden olmuştur.
- Özetle; katkısız tyhb’larda “maksimum birim deformasyon” ile yoğunluk arasında ters orantılı ilişki vardır. Katkılı betonlarda ise; durum tam tersidir.

Literatürde “maksimum birim deformasyon” ve “etüv kurusu yoğunluk” arasındaki ilişkiyi sorgulayan ve sayısal olarak sunan bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Ancak, “Literatür Özeti”nde sunulan genellenemeyen sayısal verileri içeren araştırmalar; “maksimum birim deformasyon” ve “yoğunluk” arasındaki ilişkinin, agrega tipinden büyük oranda etkilendiğini, agrega dayanımı ve bununla ilişkili olarak yoğunluğu ile betonun “maksimum birim deformasyon” değerlerinin ters orantılı olduğunu, teorik düzeyde desteklemektedir. Tezde, bu ilişki açısından edinilen veriler; literatürle uyumludur denilebilir.

4.3.10. Eğilme dayanım değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

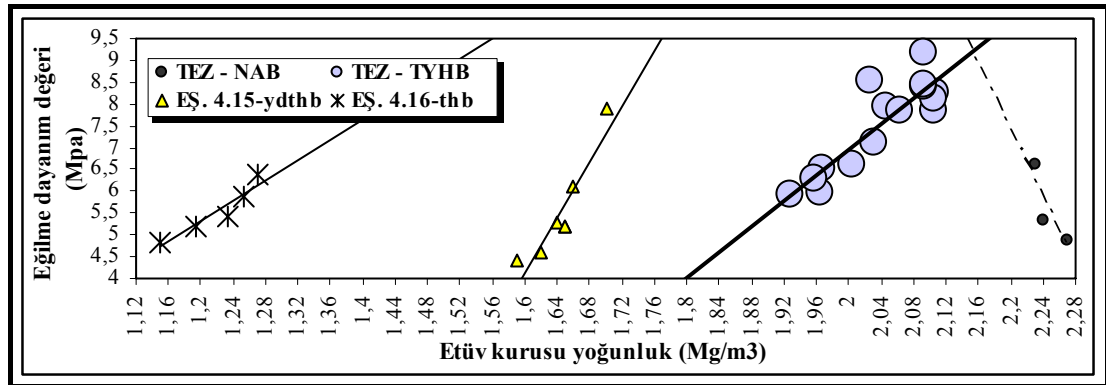
“Eğilme dayanım değeri” ve “etüv kurusu yoğunluk” ilişkisi ile ilgili sonuçlar aşağıdaki gibidir (Şekil 4.34).

- Tüm serilerde; genelde yüksek düzeyde doğru orantılı ve polinomal ilişkilerin olduğu ve tyhb’larda yoğunluk arttıkça, “eğilme dayanımı”nın arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.34. Eğilme dayanım değeri ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

- Tüm tyhb'ların sorgulandığı “s1”de; daha önceki sınamalardan farklı olarak iyi düzeyde doğrusal ilişkinin olduğu ($R^2=0,794$) ve bu değer neredeyse, sadece skoria ve W/C oranlarının değiştiği “s3”ten elde edilen değere yakın olduğu belirlenmiştir.
- Bu durum, eğilme dayanımlarının belirlenmesinde skoria oranlarının; W/C oranı değişkenine göre; daha etkili olduğunun göstergesidir.
- Katkılı tyhb'ların sorgulandığı “s2”de; bir ilişki belirlenmemiştir. Bu sonuç; yukarıdaki yargıyı desteklemekle birlikte, katkı oranlarının, tyhb'ların eğilme dayanımlarını çok farklı şekillerde etkilediğini de gösterir.
- Yoğunluk değerleri arttıkça, “eğilme dayanımı” artan tyhb'lar ve yoğunluk değeri arttıkça “eğilme dayanımı” azalan normal betonlar arasında; bu doğrultuda, orta düzeyde ($R^2=0,76$) polinomal ilişki oluşmuştur (s4).
- Değişkenlerin az olduğu serilerde yüksek düzeyde ilişkiler belirlenmiştir.



Şekil 4.35. Eğilme dayanım değeri ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

Tezde; “eğilme dayanım değeri” ve “etüv kuru yoğunluk” ilişkisinin literatüre göre konumunun sorgulanması (Şekil 4.35) ile şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Özellikle bu ilişkiyi sorgulayan herhangi bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Ancak Yapay hafif agregası ile üretilen yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar ve ponza ile üretilen taşıyıcı hafif betonları konu alan deneysel araştırmalarından [8, 168]; elde edilen verilere göre belirtilen ilişki Şekil 4.35’te (Eş. 4.15-4.16) sunulduğu gibidir.
- Şekilde de görülebileceği gibi; Tez de dâhil olmak üzere, üç farklı agregası kullanılan araştırmalarda; yoğunluk değeri arttıkça çok farklı gelişen, üç farklı

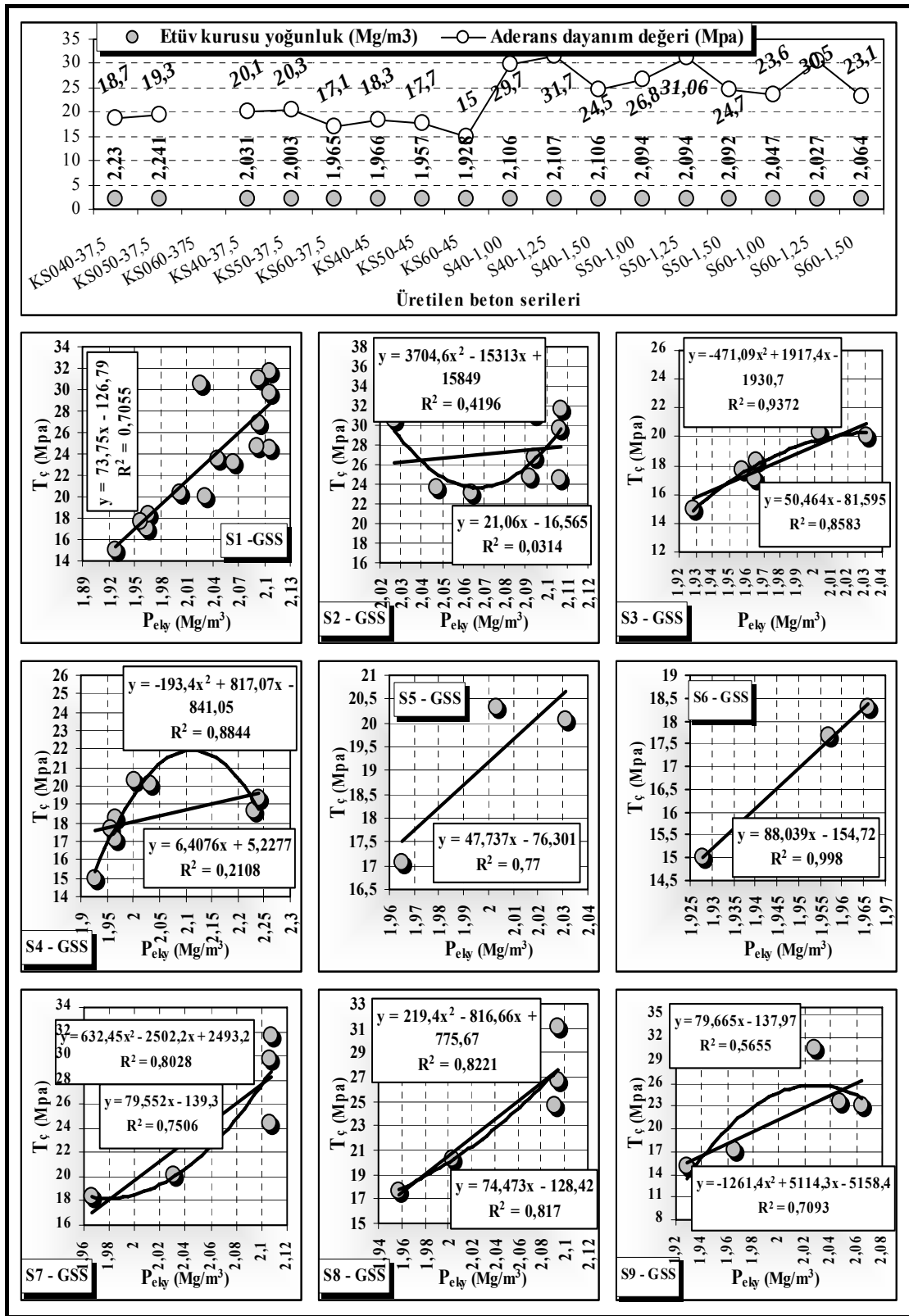
eğilme dayanımı ve yoğunluk ilişkisi gözlenebilir. Bu durum kullanılan agrega tipinin betonun, “eğilme” davranışını diğer özelliklerine göre daha baskın bir şekilde etkilediğinin bir göstergesidir.

- Öte yandan Şekil 4.35’te farklı agregalar kullanılarak üretilen her üç araştırmada da yoğunluk arttıkça; eğilme dayanımının da arttığı açıkça görülebilir.
- Bu iki örnekte; ponza kullanılan, daha düşük yoğunluktaki, taşıyıcı hafif betonlardan; yapay hafif agrega kullanılarak üretilen, daha yoğun, yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlara göre daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir. Bu durum; kullanılan deneysel yöntemlerin farklılığı veya kullanılan agregaların yüzeysel özellikleri ve çimento hamuru ile yaptığı kimyasal etkileşim ile açıklanabilir. Ancak, örneklerde, yoğunluk farklarının çok fazla olmasına rağmen bu sonuca ulaşılması; ikinci ihtimali daha da güçlendirmektedir.
- Şekil 4.35’te görüldüğü gibi; Tezdeki tyhb’lardan edinilen eğilme dayanımları; örneklerdeki eğilme dayanımlarından genelde daha yüksektir. Bu sonuç; Tezde, agrega olarak yoğunluğu diğer agregalara göre fazla olan skorianın kullanılması ve beton yoğunluğun artması ile açıklanabilir.
- Öte yandan, Tezde, normal betonlarda, yoğunluğun artması sonucunda; eğilme dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir. Bu durumda, eğilme dayanımlarının; sadece, etüv kurusu yoğunluk ile değil, aynı zamanda kullanılan agreganın yüzey yapısı ile de yakından ilişkili olduğu söylenebilir.
- Skoria, eğilme dayanımı açısından, örnekler ile kıyaslandığında; yoğunluk avantajının yanı sıra, yüzeyinin pürüzlü olması açısından da avantajlıdır. Bu durum; tyhb’ların eğilme dayanımlarının, literatürde verilen örneklerle göre çok yüksek çıkmasına neden olmuştur.

4.3.11. Aderans dayanım değeri - etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

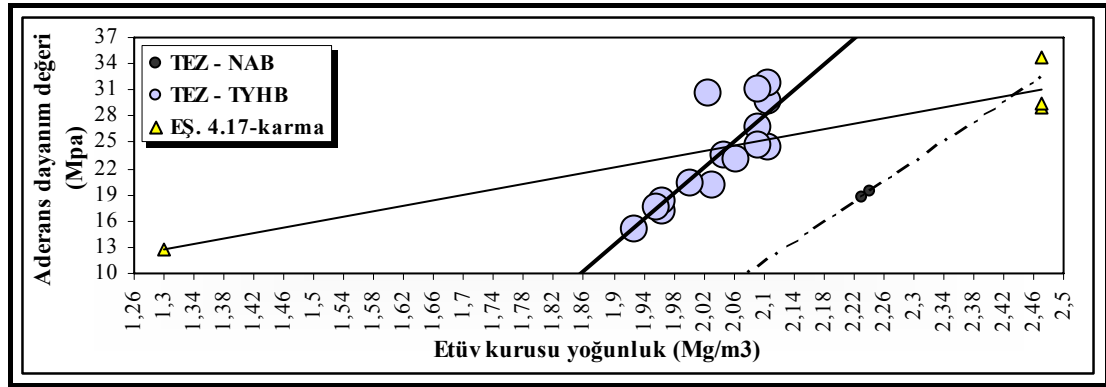
Sorgulanan ilişkisi ile ilgili saptamalar (Şekil 4.36) aşağıda belirtildiği gibidir.

- Tüm serilerde; “aderans” ve “yoğunluk” değerleri arasında, çeşitli düzeylerde, doğru orantılı ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir. Genelde yoğunluk arttıkça; aderans değerleri de artmıştır.



Şekil 4.36. Aderans dayanım değeri ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişki

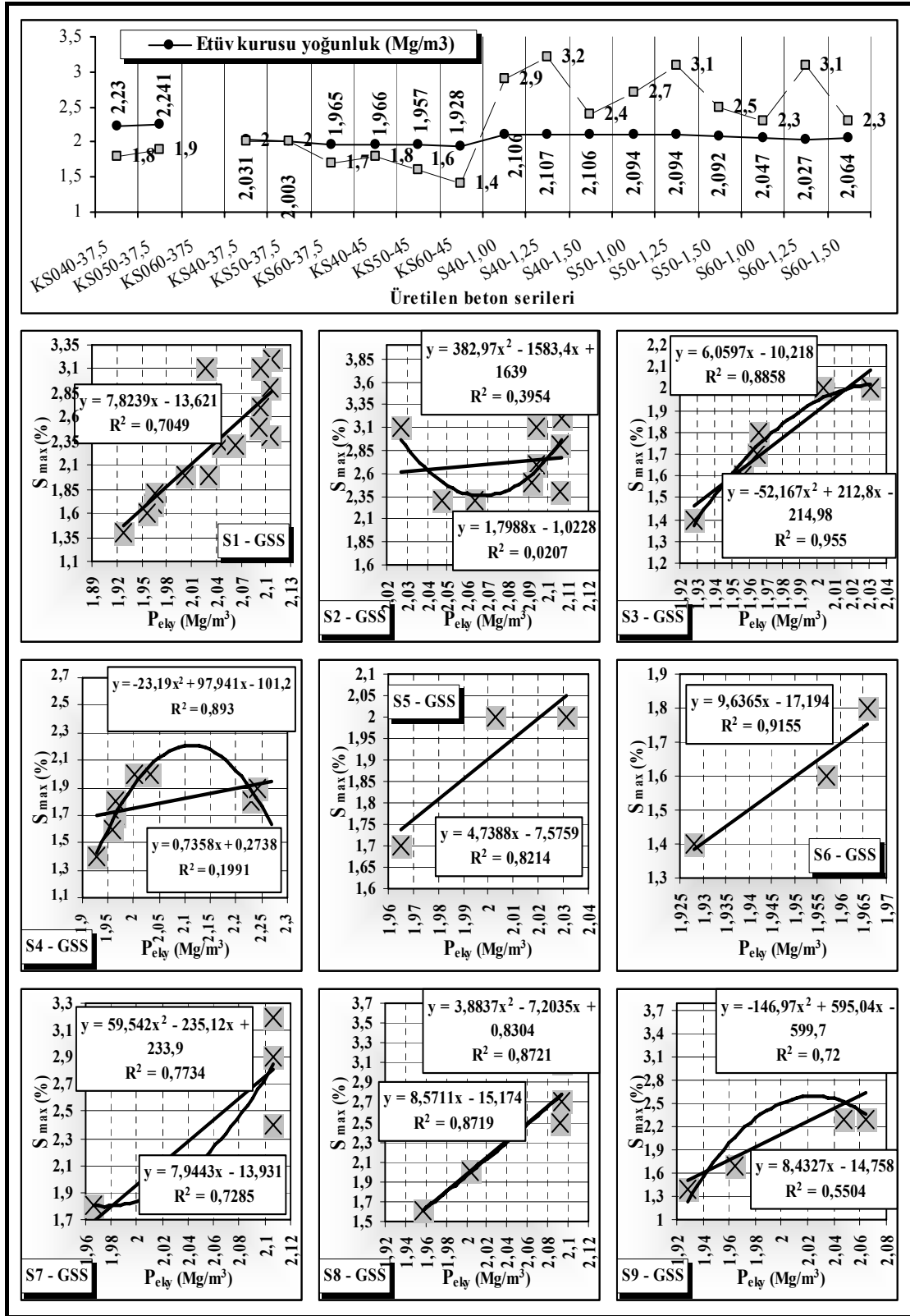
- “S3, s6”da, yüksek ve “s5”te orta düzeyde ilişki belirlenmesi; skoria oranlarının etkisi ile açıklanabilir. “s1”de, daha düşük düzeydeki ilişki ise; skoria oranının; katkı oranına göre “aderans ve yoğunluk” arasındaki ilişkide daha etkili olduğu ve katkı oranlarının sorgulanan özellikleri farklı oranlarda etkilediği ile açıklanabilir.
- Katkı oranlarının sorgulandığı önceki sorgulamalarda; genelde yüksek düzeyde ilişkiler belirlenmiştir. Bu sorgulamadaki değerler ise; orta ve iyi düzeylerdedir (s7, s8, s9). Ayrıca; sadece katkılı tyhb’lar arasında ilişki belirlenememiş olması; katkının, tyhb’ların aderans özelliklerini çok farklı yönde etkilediği görüşünü desteklemektedir (s2).
- Katkısız tyhb’lar ve normal betonların bir arada sorgulandığı “s4”te; tyhb’larda yoğunluk değerlerinin yükselmesi ile birlikte aderans değerleri yükselmiş, normal betonlarda ise düşmüştür. Bu durum, belirtilen seride; eğilme dayanım değeri ve yoğunluk sorgulamasında olduğu gibi, yoğunluk ve “aderans” değerleri arasında iyi düzeyde ($R^2=0,884$) polinomal ilişkinin oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 4.37. Aderans dayanım değeri ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

Tezde; “Aderans dayanım değeri” ve “etüv kuru yoğunluk” arasındaki ilişkinin literatüre göre sorgulanması (Şekil 4.37) ile belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Literatürde sorgulanan ilişkiyi özellikle araştıran bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Tezde, literatürden [105, 106] elde edilen dört farklı noktasal ilişki arasında, yüksek düzeyde doğrusal ilişki olduğu belirlenmiştir (Eş. 4.17).



Şekil 4.38. Donatıda maksimum birim deformasyon ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

- Şekilde görüldüğü gibi kullanılan agrega, üretilen beton tipi ve bunlara bağlı olarak, yoğunluk değiştikçe, aderans ve yoğunluk arasındaki ilişki de değişir.
- Buna göre, aynı yoğunluk değerlerinde, skoria kullanılarak üretilen tyhb'larda; hafif agregalı veya normal agregalı betonlardan daha yüksek aderans dayanım değerlerinin elde edildiği söylenebilir.

4.3.12. Donatıda maksimum birim deformasyon değeri – etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Bkz. Şekil 4.38) aşağıdaki yargılara ulaşılmıştır.

- Akma sınırına ulaşmayan donatının doğrusal davranış sergilemesi nedeniyle (Bkz. Şekil 2.12, s.32); “donatıda maksimum birim deformasyon” ve “etüv kurusu yoğunluk” arasındaki ilişkinin sorgulandığı serilerden edinilen veriler; bir önceki bölümde, “Şekil 4.36”daki saptamalar ile tamamen paraleldir. Bu nedenle belirtilen ilişkiler için yapılan yorumlar, bu bölüm için de geçerlidir. Bu nedenle tekrar edilmeyecektir.

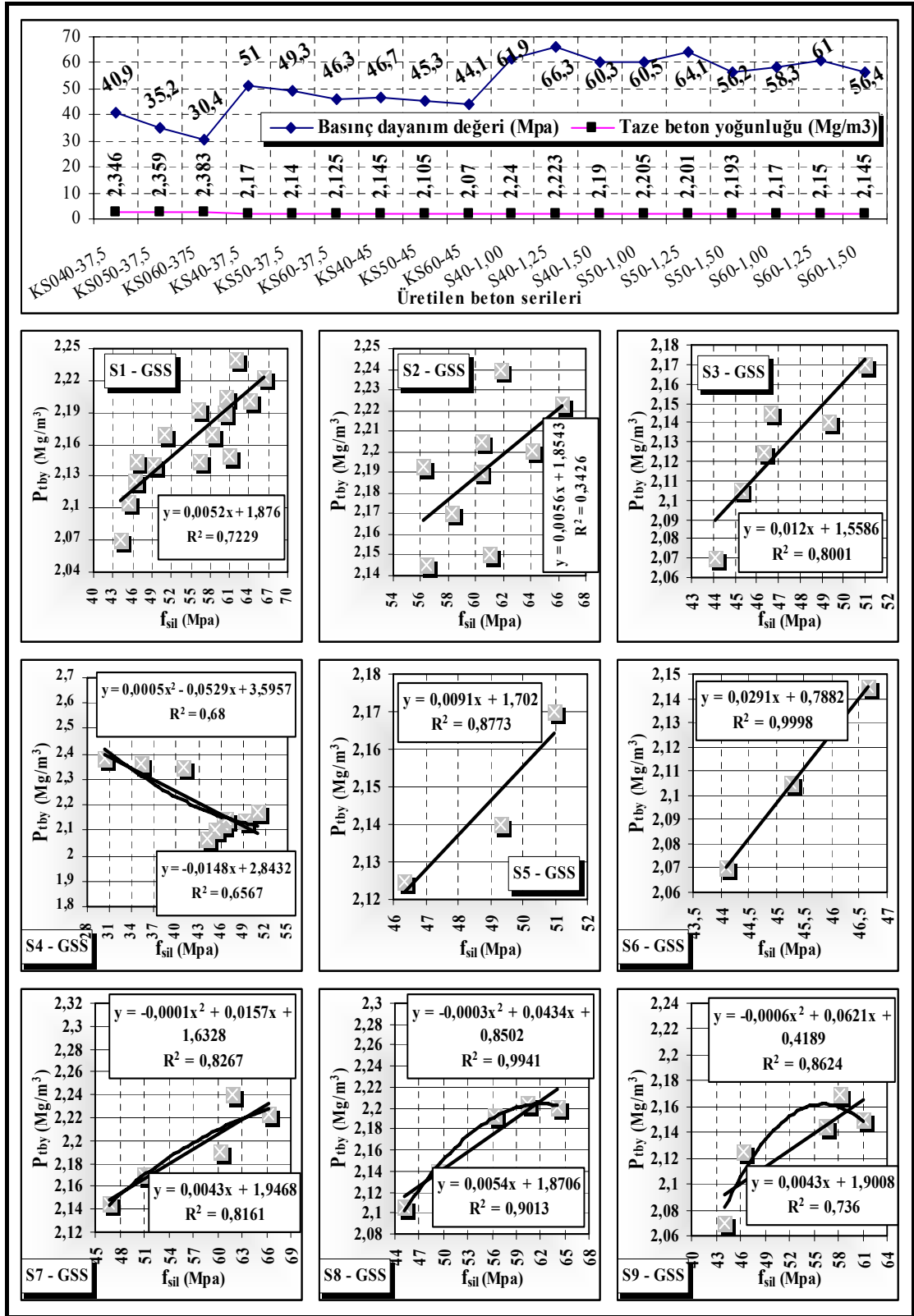
“Donatıda maksimum birim deformasyon” ve “etüv kurusu yoğunluk” arasındaki ilişkinin; Tezde ele alınış şekli doğrultusunda, literatürde sayısal olarak incelendiğine dair bir örneğe rastlanılmamıştır. Bu nedenle, yapılan sorgulama da veri olmadığı için, literatür ile ilişkilendirilememiştir.

4.4. Beton Özelliklerinin Basınç Dayanım Değeri ile İlişkisi ve Tartışma

4.4.1. Taze beton yoğunluğu - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.39) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- “S1, s2 ve s4” hariç, iyi ve yüksek düzeyde, doğru orantılı ilişkiler belirlenmiş.
- Taze beton yoğunluğu arttıkça; basınç dayanım değeri de artmıştır.

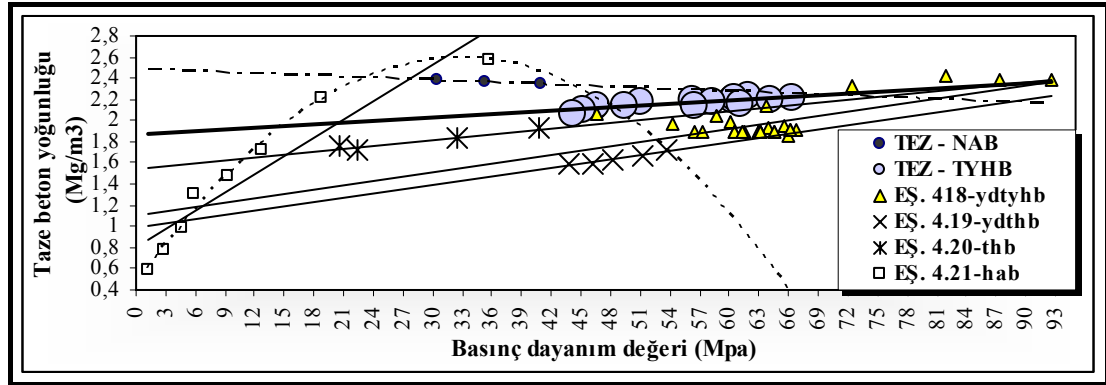


Şekil 4.39. Taze beton yoğunluğu ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

- Tüm tyhb'ların sorgulandığı “s1”de; orta düzeyde ilişki belirlenmiştir. Katkılı tyhb'ların sorgulandığı “s2”de ise; bir ilişki belirlenememiştir. Bu durum; katkı kullanımının sorgulanan ilişkiyi önemli derecede etkilediğinin bir göstergesidir.

Tezde; “taze beton yoğunluğu” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişkinin literatüre ile karşılaştırılması ile (Şekil 4.40) ulaşılan yargılar aşağıdaki gibidir.

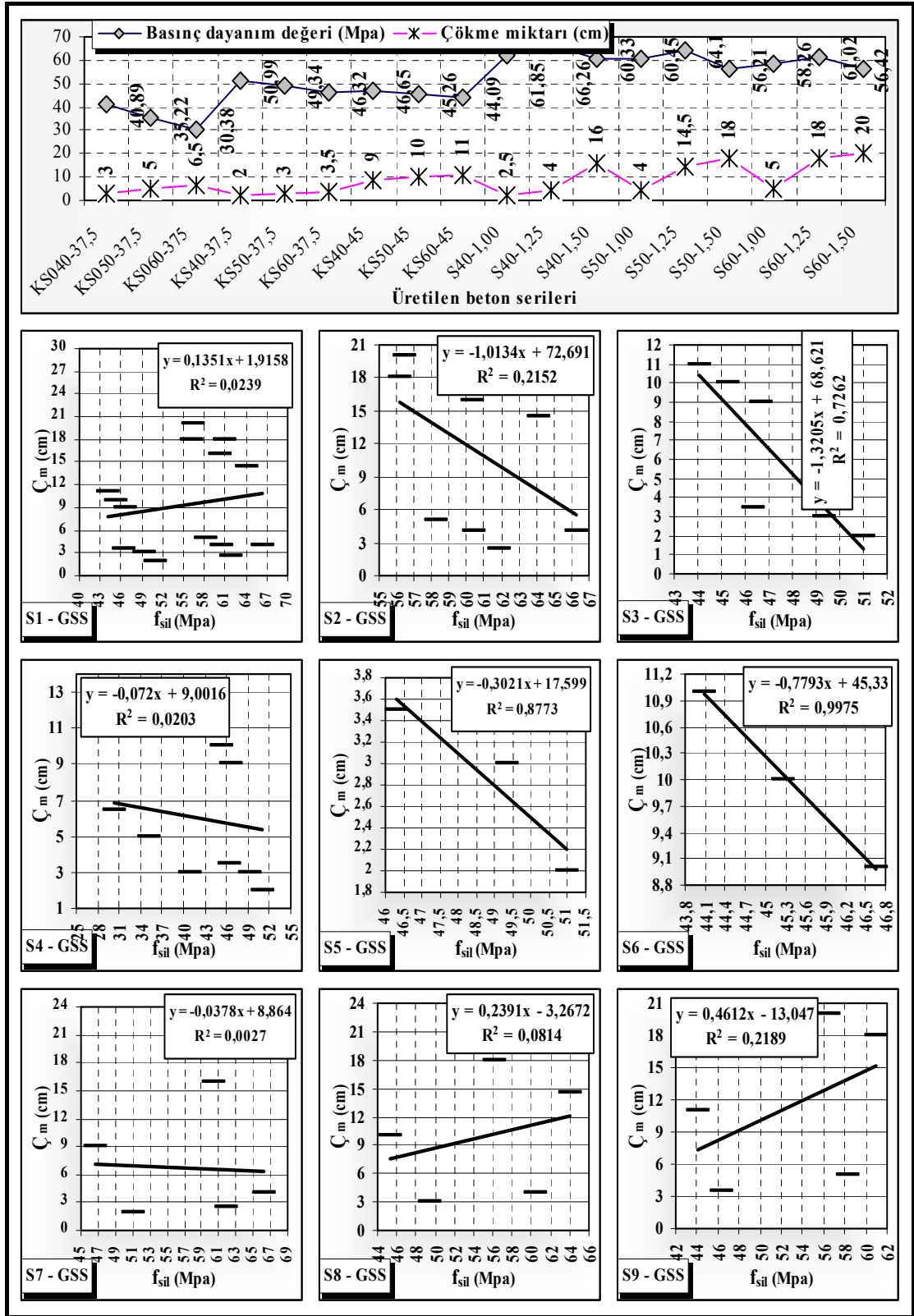
- Literatürde, bu ilişkinin öncelikli bir konu olmadığı belirlenmiştir. Literatürden edinilen noktasal veriler aracılığıyla; ilgili şekilde sunulan eşitlikler türetilmiştir. Buna göre (Eş.4.18-4.21); doğal veya yapay hafif agrega ile üretilen, yüksek dayanımlı tyhb'lar, yüksek ve normal dayanımlı hafif betonlar, hafif agregalı betonlarda taze beton yoğunluğu ve basınç dayanımı arasında; doğrusal ve polinomal ilişkiler vardır [38, 44, 50, 94]. Literatürden edinilen bu sonuç; Tezin ile uyumludur.
- Agregat yoğunluğunun artması ile taze beton yoğunluğunun arttığı ve bunun; basınç dayanımına yansıdığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda, Tezdeki tyhb'larda özellikle katkı kullanılanlarda, literatürdeki diğer hafif agregalı beton örneklerine göre daha yüksek “taze beton yoğunluğu” ve “basınç dayanım”ları elde edilmiştir.



Şekil 4.40. Taze beton yoğunluğu ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

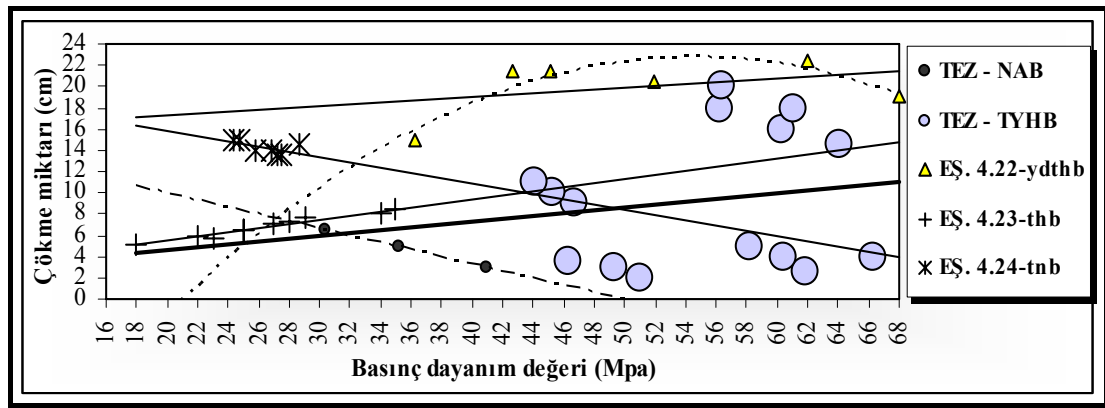
4.4.2. Taze beton kıvamı - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.41) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 4.41. Taze beton kıvamı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

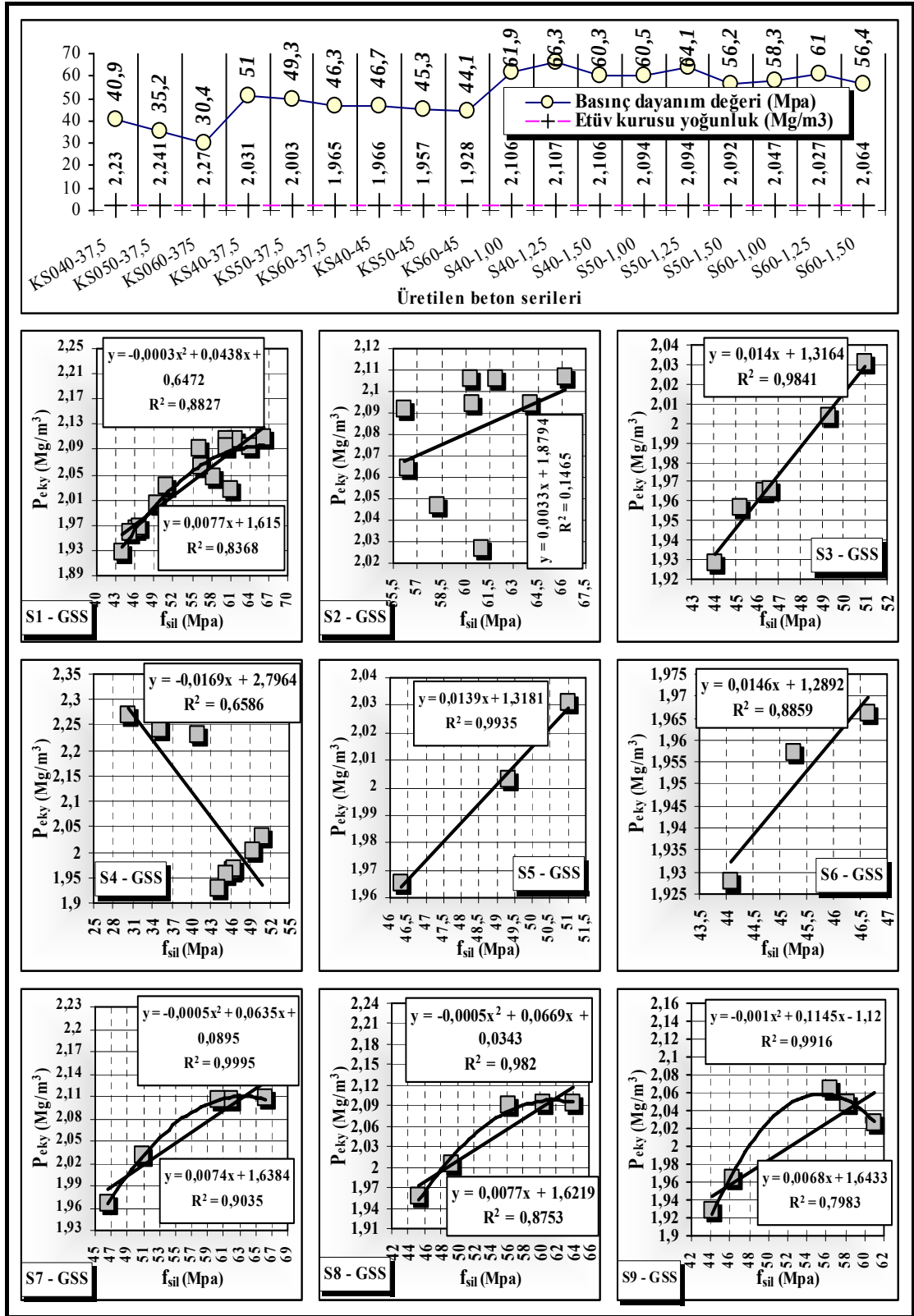
- “S3, s5, s6” hariç diğer grafiklerde; çökme miktarı ve basınç dayanımları arasında ilişki belirlenememiştir.
- Sadece skoria oranlarının değiştiği “s5” ve “s6” serilerinde iyi ve yüksek düzeyde ilişki ($R^2=0,877$ ve $0,998$) olduğu belirlenmiştir. Skoria ile birlikte W/C oranlarının da değiştiği, “s3” serisinde bu değer; orta seviyeye ($R^2=0,726$) düşmüştür. Bu veriler; tyhb’larda, üretim bileşenlerinin çökme miktarını ve basınç dayanımlarını çok farklı yönlerde etkilediğinin göstergesidir.



