

2251

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ İNŞAAT FAKÜLTESİ

BAĞLAYICI HAMURUN YAPISININ BETONUN KISA SURELİ İNELASTİK DAVRANIŞINDAKİ İŞLEVİ

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesince
«Doktor»
ünvanının verilmesi için kabul edilen tezdır.

Yük. Müh. Osman N. OKTAR

Tezin Dekanlığa Verildiği Tarih : 11 Kasım 1976
Tezin Müdafaa Edildiği Tarih : 18 Şubat 1977

Doktorayı Yöneten Profesör : Prof. Bekir POSTACIOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ferruh KOCATAŞKIN
Prof. Dr. Yaşar ATAN

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT FAKÜLTESİ MATBAASI

1 9 7 7

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon

Tezimi yöneten ve çalışmalarım boyunca her türlü yardım ve desteği esirgemeyen Hocam Sayın Prof.Bekir Postacıoğlu'na; araştırmamın başından sonuna kadar değerli fikir ve uyarılardan sürekli olarak yararlandığım Sayın Doç.Dr.M.Süheyl Akman'a ; çalışmamla yakından ilgilenmek lûtfunda bulunan doktora jürisi üyeleri Sayın Prof,Dr,Ferruh Kocataşkın ve Sayın Prof.Dr.Yaşar Atan'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırma İ.T.Ü.Araştırma İşleri Mûtevelli Heyetince desteklenmiş ve deneyler İ.T.Ü.İnşaat Fakültesi Yapı Malze - mesi Lâboratuarında yapılmıştır. Adı geçen kuruluşlara ve mensuplarına teşekkürü borç bilirim.

Ö Z E T

Bu çalışmada bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli tek eksenli basınç yükleri altındaki inelâstik davranışındaki işlevi incelenmektedir. Bu amaçla, üretilen betonlarda agrega fazının karakteristikleri (agreganın cinsi, granülometrisi, beton içindeki hacim oranı) sabit tutulmuş, buna karşı bağlayıcı hamurun yapısı çeşitli yöntemlerle değiştirilmiştir ; ancak betonların önemli bir bölümünde bu yöntem 2 farklı agrega granülometrisinde ayrı ayrı uygulanmıştır. Bağlayıcı hamurun yapısı Su/Çimento oranını değiştirerek, beton içine hava sürükleyerek, çimentonun bir bölümünü uçucu külle veya kalker filleri ile ikame ederek değiştirilmiştir. Bu şekilde elde edilen çeşitli betonlardan üretilmiş silindir şeklindeki numunelerde, belirli sıcaklık ve rutubet koşullarında, enine ve boyuna şekildeğiştirmeler ölçülerek kısa süreli basınç deneyleri uygulanmıştır.

Deney sonuçları, bağlayıcı hamurun yapısının betonun tek eksenli basınç altındaki kısa süreli davranışında önemli bir işlevi olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada, betonun elâstiklik modülünün bağlayıcı hamurun kılcal boşluk yapısına (mikroyapısına) karşı duyarlı olmadığı ve yalnızca agregalar arasındaki toplam jel miktarı ile ilgili bulunduğu ; buna karşı inelâstik özelliklerin (süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve bu gerilmelerle ilgili şekildeğiştirmeler) hamur mikroyapısına karşı duyarlı olduğu ve sadece toplam jel miktarı ile ilgili parametrelerin Jel/Hacim oranı gibi) inelastik özellikleri belirtmeyeceği gösterilmiştir. Araştırmada elde edilen sonuçlara göre İri Agrega - Harç bağ dayanımları bağlayıcı hamurun Su/Çimento oranından önemli derecede etkilenmekte ve bu durum süreksizlik sınırının ve aynı zamanda Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı oranının da Su/Çimento oranından belirli şekilde etkilenmesine yol açmaktadır. Bundan başka betonun basınç dayanımından

ayırddedilebilen bir çözölme sınırına sahip olması ancak az boşluklu bir hamur fazının bulunmasıyla mümkündür,

Çalışmada bağlayıcı hamur içindeki çeşitli boşluk tiplerinin (kılcal, sürüklenmiş hava, hapsolmuş hava) inelâstik özellikler üzerindeki etkilerinin önemli derecede farklı olduğu gösterilmektedir. Toplam hacmi aynı olan boşluklardan, inelâstik davranış üzerinde en önemli etkiye kılcal boşluklar sahip olmakta, bunları sırasıyla sürüklenmiş hava boşlukları ve hapsolmuş hava boşlukları (sıkıştırma yetersizliğinden değil, granülometrinin uygunsuzluğundan dolayı betonda kalan) izlemektedir. Bu sonuçlara dayanarak bileşimleri uygulama sınırları içinde kalan, iyi bir şekilde yerleştirilmiş ve doğal kum-çakılla üretilen katkısız betonlarda değişkeni C/E olan basınç dayanımı formüllerinin değişkeni $C/(E+h)$ olanlara göre daha uygun olduğu ; hava sürükleniş betonlarda ise $f(C/E, h)$ şeklinde daha gelişmiş yeni formüllerin bulunmasının gereği belirtilmiştir.

Araştırmada bunlardan başka betonun elâstiklik modülü ile basınç dayanımı arasında uygulamada kullanılan formüllerin betonun yapısı ve basınç yükleri altındaki davranışı açısından fiziksel bir anlama sahip olmadıkları ; bunların sadece istatistiksel anlamda bir ilgiden ibaret bulunmalarına dikkat çekilmektedir. Diğer taraftan çimentonun bir bölümünün uçucu küller veya kalker filleri ile ikame edilmesinin inelastik karakteristikler üzerinde bazı olumlu yönde etkileri gözlenmiştir. Buna dayanarak çimentonun bir bölümünün bu malzemelerle ikamesinin, bu konulardaki gerekli araştırmalar tamamlandıktan sonra, mühendislik uygulaması açısından yararlı olabileceği belirtilmektedir.

Bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışında önemli bir işleve sahip bulunduğu olgusuna dayanılarak, betonun mekanik davranışının bağlayıcı hamurun yapısal özelliklerinin fonksiyonu olarak incelenmesinin ilginç ve yararlı olacağı belirtilmiştir. Bu aynı zamanda bir taraftan betonun mekanik özellikleri, diğer taraftan bağlayıcı hamurların yapısı üzerinde şimdiye kadar yoğunlaşmış bulunan iki büyük araştırma birikiminin birbirine bağlanmasını da sağlayacaktır.

R E S U M E

Dans ce travail on étudie la fonction de la structure de la pâte liante sur le comportement inélastique du béton soumis à une sollicitation uniaxiale de compression de courte durée. Afin de réaliser cette recherche on a confectionné des bétons dont les caractéristiques du granulat telles que sa nature, sa composition granulométrique et sa fraction volumétrique sont maintenues constantes. Par contre la structure de la pâte liante a été variée selon les moyens suivants :

- Variation du rapport eau/ciment,
- Adjonction d'un entraîneur d'air,
- Remplacement d'une partie de ciment par une cendre volante ou par un filler calcaire.

Les essais ont été répétés pour deux séries dans lesquelles on a changé la granulométrie du granulat.

Les essais de compression de courte durée avec des mesures de déformations longitudinales et transversales ont été effectués sur les éprouvettes cylindriques, dans des conditions de température et d'humidité déterminées.

D'après les résultats obtenus on a montré que la structure de la pâte liante joue un rôle important dans le comportement du béton sous des charges de compression. Le module d'élasticité du béton n'est pas sensible à la micro-structure ou en d'autre terme à la structure capillaire de la pâte liante ; il n'est contrôlé que par la quantité du gel présent entre les granulats. En revanche, le comportement

inélastique est influencé par cette microstructure, et les paramètres quantitatifs, comme le rapport gel/espace, ne suffisent pas à déterminer les caractéristiques inélastiques, c'est-à-dire, la limite de discontinuité, la limite de décohésion, la résistance à la compression et les déformations correspondantes à ces limites. L'adhérence entre le gravier et le mortier est très sensible au rapport eau / ciment de la pâte liante et de même la limite de discontinuité et le rapport de cette limite à la résistance à la compression le sont aussi en conséquence. D'autre part, l'existence d'une limite de décohésion distincte de la résistance à la compression, nécessite une structure peu poreuse de la pâte liante.

Les pores de divers origines se trouvant dans la pâte liante (capillaires, bulles d'air entraînées, pores macroscopiques) ont des effets assez différents sur l'inélasticité du béton. Les pores capillaires agissent en grande partie sur les caractéristiques inélastiques parmi d'autres ; par ordre décroissant viennent ensuite l'effet des bulles d'air et enfin des pores macroscopiques (causés non par la manque de compaction, mais par le défaut de la granulométrie). Par la suite on a conclu que pour les bétons courants, sans adjuvant, confectionnés avec du sable et du gravier naturels et serrés d'une manière satisfaisante, les formules de résistance à la compression de la forme $R = f(C/E)$ s'adaptent mieux que celles de la forme $R = f(C/(E+h))$ (où h présente le volume d'air présent dans 1 m^3 de béton), tandis que pour les bétons à air entraîne on doit élaborer de nouvelles formules de la forme $R = f(C/E, h)$.

On remarque aussi que les formules qui établissent une relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression, n'ont pas un sens physique tant qu'on envisage la structure du béton et son comportement inélastique; celles-ci ont plutôt un sens statistique. D'autre part dans quelques essais de nombre limité, réalisés sur des bétons où une partie du ciment avait été remplacée par de la cendre volante ou par du filler calcaire, on a constaté certaines améliorations dans les caractéristiques inélastiques. En se basant sur ce fait on précise que le remplacement d'une partie de ciment par ces matériaux semble être très avantageux

aux domaines des travaux publics à condition qu'on entre -
prenne des recherches ultérieures plus poussées.

En se basant au fait que la structure de la pâte liante joue un rôle important dans le comportement inélastique du béton, on remarque qu'il sera intéressant et bénéfique d'étudier le comportement mécanique du béton en fonction des propriétés structurales de la pâte liante. Ceci servira en même temps d'établir une liaison entre les deux grands groupes de recherches accomplis jusqu'à maintenant qui se sont concentrés sur le comportement mécanique du béton d'une part et sur la structure des pâtes liantes d'autre part.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	I
RESUME	III
İÇİNDEKİLER	VII
TABLO LİSTESİ	XI
ŞEKİL LİSTESİ	XIII
NOTASYON	XXI

BÖLÜM I

GİRİŞ	1
1.1. Betonun yük altındaki gerçek davranışının yakından bilinmesinin önemi	1
1.2. Betonun kısa süreli tek eksenli basınç gerilmesi altındaki kırılma mekanizması, Süreksizlik ve çözülme sınırları	2
1.3. Betonun kısa süreli basınç altındaki davranışı ile ilgili çalışmalar	3
1.3.1. Kısa tarihçe	3
1.3.2. İlgili çalışmaların konularına göre sınıflandırılması	5

VIII

1.3.2.1. Süreksizlik sınırının çeşitli saptanma yöntemleri	5
1.3.2.2. Çözülme sınırının çeşitli saptanma yöntemleri	6
1.3.2.3. Süreksizlik ve çözülme sınırlarında betonun iç yapısında meydana gelen değişiklikler	6
1.3.2.4. Beton iç yapısının süreksizlik ve çözülme sınırlarına etkisi..	7
1.3.2.4.1. İri Agregat/Kum oranının etkisi	7
1.3.2.4.2. Agregat boyutunun etkisi	8
1.3.2.4.3. Agregat cinsinin etkisi.	8
1.3.2.4.4. Harç fazının yapısının etkisi	9
1.3.2.4.5. Su/Çimento Oranının etkisi	10
1.3.2.5. Süreksizlik ve çözülme sınırlarının betonun diğer mekanik özellikleri ile ilişkileri	16
1.4. Araştırma konusu	16
1.4.1. Literatürde rastlanan boşluk	16
1.4.2. Bu çalışmada çözümlenecek sorun,Kullanılacak yöntem. İncelenecek haller..	17

BÖLÜM II

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	19
2.1. Malzemenin tanımlanması	19
2.1.1. Agregat özellikleri	19
2.1.2. Çimento özellikleri	22
2.1.3. Katkı maddelerinin ve yardımcı maddelerin özellikleri	23
2.1.3.1. Hava sürükleyici katkı maddesi	24

IX

2.1.3.2. Uçucu kül	24
2.1.3.3. Atıl kalker filleri	25
2.1.4. Beton karışımları	25
2.1.4.1. Kabul edilen ilkeler	25
2.1.4.2. Karışım hesapları	29
2.1.4.3. Üretilen karışım serileri Elde edilen betonlar	31
2.1.4.4. Beton üretimi. Karıştırma yerleştirme. Kür	33
2.1.5. Numune boyut ve sayıları	37
2.2. Deneylerin tanımlanması.Yöntemler	39

BÖLÜM III

DENEY SONUÇLARI	45
3.1. E/C serisi deney sonuçları	45
3.2. HS serisi deney sonuçları	106
3.3. UK serisi deney sonuçları	125
3.4. KF serisi deney sonuçları	125

BÖLÜM IV

DENEY SONUÇLARININ İNCELENME VE DEĞERLENDİRİLMESİ	153
4.1. E/C serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi	153
4.2. E/C serisi deneylerinin değerlendirilmesin- den elde edilen sonuçlar	187
4.3. HS serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi	191
4.4. HS serisi deneylerinin değerlendirilmesin- den elde edilen sonuçlar	200
4.5. UK serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi	202

4.6. UK serisi deneylerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar	210
4.7. KF serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi	211
4.8. KF serisi deneylerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar	213
4.9. Betonun kısa süreli basınç yüklemesi altındaki inelastik davranışında bağlayıcı hamurun yapısının işlevinin belirlenmesi	214

BÖLÜM V

İLERİ ARAŞTIRMALAR	217
--------------------------	-----

BÖLÜM VI

SONUÇLAR	221
YAYIN LİSTESİ	223
ÖZGEÇMİŞ	228

T A B L O L İ S T E S İ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. E/C Serisi Betonlarının Özellikleri	34
2.2. HS Serisi Betonlarının Özellikleri	35
2.3. UK Serisi Betonlarının Özellikleri	35
2.4. KF Serisi Betonlarının Özellikleri	36
3.1. E/C Serisi Betonlarının Mekanik Özellikleri	65
3.2. Araştırmamızda Kullanılan Çeşitli Su/Çimento Oranlarında 180 Günde Ulaşılan Hidratasyon Dereceleri	105
3.3. E/C Serisi Betonlarının Jel/Hacim Oranları	105
3.4. HS Serisi Betonlarının Mekanik Özellikleri	115
3.5. HS Serisi Betonlarının Jel/Hacim Oranları	106
3.6. UK Serisi Betonlarının Mekanik Özellikleri	131
3.7. KF Serisi Betonlarının Mekanik Özellikleri	143

Ş E K İ L L İ S T E S İ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Çözülme Birim Kısaldması ile Agreg a Miktar ı Aras ındak i Ba ğ ınt ı (Shah-Chandra (10))..	11
1.2. Çözülme Birim Kısaldması ile Agreg a Miktar ı Aras ındak i Ba ğ ınt ı (Shah-Chandra (10))...	13
2.1. A ve B Betonlar ının Agreg a Kar ı ş ımlar ının Granülometri Eğ rileri	28
2.2. Deney Düzeninin Genel Gör ünü ş ü.....	40
2.3. Boyuna ve Enine Ş ekilde ğ i ş tirme Öl ç me Düzenleri	42
3.1. E/C-A-0.27 Betonu	46
3.2. E/C-A-0.35 Betonu	47
3.3. E/C-A-0.43 Betonu	48
3.4. E/C-A-0.51 Betonu	49
3.5. E/C-A-0.59 Betonu	50
3.6. E/C-A-0.67 Betonu	51
3.7. E/C-A-0.75 Betonu	52
3.8. E/C-B-0.27 Betonu	53
3.9. E/C-B-0.35 Betonu	54
3.9. E/C-B-0.35 Betonu	55
bis	
3.10.E/C-B-0.43 Betonu	56
3.11.E/C-B-0.51 Betonu	57
3.11.E/C-B-0.51 Betonu	58
bis	

3.12. E/C-B-Q.59 Betonu	59
3.12. E/C-B-Q.59 Betonu bis	60
3.13. E/C-B-Q.67 Betonu	61
3.14. E/C-B-Q.75 Betonu	62
3.15. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	67
3.16. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sını- rının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi,	68
3.17. E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanı- mının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi.	69
3.18. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Jel/ Hacim Oranına Göre Değişimi.....	70
3.19. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/ Basınç Dayanımı Oranının Jel/Hacim Ora- nına Göre Değişimi	71
3.20. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısılmanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	72
3.21. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı- daki Birim Kısılmanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	73
3.22. E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanı- mındaki Birim Kısılmanın Jel/Hacim Ora- nına Göre Değişimi	74
3.23. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sı- nırındaki Birim Kısılma/Basınç Dayanı- mındaki Birim Kısılma Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	75
3.24. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı- rındaki Birim Kısılma/Basınç Dayanımı- daki Birim Kısılma Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	76

3.25. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	77
3.26. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	78
3.27. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Hacımsal Şekildeğiştirmenin Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	79
3.28. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Birim Hacımsal Şekildeğiştirmenin Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	80
3.29. E/C Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	81
3.30. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	82
3.31. E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının % 40 ındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	83
3.32. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	84
3.33. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	85
3.34. E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	86
3.35. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	87
3.36. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	88
3.37. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısılmanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	89
3.38. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Birim Kısılmanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	90

3.39. E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	91
3.40. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısılma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısılma Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	92
3.41. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Birim Kısılma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısılma Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	93
3.42. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	94
3.43. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	95
3.44. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Hacımsal Şekildeğiştirmenin Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	96
3.45. E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Birim Hacımsal Şekildeğiştirmenin Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	97
3.46. E/C Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün Su/Çimento Oranına Göre Değişimi..	98
3.47. E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	99
3.48. E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının % 40 ındaki Poisson Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi	100
3.49. 21°C Su İçinde Tutulan ASTM-I Tipinden Portland Çimentosunun Çeşitli Sürelerde Ulaştığı Hidratasyon Dereceleri (Verbeck (30))	103
3.50. Araştırmamızda Kullanılan Çeşitli Betonların Hidratasyon Derecelerinin Bulunması	104

3.51. HS-A-0.35-0.065 Betonu	107
3.52. HS-A-0.35-0.5 Betonu	108
3.53. HS-A-0.67-0.064 Betonu	109
3.54. HS-A-0.67-0.5 Betonu	110
3.55. HS-B-0.43-0.06 Betonu	111
3.56. HS-B-0.43-0.5 Betonu	112
3.57. HS-B-0.75-0.035 Betonu	113
3.58. HS-B-0.75-0.485 Betonu	114
3.59. HS Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	116
3.60. HS Serisi Betonlarında Çözülme Sınırının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	117
3.61. HS Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	118
3.62. HS Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	119
3.63. HS Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	120
3.64. HS Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	121
3.65. HS Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	122
3.66. HS Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırlarındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	123
3.67. HS Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının % 40 ındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi	124
3.68. UK-A-0.35-35 Betonu	126
3.69. UK-A-0.35-50 Betonu	127

XVIII

3.69. UK-A-0.35-50 Betonu bis	128
3.70. UK-A-0.59-35 Betonu	129
3.71. UK-A-0.59-50 Betonu	130
3.72. UK-A Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının Değişimi	132
3.73. UK-A Serisi Betonlarında Çözülme Sınırının Değişimi	133
3.74. UK-A Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının Değişimi	134
3.75. UK-A Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Değişimi	135
3.76. UK-A Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/ Basınç Dayanımı Oranının Değişimi ..	136
3.77. UK-A Serisi Betonlarında Basınç Daya- mındaki Birim Kısalmanın Değişimi ..	137
3.78. UK-A Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün Değişimi	138
3.79. UK-A Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Değişimi	139
3.80. UK-A Serisi Betonlarında Basınç Daya- nımının % 40 ındaki Poisson Oranının Değişimi	140
3.81. KF-A-0.43-5 Betonu	141
3.82. KF-A-0.43-15 Betonu	142
3.83. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Sürek- sizlik Sınırının Değişimi	144
3.84. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Çözül- me Sınırının Değişimi	145
3.85. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının Değişimi	146
3.86. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Sürek- sizlik Sınırı/Basınç Dayanımı Oranı- nın Değişimi	147

XIX

3.87. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Değişimi	148
3.88. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısalmanın Değişimi	149
3.89. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün Değişimi	150
3.90. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Değişimi	151
3.91. KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının % 40 ındaki Poisson Oranının Değişimi	152
4.1. Taylor-Broms (34) un Agregâ-Harç Kayma Dayanımını İnceledikleri Model	172



NOTASYON

- A_i : 1 m³ yerleşmiş betonda herhangi bir (i) agregasının ağırlığı (kg)
 C : 1 m³ yerleşmiş betonda çimentonun ağırlığı (kg)
 E : 1 m³ yerleşmiş betonda suyun ağırlığı (kg)
 Elâstiklik modülü
 R : Basınç dayanımı
 X : Jel/Hacim oranı
 a : 1 m³ yerleşmiş betonda agrega gerçek hacmi (m³)
 c : 1 m³ yerleşmiş betonda çimento gerçek hacmi (m³)
 e : 1 m³ yerleşmiş betonda su hacmi (m³)
 h, h_t : 1 m³ yerleşmiş betonda hava hacmi (m³)
 h^* : 1 m³ yerleşmiş betonda sürüklenmiş hava hacmi (m³)
 p_i : (i) agregasının karışım oranı
 w : Su/Çimento oranı
 ϵ : Birim boyuna kısalma
 $\frac{\Delta V}{V}$: Birim hacımsal şekildeğiştirme
 δ_{ai} : (i) agregasının özgül ağırlığı (kg/lt)
 δ_c : Çimentonun özgül ağırlığı (kg/lt)
 ϵ_g : Birim enine genişleme
 ϵ_u : Basınç dayanımındaki birim kısalma
 ν : Poisson oranı
 ν_D : Süreksizlik sınırındaki Poisson oranı
 σ : Normal gerilme
 σ_D : Süreksizlik sınırı
 σ_L : Çözülme sınırı

BÖLÜM I

G İ R İ Ş

1.1. Betonun yük altındaki gerçek davranışının yakından bilinmesinin önemi

Yapı mühendisliği uygulamasında son zamanlara kadar betonun yalnız basınç dayanımı, elastiklik modülü, Poisson oranı gibi karakteristik bazı değerleriyle ilgileniliyordu. Bu özellikler bilindiğine göre malzemenin yük altındaki davranışı için çok basitleştirici (elastik, tam plastik, vb. gibi) kabuller yapılarak yapıların hesabı tamamlanıyordu .

Yapı hesap yöntemlerindeki en son gelişmeler, bu düşünce şeklini yetersiz kıldı. Bu yeni yöntemlere göre malzemelerin yük altındaki gerçek davranışlarını bilmek ve bunu mümkün olduğu kadar az idealize ederek hesaplarda kullanmak gerekmektedir. Bu görüş malzemelerin dayanımlarından ve şekildeğiştirebilme özelliklerinden eski yöntemlere göre daha fazla yararlanabilme amacını gütmektedir (1)*. Halen betonun basınç altında gerçekte doğrusal elastik olmayan (inelastik) davranışını hesaplarda gözönüne alan yönetmelikler arasında Amerika, Danimarka ve Rusya'da uygulanan (2) yönetmelikler sayılabilir. Yurdumuzda öteden beri betonarme yapıların hesabında kullanılan Alman DIN 1045 yönetmeliğinin 1972

*

Parantez içindeki sayılar, tezin sonundaki yayın listesindeki numaraları göstermektedir.

de yürürlüğe giren son şeklinde de (3) betonun basınç altındaki gerçek davranışından oldukça önemli derecede esinlendiği görülmektedir. Bu yönetmelikte, eğilme, normal kuvvetli eğilme ve yalnız normal kuvvet için boyutlandırma da gerilmelerle şekildeğiştirmelerin orantılı olmadığı gözönüne alınmaktadır. Ayrıca bu hesaplarda betonun kırılma durumundaki gerilmesinin bulunmasında, yüklerin betona uzun süre etkimesi halindeki dayanımının kısa süre etkimesi halindeki dayanımından daha düşük olduğu olgusu (ileride bahsedilecek "Çözülme Sınırı" = "Gerçek Basınç Dayanımı" kavramı) gözönüne alınmaktadır. Bu genel gidiş içinde, zamanla malzemelerin gerçek özelliklerinin yapı hesap yönetmelikle rinde gittikçe daha geniş ölçüde yer alacakları söylenebilir.

Hesap yöntemlerindeki bu gelişmelere paralel olarak, betonun yük altındaki davranışını makroskopik yönden ve iç yapıda meydana gelen değişimler yönünden inceleyen araştırmalar da bilhassa son 25 yılda büyük bir hız kazanmıştır. İlerdeki bir paragrafta bu çalışmalardan betonun kısa süreli tek eksenli basınç gerilmesi altındaki davranışını inceleyenler ele alınacaktır.

1.2. Betonun kısa süreli tek eksenli basınç gerilmesi altındaki kırılma mekanizması. Süreksizlik ve çözülme sınırları

Beton, bilindiği gibi, basınç yükleri altında elastik olmayan, yani "inelastik" bir davranış gösterir. Aşağıda bu davranış, iç yapı da gözönüne alınarak kırılma olayına kadar özetlenmektedir.

Normal bir sertleşmiş betonda, iri agrega ile harç fazları arasında, çimento hamurunun yapmış olduğu rötne nedeniyle oluşan çok ince çatlaklar (mikroçatlak) vardır. Beton tek eksenli basınç gerilmesi altında gittikçe artan bir yük ile yüklendiği zaman, belirli bir gerilme değerine varıldığında, bu mikroçatlaklar önemli derecede artmaya başlarlar (genel olarak mikroçatlakların bu gerilmeden de önce, fakat çok yavaş geliştiği kabul edilmektedir). Betonda yapılan ölçümler, bu gerilme düzeyine kadar yaklaşık olarak sabit kalan veya azalan Poisson oranının bundan sonra önem-

li derecede artarak değiştiğini göstermektedir. Bu gerilme değerine süreksizlik sınırı denilmektedir. Betona uygulanan gerilme artırılmaya devam edilecek olursa, bir başka gerilme düzeyinde, bu defa harç fazı içinde o gerilmeye kadar az sayıda oluşmuş bulunan mikroçatlaklar birden ve önemli ölçüde artmaya başlar, böylece betonun içinde sürekli bir mikroçatlak ağı oluşur. Ölçümler, bu gerilme düzeyine kadar devamlı küçülerek değişen hacmin, bundan sonra artma yönünde değiştiğini göstermektedir. Bu gerilme değerine de çözülme sınırı denmektedir. Çözülme sınırının diğer önemli bir özeliği de şudur : Bu sınırın altındaki bir gerilmeye kadar beton yüklenir ve gerilme sabit olarak tutulursa, o ana kadar meydana gelmiş bulunan mikroatlaklarda bir ilerleme görülmez. Buna karşı çözülme sınırına kadar yüklenmiş bir betonda yk tutulmaya devam edilirse, çatlaklar zamanla kendiliğinden ilerler ve sonunda beton dayanımını tamamen kaybeder. Bu bakımdan çözülme sınırına gerçek basıncı dayanıma da denilmektedir ; çünki çözülme sınırına varmış bir beton aslında dayanımını kaybetmiştir, fakat tamamen kırılması bir zaman sorunudur. Betonun alişılagelmiş kısa süreli basıncı deneylerinde gözlenen basıncı dayanımı ise çözülme sınırının bir miktar üzerinde yer almaktadır.

Özetlemek gerekirse betonun kısa süreli basıncı yk - lemesindeki inelastik davranışı snme olayındaki gibi imento hamurunun viskoelastik özeliğinden değil, mikroçatlakların artan yükler altında sürekli olarak yayılmasından ve bundan dolayı malzemenin sürekli olarak hasar görmesinden doğmaktadır.

1.3. Betonun kısa süreli basıncı altındaki davranışı ile ilgili alışmalar

1.3.1. Kısa tarihçe

Betonda, yukarıda kısaca açıklanmış bulunan özel kırılma mekanizmasının varlığını ilk defa 1927 yılında Brandtzaeg (4) fark etti. Bu araştırmacı gittikçe artan tek eksenli basıncı gerilmeleri altında basıncı dayanımının % 77 - 85 ine ulaşıldığında, beton numunelerin hacimlerin - deki azalmanın sona erip artma başladığını gördü ve bu olayı i tahribatın başlaması şeklinde yorumladı. Bu gerilme düzeyi bugün bizim çözülme sınırı dediğimiz sınır olmaktadır.

Brandtzaeg'den sonra konunun araştırılmasının uzun bir süre bırakıldığını görüyoruz. Ancak 1952 yılında Jones (5) un çeşitli malzemelerde, ve bu arada betonda, ses hızını ölçmek suretiyle, artan gerilmeler altında çatlakların meydana gelmesini ve gelişmesini inceleyen çalışmasına rastlıyoruz. Jones, bu araştırmasında, gittikçe artan tek eksenli basınç gerilmesine maruz kalan betonda, basınç dayanımı -nın % 25 - 30 u kadar gerilme düzeylerinde ses hızında bir değişme olduğunu buldu. Araştırmacı, bu bulgusuna dayanarak, oldukça düşük olan bu gerilme düzeylerinde bile, betonda mikroskopik boyutta yarık veya çatlakların oluştuğunu ileri sürdü.

L'Hermite (6), 1955 yılında, betonun basınç altında yaptığı yanal genişlemeleri ölçerek, süreksizlik sınırını rasyonel bir şekilde saptadı. L'Hermite'e göre, süreksizlik sınırına kadar gittikçe artarak uygulanan basınç gerilmeleri betonda bulunan boşlukları azaltmaktadır. Süreksizlik sınırına varıldığında iç boşluklar minimuma inmekte, bu sınır aşıldıktan sonra ise, meydana gelen yeni çatlaklar nedeniyle yeniden artmaya başlamaktadır. Buna paralel olarak süreksizlik sınırında Poisson oranı en küçük değerini almaktadır. Bu ilkeden yararlanarak betonun süreksizlik sınırını tarif etmek ve saptamak mümkündür.

Betonun kısa süreli tek eksenli basınç gerilmesi altındaki kırılma mekanizmasını inceleyen araştırmalar bu tarihlerden itibaren, günümüze kadar yoğun bir şekilde devam etmiştir. Bu çalışmalarda betonda kırılmanın oluşumu ve yurarda bahsedilen süreksizlik ve çözülme sınırları, bu olayları etkileyen etkenler çeşitli görüş açıları ve deney yöntemleriyle ele alınmıştır. Bu bakımdan, bütün bu çalışmalar günümüze kadar tarihsel sıraya göre incelemek, ortaya oldukça karışık bir tablo çıkarmaktadır. Bu sakıncadan kurtulmak için, çalışmaların kronolojik sıra ile incelenmesinde bu kısa bilgiyle yetinilecek, aşağıdaki paragraflarda, ilgili araştırmalar, konularına göre sistematize edilerek incelenmeye çalışılacaktır.

1.3.2. İlgili çalışmaların konularına göre sınıflandırılması

1.3.2.1. Süreksizlik sınırının çeşitli saptanma yöntemleri

Süreksizlik sınırının saptanmasında çeşitli araştırmacılar tarafından çok sayıda yöntem uygulanmıştır. Akman (7) bunları etraflı bir şekilde gözden geçirmektedir. Bu çalışmamızda çözümleyeceğimiz problemle doğrudan doğruya ilişkili olmamasını da gözönünde tutarak, biz bu yöntemlerden burada çok kısa bir şekilde bahsedeceğiz.

Süreksizlik sınırının saptanmasında ilk rasyonel yöntemi, yukarıda da belirtildiği gibi, L'Hermite (6), betonun Poisson oranının değişimini ölçerek uygulamıştır. Aynı yöntemden daha sonra Orth - Jacquin - Buvat - Berrod (8), Béres (9), Shah - Chandra (10) ve Akman (7) da yararlanmışlardır. Bu çalışmada da aynı yöntem uygulanacaktır.

Desayi - Viswanatha (11) betonun gerilme - boyuna şekildeğiştirme diyagramından yararlanarak süreksizlik sınırını saptamaktadır. Bu araştırmacılar betonun tek eksenli basınç gerilmesi altında gerilme-şekildeğiştirme diyagramını $\log(\text{gerilme}) - \log(\text{şekildeğiştirme})$ şeklinde çizdiklerinde 3 doğru elde ediyorlar ve bu doğruların kesiştikleri noktaların süreksizlik ve çözülme sınırlarına karşı geldiğini ileri sürüyorlar.

Süreksizlik sınırının saptanmasında kullanılan bir diğer yöntem, betonda gittikçe artan yükler altında ultra - ses hızının değişimini ölçmek suretiyle uygulanmaktadır. Bu teknik L'Hermite (6), Jones - Kaplan (12) ve Robinson (13) tarafından kullanılmıştır. Jones - Kaplan (12), 10 cm lik beton kübler üzerinde, ultrases geçiş zamanında 0.1 mikro - saniyelik bir düşüşün, süreksizlik sınırına karşı geldiğini ileri sürmektedir.

Bu yöntemlerden başka, Berg (14) betonun gerilme - şekildeğiştirme eğrisinde, $\Delta\varepsilon/\Delta\sigma$ büyüklüklerinin değişimini inceleyerek ; Orth - Jacquin - Buvat - Berrod (8) kompresibilite katsayısı adını verdikleri $\Delta V/V_0$ değerinin değişimini inceleyerek, Rüsch (15) ve Robinson (13) betonda mikroçatlakların ilerlemesi sırasında çıkan ses enerjisini ölçerek ; Peltier (16) ise kısa süreli sünme deneyinden yararlanarak süreksizlik sınırını saptamaktadırlar.

1.3.2.2. Çözülme sınırının çeşitli saptanma yöntemleri

Çözülme sınırının saptanmasında kullanılmış olan yöntemleri de Akman (7) etrafı bir şekilde gözden geçirmiştir. Yukarıda belirtilen nedenden, bu yöntemlerden burada çok kısa bir şekilde bahsedilecektir.

Çözülme sınırının saptanmasında en yaygın yöntem betonun hacim değişimlerinden yararlanmak suretiyle uygulanmaktadır. Yukarıdaki paragraflarda da belirtildiği gibi, çözülme sınırına varmış bir betonda hacimde bir artma başlamaktadır. Yine yukarıda belirtildiği gibi bu olayı 1927 yılında ilk defa gözleyen Brandtzaeg olmuştur. Daha sonraki yıllarda araştırmalarında aynı yöntemi kullanarak çözülme sınırını saptayanlar arasında Shah - Chandra (10) ve Akman (7) sayılabilir.

Çözülme sınırının saptanmasında bu yöntemden başka, Desayi - Wiswanatha (11) yukarıda da belirtildiği gibi betonun gerilme - şekildeğiştirme eğrisinden, yine aynı araştırmacılar (11) kısa süreli sünme deneyinden yararlanmaktadırlar.

1.3.2.3. Süreksizlik ve çözülme sınırlarında betonun iç yapısında meydana gelen değişiklikler

Beton süreksizlik ve çözülme sınırlarına vardığında, iç yapısında 1.2 paragrafında kısaca açıklanmış olan değişiklikler meydana gelmektedir. Bu konudaki başlıca araştırmaların, Amerika Birleşik Devletlerinde, Cornell Üniversitesinde, Prof. Winter yönetiminde çalışan grup tarafından 1960 larda gerçekleştirildiğini görüyoruz (17, 18, 19, 10, 1). Bu çalışmalarda iki yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde, belirli gerilme düzeyine kadar statik olarak yüklenmiş betonun üzerindeki kuvvet kaldırılmakta, bu numune - den düzgün bir kesimle bir enine kesit çıkarılmakta, sonra bir boyama ve parlatma tekniği uygulanarak kesit mikroskop altında incelenmektedir. İkinci yöntemde, aynı şekilde yüklenip boşaltılmış numuneden ince bir dilim kesilmekte ve bu dilimin X ışını ile alınan fotoğrafı incelenmektedir. Seçilen yük düzeyi çeşitli basamaklarda değiştirilerek betonun her gerilme düzeyinde uğradığı hasar ortaya çıkarılmaktadır.

Bütün bu çalışmalar, betonun tek eksenli basınç gerilmesi altındaki makroskopik davranışının, iç yapıdaki mikroçatlak dağılımıyla doğrudan doğruya ilgili olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Araştırmaların başlıca sonuçlarını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz :

1. Betona henüz yük uygulanmamışken, çimento hamurunun yapmış olduğu rötreden dolayı, harç fazı ile iri agregaların arasındaki yüzeylerde bazı mikroçatlaklar bulunmaktadır.

2. Betona gittikçe artan basınç gerilmeleri uygulanırsa, süreksizlik sınırına varıldığında harç fazı ile iri agregalar arasındaki bağ çatlaklarında hızlı bir artış başlamaktadır. Bu hızlı artış, beton dayanımını tümüyle yitirene kadar sürecektir.

3. Çözülme sınırına varıncaya kadar harç fazının içindeki çatlakların sayısı son derece azdır ve beton henüz yüklenmemişken, rötreden dolayı oluşmuş birkaç çatlaktan ibarettir. Çözülme sınırına varıldığında, harç fazı içindeki çatlaklarda hızlı bir artış başlar.

4. Çözülme sınırından sonra her iki tür çatlağın miktarındaki artış hızla devam eder ve beton kısa süreli deneylerde gözlenen basınç dayanımına varır.

1.3.2.4. Beton iç yapısının süreksizlik ve çözülme sınırlarına etkisi

1.3.2.4.1. İri agrega/Kum oranının etkisi

İri agrega/Kum oranının süreksizlik ve çözülme sınırlarına etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (12, 20, 13, 21, 10, 22). Bu çalışmalarda genel olarak betondaki iri agrega hacmi arttıkça süreksizlik sınırının ve çözülme sınırının, betonun basınç dayanımına oranının düştüğü öne sürülmektedir.

Akman (7) problemi süreksiz granülometrilili betonlarda, iri agrega/Kum oranını sistematik olarak 0 dan 2 ye kadar artırarak incelemiştir. Araştırmacının elde ettiği

sonuçlara göre, bu tür betonlarda iç yapı, İri Agregâ/Kum oranının "1" den büyük değerlerinde betona dönüşmektedir . İri Agregâ/Kum oranının "1" den küçük değerlerindeki mal - zeme beton değildir, ancak harç da sayılamaz. Bu üretilme - si sakıncalı bir ara malzemedir.

Akman'a göre iri agreganın çok olması çatlamanın daha düşük yüklerde oluşmasına sebep olur, süreksizlik sınırını küçük değerler alır. Çözülme sınırının ve basınç dayanımının değişimi ise bundan daha farklı bir durum göstermektedir. Şayet iri daneler belirli bir miktarın altında iseler (İri Agregâ/Kum oranı "1" den küçük) çatlak oluşumunu ve gelişimini artırıcı yönde etken olurlar. İri danelerin bu sınıra kadar artması basınç dayanımını ve çözülme sınırını düşürür. İri daneler, beton iç yapısının oluşmasına olanak veren değerın üstüne çıkınca (İri Agregâ/Kum oranı "1" den büyük) meydana gelen kafes giriş yapı ve kısıtlanmış içsel şekildeğiştirme etkisiyle çatlak gelişimini yavaşlatırlar. İri danelerin bu sınırdan ötede artması basınç dayanımını ve çözülme sınırını yükseltir.

1.3.2.4.2. Agregâ boyutunun etkisi

Shah - Chandra (10), agregâ boyutunun betonun süreksizlik ve çözülme sınırları ile diğer mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bunun için 5 x 5 x 15 cm boyutlu 3 grup prizmatik deney numunesi hazırlanmıştır. Bütün bu numunelerde Su/Çimento oranı 0.54 ve Agregâ/Çimento oranı 3.0 dür, ancak her grupta farklı agregâ boyutları kullanılmıştır. Birinci grup numunelerde kullanılan agregânın boyutları 9.5 ilâ 6.4 mm arasında, ikinci grupta 4.76 ilâ 2.38 mm arasında ve üçüncüsünde 1.19 ilâ 0.595 mm arasında alınmıştır. Bu şekilde hazırlanan beton modellerinde yapılan deneylerde, agregâ boyutunun artmasının süreksizlik ve çözülme sınırlarının basınç dayanımına oranlarını ve ayrıca basınç dayanımını düşürdüğü gözlenmiştir.

1.3.2.4.3. Agregâ cinsinin etkisi

Betonda kullanılan iri agregâ cinsinin süreksizlik ve çözülme sınırları üzerindeki etkisi Akman (23) tarafından incelenmiştir. Araştırmacı, daha önce iri agregâ ola -

rak yuvarlak çakıl kullanarak yapmış olduğu çalışmayı (7), bu defa kırmataş kullanarak tekrarlamıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, iri agreganın kırmataş olması, yuvarlak çakıl olmasına oranla, betonun kısa süreli tek eksenli basınç gerilmeleri altındaki kırılma mekanizmasını aşağıda belirtilen yönlerde etkilemektedir :

1. İri agreganın kalker ve pürüzlü oluşu agrega - harç bağlantısını iyi yönde etkileyerek çatlakların genişlemeye başlamasını geciktirmekte yani süreksizlik sınırını yükseltmektedir.

2. İri agreganın yumuşak ve tabakaları yönünde ayrılmaya eğimli oluşu genişleyen çatlakları durduramamakta yani çözülme sınırının daha yükselmesine olanak vermemektedir.

3. İri agreganın şekildeğiştirme yeteneğinin yüksek oluşu betonun da eksenel ve yanal şekildeğiştirmelerini artırmakta, ayrıca süreksizlik ve çözülme sınırlarında negatif yönde etken olmaktadır.

1.3.2.4.4. Harç fazının yapısının etkisi

Akman (7) çalışmasında, iri agregaları aynı, buna karşı, farklı kalitede iki çeşit kum kullanmak suretiyle, harç fazları birinde yüksek, diğerinde düşük nitelikli 2 tür beton üretmiştir. Yapılan deneylerde, harç fazının düşük nitelikli olmasıyla basınç dayanımının ve süreksizlik ve çözülme sınırlarının düştüğü gözlenmiştir. Buna karşı bu sınırların basınç dayanımına oranı incelendiğinde, iri agrega yüzdesinin düşük olduğu, yani beton iç yapısının oluşmadığı numunelerde, her iki sınırın da basınç dayanımına oranının, düşük nitelikli harç fazına sahip betonlarda az bir miktar daha düşük ; iri agrega yüzdesinin beton iç yapısını oluşturmağa yeterli bulunduğu numunelerde ise, düşük nitelikli harç fazına sahip betonlarda az bir miktar daha yüksek olduğu araştırmacının diyagramından görülmektedir.

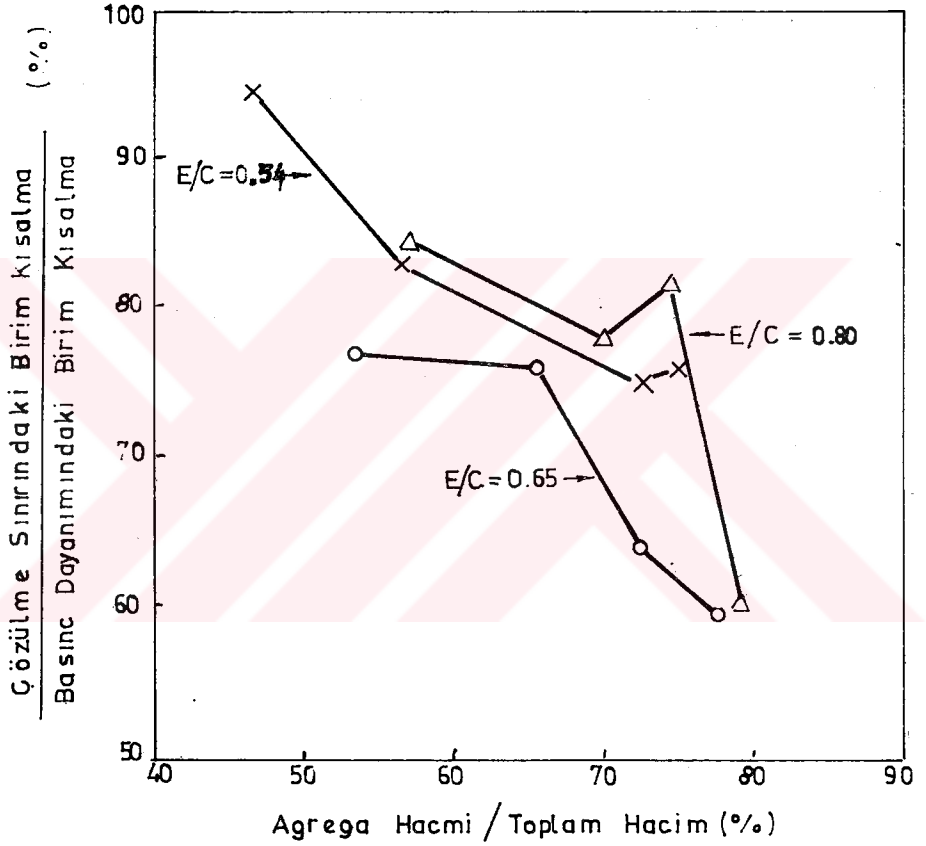
1.3.2.4.5. Su/Çimento oranının etkisi

Su/Çimento oranının, süreksizlik ve çözülme sınırları üzerindeki etkisini sistematik olarak inceleyen bir çalışmaya pek rastlanmamaktadır. Orth-Jacquin - Buvat - Berrod (8) nun çalışmasında, çimento dozajları ve granülometrik bileşimleri aynı olan 4 betonda şu sonuçlar verilmektedir :

Su/Çimento Oranı	Süreksizlik sınırı/Basınç dayanımı
0.50	0.41
0.50	0.59
0.42	0.36
0.42	0.49

Görüldüğü gibi, çok az sayıda, sonuçları oldukça dağınık ve Su/Çimento oranının çok dar bir aralıkta değiştiği bu deneylere dayanarak Su/Çimento oranının süreksizlik ve çözülme sınırları üzerindeki etkisi hakkında kesin bir şey söylemek olanağı yoktur. Nitekim yazarlar da bu sonuçlara dayanarak bu konuda bir görüş ileri sürmemektedirler.

Shah - Chandra (10), Su/Çimento oranının betonun inelastik davranışına etkisini incelemek için, çeşitli bileşimlerdeki betonlardan elde ettikleri sonuçları Şekil 1.1 de gösterilen diyagram üzerinde topluyorlar. Burada yatay eksen betondaki agrega mutlak hacminin toplam hacme oranı, düşey eksen ise çözülme sınırındaki birim kılmanın basınç dayanımındaki birim kılalmaya oranını göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi aynı Su/Çimento oranına sahip betonlara ait noktalar birbirleriyle birleştirilmiş ve böylece kırık doğrulardan oluşan 3 eğri elde edilmiştir. Yazarlar bu 3 eğriye dayanarak betonun kısa süreli yüklemdeki inelastik davranışının sertleşmiş çimento hamurunun inelastik davranışından bağımsız olduğunu ileri sürüyorlar. Aynı araştırmada bulunan sonuçlara göre, sertleşmiş çimento hamurunun kendi inelastik davranışı Su/Çimento oranına bağlıdır. Bu durumda, özetlemek gerekirse, Shah - Chandra' ya göre, Su/Çimento oranı, betonun bağlayıcı hamurunun inelastik davranışını etkilemesine rağmen betonun kendi inelastik davranışını pek etkilememektedir.

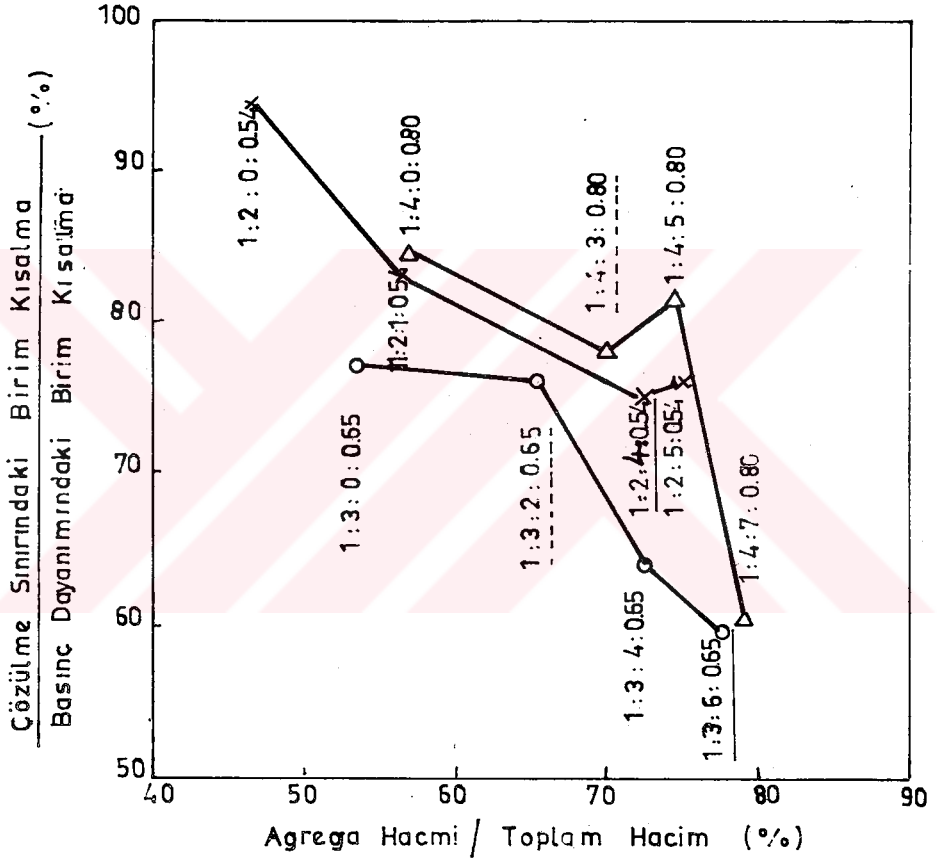


Şekil 1.1

Çözülme Birim Kısalması ile Agregat Miktarı
Arasındaki Bağlantı (Shah-Chandra (10))

Biz, Shah - Chandra'nın çalışmasındaki sonuçların ayrıntılı olarak incelenip, daha ihtiyatlı bir şekilde yorumlanması gerektiğini düşünüyoruz. Bir defa, Şekil 1.1 de göz-önüne alınan betonlardaki İri Agregat/Kum oranı geniş sınırlar içinde değişmektedir. Paragraf 1.3.2.4.1 de belirtildiği gibi bu oranın betonun inelastik davranışını ve kırılma mekanizmasını önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Öyle ise bu oranın etkisini ortadan kaldırmadan, Su/Çimento oranının etkisini incelemek ilke olarak pek güvenilir görülmemektedir. Ancak, bir an için bu gerçeği bir yana bırakarak Şekil 1.1 i incelersek, şu husus dikkatimizi çekmektedir : Herhangibir agregat yüzdesinde (Agregat yüzdesinin en yüksek olduğu bir tek beton dışında) daima, "Çözülme sınırındaki birim kısalma/Basınç dayanımındaki birim kısalma" oranı, Su/Çimento oranının 0.80 değeri için en büyük, 0.54 değeri için biraz daha küçük ve 0.65 değeri için en küçük olup, bu sıra bozulmamaktadır. Üstelik bu, herhangibir agregat yüzdesinde İri Agregat/Kum oranı sabit olmamasına rağmen böyledir. Öyle ise, Su/Çimento oranının betonun inelastik davranışına etkisi olmadığını Şekil 1.1 e dayanarak söyleyemeyiz ; şayet böyle olsaydı çeşitli agregat yüzdelerinde yukarıda belirtilen sıranın değişmesi ve böylece 3 eğrinin birbirine iyice karışması gerekirdi.

Soruna istatistik bir görüşle bu şekilde baktıktan sonra, şimdi Shah - Chandra'nın vermiş olduğu sonuçları biraz daha ayrıntılı olarak inceleyelim. Bunun için Şekil 1.1 deki eğriler her deney noktasına karşı gelen beton bileşimleri yazılarak tekrar Şekil 1.2 de çizilmiştir (Bileşimlerin yazılışı Çimento : Kum : Çakıl : Su şeklindedir). İri agregat/Kum oranlarının bu betonlarda geniş aralıklar içinde değiştiği açıkça görülmektedir. "Agregat hacmi/Toplam hacim" ve "İri agregat/Kum" oranları tamamen eşit olan 2 beton bunların arasında görülmemektedir. Dolayısıyla bu betonların ikisinde dahi Su/Çimento oranının etkisini işe diğer etkenlerin katkısı girmeden incelemenin olanağı yoktur. Ancak, yine de, bu oranların fazla farketmediği bazı betonlarda karşılaştırmalar yapacağız. 1 : 3 : 6 : 0.65 ve 1 : 2 : 4 : 0.54 betonlarının "İri agregat/Kum" oranları aynıdır ancak "Agregat hacmi/Toplam hacim" oranı birinci betonda yaklaşık olarak 0.775 ikincisinde yaklaşık olarak 0.725 dir. Bu 2 betonda, inelastik davranışı belirleyen karakteristikler, aynı çalışmada, şu şekilde verilmektedir.



Şekil 1.2

Çözölme Birim Kısalması ile Agregat Miktarı
Arasındaki Bağlantı (Shah - Chandra (10))

Beton Bileşimi	Çözülme sınırı/Basınç dayanımı	Çözülme sınırındaki birim kısalma / Basınç dayanımındaki birim kısalma	Süreksizlik sınırı/Basınç Dayanımı
1:3:6: 0.65	% 81.2	% 59.3	% 45.0
1:2:4: 0.54	% 89.9	% 74.7	% 60.0

Yukarıdaki değerlerin karşılaştırılmasından her 3 karakteristiğin de Su/Çimento oranının pek büyük sayılamayacak bu değişiminden belirli derecede etkilendiği görülmektedir.

Bileşimleri birbirine biraz daha az yakın 2 beton da 1 : 3 : 2 : 0.65 ve 1 : 4 : 3 : 0.80 betonlarıdır. Bunlarda "İri agrega/Kum" oranları birincisinde 0.67 ikincisinde 0.75 dir. "Agrega hacmi/Toplam hacim" oranı ise birincisinde yaklaşık 0.655 ikincisinde yaklaşık 0.70 dir. Bu farkları burada da bir yana bırakırsak, Shah - Chandra'nın verdiği değerlere göre, "Su/Çimento" oranının inelastik davranışa etkisini aşağıdaki gibi buluyoruz :

Beton Bileşimi	Çözülme sınırı/Basınç dayanımı	Çözülme sınırındaki birim kısalma/Basınç dayanımındaki birim kısalma	Süreksizlik sınırı/Basınç dayanımı
1:3:2: 0.65	% 93.5	% 75.7	% 60.0
1:4:3: 0.80	% 97.8	% 77.9	% 75.0

Bu sonuçlardan da, çözülme sınırı ile ilgili karakteristiklerin "Su/Çimento" oranından etkilenmediği, buna karşı süreksizlik sınırı ile ilgili olanların yine belirli derecede etkilendiği görülmektedir.

Shah - Chandra'nın verdiği sonuçlar içinde "Su/Çimento" oranının inelastik davranışa ve kırılma mekanizmasına etkisinin incelenebileceği başka beton bulunmamaktadır ;diğerlerinde "İri agrega/Kum" oranları ve agrega mutlak hacimleri birbirinden büyük ölçüde farketmektedir.

Sonuç olarak "Su/Çimento" oranının betonun kırılma mekanizmasına etkisinin Shah - Chandra tarafından sistematik bir şekilde incelenmediğini ve bu araştırmacıların elde ettikleri sonuçlardan bu konuda kesin bir yargıya varmanın olanak dışı olduğunu belirtmek isteriz .

Neville (24), süreksizlik sınırının değerinin hamurun "Su/Çimento" oranına bağlı olduğunu, herhangi bir araştırmayı referans göstermeden belirtiyor. Ancak, "Süreksizlik sınırı/Basınç dayanımı" oranının da "Su/Çimento" oranından etkilenip etkilenmediği ve bundan başka "Su/Çimento" oranının çözülme sınırını etkileyip etkilemediği hakkında birşey söylemiyor.

Sonuç olarak, literatürde rastlanan çalışmalardan veya öne sürülen düşüncelerden, "Su/Çimento" oranının betonun kısa süreli basınç yüklemesi altındaki kırılma mekanizması üzerindeki etkisi hakkında kesin bir yargıya varma olanacağının bulunmadığını görüyoruz.

1.3.2.4.6. Agrega - hamur bağ dayanımının etkisi

Beton davranışlarının, agregalar ile bunları birbirine bağlayan hamur arasındaki bağların kuvvetli veya zayıf oluşuna göre değiştiği, bilinen bir gerçektir. Bunu gözönüne alan Shah - Chandra (10) agrega - hamur bağ dayanımının betonun kısa süreli tek eksenli basınç gerilmeleri altındaki kırılma mekanizmasına etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, bunun için, agrega-hamur bağ dayanımı dışında bütün özellikleri aynı olan 3 grup beton modeli üretmişlerdir. Bağ dayanımını etkilemek için birinci grup numunelerde agrega yüzeyleri çok ince bir silikon tabakası ile kaplanarak bağ tamamen ortadan kaldırılmış ; ikinci grupta agregalar önce bir su jeti ile ve bundan sonra asetona yıkanarak bağların kuvvetlenmesi sağlanmış; üçüncü grupta ise agregalar herhangi bir işleme tâbi tutulmamıştır. Yapılan beton modellerinde yalnız bir grup tane boyutu ($3/8''$ ilâ $1/4''$ arası) kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonunda şu sonuçlara varılmıştır :

1. Yük altındaki hacim değişimleri ve Poisson oranı agrega - hamur bağ dayanımından önemli derecede etkilenmektedir. Silikonla kaplanmış agregalı numunelerde zlme sınırını basınç dayanımının yalnız % 15'idir ; buna karşı işlem görmemiş agregalı beton modellerinde bu oran % 74, önceden temizlenmiş agregalı numunelerde ise % 85'dir. Ayrıca, zayıf bağ dayanımlı numunelerde Poisson oranındaki büyüme de daha önce başlamaktadır ve bu oranın kendi değeri de daha büyüktür.

2. Agregası - hamur dayanımı agregalar silikonla kaplanarak ortadan kaldırılmış numunelerin basınç dayanımları, normal bağ dayanımına sahip numunelerin basınç dayanımlarının 1/10 u mertebesinde dir.

1.3.2.5. Süreksizlik ve zlme sınırlarının betonun diğer mekanik özellikleri ile ilişkileri

Betonun kısa süreli basınç yükleme si altında gözlenen süreksizlik ve zlme sınırlarının betonun diğer mekanik özellikleri ile ilişkili olabileceği çeşitli araştırma - cılar tarafından dşnlmştir. Rsch (25) zlme sınırının snme dayanımına eşdeğer olabileceğini ne sürmektedir. Newman (26) ise buna ek olarak süreksizlik sınırının yorulma dayanımına eşdeğer olduğunu söylemektedir. Ancak bu görüşlerin karşısında olarak, Peltier (16) ve Orth-Jacquin-Buvat-Berrod (8) snme dayanımının daha çok süreksizlik sınırında olduğunu iddia etmektedirler. Sonuç olarak, bugün için, bu ilişkilerin henüz kesinlikle açıklığa kavuşmadığını söyleyebiliriz.

1.4. Araştırma konusu

1.4.1. Literatürde rastlanan boşluk

Betonu en basit ve gerçeğe yakın olarak bir bağlayıcı hamur tarafından bir arada tutulan agrega taneleri şeklinde düşünebiliriz. Buna göre betonun gösterdiği herhangi bir davranışın temeldeki nedenleri bağlayıcı hamurun, agreganın ve hamur - agrega etkileşmesinin özellikleridir . Özellikle yukarıdaki paragraflarda bahsedilen betonun kısa süreli basınç gerilmeleri altındaki inelastik davranışının temeldeki nedenleri de bunlardır.

1.3. paragrafında verilen çalışmalar gözden geçirildiğinde, agrega ve hamur - agrega etkileşmesine ait özelliklerin betonun kısa süreli basınç gerilmeleri altındaki davranışına yaptığı etkilerin oldukça aydınlandığı görülmektedir. Buna karşı bağlayıcı hamurun yapısının betonun bu davranışı üzerindeki etkisinin yeterli bir şekilde incelendiği söylenemez. Henüz bu etkinin kayda değer bir derecede var olup olmadığı bile açıklığa kavuşmuş değildir (Bkz. Prg.1.3.2.4.5 Ref. (10) ve (24)). Bugüne kadar yapılan çalışmalarda yalnız "Su/Çimento" oranının etkisi ele alınmıştır, fakat, paragraf 1.3.2.4.5 den görüldüğü gibi, bu etkenin etkisi dahi sistematik olarak incelenmemiştir ve eldeki sonuçlardan veya ileri sürülen görüşlerden kesin bir yargıya varmak olanak dışıdır. Diğer taraftan bağlayıcı hamur özellikleri en çok değişebilen beton bileşenidir ; bağlayıcı hamurun fiziksel veya kimyasal yapısı başka çeşit etkenlerle değiştirildiğinde betonun kırılma mekanizmasında ortaya çıkabilecek değişimleri inceleyen bir çalışmaya ise rastlanmamaktadır .

1.4.2. Bu araştırmada çözümlenecek sorun.

Kullanılacak yöntem. İncelenecek haller.

Bu araştırmada betonun bağlayıcı hamurunun yapısının bu malzemenin kısa süreli basınç gerilmeleri altındaki elastik davranışındaki işlevinin önemli olup olmadığı sorunu çözümlenmeye ve eğer önemliyse bu işlevin başlıca yasalarının saptanmasına çalışılacaktır. Bağlayıcı hamur olarak agrega dışındaki bütün bileşenlerin (çimento, su, hava, varsa katkıları ve yardımcı maddeler) oluşturduğu karışım anlaşılmaktadır.

Bu inceleme için yapılan betonlarda bağlayıcı hamur tarafından birbirine bağlanan agrega fazı hep aynı tutulmaktadır ; yani agreganın cinsi, granülometrik bileşimi, 1 m^3 betondaki toplam gerçek hacmi bütün betonlarda aynı kalmaktadır (Ancak araştırma alanını biraz geniş tutabilmek amacıyla 2 tip granülometrik bileşim seçilmiş ve bu yöntem bu 2 tipte ayrı ayrı izlenmiştir). Buna karşı agregaları birbirine bağlayan hamurun fiziksel ve kimyasal yapısı aşağıdaki yöntemlerle değiştirilmektedir :

- Su/Çimento oranını değiştirerek
- Hava sürükleyici katkı maddesi katarak
- Çimentonun bir bölümü yerine uçucu kül kullanarak
- Çimentonun bir bölümü yerine atıl kalker filleri kullanarak

Araştırmada, bu çeşitli hallerde, betonun kısa süreli tek eksenli basınç gerilmeleri altındaki davranışı incelenmektedir.

BÖLÜM II

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemenin tanımlanması

2.1.1. Agreganın özellikleri

Agrega olarak, İstanbul'da, Podima bölgesinden elde edilen doğal kumlu çakıl malzemesinden yararlanılmıştır. Bu malzeme satıcısından 4 incelikte elenmiş olarak temin edilmiştir. Bunların Amerikan elek takımına göre granülometrik bileşimleri aşağıda verilmektedir :

Cinsi	No. 100 (150 μ)	No. 50. (300 μ)	No. 30. (600 μ)	No. 16. (1,18mm)	No. 8 (2,36mm)	No. 4 (4,75mm)	3/8" (9,52mm)	3/4" (19,1mm)
İnce kum	0.2	3	29	94	98	99	100	100
İri kum	-	1	3	19	69	98	100	100
İnce çakıl	-	-	-	-	-	-	52	100
İri çakıl	-	-	-	1	2	3	22	100

Agregaların fiziksel özellikleri ise aşağıdaki tabloda belirtilmiştir :

<u>Cinsi</u>	<u>Birim ağırlık (kg/lt)</u>	<u>Özgül ağırlık (kg/lt)</u>	<u>Tane Porozitesi</u>	<u>Kompasite</u>
İnce kum	1.53	2.65	Ölçülmedi	0.577
İri kum	1.68	2.64	Ölçülmedi	0.636
İnce çakıl	1.71	2.65	% 0.54	0.645
İri çakıl	1.81	2.65	% 0.51	0.683

Çakıllar, agrega - hamur bağ dayanımının zayıflama - ması için, beton üretiminde kullanılmadan önce yıkanmış ve böylece çamurlu ve organik maddeler pratik olarak tamamen ortadan kaldırılmıştır. Kumlarda ise, yapılan deneyler sonucunda, organik maddenin mevcut olmadığı, çamurlu maddelerin ise çok az miktarda bulunduğu görülmüştür. Kumların yıkanmasındaki pratik güçlük de gözönüne alınarak, bunlar olduğu gibi kullanılmıştır. Kumlarda bulunan çamurlu madde miktarları aşağıda verilmiştir :

<u>Cinsi</u>	<u>Çamurlu madde oranı (ağırlık yüzdesi)</u>
İnce kum	% 0.6
İri kum	% 0.7

Agregaların petrografik bileşimi ise aşağıda verilmektedir :

<u>İnce Kum</u>	<u>İri Kum</u>
% 83 Kuvars	% 95 Kuvars, kuvarsit
% 6 Feldispat	% 2 Kavkı
% 5 Kavkı	% 1 Agat, opal, kalseduvan
% 4 Agat, opal, kalseduvan	% 1 Kalsit
% 1 Kalker	% 1 Serpantin ve diğerleri
% 1 Demir ve diğerleri	

<u>İnce Çakıl</u>	<u>İri Çakıl</u>
% 95 Kuvars, sileks	% 95 Kuvars, sileks
% 3 Opal, agat	% 3 Kalsit
% 1 Kalsit	% 1 Opal
% 1 Kavkı	% 1 Kavkı

2.1.2. Çimento özellikleri

Bütün betonlarda Nuh Çimento fabrikasının üretimi olan normal portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoların hepsi aynı zamanda alınmış ve çeşitli torbalardan alınan numunelerde yapılan standard deneylerden, torbalar arasında önemli farklar bulunmadığı ayrıca saptanmıştır.

Kullanılan çimento üzerinde TS 19 a göre yapılan deney sonuçları aşağıda verilmektedir.