Şekil 4.42. Taze beton kıvamı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

Tezde; “taze beton kıvamı” ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatüre göre konumunun sorgulanması (Şekil 4.42) ile şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Literatürden [16, 23, 161] yararlanılarak ilgili eşitlikler (Eş.4.22-4.24) türetilmiştir. Değişkenler nedeniyle; bu ilişkinin tek bir şekilde tariflenmesi zordur.
- Örneklerden elde edilen “Eş. 4.22” yapay hafif agrega ile üretilen yüksek dayanımlı tyhb’lardan edinilen veriler ile oluşturulmuştur. “Eş.4.23”; ponza ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar; “Eş.4.24” ise; normal betonlar ile ilişkilidir.
- Tezde, katkısız normal betonlar ve tyhb’larda; “Eş.4.24” de görüldüğü gibi, çökme miktarı artarken basınç dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir.
- Katkılı tyhb’larda ise; katkının doyma sınırına kadar çökme miktarı ile basınç dayanımlarının birlikte arttığı (Eş.4.22 ve Eş.4.23’de olduğu gibi) belirlenmiştir. Ancak, sınırın aşılması durumunda, çökme miktarı artarken, basınç dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.43. Etüv kuru yoğunluk ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

- Örneklerde de görülebileceği gibi genel olarak; aynı basınç dayanımlarında normal betonlardan elde edilen çökme miktarı; taşıyıcı hafif betonlardan daha fazladır. Ancak yüksek dayanımlı olarak tasarlanan doğal hafif agrega (bu araştırmadaki tyhb'lar örnek olarak verilebilir) veya yapay hafif agrega kullanılarak üretilmiş olan betonlarda; katkı kullanıldığı için, çökme miktarı ve basınç dayanımlarının incelenen diğer beton tiplerinden daha yüksek olduğu söylenebilir.

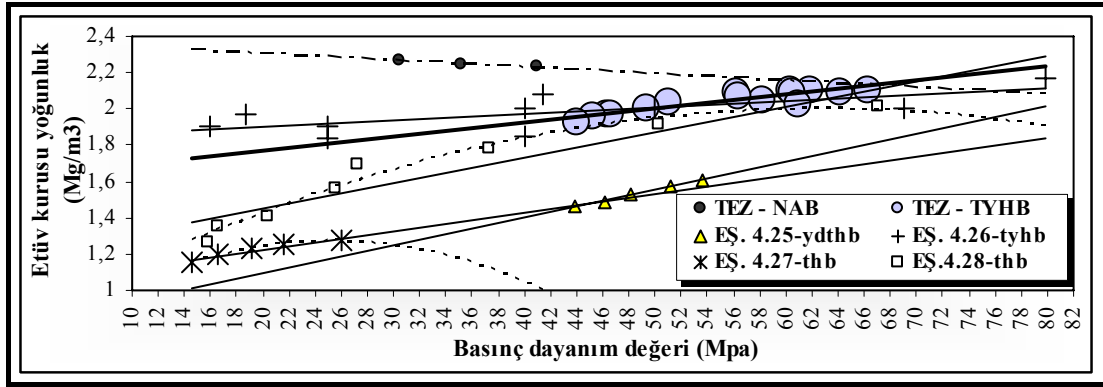
4.4.3. Etüv kurusu yoğunluk - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin sorgulanması ile (Bkz. Şekil 4.43) sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

- “S2” ve “s4” serileri hariç, tüm serilerde; iyi ve yüksek düzeyde doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. “Etüv kurusu yoğunluk” ve basınç dayanım değeri birlikte artmıştır.
- Ayrıca; katkı oranlarının sınıandığı “s7”, “s8” ve “s9” da, elde edilen polinomal ilişkilerin, doğrusal ilişkilerden daha yüksek güvenilirlikte olduğu belirlenmiştir.
- Katkısız tyhb'ların ve normal betonların, yoğunluk ve basınç dayanım değerleri arasındaki ilişkinin birlikte sorgulandığı “s4”te; orta düzeyde, ters orantılı ilişki belirlenmiştir. Bu durum; tyhb'ların daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olmalarına rağmen; normal betonlara göre daha yüksek basınç dayanımlarında olmasının bir sonucudur.
- Tüm katkılı tyhb'ların birlikte sorgulandığı; “s2”de, ilişki olmaması; kullanılan katkı oranlarının; basınç dayanımlarını; yoğunluk değerlerine göre çok daha fazla oranda etkilemesi ve bu doğrultuda, sorgulanan ilişkinin bozulması ile açıklanabilir.

Tezde; “etüv kurusu yoğunluk” ve basınç dayanım değeri ilişkisinin literatür ile karşılaştırılarak sorgulanması (Şekil 4.44) aracılığıyla sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Literatürde; yoğunluk ve basınç dayanımları arasında yüksek düzeyde ilişki olduğu belirtilmektedir. Ancak bunun özellikle incelendiği belirlenememiştir.
- Tezde, literatürden [6, 8, 9, 16, 58, 65, 79, 94] yararlanılarak, ilgili eşitlikler (Eş.4.25-4.28) elde edilmiştir. Görüldüğü gibi yoğunluk ve basınç dayanım değerleri; tüm agrega tiplerinde beraber artmaktadır. Ancak agrega tipi değiştikçe, sayısal ilişkiler de değişmiştir.



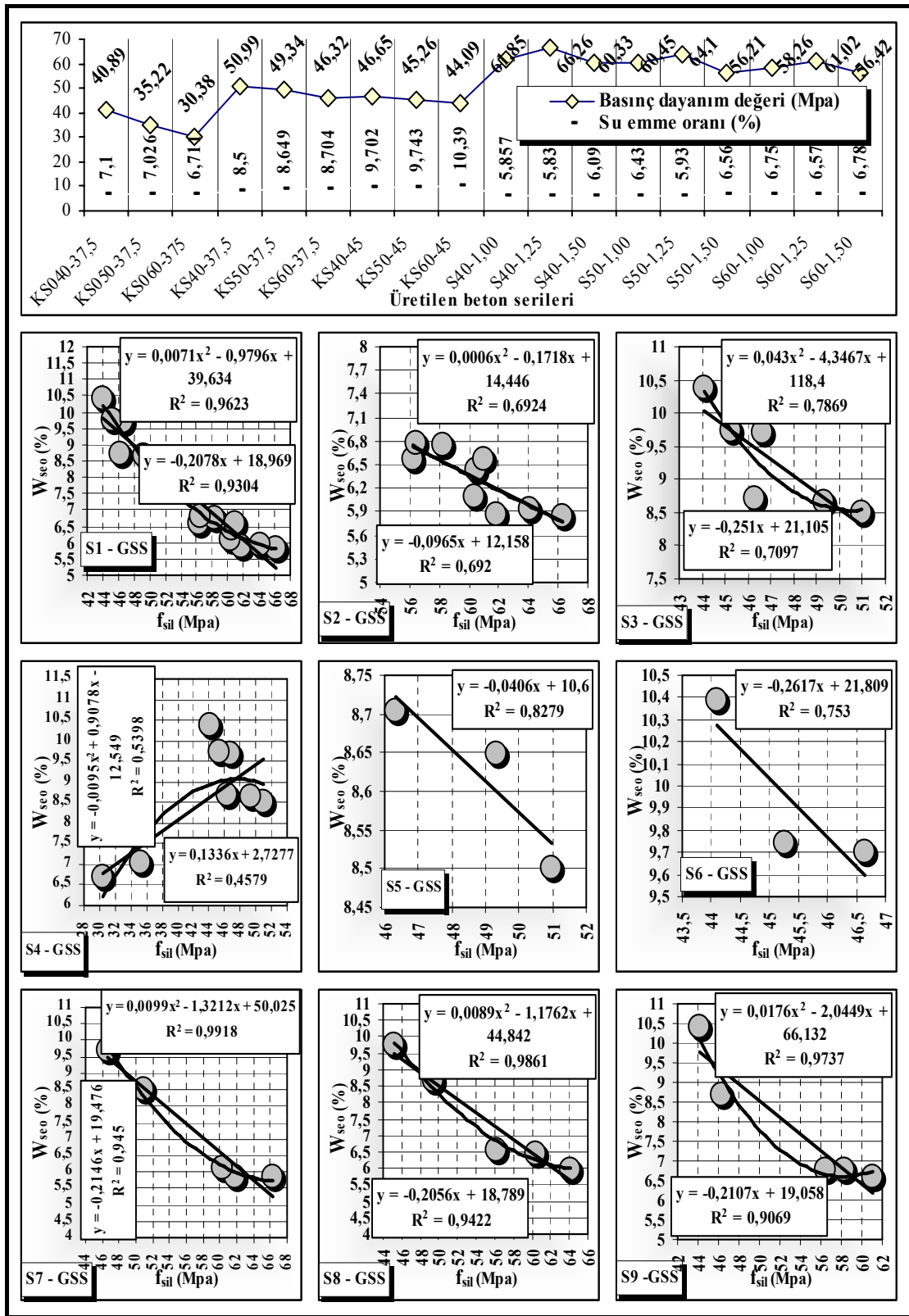
Şekil 4.44. Etüv kuru yoğunluk ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- Tezde, üretilen tyhb'ların yoğunluk ve basınç dayanımlarının; ponza ile üretilen taşıyıcı hafif betonlarınkinden yüksek olduğu belirlenmiştir (Eş.4.27 - 4.28).
- Tezdeki tyhb'ların; yapay hafif agrega ile üretilen yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlara göre, aynı basınç dayanım değerinde; daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaştığı (Eş.4.25) belirlenmiştir.
- Yapay hafif agrega ile üretilen tyhb'larda; sorgulanan değerlerin tez sonuçları ile yakınlığı (Eş.4.26) belirlenmiştir. Bu örnekte, aynı yoğunluk değerinde, Tezdeki katkısız tyhb'ların basınç dayanım değeri; yapay hafif agregalı tyhb örneklerinden bir miktar daha yüksektir. Ancak; tezdeki katkılı tyhb'larda; yapay hafif agrega ile üretilen tyhb örneklerine göre çok yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşılmıştır.
- Bu durum; tezde üretilen tyhb'ların yoğunluklarının fazla olması, skorianın; yapay hafif agregalara göre daha pürüzlü olan yüzey yapısı ve katkının tyhb'ların dayanımını olumlu yönde etkilemesi ile açıklanabilir.

4.4.4. Su emme oranı - basınç dayanım değeri ilişkisi

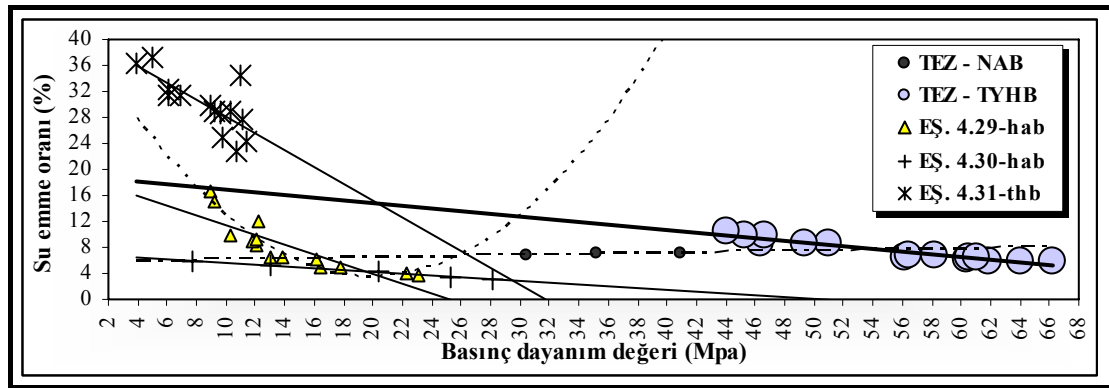
Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.45) aşağıda sıralanan yargılara ulaşılmıştır.

- Tezde; ”s2, s3, s4 ve s6” hariç, “su emme oranı” ve “basınç dayanım değeri” arasında; iyi ve yüksek düzeyde, ters orantılı ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir. “Su emme oranı” arttıkça, basınç dayanım değeri azalmıştır.



Şekil 4.45. Su emme oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

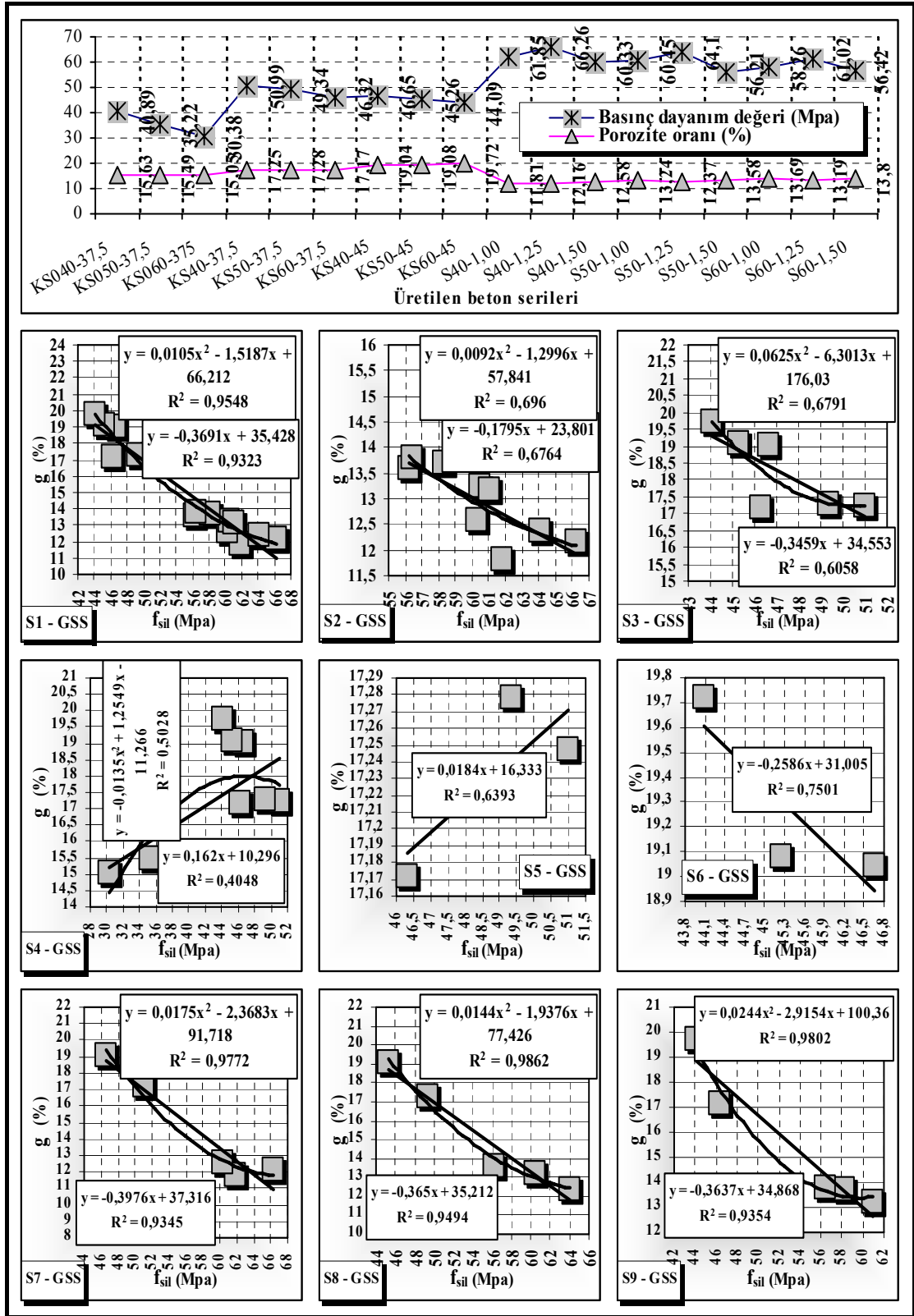
- Katkılı tyhb'ların sorgulandığı “s2”de; orta düzeye yakın ($R^2=0,692$) ilişki belirlenmiştir. Bu durum; öncelikle katkı oranları olmak üzere, skoria oranlarının; tyhb'ların “basınç dayanımı” ve “su emme oranı” değerlerini farklı oranlarda etkilediğinin bir göstergesidir.
- “S3”te; orta düzeyde ilişki elde edilmiştir. Bu durum; kullanılan skoria ve W/C oranı değişkenlerinin belirlenen ilişkiyi farklı yönde etkilediği ile açıklanabilir.
- “S4”te; agrega farklılaşması nedeniyle ilişki elde edilememiştir.
- “S6”da; “s5”in aksine, iyi düzeyde ilişki elde edilmesi; veri hatası olabilir.



Şekil 4.46. Su emme oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

Tezde “su emme oranı” ve “basınç dayanım değeri” ilişkisinin literatür ile karşılaştırılması aracılığıyla (Şekil 4.46) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır;

- Literatürde; “su emme oranı” ve “basınç dayanım değeri” arasında kuvvetli ilişki olduğu vurgulanan bir konudur. Birçok örneğin incelenmiş olmasına rağmen, bu bölümde, Tezden edinilen sonuçların, literatür ile ilişkilendirilmesi için yeterli veri elde edilememiştir.
- Şekilde verilen örnekler (Eş.4.29-4.31) ponza ile üretilen hafif agregalı betonlar ile ilişkilidir.
- Bir örnekte; edinilen basınç dayanım değerleri; tezdeki tyhb'lardan daha düşük ve “su emme oranları”, daha yüksektir. Ancak; Tezde üretilen tyhb'larda, verilen diğer iki örneğe göre aynı basınç dayanım değerinde; daha yüksek su emme oranları elde edilmiştir.



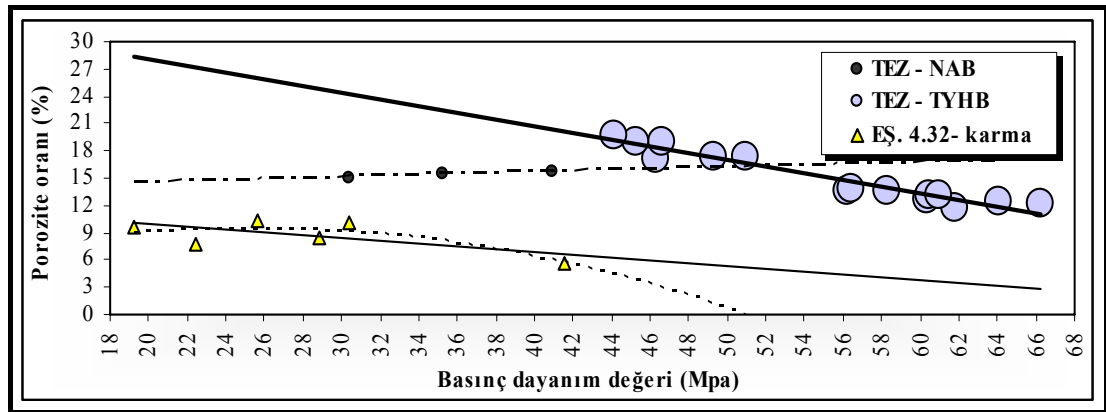
Şekil 4.47. Porozite oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

- Bu durum ilgi çekicidir. Çünkü genel görüş; kullanılan hafif agreganın tane yoğunluğunun artması durumunda; “su emme oranı”nın azalacağı yönündedir.
- Tezde kullanılan skorialar; literatürde, hafif agrega spektrumunda yer alan, en yoğun ve en az su emen agregalar olarak tanımlanmıştır (Bkz. 3. Bölüm, s.40). İlgili örnekte; Teze göre, oransal olarak daha düşük su emme oranlarının elde edilmesi; kullanılan bileşen veya yöntem farklılığı ile açıklanabilir.

4.4.5. Porozite oranı - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Bkz. Şekil 4.47) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır;

- Porozite oranları; su emme oranlarından, ilgili deneysel yöntemle göre, hesap yoluyla elde edildiği için; “su emme oranı” ve “basınç dayanım değeri” arasında olan ilişkiler için yapılan saptamaların hepsi, “porozite oranı” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişkiler içinde geçerlidir. Bu nedenle bu bölümde tekrar edilmeyecektir.



Şekil 4.48. Porozite oranı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

Tezde; belirtilen ilişkinin literatüre göre olan konumunun sorgulanması (Şekil 4.48) ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- “Su emme oranı ” ve “basınç dayanım değeri” arasında olan ilişki gibi bu sorgulamanın da de literatür ile sayısal olarak ilişkilendirilebilmesi için yeterli veri

bulunamamıştır. Elde edilen tek örnek [167], yaklaşık değerleri içeren farklı beton tiplerini bir arada sorgulayan bir örnektir (Eş.4.32).

- Bu örnekte de; Tezdeki tyhb'lara göre daha düşük basınç değerlerinde, daha yüksek porozite olması gerekirken; daha düşük değerler elde edilmiştir. Değerler arasındaki fark çok fazladır. Bu nedenle, bu durum da bir önceki sorgulamada olduğu gibi; "porozite" belirlerken kullanılan deneysel yöntem farklılıkları ile açıklanabilir.

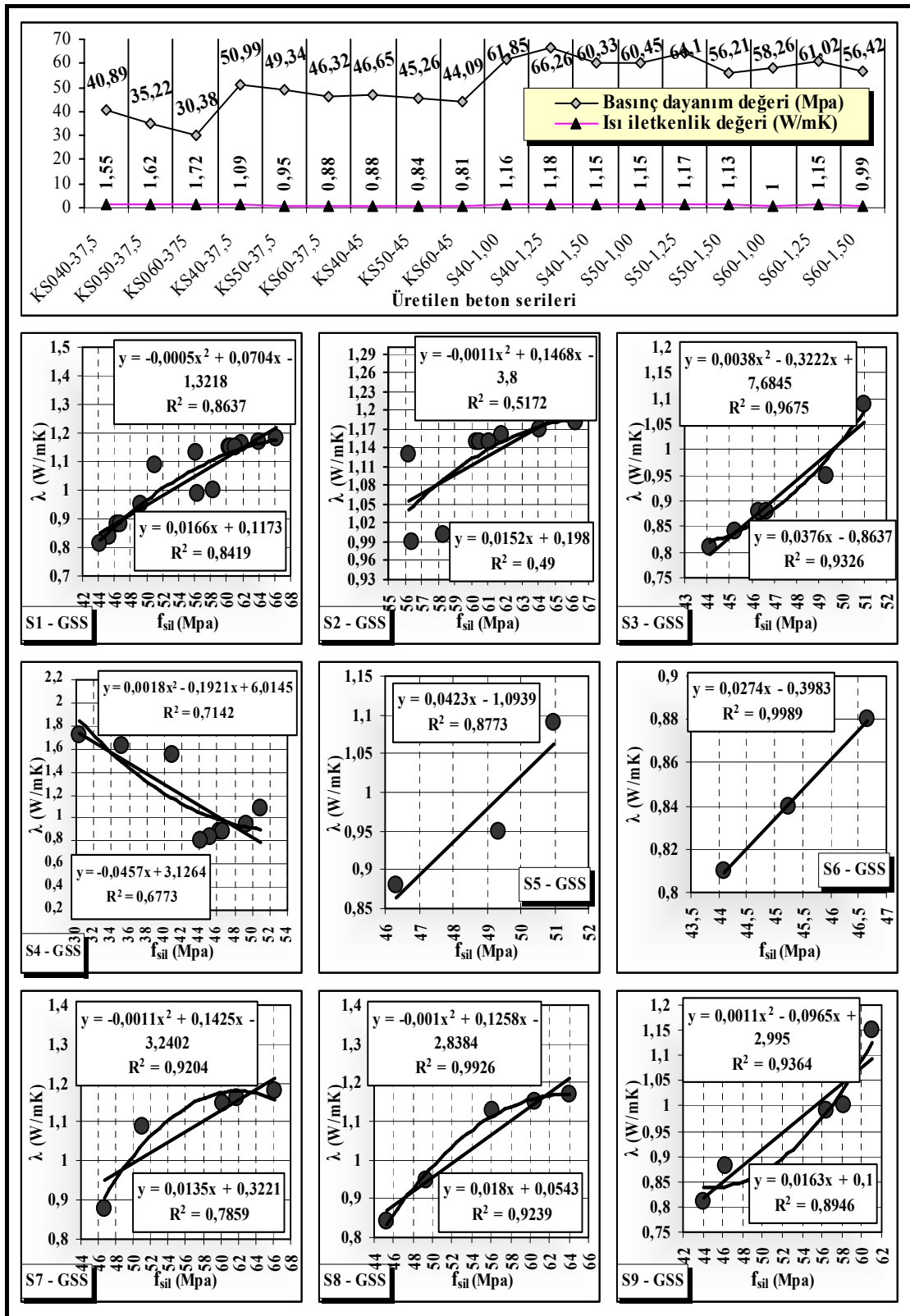
4.4.6. Isı iletkenlik değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin "üretim değişkenleri"ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.49) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

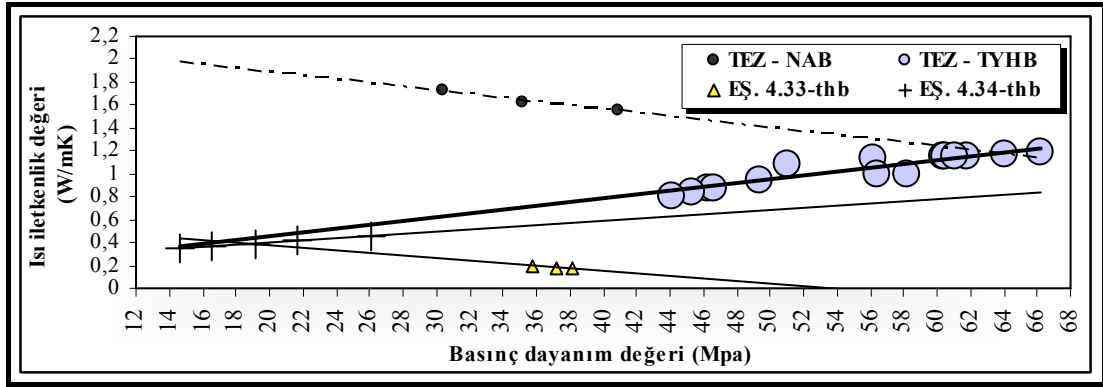
- "S2 ve s4" hariç iyi ve yüksek düzeyde doğru orantılı ilişkiler belirlenmiştir.
- Katkılı tyhb'ların sorgulandığı "s2"de; ortanın altında ilişki belirlenmiştir. Bu durum, katkı oranlarının; basınç dayanımlarını ve ısı iletkenliklerini farklı etkilemiş olması ile açıklanabilir.
- Normal agregalı ve katkısız tyhb'ların birlikte sorgulandığı "s4"te; orta düzeyde olsa da bir ilişki belirlenmiş olması; özellikle katkı kullanılan tyhb'ların, ısı iletkenlik davranışı açısından, normal betonlara yaklaştığının bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

Tezde; "ısı iletkenlik değeri" ve basınç dayanım değeri ilişkisinin literatür ile karşılaştırılması aracılığıyla (Bkz. Şekil 4.50) aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Literatürdeki diğer ilişkilerin aksine, "ısı iletkenlik değeri"; basınç dayanım değerinden çok "etüv kurusu yoğunluk" değerleri ile ilişkilendirilerek sorgulanmıştır. Bu nedenle; literatürden [8, 39] sadece iki örnek elde edilebilmiştir.
- Verilen örnekler; skori (Eş.4.33) ve ponza (Eş.4.34) ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar ile ilişkilidir.
- Her iki örnekte de, Tezdeki tyhb'lardan daha düşük basınç dayanımı ve ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Eş. 4.33'teki değerler, belirtilen basınç dayanım değerinde ponzaya göre daha yoğun bir agrega olan skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar için çok düşük değerlerdir [39].



Şekil 4.49. Isı iletkenlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki



Şekil 4.50. Isı iletkenlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- Tezde de skoria kullanılmış olmasına rağmen, tezdeki değerler ile verilen örnekteki ısı iletkenlik değerleri arasındaki farkın bu kadar fazla olması; kullanılan bileşen farklılıkları ve kullanılan deneysel yöntem farklılığı (çok küçük numunelerden, çok hızlı ölçüm alınması sonucunda, dışarı kaçan ısı enerjisinin fazla olması) ihtimali ile açıklanabilir [39].

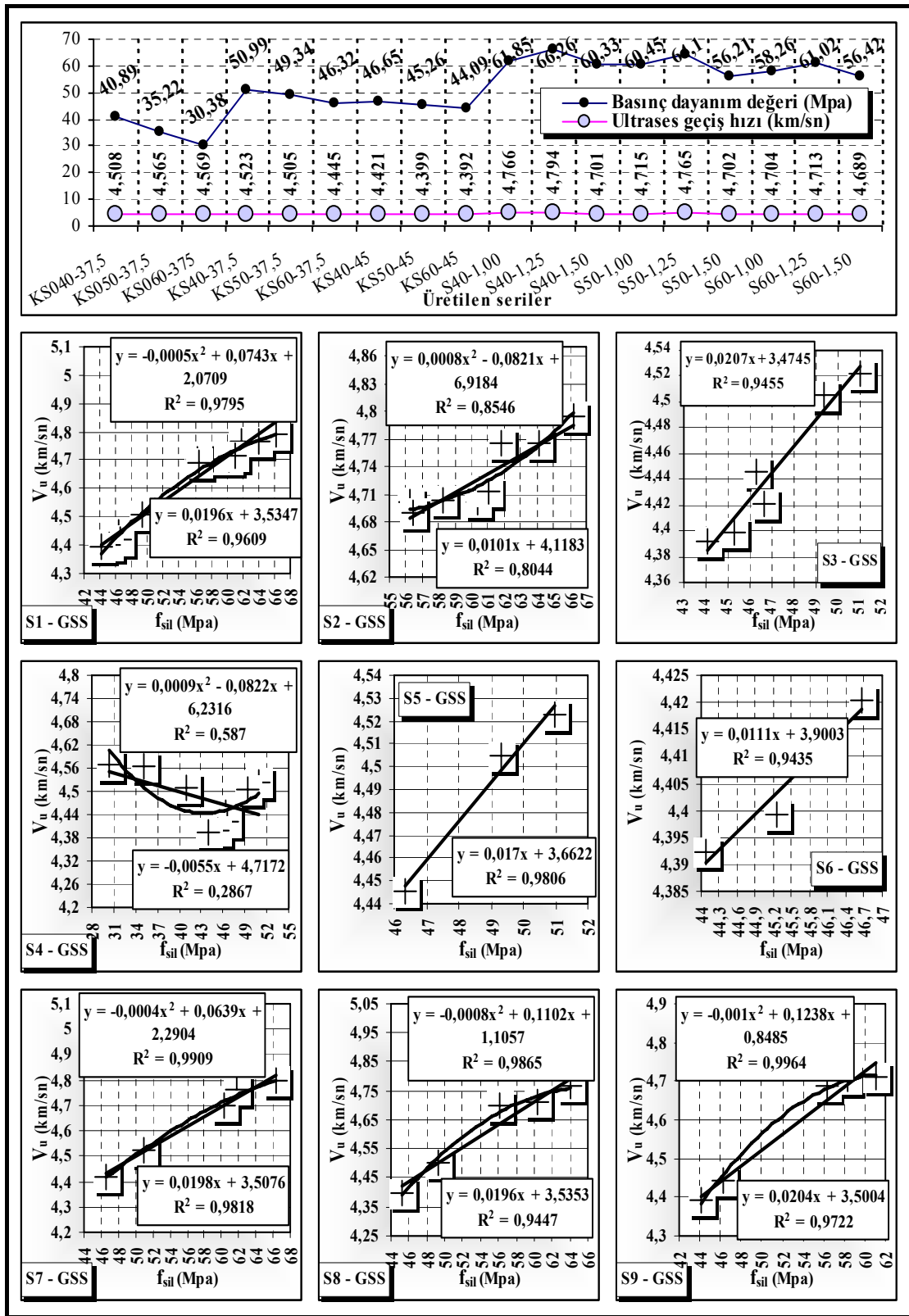
4.4.7. Ultrases geçiş hızı - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.51) aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

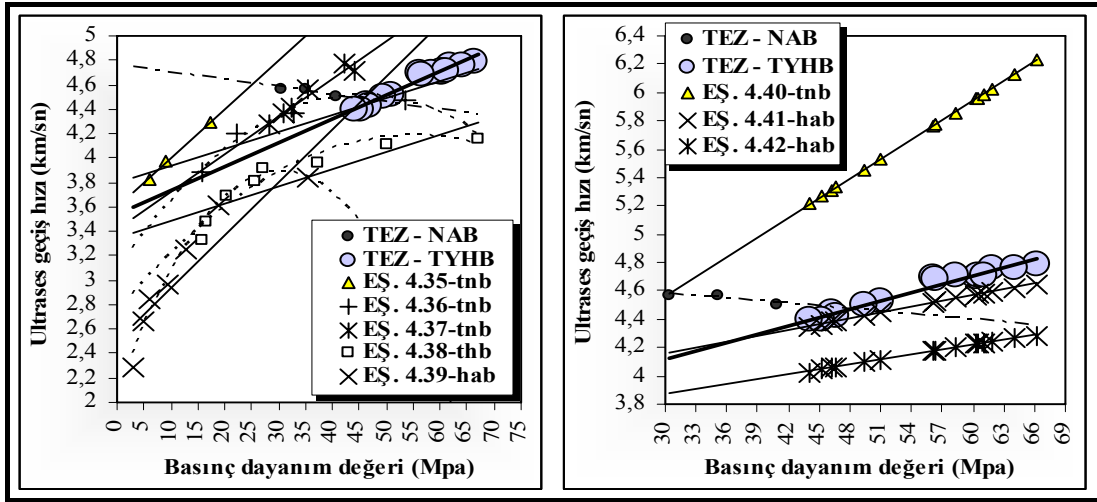
- Tezde; katkısız tyhb’lar ve normal betonların birlikte sorgulandığı “s4” hariç, “s2”de iyi ($R^2=0,804$) diğerlerinde yüksek derecede doğrusal ilişkiler elde edilmiştir. basınç dayanım değeri ve ultrases hızı birlikte artmıştır. “s4” serisinde ilişki elde edilmemiş olması; tyhb’larda sıkı yapılaşan ara yüzey ve bu doğrultuda normal betonlardan farklılaşan basınç dayanım değeri ile açıklanabilir.