FİZİKSEL ÖZELİKLER

Blaine özgül yüzeyi (cm^2/gr)	:	2470
4700 delikli elekte kalan (%)	:	9
950 delikli elekte kalan (%)	:	0.6
Özgül ağırlık (gr/cm^3)	:	3.16
Normal kıvam suyu (%)	:	26
Le Châtelier iğnelerinin açılması (Toplam)	:	2 mm
Priz başlangıcı	:	4 saat
Priz sonu	:	4 saat 30 dak.

MEKANİK ÖZELİKLER

(Rilem - Cembureau yöntemi ile dayanım değerleri)

Basınç dayanımları (kgf/cm^2)		Eğilme - Çekme dayanımları (kgf/cm^2)	
7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
270	345	55	64

KİMYASAL BİLEŞİM

Erimeyen	SiO_2	:	% 0.24
	SiO_2	:	%21.90
	Al_2O_3	:	% 3.91
	Fe_2O_3	:	% 3.51
	CaO	:	%65.21
	MgO	:	% 0.62
	SO_3	:	% 2.75
	K_2O	:	% 0.62
	Na_2O	:	% 0.72
Ateşte kayıp		:	% 1.18
	C_3S	:	%59.83
	C_2S	:	%17.74
	C_3A	:	% 4.43
	C_4AF	:	%10.67
Hidrolik modül		:	2.22
Silis modülü		:	2.95
Alümino ferrik mo-		:	1.11
dülü.			

Sonuç : Çimento fiziksel, kimyasal ve mekanik yönden TS 19 (Portland Çimentoları Standardı) da PÇ 325 Normal Portland Çimentosu için istenen özellikleri sağlamaktadır .

2.1.3. Katkı maddelerinin ve yardımcı maddelerin özellikleri

İlerdeki paragraflarda daha ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere, çeşitli beton serilerinde 3 tip katkı maddesi ve yardımcı madde kullanılmıştır. Bunlar :

- Hava sürükleyici katkı maddesi
- Uçucu kül
- Atıl kalker filleri dir.

Bu maddelerin özellikleriyle ilgili ayrıntılı bilgi aşağıdaki paragraflarda verilmektedir.

2.1.3.1. Hava sürükleyici katkı maddesi

Hava sürükleyici katkı maddesi olarak, Almanya'daki Grünau fabrikasının üretimi olan Tricosal LP isimli madde kullanılmıştır. Bu maddenin klorür ihtiva etmediği prospektüsünde belirtilmektedir.

2.1.3.2. Uçucu kül

Deneylerde Çatalağzı termik santralının uçucu külü kullanılmıştır. Bu madde üzerinde Türk Standartları Ensti - tüsü tarafından hazırlanmış bulunan "TS 639 - Uçucu küller" standardının gözden geçirilmiş ikinci tasarısına göre istenen deneyler yapılmıştır (Deneylerin yapıldığı tarihte T 639 standardı henüz yayınlanmamıştı). Bu deneylerde bulunan sonuçlar aşağıda verilmektedir.

FİZİKSEL ÖZELİKLER

Blaine özgül yüzeyi	(cm ² /gr)	:	1800
4700 delikli elekte kalan (%)	:	15.6	
950 delikli elekte kalan (%)	:	1.8	
Hacim genişmesi	(mm)	:	2
Basınç dayanımı oranı (28 günde):			1.07
Puzolanik aktivite oranı			
	(28 günde):		0.65

KİMYASAL ÖZELİKLER

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%) :	92.66
MgO (%) :	0.98
SO_3 :	Eser
Rutubet (%) :	0.8
Kızdırma kaybı (%) :	2.76

Sonuç : Uçucu kül, kimyasal bileşim açısından, standardın ön gördüğü koşulları iyi bir şekilde sağlamaktadır . Buna karşı inceliği standardda istenilen değerin (Bu değer $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ dır) epeyi altındadır. Ancak yine de, basınç dayanımı oranı standardda istenilen değeri (1.00) aştığından ve puzolanik aktivite oranı standarda (0.70) epeyi yaklaştığından, araştırmanın amacı bakımından standarda tam uymanın zorunlu olmadığı da düşünülerek, bu malzemenin betonlarda kullanılması yönüne gidilmiştir.

2.1.3.3. Atıl kalker filleri

Atıl kalker filleri, 1 numaralı mavi kalker kırmataşın bir öğütücüde öğütülmesi ve elde edilen malzemenin 88μ göz açıklıklı elekten elenmesiyle elde edilmiştir. Malzemenin özgül ağırlığı 2.79 gr/cm^3 , Blaine özgül yüzeyi $2300 \text{ cm}^2/\text{gr}$ dır.

2.1.4. Beton karışımları

2.1.4.1. Kabul edilen ilkeler

Araştırmada kullanılan betonlarda, paragraf 1.4.2 de belirtiltiği gibi, bağlayıcı hamur tarafından birbirine bağlanan agrega fazının cinsi, granülometrik bileşimi ve 1 m^3 betondaki toplam gerçek hacmi değiştirilmemekte, buna karşı bu agregaları birbirine bağlayan hamurun fiziksel ve kimyasal yapısı çeşitli yöntemlerle değiştirilmektedir. Bundan başka, yine paragraf 1.4.2 de belirtiltiği gibi, araştırma alanını biraz geniş tutabilmek amacıyla, 2 tip granülometrik bileşim seçilmiş (Bunlara A ve B betonları denmektedir) ve bu yöntem bu 2 tipte ayrı ayrı izlenmiştir.

Bütün betonlarda, 1 m^3 betondaki agreganın toplam gerçek hacmi 0.715 m^3 olarak seçilmiştir. Burada, $\pm 0.007 \text{ m}^3$ bir tolerans sınırı tanınmıştır. En büyük dane çapı $3/4''$ (19.1 mm) alınmıştır.

Bu miktarların ve kullanılan 2 tip granülometrik bileşimin seçiminde, şu 3 ilke gözönünde tutulmuştur :

1. Seçilen değerler , düşünülen çeşitli hamur yapılarıyla, yerleştirilebilmesi mümkün betonlar vermeli, ayrıca, hava sürükleyici katkı maddesiyle yapılan beton serisi gözönünde tutularak, beton içine yeterli miktarda hava sürüklenmesini sağlayacak şekilde olmalıdır.

2. 2 tip granülometrik bileşim birbirinden belirli bir şekilde farklı olmalıdır.

3. 2 tip granülometrik bileşim, uygulamada uygun bir şekilde kullanılabilecek kumu en az ve en fazla beton tiplerine yakın olmalıdır.

Bu 3 ilkenin ışığında, eldeki malzemelerle oldukça uzun süren bileşim denemeleri yapılmıştır. Sonuçta, aşağıda karakteristikleri verilen iki tip granülometrik bileşimde karar kılınmıştır :

A Betonu

Agrega oranları (gerçek hacimlerine göre) :

ince kum : 0.10

iri kum : 0.24

ince çakıl: 0.33

iri çakıl: 0.33

Kum : Çakıl = 1 : 1.95

Agrega karışımının granülometrik bileşimi :

<u>No.100</u>	<u>No.50</u>	<u>No.30</u>	<u>No.16</u>	<u>No.8</u>	<u>No.4</u>	<u>3/8"</u>	<u>3/4"</u>
-	1	4	14	27	34	58	100

B Betonu

Agrega oranları (gerçek hacimlerine göre) :

İnce kum : 0.31

İri kum : 0.21

İnce çakıl: 0.24

İri çakıl: 0.24

Kum : Çakıl = 1 : 0.96 (Ancak burada, agreg a oranlarının karşılaştırılmasından da görülebileceği gibi, kum, A betonuna göre, daha incedir)

Agrega karışımının granülometrik bileşimi :

<u>No.100</u>	<u>No.50</u>	<u>No.30</u>	<u>No.16</u>	<u>No.8</u>	<u>No.4</u>	<u>3/8"</u>	<u>3/4"</u>
0.1	1	10	33	44	52	70	100

Şimdi kullandığımız bu 2 tip granülometrik bileşimi uygulamada kullanılan bileşimlerle karşılaştıralım.

Bunun için, Şekil 2.1 de, A ve B betonlarının agre - ga karışımlarının granülometri eğrileri, eski DIN 1045 deki, D - E eğrileri ile birlikte çizilmiştir. Bilindiği gibi eski DIN 1045 in öngördüğü elekler yuvarlak deliklidir. Bu araştırmada kullanılan A ve B betonlarının granülomet - rik bileşimi ise kare delikli Amerikan elekleriyle saptan - mıştır. Şekil 2.1 in çizilmesinde kare delik ile yuvarlak delik arasında geçiş katsayısı 1.25 alınarak (27) bu farkın etkisi ortadan kaldırılmıştır. Çizilmiş granülometri eğri - lerinden görüldüğü gibi, A betonu D eğrisine, B betonu ise E eğrisine oldukça yakın bir şekilde uymaktadır. Aradaki başlıca fark en büyük dane boyutundadır. Bilindiği gibi es - ki DIN 1045 D - E eğrilerinde en büyük dane çapı 30 mm dir. Bizim araştırmamızda ise bu değer $19.1 \times 1.25 = 24\text{mm}$ olmaktadır. Bu değer in saptanmasında şu düşünce etken ol - muştur : Üretilecek malzeme alışılmış ölçüler içinde "be - ton" karakterine sahip olacak kadar iri daneli olmalı, an - cak dane büyüklüğü mekanik deneylerdeki şekildeğiştirme ölçmelerinin sıhhat derecesi bakımından olanak olduğu oran -

da küçük olmalıdır ; çünkü şekildeğiştirmelerin ölçülmesinde ölçü uzunlukları bellidir (Bkz.paragraf 2.2), bu durumda bu uzunluklar içinde agrega danesi sayısı ne kadar fazla ise ölçü alınan bu kısımlar betondaki gerçek davranışı o oranda daha iyi temsil edecektir. Bu düşüncenin ışığında en büyük dane çapının, kare delikli elek sisteminde, $3/4"=19.1$ mm alınmasına karar verilmiştir.

2.1.4.2. Karışım hesapları

2.1.4.1. paragrafında da belirtildiği gibi, üretilen betonun granülometrisi ister A ister B tipinde olsun, 1 m^3 yerleşmiş betondaki toplam agrega gerçek hacmi daima 0.715 m^3 alınmıştır. Geriye kalan kısım çimento, su, hava ve varsa katkı maddeleri tarafından doldurulmaktadır. Araştırmada bunların hepsi birden bağlayıcı hamur olarak düşünülmüştür. Buna göre bütün betonlarda bağlayıcı hamurun hacmi $1-0.715 = 0.285 \text{ m}^3$ olmaktadır ($\pm 0.007 \text{ m}^3$ tolerans sınırları içinde).

Bu ilkelerin ışığı altında beton bileşim hesaplarında izlenen yol aşağıda verilmektedir.

Kullanılan notasyon :

$c = 1 \text{ m}^3$ yerleşmiş betonda çimento gerçek hacmi (m^3)

$e = 1 \text{ m}^3$ yerleşmiş betonda su hacmi (m^3)

$h = 1 \text{ m}^3$ yerleşmiş betonda hava hacmi (m^3)

$C = 1 \text{ m}^3$ yerleşmiş betonda çimentonun ağırlığı (kg)

$E = 1 \text{ m}^3$ yerleşmiş betonda suyun ağırlığı (kg)

$$w = \frac{E}{C} \text{ oranı}$$

$$\rho_c = \text{Çimentonun özgül ağırlığı (kg/lt)}$$

$$A_i = 1 \text{ m}^3 \text{ yerleşmiş betonda herhangi bir (i) agregasının ağırlığı (kg)}$$

$$P_i = \text{(i) agregasının karışım oranı}$$

$$\rho_{ai} = \text{(i) agregasının özgül ağırlığı (kg/lt)}$$

1 m³ yerleşmiş betonda, bağlayıcı hamurun toplam hacmi :

$$c + e + h = 0.285 \text{ m}^3 \quad (1)$$

E/C = w oranı önceden seçilmektedir. Buna göre :

$$\frac{e}{c} = w \cdot f_c \text{ olur.} \quad (2)$$

(1) ve (2) den :

$$c + w \cdot f_c \cdot c + h = 0.285$$

$$c(1 + w \cdot f_c) + h = 0.285$$

(h) tahmin edilir. Böylece :

$$c = \frac{0.285 - h}{1 + w \cdot f_c} \text{ bulunur.}$$

Bundan sonra, 1 m³ yerleşmiş betonu oluşturan malzemelerin ağırlıkları aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır :

$$C = c \cdot f_c$$

$$E = w \cdot C$$

$$A_i = 0.715 \times p_i \times f_{ai} \times 1000$$

Araştırmada kullanılan betonların bileşimi yukarıda açıklandığı gibi hesaplanmıştır. Ancak burada (h) kesin olarak önceden bilinmemektedir. Bu yüzden tahmin edilen (h) ya göre bileşimi hesaplanan betonda, toplam agrega gerçek hacmi her zaman 0.715 m³ olmamaktadır. Bu güçlüğü yenmek için, her bileşim için önce bir ön beton üretilmiş,

bunun üzerinde taze birim ağırlık ve buradan da gerçek malzeme miktarları bulunmuştur. Eğer toplam agrega gerçek hacmi $0.715 \pm 0.007 \text{ m}^3$ arasında ise (Bu sınırlar toplam agrega gerçek hacminde % 1 hataya karşı geliyor), saptanan bileşim aynen korunarak esas betonun üretimine geçilmiştir. Eğer bu sınırların dışına çıkılmışsa elde edilen sonuç da gözönüne alınarak aynı işlemlere devam edilmiştir. Sonuç olarak, bütün betonlarda toplam agrega gerçek hacminin $0.715 \pm 0.007 \text{ m}^3$ olması sağlanmıştır.

2.1.4.3. Üretilen karışım serileri. Elde edilen betonlar

Paragraf 1.4.2 de de belirtildiği gibi, bu araştırmada, bağlayıcı hamurun yapısı aşağıda gösterilen yöntemlerle değiştirilmiştir :

- Su/Çimento oranını değiştirerek
- Hava sürükleyici katkı maddesi katarak
- Çimentonun bir bölümü yerine uçucu kül kullanarak
- Çimentonun bir bölümü yerine atıl kalker filleri kullanarak

Üretilen betonlarda bu 4 yöntemin herbiri ayrı bir karışım serisini oluşturmuştur. Bu serilerin isimlendirilmesi şöyledir :

- Su/Çimento oranı serisi (E/C serisi)
- Hava sürükleyici katkı maddesi serisi (HS serisi)
- Uçucu kül serisi (UK serisi)
- Kalker filleri serisi (KF serisi)

Her seriden, A ve B granülometreleriyle veya yalnız A granülometresiyle ve çeşitli bileşimlerde betonlar üretilmiştir. Üretilen bu betonların dökümü aşağıda verilmektedir.

1. E/C serisi

Su/Çimento oranları 0.27 ilâ 0.75 arasında değişen ve A ve B tipi granülometriye sahip aşağıdaki betonlar üretilmiştir :

a) E/C-A Betonları

E/C - A - 0.27	E/C - A - 0.59
E/C - A - 0.35	E/C - A - 0.67
E/C - A - 0.43	E/C - A - 0.75
E/C - A - 0.51	

Burada son sayılar Su/Çimento oranlarını göstermektedir.

b) E/C - B Betonları

E/C - B - 0.27	E/C - B - 0.59
E/C - B - 0.35	E/C - B - 0.67
E/C - B - 0.43	E/C - B - 0.75
E/C - B - 0.51	

2. HS Serisi

A tipi granülometriyle 0.35 ve 0.67 Su/Çimento oranlarında, B tipi granülometriyle ise 0.43 ve 0.75 Su/Çimento oranlarında, ve Tricosal LP hava sürükleyici katkı maddesi çeşitli yüzdelerde kullanılarak, aşağıdaki betonlar üretilmiştir :

a) HS - A Betonları

HS - A - 0.35 - 0.065	HS - A - 0.67 - 0.064
HS - A - 0.35 - 0.5	HS - A - 0.67 - 0.5

Burada birinci sayılar Su/Çimento oranını, ikinci sayılar ise, yüzde cinsinden çimento ağırlığına nispetle hava sürükleyici katkı maddesi oranını göstermektedir.

b) HS - B Betonları

HS - B - 0.43 - 0.06	HS - B - 0.75 - 0.035
HS - B - 0.43 - 0.5	HS - B - 0.75 - 0.485

3. UK Serisi

Yalnız A tipi granülometriyle, 0.35 ve 0.59 Su/Bağlayıcı oranlarıyla ve iki oranda uçucu kül kullanılarak aşağıdaki betonlar üretilmiştir :

UK - A - 0.35 - 35

UK - A - 0.59 - 35

UK - A - 0.35 - 50

UK - A - 0.59 - 50

Son sayılar, yüzde cinsinden, çimentonun gerçek hacim cinsinden ne kadarlık bir bölümünün uçucu külle ikame edildiğini göstermektedir.

4. KF Serisi

Yalnız A tipi granülometriyle, 0.43 Su/Çimento oranıyla ve iki oranda atıl kalker filleri kullanılarak aşağıdaki betonlar üretilmiştir :

KF - A - 0.43 - 5

KF - A - 0.43 - 15

Burada da son sayı, yüzde cinsinden, çimentonun gerçek hacim cinsinden ne kadarlık bir bölümünün kalker filleriyle ikame edildiğini göstermektedir.

Üretilmiş bulunan bu betonların ayrıntılı bileşimleri ve taze beton özellikleri Tablo 2.1 ilâ Tablo 2.4 de verilmiştir.

2.1.4.4. Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme, kür

Bütün betonlar düşey eksenli zorlamalı karıştırma-
lı ufak betoniyerde (malaksör) karıştırılarak üretilmiştir. Bütün betonlarda karıştırma bir defada bütün malzemeler bir arada karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Karıştırma süreleri kıvama göre 2 ilâ 3.5 dakika arasında değiştirilmiştir.

TABLO 2.1

E/C Serisi Betonların Özellikleri

Karışım kodu	1 m ³ Betona giren gerçek malzeme miktarları (kg)						Taze Beton Özellikleri				
	Çimento	Su	İnce kum	İri kum	İnce çakıl	İri çakıl	Vebe (sn)	Çökme (cm)	Birim ağırlık (kg/lt)	Kompasite	Hava boşluğu
E/C-A-0.27	445	120	191	458	632	632	9	0	2.481	0.863	1.6
E/C-A-0.35	405	142	189	452	624	624	4.5	2	2.436	0.842	1.6
E/C-A-0.43	358	154	190	453	627	627	2.5	6.5	2.409	0.830	1.7
E/C-A-0.51	326	166	189	454	626	626	- *	13	2.388	0.819	1.5
E/C-A-0.59	304	180	190	455	628	628	-	14.5	2.384	0.814	0.6
E/C-A-0.67	285	191	187	448	619	619	-	14.5	2.349	0.798	1.1
E/C-A-0.75	258	193	189	453	625	625	-	17.5	0.343	0.797	1.0
E/C-B-0.27	390	106	585	390	466	466	36	0	2.402	0.844	5.1
E/C-B-0.35	363	127	578	385	460	460	6.5	0	2.374	0.826	4.7
E/C-B-0.43	319	137	579	386	461	461	4	0	2.344	0.814	4.9
E/C-B-0.51	287	146	578	386	460	460	2.5	0.3	2.317	0.802	5.1
E/C-B-0.59	266	157	575	384	458	458	2	0.9	2.299	0.792	5.1
E/C-B-0.67	240	161	585	390	466	466	2	0.9	2.309	0.796	4.3
E/C-B-0.75	227	170	581	388	463	463	1.5	1.2	2.292	0.787	4.2

* Kıvam fazla sulu olduğundan Vebe derecesi ölçülememiştir.

TABLO 2.2
HS Serisi Betonlarının Özellikleri

Karışım Kodu	1 m ³ Betona giren gerçek malzeme miktarları (kg)							Taze beton özellikleri				
	Çimento	Su	İnce kum	İri kum	İnce çakıl	İri çakıl	Tricoaal LP	Vebe (sn)	Çökme (cm)	Birim ağırlık (kg/lt)	Kompasite	Hava boşluğu(%)
HS-A-0.35-0.065	353	123	190	456	630	630	0.229	4	0.3	2.382	0.832	4.5
HS-A-0.35-0.5	286	100	190	455	628	628	1.432	4.5	0.5	2.264	0.809	9.2
HS-A-0.67-0.064	199	133	190	456	630	630	0.126	-	16	2.238	0.783	8.4
HS-A-0.67-0.5	122	81	187	449	620	620	0.610	-	3.2	2.081	0.747	17.1
HS-B-0.43-0.06	277	119	584	389	465	465	0.166	5	0	2.299	0.806	7.4
HS-B-0.43-0.5	233	100	577	385	460	460	1.164	5.5	0	2.216	0.784	11.4
HS-B-0.75-0.035	199	149	576	384	459	459	0.0695	2	1.5	2.226	0.772	7.9
HS-B-0.75-0.485	120	90	582	388	463	463	0.582	5	0	2.086	0.756	15.4

TABLO 2.3
UK Serisi Betonlarının Özellikleri

Karışım Kodu	1 m ³ Betona giren gerçek malzeme miktarları (kg)							Taze beton özellikleri				
	Çimento	Su	İnce kum	İri kum	İnce çakıl	İri çakıl	Uçucu kül	Vebe (sn)	Çökme (cm)	Birim ağırlık (kg/lt)	Kompasite	Hava boşluğu(%)
UK-A-0.35-35	273	146	190	455	628	628	85	2.5	7	2.406	0.850	0.5
UK-A-0.35-50	218	152	188	451	622	622	126	1.7	7.7	2.381	0.849	0
UK-A-0.59-35	202	184	189	453	625	625	63	-	19	2.341	0.813	0.3
UK-A-0.59-50	158	186	189	453	625	625	92	-	14.5	2.328	0.814	0

TABLO 2.4

KF Serisi Betonlarının Özellikleri

Karışım Kodu	1 m ³ Betona giren gerçek malzeme miktarları (kg)						Taze beton özellikleri					
	Çimento	Su	İnce kum	İri kum	İnce çakıl	İri çakıl	Kalker Filleri	Vebe (sn)	Çökme (cm)	Birim ağırlık (kg/lt)	Kompasite boşluğu(%)	Hava
KF-A-0.43- 5	340	155	190	456	629	629	17	1.5	5	2.417	0.833	1.2
KF-A-0.43-15	307	155	191	457	630	630	47	2.2	4.5	2.418	0.835	1.0

Üretilen betonlar çapı 15 cm, yüksekliği 30 cm olan silindirik kalıplara yerleştirilmiştir. Betonların kalıplarına yerleştirilmesinde göz önünde tutulan ilke, her betonun kıvamına göre en iyi şekilde sıkışmasını sağlamak ve ayrışmayı kesinlikle önlemek olmuştur. Bunun için çeşitli kıvamlarda çeşitli yerleştirme yöntemleri uygulanmıştır. Çok sulu olmayan betonlar önce 2 tabaka (Su/Çimento oranları 0.27 olanlar 3 tabaka) halinde şişlenerek kalıplarına yerleştirilmiş sonra motorla çalışan titreşim masası üzerinde yerleştirme tamamlanmıştır. Çok sulu betonlar yalnız iki tabaka halinde şişlenerek yerleştirilmiş, bunlarda titreşim uygulanmamıştır. Yerleştirmenin tam ve homojen olduğu gerek yerleşmiş taze beton üzerinde yapılan gözlemlerle, gerekse daha sonra sertleşmiş şahit numuneleri yarıp içine bakarak tahkik edilmiştir. Çeşitli kıvamlarda uygulanan yerleştirme yöntemlerine örnekler aşağıda verilmektedir. Bütün betonların ayrıntılı yerleştirme yöntemleri, gereksiz olduğu düşünülerek, verilmeyecektir.

E/C - A - 0.27 betonu önce 3 tabaka halinde ve her tabaka 100 defa şişlenerek yerleştirilmiş, sonra 1 dakika titreşim uygulanmıştır. Çok kuru diğer bir beton olan E/C - B - 0.27 betonu da benzer şekilde yerleştirilmiş ancak buna 1.5 dakika titreşim uygulanmıştır (İleride verilecek mekanik deney sonuçlarından, bu yerleştirmelerin bile bu betonlarda yeterli olmadığı görülecektir).

E/C - A - 0.43 betonu 2 tabaka halinde ve her tabaka 25 defa şişlenerek yerleştirilmiş, sonra 15 saniye titreşim uygulanmıştır.

E/C - A - 0.59 betonu 2 tabaka halinde ve her tabaka 25 defa şişlenerek yerleştirilmiş, ayrıca titreşim uygulanmamıştır.

Betonların kürü, ileride bahsedilecek "Jel/Hacim" oranlarının literatürdeki verilerden hesap edilebilmesini sağlamak amacıyla, en yüksek rutubet koşullarında yapılmıştır. Bunun için, silindirik kalıplarına yerleştirilmiş olan betonların üst yüzeyleri zaman geçirilmeden bir naylon tabaka kalıp etrafına lâstikle sarılarak kapanmıştır. Numuneler 24 saat bu şekilde kaldıktan sonra kalıplarından çı-

karılmış ve hemen su dolu havuza ($20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$) konmuştur. Betonlar burada mekanik deney tarihinden 2 hafta evveline kadar, yani 24 hafta süreyle suda kalmıştır. Numuneler mekanik deneyden 2 hafta önce sudan çıkarılmış ve havuzların yanında ortalama % 90 rutubetteki durgun havalı bir yerde $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 11-12 gün süreyle kısmen kurutulmuştur. Bu süre içinde çok kısa bir zaman için (30 dakika kadar) laboratuvar atmosferine çıkarılıp ($20^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$, % 60 $\pm$ 5 rutubet) çimento-alçı karışımıyla başlıkları yapılmış, sonra tekrar yüksek rutubetli kurutma yerine konmuştur. Mekanik deneyden 2-3 gün evvel numuneler "Tricuring" isimli kloritten arı bir beton kür maddesi fırçayla 2 kat sürülerek kaplanmış ve bundan sonra laboratuvar atmosferine çıkarılarak üzerlerine şekildeğiştirme ölçme çerçevelerinin tutturulması için gereken özel parçacıklar yapıştırılmıştır. Daha sonra numuneler laboratuvar atmosferinde mekanik deneylere tâbi tutulmuştur.

Numunelere mekanik deneylerden önce hidratasyonlarını büyük ölçüde tamamlamada şu düşünce etken olmuştur : Bilindiği gibi betonun özellikleri zamanla değişmektedir. Bu araştırmada ise zamanın (beton yaşının) etkisi incelenmektedir. Bu bakımdan araştırmanın zaman etkisinin sona ererek beton özelliklerinin kararlı duruma vardığı "tam hidratate olmuş" duruma yakın bir durumda yapılması tercih edilmiştir. Betonun yaşının inelastik özellikler üzerindeki etkisini ilerdeki bir çalışmada incelemek uygun olacaktır.

2.1.5. Numune boyut ve sayıları

Yukarıda da belirtildiği gibi numunelerin hepsi 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindirlere dir. Her karışımdan 3 numune yapılmıştır. Numuneler üretimlerinden sonraki 26 ncı haftada boyuna ve enine şekildeğiştirmeler ölçülerek tek eksenli basınç deneyine tâbi tutulmuştur. Her karışım için hazırlanmış 3 numune mekanik deneyden önce tartılmış ve bunlardan en yakın ağırlıkta olan 2 tanesi (3 numunenin ağırlıklarındaki farkların çok küçük olduğu daima gözlenmiştir) üzerinde mekanik deney uygulanmıştır. Şayet mekanik deney sonuçları 2 numunede çok yakın çıkarsa bu kadar numuneyle yetinilmiş, eğer bir farklılık varsa üçüncü numune de mekanik deneyeye tâbi tutulmuştur.

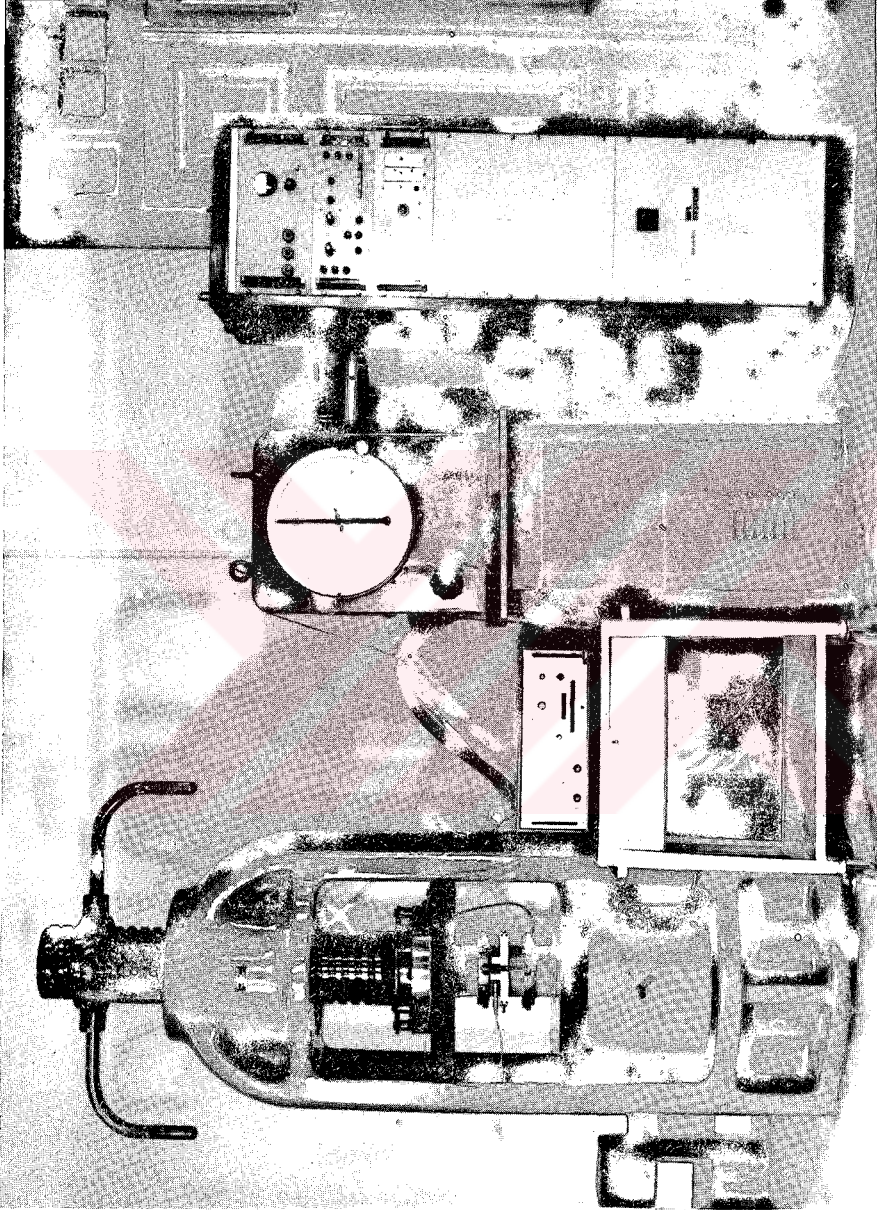
2.2. Deneylerin tanımlanması. Yöntemler

Yukarıda da belirtildiği gibi mekanik deneylerde silindirik şeklindeki numuneler tek eksenli kısa süreli basınç deneyine tâbi tutulmuştur. Bu deneylerde betonun yük altındaki boyuna ve enine şekildeğiştirmeleri ölçülerek buradan elâstiklik modülü, Poisson oranı, süreksizlik ve çözülme sınırları hesaplanmış ve "Gerilme - Boyuna şekildeğiştirme", "Gerilme - Poisson Oranı" ve "Gerilme-Hacimsal şekildeğiştirme" diyagramları çizilmiştir.

Basınç deneyleri Amsler marka 500 ton kapasiteli preste yapılmıştır. Yüklemenin kontrolü bu presle beraber çalışan MFL marka servo kontrollü elektrohidrolik regülatör ile sağlanmıştır. Deney düzeni genel olarak Şekil 2.2 de görülmektedir.

Tek eksenli basınç gerilmesi durumunun en iyi bir şekilde sağlanması için, Keeton (28) un tavsiyesine uyularak numune ile pres tablaları arasına 7 mm kalınlıkta oluklu mukavva parçalar konmuştur. Bu araştırmacının betonun yüzeyine fotoelâstik bir madde kaplayarak yaptığı gözlemlerde, arada oluklu mukavva bulunması durumunda, numune - tabla temas yüzeyinde ve civarında şekildeğiştirme yayılımının çok daha üniform olduğu ve numunenin hemen tamamına yakın bir bölümünde istenilen tek eksenli basınç gerilmesi haline ulaşıldığı görülmüştür. Araştırmacı bu sonucu mukavvanın beton numune - çelik tabla arasındaki sürtünmeyi ve temas yüzeylerindeki ufak geometrik uygunsuzlukları büyük ölçüde azaltmasıyla açıklamaktadır.

Deneylerde betonun basınç gerilmesi altındaki şekildeğiştirme artış hızı sabit tutulmuştur. Bu hızın değeri $1.44 \mu D / \text{sec}$ dur. (μD (mikrodeformasyon) birim şekildeğiştirme birimi olarak kullanılmakta olup, $1 \mu D = 10^{-6}$ dır. Bu yükleme hızıyla numunelerin basınç dayanımlarına ulaşp kırılmaları için 5 ilâ 12 dak. zaman gerekmiştir. Şekildeğiştirme okumaları başlangıçta 2 tonda bir, betonun kırılmasına doğru ise 1 tonda bir ve bazen daha sık yapılmıştır. Okuma sırasında yük artışı durdurulmamış, yük başlangıçtan kırılmaya kadar kesintisiz olarak artırılmıştır.

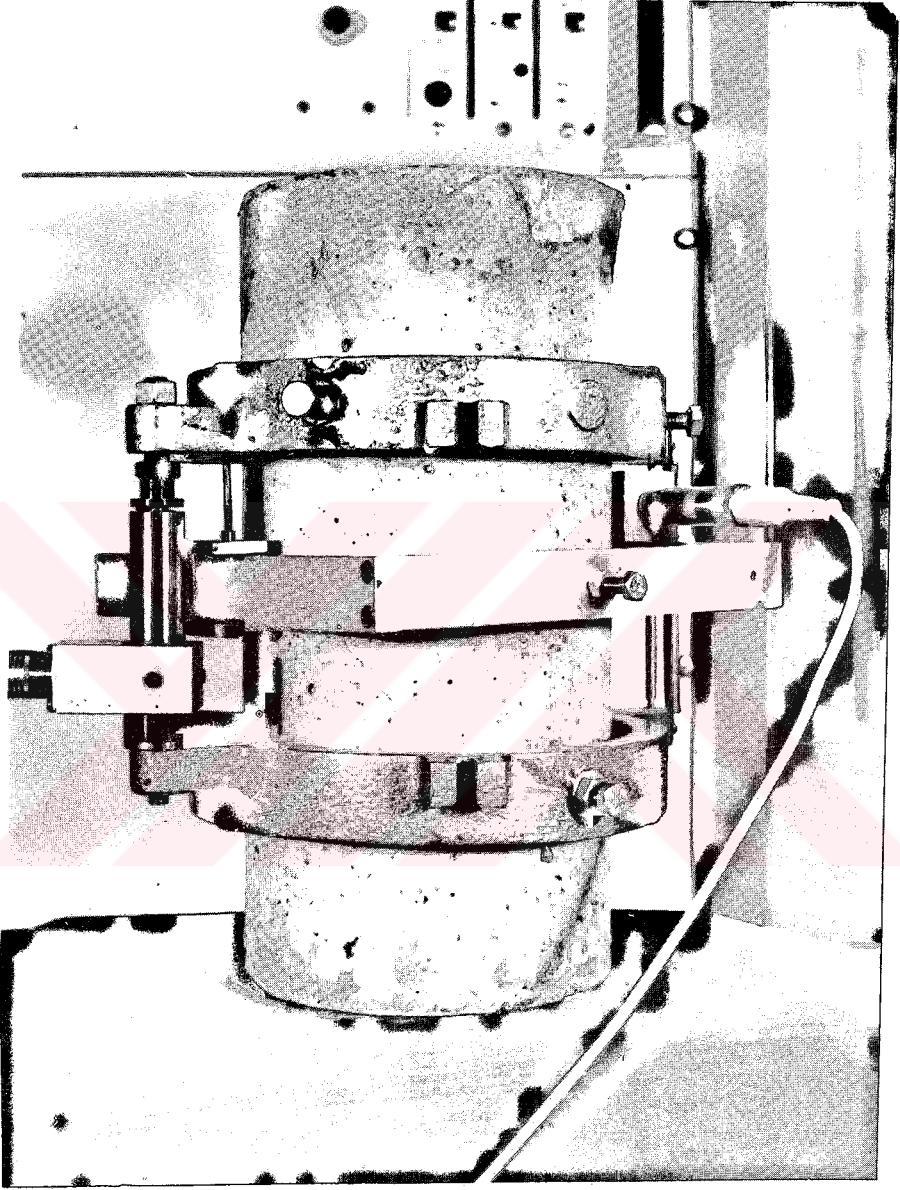


Şekil 2.2
Deney Düzenin Genel Görünüşü

Boyuna şekildeğiştirmeler numune üzerine takılan ve 140 mm lik bir boyda betonun ekseninde meydana gelen kısalmanın iki katını veren özel bir çerçeve yardımıyla ölçülmüştür. Bu amaçla yüklemeyi kontrol eden elektrohidrolik regülatörün transducer'i bu çerçeveye bağlanmış ve böylece hem şekildeğiştirme artış hızının kontrolü, ve hem de şekildeğiştirmenin ölçülmesi aynı transducer'le sağlanmıştır. Bu, deplasman ölçen ve manyeto-rezistif tipten bir transducer'dir. Bu transducer ve elektrohidrolik regülatörle yapılan okumalarda 37.2 ünite sayaç okuması betonda 0.05 mm kısaltmaya karşı gelmektedir ; buna göre bir sayaç okuması betonda 0.05/37.2 mm kısaltmayı gösterir. Uygulanan şekildeğiştirme hızında sayaç dakikada 9 sayı artmaktadır. Okuma duyarlığını yükseltmek için, sayaçın bu şekilde sabit hızla dönme durumundan yararlanılmış ve sayaç yerine $\frac{1}{100}$

dakika taksimatlı kronometre okunmuştur. Böylece $\frac{9}{100} = 0.09$ sayaç taksimatı hatası ile boyuna şekildeğiştirmelerin okunması mümkün olmuştur. Bu ise $0.09 \times \frac{0.05}{37.2} = 0.00012$ mm ye karşı gelmektedir. Ölçü boyu 140 mm olduğundan birim kısaltma ölçülmesinde sağlanan duyarlık $\frac{0.00012}{140} = 0.8 \times 10^{-6}$ = 0.8 μ D olmuştur.

Enine şekildeğiştirmelerin ölçülmesi için numunenin tam ortasında çapsal yöndeki genişlemeyi ölçebilecek özel bir çerçeve düşünülmüştür. Boyuna ve enine şekildeğiştirme ölçme düzenleri toplu olarak Şekil 2.3 de görülmektedir. Bir tarafı mafsallı olan enine şekildeğiştirme çerçevesi ölçü transducer'ının bağlandığı karşı tarafında, betonda çapsal yönde meydana gelen genişlemeyi 2 misli büyüterek vermektedir. Ölçü transducer'ı olarak HBM firmasının WIT/2 endüktif transducer'ı kullanılmıştır. Bu, deplasman ölçen tipten bir aygıttır. Bu transducer'dan alınan sinyal yine HBM firmasının KWS/3S-5 tipi amplifikatöründen okunmuştur. Bu düzenle yapılan şekildeğiştirme ölçmelerinde başlangıçta çok yüksek sonra şekildeğiştirmeler arttıkça daha düşük duyarlıklar sağlanmaktadır. Şöyle ki ; Amplifikatörün en duyarlı olduğu 1 kademesinde, 100 taksimatlık kadranın tümü, transducer'ın 1 μ (mikron) luk deplasmanına karşı gelmektedir. Kadran üzerinde 1 taksimat hata ile okuma yapmak mümkündür. Buna göre bu kademedeki deplasman okunmasında-



Şekil 2.3

Boyuna ve Enine Şekildeğiştirme Ölçme Düzenleri

ki hata 0.01μ olmaktadır. Ancak, deplasmanın değeri 1μ u aşarsa, bu defa amplifikatörün 2 kademesinde okuma yapmak gerekmektedir ki, burada tüm kadran 2μ luk bir deplasmana karşı gelmekte ve burada yapılan okuma hatası da 0.02μ olmaktadır. Amplifikatörün bundan sonra 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 ve 1000 kademeleri vardır ve bu kademelerde yapılabilecek deplasman okuması hataları da sırasıyla 0.05μ , 0.1μ , 0.2μ , 0.5μ , 1μ , 2μ , 5μ ve 10μ olmaktadır. Bizim deneylerimizde amplifikatörü genellikle 5 ilâ 100 kademeleri arasında kullanmak gerekmiştir ; çok ender olarak bazen 200 kademesi de kullanılmıştır. Buna göre deplasman okunmasında yapılan hata 0.05μ ilâ 2μ arasında değişmiştir. Diğer taraftan, betonun yanıl genişlemesi, yukarıda da söylendiği gibi, 150 mm lik çapta ve bu genişleme 2 defa büyölterek ölçülmüştür. Buna göre, yukarıdaki deplasman ölçme hatalarını $2 \times 150 = 300$ mm ye bölerek betonun birim yanıl genişlemesinde yapılan hatayı bulmak mümkündür. Bu hatalar, bu şekilde hesaplanarak, aşağıdaki tabloda verilmiştir.

<u>Kademe</u>	<u>Birim Yanıl Genişleme Ölçülmesinde Yapılan Hata</u>
5	$0.17\mu D$
10	$0.34\mu D$
20	$0.68\mu D$
50	$1.7\mu D$
100	$3.4\mu D$
200	$6.8\mu D$

Boyuna ve enine şekildeğiştirme ölçen çerçevelerin vidaları doğrudan doğruya beton yüzeyine değil, beton yüzeyine yapıştırılan özel ayaklara oturtulmuştur. Boyuna çerçeve için bu ayakların oldukça kolay şekildeğiştirme yapabilen bir malzemeden yapılması gerekmiştir ; zira, aksi durumda, betonun yanıl genişlemesi dolayısıyla, bu çerçeve iç basınca maruz kalmış gibi zorlanmakta ve kendisi de betonu bir ölçüde frete etmektedir. Bu sakıncadan kurtulmak için polivinil klorür (PVC) ayakların kullanılmasının uygun olduğu gözlenmiştir ; ayrıca bu PVC ayakların çerçevelerin ken-

di ağırlılığıyla deplasman yapmasına olanak vermeyecek derecede bir rijitliğe sahip olduğu da görülmüştür. Yanal çerçeve için fretaj durumu bahis konusu değildir ; ölçü sıh - hati bakımından bu çerçevenin takıldığı ayakların mümkün olduğu kadar rijit bir maddeden yapılması gerekmektedir. Bu bakımdan bu çerçevenin ayakları pirinçten yapılmıştır. Bütün ayakların beton yüzeyine geometrik bakımdan uygun ve sağlam bir şekilde yapışması için de burada ayrıntısına girilmeyecek azamî özen gösterilmiştir ; boyuna şekildegış - tirme ölçme çerçevesinin ayakları "Bally" marka, enine şekildegıştirme ölçme çerçevesinin ayakları da "404" marka yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır.



BÖLÜM III

DENEY SONUÇLARI

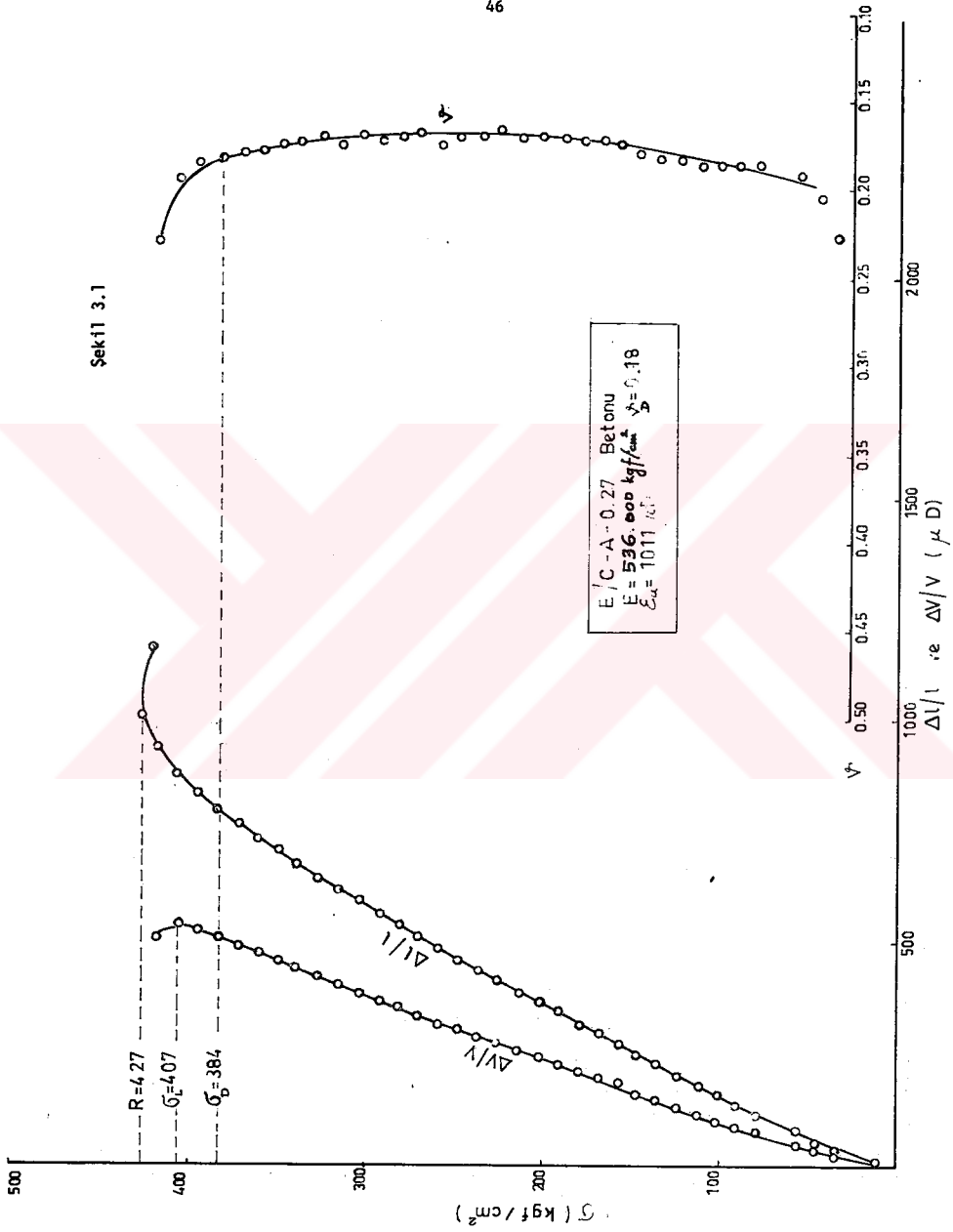
Önceki bölümlerde mahiyeti ve ayrıntıları açıklanan deneylerde elde edilen sonuçlar bu bölümde tablolar ve grafikler halinde verilmektedir. Bu tablo ve grafiklerde açıklanması gereken hususlar da yine bu bölümde ayrıca belirtilecektir.

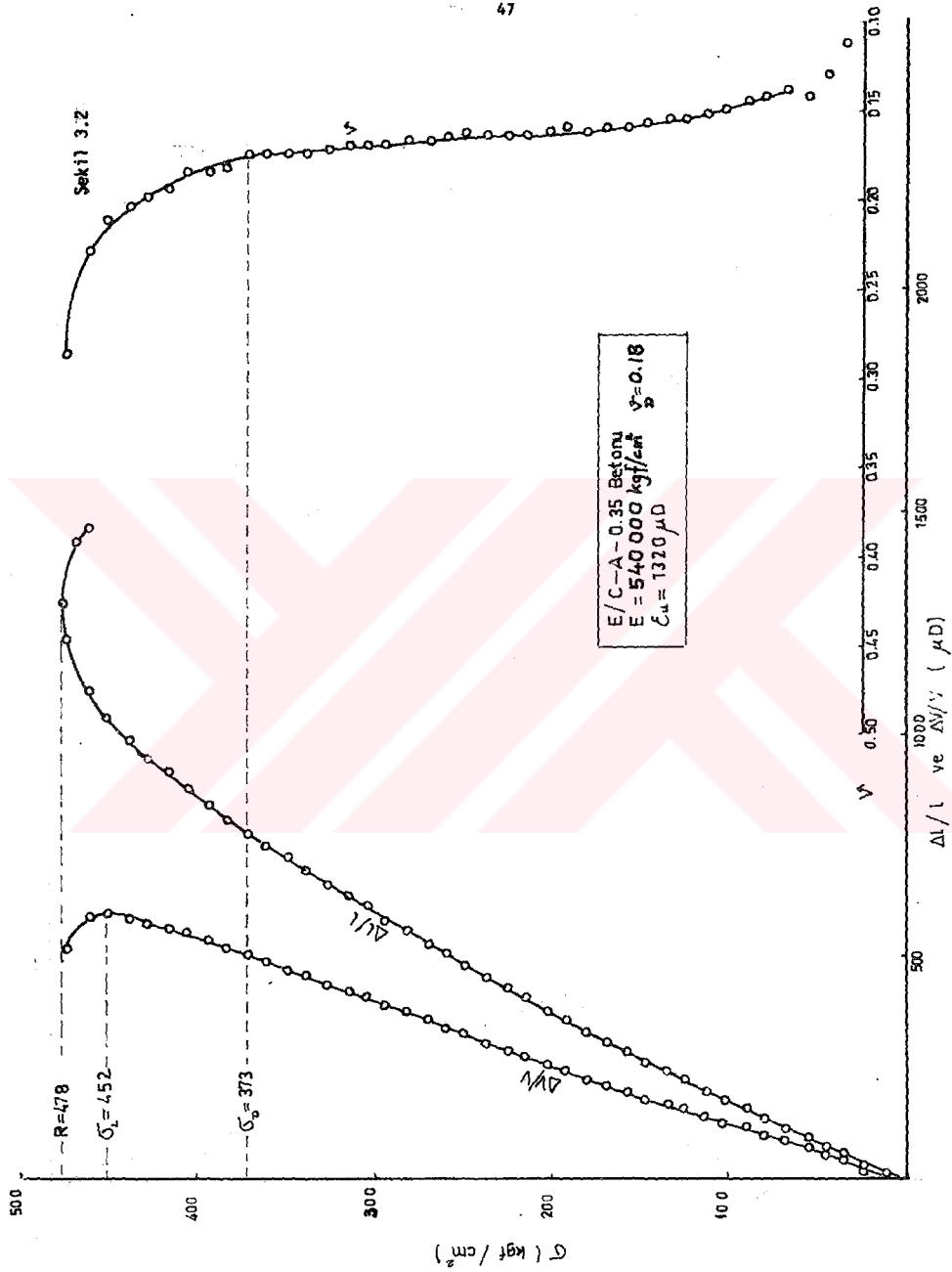
3.1. E/C Serisi deney sonuçları

E/C serisine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 3.1 ilâ Şekil 3.14 de verilmektedir. Bu eğrilerde gerilme (σ) ye göre boyuna birim kısalma ($\Delta l/l$), Poisson oranı (ν) ve hacımsal birim şekildeğiştirme ($\Delta V/V$) nin değişimleri çizilmiş, ayrıca süreksizlik sınırı (σ_D) çözümlenme sınırı (σ_L) basınç dayanımı (R) işaret edilmiş ve elâstiklik modülü (E), süreksizlik sınırındaki Poisson oranı (ν_D) ile basınç dayanımındaki birim kısalma (ϵ_u) nin değerleri yazılmıştır.

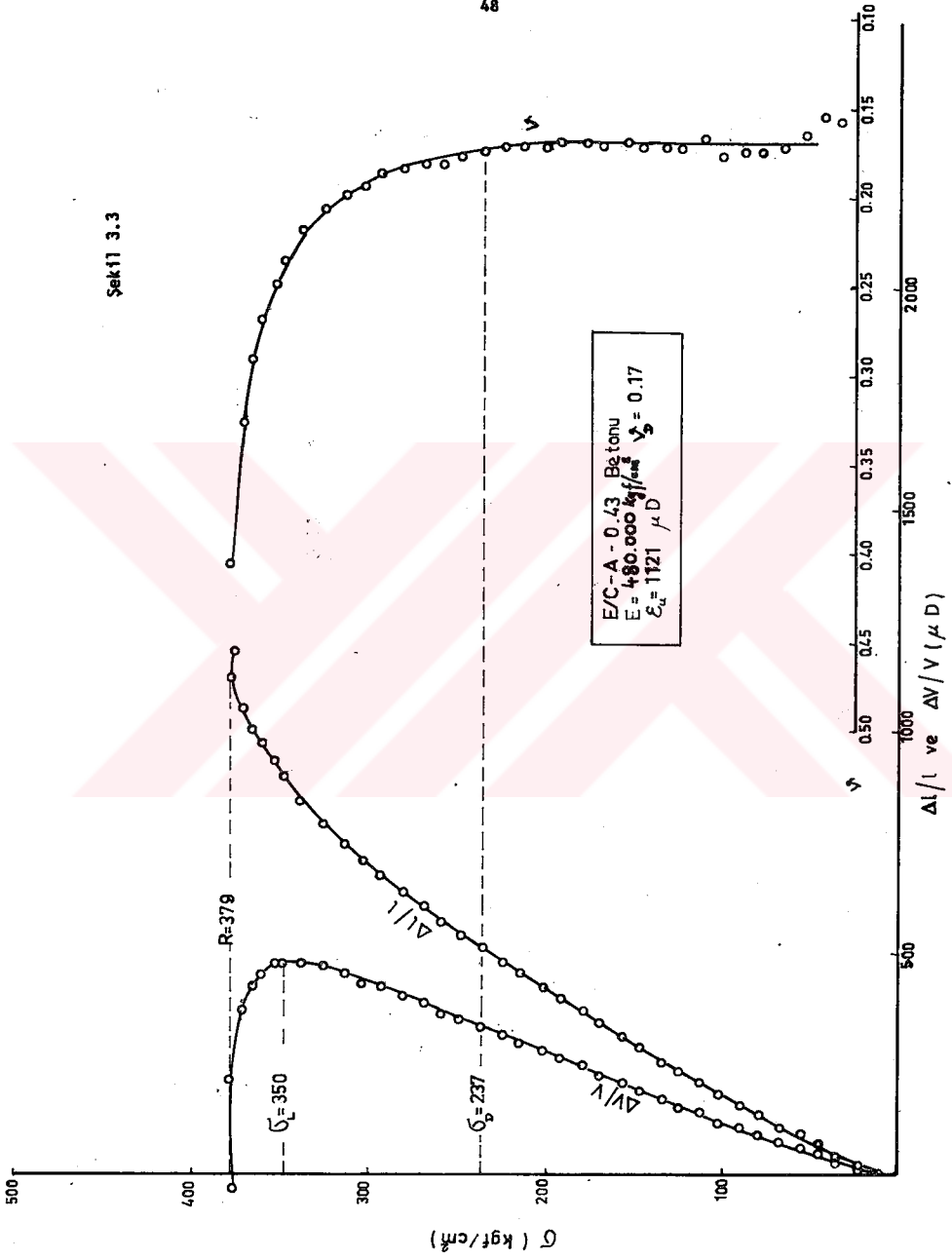
Süreksizlik sınırının saptanmasında Poisson oranı -nın değişiminden yararlanılmıştır. Süreksizlik sınırı, Bölüm I de ayrıntılı olarak açıklandığı gibi, Poisson oranının önemli ve devamlı bir şekilde artmaya başladığı gerilme değeridir. Deneylerde bu tariftten yararlanılarak süreksizlik sınırı saptanmıştır. Yalnız, çizilen Poisson oranı değişimi eğrilerinden, yukarıdaki tarife dayanılarak süreksizlik