Tezde; “ultrases geçiş hızı” ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması aracılığıyla (Şekil 4.52) aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Literatürde, “basınç dayanım değeri” ve “ultrases geçiş hızı” arasındaki ilişki popüler olarak araştırılan bir konudur [50, 60, 63-65].

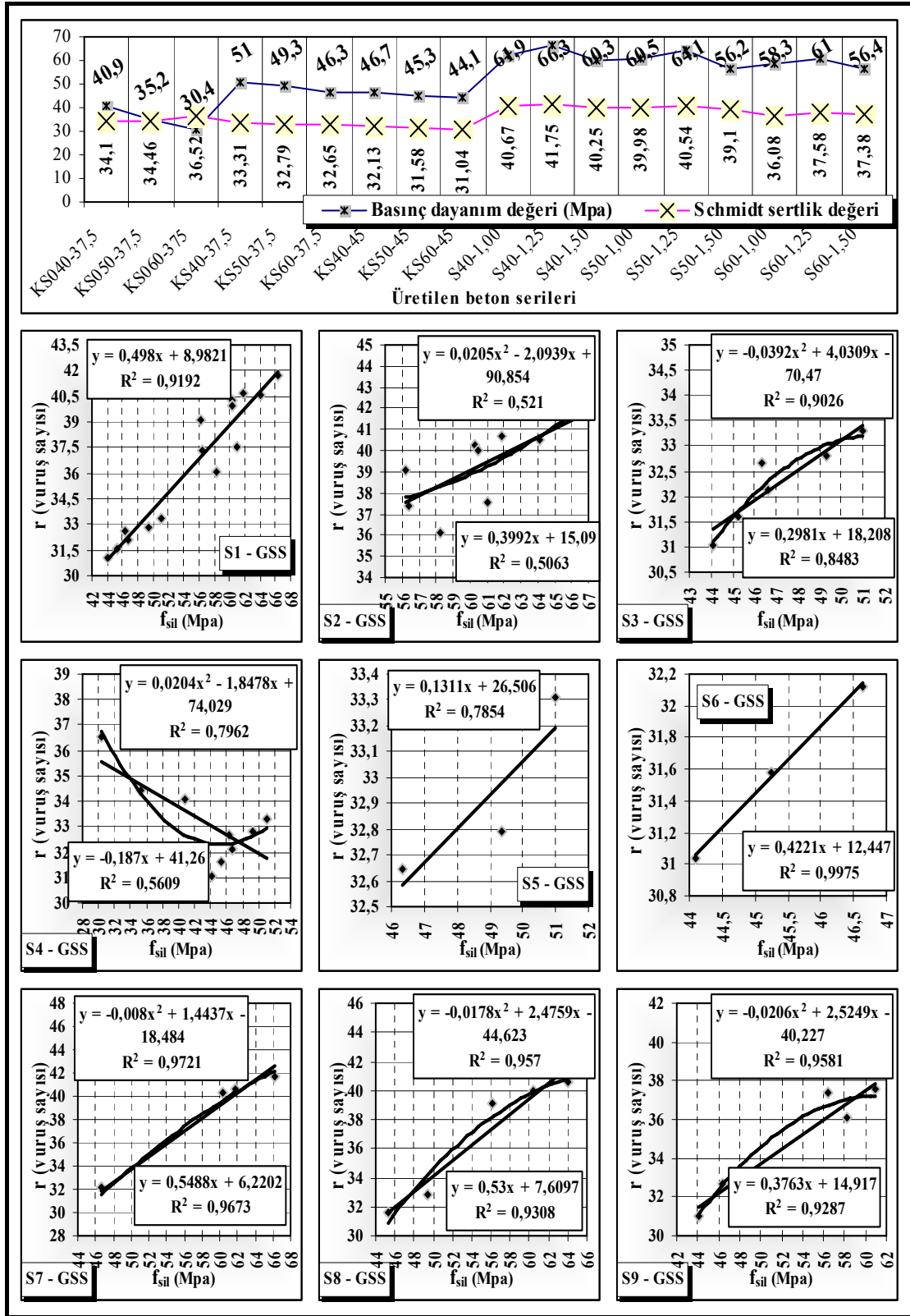


Şekil 4.51. Ultras ses geçiş hızı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki



Şekil 4.52. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- Örneklerden edinilen ve Tezde türetilen eşitlikler, “Şekil 4.52,a”da, kaynaklarda sorgulanan ilişki için önerilen eşitlikler; “Şekil 4.52, b”de sunulmuştur.
- Bu eşitliklerin biri ponza ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar (Eş.4.38) ikisi yapay hafif agrega ile üretilen hafif agregalı betonlar (Eş.4.39, 4.41) ve diğerleri normal agrega ile üretilen, taşıyıcı normal betonlar ile ilgilidir.
- “Şekil 4.52, a”da, görülebileceği gibi; Tezdeki tyhb’lardan elde edilen ultrases hızları ve basınç dayanımları; ponza ile üretilen (Eş.4.38) betonlardan daha fazladır.
- Tezdeki tyhb’lardan daha düşük basınç dayanımlarına sahip, “normal dayanım” sınıfındaki normal betonlarda; daha düşük basınç dayanımları ve ultrases hızları edinilmiştir (Eş.4.37). Tezdeki tyhb’lar ile aynı basınç dayanım değerine sahip olan normal betonlarda ise; daha yüksek ultrases hızları elde edilmiştir (Eş.4.37).
- Tezdeki tyhb’lar ile aynı basınç dayanımlarına sahip olan yapay hafif agregalı hafif betonlarda ise; daha düşük ultrases hızları belirlenmiştir (Eş.4.41 – 4.42).
- Öte yanda; “normal dayanım” sınıfında olan normal agregalı betonlar için önerilen eşitlik (Eş.4.40) ile hesaplanan ultrases hızlarında; yüksek dayanım değerlerinde (40 Mpa ve üstü) aşırı sapma (kayaçların ultrases hızlarını bile geçecek şekilde) olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç; literatürde önerilen, “eşitliklerin, ancak kendi dayanım sınıfları ve üretim bileşenleri için kullanılabileceği” görüşünü [9] desteklemektedir.

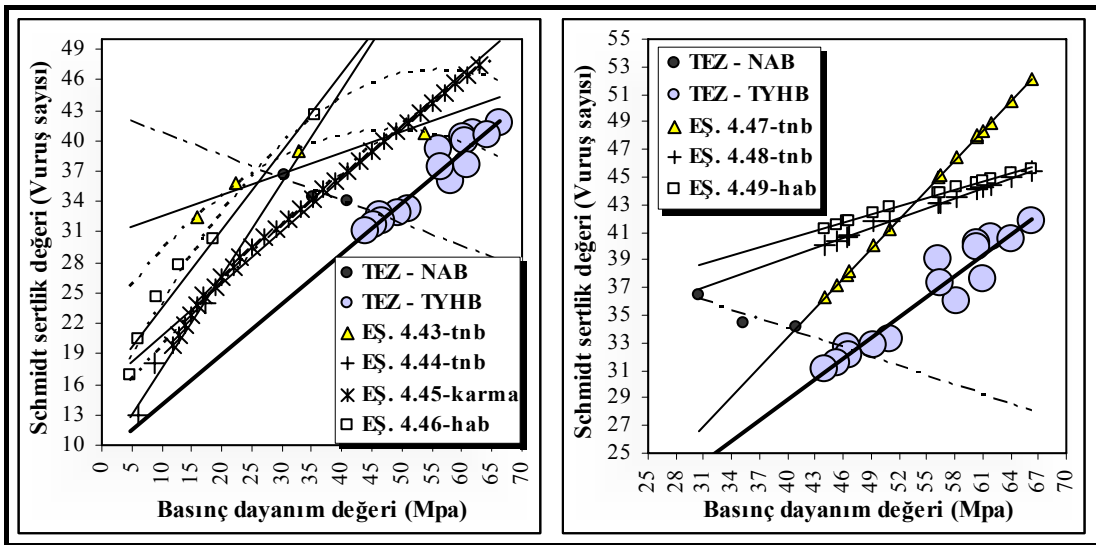


Şekil 4.53. Schmidt sertlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

4.4.8. Schmidt sertlik değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil Bkz. 4.53) aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir.

- Tezde; “s2, s4” hariç, sertlik değeri ve “basınç dayanımları arasında, yüksek düzeyde, doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. İki değer birlikte artmıştır.
- “S2”deki düşük düzeyde ilişki ($R^2=0,521$); katkı oranlarının betonların sıklıklarını ve basınç dayanımlarını farklı şekillerde etkilemesi ile açıklanabilir.
- Katkısız tyhb’lar ve normal betonların birlikte sınındığı s4’te; agrega faklılığına rağmen, iyi düzeye yakın polinomal ilişki ($R^2=0,796$) belirlenmiş olması dikkat çekicidir. Bu durum; üretilen tyhb’larda, çimento hamuru ve skoria arasındaki kohesif kuvvetlerin çok olduğunun ve fazların bir arada hareket ederek, kuvvete karşı tepki verdiğinin bir göstergesidir.



Şekil 4.54. Schmidt sertlik değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

Tezde; “schmidt sertlik değeri” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması aracılığıyla (Şekil 4.54) şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Yapılan araştırmaların çoğunlukla normal betonlar ile ilgili olduğu belirlenmiştir [50, 60, 61, 64]. Hafif agrega ile üretilen betonlarda, sorgulanan davranış ile ilgili tek

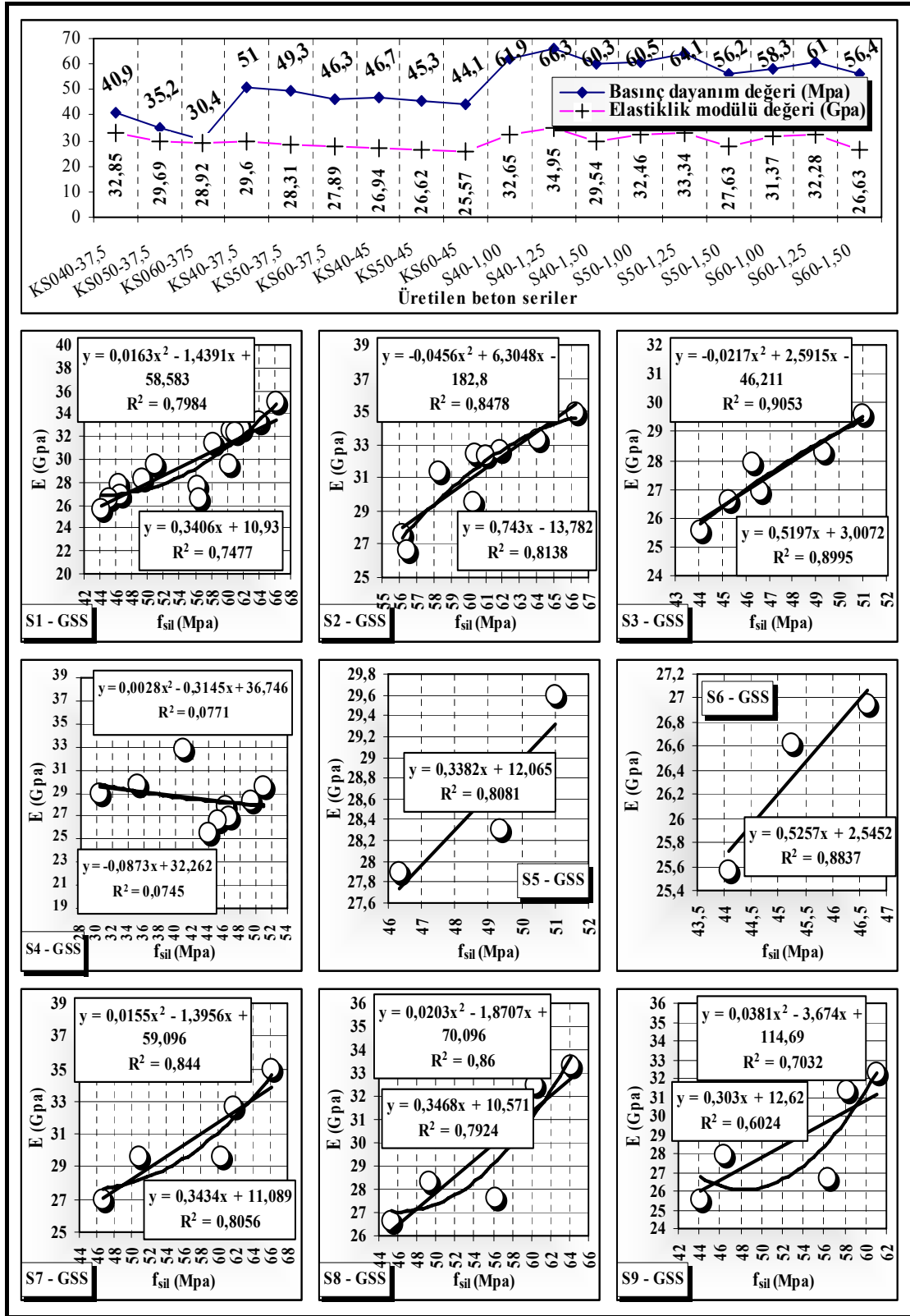
bir kaynak [50] bulunabilmiştir (Eş.4.46 ve 4.49). Bu kaynaktaki veriler ise; genelde düşük dayanım sınıfına aittir. “Şekil 4.54, a”da literatürden elde edilen, tekil veriler kullanılmış ve ilgili saptamalar aşağıda sunulmuştur.

- Tezdeki tyhb’lara göre daha düşük basınç dayanımlarındaki normal betonlarda; daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir (Eş.4.44).
- Ancak aynı sertlik değerlerinde; Tezdeki tyhb’ların basınç dayanımları daha yüksektir. Yani; basınç dayanım değeri ile kıyaslandığında, normal betonlarda daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir.
- Yapay hafif agregalı hafif betonlar için de aynı durum söz konusudur (Eş.4.46).
- Literatürde önerilen eşitlikler için de aynı saptamalar geçerlidir. Ayrıca yapay hafif agregalar ile üretilen betonlarda bile (Eş.4.49) aynı basınç dayanım değerinde; daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır.
- Normal betonlarda, kullanılan agreganın sert yapısı nedeniyle; sertlik değerlerinin bir miktar yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Ancak; skoriadan çok daha hafif olan, boşluk miktarı çok fazla olan yapay hafif agrega ile üretilen hafif betonlarda; beklenen sonuç; sertlik değerlerinin daha az olmasıdır.
- “Şekil 4.54, b”deki Eş.4.47 ve Eş. 4.48; normal betonlar ile ilgilidir. Görüldüğü gibi, ön görülen ilişkiler çok farklıdır. Bu durumda, irdelenen eşitliklerin, bu Tezde, yüksek dayanım sınıfındaki, tyhb’lar için, fazla sapma gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Bu sonuç ta; “üretim değişkenlerinin, beton tipi ve dayanım sınıflarının, beton özellikleri arasındaki ilişkileri önemli ölçüde etkilediği” savını desteklemektedir.

4.4.9. Elastiklik modülü değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi

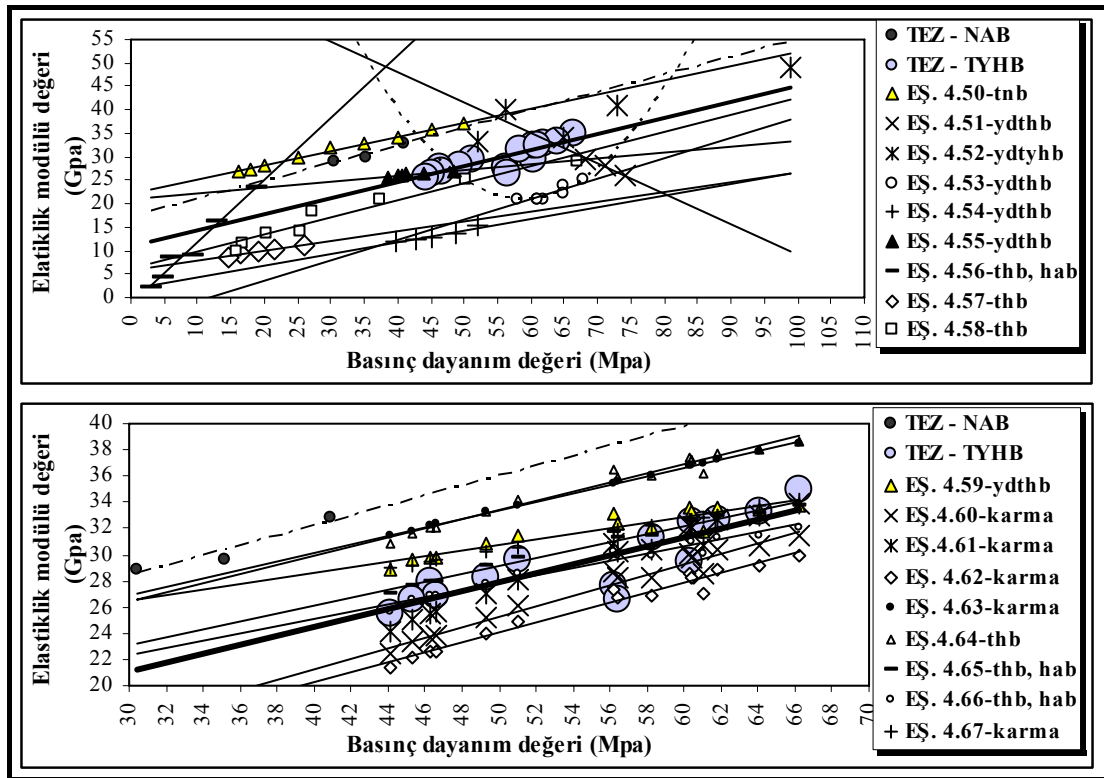
Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.55) aşağıda sıralanan sonuçlar elde edilmiştir.

- “S7”deki orta düzeydeki ilişki; veri sapması ile açıklanacak olursa; “s4” hariç; “elastiklik modülü değeri” ve “basınç dayanım değeri” arasında; iyi ve yüksek düzeyde ilişkiler belirlenmiştir.



Şekil 4.55. Elastiklik modülü değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

- Diğer sınımalara göre korelasyon katsayılarının biraz düştüğü ancak tyhb'ların sorgulandığı serilerin hepsinde, “elastiklik modülü değeri” ve “basınç dayanım değeri” arasında ilişki olduğu belirlenmiştir.
- Katkısız tyhb'lar ve normal betonların birlikte sorgulandığı “s4”te; agrega farklılığının elastiklik modülünü önemli oranda etkilemesinden dolayı; hiçbir ilişki belirlenememiştir.



Şekil 4.56. Elastiklik modülü değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

Belirtilen ilişkinin literatüre ile karşılaştırılması aracılığıyla (Şekil 4.56) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır;

- Bu ilişkinin literatürde [8, 21, 40, 41, 50, 65, 94, 169] yoğun olarak araştırıldığı (Şekil 4.56) ve bilimsel araştırmalar sonucunda ve ilgili standartlarda [16, 50, 80, 87, 98, 175]; çok sayıda önerilen sayısal ilişkilerin olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.56, b).
- “Şekil 4.56, a”daki eşitliklerden biri taşıyıcı normal betonlara (Eş.4.50); biri yapay hafif agregalı yüksek dayanımlı tyhb'lara (Eş.4.52); üçü yapay hafif agregalı

yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlara (Eş.4.51, 4.53 ve 4.54); biri yapay hafif agregalı düşük dayanımlı hafif agregalı betonlara (Eş.4.56), ikisi, ponzalı taşıyıcı hafif betonlara (Eş.4.57-8.58) ait verilerden edinilmiştir.

- Görüldüğü gibi; aynı basınç dayanımlarında, normal agregalı betonların elastiklik modülleri; Tezdeki tyhb'ların elastiklik modüllerinden bir miktar yüksektir. Aynı durum; yapay hafif agregalı yüksek dayanımlı tyhb'lar için de geçerlidir.
- Yapay hafif agregalı, yüksek dayanımlı tyhb'lar ve yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonların karışım oranları belirlenirken ve üretim aşamasında büyük özen gösterilmektedir. Çok yüksek dayanıma sahip, yüksek dozajda çimento kullanımı, çok miktarda, mineral katkı, lif veya çelik tel katkı ve ince dolgu malzemesi, ayrıca ince malzeme kullanımı çok fazla karışım suyu gerektirdiğinden dolayı, akışkanlığı arttırmak için de, yüksek dozajlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığı belirlenmiştir.
- Şekilde sunulan örnekte (Eş.4.52); Belirtilen şekilde üretilen yüksek dayanımlı tyhb'larda, aynı basınç dayanımlarında; Tezdeki tyhb'lardan ve örneklerde verilen diğer yüksek dayanımlı normal betonlardan (Eş.4.50) daha fazla elastiklik modülleri elde edilmiştir. Ancak; Tezdeki tyhb'ların basınç dayanımları ve elastiklik modülleri; ponza veya yapay hafif agregalı ile üretilen diğer hafif beton örneklerine göre genelde daha yüksektir.
- Tezdeki tyhb'larda; yukarıda belirtildiği gibi, çok büyük özen gösterilerek üretilen yüksek dayanımlı tyhb'lara göre bu sonucun elde edilmesi dikkat çekicidir. Bu durum; ideal en büyük tane boyutunda ve ideal tane boyu dağılımında olan agregalı kullanımı, katkının olumlu etkisi, skorianın pürüzlü yüzey yapısı ve çimento hamuru ile olan kimyasal etkileşiminin sonucudur.
- Öte yandan; araştırılan ilişkinin belirlenmesi için, literatürde önerilen, 10 farklı eşitliğin sorgulanması sonucunda, daha farklı saptamalar yapılmıştır (Şekil 4.56, b).
- Tezdeki tyhb'lar için, aynı basınç dayanımlarında; "NEN 5967"de (Eş.4.59), ACI 318'de (Eş.4.61), CEB-FIB MC 90 (Eş.4.64) ve Eurocode 2'de (Eş.4.65) önerilen elastiklik modülleri; daha fazladır. Tüm bu eşitlikler; yapay hafif agregalı ile üretilmiş yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar için önerilmiştir.
- Öte yandan Tezdeki tyhb'lar için, aynı basınç dayanımlarında; Pauw (Eş.4.60), ACI 213 (Eş.4.62), Carssquillo ve NZS 3473 (Eş.4.67) tarafından önerilen elastiklik

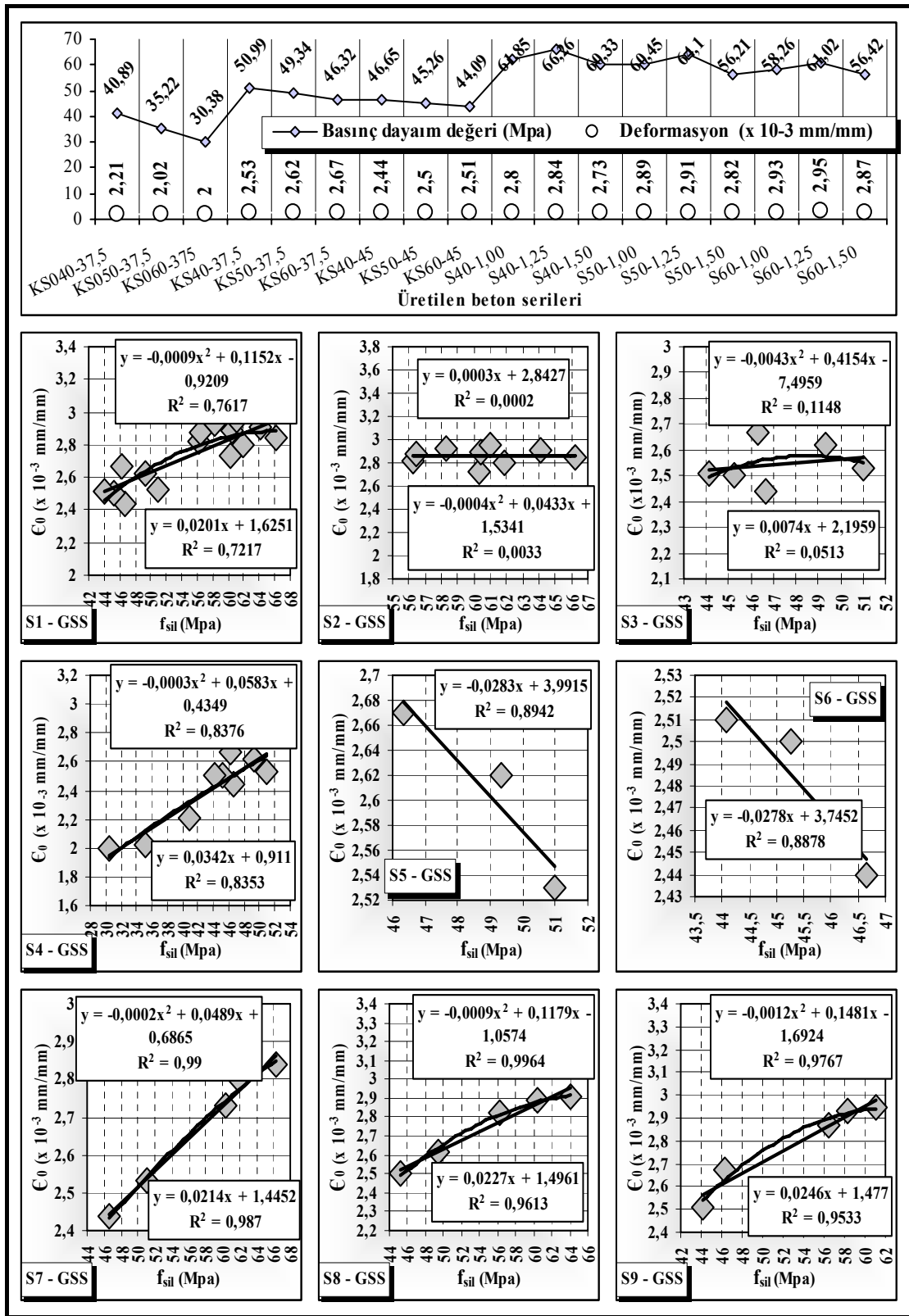
modülleri daha azdır. Belirtilen ilk iki eşitlik orta dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar için, diğeri (1,4-2,5) Mg/m³ yoğunluk ve (21-83) Mpa basınç dayanımlarına sahip olan tüm beton tipleri için önerilmiştir. Bu nedenle sapma olması normaldir.

- Tezdeki sonuçlara, en yakın olan;“NS 3473”de (Eş.4.66) yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar için önerilen ilişkidir. Bu ilişkide de, Tezdeki elastiklik modülü değerlerine göre, düşük dayanımlarda; yüksek, yüksek dayanımlarda ise; daha düşük değerler önerilmiştir.

4.4.10. Basınç gerilimi altında maksimum birim deformasyon - basınç dayanım değeri ilişkisi

Belirtilen ilişkinin sorgulanması ile (Şekil 4.57) edinilen sonuçlar, aşağıdaki gibidir.

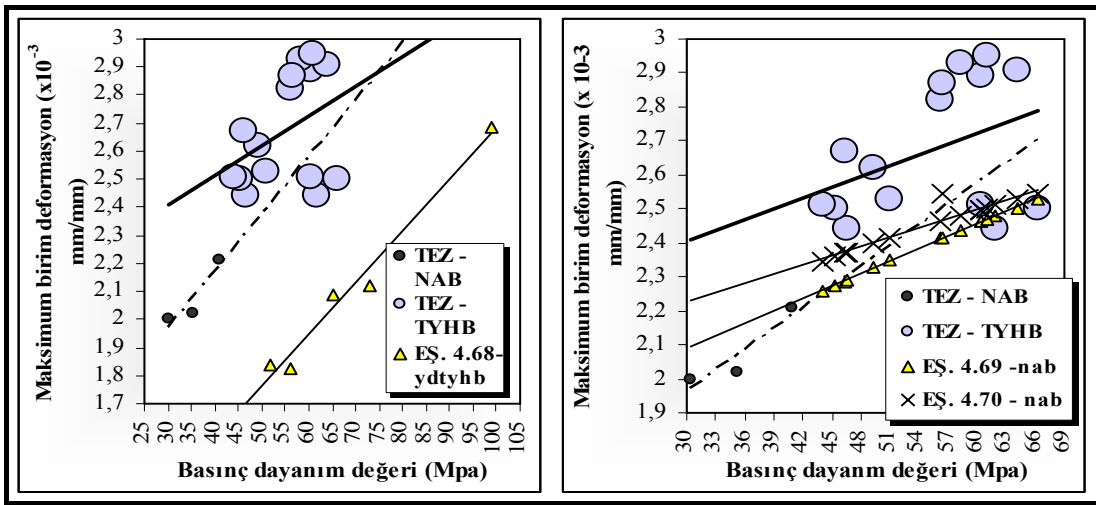
- Tezde, “s2, s3”de önceki sorgulamalarda; tyhb’ların diğer özellikleri ve basınç dayanım değeri arasında, genelde iyi düzeyde ilişkiler belirlenmiştir. Bu sorgulamada ise; maksimum birim deformasyon ve basınç dayanımları arasında ilişki belirlenememiştir. “S1”de ise; orta düzeyde ilişki mevcuttur. Bu durum; değişen skoria oranlarının, maksimum birim deformasyon değerlerini, basınç dayanım değerinden çok etkilemesi ve bunun ilişkiyi ortadan kaldırması ile açıklanabilir.
- Katkı oranlarının sorgulandığı “s7, s8 ve s9”da yüksek düzeyde; ilişkiler elde edilmiş olması; bu yargıyı destekler niteliktedir.
- Bu sorgulamada, diğer sınamaların aksine, “s4” serisinde iyi düzeyde ($R^2=0,838$), doğrusal ilişki belirlenmiştir. Basınç dayanımları ve maksimum birim deformasyon değerleri birlikte artmıştır. Tezde edinilen bu sonuç; düşük basınç dayanım değeri elde edilen, normal betonların, düşük deformasyon kabiliyetine sahip olmaları ve yüksek basınç dayanım değerine sahip olan tyhb’ların yüksek deformasyon yapabilme yeteneklerinin birlikte sınanması sonucunda oluştuğu ile açıklanabilir.
- Sadece skoria oranlarının değiştiği “s5”, “s6”da; yüksek düzeyde ($R^2=0,894$ ve $0,888$) ters orantılı ilişki belirlenmiştir. Skoria oranı arttıkça, basınç dayanımları düşmüş, “maksimum birim deformasyon” değerleri artmıştır. Katkılı tyhb’larda (s7, s8, s9) bu davranış tam tersidir. Doğru orantılıdır. Bu durumda; katkı kullanımının, tyhb’ların deformasyon davranışını değiştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.57. Maksimum birim deformasyon ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

“Maksimum birim deformasyon” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişkinin literatüre ile karşılaştırılması aracılığıyla (Şekil 4.58) şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Literatürden [21, 22, 82, 98]; sınırlı sayıda veri elde edilmiştir (Eş.4.68 – 4.70). İlk eşitlik, iki ayrı kaynaktaki verilerin birlikte sınanması sonucunda oluşturulmuştur.
- “Şekil 4.58, a”daki eşitlik (Eş.4.68); yapay hafif agregalı yüksek dayanımlı tyhb’lardan edinilen veriler ile türetilmiştir.



Şekil 4.58. Maksimum birim deformasyon ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

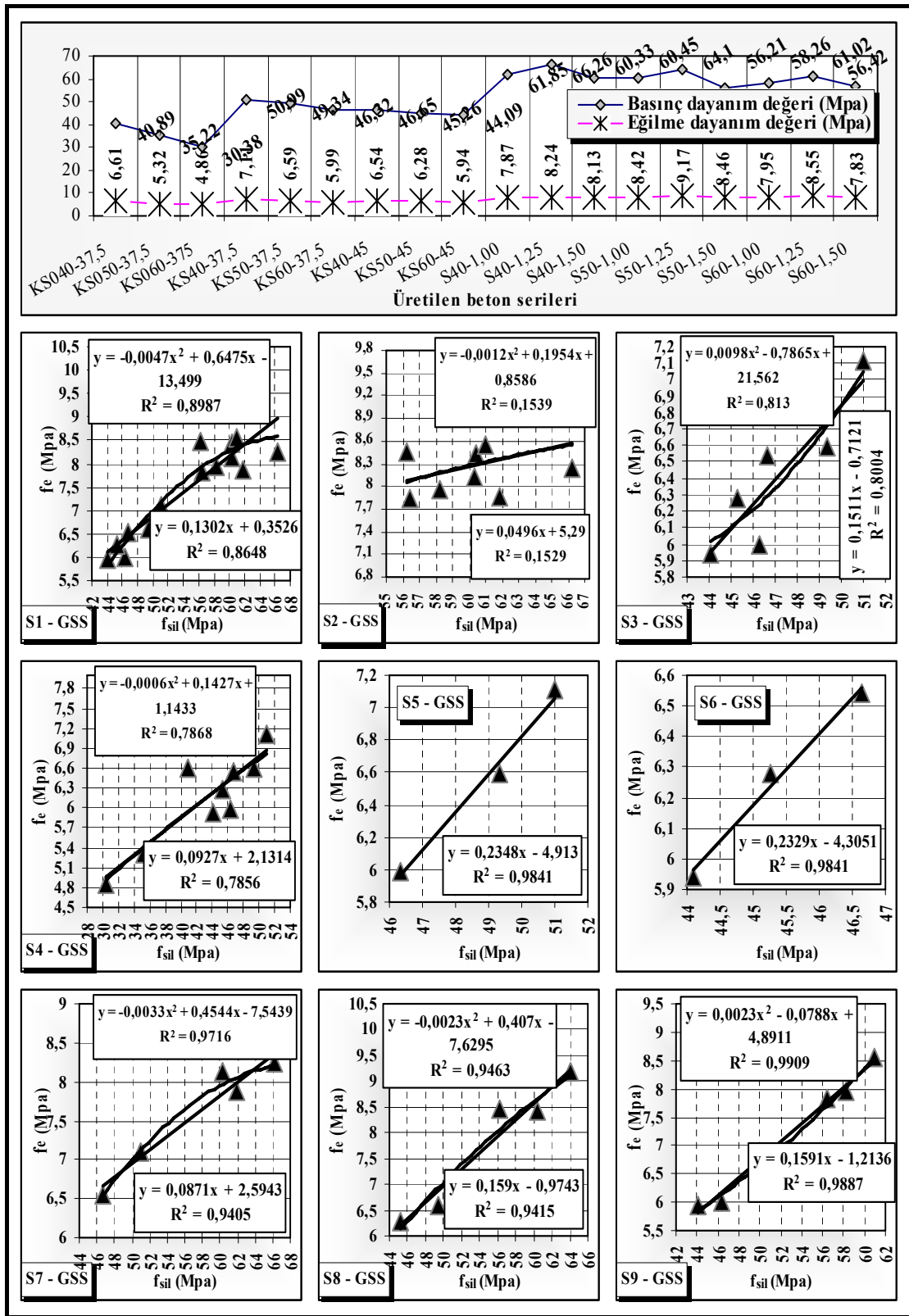
- “Şekil 4.58, b”deki “Eş.4.69” Arıoğlu tarafından, önerilmiştir. “Eş.4.70” ise; Bluic tarafından, 17 farklı kaynaktan edinilen verilerin ilişkilendirilmesi sonucunda, (10-125) Mpa basınç dayanımlarına sahip olan normal beton tipleri için önerilmiştir.
- Şekilde görüldüğü gibi aynı basınç dayanım değerinde, Tezde üretilen tyhb’lardan elde edilen “maksimum birim deformasyon” değerleri; yapay hafif agregalı yüksek dayanımlı tyhb’lardan ve yüksek dayanımlı normal betonlardan daha yüksektir.
- Hafif agregalı betonların, daha yüksek “maksimum birim deformasyon” değerleri verdiği, agrega dayanımı ile betonun deformasyon davranışının ters orantılı olduğu bildirilmiştir. Bu doğrultuda, Tezde üretilen tyhb’larda normal agregalı betonlardan daha yüksek “maksimum birim deformasyon” değerlerinin elde edilmiş olması; literatürdeki ortak görüş ile uyumludur.

- Öte yandan, bu bölümde net olarak sayısallaştırılamadığı için sunulamayan (Bkz. 2. Bölüm) çok farklı veriler de belirlenmiştir. Örneğin yapay hafif agregalar ile üretilen hafif betonlarda; çok daha yüksek deformasyon değerleri veya ponza ile üretilen düşük dayanımlı hafif betonlarda; Tez verilerine çok yaklaşan “maksimum birim deformasyon” değerleri belirlenmiştir. Ayrıca; skorla ile üretilen hafif betonların deformasyon davranışını inceleyen bir araştırmaya rastlanılmamıştır.
- Sonuç olarak; literatürde olan verilerin, özellikle farklı tipte doğal veya yapay hafif agrega kullanılan, normal veya yüksek dayanımlı hafif betonların sayısal kıyaslaması için yeterli olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca; geniş aralıkta olan hafif beton tiplerinde, deformasyon davranışlarının karşılaştırılması için; basınç dayanım değerinin ve ikili korelasyonların yeterli olmadığı açıktır
- Tezde; çok dar bir yoğunluk aralığında elde edilen veriler arasında, ilişki olduğu ve normal betonlardan daha fazla deformasyon değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

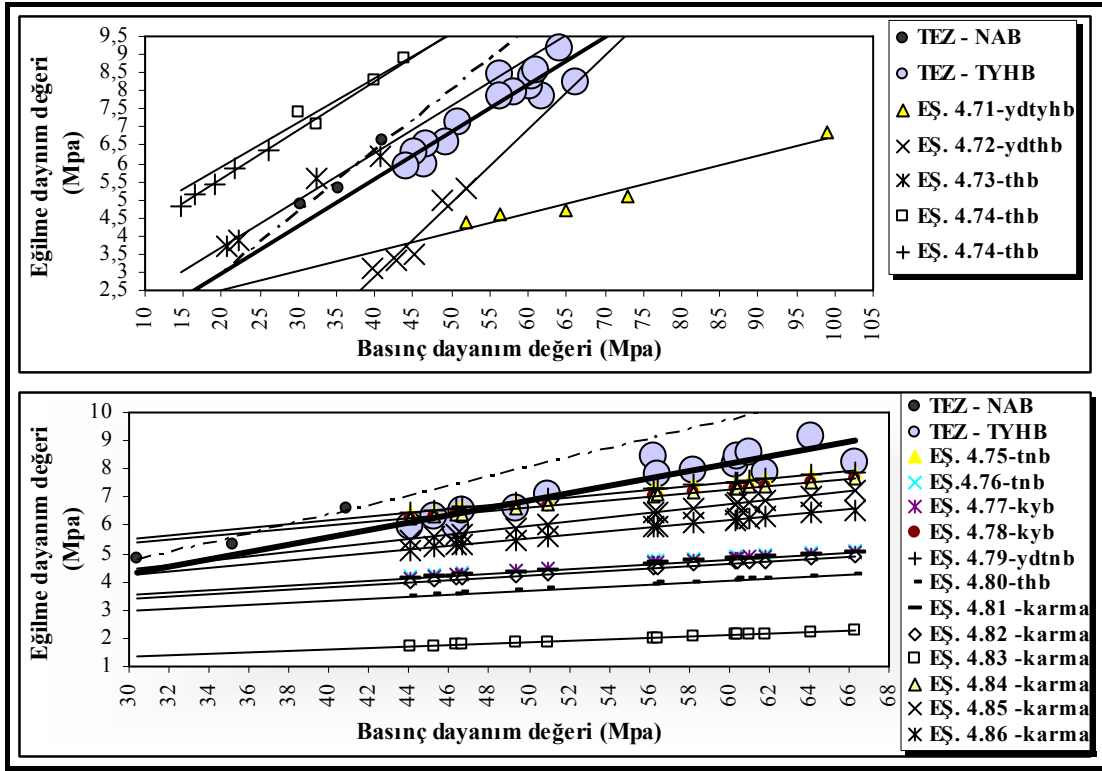
4.4.11. Eğilme dayanım değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi

Sorgulanan ilişki kapsamında (Şekil 4.59) aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tüm serilerde (s2 ve s4) dışında; iyi ve yüksek düzeyde ilişkiler belirlenmiştir.
- Katkısız tyhb’ların sınıandığı “s2”de; net bir ilişki belirlenememiştir. Bu durum; skorlanın; eğilme dayanımını, basınç dayanımından çok, hiper akışkanlaştırıcının ise; basınç dayanımını eğilme dayanımından çok etkilemiş olması ile açıklanabilir.
- Tezde; “eğilme dayanım değeri” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişkinin literatüre ile karşılaştırılması aracılığıyla (Bkz. Şekil 4.60) şu sonuçlara ulaşılmıştır;
- Sorgulanan ilişki kapsamında; “Şekil 4.60, b”de görüldüğü gibi literatürde normal agregalar ile üretilen betonlar için, çok sayıda sayısal ilişki önerildiği belirlenmiştir [9; 91, 98, 146]. Şekilde sunulan tüm eşitlikler; farklı dayanım sınıflarına sahip olan normal betonlar ile ilgilidir.
- Ancak; hafif agregalı betonlar ile ilgili veriler yetersizdir. Literatürden edinilen veriler “Şekil 4.60,a”da ilişkilendirilerek sunulmaya çalışılmıştır [4, 5, 8, 21, 22, 38, 94].



Şekil 4.59. Eğilme dayanım değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki



Şekil 4.60. Eğilme dayanım değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- Şekilde sunulan; Eş. 4.71; yapay hafif agregalar ile üretilen yüksek dayanımlı tyhb'lar, Eş.4.72; yapay hafif agregalar ile üretilen yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar; Eş. 4.73-4.74; skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlar ile ilişkilidir.
- Aynı basınç dayanımlarında, Tezdeki tyhb'lardan; yapay hafif agregalar ile üretilen yüksek dayanımlı tyhb'ların ve yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonların eğilme dayanımlarından daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Bu durum; yapay hafif agreganın yüzeyinin skoriadan daha az pürüzlü olması, bu doğrultuda fiziksel olarak mekanik kilitlenme ve kohesif kuvvetlerin daha az olması sonucunda oluştuğu, ayrıca sınıyan beton yaşının düşük olması ile açıklanabilir.
- Ancak; daha düşük dayanım sınıfında olan, düşük yoğunluktaki ponzal taşıyıcı hafif betonlarda; Tezdeki tyhb'lar ile aynı eğilme dayanımlarında, daha düşük basınç dayanım değeri belirlenmiştir. Yani, basınç dayanım değeri ile orandırıldığında; ponzal taşıyıcı hafif betonlarda, Tezdeki tyhb'lara göre; daha yüksek eğilme dayanımlarına ulaşılmıştır (Eş.4.74). Bu durum; ponzanın, çimento hamuru ile

kimyasal reaksiyonunun Tezde kullanılan skoriadan daha yüksek olması ile açıklanabilir.

- Öte yandan yine daha düşük dayanım sınıfında olan ve skoria ile üretilen taşıyıcı hafif betonlarda, Tezdeki tyhb'lar ile aynı basınç dayanım değerlerinde; Tezdeki eğilme dayanımlarından daha yüksek değerler belirlenmiştir. Bu sonuç, belirtilen örnekte kullanılan mineral katkıları veya skorianın Tezdeki skoriaya göre, çimento hamuru ile kimyasal etkileşiminin fazla olması, daha boşluklu yapısı ve fiziksel olarak mekanik kilitleme, kohesif kuvvetlerin artması ile açıklanabilir.
- “Şekil 4.60, b”de görüldüğü gibi; Tezdeki eğilme dayanımlarının, literatürde normal betonlar için önerilen değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum yukarıda sunulan benzer ifadeler ile açıklanabilir.

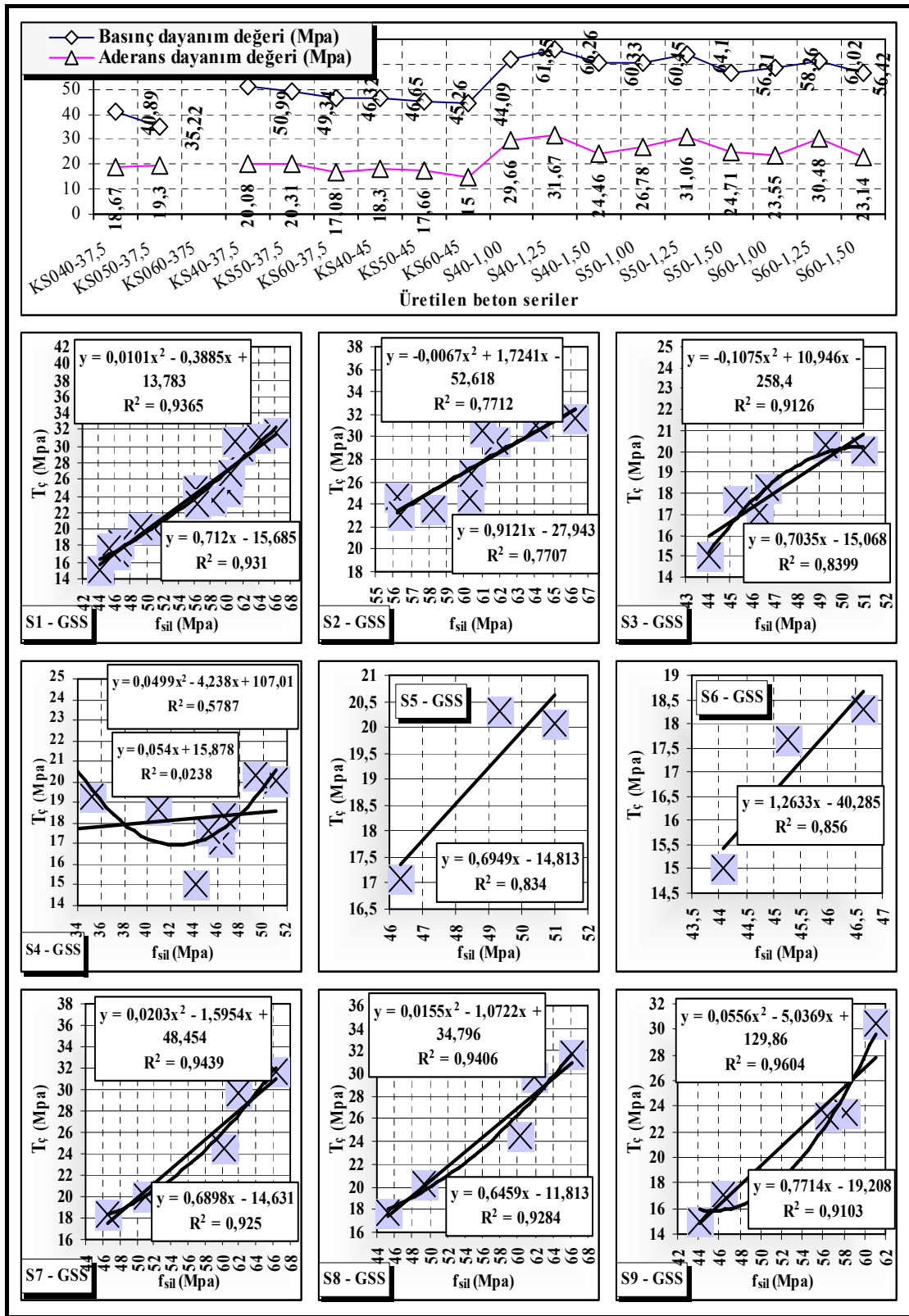
4.4.12. Aderans dayanım değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi

Sorgulanan ilişki ile ilgili olarak (Şekil 4.61) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

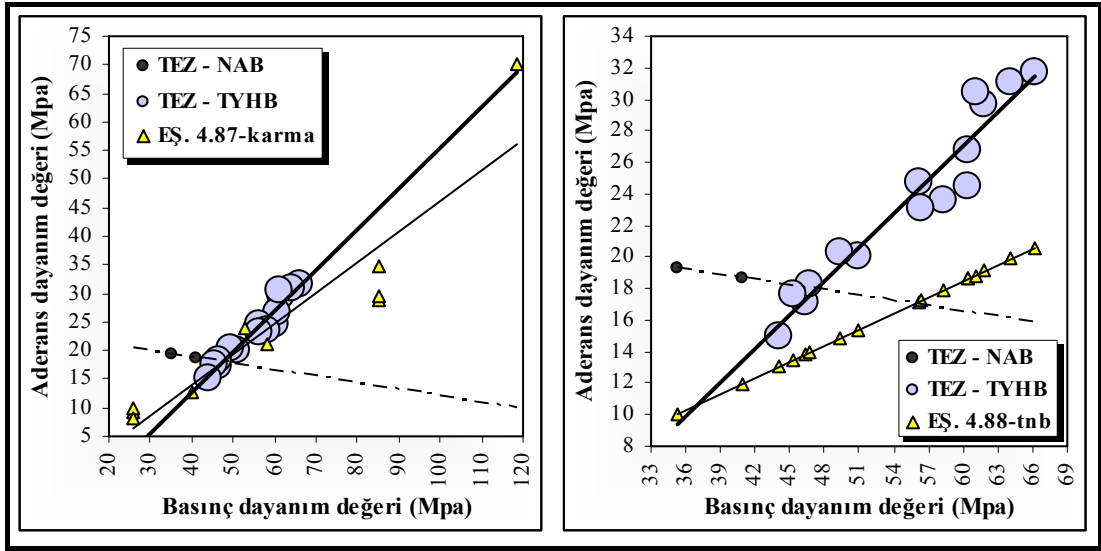
- Tüm serilerde; “s2” ve “s4” dışında, iyi ve yüksek düzeyde doğrusal ilişkiler belirlenmiştir. Aderans dayanımları ve basınç dayanımları birlikte artmıştır.
- Katkılı tyhb'ların sınıandığı “s2”de; belirtilen ilişki iyiye yakın seviyededir. Bu durum skorianın “aderans” değerlerini ve basınç dayanım değerini paralel şekilde etkilediğini gösterir.

Tezde; belirtilen ilişkinin literatüre göre olan konumunun sorgulanması (Bkz. Şekil 4.62) ile aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- Aderansı belirleyen parametrelerin çok fazla olması, ortak bir standardın geliştirilememiş olması gibi nedenlerden dolayı; literatürde betonun bu özelliği ile ilgili ortak bir dil oluşturulamamıştır. Ayrıca, bu ilişkiyi, normal agrega ile üretilen betonlarda sorgulayan ve sayısal ilişki öneren bir örnek (Eş.4.88) belirlenebilmiştir.
- Bu doğrultuda Tezde, farklı beton tiplerinden elde edilen veriler [103, 105, 106, 111] birleştirilerek, sayısal ilişki elde edilmeye çalışılmıştır (Eş.4.87).



Şekil 4.61. Aderans dayanım değeri ve basmaç dayanım değeri arasındaki ilişki



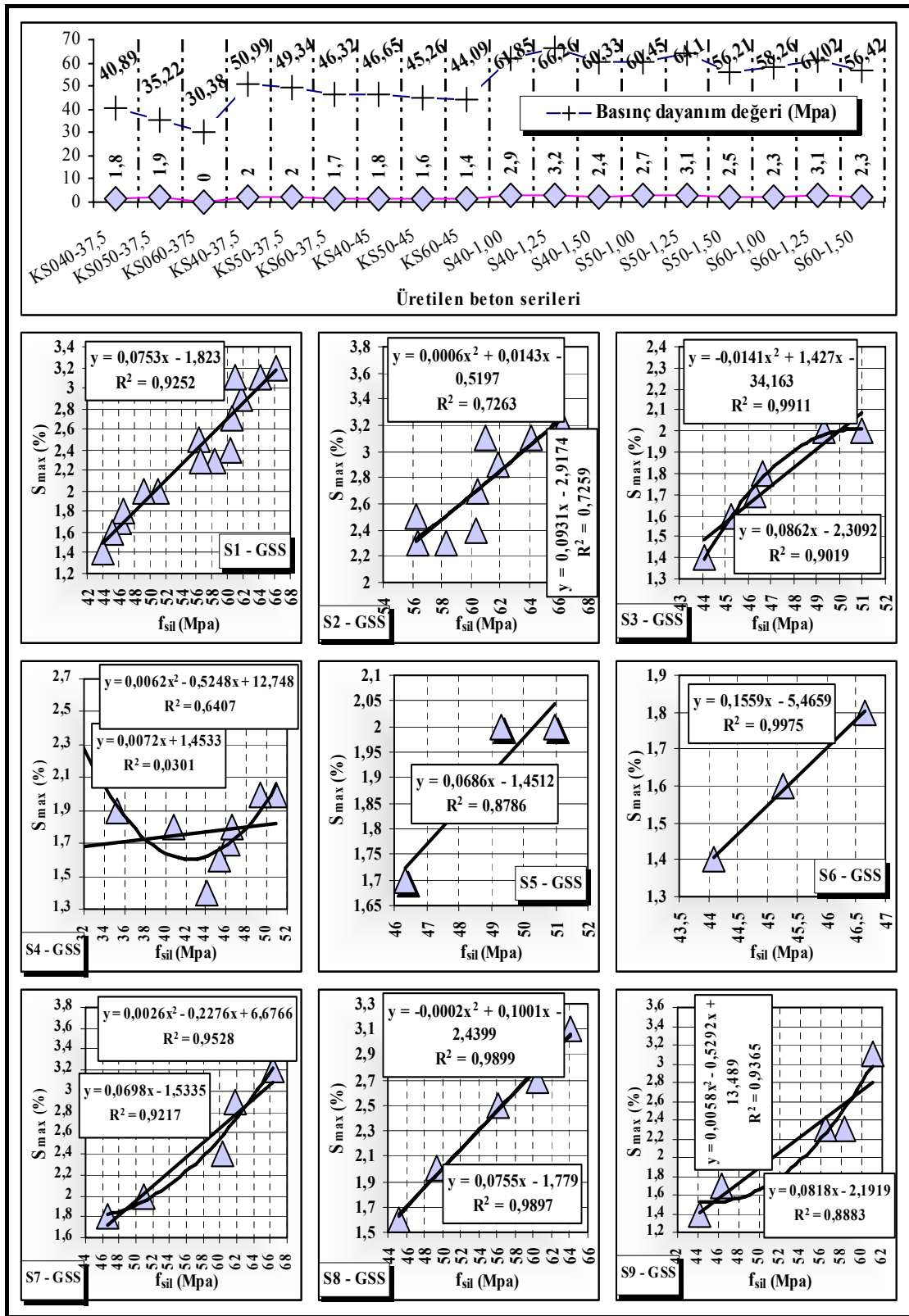
Şekil 4.62. Aderans dayanım değeri ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişkinin literatür ile karşılaştırılması

- Her iki örnekte de görüldüğü gibi genel olarak basınç dayanım değeri artınca “aderans” değerleri de doğru orantılı olarak artar. Bu veri, Tezin sonuçları ile uyum içerisindedir.
- Aynı basınç dayanım değerlerinde; Tezdeki tyhb’lardan elde edilen aderans değerleri, normal betonlar için önerilen sayısal değerlere göre daha yüksektir. Bu veri de Tezde elde edilen bulgular ile uyum içerisindedir.

4.4.13. Donatıda maksimum birim deformasyon değeri - basınç dayanım değeri ilişkisi

“Belirtilen ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.63) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır;

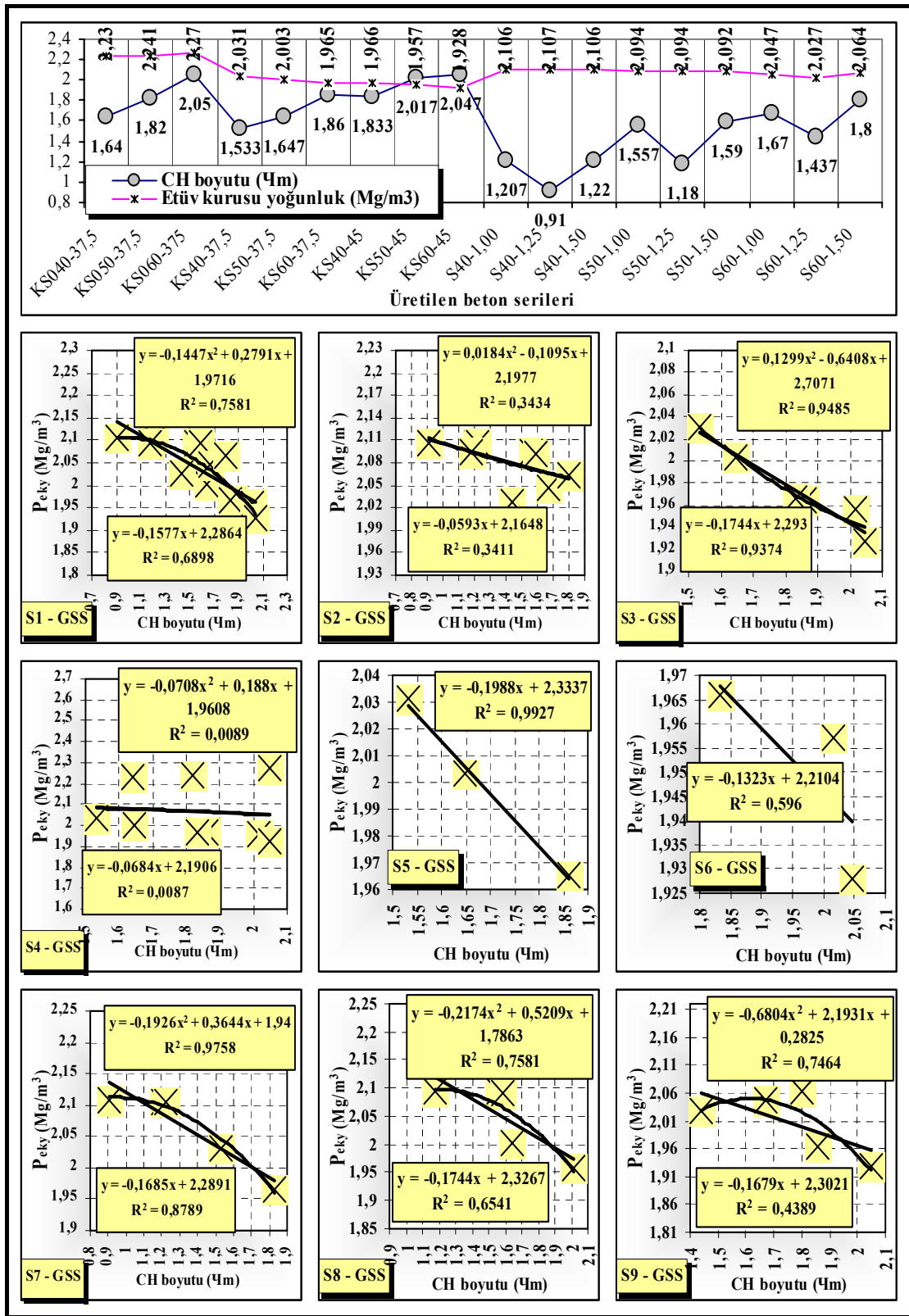
- Tezde, aderans değerleri belirlenirken, donatı akma sınırına ulaşmadığı için doğrusal davranış göstermiş, bu durum sorgulanan ilişkiye yansımıştır (Bkz. Şekil 2.12, s.32). Bu doğrultuda; “Aderans dayanım değeri” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişki için yapılan saptamalar, bu ilişki için de geçerlidir.
- Sorgulanan ilişki için, literatürde veriye rastlanılmamıştır. Bu nedenle, literatür sorgulaması da yapılamamıştır.



4.5. Ara Yüzey Bölgesinde CH boyutu - Etüv Kuru Yoğunluk ile İlişkisi ve Tartışma

“CH boyutu” ve “etüv kuru yoğunluk” arasındaki ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Şekil 4.64) aşağıda sunulan sonuçlara ulaşılmıştır.

- “S2”, “s4” ve “s5” grafikleri hariç; “orta”, “iyi” ve “yüksek” düzeyde, ters orantılı ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir. “CH boyutu” arttıkça, ara yüzey bölgesindeki boşluk oranının artması nedeniyle, “etüv kuru yoğunluk” değerlerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- “S1”de birçok üretim değişkenine rağmen, iyiye yakın düzeyde, “S3”te W/C oranının değişmesine rağmen yüksek düzeyde ilişki belirlenmiş olması; agrega tipinin ara yüzey bölgesinin ve kristal morfolojisinin belirlenmesinde çok etkili olduğunun bir göstergesidir.
- Bu sorgulamada “etüv kuru yoğunluk” ile betonun özelliklerinin sorgulandığı diğer sınamalara göre korelasyon katsayılarının düştüğü belirlenmiştir. Bu durum; betonun doğal heterojen yapısı ve TEM analizlerinin, sınırlılıkları ile açıklanabilir.
- Katkılı tyhb’ların sorgulandığı “s2”de; ilişki belirlenememiştir. Bu durum; kullanılan katkının, bileşen dağılımlarını ve çimentonun hidrasyon gelişimini farklı oranlarda etkileyerek, “CH boyutu”nun “etüv kuru yoğunluk” değerlerine göre farklılaşmasının sonucudur.
- “S4”te, ilişki olmaması; normal agrega ve skoria çevresinde, agregaların su emme değerlerinin farklı olması ve ara yüzey bölgelerinin W/C oranlarının değişmesi ile açıklanabilir. Normal agrega kullanılan betonlarda; ara yüzey bölgesinde, W/C yükseldikçe, “CH boyutu”nun arttığı, skorialarda ise agreganın daha yüksek su emme değerine sahip olması nedeniyle; “CH boyutu”nun küçüldüğü belirlenmiştir.
- “S3” ve “s5” serilerinde, yüksek oranda ilişki belirlenirken, “s6” serisinde bunun belirlenememiş olması; W/C oranındaki artışın, iri agrega çevresinde “kanama” oranını arttırması ve bunun sonucunda “CH boyutu”nda değişkenliğin artmış olması ile açıklanabilir.



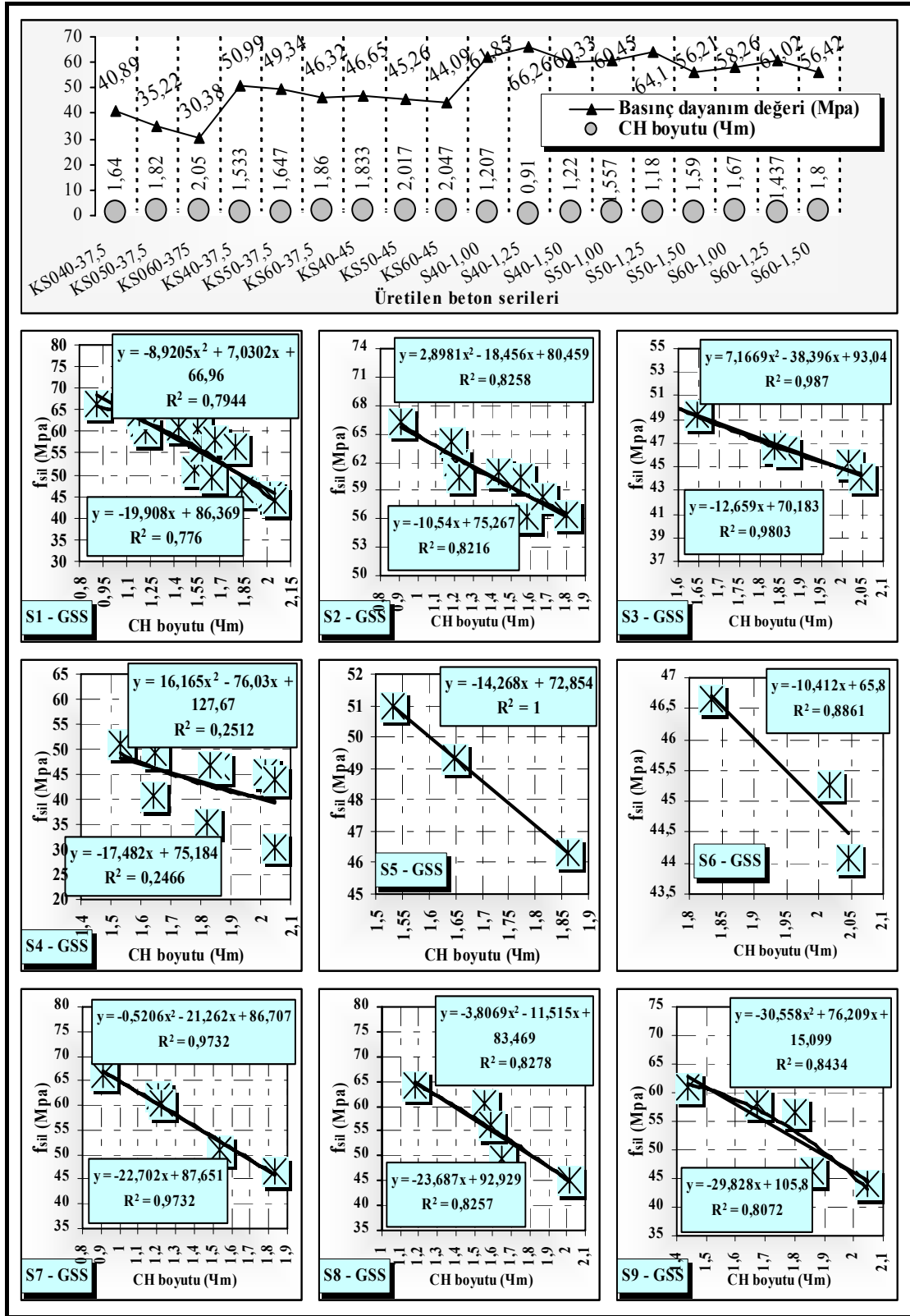
Şekil 4.64. CH boyutu ve etüv kuru yoğunluk arasındaki ilişki

- “S7, s8 ve s9” serilerinde; üretimde kullanılan skoria oranlarının artması ile birlikte; ilişki düzeylerinde düşüş belirlenmiştir. Bu durum da yukarıdaki gibi açıklanabilir. Muhtemelen, iri agrega oranının artması; “kanama” oranının artmasına, kanama oranının artması; heterojen yapının artmasına yol açmıştır.

4.6. Ara Yüzey Bölgesinde CH boyutu - Basınç Dayanım Değeri ile İlişkisi ve Tartışma

“CH boyutu” ve “basınç dayanım değeri” arasındaki ilişkinin “üretim değişkenleri”ne göre sorgulanması ile (Bkz. Şekil 4.65) elde edilen sonuçlar, aşağıya sunulduğu gibidir.

- Üretilen tyhb’ların tümünde “CH boyutu” ve “basınç dayanım değeri” arasında iyi ve yüksek düzeyde ters orantılı ilişkiler ve polinomal ilişkiler belirlenmiştir.
- “CH boyutu” azaldıkça, “basınç dayanımı” değerleri artmıştır.
- Daha önce belirtildiği gibi, ara yüzey bölgesindeki “CH boyutu”; betonun basınç dayanım değerini en çok etkileyen morfolojik parametrelerden biridir. CH boyutu arttıkça; kristalin amorf yapısı nedeniyle, ara yüzeydeki boşluk miktarı artar. Ayrıca, kristal, büyüdükçe; yüzey alanı azalır ve çimento hamuru ile agrega arasındaki kohesif kuvvetlerin de azalmasına yol açar. Sonuçta tüm bu mekanizmalar, “basınç dayanımı” değerlerinin düşmesine neden olur. Elde edilen sonuç, literatürde sunulan teorik bilgi ile uyumludur.
- Tezde, bu teorik bilgi sayısallaştırılmıştır.
- Kullanılan agreganın farklılaştığı “s4” te; hiçbir ilişki belirlenememiştir.
- Üretim değişkenleri azaldıkça; sorgulanan ilişkinin güvenilirliği artmıştır.
- “S6, s8 ve s9”da korelasyon katsayılarındaki azalma; bir önceki sorgulamada yapılan, “W/C oranı ve skoria oranındaki artışın, ara yüzey ve kristal morfolojisinde; heterojenliyi arttırdığı” tespitini desteklemektedir.
- Bu sonuçlar; normal agrega ve skoria kullanılarak üretilen betonlarda, kullanılan agreganın; ara yüzey bölgesindeki kristal morfolojisini, genelde bu bölgenin morfolojik yapılaşmasını ve bunun ile ilişkili olarak “basınç dayanımı” değerlerini önemli ölçüde farklı etkilediğinin açık bir göstergesidir.