Seri 3.1

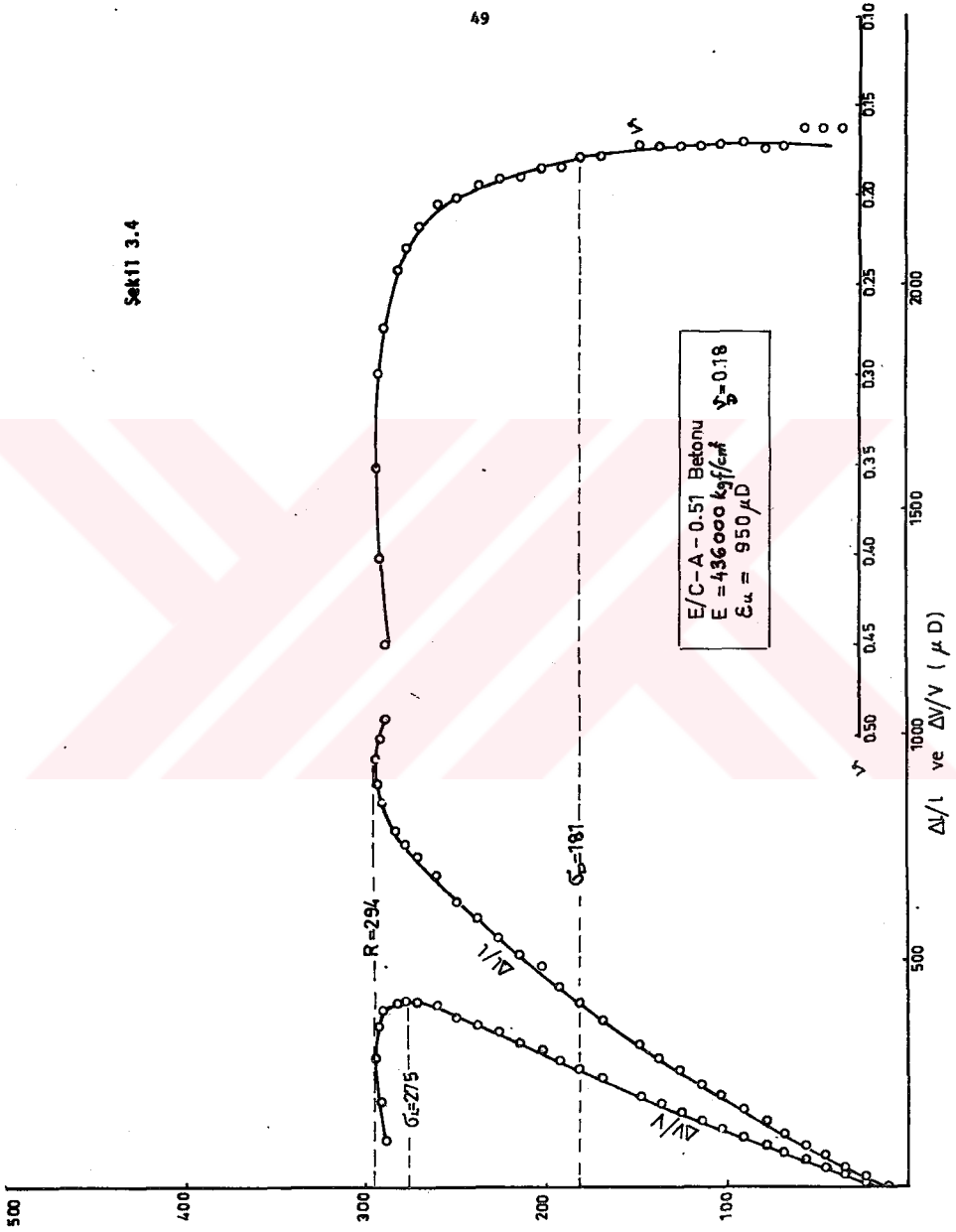




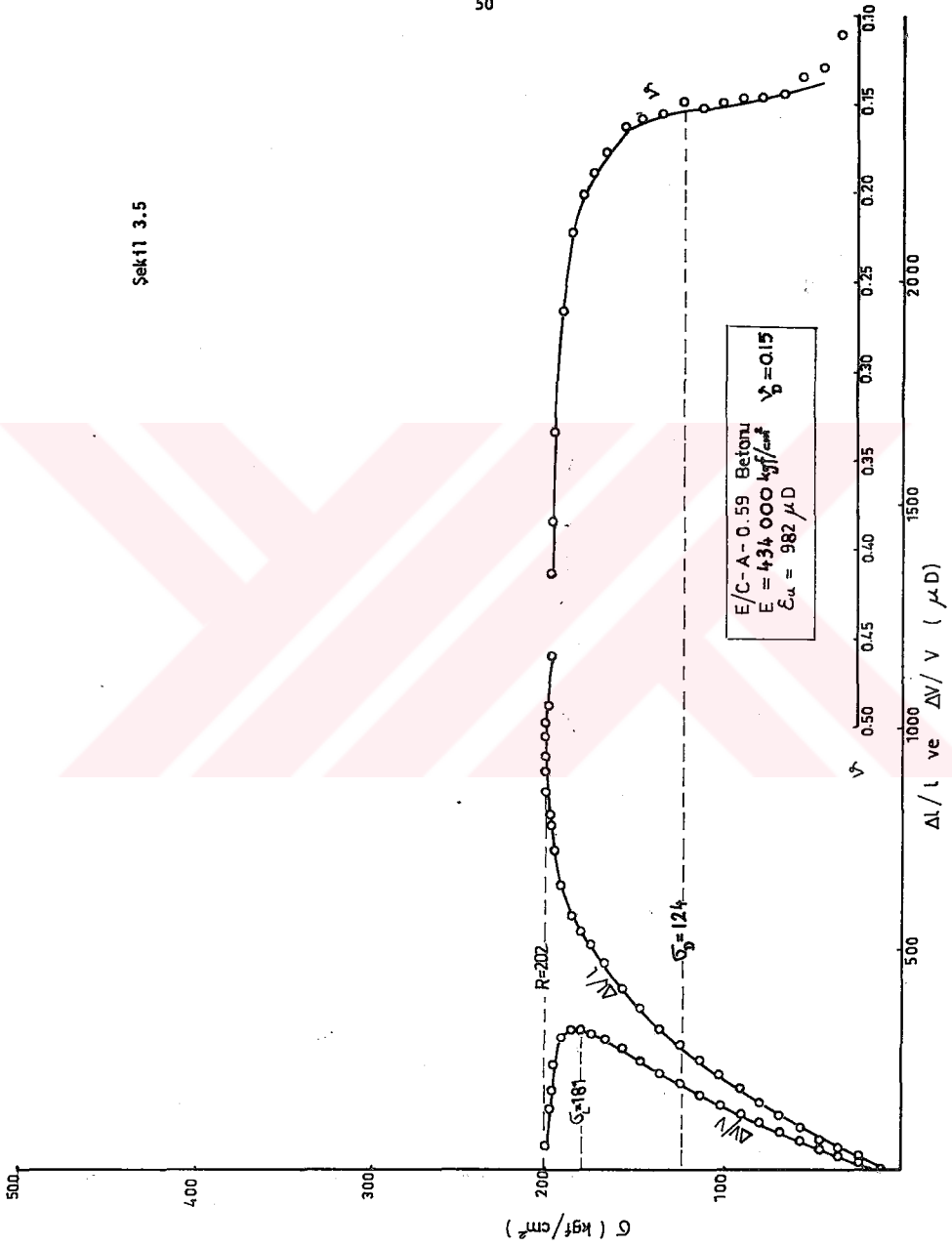
Şekil 3.3



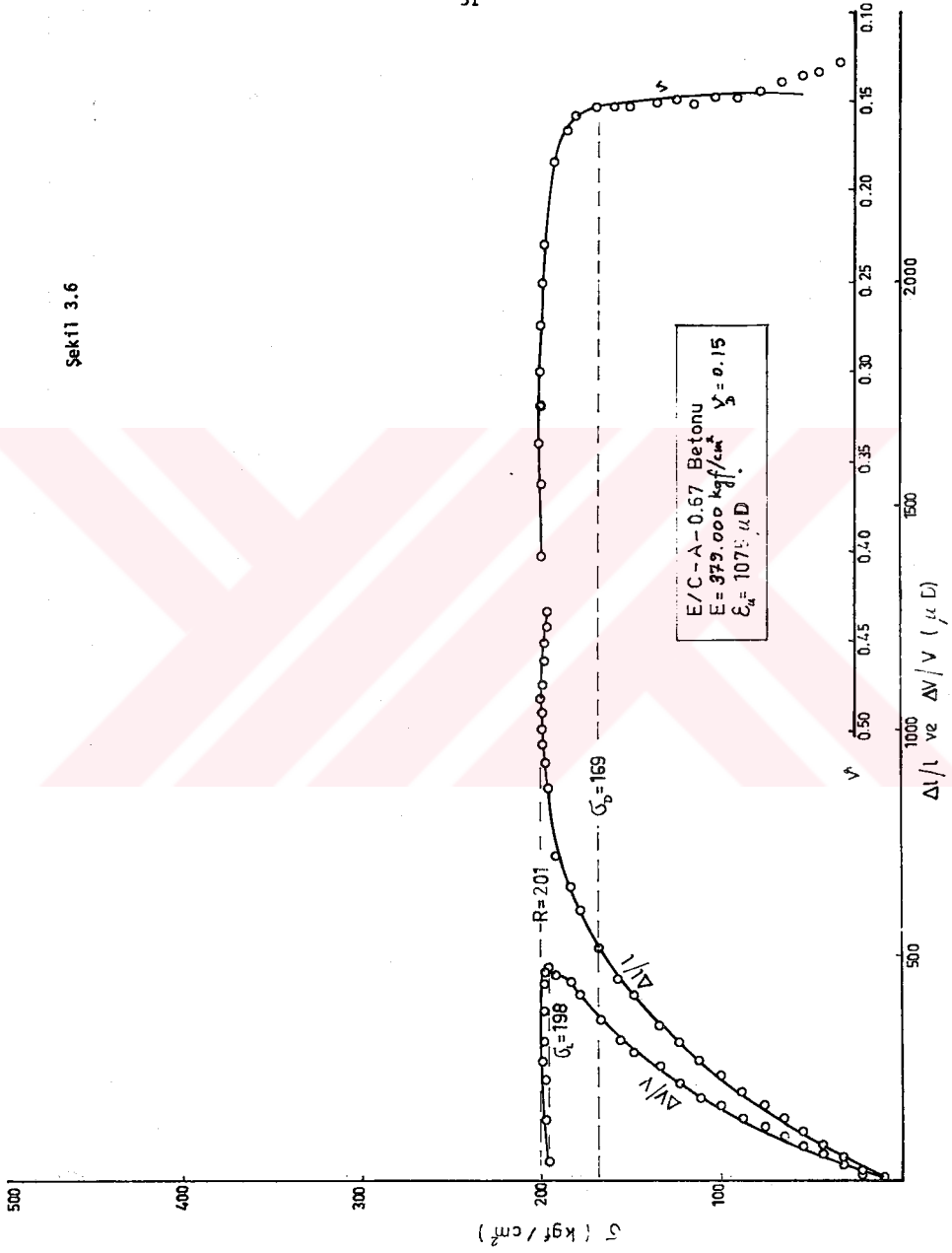
Şekil 3.4



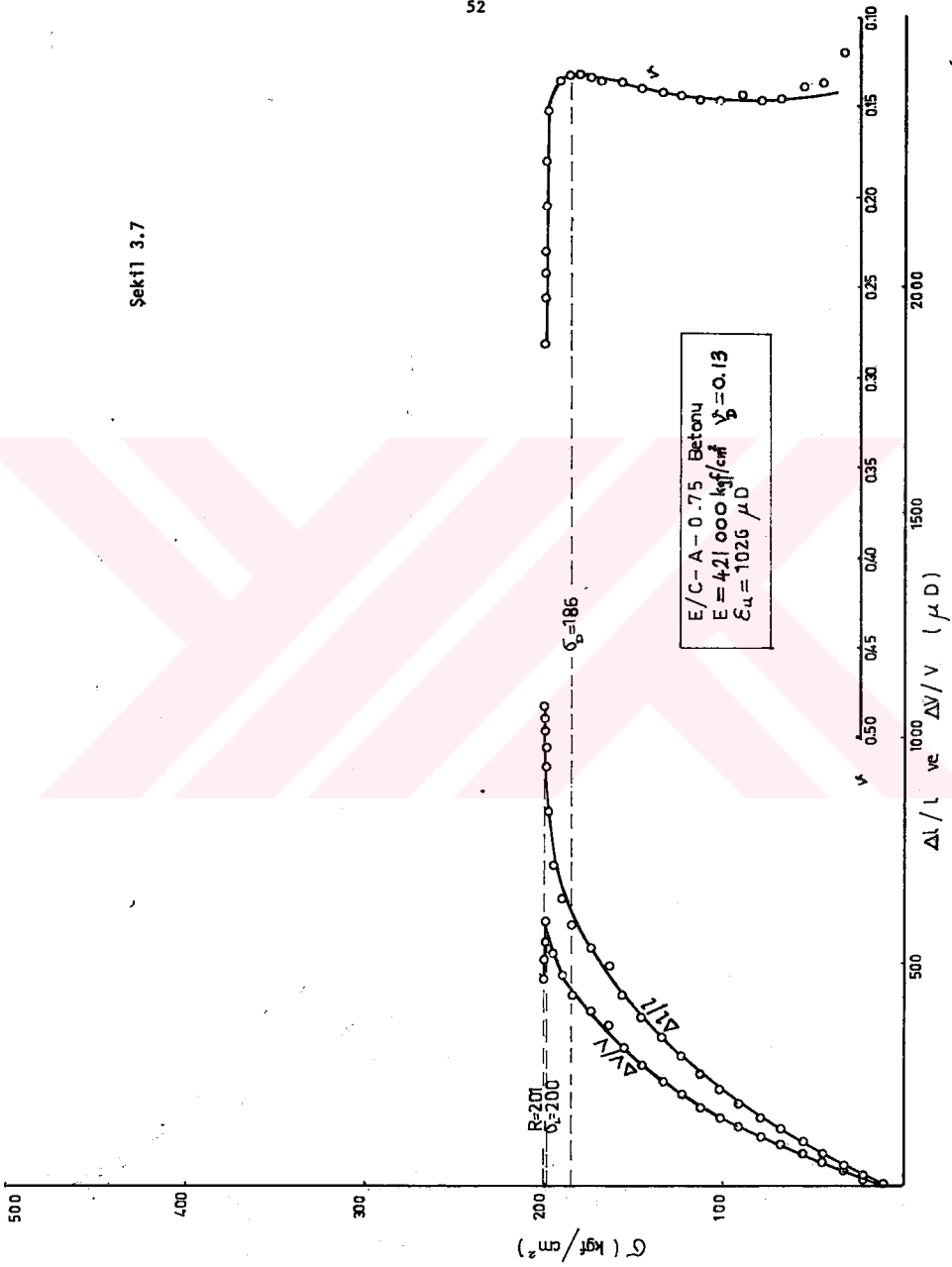
Sekt 3.5

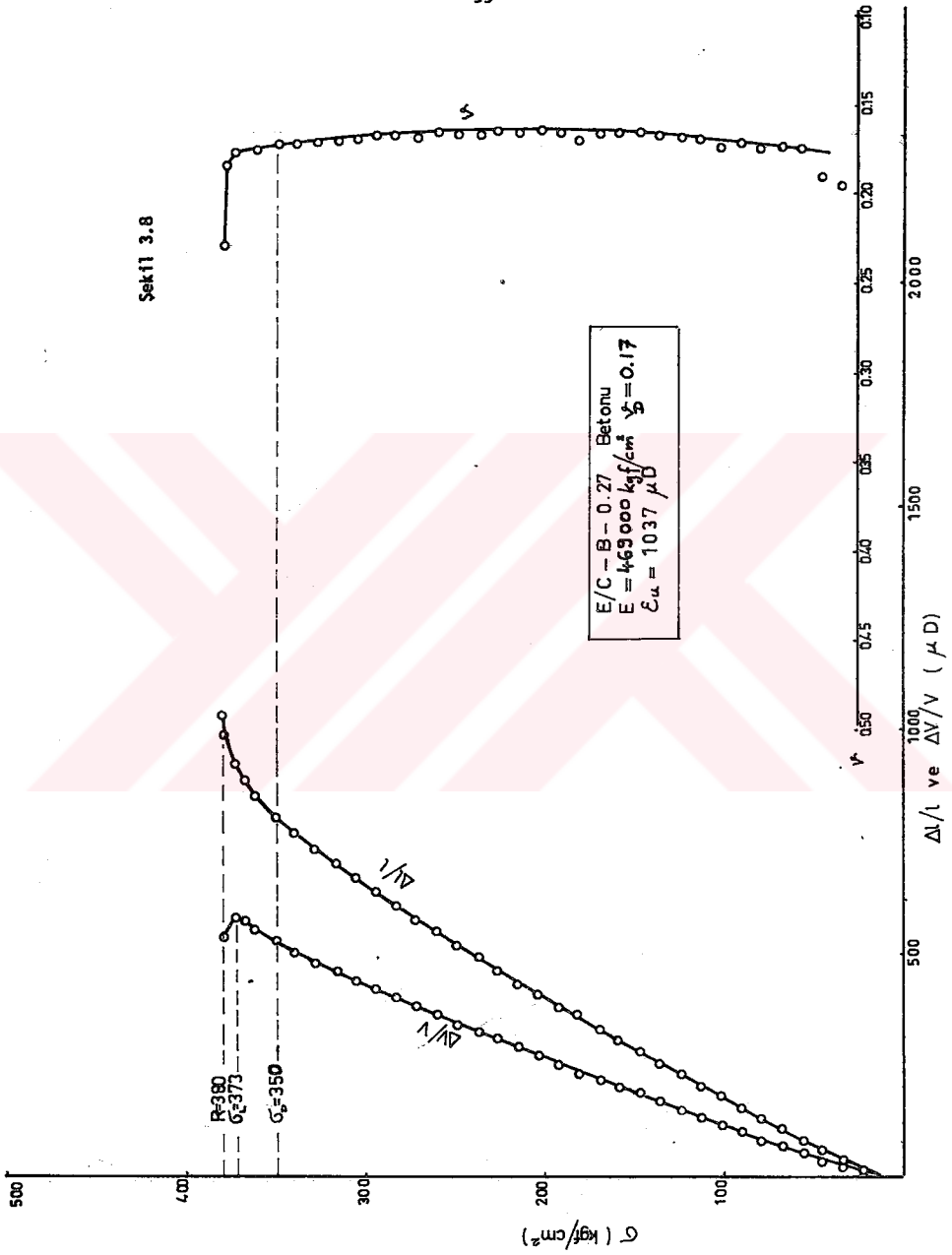


Şekil 3.6

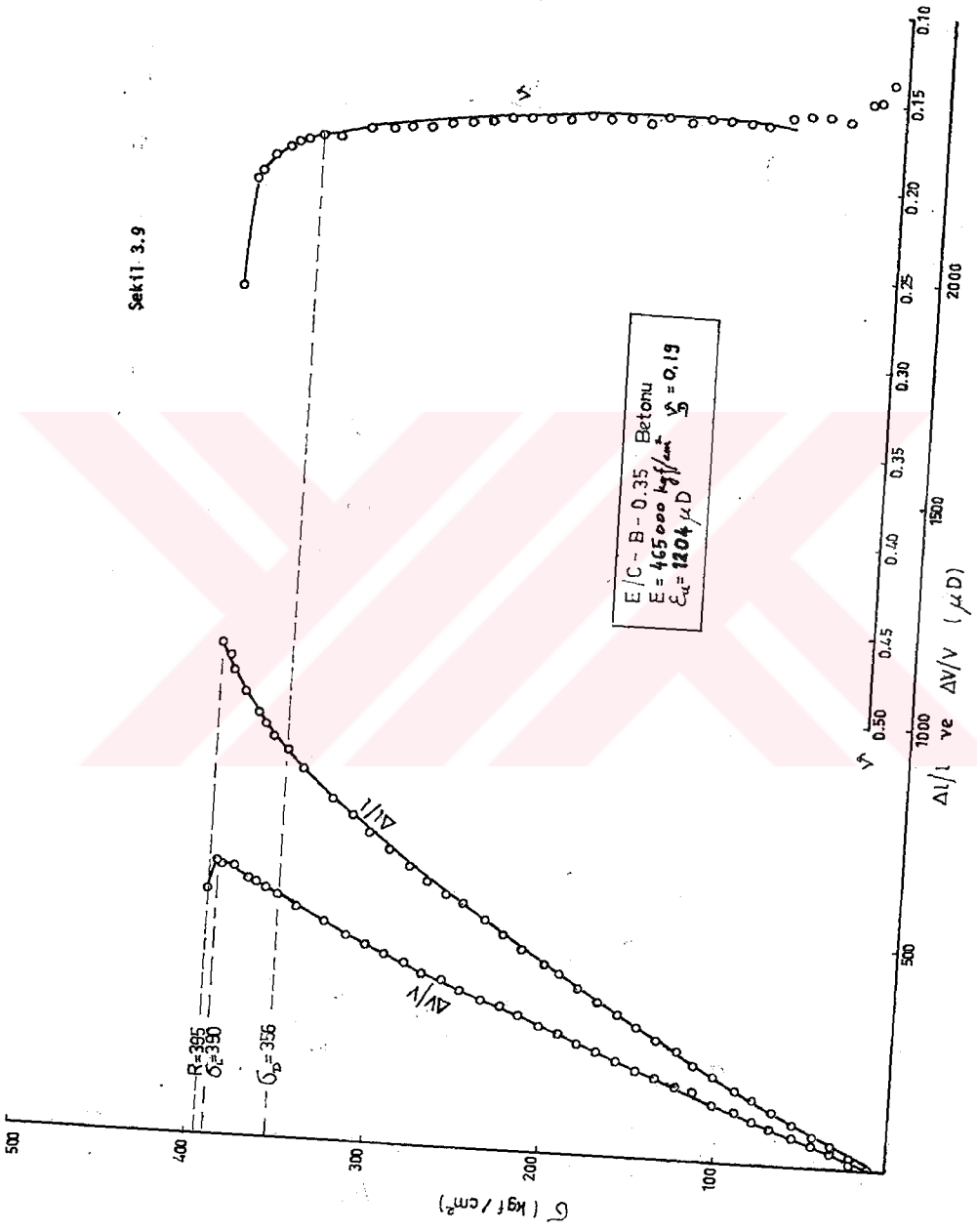


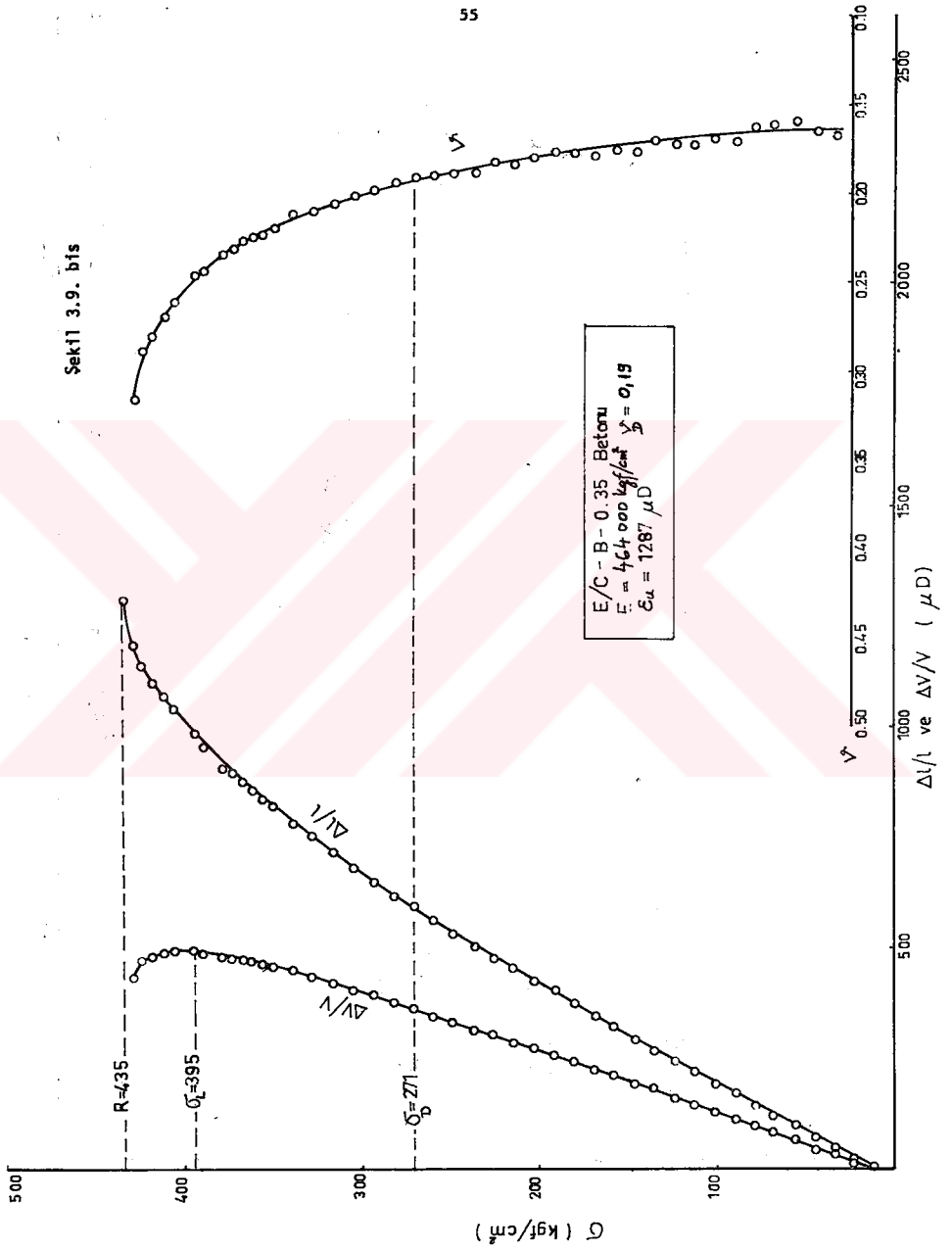
Sekt 3.7



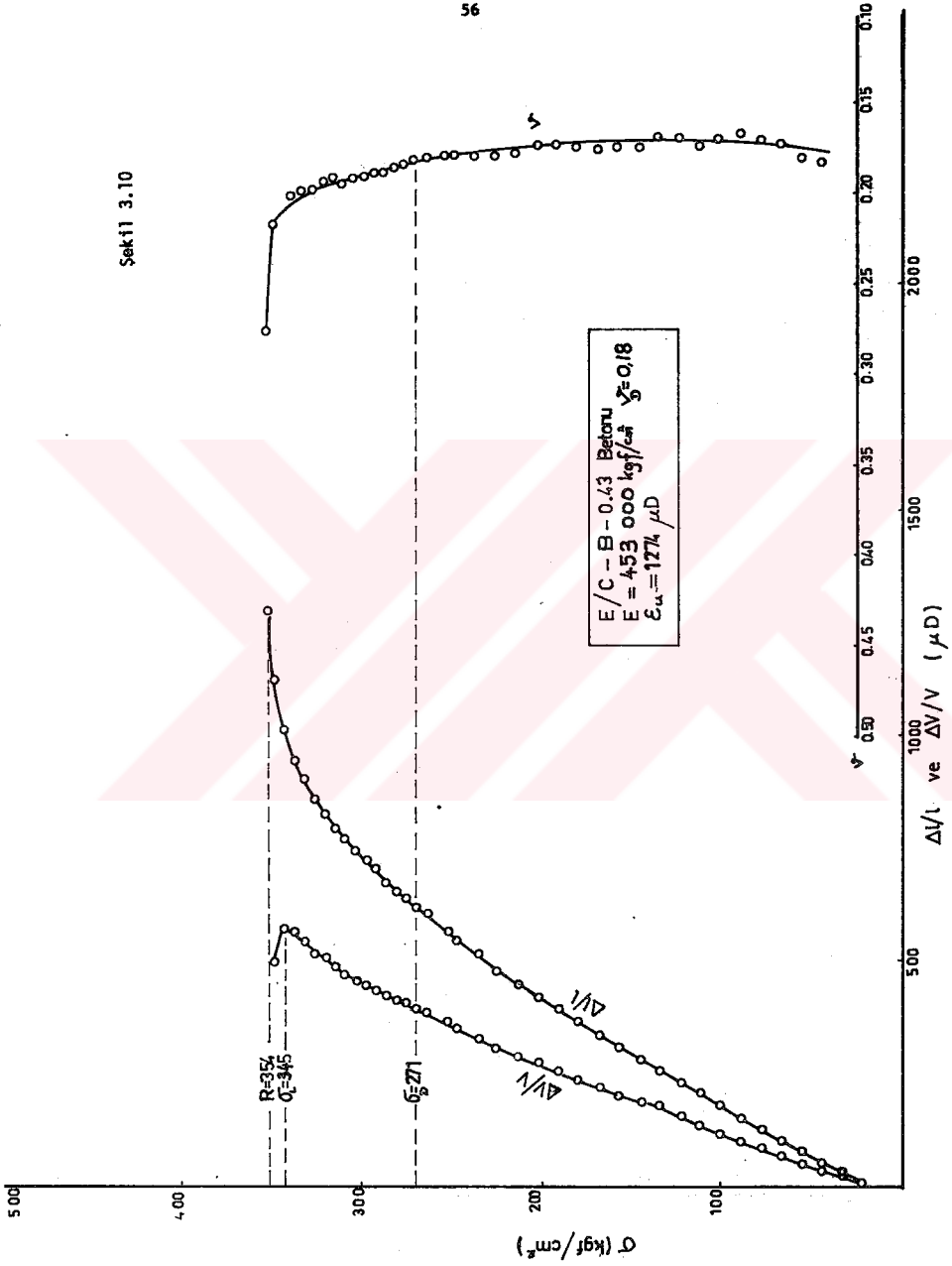


Sek 11-3.9

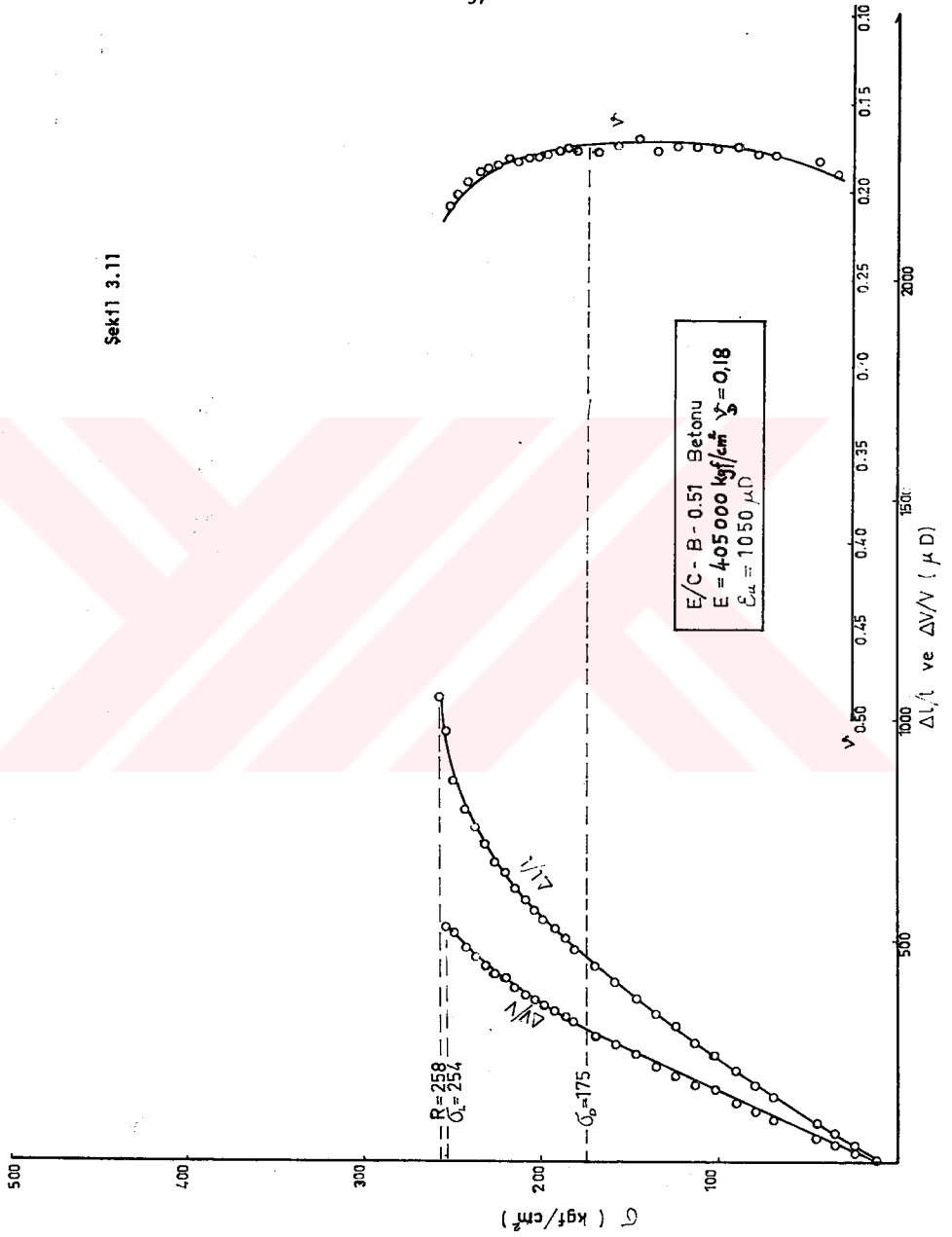




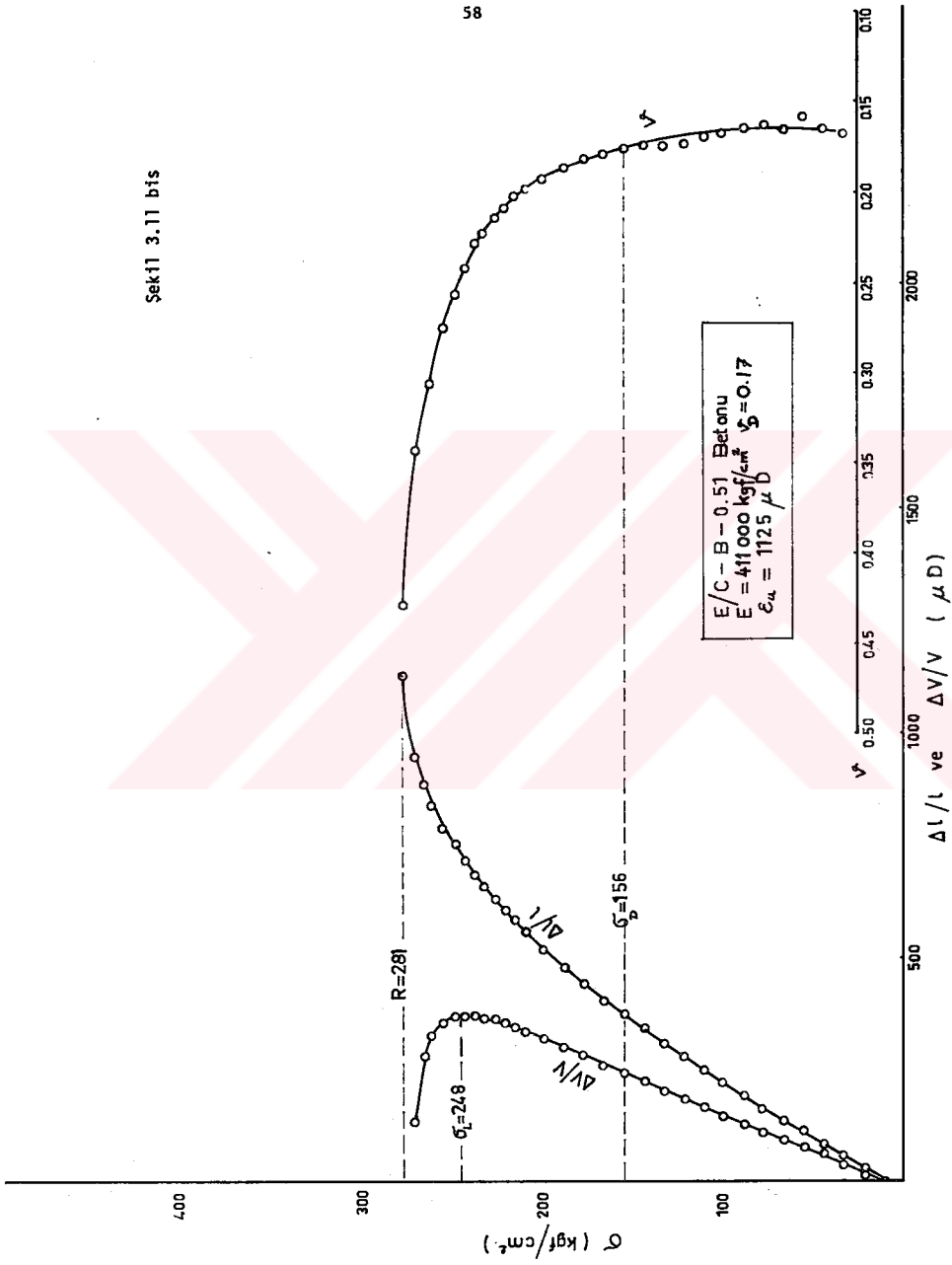
Sekt11 3.10



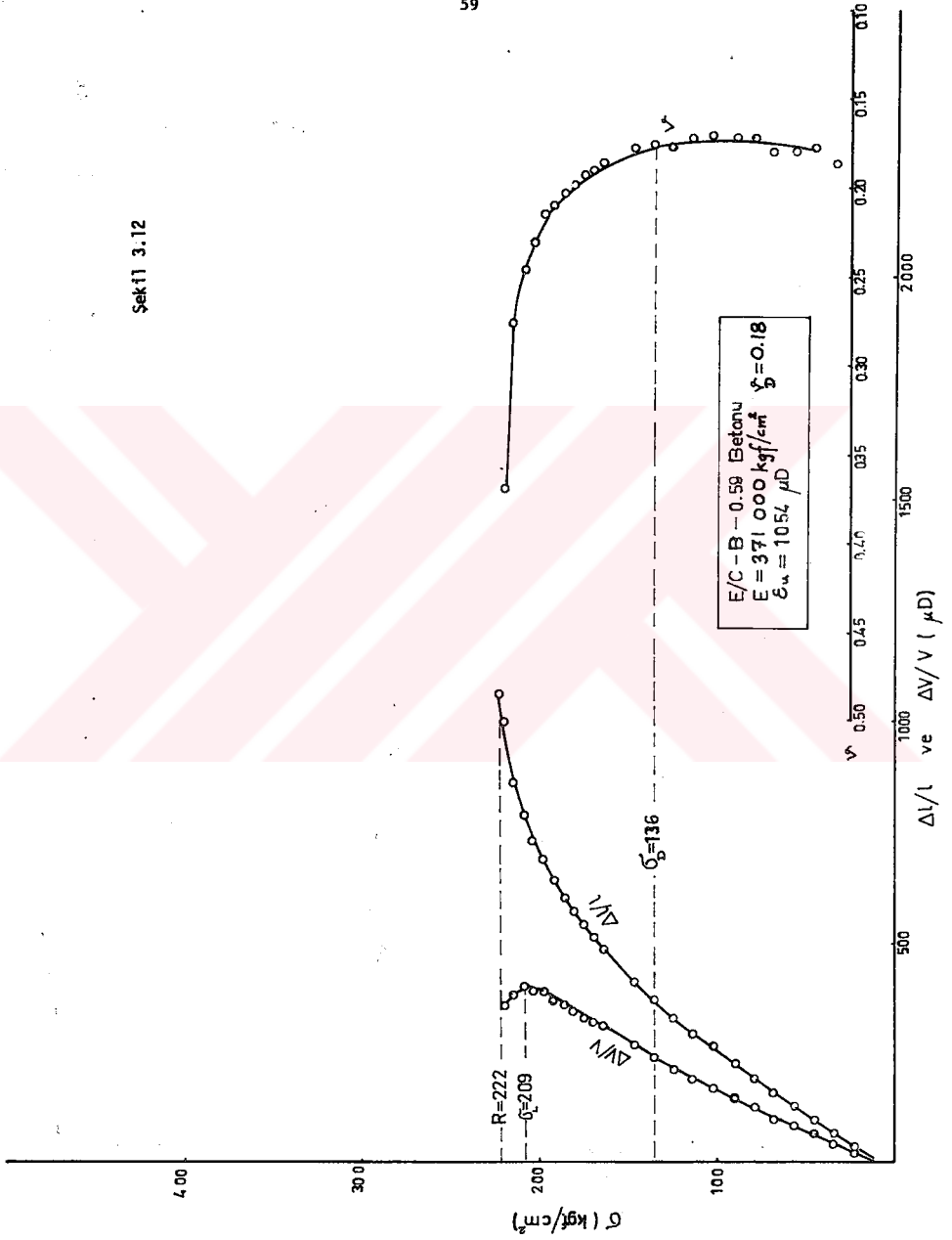
Sekil 3.11



Sekt 3.11 bis

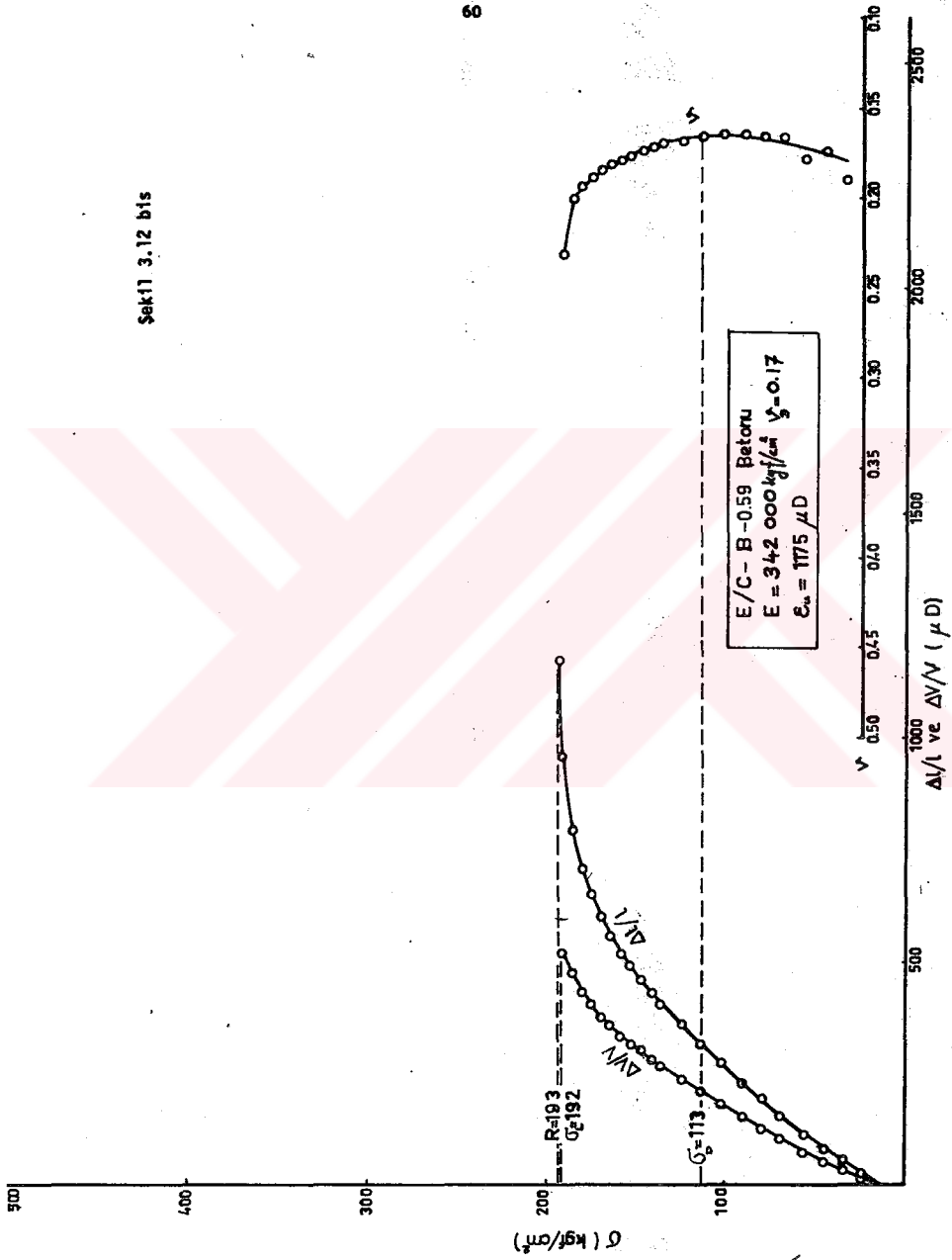


Sekt 11 3.12

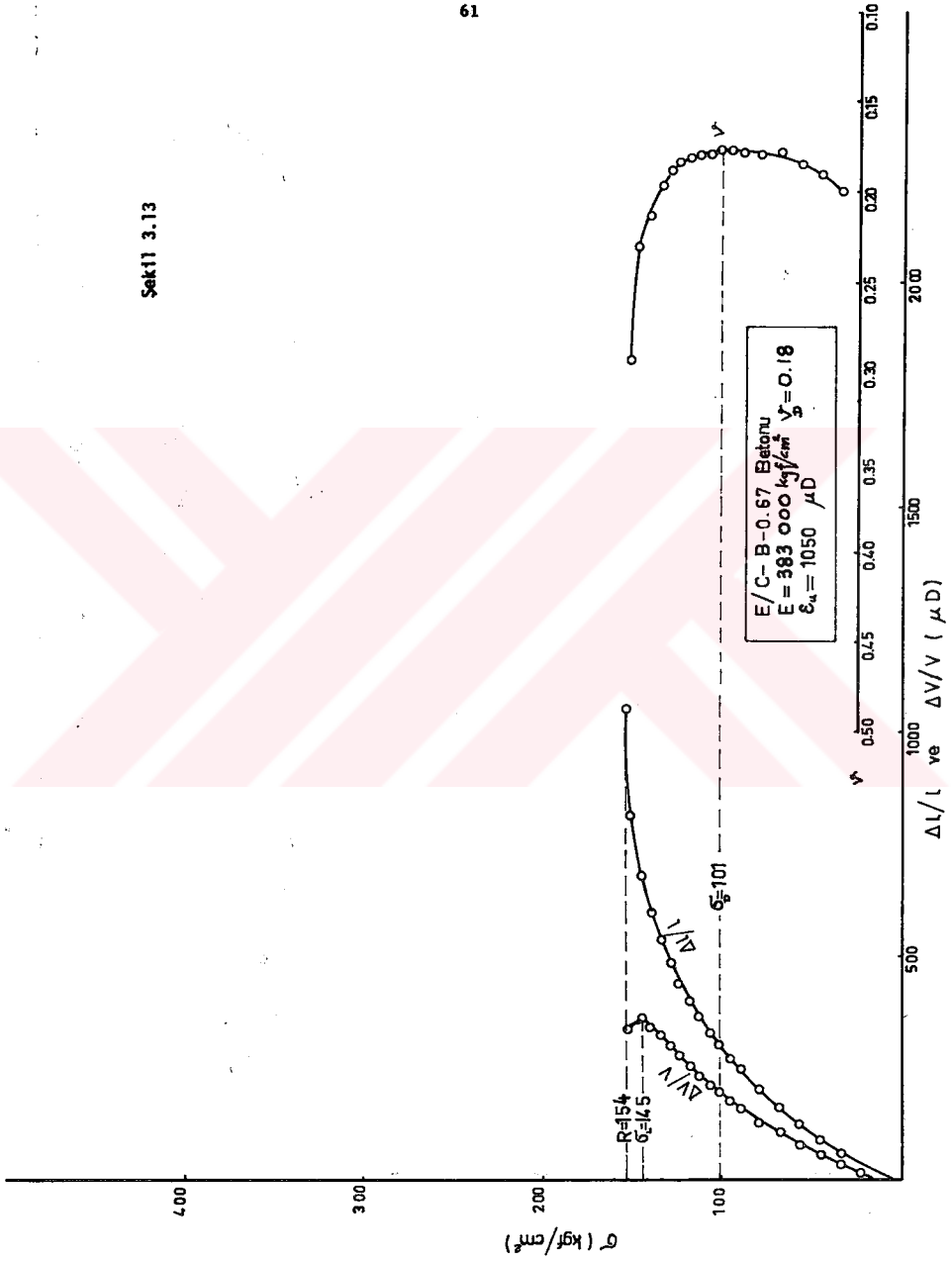


Sekil 3.12 bis

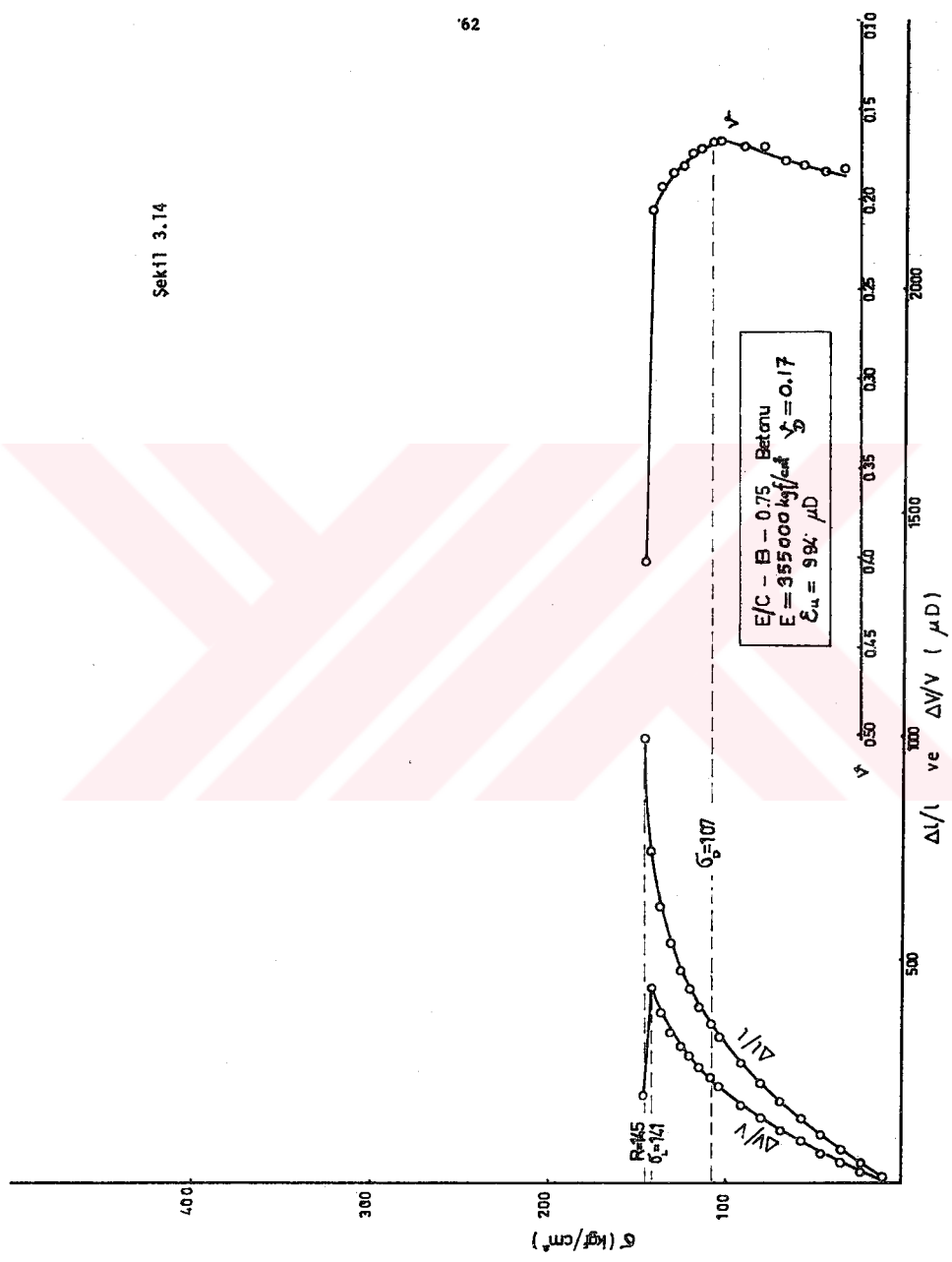
60



Sekt 3.13



Sekil 3.14



sizlik sınırının grafik olarak bulunmasının oldukça kaba olduğu görülmüştür. Bunun üzerine deneylerde çeşitli yük kademelerinde elde edilen Poisson oranlarının değerlerinin değişimi incelenmiştir. Çok çeşitli betonlar için yapılan bu incelemelerde, Poisson oranının, belirli bir gerilme seviyesine kadar, her ardışık 2 ton yük kademesi için ∓ 0.002 ye kadar değişimler gösterdiği, buna karşı bir defa $+ 0.003$ lük bir artış oldu mu bunu, büyük bir çoğunlukla daha büyük artışların izlediği görülmüştür. Bu gözleme dayanarak, eğer bir P_D yükünden hemen sonraki $P_D + 2$ ton yükünde Poisson oranı $+ 0.003$ lük bir artış gösteriyor ve daha sonraki yük kademelerinde bu artış buna eşit veya daha fazla artarak devam ediyorsa, P_D yükünde betonun süreksizlik sınırına varıldığı kabul edilmiştir. Böylece süreksizlik sınırının, grafik yönteme oranla daha sıhhatli bir şekilde saptanması mümkün olmuştur.

Çözülme sınırı hacımsal birim şekildeğiştirme eğri - sinden yararlanılarak bulunmuştur. Bölüm I de açıklandığı gibi bu sınır betonda basınç yükleri altında hacmin artmaya başladığı gerilmedir. ϵ_L ile boyuna, ϵ_g ile enine şekildeğiştirmeler gösterilirse, ikinci dereceden şekildeğiştirmeleri ihmal ederek, birim hacımsal şekildeğiştirme :

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - (1 - \epsilon_L) (1 + \epsilon_g) (1 + \epsilon_g) = \epsilon_L - 2 \epsilon_g$$

bulunur. Deneyde ölçülen (ϵ_L) ve (ϵ_g) lerden yukarıdaki ifadeden yararlanarak ($\Delta V/V$) ler hesaplanmış ve ($\Delta V/V$) nin değerinde azalma meydana gelen gerilme (veya $\Delta V/V$ eğrisinin maksimumdan geçtiği gerilme) çözülme sınırı olarak alınmıştır.

Elâstiklik modülünün hesabında, boyuna birim kısalma eğrisinin basınç dayanımının 1/3 üne kadar doğrusal kabul edilebilmesinden (7) yararlanılmış ve bu bölgedeki deney noktalarından (ölçü hatalarının önemli olabildiği ilk 2 nokta gözönüne alınmayarak) lineer regresyonla bu modül hesaplanmıştır. Bu konuda daha iyi bir yöntem RILEM (Yapı

Malzemeleri ve Yapı Lâboratuvarları Uluslararası Birliği) tarafından da önerildiği gibi, belirli 2 yük değeri arasında yükleyip boşaltmalar yaparak, elde edilen doğrunun eğimi sabitleştiğinde bu eğimi elâstiklik modülü olarak almaktır. Ancak araştırmamızda asıl amaç başlangıçtan kırılmaya kadar sabit bir şekildeğiştirme hızı ile artan basınç yüklemesinde betonun kırılma mekanizmasını incelemek olduğundan, bu yükleme boşaltmalardan kaçınılmış ve elâstiklik modülünün biraz kabaca saptanmasıyla yetinilmiştir.

Poisson oranının betonda uygulanan yükle beraber değıştiği esasen bilinmektedir. Bizim deneylerimizde de bu oranın, betonun karakterine bağılı olarak, uygulanan yükle çeşitli değışimler gösterdiği görülmüştür (Bu değışimlere ileride değinilecektir). Bu bakımdan, yalnızca bir karşılaştırmayı gerçekleştirebilmek amacıyla, Poisson oranının önemli artmalar göstermeden hemen önceki değeri, yani süreksizlik sınırındaki değeri (ν_D) ve ayrıca betonda emniyet kat sayısının 2.5 civarında alındığı düşünülerek, betonun servis yüklerindeki Poisson oranı hakkında fikir vermesi maksadıyla basınç dayanımınının % 40 ındaki Poisson oranı ($\nu_{0.4R}$) grafiklerde belirtilmiştir.

Basınç dayanımındaki birim kısalmanın (ϵ_u) kullanılan elektrohidrolik regülatörle şekildeğiştirme artış hızı sonuna kadar kontrol edilebildiğinden iyi bir şekilde saptanması mümkün olmuştur. Bu değerler de gerilme - şekildeğiştirme eğrilerinde verilmiştir.