Şekil 4.65. CH boyutu ve basınç dayanım değeri arasındaki ilişki

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı oranlarda iri agrega ve katkı oranları değiştirilerek, farklı tipte, taşıyıcı yarı hafif beton numuneleri üretilmiş olup, bu betonların “basınç dayanım değeri”, “etüv kurusu yoğunluk” ve “CH boyutu” arasındaki sayısal ilişkiler dikkate alınarak; “beton özellikleri ve ara yüzey bölgesinin kristal morfolojisi” arasındaki ilişkiler irdelenmiş olup, bu ilişkiler sayısal olarak da belirlenmiştir. Özellikle, “basınç dayanım değeri” ile ilgili sayısal verilerin güvenilirlik düzeylerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 5.1 ‘de de ifade edildiği gibi; normal betonlar ile aynı karışım oranlarında üretilen katkısız, yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlarda, normal betonlara göre ortalama olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Taze beton yoğunluk değerinde; % 9,33; etüv kurusu yoğunluk değerinde; % 10,97, ısı iletkenlik değerlerinde; % 39,69 ve CH boyutunda; % 8,43 azalma,
- Basınç dayanımı değerinde; % 39,09, eğilme dayanım değerinde; % 18,23, aderans dayanım değerinde; % 6,39, maksimum birim deformasyon değerinde; % 25,89 ve donatıda oluşan maksimum birim deformasyon değerinde; % 8,19 artış, sağlanarak bu özellikler kapsamında daha yüksek performans elde edilmiştir

Ancak, bu betonlarda, normal betonlara göre, azalan yoğunluk ile ilişkili olarak;

- Su emme oranında; % 24,74 ve porozite oranında; % 12,00 artış,
 - Çökme miktarında; % 39,83, ultrases geçiş hızında; % 1,17, schmidt sertlik değerinde; % 5,92 ve elastiklik modülü değerinde; % 6,03 azalma
- saptanarak, yukarıda sıralanan özellikler kapsamında; performans düşüklüğü belirlenmiştir

Öte yandan; katkılı, yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlarda; kullanılan katkının yüksek su indirgeme kabiliyeti ve skorianın olumlu özelliklerinin bir arada, beton özelliklerine olumlu yansması ile normal betonlara göre ortalama olarak;

- Taze beton yoğunluğunda; % 6,83, etüv kurusu yoğunlukta; % 7,20, su emme oranında; % 8,94, porozite oranında; % 15,87, ısı iletkenlik değerinde; % 31,04 ve CH boyutunda; % 24,38 azalma,
- Çökme miktarında; % 137, 95, ultrases geçiş hızlarında; % 3,86, schmidt sertlik değerinde; % 12,33, basınç dayanım değerinde; % 72,49, elastiklik modülü değerinde; % 2,49, maksimum birim deformasyon değerinde; % 38,10, eğilme dayanım değerinde; % 50,67, aderans dayanım değerinde; % 47,87 ve donatıda maksimum birim deformasyon değerinde; % 51,51 artış sağlanarak, incelenen tüm özellikler açısından yüksek performans elde edilmiştir

Yukarıda sunulan sayısal veriler doğrultusunda;

- Yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonların; genelde davranışsal açıdan, yüksek dayanımlı taşıyıcı normal betonların ve yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonların arasında yer aldığı ve her iki beton tipinin olumlu özelliklerinin (hafiflik ve dayanım) üretilen yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlarda birleştiği,
- Üretiminde büyük enerji gerektiren yapay hafif agregalar veya düşük dayanıma ve bağlantılı boşluklara sahip olan ponza yerine doğal bir agrega olan skoria kullanılarak ve mineral katkı kullanılmadan, normal betonlara göre hafifletilmiş yüksek dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlar üretilebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Bundan sonra yapılacak olan araştırmalarda, bu tezde üretilen taşıyıcı yarı hafif betonlar; yapı elemanı üretim eyleminde; “amaç ve sınırlılıklar”, “optimizasyon”, “diğer katkı maddeleri”, “hazır beton”, “normal dayanım”, “ara yüzey bölgesi genişliği”, bu bölgedeki “CH yönlenmesi”, “ortalama CH boyutu”, “mikrostrüktürel boşluk oranı”, “kılcal çatlak oranı” gibi kavramlar aracılığıyla sorgulanmalıdır. Ayrıca, tüm bu sorgulamalar; “çimento hamuru ve ara yüzey bölgesi arasındaki farklılıklar”, “ara yüzeydeki bölgesel farklılaşmalar” ve “süreç” gözetilerek de yapılmalıdır.

Çizelge 5. 1. Tezde elde edilen deney, analiz sonuçları ve kontrol betonlarına göre belirlenen oransal farklar

			BETONUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ								
N O	ÜRETİLEN SERİLER	A/Ç (hacimce oranı)	Taze beton yoğ. (P_{tby}) (Mg/m ³)	Taze beton kıvamı (C_m) (cm)	Etüv kurusu yoğ. (P_{eky}) (Mg/m ³)	Su emme oranı (W_{seo}) (%)	Poro- zite oranı (g) (%)	Birim hacim ağ. (P_{bha}) (Mg/m ³)	Isı ilet- kenlik değeri (λ) (W/mK)	Ultra- ses hızı (V_u) (km/sn)	Sch- midt sertliği (r) (vur.S.)
%37,7 W/C ORANINDA, KATKISIZ - NORMAL KONTROL BETONLARI											
1.	KS040-37,5	1,628	2,35	3,0	2,23	7,10	15,63	2,20	1,55	4,51	34,10
2.	KS050-37,5	2,035	2,35	5,0	2,24	7,03	15,49	2,20	1,62	4,57	34,46
3.	KS060-37,5	2,442	2,37	6,5	2,27	6,71	15,05	2,24	1,72	4,57	36,52
NORMAL KONTROL BETONLARI İLE AYNI KARİŞİM ORANLARINDA ÜRETİLEN %37,7 W/C ORANINDA, KATKISIZ - YÜKSEK DAYANIMLI TAŞIYICI YARI HAFİF BETONLAR											
4	KS40 - 37,5	1,628	2,17	2,0	2,03	8,50	17,25	2,01	1,09	4,53	33,31
	FARK (%)	0	- 7,66	- 33,33	- 8,97	+19,72	+10,36	-8,64	-29,68	+0,44	-2,32
5.	KS50 - 37,5	2,035	2,14	3,0	2,00	8,65	17,28	1,98	0,95	4,51	32,79
	FARK (%)	0	- 8,94	- 40	- 10,71	+23,04	+11,56	-10,00	-41,36	-1,31	-4,85
6.	KS60 - 37,5	2,442	2,10	3,5	1,97	8,70	17,17	1,96	0,88	4,45	32,65
	FARK (%)	0	- 11,39	- 46,15	- 13,22	+29,66	+14,08	-12,5	-48,84	-2,63	-10,60
ORTALAMALAR		0	-9,33	-39,83	-10,97	+24,14	+12,00	-10,38	-39,96	-1,17	-5,92
% 45 W/C ORANINDA, KATKISIZ - YÜKSEK DAYANIMLI TAŞIYICI YARI HAFİF BETONLAR											
7.	KS40 - 45	1,534	2,15	9,0	1,97	9,70	19,04	1,94	0,88	4,42	32,13
	FARK (%)	- 5,77	- 8,51	+ 200	- 11,66	+36,62	+21,82	-11,82	-43,23	-2,00	-5,78
8.	KS50 - 45	1,918	2,15	10,0	1,96	9,74	19,08	1,94	0,84	4,40	31,58
	FARK (%)	- 5,75	- 8,51	+ 100	- 12,5	+38,55	+23,18	-11,82	-48,15	-3,72	-8,36
9.	KS60 - 45	2,302	2,07	11,0	1,93	10,39	19,72	1,90	0,81	4,39	31,04
	FARK (%)	- 5,73	-12,66	+ 69,23	-14,98	+54,84	+31,03	-15,18	-52,91	-3,94	-15,01
ORTALAMALAR		-5,75	-9,89	+123,08	-13,05	+43,34	+25,34	-12,94	-48,10	-3,22	-9,72
% 30 W/C ORANINDA, KATKILI - YÜKSEK DAYANIMLI TAŞIYICI YARI HAFİF BETONLAR											
10.	S40 - 1	1,722	2,24	2,5	2,13	5,86	11,81	2,08	1,16	4,77	40,67
	FARK (%)	+ 5,77	- 4,68	- 16,67	- 4,48	-17,46	-24,44	-5,45	-25,16	+5,76	+19,27
11.	S40 - 1,25	1,722	2,22	4,0	2,11	5,84	12,16	2,08	1,18	4,79	41,75
	FARK (%)	+ 5,77	- 5,53	+ 33,33	- 5,38	-17,75	-22,20	-5,45	-23,87	+6,21	+22,43
12.	S40 - 1,50	1,722	2,19	16,0	2,11	6,09	12,58	2,07	1,15	4,70	40,25
	FARK (%)	+ 5,77	- 6,81	+433,33	- 5,38	-14,23	-19,51	-5,91	-25,81	+4,21	+18,04
13.	S50 - 1	2,152	2,25	4,0	2,10	6,43	13,24	2,06	1,15	4,71	39,99
	FARK (%)	+ 5,75	- 4,26	- 20	- 6,25	-8,53	-14,53	-6,36	-29,01	+3,06	+16,05
14.	S50 - 1,25	2,152	2,20	14,5	2,10	5,94	12,37	2,07	1,17	4,76	40,54
	FARK (%)	+ 5,75	- 6,38	+ 190	- 6,25	-15,51	-20,14	-5,91	-27,78	+4,16	+17,64
15.	S50 - 1,50	2,152	2,19	18,0	2,09	6,57	13,58	2,06	1,13	4,70	39,10
	FARK (%)	+ 5,75	- 6,81	+ 260	- 6,70	-6,54	-12,33	-6,36	-30,25	+2,84	+13,46
16.	S60 - 1	2,582	2,17	5,0	2,05	6,76	13,69	2,02	1,00	4,70	36,08
	FARK (%)	+ 5,73	- 8,44	- 23,08	- 10,57	+0,75	-9,04	-9,82	-41,86	+2,84	-1,20
17.	S60 - 1,25	2,582	2,15	18,0	2,03	6,56	13,19	2,00	1,15	4,71	37,58
	FARK (%)	+ 5,73	- 9,28	+176,92	- 10, 57	-2,24	-12,36	-10,71	-33,14	+3,06	+2,90
18.	S60 - 1,50	2,582	2,15	20,0	2,06	6,78	13,80	2,03	0,99	4,69	37,38
	FARK (%)	+ 5,73	-9,28	+207,69	- 9,25	+1,04	-8,31	-9,38	-42,44	+2,63	+2,35
ORTALAMALAR		+5,75	-6,83	+137,95	-7,20	-8,94	-15,87	-7,26	-31,04	+3,86	+12,33

Çizelge 5. 1. (Devam) Tezde elde edilen deney, analiz sonuçları ve kontrol betonlarına göre belirlenen oransal farklar

		BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ						ARA YÜZEY
N O	ÜRETİLEN SERİLER	Basınç dayanım değeri (f _{sil}) Mpa	Elastiklik Modülü değeri E (Gpa)	Maksimum birim deformasyon ε ₀ (x10 ⁻³ m/mm)	Eğilme dayanım değeri (f _e) Mpa	Aderans dayanım değeri (T _e) Mpa	Donatıda maksimum birim def. S _{max} (%)	CH boyutu (ϕm)
%37,7 W/C ORANINDA, KATKISIZ - NORMAL KONTROL BETONLARI								
1.	KS040-37,5	40,89	32,85	2,21	6,61	18,67	1,80	1,640
2.	KS050-37,5	35,22	29,69	2,02	5,32	19,30	1,90	1,820
3.	KS060-37,5	30,38	28,92	2,00	4,86	-	-	2,050
NORMAL KONTROL BETONLARI İLE AYNI KARIŞIM ORANLARINDA ÜRETİLEN %37,7 W/C ORANINDA, KATKISIZ – YÜKSEK DAYANIMLI TAŞIYICI YARI HAFİF BETONLAR								
4	KS40 – 37,5	50,99	29,60	2,53	7,11	20,08	2,00	1,533
	FARK (%)	+24,70	-9,89	+14,48	+7,56	+7,55	+11,11	-6,52
5.	KS50 – 37,5	49,34	28,31	2,62	6,59	20,31	2,00	1,647
	FARK (%)	+40,09	-4,65	+29,70	+23,87	+5,23	+5,26	-9,51
6.	KS60 – 37,5	46,32	27,89	2,67	5,99	17,08	1,70	1,860
	FARK (%)	+52,47	-3,56	+33,50	+23,25	-	-	-9,27
ORTALAMALAR		+39,09	-6,03	+25,89	+18,23	+6,39	+8,19	-8,43
% 45 W/C ORANINDA, KATKISIZ – YÜKSEK DAYANIMLI TAŞIYICI YARI HAFİF BETONLAR								
7.	KS40 – 45	46,65	26,94	2,44	6,54	18,30	1,80	1,833
	FARK (%)	+14,09	-17,99	+10,41	-1,06	-1,98	0	+11,77
8.	KS50 – 45	45,26	26,62	2,50	6,28	17,66	1,60	2,017
	FARK (%)	+28,51	-10,34	+23,76	+18,05	-8,50	-15,79	+10,82
9.	KS60 – 45	44,09	25,57	2,51	5,94	15,00	1,40	2,047
	FARK (%)	+45,13	-11,58	+25,50	+22,22	-	-	-0,15
ORTALAMALAR		+29,24	-13,30	+19,89	+13,07	-5,24	- 7,90	+7,48
% 30 W/C ORANINDA, KATKILI - YÜKSEK DAYANIMLI TAŞIYICI YARI HAFİF BETONLAR								
10.	S40 – 1	61,85	32,65	2,80	7,87	29,66	2,90	1,207
	FARK (%)	+51,26	-0,61	+26,70	+19,06	+58,86	+61,11	-26,40
11.	S40 –1,25	66,26	34,95	2,84	8,24	31,67	3,2	0,910
	FARK (%)	+62,04	+6,39	+28,51	+24,66	+69,63	+77,78	-44,51
12.	S40 – 1,50	60,33	29,54	2,73	8,13	24,46	2,40	1,220
	FARK (%)	+47,54	-10,08	+23,53	+22,07	+31,01	+33,33	-25,61
13.	S50 – 1	60,45	32,46	2,89	8,42	26,78	2,70	1,557
	FARK (%)	+71,64	+9,33	+43,07	+58,27	+38,76	+42,11	-14,45
14.	S50 – 1,25	64,10	33,34	2,91	9,17	31,06	3,10	1,180
	FARK (%)	+82,00	+12,29	+44,06	+72,37	+60,93	+63,16	-35,16
15.	S50 – 1,50	56,21	27,63	2,82	8,46	24,71	2,50	1,590
	FARK (%)	+59,60	-6,94	+39,60	+59,02	+28,03	+31,58	-12,64
16.	S60 – 1	58,26	31,37	2,93	7,95	23,55	2,30	1,670
	FARK (%)	+91,77	+8,30	+46,50	+63,58	-	-	-18,54
17.	S60 –1,25	61,02	32,28	2,95	8,55	30,48	3,10	1,437
	FARK (%)	+100,86	+11,62	+47,50	+75,93	-	-	-29,90
18.	S60 – 1,50	56,42	26,63	2,87	7,83	23,14	2,30	1,800
	FARK (%)	+85,71	-7,92	+43,50	+61,11	-	-	-12,20
ORTALAMALAR		+72,49	+2,49	+38,10	+50,67	+47,87	51,51	-24,38

KAYNAKLAR

1. Esin, T., Onat, M., “Ekolojik yapı malzeme kriterlerinin ülkemiz koşulları açısından irdelenmesi”, *Yapı Malzemesinin Geleceği - Yapı Malzemesi Kurultayı 2003*, İstanbul, 1-2 (2003)
2. Başıyigit, C., Yücel, K. T., Özel, C., “Yapılarda ısınma amaçlı enerji tüketimi ve hava kirliliği konusunda alınabilecek önlemler”, *S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (3): 108-114 (2003).
3. Koçu, N., Dereli, M., “Geleceğin çağdaş yapı malzemesi “hafif agregalı doğal volkanik tüfler” ve değerlendirilmesi”, *Yapı Malzemesinin Geleceği - Yapı Malzemesi Kurultayı 2003*, İstanbul, 3 (2003).
4. Kılıç, A., Atiş, D.C., Yaşar, E., Özcan, F., “High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures”, *Cement and Concrete Research*, (2363): 1-5 (2003).
5. Yaşar, E., Atis, C.D., Kılıç, A., Gülsen, H., “Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash”, *Materials Letters*, 57: 2267-2270 (2003).
6. Topçu, İ.B., “Semi lightweight concretes produced by volcanic slags”, *Cement and Concrete Research*, 27(1): 15-21 (1997).
7. Chia, K.S., Zhang, M.H., “Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete”, *Cement and Concrete Research*, 32: 639-645 (2002).
8. Gündüz, L., Uğur, İ., “The effects of different fine and coarse pumice aggregate / cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures”, *Cement and Concrete Research*, 35: 1859-1864 (2005).
9. Mehta P.K., Monteiro P.J.M., “Concrete, Microstructure, Properties and Materials”, *Prentice Hall*, New Jersey, 19, 30, 32, 36, 118, 119 (1993).
10. Monteiro, P.J.M., “The Structure and Properties of Civil Engineering Materials”, Department of Civil and Environmental Engineering, *University of California*, Berkeley, 2-4 (2003).
11. T.C. Devlet Planlama Teşkilatı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu “Yapı malzemeleri III (pomza-perlit-vermikülit-flogopit-genleşen killer)”, *DPT Madencilik ÖİK*, DPT: 2617 - ÖİK: 628, Ankara, 2 (2001).
12. Ürün, Ü., “İzmir-Menderes yöresi pomza endüstriyel hammaddelerinin teknolojik özellikleri ve tüketim alanlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 7 (2004).

13. EuroLightCon, "Economic design and construction with light weight aggregate concrete", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R1, Gouda*, 16, 21, 25, 29, 30 (1998).
14. ACI Committee E-701, "Aggregates for concrete", *ACI, Education Bulletin E1-99, Michigan*, 3, 23 (1999).
15. Sveindottir, E.L, etc., "LWAC material properties, state-of-the-art", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R2, Gouda*, 14-18, 20, 22, 23, 25,26 (1998).
16. Holm, T.A., Bremner, T.W, "State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments", *ERDC/SL TR-00-3 (TR INP-00-2), Washington*, 12, 13, 16-18, 22, 24, 26, 30, 31, 37, 41, 43, 50, 52 (2000).
17. Dehn, F., Santowski, A., "Size effects in high-performance lightweight aggregate concrete", *University of Leipzig, LACER No.5, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 103-114 (2000).
18. Ma, J., Dietz, J., "Ultra high performance self compacting concrete", *University of Leipzig, LACER No.7, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 33-42 (2002).
19. Türk Standartları Enstitüsü, "TS EN 206-1, Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk", *TSE*, Ankara, 1-61 (2002).
20. Faust, T., "Supplements to MC-90 for lightweight aggregate concrete", *University of Leipzig, LACER No. 5, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 75-84 (2000).
21. Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Grimm, R., König, G., "Role of aggregate fraction in the fracture of semi-lightweight high strength concrete", *Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete*, Leipzig, 1453-1466 (2002).
22. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., "Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı", *itüdergisi*, 1 (2): 125-144 (2002).
23. Hossain, K.M.A., "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete", *Cement and Concrete Research*, 34: 283-291 (2004).
24. Taşdemir, M.A., "Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 41 (1982).

25. Nemati, K.M. ; Monteiro, P.J.M.; Scrivener, K.L., “Analysis of compressive stress-induced cracks in concrete,” *American Concrete Institute Materials Journal*, 95 (5): 617-631 (1998).
26. Basheer, L.; Basheer, P.A.M.; Long, A.E., “Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary portland cement concrete”, *Construction and Building Materials*, 19: 682-690 (2005).
27. Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M., “Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach”, *Cement and Concrete Research*, 35: 1195-1203 (2005).
28. Lo, T.Y., Cui, H.Z., “Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete”, *Materials Letters*, 58: 916-919 (2004).
29. Pokkuluri, K., “Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of portland cement concrete in the low microwave frequency range”, Master’s Thesis, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburg, Virginia., 5, 7 (1998).
30. Diamond, S., Huang, J., “The ITZ in concrete – a different view based on image analysis and SEM observations”, *Cement & Concrete Composites*, 23: 179-188 (2001).
31. Fernández, R.D.H., Alonso, J.M., Abella, F.M., Barrios, M.H., “Ageing of concrete in dams”, *ICOLD European Club, Switzerland*, 7 (2004).
32. FHWA, “Guidelines for detection, analysis, and treatment of materials-related distress in concrete pavements”, *Federal Highway Administration, FHWA Contract DTFH61-96-C-00073, McLean*, 155, 156 (2002).
33. Jiang, L., “The interfacial zone and bond strength between aggregates and cement pastes incorporating high volumes of fly ash”, *Cement & Concrete Composites*, 21: 313-316 (1999).
34. Diamond, S., “The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer”, *Cement & Concrete Composites*, 26: 919-933 (2004).
35. T.C. Başbakanlık Güneydoğu Anadolu Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı, “GAP Bölge kalkınma planı ana rapor, Cilt - 2”, *T.C. Başbakanlık GAP Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı*, Ankara, 59 (2002).
36. Erdoğan, B., Yavuz, A.B., “Güneydoğu anadolu’nun miyosen paleocoğrafyası ile mermer yataklarının ilişkisi”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2: 53-64 (2002).

37. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, “Deprem bölgeleri haritası”, *Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi*, Ankara, 2 (1996).
38. EuroLightCon, “Properties of LWAC made with natural lightweight aggregates”, *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R17, ISBN 90 376 0138 3, Gouda*, 8-35 (2000).
39. M.R. Moufti, M.R., Sabtan, A.A., El-Mahdy, O.R., Shehata, W.M., “Assessment of the industrial utilization of scoria materials in central Harrat Rahat, Saudi Arabia”, *Engineering Geology*, 57: 155-162 (2000).
40. Al-Khaiat, H., Haque, M.N., “Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete”, *Cement and Concrete Research*, 28(6): 859-866 (1998).
41. Nolan, E., Bamforth, P., “Properties of lightweight concretes containing lytag and liapor”, *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R8, ISBN 90 376 0488 9, Gouda*, 6-22 (2000).
42. Gao, J.M., Qian, C.X., Liu, H.F., Wang, B., Li, L., “ITZ microstructure of concrete containing GGBS”, *Cement and Concrete Research*, 35: 1299-1304 (2005).
43. Çankıran, O., “Pomza agregali hafif betonun mekanik özellikleri ve kimyasal katkılarla dayanımının artırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 81 (1998).
44. Trouw, R., “Technical and economic mixture optimisation of high strength lightweight aggregate concrete”, *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R9, ISBN 90 376 0498 6, Gouda*, 10-59 (2000).
45. Haque, M.N., Al-Khaiat, H., Kayali, O., “Strength and durability of lightweight concrete”, *Cement & Concrete Composites*, 26: 307-314 (2004).
46. Özturan, T., Çeçen, C., “Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths”, *Cement and Concrete Research*, 27 (2): 165-170 (1997).
47. Tunç, T., “Taş ununun betonun bazı teknik özelliklerine etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16 (1999).
48. Nolan, E., “Methods for testing fresh lightweight aggregate concrete”, *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R4, ISBN 90 376 0271 1, Gouda*, 10-41 (1999).

49. Peters, M.L., “Grading and composition of the aggregate”, *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R7, ISBN 90 376 0414 5, Gouda*, 11-38 (2000).
50. Sahu, S.; Badger, S.; Thaulow, N.; Lee, R.J., “Determination of water – cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy”, *Cement & Concrete Composites*, 26: 987-992 (2004).
51. Aydın, S., “Yüksek sıcaklığa dayanıklı harç geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 19, 28, 140 (2004).
52. Shoaib, M.M., Ahmed, S.A., Balaha, M.M., “Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars”, *Cement and Concrete Research*, 31: 1533-1538 (2001).
53. American Concrete Institute “Guidelines for authorities and responsibilities in concrete design and construction”, *Concrete International*, 33-39 (2005).
54. Demirboğa, R., Gül, R., “The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete”, *Cement and Concrete Research*, 33: 723-727 (2003).
55. Khan, M.I., “Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models”, *Building and Environment*, 37: 607-614 (2002).
56. Demirboga, R., Gul, R., “Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures “, *Energy and Buildings*, 35: 1155-1159, (2003).
57. Babu, K.G., Babu, S.B., “Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, 26: 605-611 (2004).
58. Taşdemir, C., “Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri”, *TMH*, (427): 57-61 (2003).
59. CNS Farnell , “Concrete testing”, technical support raport”, *CNS Farnell, Word Class Ultrasonic Test Equipment, London*, 1-3 (2004).
60. Köseoğlu, O. E., Agreganın en büyük tane çapı ve karot numunesi boyutunun ölçülen beton basınç dayanımına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 35,36, 70, 104, 111 (2003).

61. Çopuroğlu, O., “Beton numunesi şekil ve boyutunun basınç ve çekme dayanımına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 36, 37, 53, 54, 84 (2001).
62. Ünal, O., Uygunoğlu, T., Çoşkun, U., “Agrega granülometrisinin yüksek performanslı beton özelliklerine etkisi”, *YTED, ISSN:1305-631X*, (2005/2): 13-20 (2005).
63. Prassianakis I.N., Prassianakis, N.I., “Ultrasonic testing of non-metallic materials: concrete and marble”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 42: 191-198 (2004).
64. Uygunoğlu, T., Ünal, O., “Erken yaşlardaki beton üzerinde buzun etkisi”, *YTED, ISSN:1305-631X*, (2005/1): 37-44 (2005).
65. Arda, A., “Hafif betonlarda agrega konsantrasyonunun mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 13 (1994).
66. Voigt, T., Akaya, Y., Shah, S.P., “Nondestructive testing of concrete using ultrasound”, *University of Leipzig, LACER No. 6, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 349-361 (2001).
67. Hamamcı, R.B., “A study on the properties of perlite aggregate lightweightconcrete as a composite materiel”, Doctoral thesis, Boğaziçi University, 17, 43 (1998).
68. Öztürk, C., “Beton dayanımının belirlenmesinde klasik yöntem ile ultrasonik yöntemin karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, s.2, 5-8, 21, 29, 34-38 (1994).
69. Demir, N., “Normal ve yüksek dayanımlı betonların ultrases geçim hızı - dayanım ilişkisi üzerine bir araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 24 (2000).
70. International Atomic Energy Agency, Guidebook on non-destructive testing of concrete structures”, *IAEA, IAEA-TCS-17, ISSN 1018-5518, Vienna*, 15, 63-66 (2002).
71. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 3260, Beton Yüzey Sertliği Yolu ile Yaklaşık Beton Dayanımının Tayini Kuralı”, *TSE*, Ankara, 1-7 (1978).
72. Akpınar, Ş.A., “Degisik kaynaklı agregaların beton kalitesi üzerindeki etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 20-21 (2002).

73. Eren, Ö., Yılmaz, Z., “Değişik sıcaklıklarda kür edilen salt portland Çimentolu, yüksek fırın cürufu veya uçucu kül katkılı betonlarda dayanım gelişimi”, **İMO Teknik Dergi**, (222): 3311-3322 (2004).
74. Holm, T.A., “Lightweight concrete and aggregates”, Tests and Properties of Concrete, 1st ed., **ASTM, 169C**, Philadelphia, 522-532 (2001)
75. Aulia, T.B., Deutschmann, K., “Effect of mechanical properties of aggregate on the ductility of high performance concrete”, **University of Leipzig, LACER No. 4, ISSN 1432-6590, Leipzig**, 142-145 (1999).
76. Wille, K., Dehn, F., “Fracture mechanics of different lightweight concretes (LWC)”, **University of Leipzig, LACER No.8, ISSN 1432-6590, Leipzig**, 81-95 (2003).
77. Sari, D., Pasamehmetoglu, A.G., “The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete”, **Cement and Concrete Research**, 35: 936-942 (2005).
78. Türkel, S., Felekoğlu, B., “Aşırı dozda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerine etkileri”, **DEÜ Müh. Fak. Fen ve Müh. Dergisi**, 6 (1): 77-89 (2004).
79. EuroLightCon, “Durability of LWAC made with natural lightweight aggregates”, **European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R18, ISBN 90 376 0148 0, Gouda**, 7-25 (2000).
80. Takács, P.F., “Deformations in concrete cantilever bridges: observations and theoretical modelling”, Doctoral Thesis, **The Norwegian University of Science and Technology**, Trondheim, 20 (2002).
81. Wu, K.R., Chen, B., Yao, W., Zhang, D., “Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete”, **Cement and Concrete Research**, 31: 1424 (2001)..
82. Attard M.M., Setunge, S., “Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete”, **ACI Materials Journal**, 93(5): 432-442 (1996)
83. Gutierrez, P.A., Canovas, M.F., "The Modulus of Elasticity of High Performance Concrete", **Materials and Structures, RILEM**, 28(184): 559-568 (1995).
84. Chi, J.M., Huang, R., Yang, C.C., Chang J. J., “Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete”, **Cement & Concrete Composites**, 25: 197-205 (2003).

85. Li, G., Zhao, Y., Pang, S.S., Li, Y., "Effective Young's modulus estimation of concrete", *Cement and Concrete Research*, 29: 147 (1999).
86. Stemland, H., Thorenfeldt, E., Hynne, T., "Composite models for short- and long-term strength and deformation properties of LWAC", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R35, ISBN 90 376 02 88 6, Gouda*, 9-34 (2000).
87. Mijnsbergen, J.P.G., "Comparing high strength LWAC and HSC with the aid of a computer model", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R38, ISBN 90 376 03 18 1, Gouda*, 15-33 (2000).
88. Nemati, K.M.; Monteiro, P.J.M., Cook, N.G.W., "A new method for studying stress – induced microcracks in concrete", *American Society of Civil Engineers, Journal of Materials in Civil Engineering*, 10 (3): 132, 133 (1998).
89. Milenkovic, A., Pluis, M., "Fatigue of normal weight concrete and lightweight concrete", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R34, ISBN 90 376 02 78 9, Gouda*, 27-31 (2000).
90. Nemati, K.M., Monteiro, P.J.M., "A new method to observe three-dimensional fractures in concrete using liquid metal porosimetry technique," *Cement and Concrete Research*, 27 (9): 1340 (1997).
91. The Federal Highway Administration, "HPC Structural Designers Guide", *FHWA, FHWA-RCBAL-05-007, Washington*, 26, 55 (2005).
92. Şahin, R.S., Demirboğa, R., Uysal, H., Gül, R., "The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete", *Cement and Concrete Research*, 33: 1245-1249 (2003).
93. Faust, T., "Stress strain curves of high strength lightweight concrete", *University of Leipzig, LACER No.2, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 103-107 (1997).
94. Rossignolo, J.A., Agnesini, M.V.C., Morais, J.A., "Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates", *Cement & Concrete Composites*, 25: 77-82 (2003).
95. Meyer, J., "Improving the ductility of high performance concrete (HPC)", *University of Leipzig, LACER No.1, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 121-132 (1996).
96. Deutschmann, K., Sicker, A., "Time dependent change of the ductility of high strength concrete", *University of Leipzig, LACER No.3, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 175-184 (1998).

97. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12390-3, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini”, *TSE*, Ankara, 1-12 (2003).
98. Bluic, R., “Particularities of the structural behaviour of reinforced high strength concrete slabs”, Doctoral Thesis, *University of New South Wales*, 53 (2004).
99. ACI Committee E-701, “Chemical admixtures for concrete”, *ACI, Education Bulletin E4-03, Michigan*, 2-12 (2003).
100. Orgass, M., Klug, Y., “Steel fibre reinforced ultra-high strength concretes”, *University of Leipzig, LACER No.9, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 233-244 (2004).
101. Alabaş, V., “Buhar kürü yönteminin beton basınç dayanımına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 57 (2002).
102. Lundgren, K., “Three-dimensional modelling of bond in reinforced concrete”, Doctoral Thesis, *Chalmers University of Technology*, Göteborg, Sweden, 1, 10, 12, 34 (1999).
103. Weiße, D., Holschemacher, K., “Some aspects about the bond of reinforcement in ultra high strength concrete”, *University of Leipzig, LACER No. 8, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 251, 252, 260 (2003).
104. Wang, X., Liu, X., “A strain-softening model for steel–concrete bond”, *Cement and Concrete Research*, 33: 1669, 1670 (2003).
105. Tue, N.V., Krumbach, R., “Bond behaviour between the newly developed reinforcing steel and HPC”, *University of Leipzig, LACER No. 3, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 76 (1998).
106. Dehn, F., Holschemacher, K., Weiße, D., Sia, S., “Bond behaviour of deep – ribbed reinforcement in LWAC”, *University of Leipzig, LACER No. 6, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 294 (2001).
107. Övüç, M., “Buhar kürü yönteminin beton ile çelik aderansı üzerine etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 43, 45, 48, 91, 93 (2004).
108. Esfahani, M.R., Kianoush, M.R., “Development / splice length of reinforcing bars”, *ACI Structural Journal*, 102 (1): 22-30 (2005).
109. Dehn, F., Holschemacher K., Lange, M., Saidowsky L., “Bond behaviour of lightweight aggregate concrete (LWAC) under cyclic loading”, *University of Leipzig, LACER No. 5, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 93-102 (2000).

110. Ichinose, T., Kanayama, Y., Inoue, Y., Bolander Jr., J.E., “Size effect on bond strength of deformed bars”, *Construction and Building Materials*, 18: 549-558 (2004).
111. Dehn, F., Holschemacher, K., Weiße, D., “Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour”, *University of Leipzig, LACER No. 5, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 115-124 (2000).
112. Hüsem, M., Doğu Karadeniz Bölgesi doğal hafif agregalarından biriyle yapılan hafif beton geleneksel bir betonla karşılaştırmalı”, Doktora tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 7 (1995).
113. Soylev, T.A., Francois, R., “Quality of steel - concrete interface and corrosion of reinforcing steel”, *Cement and Concrete Research*, 33: 1407-1415 (2003).
114. Lee, H.S., Noguchi, T., Tomosawa, F., “Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion”, *Cement and Concrete Research*, 32: 1313-1318 (2002).
115. Haddad, R.H., Shannis, L.G., “Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel”, *Construction and Building Materials*, 18: 425-435 (2004).
116. Atahan, H.N., Taşdemir, M.A., Oktar, O.N., “Yüksek dayanımlı betonlarda çimento hamurunun boşluk yapısının beton özelliklerine etkisi”, *itüdergisi/d*, 2 (1): 23-34 (2003).
117. Liao, K.Y., Chang, P.K., Peng, Y.N., Yang, C.C., “A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete” *Cement and Concrete Research* 34: 977-989 (2004).
118. Fernandes, İ.; Noronha, F.; Teles, M., “Microscopic analysis of alkali-aggregate reaction products in a 50-year-old concrete”, *Materials Characterization*, 53: 295-306 (2004).
119. Tasong, W.A., Lynsdale, C.J., Cripps, J.C., “Aggregate-cement paste interface Part I. Influence of aggregate geochemistry”, *Cement and Concrete Research*, 29: 1019-1025 (1999).
120. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 197-1- Genel Çimentolar - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, *TSE*, Ankara, 8 (2002).
121. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, “Çimento genel teknik şartnamesi”, Genel Teknik Şartname, *Başbakanlık Basımevi*, Ankara, 1,3 (1985).

122. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 706 EN 12620, Beton Agregaları”. *TSE*, Ankara, 1-40 (2003).
123. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 1114 EN 13055-1”, Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için”, *TSE*, Ankara, 1-39 (2004).
124. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 932-1, Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler - Kısım 1: Numune Alma Metotları”, *TSE*, Ankara, 1-19 (1997).
125. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 932-2, Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Laboratuar Numunelerin Azaltılması Metodu”, *TSE*, Ankara, 1-11 (1999).
126. ASTM Comitte C 09.21, “ASTM C 330-99, ASTM C 330-00, Standart Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete”, *ASTM*, Philadelphia, 207-210 (2000).
127. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 3530 EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini - Eleme Metodu”, *TSE*, Ankara, 1-8 (1999).
128. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 933-2, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Kısım 2: Tane Boyutu Dağılımı Tayini - Deney Elekları, Elek Göz Açıklıklarının Anma Büyüklükleri”, *TSE*, Ankara, 1-2 (1996).
129. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 1097-3, Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini”, *TSE*, Ankara, 1-9 (1999).
130. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 1097-5, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 5: Hava Dolaşımli Etüvde Kurutma İle Su Muhtevasının Tayini”, *TSE*, Ankara, 1-7 (2001).
131. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini”, *TSE*, Ankara, 1-22 (2002).
132. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 3814 EN 933-4, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Tane Şeklinin Tayini - Şekil İndisi”, *TSE*, Ankara, 1-6 (2001).
133. Smeplass, S, “Applicability of the particle-matrix model to LWAC”, *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R12, ISBN 90 376 0341 6, Gouda*, 10-55 (2000).

134. Harry, G.A., "Chemical stability, wear resistance and freeze-thaw resistance of lightweight aggregate concrete", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R25, ISBN 90 376 0218 5, Gouda*, 8-27 (2000).
135. Sveinsdóttir, E.L., Monsen, A., Kwint, E., Thienel, K.C., "Light weight aggregates", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R15, ISBN 90 376 0118 9, Gouda*, 8-23 (2000).
136. Erdoğan, Ş., Kurbetci, Ş., "Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri", *TMH*, (423): 115-120 (2003).
137. Doğan, Ü.A., "Yeni kuşak süper akışkanlaştırıcıların harç ve beton özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 30 (2000).
138. Yılmaz, A.D., "Yeni kuşak hiper akışkanlaştırıcı beton katkıları", *TMH*, (426): 125-129 (2003).
139. Türk Standartları Enstitüsü, "TS EN 934-2, Kimyasal Katkılar - Beton, harç ve Şerbet İçin Bölüm 2: Beton Katkıları - Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme", *TSE*, Ankara, 1-25 (2002).
140. Degussa, "Beton ve çimento katkıları", *Teknik Katalog, YKS, İstanbul*, 6-9, 14 (2005)
141. Türk Standartları Enstitüsü, "TS 2511, Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları", *TSE*, Ankara, 1-7 (1977).
142. American Concrete Institute Committee 213, "ACI 213, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete", *ACI*, Michigan, 23 (2003).
143. American Concrete Institute Committee 211, "ACI 211.2-91, Standart Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete, *ACI*, Michigan, 1-14 (1991).
144. Maage, M., etc., "Structural LWAC specification and guideline for materials and production", *European Union, EuroLightCon, Document BE96-3942/R14, ISBN 90 376 0108 1, Gouda*, 51, 52 (2000).
145. Faust, T., Beck, M., "Pore structure of different lightweight aggregates (LWA)", *University of Leipzig, LACER No.4, ISSN 1432-6590, Leipzig*, 123-132 (1999)
146. Horta, A., "Evaluation of self-consolidating concrete for bridge structure applications", Master's Thesis, *Georgia Institute of Technology*, Atlanta, Georgia, 1-219 (2005).

147. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12350-1 Beton- Taze Beton Deneyleri - Bölüm 1: Numune Alma”, *TSE*, Ankara, 1-2 (2002).
148. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12350-6, Beton – Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk”, *TSE*, Ankara, 1-5 (2002).
149. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12350-2, Beton- Taze Beton Deneyleri – Bölüm 2; Çökme (Slamp) Deneyi”, *TSE*, Ankara, 1-4 (2002).
150. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12390-1, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri”, *TSE*, Ankara, 1-7 (2002).
151. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12390-2, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm: 2 Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Yapımı ve Küre Tabi Tutulması”, *TSE*, Ankara, 1-4 (2002).
152. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12390-7, Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini”, *TSE*, Ankara, 1-5 (2002).
153. Türk Standartları Enstitüsü, “TS ISO 8302, Isı Yalıtımı - Kararlı Halde Isıl Direncin ve İlgili Özelliklerin Tayini - Mahfazalı Sıcak Plaka Cihazı”, *TSE*, Ankara, 1-53 (2002).
154. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 415 EN 12939, Yapı Malzemelerinin ve Mamullerinin Isıl Performansı - Mahfazalı Sıcak Plâka Cihazı ve Isı Akış Sayacı Metotları ile Isıl Direncin Tayini - Yüksek ve Orta Isıl Dirençli Kalın Mamuller”, *TSE*, Ankara, 1-31 (2005)
155. British Standards Institution, “BS 1881 : Part 203, Testing Concrete, Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, *BSI*, London 1-3 (1986).
156. American Society of Testing and Materials, “ASTM C805-02, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete”, *ASTM*, Philadelphia, 1, 2 (2002).
157. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12390-4, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 4: Basınç Dayanımı - Deney makinelerinin Özellikleri”, *TSE*, Ankara, 1-12 (2002).
158. American Society of Testing and Materials, “ASTM C469, Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, *ASTM*, Philadelphia, 3,4 (2002).

159. Türk Standartları Enstitüsü, “TS EN 12390-5, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini”, *TSE*, Ankara, 1-5 (2002).
160. Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., Zhu, C., “Corrosion influence on bond in reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34: 2163 (2004).
161. Al-Negheimish, A.I., Al-Zaid, R.Z., “Effect of manufacturing process and rusting on the bond behavior of deformed bars in concrete”, *Cement & Concrete Composites*, 26: 735-742 (2004).
162. Haddad, R.H., Abende, R.M., “Effect of thermal cycling on bond between reinforcement and fiber reinforced concrete”, *Cement & Concrete Composites*, 26: 743-752 (2004).
163. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 138 EN 10002-1, Metalik Malzemeler - Çekme Deneyi Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu”, *TSE*, Ankara, 1-49 (2004).
164. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 708, Beton Çelik Çubuklar”, *TSE*, Ankara, 1-29 (1996).
165. Lo, T.Y., Cui, H.Z., “Spectrum analysis of the interfacial zone of lightweight aggregate concrete”, *Materials Letters*, 58: 3089-3095 (2004).
166. Elsharief, A., Cohen, M.D., Olek, J., “Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar”, *Cement and Concrete Research*, 35: 1368-1376 (2005).
167. Yun, B., Ratiyah, İ., Basheer, P.A.M., “Properties of lightweight concrete manufactured with fly ash, furnace bottom ash, and lytag”, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, 77-78 (2004).
168. Kayalı, O., Haque, M.N., Zhu, B., “Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete”, *Cement & Concrete Composites*, 25: 207-213 (2003).
169. American Concrete Institute, “ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”, *ACI*, Michigan, 1-443 (2002).

EKLER

EK-1. Agrega deneylerine ayrıntılı bulgular

Çizelge 1.1. Agregaların kuru eleme yöntemine göre tane boyu dağılımı deneyleri ile ilgili olarak, deneysel hesaplamaları içeren deney formları [127]

A- HAFİF AGREGA - ÜÇ DENEYİN ORTALAMASI (Toplam 13376 gram, ortalama, 4459 gram malzeme)			
Elek göz açıklığı, mm	Elek üstü fraksiyon kütlesi (R _i), g	Elek üstü fraksiyon kütlesi (%), (R _i / M ₁), 100	Elek altı kümülatif yüzdesi (%), 100-(R _i / M ₁)x100
32	0	0	100
(32-16)	133,8	1	99
(16-8)	6956,1	52	48
(8-4)	12708,3	95	5
(4-0,063)	13376,0	99,91	0,09
Tavadaki fraksiyon Kütlesi (P)	4		
63 mikron elekten geçen ince taneli malzemenin kütlesi (f) (%) = $\left[\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \right] \times 100 = (27 / 13376) \times 100 = 0,2$			
B- NORMAL İRİ AGREGA - ÜÇ DENEYİN ORTALAMASI (Toplam , 25679 gram malzeme)			
Elek göz açıklığı, mm	Elek üstü fraksiyon kütlesi (R _i), g	Elek üstü fraksiyon kütlesi (%), (R _i / M ₁), 100	Elek altı kümülatif yüzdesi (%), 100-(R _i / M ₁)x100
32	0	0	100
(32-16)	256,8	1	99
(16-8)	13096,3	51	49
(8-4)	24395,1	95	5
(4-0,063)	25679,0	99,93	0,07
Tavadaki fraksiyon kütlesi (P)	17		
63 mikron elekten geçen ince taneli malzemenin kütlesi (f) (%) = $\left[\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \right] \times 100 = (27 / 25679) \times 100 = \% 0,1$			
C - İNCE AGREGANIN - ÜÇ DENEYİN DENEYİN ORTALAMASI (Toplam, 6831 gram malzeme)			
Elek göz açıklığı, mm	Elek üstü fraksiyon kütlesi (R _i), g	Elek üstü fraksiyon kütlesi (%), (R _i / M ₁), 100	Elek altı kümülatif yüzdesi (%), 100-(R _i / M ₁)x100
4 mm üstü	0	0	100
(2-4)	1502,8	22	78
(1-2)	2869,0	42	58
(0,500-1)	4030,3	59	41
(0,250-0,500)	5806,4	85	15
(0,125-0,250)	6694,4	98	2
(0,063-0,125)	6798	99,52	0,48
Tavadaki fraksiyon kütlesi (P)	33		
63 mikron elekten geçen ince taneli malzemenin kütlesi (f) (%) = $\left[\frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \right] \times 100 = (45 / 6831) \times 100 = 0,7$			

Çizelge 1.2. Tezdeki farklı agrega oranlarına ait tane boyu dağılımları, incelik modülleri

% 40 AGREGA İÇEREN SERİLERDE TANE BOYU DAĞILIMI		
Elek göz açıklığı, mm	Elek üstü fraksiyon kütlesi (%), (R _i / M ₁), 100	Elek altı kümülatif yüzdesi (%), 100-(R _i / M ₁)x100
32	0	100
(32-16)	0,4	99,6
(16-8)	20,8	79,2
(8-4)	38,0	62,0
(4-2)	53,2	46,8
(2-4)	65,2	34,8
(1-2)	75,4	24,6
(0,500-1)	91,0	9,0
(0,250-0,500)	98,8	1,2
(0,125-0,250)	99,7	0,3
(0,063-0,125)		
63 mikron elekten geçen ince taneli malzemenin kütlesi (f) (%) = 0,50		
% 50 AGREGA İÇEREN SERİLERDE TANE BOYU DAĞILIMI		
Elek göz açıklığı, mm	Elek üstü fraksiyon kütlesi (%), (R _i / M ₁), 100	Elek altı kümülatif yüzdesi (%), 100-(R _i / M ₁)x100
32	0	100
(32-16)	0,5	99,5
(16-8)	26,0	74,0
(8-4)	47,5	52,5
(4-2)	61,0	39,0
(2-4)	71,0	29,0

EK-1. (Devam) Agregada deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 1.2. (Devam) Tezdeki farklı agregada oranlarına ait tane boyu dağılımları, incelik modülleri [127]

(1-2)	79,5	20,5
(0,500-1)	92,5	7,5
(0,250-0,500)	99,0	1,0
(0,125-0,250)	99,8	0,2
(0,063-0,125)		
63 mikron elekten geçen ince taneli malzemenin kütlesi (f) (%) = 0,45		
% 60 AGREGA İÇEREN SERİLERDE TANE BOYU DAĞILIMI		
Elek göz açıklığı, mm	Elek üstü fraksiyon kütlesi (%), (R _i / M _i), 100	Elek altı kümülatif yüzdesi (%), 100-(R _i / M _i)x100
32	0	100
(32-16)	0,6	99,4
(16-8)	31,2	68,8
(8-4)	57,0	43,0
(4-2)	68,8	31,2
(2-4)	76,8	23,2
(1-2)	83,6	16,4
(0,500-1)	94,0	6,0
(0,250-0,500)	99,2	0,8
(0,125-0,250)	99,8	0,2
(0,063-0,125)		
63 mikron elekten geçen ince taneli malzemenin kütlesi (f) (%) = 0,40		

Çizelge 1.3. Deneylerde kullanılan normal iri agreganın, hafif agregada ile aynı tane boyu dağılımına sahip olması için, yapılan düzeltme işlemleri

Beton dökümü veya agregada deneylerinde karışıma giren normal iri agregada sınıfı			Karışımda olması gereken normal iri agregada yüzdesi		
(8-16) mm'lik agregada			% 51		
(4-8) mm'lik agregada			% 39		
(4-5) mm'lik agregada			% 10		
Tane boyu dağılımı sınıfları	Hedeflenen değer (% olarak)	1 nolu agregada oranı (%51)	2 nolu agregada oranı (%39)	3 nolu agregada oranı (%10)	Elde edilen değer (% olarak)
(16-8)	52	50,572	1,397	-	51,969
(8-4)	43	0,428	36,543	5,934	42,477
(4-0)	5	-	1,06	4	5,06
Skorinin, tane boyu dağılımlarını elde edebilmek için; birçok oran denenmiş, sonuçta, belirtilen oranlar elde edilmiştir.					

Çizelge 1.4. Tezde kullanılan agregaların gevşek yığın yoğunlukları ile ilgili rapor [129]

A - HAFİF AGREGA				
Deney sonuçları	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	V (litre –dm ³)	P _b (kg / m ³)
Birinci deney	0,185	4,631	5,161	861,5
İkinci deney	0,185	4,661	5,161	867,3
Üçüncü deney	0,185	4,639	5,161	863,0
Gevşek yığın yoğunluğu ile ilgili ortalama sonuç değeri (sts = 3,10)				864,0
B - NORMAL İRİ AGREGA (DERE ÇAKILI)				
Deney sonuçları	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	V (litre –dm ³)	P _b (kg / m ³)
Birinci deney	0,185	8,778	5,161	1665
İkinci deney	0,185	8,710	5,161	1652
Üçüncü deney	0,185	8,746	5,161	1659
Gevşek yığın yoğunluğu ile ilgili ortalama sonuç değeri (sts = 6,51)				1659
C - İNCE AGREGA (DERE KUMU)				
Deney sonuçları	m ₁ (kg)	m ₂ (kg)	V (litre –dm ³)	P _b (kg / m ³)
Birinci deney	0,138	2,411	1,334	1704
İkinci deney	0,138	2,403	1,334	1698
Üçüncü deney	0,138	2,431	1,334	1719

EK-1. (Devam) Agregada deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 1.4. (Devam) Tezde kullanılan agregaların gevşek yığın yoğunlukları ile ilgili rapor [129]

Gevşek yığın yoğunluğu ile ilgili ortalama sonuç değeri (sts = 10,82)	1707
GEVŞEK YIĞIN YOĞUNLUĞU DENEYLERİ İLE İLGİLİ HESAPLAMA YÖNTEMİ [149]	
Gevşek yığın yoğunluğu (ρ_b) her deney numunesi için, aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmalıdır.	
$\rho_b = (m^2 - m^1) / V$, eşitliğinde; ρ_b = Gevşek yığın yoğunluğu, kg / m^3 (kg/m^3 olarak bulunan değer, sonradan Mg/m^3'e çevrilmiştir) m^2 = Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesi. m^1 = Boş ölçü kabı kütlesi, kg. V = Ölçü kabının hacmi, L. dir.	
Gevşek yığın yoğunluğu, normal agregalarda ikinci ondalığa kadar yuvarlatılarak; hafif agregalarda, üçüncü ondalığa kadar yuvarlatılarak, üç değer in ortalaması olarak verilir.	

Çizelge 1.5. Agregaların agregada tane yoğunluğu ve su emme değerleri ile ilgili deney sonuçları [131]

HAFİF AGREGA - 4-16 mm tane aralığındaki hafif iri agregada							
Hesaplanan değer		1.Deney	2.Deney	3.Deney	ORT.	sts	
Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu	$\rho_{rd} =$	1,836	1,807	1,816	1,819	0,015	
Su emme oranı (0,5 saat daldırma sonunda, kuru kütl. Bir yüzdesi olarak)	$WA_{0,5} =$	7,294	7,500	7,489	7,427	0,12	
Su emme oranı (24 saat daldırma sonunda, kuru kütl. bir yüzdesi olarak)	$WA_{24} =$	11,294	10,833	10,526	10,884	0,39	
NORMAL AGREGA (DERE ÇAKILI) - 4-16 mm tane aralığındaki normal iri agregada							
Hesaplanan değer		1.Deney	2.Deney	3.Deney	4.Deney	ORT.	sts
Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu	$\rho_{rd} =$	2,567	2,575	2,619	2,574	2,583	0,024
Su emme oranı (24 saat)	$WA_{24} =$	1,368	1,370	1,388	1,430	1,389	0,029
İNCE AGREGA (DERE KUMU) - 0,063 – 4 mm tane aralığındaki normal ince agregada							
Hesaplanan değer		1.Deney	2.Deney	3.Deney	4.Deney	ORT.	sts
Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu	$\rho_{rd} =$	2,502	2,563	2,445	2,543	2,538	0,052
Su emme oranı (24 saat)	$WA_{24} =$	1,570	1,645	1,455	1,440	1,500	0,098
TS EN 1097-6'ya göre, agregaların, yoğunlukları ve su emme oranların için kullanılan eşitlikler							
Hesaplanan değer		Eşitliği					
Etüvde kurutulmuş esasta Tane yoğunluğu		$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]}$					
Su emme oranı (24 saat, kuru kütl. bir yüzdesi olarak)		$WA_{24} = \frac{[100 \times (M_1 - M_4)]}{M_4}$					
Eşitliklerde kullanılan semboller							
M_1	Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş olan agreganın kütlesi, g.						
M_2	Doygun agregada numunesini ihtiva eden piknometrenin kütlesi, g.						
M_3	Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi, g.						
M_4	Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi, g.						
Not 1	Tane yoğunluğu değerleri, 0,01 Mg/m ³ , yaklaşımla ifade edilir.						
Not 2	Su emme oranı değeri, % 0,1 yaklaşımla ifade edilir.						
Not 3	Hesaplamalar, aşağıdaki eşitlik kullanılarak kontrol edilebilir: $\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - (\rho_{rd} / \rho_a)$						

Çizelge 1.6. Şekil indisi (SI) değerlerinin belirlenmesine ilişkin deney raporu [132]

A - HAFİF AGREGA			
($D_i > 2d_i$) iken tane büyüklüğü aralığı (d_i/D_i), (mm)	Kütle M_{1i} (g)	Kütle M_{2i} (g)	Şekil indisi (SI) (%)
(4-8) ve (8-16)	1096	106 (56 +50)	10
B - NORMAL İRİ AGREGA			
($D_i > 2d_i$) iken tane büyüklüğü aralığı (d_i/D_i), (mm)	Kütle M_{1i} (g)	Kütle M_{2i} (g)	Şekil indisi (SI) (%)
(4-8) ve (8-16)	8986	1024 (312+712)	11
HESAPLAMALARDA KULLANILAN EŞİTLİKLER			
$SI = [\sum M_{2i} / \sum M_{1i}] \times 100$, bu eşitlikte; M_{1i}= Etüvde sabit kütleyle gelinceye kadar kurutulmuş olan deney numunesi kısmının kütlesi (deneye tabi tutulan tane büyüklük aralıklarındaki kütlelerin toplamı),g, M_{2i}= Kübik olmayan tanelerin kütlesi (her bir aralıkta yer alan ve kübik olmayan tanelerin toplamı),g,			

EK-2. Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 2.1. Taze beton yoğunlukları ile ilgili hesap değerleri ve deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	Hesaplanan Taze Beton Yoğunluk Değerleri (Kg/m ³)	Ölçülen Taze Beton Yoğunluk Değerleri (Kg/m ³)	Fark (Kg/m ³)	Fark (%)
1.	KS040 – 37,5	2379,0	2346 ±90	33,0	1,38
2.	KS050 – 37,5	2381,5	2359 ±90	22,5	0,95
3.	KS060 – 37,5	2383,0	2367 ±90	16,0	0,67
4.	KS40 – 37,5	2206,0	2170 ±90	36,0	1,63
5.	KS50 – 37,5	2166,0	2140 ±90	26,0	1,2
6.	KS60 – 37,5	2125,0	2100 ±90	25,0	1,18
7.	KS40 – 45	2156,7	2144,5 ±90	12,2	0,57
8.	KS50 – 45	2118,0	2105 ±90	13,0	0,61
9.	KS60 – 45	2080,0	2070 ±90	10,0	0,48
10.	S40 – 1	2256,4	2240 ±90	16,4	0,73
11.	S40 – 1,25	2256,4	2223 ±90	33,4	1,48
12.	S40 – 1,50	2256,4	2190±90	66,4	2,94
13.	S50 – 1	2213,5	2205 ±90	8,5	0,38
14.	S50 – 1,25	2213,5	2201 ±90	12,5	0,56
15.	S50 – 1,50	2213,5	2193 ±90	20,5	0,93
16.	S60 – 1	2176,0	2170 ±90	6,0	0,28
17.	S60 – 1,25	2176,0	2150 ±90	26,0	1,19
18.	S60 – 1,50	2176,0	2145 ±90	31,0	1,42

Çizelge 2.2. Etüv kurusu yoğunluk ve su emme oranının belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi [152]

SEMBOL	ÖLÇÜLEN SAYISAL DEĞERLER
m_{ekk}	Numunenin etüv kurusu kütlesi
m_{sdykk}	Numunenin (sdyk), havadaki kütlesi (kg)
m_s	Numunenin (sd) su içindeki görünür kütlesi (kg)
P_{20}	Suyun 998 kg/m ³ olarak kabul edilen, 20 °C sıcaklıktaki yoğunluğu
V_{ϕ}	Özel metot ile tayin edilen numune hacmi (m ³)
p_{eky}	Etüv kurusu yoğunluk (kg/m ³)
P_{sd}	Hesaplanan suya doymuş yoğunluk değeri (kg/m ³)
W_{seo}	Su emme oranı (%)
Hesaplama Eşitlikleri	
$V_{\phi} = \frac{(m_{sdykk} - m_s)}{P_{20}}$	$p_{eky} = \frac{m_{ekk}}{V_{\phi}}$
$p_{sd} = \frac{m_{sdykk}}{V_{\phi}}$	$W_{seo} = \frac{(p_{sd} - p_{eky})}{p_{eky}}$

Çizelge 2.3. Porozite oranı ve birim hacim ağırlık değerlerinin belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi [173]

SEMBOL	ÖLÇÜLEN SAYISAL DEĞERLER
m_{ekk}	Numunenin etüv kurusu kütlesi
m_{sdykk}	Numunenin , havadaki kütlesi (kg) (suya doymuş, yüzeyi kuru olan numune kütlesi)
V_b	Boşlukların hacmi (m ³)
V_k	Kumpas kullanılarak, ölçüm ve hesaplama yoluyla tayin edilen numune hacmi (m ³)
g	Gözeneklilik, porozite oranı (%)
p_{bha}	Birim hacim ağırlığı (kg/m ³)
P_{20}	20 °C suyun yoğunluğu (998 kg/m ³)
Hesaplama Eşitlikleri	
$V_b = \frac{(m_{sdykk} - m_{ekk})}{P_{20}}$	$g = \frac{V_b}{V_k} \times 100$
	$p_{bha} = \frac{m_{ekk}}{V_k}$

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 2.4. Etüv kurusu yoğunluk ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	P _{eky} (Kg / m ³)	STS
1.	KS040 – 37,5	2224	2231	2235	2230	5,57
2.	KS050 – 37,5	2238	2239	2245	2241	3,79
3.	KS060 – 37,5	2263	2278	2270	2270	7,51
4.	KS40 – 37,5	2030	2031	2033	2031	1,53
5.	KS50 – 37,5	2003	2004	2003	2003	0,58
6.	KS60 – 37,5	1966	1965	1963	1965	1,53
7.	KS40 – 45	1970	1956	1971	1966	8,39
8.	KS50 – 45	1956	1952	1963	1957	5,57
9.	KS60 – 45	1930	1922	1932	1928	5,29
10.	S40 – 1	2104	2100	2114	2106	7,21
11.	S40 – 1,25	2112	2100	2109	2107	6,25
12.	S40 – 1,50	2097	2113	2109	2106	8,33
13.	S50 – 1	2097	2097	2095	2094	1,15
14.	S50 – 1,25	2091	2097	2093	2094	3,06
15.	S50 – 1,50	2095	2091	2090	2092	2,65
16.	S60 – 1	2046	2039	2055	2047	8,02
17.	S60 – 1,25	2029	2020	2031	2027	5,86
18.	S60 – 1,50	2068	2061	2065	2064	3,51

Çizelge 2.5. Su emme ve porozite oranı ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ		2. SONUÇ		3. SONUÇ		ORTALAMALAR (%)		STS
		W _{seo}	g _{po}	W _{seo}	g _{po}	W _{seo}	g _{po}	W _{seo}	g _{po}	
1.	KS040 – 37,5	7,284	15,969	7,082	15,619	6,935	15,295	7,100	15,628	0,175
2.	KS050 – 37,5	7,016	15,409	7,07	15,570	6,993	15,494	7,026	15,491	0,040
3.	KS060 – 37,5	6,982	15,675	6,541	14,701	6,610	14,765	6,711	15,047	0,237
4.	KS40 – 37,5	8,424	17,078	8,517	17,260	8,558	17,404	8,500	17,247	0,069
5.	KS50 – 37,5	8,837	17,508	8,733	17,388	8,578	16,938	8,649	17,278	0,130
6.	KS60 – 37,5	8,851	17,278	8,702	17,337	8,558	16,900	8,704	17,172	0,147
7.	KS40 – 45	9,748	19,366	9,667	18,933	9,691	18,828	9,702	19,042	0,042
8.	KS50 – 45	9,867	19,385	9,836	19,008	9,526	18,830	9,743	19,080	0,189
9.	KS60 – 45	10,415	19,825	10,458	19,769	10,300	19,575	10,391	19,723	0,082
10.	S40 – 1	5,513	11,470	6,286	12,007	5,771	11,957	5,857	11,811	0,394
11.	S40 – 1,25	5,871	12,183	5,810	12,185	5,832	12,105	5,838	12,158	0,031
12.	S40 – 1,50	6,295	12,970	6,058	12,464	5,927	12,311	6,093	12,582	0,187
13.	S50 – 1	6,342	13,071	6,342	13,242	6,444	13,418	6,430	13,243	0,059
14.	S50 – 1,25	5,835	12,324	5,913	12,235	6,068	12,545	5,937	12,368	0,119
15.	S50 – 1,50	6,444	13,357	6,695	13,833	6,555	13,556	6,565	13,582	0,126
16.	S60 – 1	6,745	13,576	6,817	13,789	6,715	13,708	6,759	13,691	0,052
17.	S60 – 1,25	6,555	13,242	6,733	13,465	6,450	12,849	6,579	13,185	0,143
18.	S60 – 1,50	6,769	13,746	6,938	14,099	6,634	13,550	6,780	13,798	0,152

Çizelge 2.6. Isı iletkenlik değerlerinin belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi

$\lambda = \frac{Q \times l_1}{2 \times A_1 \times \Delta T}$ Burada;	
• λ	= Isı iletkenlik değeri (W/mK)
• Q	= Isıtıcı plakaya beslenen elektrik gücü (Watt)
• ΔT	= Yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkı (K)
• l_1	= Numune kalınlığı (m),
• A_1	= Isıtıcı plaka alanı (m ²) dir.
Hesaplamalarda kullanılan diğer simgeler ve eşitlikler aşağıdaki gibidir;	
• t_{w1}	= Isıtma levhasına giriş
• t_{k1}	= Soğutma levhasına giriş
• t_{w2}	= Isıtma levhasından çıkış
• t_{k2}	= Soğutma levhasından çıkış
• $t_{w \text{ Ort.}}$	= ($t_{w1} + t_{w2}$)/2
• $t_{k \text{ Ort.}}$	= ($t_{k1} + t_{k2}$)/2

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 2.7. Isı iletkenlik değeri ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	STS	λ (W/mK)
1.	KS040 – 37,5	1,53	1,55	1,56	0,015	1,55
2.	KS050 – 37,5	1,62	1,62	1,63	0,006	1,62
3.	KS060 – 37,5	1,65	1,81	1,70	0,082	1,72
4.	KS40 – 37,5	1,06	1,10	1,12	0,031	1,09
5.	KS50 – 37,5	0,93	0,95	0,96	0,015	0,95
6.	KS60 – 37,5	0,91	0,88	0,85	0,030	0,88
7.	KS40 – 45	0,89	0,85	0,91	0,031	0,88
8.	KS50 – 45	0,82	0,84	0,85	0,015	0,84
9.	KS60 – 45	0,81	0,79	0,82	0,015	0,81
10.	S40 – 1	1,16	1,14	1,19	0,025	1,16
11.	S40 – 1,25	1,20	1,17	1,17	0,017	1,18
12.	S40 – 1,50	1,13	1,19	1,14	0,032	1,15
13.	S50 – 1	1,16	1,14	1,16	0,012	1,15
14.	S50 – 1,25	1,16	1,19	1,17	0,015	1,17
15.	S50 – 1,50	1,14	1,12	1,12	0,012	1,13
16.	S60 – 1	0,98	0,92	1,10	0,092	1,00
17.	S60 – 1,25	1,16	1,13	1,16	0,017	1,15
18.	S60 – 1,50	0,99	0,98	1,00	0,010	0,99

Çizelge 2.8. Ultrases geçiş hızı ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	V_u (Km/sn)	STS
1.	KS040 – 37,5	4,4705	4,5306	4,5229	4,5078	0,033
2.	KS050 – 37,5	4,5243	4,6367	4,5343	4,5651	0,062
3.	KS060 – 37,5	4,5564	4,6013	4,5503	4,5693	0,028
4.	KS40 – 37,5	4,5552	4,5126	4,5000	4,5226	0,029
5.	KS50 – 37,5	4,5430	4,5149	4,4578	4,5052	0,043
6.	KS60 – 37,5	4,4675	4,4358	4,4325	4,4453	0,019
7.	KS40 – 45	4,4638	4,4017	4,3959	4,4205	0,038
8.	KS50 – 45	4,375	4,4187	4,4038	4,3992	0,022
9.	KS60 – 45	4,4009	4,3644	4,4118	4,3924	0,025
10.	S40 – 1	4,8067	4,7826	4,7079	4,76573	0,052
11.	S40 – 1,25	4,8237	4,7344	4,8244	4,79417	0,052
12.	S40 – 1,50	4,6618	4,7418	4,6983	4,70063	0,040
13.	S50 – 1	4,7838	4,668	4,6916	4,7145	0,061
14.	S50 – 1,25	4,7672	4,7790	4,7476	4,7646	0,016
15.	S50 – 1,50	4,7073	4,6715	4,7257	4,7015	0,028
16.	S60 – 1	4,8090	4,6002	4,7028	4,7040	0,104
17.	S60 – 1,25	4,7260	4,6778	4,7343	4,7127	0,031
18.	S60 – 1,50	4,6551	4,7100	4,7016	4,6889	0,030

Çizelge 2.9. Schimdt sertlik değeri ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	V_{ssd}	STS
1.	KS040 – 37,5	34,3125	33,5625	34,4375	34,1042	0,4732
2.	KS050 – 37,5	34,5000	34,6250	34,2500	34,4583	0,1909
3.	KS060 – 37,5	36,125	36,2500	36,1875	36,5208	0,0625
4.	KS40 – 37,5	34,4375	33,0625	32,4375	33,3125	1,0232
5.	KS50 – 37,5	32,6875	32,7500	32,9375	32,7917	0,1301
6.	KS60 – 37,5	32,4375	32,8125	32,6875	32,6458	0,1909
7.	KS40 – 45	32,0000	32,0625	32,3125	32,1250	0,1654
8.	KS50 – 45	31,5000	31,3125	31,9375	31,5833	0,3207
9.	KS60 – 45	31,5000	31,1875	30,4375	31,0417	0,5461
10.	S40 – 1	40,6875	40,8750	40,4375	40,6667	0,2195
11.	S40 – 1,25	41,8750	41,3125	42,0625	41,7500	0,3903
12.	S40 – 1,50	40,0625	40,1250	40,5625	40,2500	0,2724
13.	S50 – 1	40,0000	39,5000	40,4375	39,9792	0,4691
14.	S50 – 1,25	41,0625	39,8125	40,7500	40,5417	0,6505
15.	S50 – 1,50	40,3125	38,7500	38,2500	39,1042	1,0759
16.	S60 – 1	36,6250	35,8750	35,7500	36,0833	0,4732
17.	S60 – 1,25	38,1250	37,7500	36,8750	37,5833	0,6415
18.	S60 – 1,50	37,3750	36,9375	37,8125	37,3750	0,4375

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 2.10. Basınç dayanım değeri ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	f_{sil} (Mpa)	STS
1.	KS040 – 37,5	40,98	41,98	39,72	40,89	1,13
2.	KS050 – 37,5	32,93	37,32	35,41	35,22	2,20
3.	KS060 – 37,5	29,88	34,62	26,63	30,38	4,02
4.	KS40 – 37,5	52,78	49,12	51,08	50,99	1,83
5.	KS50 – 37,5	49,47	49,96	48,58	49,34	0,70
6.	KS60 – 37,5	48,70	44,35	45,92	46,32	2,20
7.	KS40 – 45	47,59	45,90	46,47	46,65	0,86
8.	KS50 – 45	43,05	46,66	46,06	45,26	1,93
9.	KS60 – 45	44,99	42,12	45,16	44,09	1,71
10.	S40 – 1	63,85	59,50	62,19	61,85	2,20
11.	S40 – 1,25	68,05	64,23	66,51	66,26	1,92
12.	S40 – 1,50	58,96	63,50	58,53	60,33	2,75
13.	S50 – 1	62,10	58,11	61,10	60,45	2,08
14.	S50 – 1,25	62,36	65,61	64,32	64,10	1,64
15.	S50 – 1,50	57,28	53,40	57,95	56,21	2,46
16.	S60 – 1	59,06	57,05	58,67	58,26	1,07
17.	S60 – 1,25	61,04	60,05	61,98	61,02	0,97
18.	S60 – 1,50	54,74	57,79	56,74	56,42	1,55

Çizelge 2.11. Elastiklik modülü değerinin belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi [158]

$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$	$\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$	$\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$	$\varepsilon_2 = \frac{d_2}{L_0}$	$\varepsilon_1 = \frac{d_1}{L_0}$
• E	= Elastiklik modülü (Gpa) (Literatürde sekant modülü olarak geçen değer)			
• σ_2	= Numunede maksimum gerilimin % 40'ına denk gelen gerilim değeri (Mpa)			
• σ_1	= Numunede minimum boy değişimine denk gelen gerilim değeri (Mpa)			
• ε_2	= % 40 gerilimdeki birim deformasyon (mm/mm)			
• ε_1	= Minimum gerilimdeki birim deformasyon (s. değer, $0,05 \times 10^{-3}$ mm/mm)			
• d_2	= % 40 gerilimdeki dikey boy değişimi (mm)			
• d_1	= Minimum gerilimdeki dikey boy değişimi (mm)			
• L_0	= İlk boy (mm) (Aparatın numune ile temas eden montaj vidaları arasındaki mesafe, tezde bu değer 225 mm'dir)			

Çizelge 2.12. Elastiklik modülü değeri ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	E (Gpa)	STS
1.	KS040 – 37,5	32,47	34,19	31,88	32,85	1,20
2.	KS050 – 37,5	28,94	30,20	29,93	29,69	0,66
3.	KS060 – 37,5	29,89	32,11	24,75	28,92	3,78
4.	KS40 – 37,5	30,26	28,51	30,02	29,60	0,95
5.	KS50 – 37,5	28,23	29,40	27,31	28,31	1,05
6.	KS60 – 37,5	29,64	26,53	27,50	27,89	1,59
7.	KS40 – 45	29,41	25,72	25,68	26,94	2,14
8.	KS50 – 45	25,70	27,60	26,56	26,62	0,95
9.	KS60 – 45	26,61	23,19	26,92	25,57	2,07
10.	S40 – 1	33,90	31,05	32,99	32,65	1,46
11.	S40 – 1,25	36,44	33,09	35,33	34,95	1,71
12.	S40 – 1,50	28,13	31,92	28,56	29,54	2,08
13.	S50 – 1	33,73	30,83	32,83	32,46	1,48
14.	S50 – 1,25	32,08	34,12	33,82	33,34	1,10
15.	S50 – 1,50	28,62	25,67	28,60	27,63	1,70
16.	S60 – 1	32,13	30,78	31,20	31,37	0,69
17.	S60 – 1,25	32,27	31,40	33,18	32,28	0,89
18.	S60 – 1,50	25,64	27,20	27,06	26,63	0,86

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 2.13. Maksimum birim deformasyon değerleri ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ		2. SONUÇ		3. SONUÇ		$\epsilon_{md} (x 10^{-2})$	$\epsilon_0 (x 10^{-3} \text{ mm/mm})$
1.	KS040 – 37,5	50,0	2,22	50,5	2,24	48,5	2,16	49,7	2,21
2.	KS050 – 37,5	44,5	1,98	46,2	2,05	45,8	2,04	45,5	2,02
3.	KS060 – 37,5	46,0	2,04	46,5	2,07	42,5	1,89	45,0	2,00
4.	KS40 – 37,5	58,0	2,58	56,0	2,49	57,0	2,53	57,0	2,53
5.	KS50 – 37,5	59,0	2,62	59,0	2,62	59,0	2,62	59,0	2,62
6.	KS60 – 37,5	61,5	2,73	58,5	2,60	60,0	2,67	60,0	2,67
7.	KS40 – 45	55,5	2,47	54,3	2,41	55,2	2,45	55,0	2,44
8.	KS50 – 45	55,2	2,45	57,0	2,53	57,0	2,53	56,4	2,50
9.	KS60 – 45	56,7	2,52	55,0	2,44	57,8	2,57	56,5	2,51
10.	S40 – 1	64,0	2,84	62,0	2,76	63,0	2,80	63,0	2,80
11.	S40 – 1,25	64,5	2,87	63,5	2,82	64,0	2,84	64,0	2,84
12.	S40 – 1,50	62,0	2,76	64,5	2,86	58,0	2,58	61,5	2,73
13.	S50 – 1	65,5	2,91	64,5	2,87	65,0	2,89	65,0	2,89
14.	S50 – 1,25	65,0	2,89	66,0	2,93	65,5	2,91	65,5	2,91
15.	S50 – 1,50	63,5	2,82	62,5	2,78	64,5	2,87	63,5	2,82
16.	S60 – 1	66,5	2,96	65,5	2,91	66,0	2,93	66,0	2,93
17.	S60 – 1,25	66,5	2,95	66,0	2,93	67,0	2,98	66,5	2,95
18.	S60 – 1,50	64,0	2,84	65,0	2,89	64,5	2,87	64,5	2,87

Çizelge 2.14. Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi

$R_e = \frac{2 \times d_{1e} \times d_{2e}^2 \times s_e}{3 \times L_e} \text{ ve } f_e = \frac{3 \times F_e \times L_e}{2 \times d_{1e} \times d_{2e}^2}$	
• R_e	= Gerekli yükleme hızı, (N/sn) (Tezde, 0,09 kN/sn olarak bulunmuştur)
• S_e	= Gerilim artış hızı, (Mpa/sn)
• L_e :	= Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, (mm),
• d_{1e} ve d_{2e}	= Numunenin en kesit boyutları, (mm)
• f_e	= Eğilme dayanımı, (Mpa -N/mm ² -),
• F_e	= En büyük yük, (N),
• L_e	= Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, (mm),
• d_{1e} ve d_{2e}	= Numunenin en kesit boyutları, (mm)

Çizelge 2.15. Eğilme dayanım değerleri ile ilgili deney sonuçları

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	f_c (Mpa)	STS
1.	KS040 – 37,5	6,687	6,368	6,759	6,61	0,208
2.	KS050 – 37,5	5,432	5,148	5,387	5,32	0,153
3.	KS060 – 37,5	4,968	4,905	4,698	4,86	0,141
4.	KS40 – 37,5	7,398	7,313	6,615	7,11	0,430
5.	KS50 – 37,5	7,052	6,345	6,372	6,59	0,401
6.	KS60 – 37,5	5,472	5,868	6,624	5,99	0,585
7.	KS40 – 45	6,746	6,548	6,336	6,54	0,205
8.	KS50 – 45	5,985	6,390	6,453	6,28	0,254
9.	KS60 – 45	5,850	6,129	5,828	5,94	0,168
10.	S40 – 1	8,469	7,925	7,218	7,87	0,627
11.	S40 – 1,25	8,789	8,222	7,722	8,24	0,534
12.	S40 – 1,50	8,132	8,298	7,965	8,13	0,167
13.	S50 – 1	8,388	8,888	7,974	8,42	0,458
14.	S50 – 1,25	9,149	9,464	8,901	9,17	0,282
15.	S50 – 1,50	8,811	8,654	7,902	8,46	0,486
16.	S60 – 1	8,244	7,862	7,745	7,95	0,261
17.	S60 – 1,25	8,694	7,911	9,041	8,55	0,579
18.	S60 – 1,50	7,718	7,659	8,123	7,83	0,253

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular

Çizelge 2.16. Aderans dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi

$T_{\varphi} = \frac{P_{\max}}{\Pi \times l \times d}$	
• T_{φ}	= Çekme kuvveti etkisinde beton donatı aderans dayanımı (Mpa)
• $P_{\max}$	= Maksimum sıyrılma kuvveti (N)
• l	= Donatının beton içerisinde gömülü olduğu boy (mm)
• d	= Donatının çapı (mm)
• Uygulanan yükün artış hızı 0,3 kN/sn olacak şekilde ayarlanmıştır.	

Çizelge 2.17. Aderans dayanım değerleri ile ilgili deney sonuçları

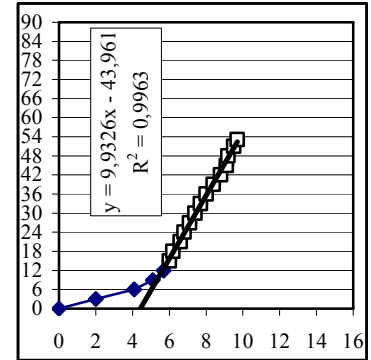
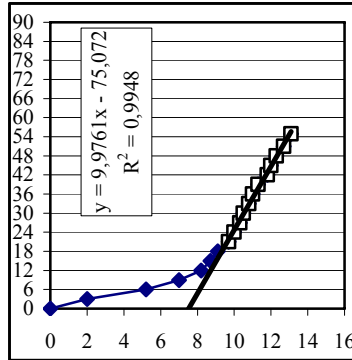
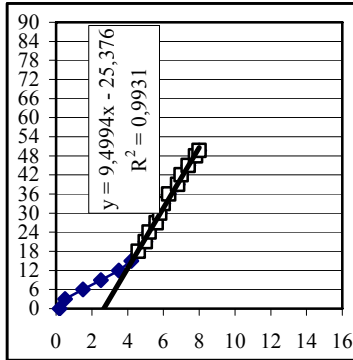
NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ	2. SONUÇ	3. SONUÇ	T_{φ} (Mpa)	STS
1.	KS040 – 37,5	17,66	19,50	18,86	18,67	0,934
2.	KS050 – 37,5	19,33	20,07	18,51	19,30	0,780
3.	KS060 – 37,5	-	-	-	-	
4.	KS40 – 37,5	19,50	20,92	19,82	20,08	0,745
5.	KS50 – 37,5	20,96	20,18	19,79	20,31	0,596
6.	KS60 – 37,5	16,45	17,59	17,19	17,08	0,578
7.	KS40 – 45	18,90	18,19	17,80	18,30	0,558
8.	KS50 – 45	18,08	17,30	17,59	17,66	0,394
9.	KS60 – 45	14,39	15,10	15,52	15,00	0,571
10.	S40 – 1	29,24	30,73	29,02	29,66	0,930
11.	S40 – 1,25	32,51	31,48	31,01	31,67	0,767
12.	S40 – 1,50	23,66	25,79	23,94	24,46	1,157
13.	S50 – 1	27,39	26,72	26,22	26,78	0,587
14.	S50 – 1,25	31,65	30,45	31,08	31,06	0,600
15.	S50 – 1,50	24,26	25,19	24,69	24,71	0,465
16.	S60 – 1	23,13	23,98	23,55	23,55	0,425
17.	S60 – 1,25	30,87	29,91	30,66	30,48	0,505
18.	S60 – 1,50	22,45	23,34	23,62	23,14	0,611

Çizelge 2.18. Aderans deneylerinde kullanılan donatıların bazı mekanik özellikleri[163]

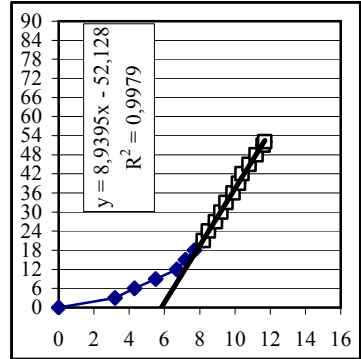
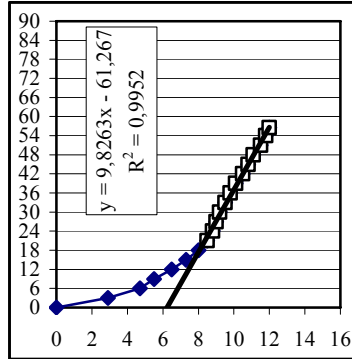
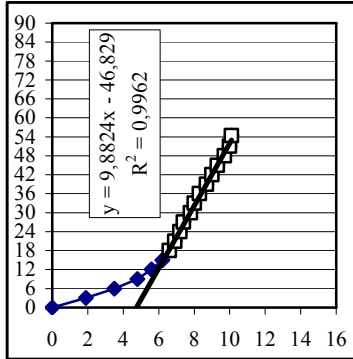
DONATI ÖZELLİKLERİ	NUMUNE NO 1	NUMUNE NO 2	NUMUNE NO 3	ORTALAMA
Donatı çapı (mm)	16	16	16	16,00
Kesit alanı (mm ²)	200,96	200,96	200,96	200,96
İlk boy (L ₀) (mm)	160	160	160	160,00
Son boy (L ₁) (mm)	227,88	226,70	227,16	227,25
Akma kuvveti (kN)	98,95	101,84	101,70	100,83
Akma mukavemeti (R _{e%2}) (N/mm ²)	492,36	506,78	506,10	501,75
Çekme kuvveti (kN)	138,89	143,91	141,44	141,41
Çekme mukavemeti (R _m) (N/mm ²)	691,11	716,13	703,87	703,70
R _m / R _{e%2} oranı	1,40	1,41	1,39	1,40
Kopma kuvveti (kN)	119,73	124,14	122,15	122,01
Kopma mukavemeti (N/mm ²)	595,79	617,73	607,83	607,12
Kopma uzaması (L ₁ -L ₀) (mm)	67,88	66,70	67,16	67,25
Uzama oranı [(L ₁ -L ₀) / L ₀] $\times$ 100 (%)	42,43	41,69	41,98	42,03

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular

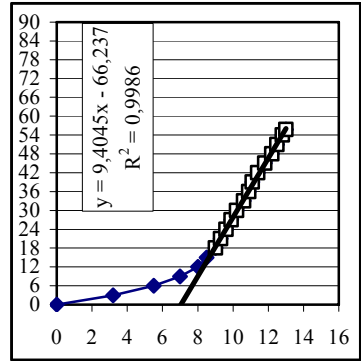
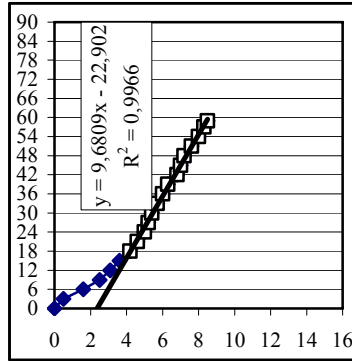
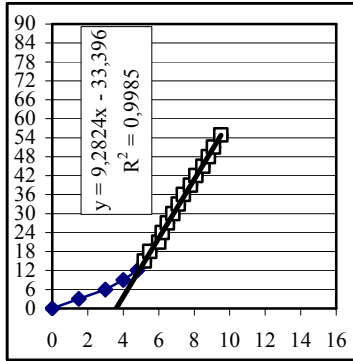
KS040 – 37,5



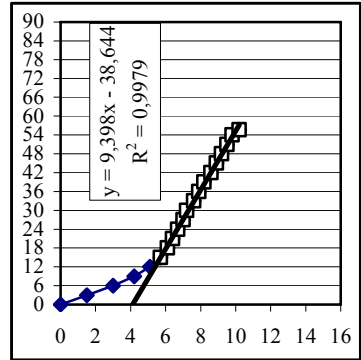
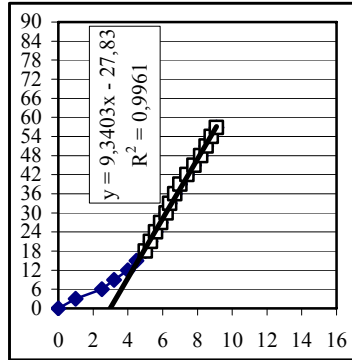
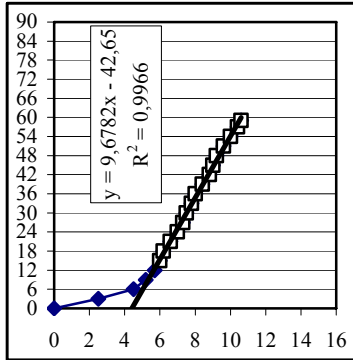
KS050 – 37,5



KS40 – 37,5

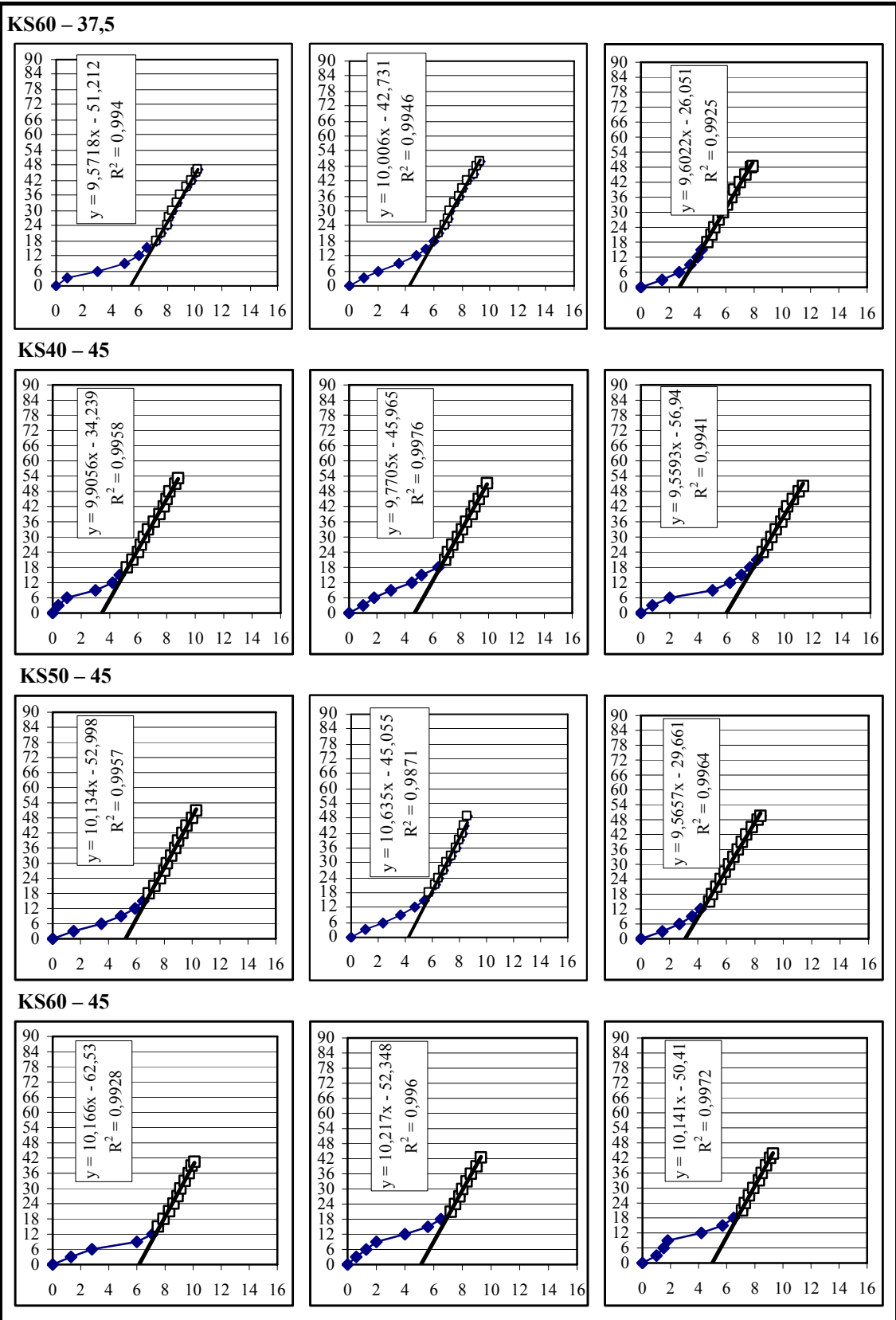


KS50 – 37,5



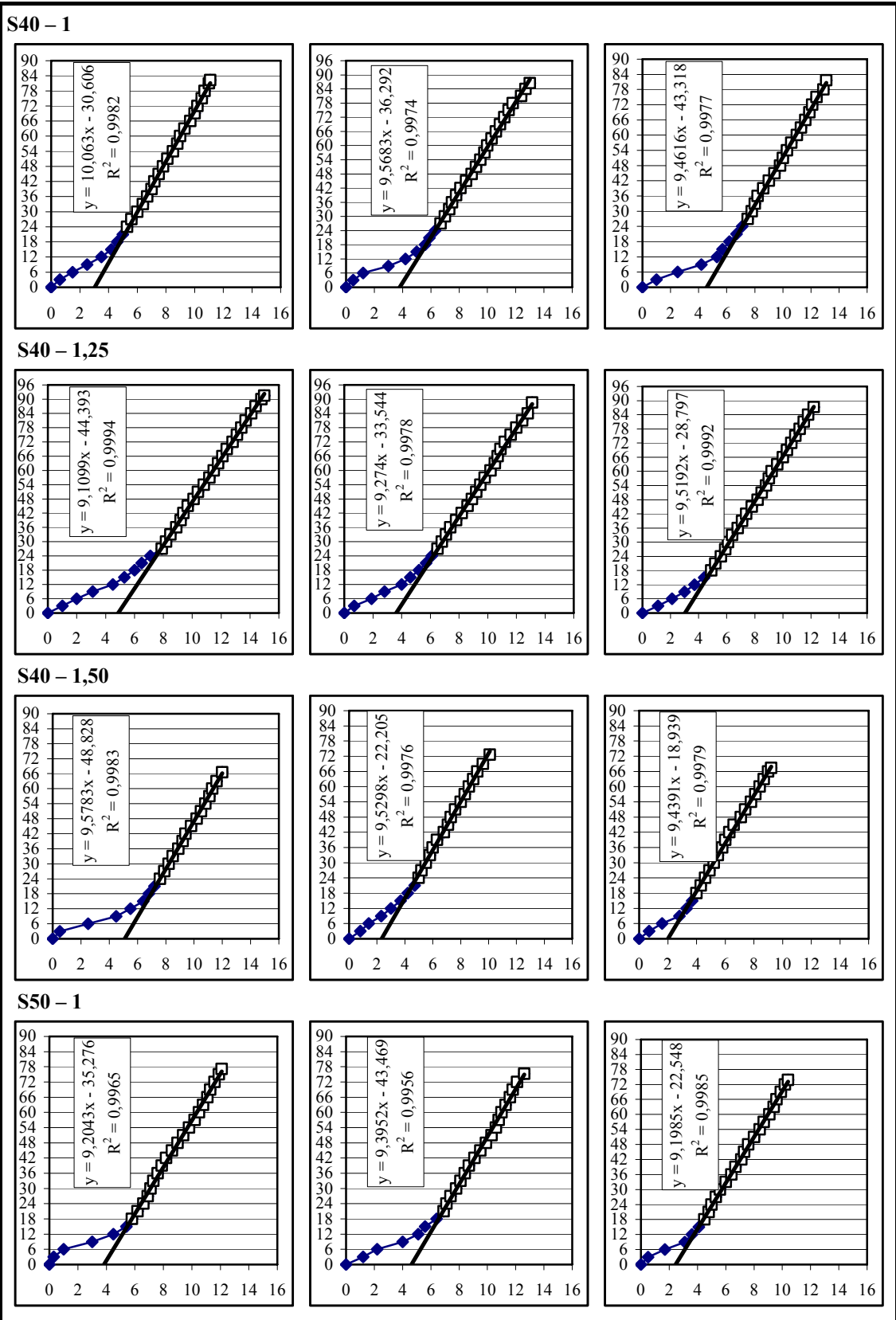
Şekil 2.1. Çekme kuvveti – donatıda oluşan deformasyon ilişkisi (x: mm; y: kN) -1

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular



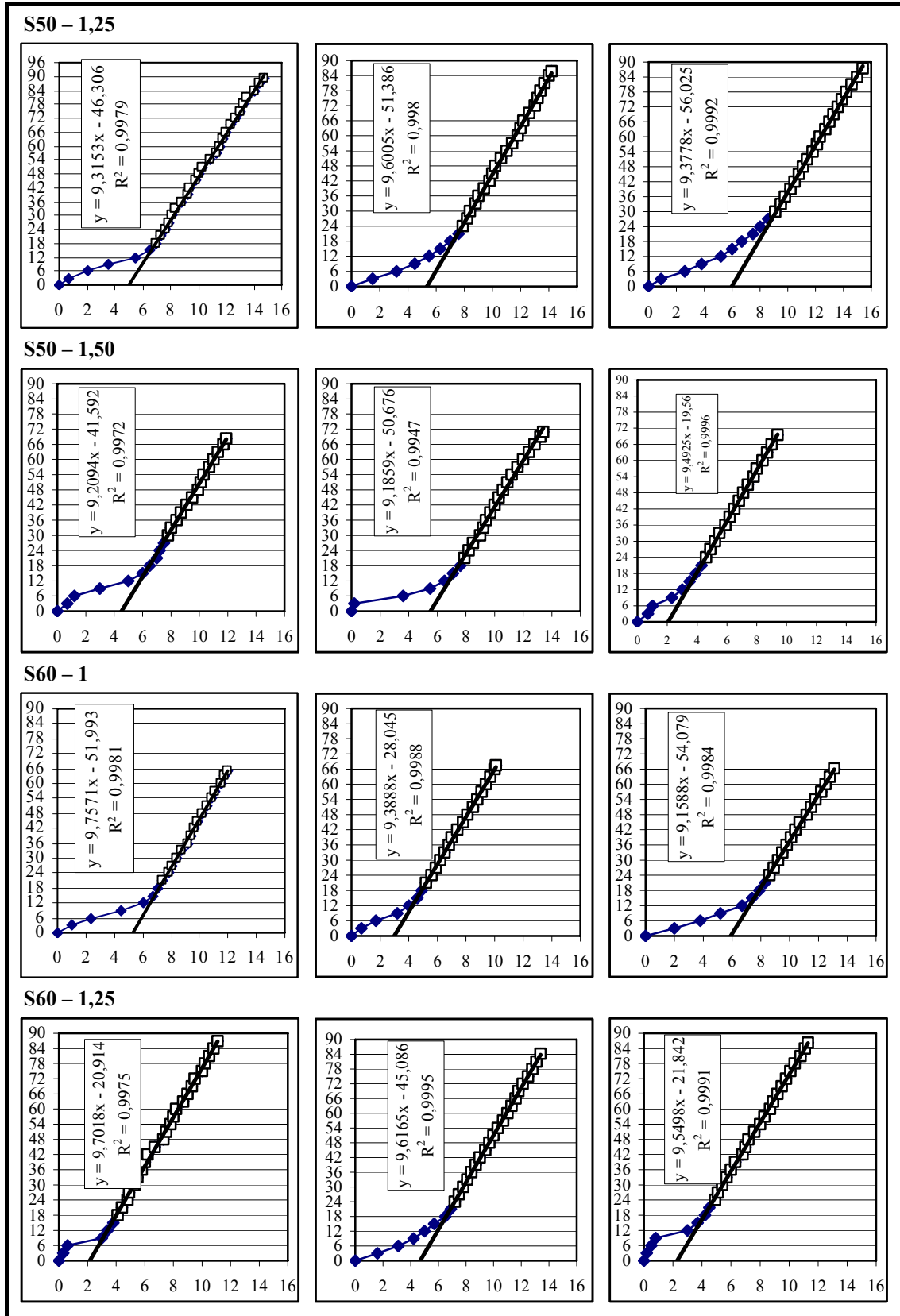
Şekil 2.2. Çekme kuvveti – donatıda oluşan deformasyon ilişkisi (x: mm; y: kN) -2

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular



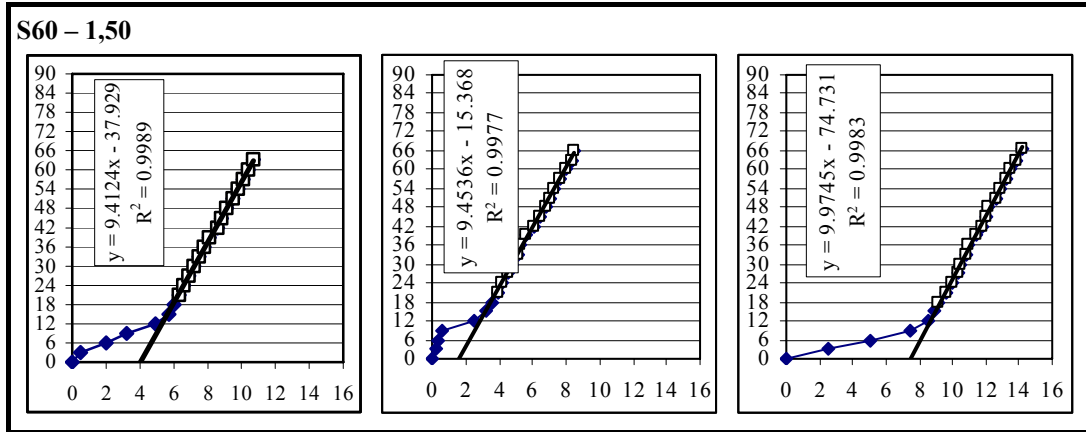
Şekil 2.3. Çekme kuvveti – donatıda oluşan deformasyon ilişkisi (x: mm; y: kN) -3

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular



Şekil 2.4. Çekme kuvveti – donatıda oluşan deformasyon ilişkisi (x: mm; y: kN) -4

EK-2. (Devam) Beton deneylerine ait ayrıntılı bulgular



Şekil 2.5. Çekme kuvveti – donatıda oluşan deformasyon ilişkisi (x: mm; y: kN) -5

Çizelge 2.19. Donatıda oluşan “ilk deformasyon”, “son deformasyon” ve “net deformasyon” değerleri

NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ			2. SONUÇ			3. SONUÇ		
		P (kN)	İlk def. (mm)	Son def. (mm)	P (kN)	İlk def. (mm)	Son def. (mm)	P (kN)	İlk def. (mm)	Son def. (mm)
1.	KS040 – 37,5	49,7	2,67	8,0	54,9	7,53	13,1	53,1	4,43	9,7
2.	KS050 – 37,5	54,4	4,74	10,1	56,5	6,24	12,0	52,1	5,83	11,7
4.	KS40 – 37,5	54,9	3,60	9,5	58,9	2,37	8,5	55,8	7,04	13,0
5.	KS50 – 37,5	59,0	4,41	10,6	56,8	2,98	9,1	55,7	4,11	10,2
6.	KS60 – 37,5	46,3	5,35	10,2	49,5	4,27	9,3	48,4	2,71	7,9
7.	KS40 – 45	53,2	3,46	8,8	51,2	4,70	9,9	50,1	5,96	11,3
8.	KS50 – 45	50,9	5,23	10,3	48,7	4,24	8,6	49,5	3,10	8,4
9.	KS60 – 45	40,5	6,15	10,1	42,5	5,12	9,3	43,7	4,97	9,3
10.	S40 – 1	82,3	3,04	11,1	86,5	3,79	13,0	81,7	4,58	13,1
11.	S40 – 1,25	91,5	4,87	15,0	88,6	3,62	13,1	87,3	3,03	12,2
12.	S40 – 1,50	66,6	5,10	12,00	72,6	2,33	10,1	67,4	2,01	9,2
13.	S50 – 1	77,1	3,83	12,1	75,2	4,63	12,6	73,8	2,45	10,4
14.	S50 – 1,25	89,1	4,97	14,7	85,7	5,35	14,2	87,5	5,97	15,4
15.	S50 – 1,50	68,3	4,52	11,9	70,9	5,52	13,4	69,5	2,06	9,4
16.	S60 – 1	65,1	5,33	12,0	67,5	2,99	10,1	66,3	5,90	13,1
17.	S60 – 1,25	86,9	2,16	11,1	84,2	4,69	13,4	86,3	2,29	12,3
18.	S60 – 1,50	63,2	4,03	10,7	65,7	1,63	8,5	66,5	7,49	14,2
NO	SERİ KODLARI	1. SONUÇ		2. SONUÇ		3. SONUÇ		STS	ORT. (mm)	
		P (kN)	Net def. (mm)	P (kN)	Net def. (mm)	P (kN)	Net def. (mm)		P (kN)	Net def. (mm)
1.	KS040 – 37,5	49,7	5,33	54,9	5,57	53,1	5,27	0,159	52,6	5,4
2.	KS050 – 37,5	54,4	5,36	56,5	5,76	52,1	5,87	0,268	54,3	5,7
4.	KS40 – 37,5	54,9	5,90	58,9	6,13	55,8	5,96	0,119	56,5	6,0
5.	KS50 – 37,5	59,0	6,19	56,8	6,12	55,7	6,09	0,051	57,2	6,1
6.	KS60 – 37,5	46,3	4,85	49,5	5,03	48,4	5,19	0,170	48,1	5,0
7.	KS40 – 45	53,2	5,34	51,2	5,20	50,1	5,34	0,081	51,5	5,3
8.	KS50 – 45	50,9	5,07	48,7	4,36	49,5	5,30	0,490	49,7	4,9
9.	KS60 – 45	40,5	3,95	42,5	4,18	43,7	4,33	0,191	42,2	4,2
10.	S40 – 1	82,3	8,06	86,5	9,21	81,7	8,52	0,579	83,5	8,6
11.	S40 – 1,25	91,5	10,13	88,6	9,48	87,3	9,17	0,490	89,1	9,6
12.	S40 – 1,50	66,6	6,90	72,6	7,77	67,4	7,19	0,443	68,9	7,3
13.	S50 – 1	77,1	8,27	75,2	7,97	73,8	7,95	0,179	75,4	8,1
14.	S50 – 1,25	89,1	9,73	85,7	8,85	87,5	9,43	0,447	87,4	9,3
15.	S50 – 1,50	68,3	7,38	70,9	7,88	69,5	7,34	0,301	69,6	7,5
16.	S60 – 1	65,1	6,67	67,5	7,11	66,3	7,20	0,284	66,3	7,0
17.	S60 – 1,25	86,9	8,94	84,2	8,71	86,3	10,01	0,694	85,8	9,2
18.	S60 – 1,50	63,2	6,67	65,7	6,87	66,5	6,71	0,106	65,1	6,8