Şekil 3.1 ilâ Şekil 3.14 de E/C serisi karışımlarından herbirinden örnek olarak bir numunenin gerilme - şekildeğiştirme eğrisi verilmiştir. Ancak bazı karışımlarda farklı numunelerde karakteristik farklı davranışlar gözlenmiştir (Bu farklı davranışların nedenlerine ve ifade ettikleri anlamlara Bölüm IV de değinilecektir). Bu gibi durumlarda farklı davranış gösteren numunelerin gerilme - şekildeğiştirme eğrileri ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 3.1 de E/C serisinin çeşitli karışımlarında elde edilen süreksizlik sınırları, çözülme sınırları, basınç dayanımları, basınç dayanımındaki birim kısaltmaları, elâstiklik modülleri ve Poisson oranları verilmektedir. Bu

TABLO 3.1

E/C Serisi Betonlarının 180 günlük Mekanik Özellikleri

Karışım	Süreksizlik sınırı (kgf/cm ²)	Çözülme sınırı (kgf/cm ²)	Basınç dayanımı (kgf/cm ²)	Basınç Dayanımın- daki Birim kısalma (μ D)	Elastiklik Modülü (kgf/cm ²)	Süreksizlik sınırındaki Poisson Oranı	Basınç Dayanımı- nın λ 40 ın- daki Pois- son Oranı
E/C-A-0.27	362	401	421	1004	522.000	0.172	0.164
E/C-A-0.35	362	446	481	1320	546.000	0.190	0.175
E/C-A-0.43	248	344	372	1159	479.000	0.182	0.176
E/C-A-0.51	209	268	282	960	458.000	0.184	0.163
E/C-A-0.59	130	170	188	898	456.000	0.150	0.161
E/C-A-0.67	141	198	201	902	364.000	0.147	0.138
E/C-A-0.75	172	188	189	1018	402.000	0.130	0.148
E/C-B-0.27	350	376	381	1063	463.000	0.176	0.166
E/C-B-0.35	318	378	400	1160	467.000	0.190	0.172
E/C-B-0.43	254	328	336	1132	450.000	0.188	0.174
E/C-B-0.51	166	251	270	1088	408.000	0.172	0.170
E/C-B-0.59	124	200	208	1114	364.000	0.172	0.174
E/C-B-0.67	107	152	158	1041	364.000	0.170	0.174
E/C-B-0.75	90	141	145	994	351.000	0.168	0.180

değerler, her bir karışım için 2 ilâ 3 değer in ortalamasıdır. Bölüm II de de belirtildiği gibi, herhangi bir karışım da, eğer ilk 2 numune yakın sonuçlar vermişse bu 2 numuneyle yetinilmiş, sonuçlar farklılık göstermişse 3 ncü numune de deneye tâbi tutulmuştur.

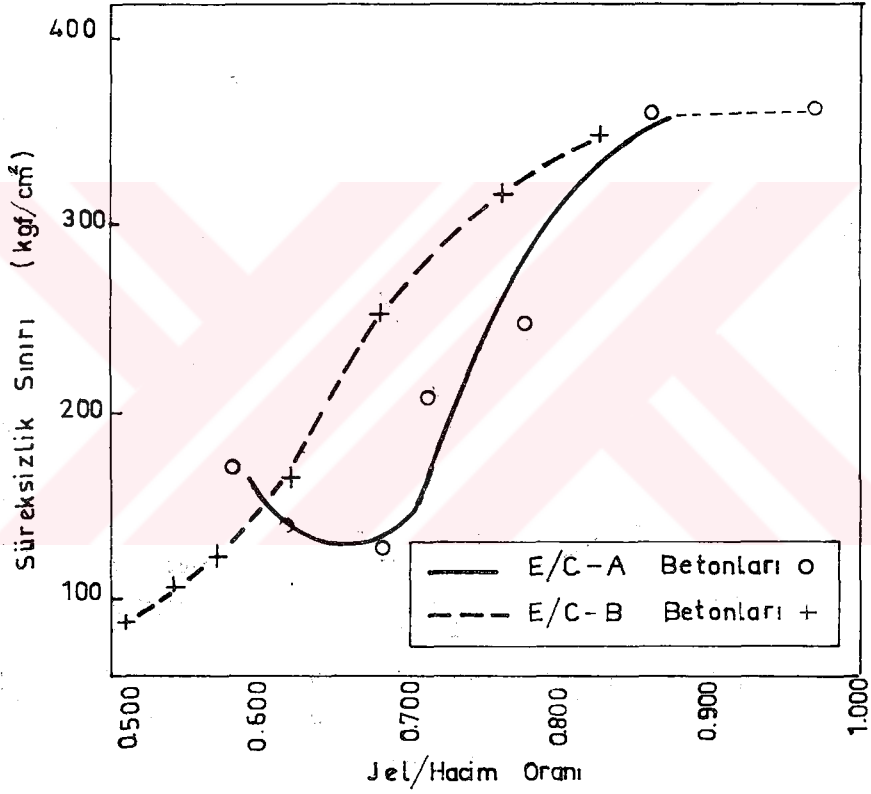
Şekil 3.15 ilâ Şekil 3.48 de E/C serisine ait betonlarda kritik sınırlar, basınç dayanımları, çeşitli şekildeğiştirme özellikleri ve malzeme sabitleri ile ilgili özelliklerin bağlayıcı hamurun yapısına göre değişimi incelenmektedir. Grafiklerdeki deney noktaları her bir karışıma ait 2 ilâ 3 numunede elde edilen sonuçların ortalamasını göstermektedir. Hamurun yapısının belirlenmesinde "Jel/Hacim" oranı ve "Su/Çimento" oranı kullanılmıştır. Su/Çimento oranı, bilindiği gibi, beton karışımına giren su ve çimentonun ağırlıklarının birbirine oranından ibarettir. Jel/Hacim oranı, Powers (29) tarafından, tarif edilen ve Su/Çimento oranını ve bağlayıcı hamurun hidratasyon derecesini birlikte ifade eden bir kavramdır. Bu kavram aşağıda açıklanmaktadır :

1 cm³ Portland çimentosunun tam hidratasyonu sonunda yaklaşık olarak 2.06 cm³ hemen tamamı jelden oluşan bir hidratasyon ürünü meydana gelir (Bundan sonra bu hidratasyon ürününe kısaca "jel" deneyecektir). Eğer çimentonun hepsi değil de $(0 \leq \alpha \leq 1)$ kadar bir kesri hidrate olmuşsa bu takdirde meydana gelen jel hacmi $2.06 \frac{C\alpha}{\rho_c}$ dir (Bu-

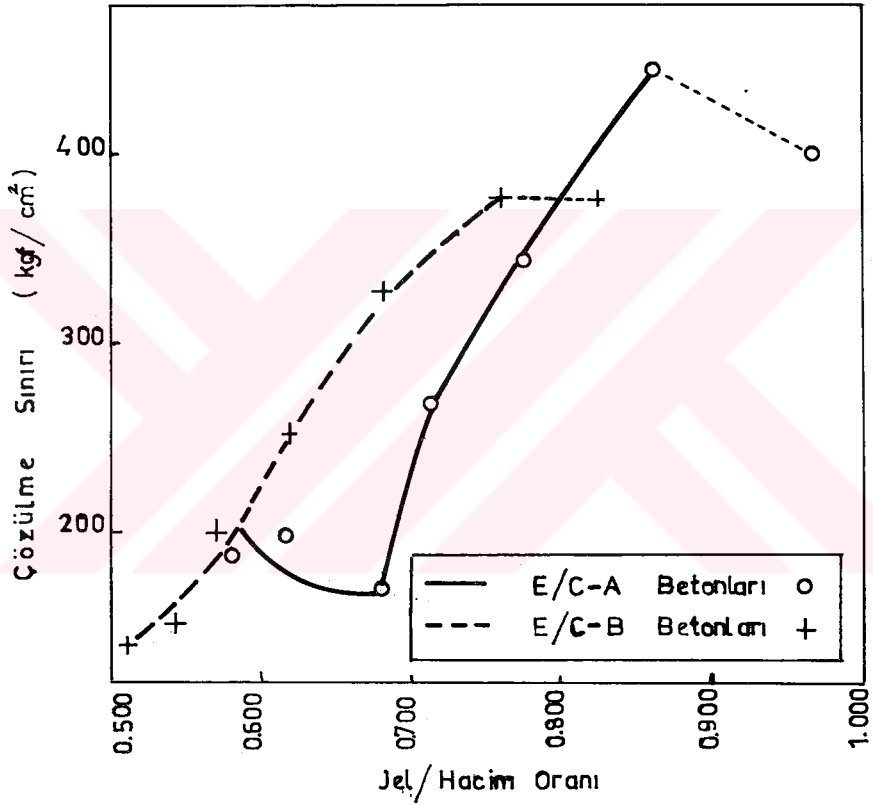
rada C çimentonun kuru haldeki ağırlığını, ρ_c toz çimentonun özgül ağırlığını ve α da hidratasyon derecesini gösteriyor). Hiç hava boşluğu içermeyen bir hamurda belirli bir α hidratasyon derecesinde meydana gelen jele ayrılabilir maksimum hacim başlangıçta su ile dolu hacim (e) ile çimento tanelerinin bir kısmının hidrate olmasından dolayı ortaya çıkan yeni $\frac{C}{\rho_c} \alpha$ hacimlerinin topla-

mından ibarettir. İşte Jel/Hacim oranı (X), mevcut jel hacminin, jele ayrılabilir bu hacme oranı olarak tanımlanmaktadır. Yani :

$$X = \frac{\text{Jel hacmi}}{\text{Jele ayrılabilir hacim}} = \frac{2.06 \frac{C}{\rho_c} \cdot \alpha}{\frac{C}{\rho_c} \cdot \alpha + e} \quad \text{dir.}$$

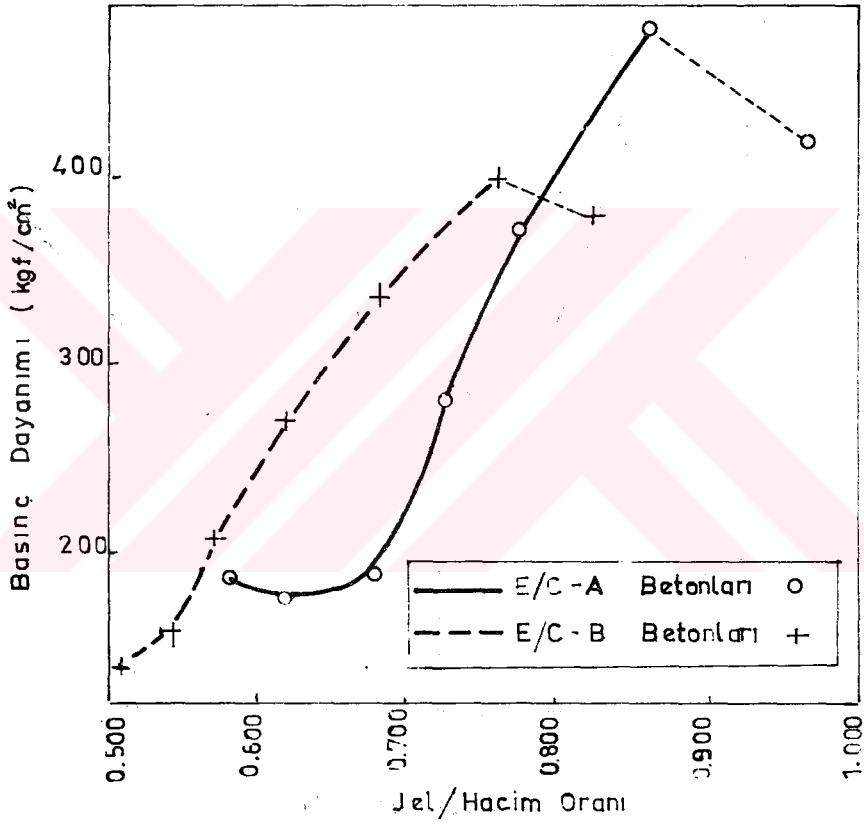


Şekil 3.15
E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının
Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



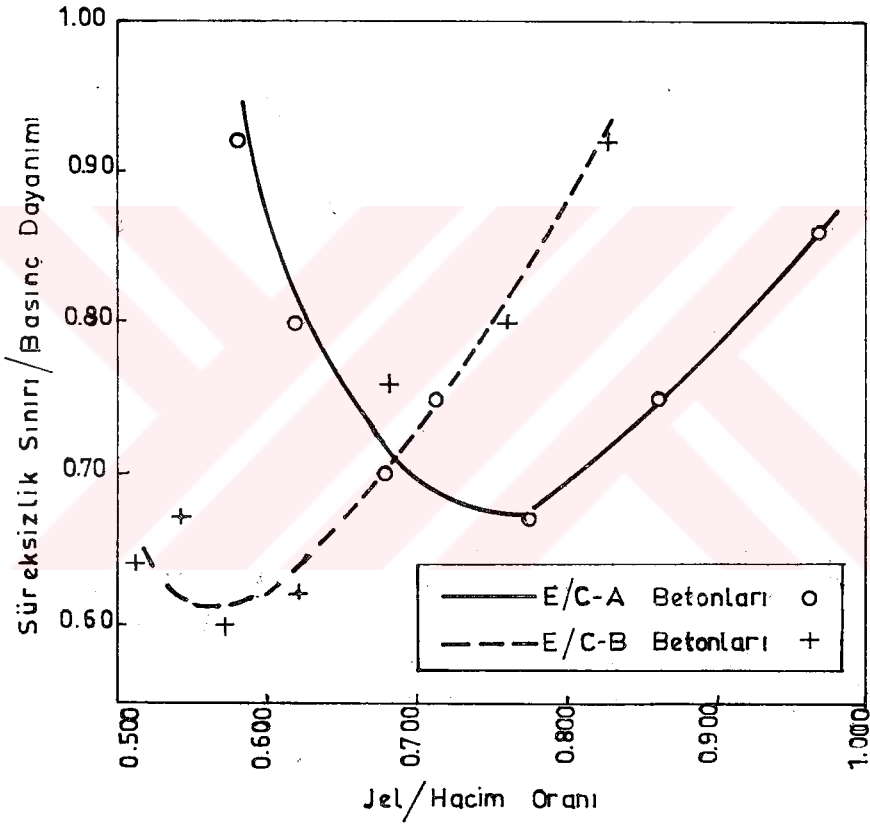
Şekil 3.16

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırının
Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



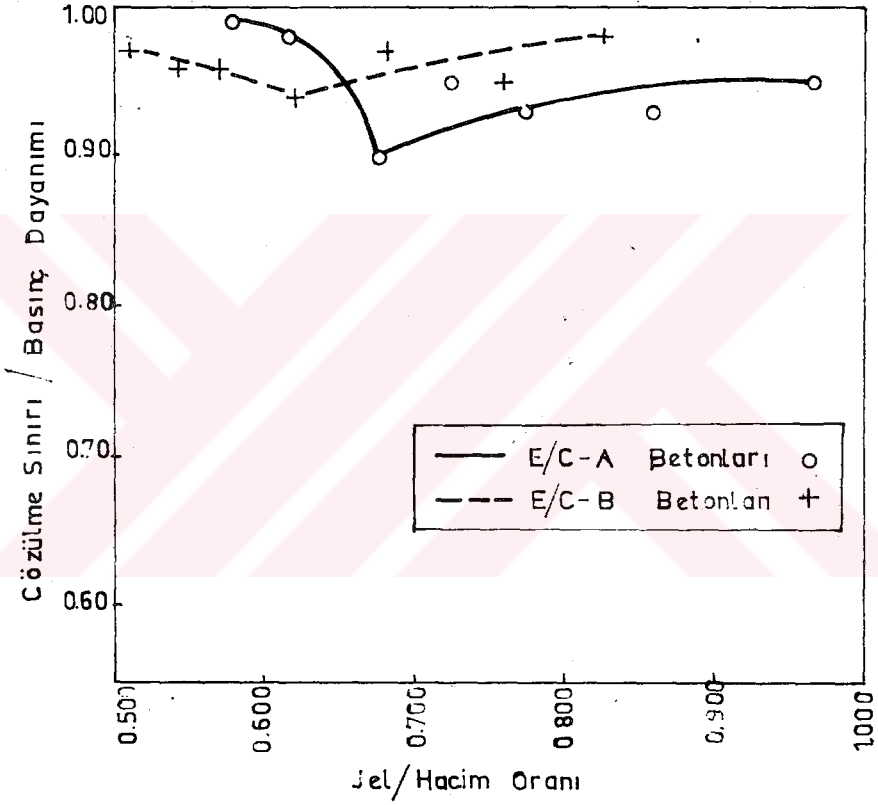
Şekil 3.17

E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



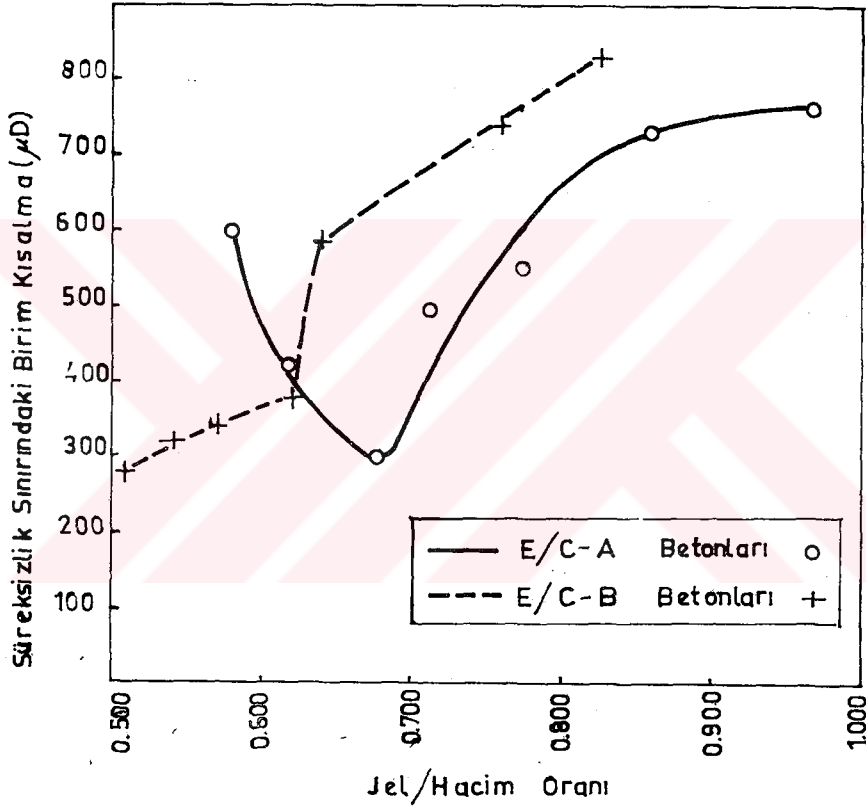
Şekil 3.18

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/
Basınç Dayanımı Oranının Jel/Hacim Oranına
Göre Değişimi



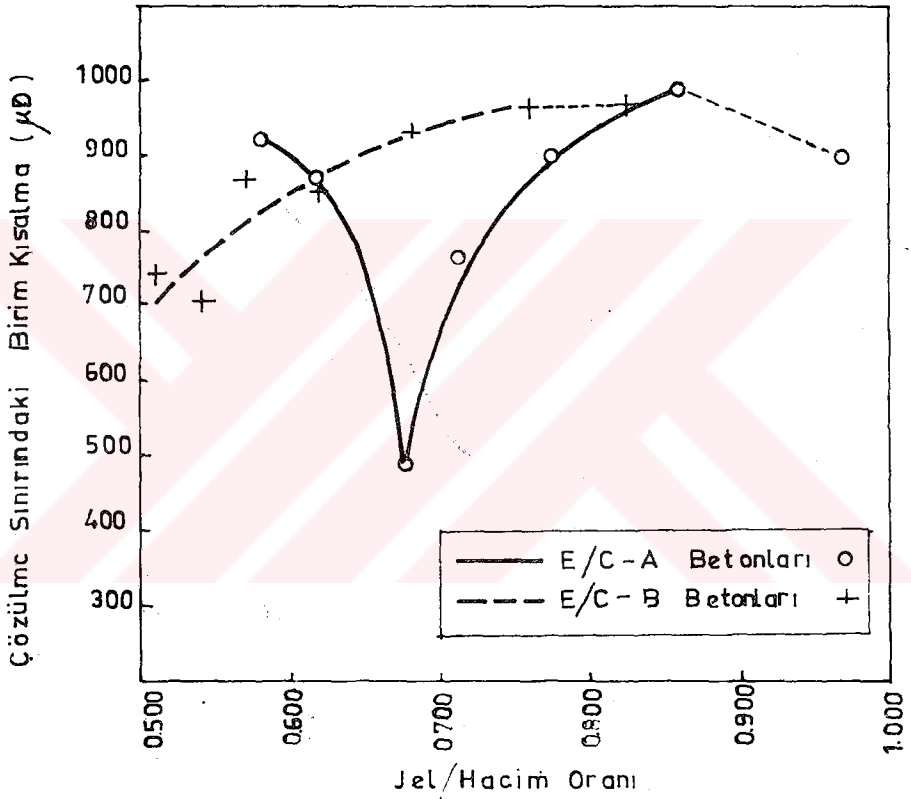
Şekil 3.19

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/ Basınç Dayanımı Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



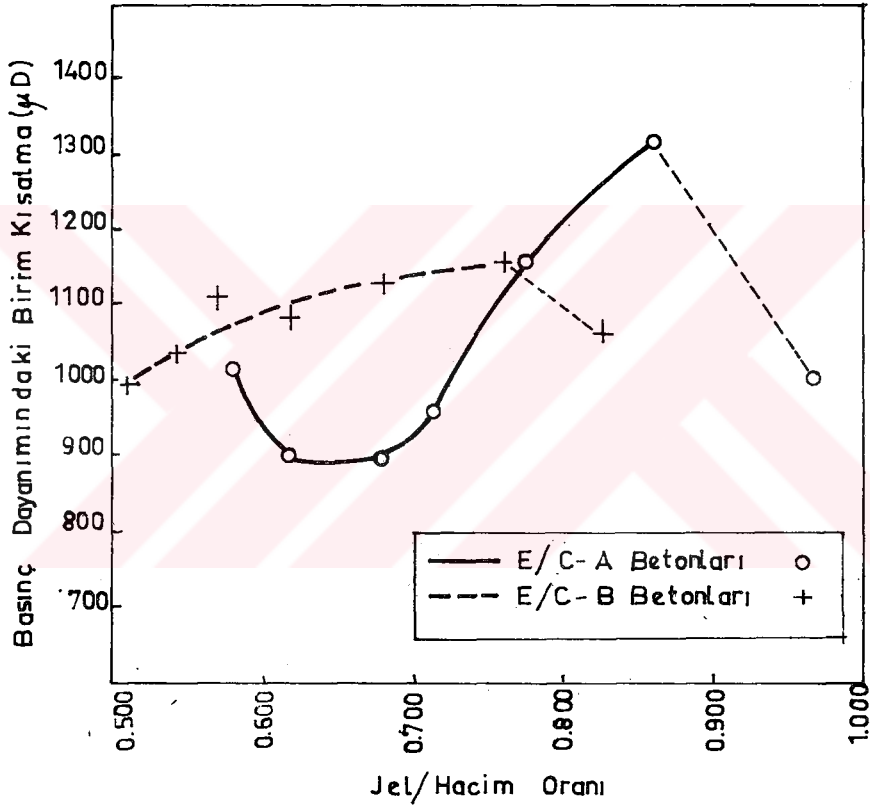
Şekil 3.20

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısalmanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



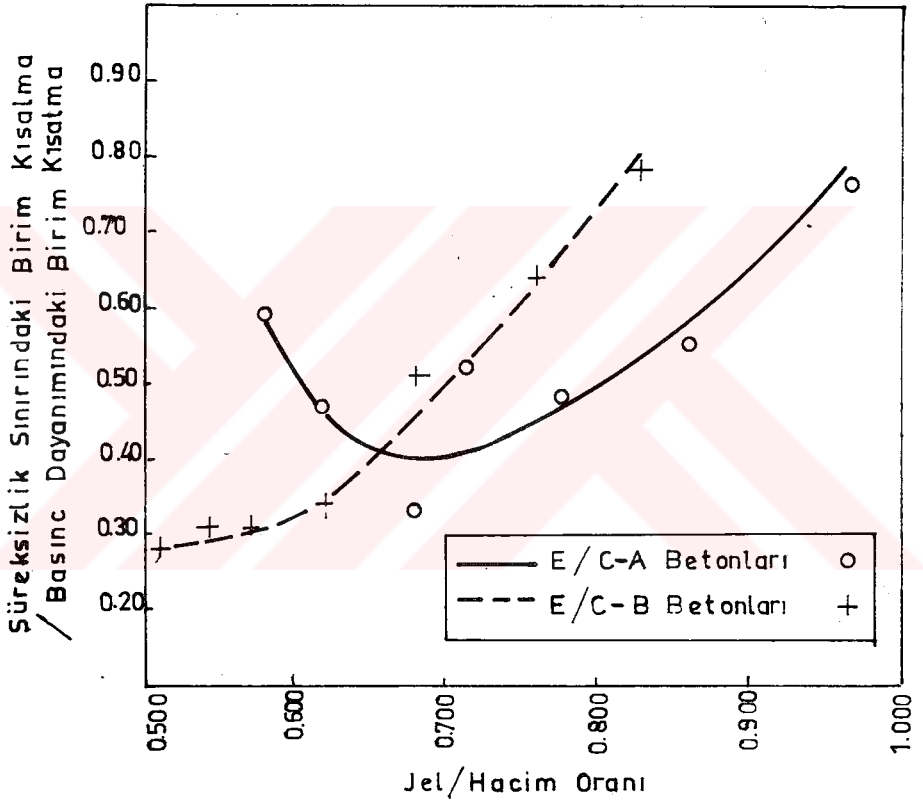
Şekil 3.21

E/C Serisi Betonlarında Çözölme Sınırındaki Birim Kısılmanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



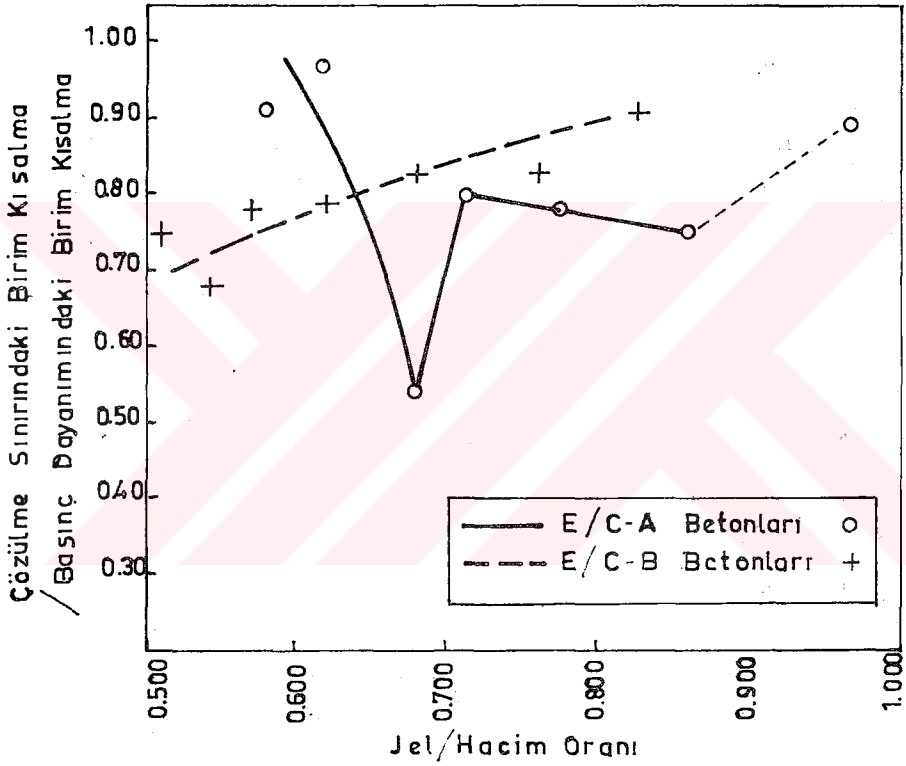
Şekil 3.22

E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısalmanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



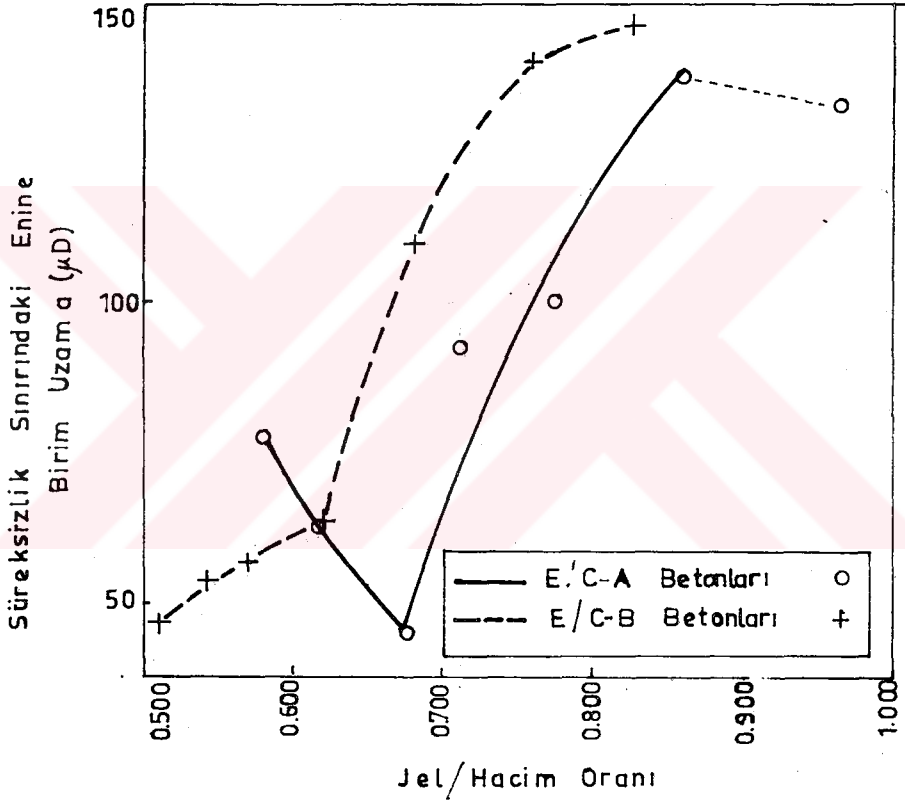
Şekil 3.23

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısılma/Basınc Dayanımındaki Birim Kısılma Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



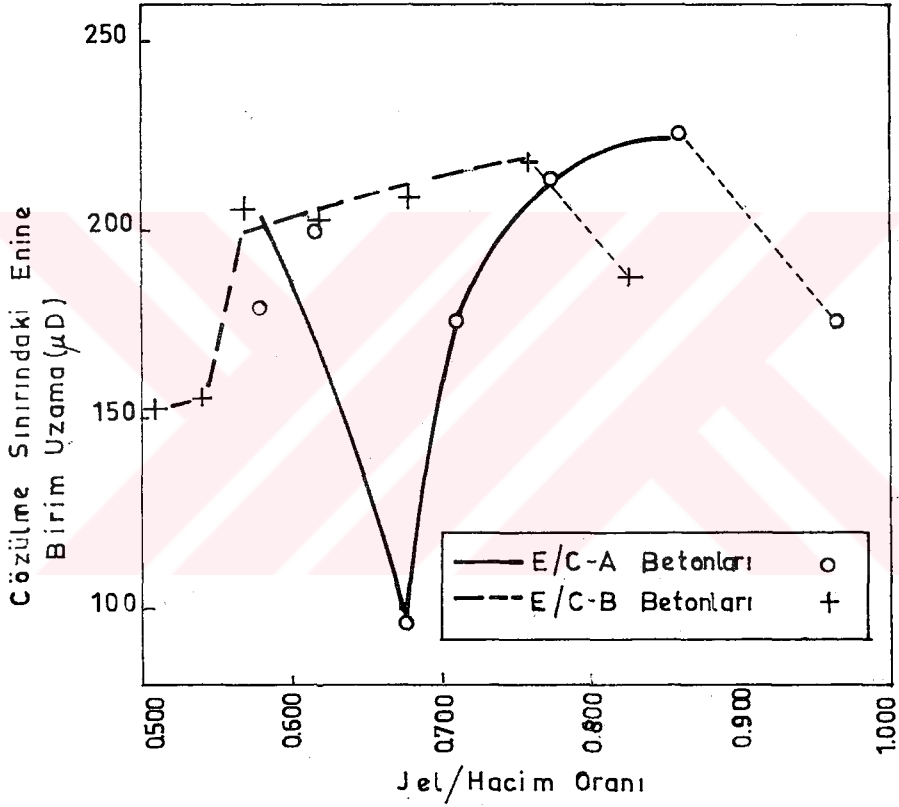
Şekil 3.24

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Birim Kısılma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısılma Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



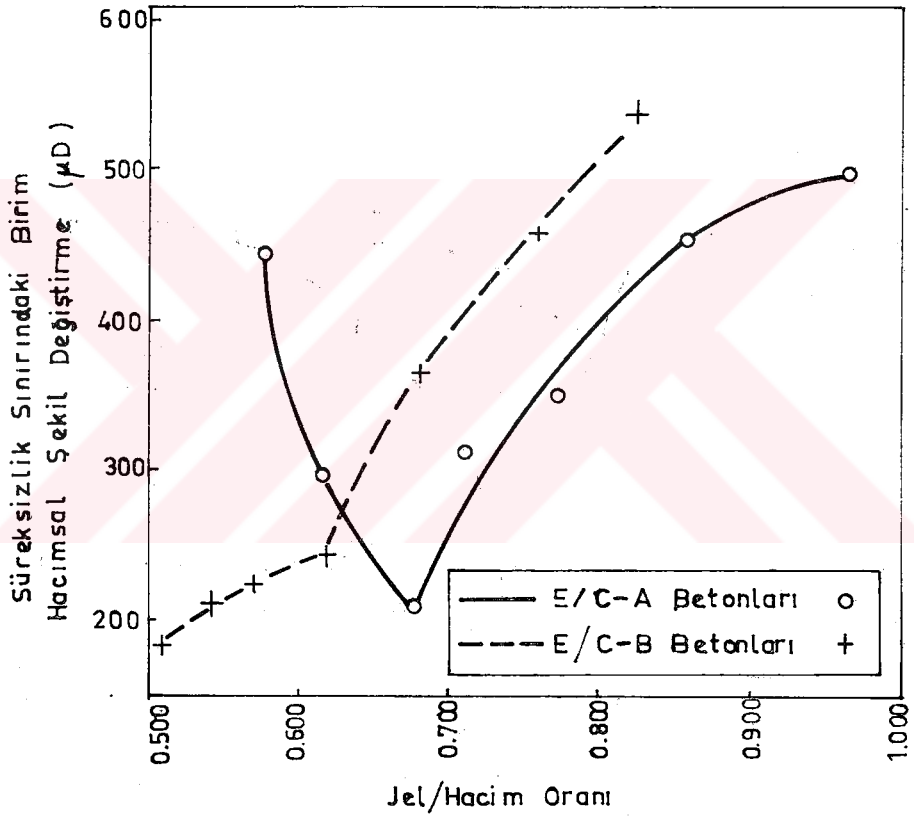
Şekil 3.25

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



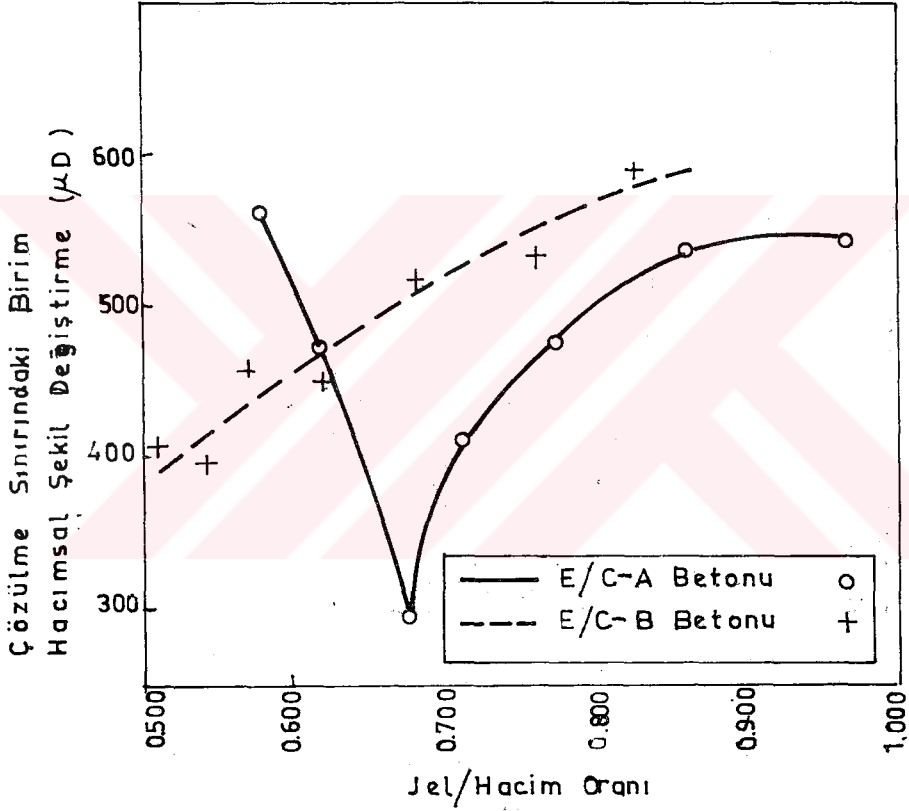
Şekil 3.26

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



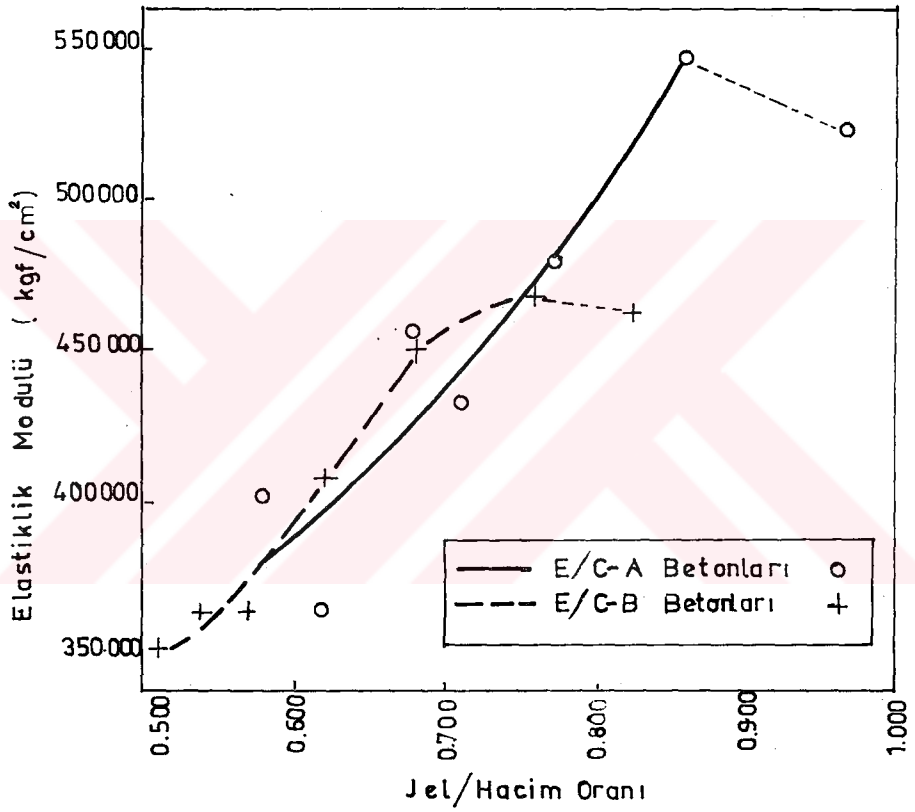
Şekil 3.27

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Hacimsal Şekildeğiştirme'nin Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi

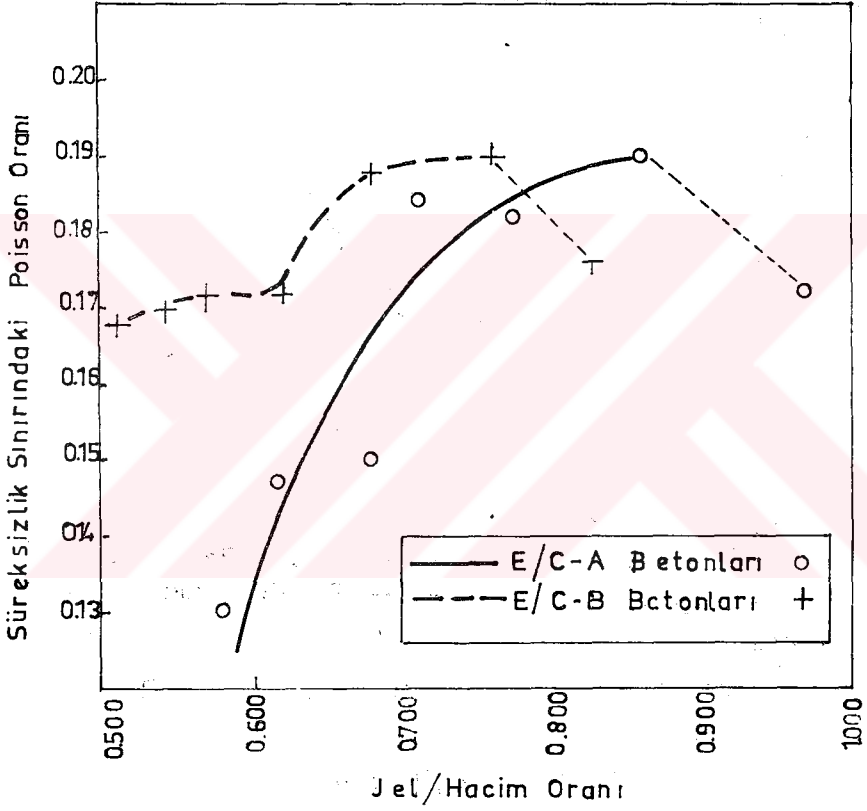


Şekil 3.28

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Birim Hacımsal Şekildeğiştirmenin Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi

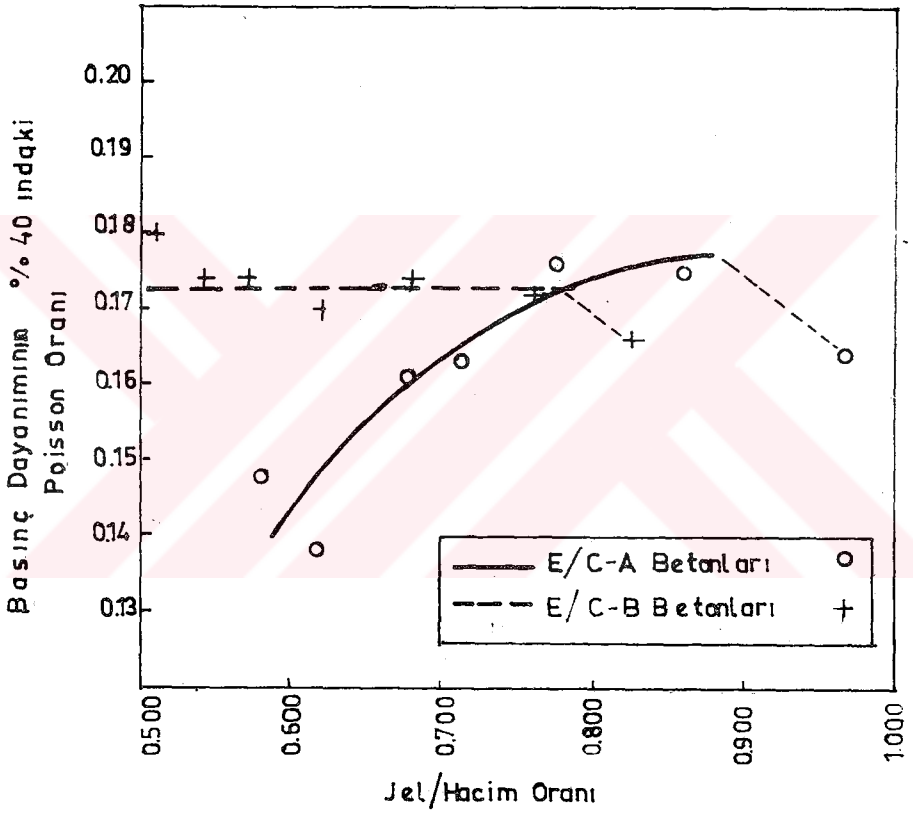


Şekil 3.29
E/C Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün
Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



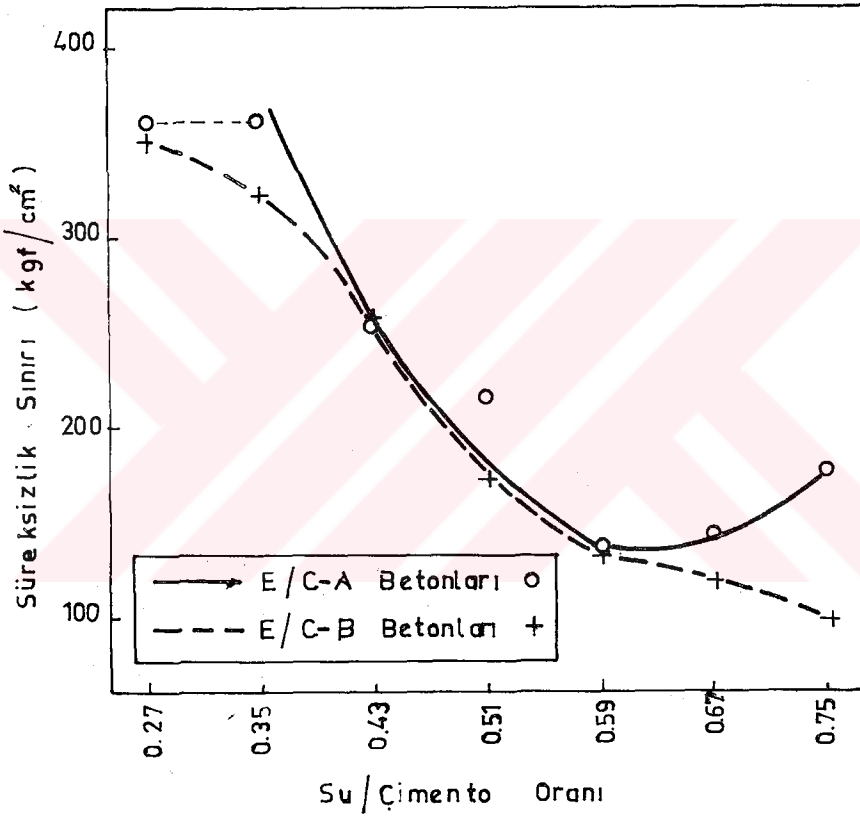
Şekil 3.30

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



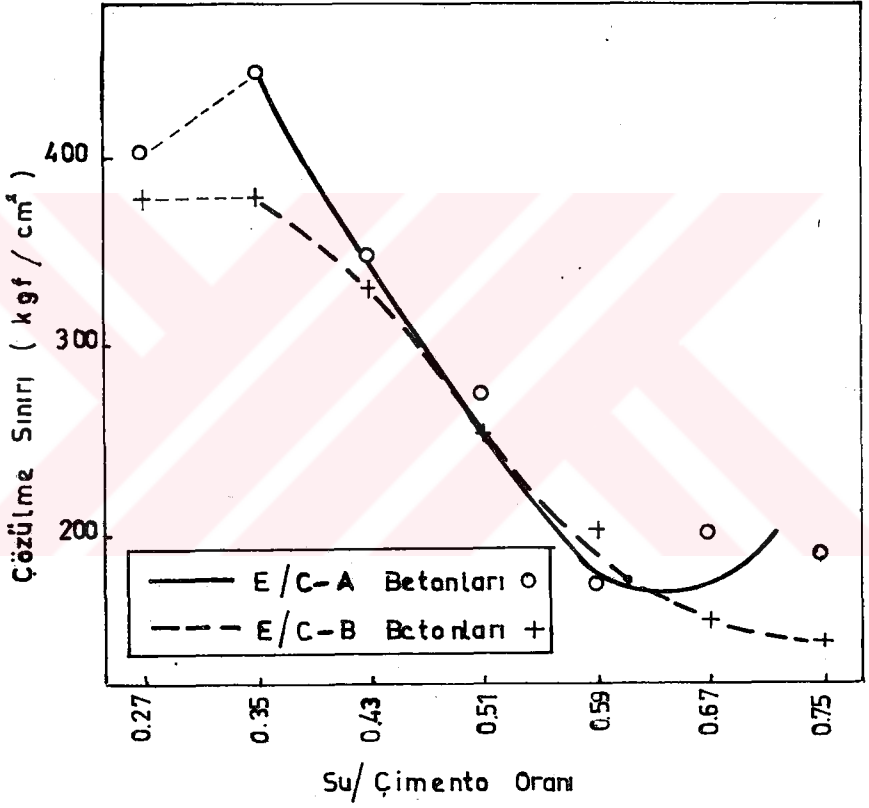
Şekil 3.31

E/C Serisi Betonlarında Basmaç Dayanımının
% 40 ındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına
Göre Değişimi



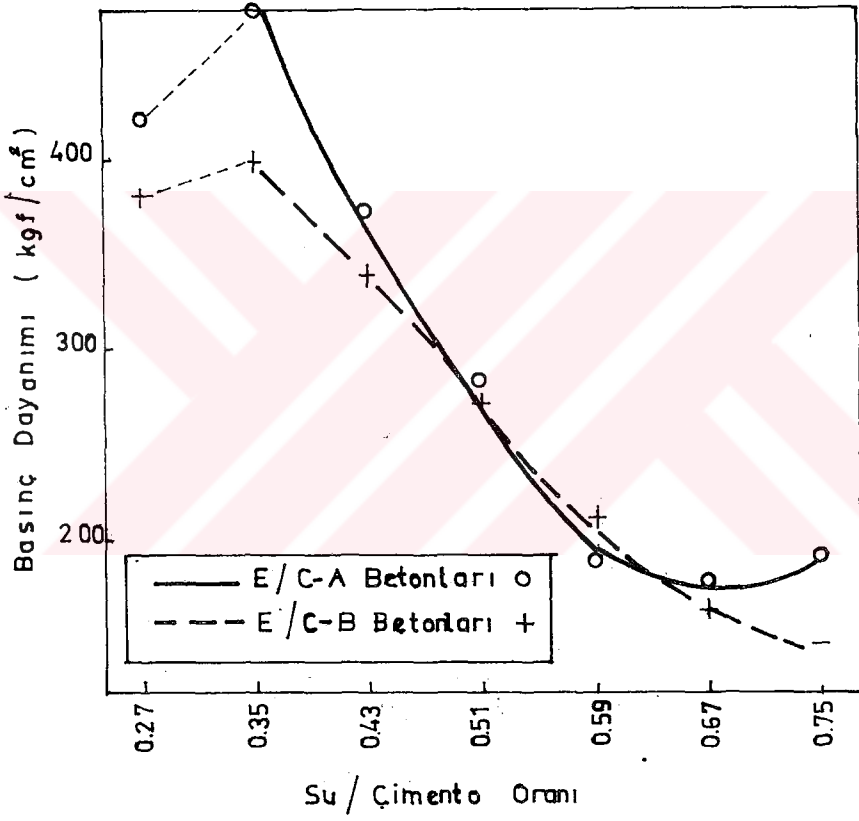
Şekil 3.32

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının
Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



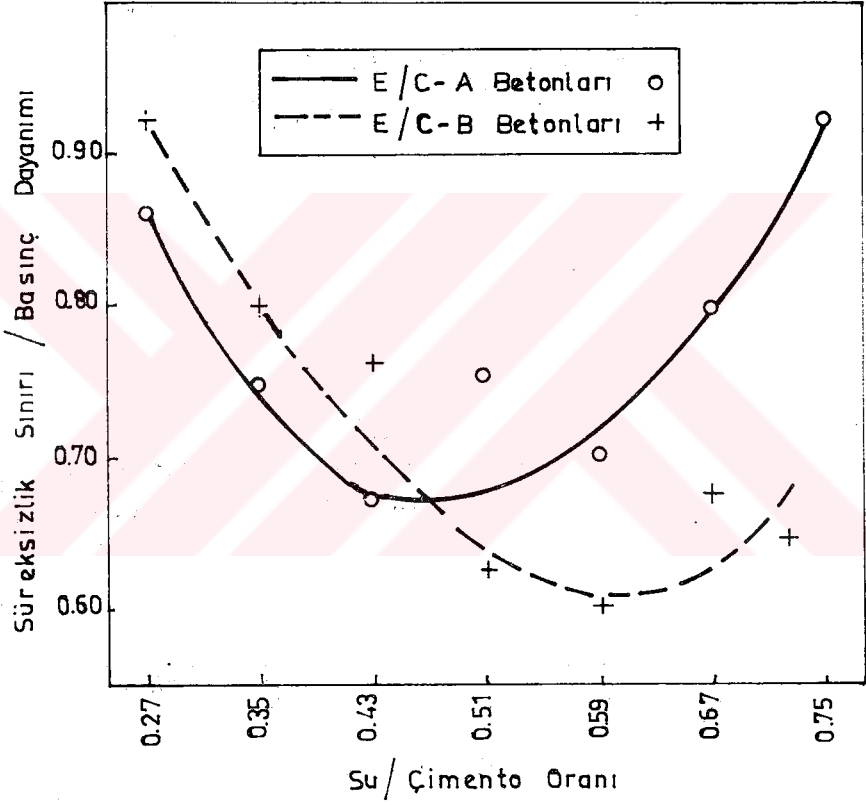
Şekil 3.33

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırının
Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