EK-3. TEM analizlerine ait ayrıntılı bulgular ve görüntüler

Çizelge 3.1. CH boyutu özet ölçüler

NO	SERİ KODU	1. BOYUT (µm)	2. BOYUT (µm)	3. BOYUT (µm)	CH BOYUTU (µm)	STS
1.	KS040 – 37,5	2,00	1,54	1,38	1,640	0,322
2.	KS050 – 37,5	1,92	1,69	1,85	1,820	0,118
3.	KS060 – 37,5	1,92	2	2,23	2,050	0,161
4.	KS40 – 37,5	1,25	1,54	1,81	1,533	0,280
5.	KS50 – 37,5	1,44	1,00	2,5	1,647	0,771
6.	KS60 – 37,5	1,73	2,12	1,73	1,860	0,225
7.	KS40 – 45	2,12	1,92	1,46	1,833	0,338
8.	KS50 – 45	2,4	1,46	2,19	2,017	0,493
9.	KS60 – 45	3,07	1,92	1,15	2,047	0,966
10.	S40 – 1	0,77	1,27	1,58	1,207	0,409
11.	S40 – 1,25	1,15	0,85	0,73	0,910	0,216
12.	S40 – 1,50	1,23	1,31	1,12	1,220	0,095
13.	S50 – 1	1,6	1,65	1,42	1,557	0,121
14.	S50 – 1,25	1,39	1,02	1,13	1,180	0,190
15.	S50 – 1,50	1,54	1,5	1,73	1,590	0,123
16.	S60 – 1	1,81	1,63	1,58	1,670	0,121
17.	S60 – 1,25	1,08	1,96	1,27	1,437	0,463
18.	S60 – 1,50	1,46	2,02	1,92	1,800	0,299



Resim 3.1. Tem analizleri ile ilgili olarak numune hazırlama sürecine ilişkin görüntüler

EK-4. Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Bu bölümde sunulan eşitlikler; elde edilmiş biçimlerine göre; “kaynaktan” ve “türetilmiş” ifadeleri ile tanımlanmıştır. “Kaynaktan” tanımı; sunulan eşitliğin, belirtilen kaynaktan doğrudan alındığını ifade etmektedir. “Türetilmiş” ise; referans gösterilen kaynaklardan elde edilen sayısal veriler arasındaki ilişkinin, bu çalışmada sorgulanması ile araştırmacı tarafından, türetilen eşitliklerdir. Tüm eşitlikler ile ilgili standart ve bazı eşitlikler ile ilgili özel açıklamalar; eşitliğin altında özet olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Taze beton yoğunluğu ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$p_{tby} = [(0,8743 \times p_{eky}) + 0,2986]$					(4.1)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde edilmiş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	5	Türetilmiş	0,951	[94]

Çizelge 4.2. Taze beton kıvamı ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$C_m = [(3,8842 \times p_{eky}) - 1,2729]$					(4.2)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde edilmiş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	10	Türetilmiş	0,869	[23]

Çizelge 4.3. Su emme oranı ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eş.
$W_{seo} = [(-10,733 \times p_{eky}) + 26,62]$ $W_{seo} = [(9,3556 \times p_{eky}^2) - (42,518 \times p_{eky}) + 52,563]$					(4.3)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde edilmiş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Ponza, normal	14	Türetilmiş	0,869 ve 0,931	[92]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$W_{seo} = [(-33,382 \times p_{eky}) + 67,852]$					(4.4)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde edilmiş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,988	[92]

Çizelge 4.4. Isı iletkenlik değeri ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$\lambda = [(2,6475 \times p_{eky}) - 4,2444]$					(4.5)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde edilmiş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydthb, tdtb	Yapay hafif, normal	9	Türetilmiş	0,678	[16]
Yukarıdaki eşitlik, belirtilen kaynaktan, yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar ile ilgili olarak literatürden verilen örneklerin ve aynı kaynaktan, taşıyıcı normal betonlara ilişkin olarak sunulan iki verinin bir arada ilişkilendirilmesi ile oluşturulmuştur.					
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$\lambda = [(1,8229 \times p_{eky}) - 2,6492]$					(4.6)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde edilmiş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif, normal	7	Türetilmiş	0,771	[16]
Yukarıdaki eşitlik, belirtilen kaynaktan, yüksek dayanımlı taşıyıcı hafif betonlar ile ilgili olarak literatürden verilen örneklerin ilişkilendirilmesi ile oluşturulmuştur.					
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$\lambda = [(0,8165 \times p_{eky}) + 0,6033]$					(4.7)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde edilmiş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,860	[8]

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.4. (Devam) Isı iletkenlik değeri ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 4						Eşitlik no
$\lambda = \left[(0,00035 \times p_{eky}) - 0,077 \right]$ veya $\lambda = \left[(0,3478 \times p_{eky}) - 0,095 \right]$						(4.8)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no	
Hab	Ponza	3	Kay. ve türetilmiş	0,936	[58]	
• İlk eşitlikte etüv kuru yoğunluk; kg/m ³ olarak kaynaktan alınmıştır. İkinci eşitlikte ise birimi; Mg/m ³ 'tür						
EŞİTLİK - 5						Eşitlik no
$\lambda = 0,072 \times e^{0,00125 \times p_{eky}}$, $\lambda = 0,072 \times e^{1,25 \times p_{eky}}$						(4.9)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no	
Ydtyhb	Yapay hafif	-	Kaynaktan	-	[16]	
- Sunulan eşitlik, yoğunluğu (0,32-3,20) Mg/m³ arasında olan ve mahfazalı sıcak plaka cihazı ile ölçüm alınmış, etüv kuru kütleye sahip tüm betonların ısı iletkenlik değerleri için, Volero tarafından türetilmiş, Holm tarafından doğruluğu sınanmıştır. - Peky değerinin kg/m³ cinsinden verilmesi gerekmektedir. Son eşitlikte bu değer; Mg/me'e dönüştürülmüştür. 1,6 Mg/m³ yoğunluktan sonra, yavaş yavaş gerçekten sapmaların başladığı, bu durumun normal agrega kullanımında belirginleştiği ve aşırı kristalize yapıdaki normal agregalı betonlarda ise, eşitliğin, gerçekten düşük tahmin yaptığını bildirilmiştir [16].						
EŞİTLİK - 6						Eşitlik no
$\lambda = \left[(0,2013514 \times p_{eky}) + 0,07756616 \right]$ (Eşitlik, yoğunluk; Mg/m ³ olacak şekilde değiştirilmiştir)						(4.10)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no	
Hab	Perlit, ponza	-	Kaynaktan	0,89	[54]	
EŞİTLİK - 7						Eşitlik no
$\lambda = \left[(0,00027 \times p_{eky}) - 0,011 \right]$, $\lambda = \left[(0,27 \times p_{eky}) - 0,011 \right]$ (p_{eky} ; Mg/m ³ 'e çevrilmiştir)						(4.11)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no	
Gaz beton	yok	-	Kaynaktan	-	[58]	
• Etüv kuru yoğunluk; kg/m ³ olarak alınmıştır, "Konuğun araştırmasından referans olarak verilmiştir.						

Çizelge 4.5. Ultrases geçiş hızı ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1						Eşitlik no
$V_u = \left[(1,0523 \times p_{eky}) + 2,0977 \right]$ veya $V_u = \left[(-1,0184 \times p_{eky}^2) + (4,3816 \times p_{eky}) - 0,5583 \right]$						(4.12)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no	
Thb	Ponza	8	Türetilmiş	0,940	[65]	

Çizelge 4.6. Elastiklik modülü değeri ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1						Eşitlik no
$E = \left[(18,491 \times p_{eky}) + 12,749 \right]$ veya $E = \left[(158,69 \times p_{eky}^2) - (365,48 \times p_{eky}) + 219,2 \right]$						(4.13)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no	
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,910	[8]	
EŞİTLİK - 2						Eşitlik no
$E = \left[(24,473 \times p_{eky}) - 21,87 \right]$ veya $E = \left[(19,875 \times p_{eky}^2) - (40,502 \times p_{eky}) + 29,963 \right]$						(4.14)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no	
Thb	Ponza	8	Türetilmiş	0,965	[65]	

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.7. Eğilme dayanım değeri ve etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$f_e = \left[(31,865 \times p_{eky}) + 46,866 \right] \text{ veya } f_e = \left[(298,07 \times p_{eky}^2) - (948,47 \times p_{eky}) + 758,91 \right]$					(4.15)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	7	Türetilmiş	0,973	[168]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$f_e = \left[(11,636 \times p_{eky}) - 8,6645 \right] \text{ veya } f_e = \left[(106,29 \times p_{eky}^2) - (245,55 \times p_{eky}) + 146,7 \right]$					(4.16)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,889	[8]

Çizelge 4.8. Aderans dayanımı ve etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$T_\varphi = \left[(15,536 \times P_{eky}) - 7,3963 \right]$					(4.17)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Karma	4	Türetilmiş	0,926	Notta
• Yukarıda sunulan eşitlik, [105, 106] nolu kaynaklarda sunulan deneysel verilerin ilişkilendirilmesi sonucunda elde edilmiştir.					

Çizelge 4.9. Taze beton yoğunluğu ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$p_{tby} = \left[(0,0136 \times f_{sil}) + 1,1095 \right], p_{tby} = \left[(0,0005 \times f_{sil}^2) - (0,0558 \times f_{sil}) + 3,5142 \right]$					(4.18)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
ydythb, ydthb	Yapay hafif, normal	19	Türetilmiş	0,524 ve 0,670	[44]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$p_{tby} = \left[(0,0135 \times f_{sil}) + 0,9817 \right]$					(4.19)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif, normal	5	Türetilmiş	0,949	[94]
• Veriler 63 günlük numunelerden elde edilmiştir					
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$p_{tby} = \left[(0,0091 \times f_{sil}) + 1,5455 \right]$					(4.20)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Skoria	4	Türetilmiş	0,902	[38]
EŞİTLİK - 4					Eşitlik no
$p_{tby} = \left[(0,0576 \times f_{sil}) + 0,7997 \right], p_{tby} = \left[(-0,002 \times f_{sil}^2) + (0,1306 \times f_{sil}) + 0,4503 \right]$					(4.21)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Hab	Yapay hafif, normal	8	Türetilmiş	0,883 ve 0,991	[50]
• İlgili eşitlik elde edilirken 90 günlük numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri kullanılmıştır.					

Çizelge 4.10. Taze beton kıvamı ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$C_m = \left[(-0,0202 \times f_{sil}^2) + (2,2114 \times f_{sil}) - 37,738 \right]$					(4.22)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	6	Türetilmiş	0,752	[16]

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.10. (Devam) Taze beton kıvamı ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$C_m = \left[(0,1916 \times f_{sil}) + 1,7045 \right]$					(4.23)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	10	Türetilmiş	0,966	[23]
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$C_m = \left[(0,2319 \times f_{sil}^2) - (12,491 \times f_{sil}) + 181,9 \right]$					(4.24)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	7	Türetilmiş	0,889	[161]

Çizelge 4.11. Etüv kurusu yoğunluk ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$p_{eky} = \left[(0,0153 \times f_{sil}) + 0,7863 \right]$					(4.25)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	5	Türetilmiş	0,985	[94]
• Veriler 63 günlük numunelerden elde edilmiştir					
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$p_{eky} = \left[(0,0035 \times f_{sil}) + 1,8299 \right]$					(4.26)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tyhb, ydythb	Karma	10	Türetilmiş	0,508	Notta
• Yukarıda sunulan eşitlik; [6, 9, 16, 58, 79] nolu kaynaklarda; yüksek ve normal dayanımlı taşıyıcı yarı hafif betonlar için sunulan verilerin bir araya getirilmesi ve ilişkilendirilmesi sonucunda elde edilmiştir					
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$p_{eky} = \left[(0,0102 \times f_{sil}) + 1,0195 \right], p_{eky} = \left[(-0,001 \times f_{sil}^2) - (0,053 \times f_{sil}) + 0,6006 \right]$					(4.27)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,883	[8]
EŞİTLİK - 4					Eşitlik no
$p_{eky} = \left[(0,0141 \times f_{sil}) + 1,1652 \right], p_{eky} = \left[(-0,0003 \times f_{sil}^2) + (0,0394 \times f_{sil}) + 0,7635 \right]$					(4.28)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	8	Türetilmiş	0,886 ve 0,976	[65]

Çizelge 4.12. Su emme oranı ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik
$W_{seo} = \left[(-0,7529 \times f_{sil}) + 19,058 \right], W_{seo} = \left[(0,0944 \times f_{sil}^2) - (3,7791 \times f_{sil}) + 41,277 \right]$					(4.29)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Hab	Ponza	14	Türetilmiş	0,692 ve 0,883	[92]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$W_{seo} = \left[(-0,1399 \times f_{sil}) + 6,9804 \right]$					(4.30)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Hab	Ponza	5	Türetilmiş	0,982	[92]
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$W_{seo} = \left[(-1,2945 \times f_{sil}) + 41,021 \right]$					(4.31)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	14	Türetilmiş	0,553	

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.13. Porozite oranı ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1 - POROZİTE ORANI					Eşitlik no
$g = [(-0,1512 \times f_{sil}) + 12,866], g = [(-0,0146 \times f_{sil}^2) + (0,747 \times f_{sil}) - 0,0736]$					(4.32)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karışık	Karma	6	Türetilmiş	0,440 ve 0,665	[167]
Araştırmada 10'luk küpten elde edilen basınç dayanım değerleri; "0,8" katsayısı ile küçültülerek kullanılmıştır. Ayrıca, değerler grafikten elde edildiği için, yaklaşık değerlerdir.					

Çizelge 4.14. Isı iletkenlik değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$\lambda = [(-0,0111 \times f_{sil}) + 0,5926]$					(4.33)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Skoria	3	Türetilmiş	0,975	[39]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$\lambda = [(0,0095 \times f_{sil}) + 0,2058]$					(4.34)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,991	[8]

Çizelge 4.15. Ultrases geçiş hızı değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$V_u = [(0,0399 \times f_{kb,sil}) + 3,6023]$					(4.35)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	3	Türetilmiş	0,994	[64]
Referans basınç dayanım değerleri elde edilirken, 10 cm'lik küplerden elde edilen değerler, 0,8 katsayısı ile azaltılmıştır.					
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$V_u = [(0,0139 \times f_{sil}) + 3,7954], V_u = [(-0,0007 \times f_{sil}^2) + (0,0625 \times f_{sil}) + 3,0872]$					(4.36)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	4	Türetilmiş	0,779 ve 0,975	[60]
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$V_u = [(0,0309 \times f_{sil}) + 3,4156]$					(4.37)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	6	Türetilmiş	0,957	[63]
Deneyler, 30 yıllık numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.					
EŞİTLİK - 4					Eşitlik no
$V_u = [(0,014 \times f_{sil}) + 3,348], V_u = [(-0,0005 \times f_{sil}^2) + (0,0524 \times f_{sil}) + 2,7397]$					(4.38)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	8	Türetilmiş	0,751 ve 0,928	[65]
EŞİTLİK - 5					Eşitlik no
$V_u = [(0,0433 \times f_{sil}) + 2,5122], V_u = [(-0,0019 \times f_{sil}^2) + (0,118 \times f_{sil}) + 2,0862]$					(4.39)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Hab	Yapay hafif	8	Türetilmiş	0,832 ve 0,979	[50]
İlgili eşitlik elde edilirken 90 günlük numunelerden elde edilen değerler kullanılmıştır.					
EŞİTLİK - 6					Eşitlik no
$V_u = [(0,0457 \times f_{b,10.luk\ küp}) + 3,1969]$ veya $V_u = [(0,0399 \times f_{kb,sil}) + 3,6023]$					(4.40)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	3	Kaynaktan	0,963	[64]

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.15. (Devam) Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK – 7 ve 8					Eş.
$f_{kb,sil} = 0,12 \times e^{1,36 \times V_u}, V_u = \left[\frac{\ln\left(\frac{f_{kb,sil}}{0,12}\right)}{1,36} \right] \quad f_{kb,sil} = 0,071 \times e^{1,597 \times V_u} \quad V_u = \left[\frac{\ln\left(\frac{f_{kb,sil}}{0,071}\right)}{1,597} \right]$					(4.41) ve (4.42)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Hab	Yapay hafif		Kaynaktan	Yük. old. bil.	[50]
• İlgili kaynakta referans olarak sunulmuş					

Çizelge 4.16. Schmidt sertlik değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK – 1					Eşitlik no
$r = \left[(0,207 \times f_{sil}) + 30,549 \right], r = \left[(-0,0083 \times f_{sil}^2) + (0,7927 \times f_{sil}) + 22,005 \right]$					(4.43)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Tnb	Normal	4	Türetilmiş	0,855 ve 0,997	[60]
EŞİTLİK – 2					Eşitlik no
$r = \left[(1,3883 \times f_{b,10.luk\ küp}) - 11,898 \right] \text{ veya } r = \left[(0,9165 \times f_{kb,sil}) + 8,4353 \right]$					(4.44)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Tnb	Normal	3	Kaynaktan ve türetilmiş	0,951	[64]
• Referans basınç dayanım değerleri elde edilirken; 10 cm'lik küplerden elde edilen değerler, 0,8 katsayısı ile azaltılmıştır.					
EŞİTLİK – 3					Eşitlik no
$r = \left[(0,5144 \times f_{kb,sil}) + 15,703 \right]$					(4.45)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Karma	-	30	Türetilmiş	0,997	[60]
• Yukarıda sunulan eşitlik, DIN 4240 ta betonun schmidt sertlik değeri ile ortalama basınç dayanım değerleri arasında ilişkiyi özetleyen referans tablodan türetilmiştir. Ayrıca, kullanılan schmidt sertlik değerleri süreç ve karbonatlaşma olabileceği ihtimali göz önüne alınarak, 0,95 katsayısı ile azaltılmıştır.					
EŞİTLİK – 4					Eşitlik no
$r = \left[(0,7702 \times f_{sil}) + 15,893 \right], r = \left[(-0,0107 \times f_{sil}^2) + (1,2063 \times f_{sil}) + 13,005 \right]$					(4.46)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Hab	Yapay hafif	8	Türetilmiş	0,964 ve 0,978	[50]
• İlgili eşitlik elde edilirken 90 günlük numunelerden elde edilen değerler kullanılmıştır.					
EŞİTLİK – 5					Eşitlik no
$f_{kb,sil} = \left[(1,4067 \times r) - 7,0467 \right] \text{ veya } r = \left[\frac{(f_{kb,sil} + 7,0467)}{1,4067} \right]$					(4.47)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Tnb	Normal	14	Kaynaktan	0,913	[61]
EŞİTLİK – 6					Eşitlik no
$f_{kb,sil} = \left[(4,131 \times r) - 121,72 \right] \text{ veya } r = \left[\frac{(f_{kb,sil} + 121,72)}{4,131} \right]$					(4.48)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Tnb	Normal	4	Kaynaktan	0,855	[60]

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.16. (Devam) Schmidt sertlik değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 7					Eşitlik no
$f_{kb,sil} = 0,954 \times e^{0,093 \times r} \text{ veya } r = \frac{\ln\left(\frac{f_{kb,sil}}{0,954}\right)}{0,093}$					(4.49)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Hab	Yapay hafif	6	Kaynaktan	0,978	[50]

Çizelge 4.17. Elastiklik modülü değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$E = \left[(0,3006 \times f_{kb,sil}) + 22,293 \right] \text{ (Eşitlik TS 500'de sunulan değerlerden türetilmiştir)}$					(4.50)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Tnb	Normal	9	Türetilmiş	0,992	[174]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$E = \left[(-0,6477 \times f_{sil}) + 73,963 \right] \text{ (98 günlük numunelerden elde edilen değerler kullanılmıştır)}$					(4.51)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	3	Türetilmiş	0,956	[41]
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$E = \left[(0,2975 \times f_{sil}) + 18,92 \right]$					(4.52)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydtyhb	Yapay hafif	5	Türetilmiş	0,759	[21, 22]
EŞİTLİK - 4					Eşitlik no
$E = \left[(0,4359 \times f_{sil}) + 5,2564 \right] \text{ veya } E = \left[(0,0531 \times f_{sil}^2) - (6,2571 \times f_{sil}) + 205,28 \right]$					(4.53)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	7	Türetilmiş	0,866	[168]
EŞİTLİK - 5					Eşitlik no
$E = \left[(0,2506 \times f_{sil}) + 1,7391 \right]$					(4.54)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	5	Türetilmiş	0,911	[94]
• Veriler 7 günlük numunelerden elde edilmiştir.					
EŞİTLİK - 6					Eşitlik no
$E = \left[(0,1248 \times f_{sil}) + 20,898 \right], E = \left[(-0,0113 \times f_{sil}^2) + (1,1149 \times f_{sil}) - 0,6233 \right]$					(4.55)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	6	Türetilmiş	0,836 ve 0,892	[40]
• Araştırmada, 10 cm'lik küp numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri 0,8 katsayısı ile azaltılarak kullanılmıştır.					
EŞİTLİK - 7					Eşitlik no
$E = \left[(1,3216 \times f_{sil}) - 1,4131 \right]$					(4.56)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Thb, hab	Yapay hafif	8	Türetilmiş	0,974	[50]
• İlgili eşitlik elde edilirken 90 günlük numunelerden elde edilen değerler kullanılmıştır.					
EŞİTLİK - 8					Eşitlik no
$E = \left[(0,2107 \times f_{sil}) + 5,68 \right]$					(4.57)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,997	[8]

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.17. (Devam-1) Elastiklik modülü değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 9					Eşitlik no
$E = \left[(0,3636 \times f_{sil}) + 6,0114 \right]$					(4.58)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Thb	Ponza	8	Türetilmiş	0,954	[65]
EŞİTLİK - 10					Eşitlik no
$E = \left[35900 + (40 \times f_{kb, sil}) \right] \times \left(\frac{P_{eky}}{2300} \right)^{1,5}$					(4.59)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Ydthb	Hafif agregalar	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[87]
“NEN 5967” a göre (1400-2500) kg/m³ yoğunluğa sahip olan tüm beton çeşitlerinde sunulan eşitlik kullanılabilir. Bu eşitlik, ilgili kaynaktaki tdtb’lar için önerilmiştir. Elde edilen elastiklik modülü değerleri sonuçları; Mpa birimindedir.					
EŞİTLİK - 11					Eşitlik no
$E = 0,04 \times p_{eky}^{3/2} \times f_{kb, sil}^{1/2}$					(4.60)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Thb, Tnb	Karma	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[50]
Pauw’un yaptığı bilimsel araştırmaya göre; yoğunluğu (1440-2500) kg/m³ arasında, basınç dayanım değeri; 35 Mpa civarında olan betonların elastiklik modülü; sunulan eşitlik yardımıyla hesaplanabilir. Elde edilen sonuçlar; Mpa birimindedir.					
EŞİTLİK - 12					Eşitlik no
$E = 0,043 \times p_{eky}^{3/2} \times f_{kb, sil}^{1/2}$					(4.61)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Thb, Tnb	Karma	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[16, 40]
ACI 318’e göre; farklı yoğunluktaki betonların elastiklik modülü değerleri; eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.					
EŞİTLİK - 13					Eşitlik no
$E = 0,038 \times p_{eky}^{3/2} \times f_{kb, sil}^{1/2}$					(4.62)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Thb, Tnb	Karma	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[16]
ACI 213’e göre; en az 41 Mpa basınç dayanım değerine sahip olan farklı yoğunluktaki betonların elastiklik modülü değerleri verilen eşitlik yardımıyla hesaplanabilir. Elde edilen elastiklik modülü değeri sonuçları; Mpa birimindedir.					
EŞİTLİK - 14					Eşitlik no
$E = 4,73 \times f_{kb, sil}^{1/2}$					(4.63)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Thb, Tnb	Karma	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[12; 168]
ACI 318-95’e göre; birim hacim ağırlığı; 1440 ile 2480 kg/m³ arasında ve basınç dayanım değeri, 41 MPa kadar olan betonların elastiklik modülü değerleri; sunulan eşitlik kullanılarak teorik yoldan hesaplanabilir [12; 168]. Elde edilen değerler; Gpa birimindedir.					
EŞİTLİK - 15					Eşitlik no
$E = \left[(9980 \times f_{kb, sil}^{1/3}) \times \frac{P_{eky}}{2200} \right]$					(4.64)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Thb	Hafif agregalar	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[80]
“CEB – FIB MC 90”a göre, Elde edilen elastiklik modülü değerleri; Mpa birimindedir.					
EŞİTLİK - 16					Eşitlik no
$E = \left[(9500 \times f_{kb, sil}^{1/3}) \times \frac{P_{eky}}{2400} \right]$					(4.65)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R²)	Kaynak no
Thb, hab	Hafif agregalar	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[80]
“Eurocode 2” Standartları’na göre. Elde edilen elastiklik modülü değerleri; Mpa birimindedir.					

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.17. (Devam-2) Elastiklik modülü değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 17					Eşitlik no
$E = \left[(9500 \times f_{kb,sil}^{0,3}) \times \frac{p_{eky}}{2200} \right]$					(4.66)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
ydthb, hab	Hafif agregalar	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[80]
“NS 3473 (1998)” Standartları’na göre. Elde edilen elastiklik modülü değerleri; Mpa birimindedir.					
EŞİTLİK - 18					Eşitlik no
$E = \left[(3320 \times f_{kb,sil}^{0,5}) + 6900 \right] \times \left(\frac{p_{eky}}{2300} \right)^{1,5}$					(4.67)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Thb, tnb	Karma	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[13, 82, 98]
- Carrasquillo ve (21-83) Mpa basınç dayanım değerine sahip betonlarda (etüv kurusu yoğunluk değeri hesaplamaya katılarak veya katılmadan, son kısım olmadan) yukarıdaki eşitlik yüksek korelasyonda ilişki sağlamaktadır. - NZS 3101” standardına göre (1400-2500) kg/m³ yoğunluğa, sahip olan tüm beton çeşitlerinde sunulan eşitlik kullanılabilir					

Çizelge 4.18. Maksimum birim deformasyon ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$\varepsilon_0 = \left[(0,0157 \times f_{sil}) + 1,0023 \right]$					(4.68)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydtyhb	Yapay hafif	4	Türetilmiş	0,8738	[21, 22]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$\varepsilon_0 = \left[(1,753 \times f_{kb,sil}^{0,27756}) \times V_{sil}^{-0,09314} \right]$					(4.69)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Nab	Normal	-	Kaynaktan	Yüksek ol. bil.	[82]
- Arioğlu’nun gerçekleştirdiği araştırmaya göre; maksimum birim deformasyonlar; sunulan eşitlikten yararlanılarak bulunabilir. - V_{sil}; deneye tabi tutulan silindirin, cm³ cinsinden hacmini ifade etmektedir.					
EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$\varepsilon_0 = 11 \times 10^{-4} \times f_{kb,sil}^{0,20} \text{ veya } \varepsilon_0 = 1,1 \times f_{kb,sil}^{0,20} \text{ (x } 10^{-3} \text{ mm/mm sonucunu doğrudan elde etmek için)}$					(4.70)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Nab	Normal	-	Kaynaktan	-	[98]
Sunulan eşitlik Bluic tarafından belirtilen konuda yapılan analitik araştırmada 17 farklı kaynaktan aldığı formüller arası kurduğu ilişki sonucunda elde edilmiştir. (10-125) Mpa basınç dayanım değeri için geçerlidir.					

Çizelge 4.19. Eğilme dayanım değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 1					Eşitlik no
$f_e = \left[(0,0531 \times f_{sil}) + 1,4435 \right]$					(4.71)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydtyhb	Yapay hafif	5	Türetilmiş	0,959	[21, 22]
EŞİTLİK - 2					Eşitlik no
$f_e = \left[(0,2028 \times f_{sil}) + 5,2191 \right]$					(4.72)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R ²)	Kaynak no
Ydthb	Yapay hafif	5	Türetilmiş	0,907	[94]
Veriler 7 günlük numunelerden elde edilmiştir.					

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.19. (Devam-1) Eğilme dayanım değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 3					Eşitlik no
$f_e = \left[(0,1302 \times f_{sil}) + 1,0731 \right]$					(4.73)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Skoria	4	Türetilmiş	0,971	[38]
EŞİTLİK - 4					Eşitlik no
$f_e = \left[(1,222 \times f_{sil}) + 3,4586 \right]$ veya $f_e = \left[(0,0093 \times f_{sil}^2) - (0,5649 \times f_{sil}) + 15,82 \right]$					(4.74)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Skoria	4	Türetilmiş	0,909	[4, 5]
EŞİTLİK - 5					Eşitlik no
$f_e = \left[(0,1339 \times f_{sil}) + 2,9068 \right]$					(4.74)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Ponza	5	Türetilmiş	0,994	[8]
EŞİTLİK - 6					Eşitlik no
$f_e = 0,37 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.75)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	-	Kaynaktan	-	[91]
Sunulan eşitlik AASHO tarafından, normal agregalı betonlar için önerilmiştir. Eğilme ve basınç dayanım değerleri “ksi” cinsindendir. Ancak; FHWA’ya göre bu formül yüksek dayanımlı betonlarda gerçekten düşük değerler vermektedir.					
EŞİTLİK - 7					Eşitlik no
$f_e = 0,24 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.76)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	-	Kaynaktan	-	[91]
Sunulan eşitlik AASHO tarafından, normal agregalı betonlar için önerilmiştir. Eğilme ve basınç dayanım değerleri “ksi” cinsindendir. Ancak; FHWA’ya göre bu formül yüksek dayanımlı betonlarda gerçekten düşük değerler vermektedir.					
EŞİTLİK - 8					Eşitlik no
$f_e = 7,5 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.77)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Kyb	Normal	-	Kaynaktan	-	[146]
ACI 318’de kendiliğinden yerleşen betonlar için önerilmiştir. Basınç ve eğilme dayanım değerleri psi cinsinden verilmiştir.					
EŞİTLİK - 9					Eşitlik no
$f_e = 11,29 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.78)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Kyb	Normal	-	Kaynaktan	-	[146]
Horta’nın kendiliğinden yerleşen betonlar için önerdiği eşitliktir. Basınç ve eğilme dayanım değerleri psi cinsinden verilmiştir					
EŞİTLİK - 10					Eşitlik no
$f_e = 11,7 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.79)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Ydtnb	Normal	-	Kaynaktan	-	[9]
Sunulan eşitlik Yamao ve Kobayashi’nin araştırmasından referans olarak alınmıştır. Basınç ve eğilme dayanım değerleri; psi cinsinden verilmiştir. Sunulan eşitlik, (40-100) Mpa (6000 psi– 15000 psi) basınç dayanım değerine sahip yüksek dayanımlı betonlar için geçerlidir.					
EŞİTLİK - 11					Eşitlik no
$f_e = 0,20 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.80)
Beton tipi	İri agrega tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Thb	Hafif agregalar	-	Kaynaktan	-	[91]
Sunulan eşitlik AASHO tarafından, kum kullanılan hafif betonlar için önerilmiştir. Eğilme ve basınç dayanım değerleri “ksi” cinsindendir. Ancak; FHWA’ya göre bu formül yüksek dayanımlı betonlarda gerçekten düşük değerler vermektedir.					

EK-4. (Devam) Tartışma bölümünde kullanılan eşitlikler

Çizelge 4.19. (Devam-2) Eğilme dayanım değeri ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK - 11					Eşitlik no
$f_e = 0,62 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.81)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Normal	-	Kaynaktan	-	[98]
• Sunulan eşitlik Bluic tarafından belirtilen konuda yapılan analitik araştırma için, “ACI”dan alınmış ve referans olarak sunulmuştur.					
EŞİTLİK - 12					Eşitlik no
$f_e = 0,60 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.82)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Normal	-	Kaynaktan	-	[98]
• “AS 3600 (2001)” ve “CSA 23.3 (1994)”dan alınmış ve referans olarak sunulmuştur.					
EŞİTLİK - 13					Eşitlik no
$f_e = 0,12 \times f_{kb,sil}^{0,7}$					(4.83)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Normal	-	Kaynaktan	-	[98]
• Sunulan eşitlik Bluic tarafından belirtilen konuda yapılan analitik araştırma için, “BS 8007 (1997)”den alınmış ve referans olarak sunulmuştur.					
EŞİTLİK - 14					Eşitlik no
$f_e = 0,94 \times f_{kb,sil}^{1/2}$					(4.84)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Normal	-	Kaynaktan	-	[98]
• Bu eşitlik; “Carsquillo ve ark.’dan alınmış ve referans olarak sunulmuştur. Eşitlik (21-83) Mpa basınç değeri için geçerlidir.					
EŞİTLİK - 15					Eşitlik no
$f_e = 0,44 \times f_{kb,sil}^{2/3}$ (“Ahmad ve Shah -1985- ve Raphael 1984-)					(4.85)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Normal	-	Kaynaktan	-	[98]
EŞİTLİK - 16					Eşitlik no
$f_e = 0,53 \times f_{kb,sil}^{0,6}$					(4.86)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Normal	-	Kaynaktan	-	[98]
• Bluic’in araştırmasında, 12 farklı kaynaktan alınan formüller kullanılarak türetilmiştir. (11-126) Mpa basınç dayanım değeri için geçerlidir.					

Çizelge 4.20. Aderans dayanım ve basınç dayanım değeri ilişkisi

EŞİTLİK – 1					Eşitlik no
$T_{\varphi} = \left[(0,5377 \times f_{sil}) - 7,5664 \right]$					(4.87)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Karma	Karma	10	Türetilmiş	0,867	Notta
Eşitlik, [103, 105, 106, 111, 161] nolu beş farklı kaynaktan sunulan deneysel verilerin ilişkilendirilmesi sonucunda elde edilmiştir.					
EŞİTLİK – 2					Eşitlik no
$T_{\varphi} = \left[(0,3403 \times f_{sil}) - 1,9347 \right]$					(4.88)
Beton tipi	İri agregası tipi	Veri sayısı	Elde ediliş biçimi	Korelasyon (R^2)	Kaynak no
Tnb	Normal	6	Kaynaktan	-	[114]

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÖNÜL, Hatice
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 26.01.1972 Diyarbakır
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 496 27 67
 Faks : 0 (412) 248 84 04
 e-mail : hatice@dicle.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Mimarlık Bölümü	2000
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Mimarlık Bölümü	1995
Lise	Ziya Gökalp Lisesi	1989

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1996-2007	Dicle Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Özdeniz, M.B., Bekleyen, A., Gönül, İ.A., Gönül, H., Sarıgöl, H., Dalkılıç, N., Yıldırım, M. ve İlter, T., “Geçmişten geleceğe Harran yöresel mimarisi”, Yapı, 198: 94-101, 1998.
- Özdeniz, M.B., Bekleyen, A., Gönül, İ.A., Gönül, H., Sarıgöl, H., İlter, T., Dalkılıç, N. ve Yıldırım, M., “Vernacular domed houses of Harran”, Habitat International, 22 (4): 477-485, 1998.

3. Gönül, H. ve Demirel, F., “Prefabrike endüstri yapıları üzerine bir alan araştırması: Diyarbakır Birinci Organize Sanayi Bölgesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18 (1): 169-184, 2003.
4. Özdeniz, M.B., Bekleyen, A., Gönül, İ.A., Gönül, H., Sarıgöl, H., İlter, T., Dalkılıç, N. ve Yıldırım, M., “Toprağın sırrı- veya Harran yöresel mimarisi”, GAP Bölgesinde Kültür Varlıklarının Korunması, Yaşatılması ve Tanıtılması Sempozyumu, Ş.Urfa, 203-212, 1998.

Hobiler

Sinema, Müzik, Paraşüt Sporü, Geleneksel Takı Tasarımı