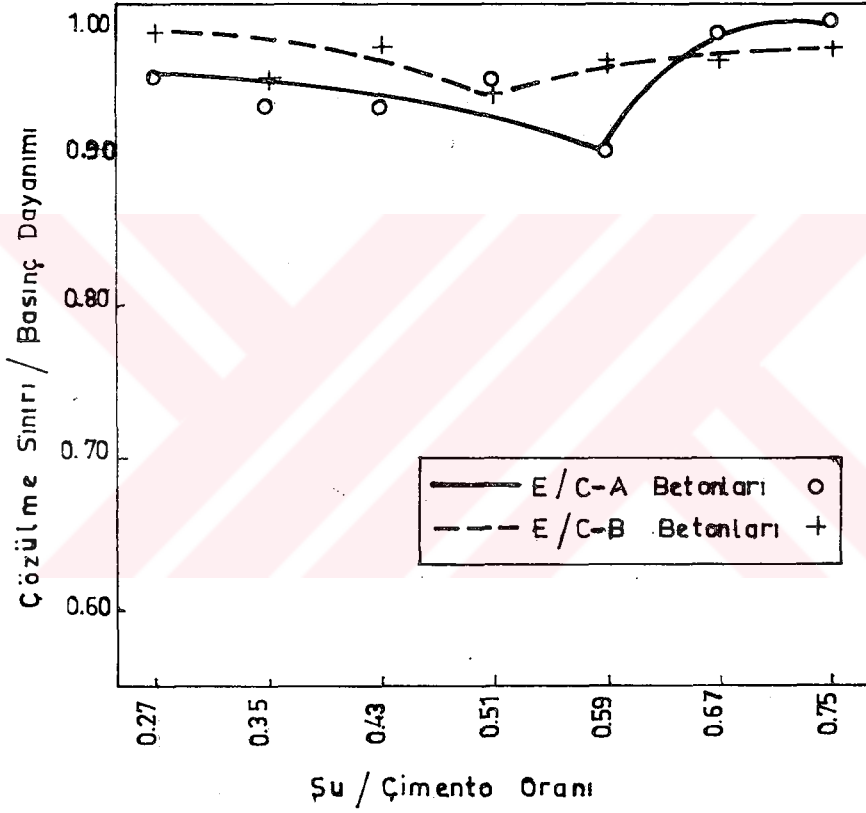
Şekil 3.34

E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının
Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



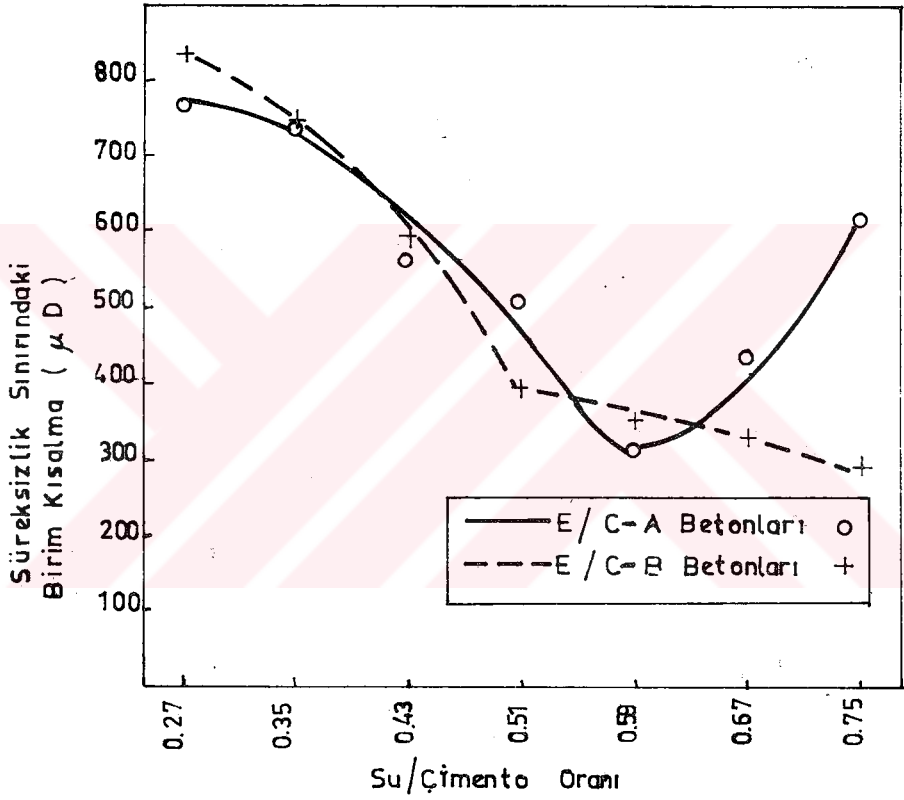
Şekil 3.35

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



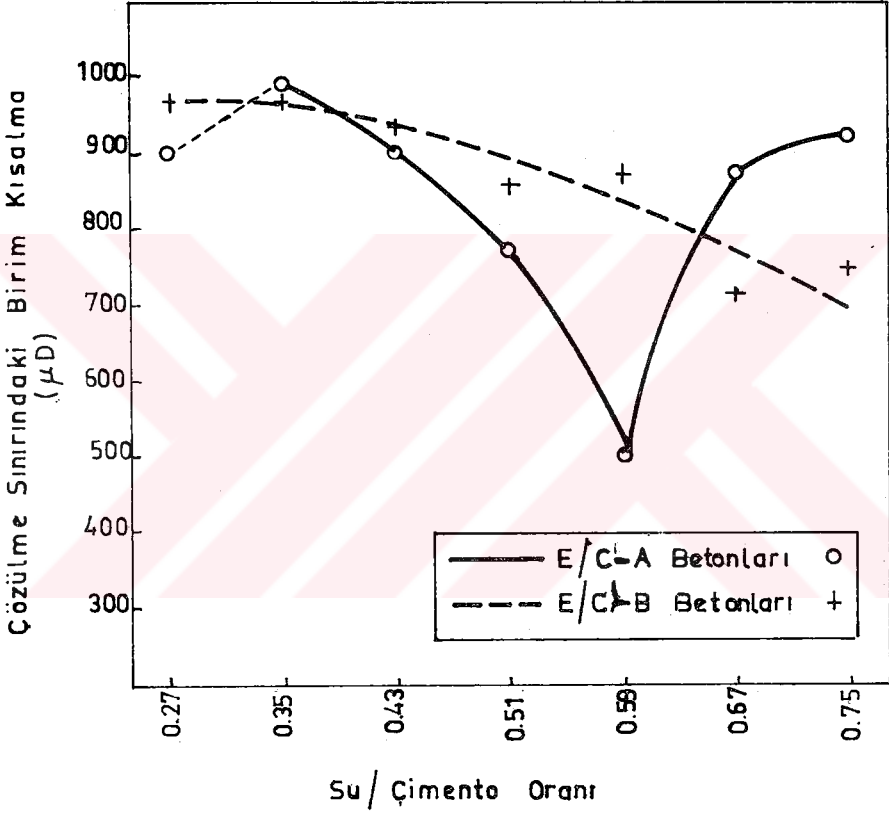
Şekil 3.36

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



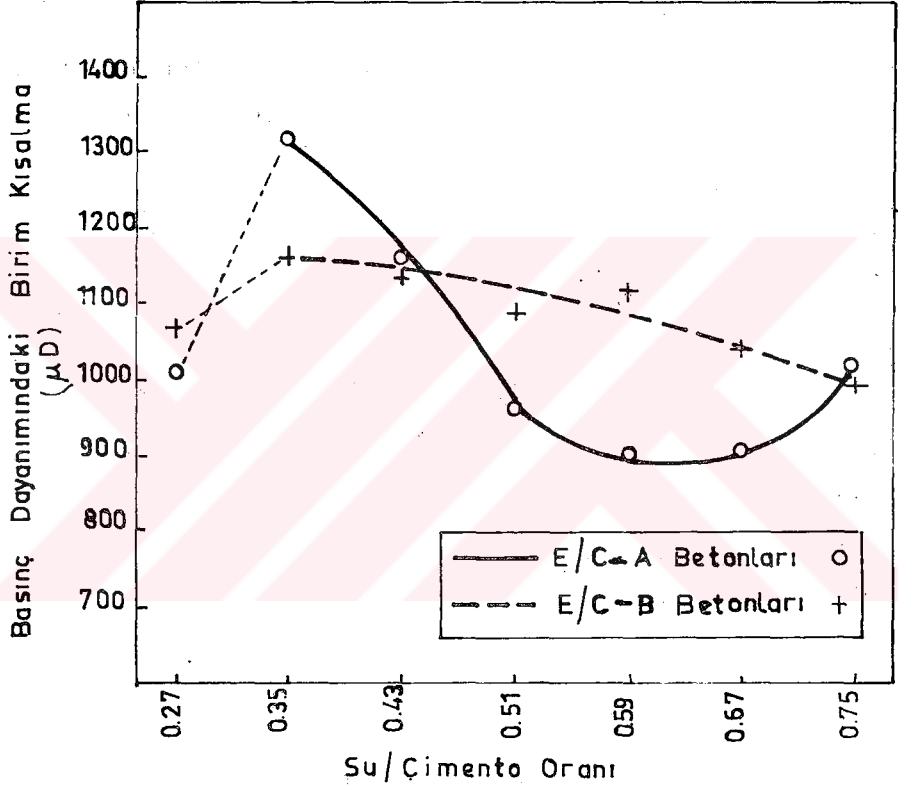
Şekil 3.37

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki
Birim Kısılmanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



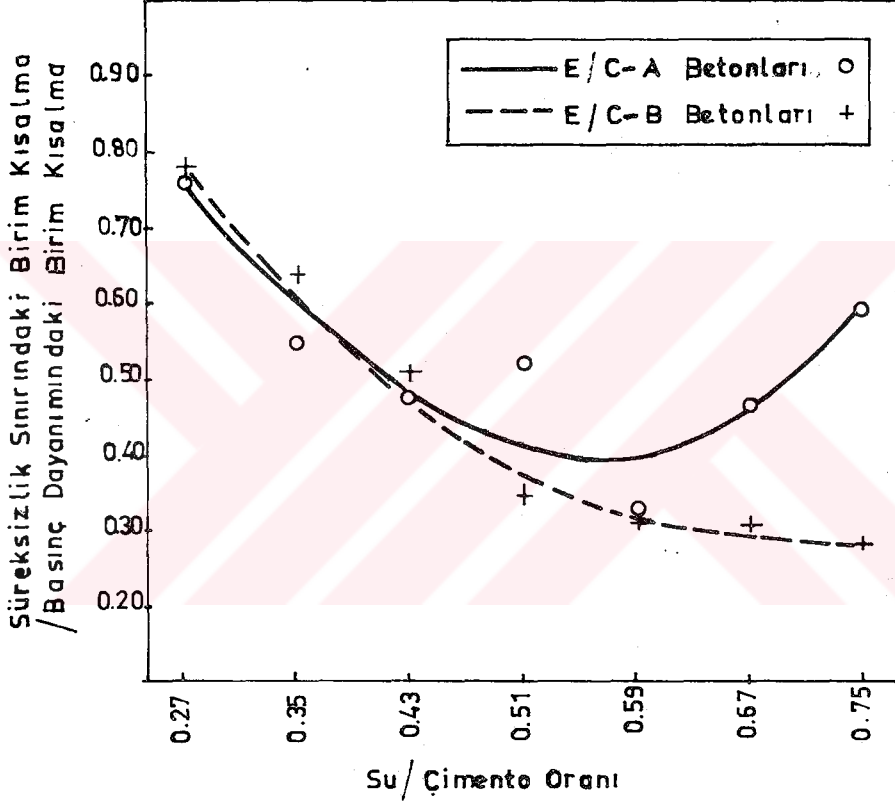
Şekil 3.38

E/C Serisi Betonlarında Çözölme Sınırlındaki Birim Kısılmanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



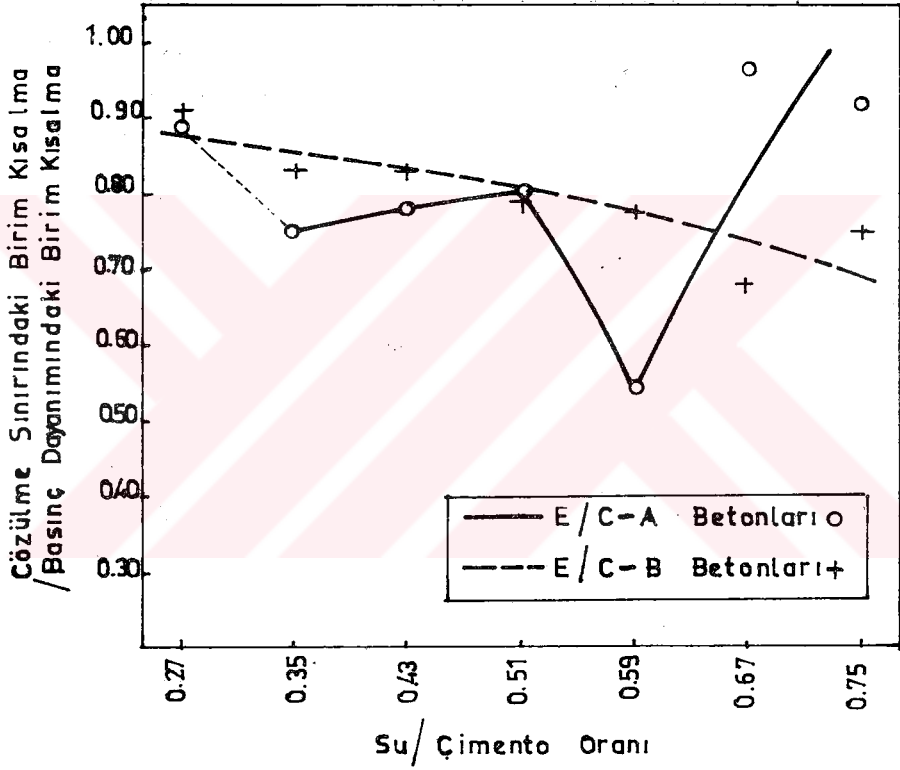
Şekil 3.39

E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısalmanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



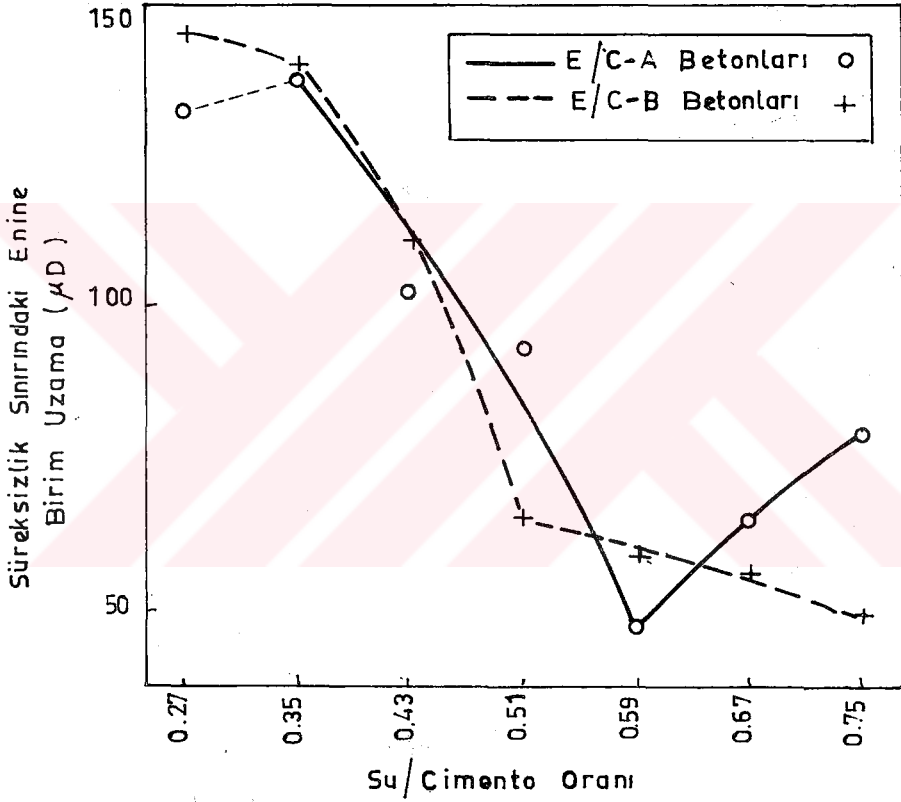
Şekil 3.40

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısılma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısılma Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



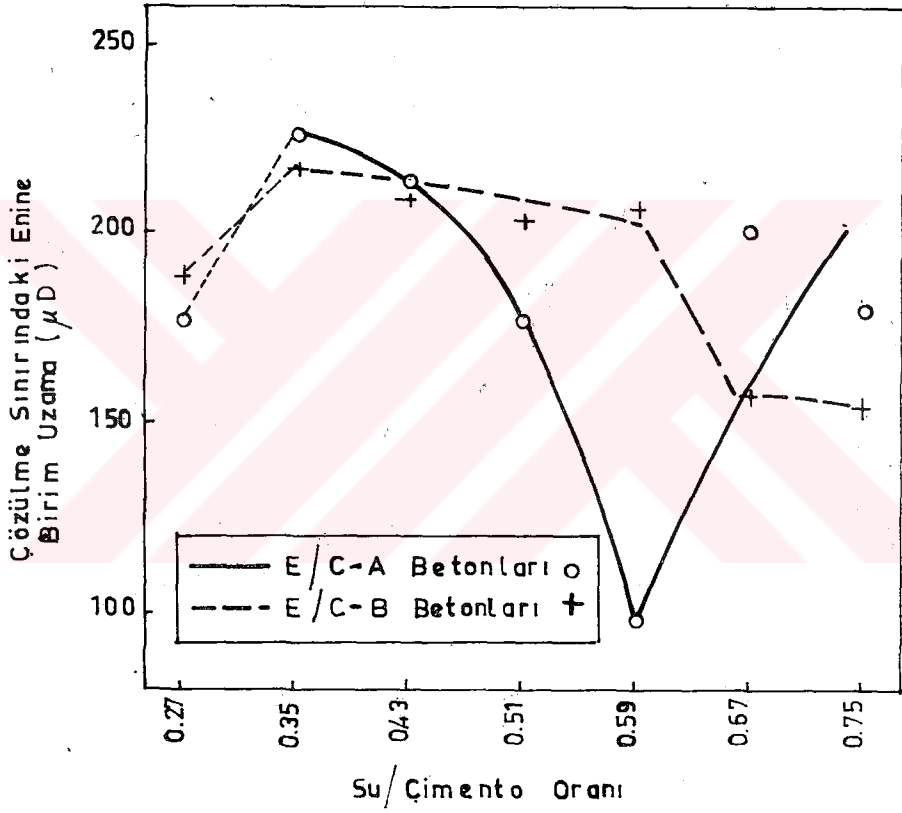
Şekil 3.41

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki
Birim Kısılma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısılma
Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



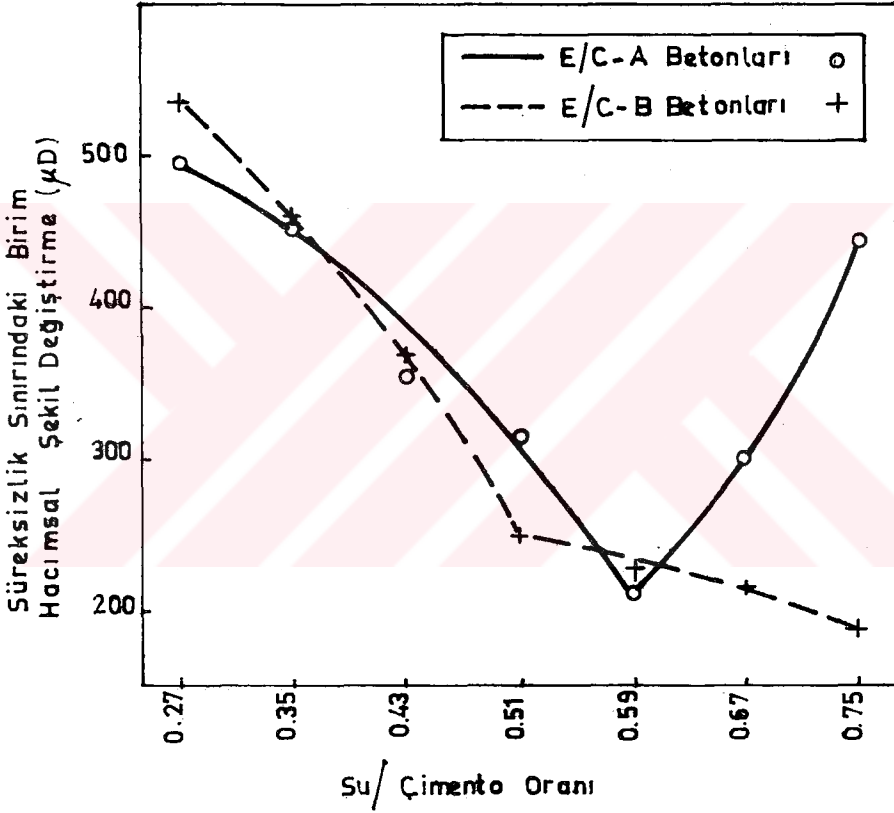
Şekil 3.42

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



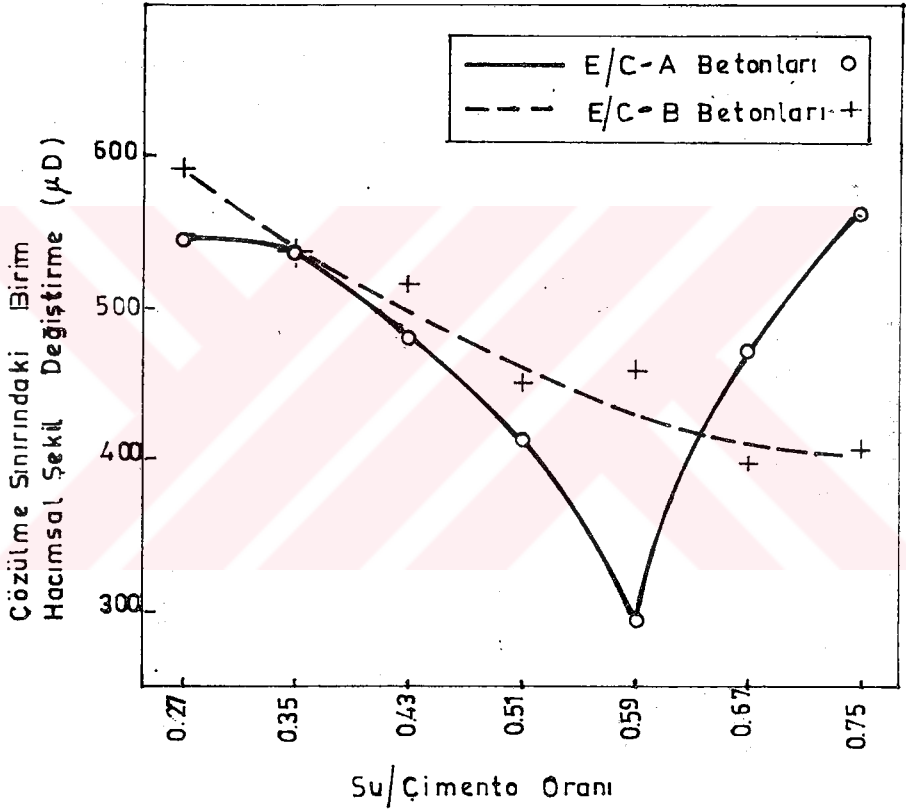
Şekil 3.43

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Enine Birim Uzamanın Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



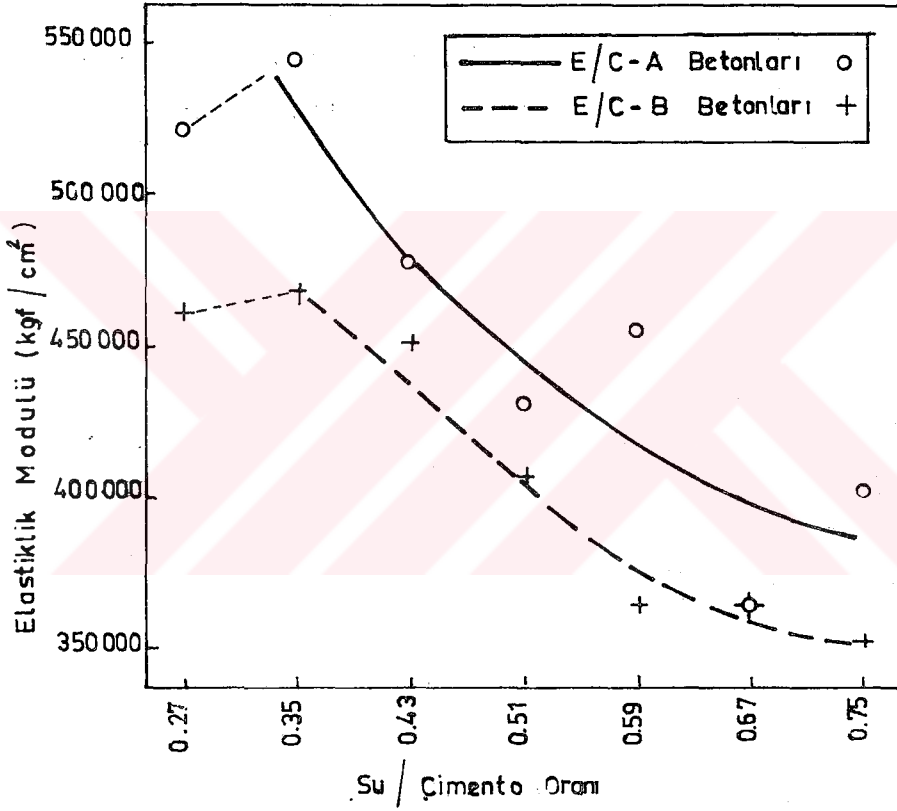
Şekil 3.44

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Birim Hacımsal Şekildeğiştirmenin Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



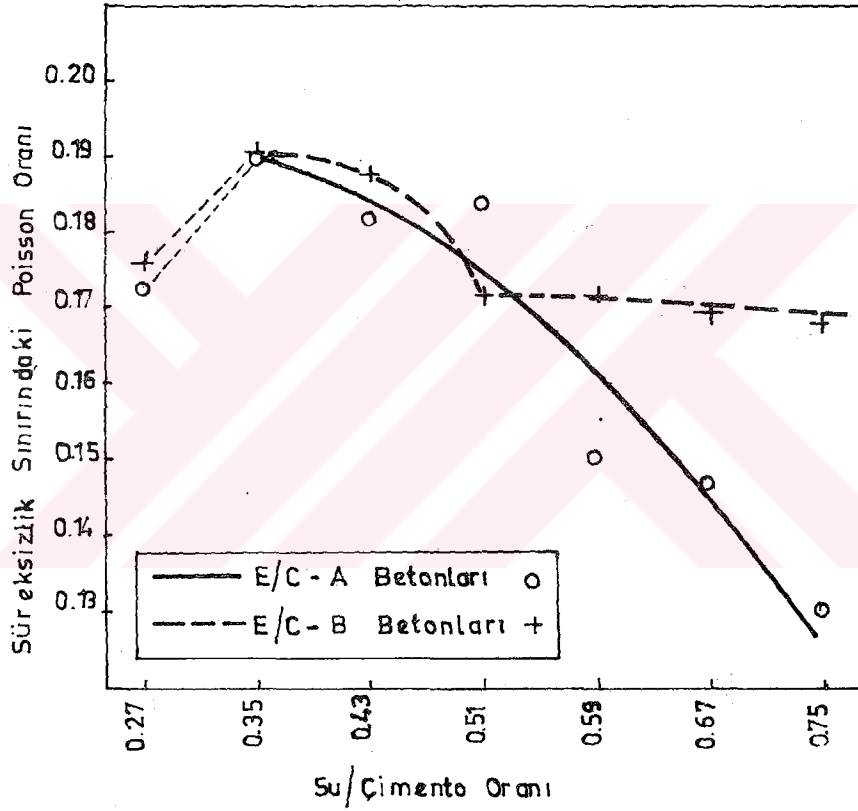
Şekil 3.45

E/C Serisi Betonlarında Çözülme Sınırındaki Birim Hacımsal Şekildeğişirmenin Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



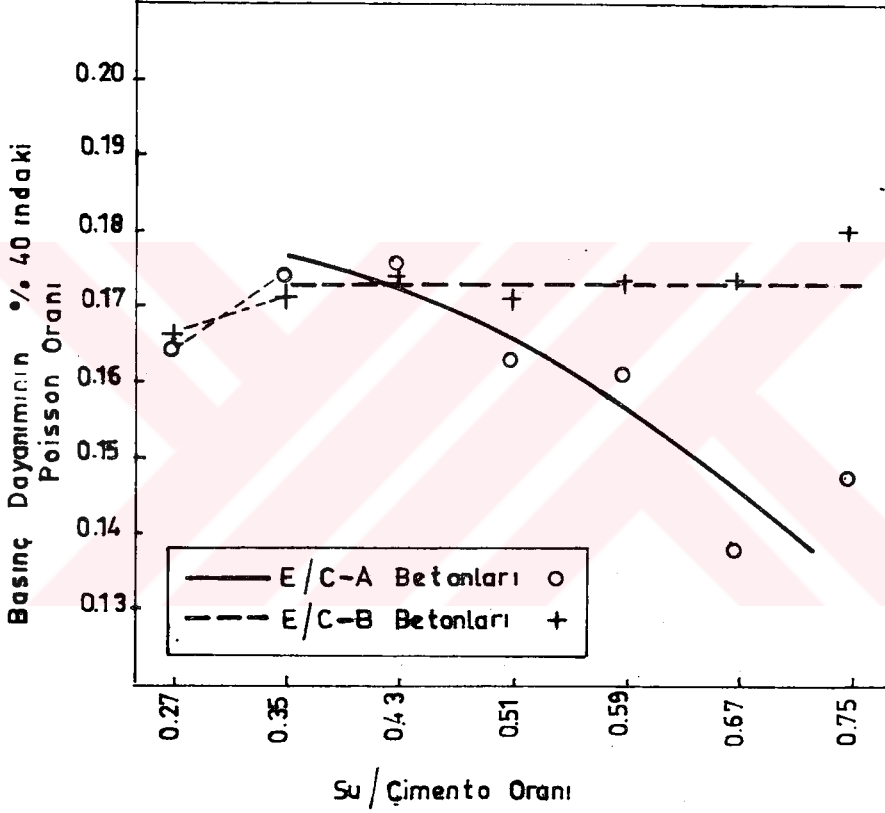
Şekil 3.46

E/C Serisi Betonlarında Elastiklik Modülünün
Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



Şekil 3.47

E/C Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Su/Çimento Oranına Göre Değişimi



Şekil 3.48

E/C Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının
% 40'ındaki Poisson oranının Su/Çimento Oranına
Göre Değişimi

Ancak bağlayıcı hamurda genellikle bir miktar hava bulunur (Bizim betonlarımızın hamur fazında da bir miktar hava vardır). Bu bakımdan jele ayrılabilen hacme bu hava boşluğunu da katmak gerekir. Bu bakımdan tarif biraz değişerek şu hali alır :

$$X = \frac{2.06 \frac{C}{f_c} \cdot \alpha}{\frac{C}{f_c} \cdot \alpha + e + h}$$

Burada pay ve paydayı C ile bölersek :

$$X = \frac{2.06 \frac{\alpha}{f_c}}{\frac{\alpha}{f_c} + \frac{e+h}{C}} \quad \text{bulunur.}$$

f_c için araştırmamızda kullandığımız çimentodaki $f_c = 3.16 \text{ kg/lt}$ değeri yerine konursa :

$$X = \frac{0.652 \alpha}{0.316 \alpha + \frac{e+h}{C}} \quad \text{bulunur.} \quad (3.1)$$

Araştırmamızda bu son ifadeye göre "Jel/Hacim" oranları hesaplanmıştır. α hidrasyon derecesinin saptanmasında Verbeck (30) in çeşitli çimentolarda 13 yıl süreyle yaptığı deneyler sonucu verdiği hidrasyon ısılarından yararlanılmıştır. Bu araştırmacı 21°C su içinde tuttuğu çeşitli Su/Çimento oranında ASTM I Portland çimentosundan yapılmış (Bizim çimentoya uyuyor) çimento hamuru numuneleri için aşağıdaki tabloda görülen hidrasyon ısılarını vermektedir.

Su/Çimen- to Oranı	Hidratasyon Isısı (cal/gr)				
	28 gün	90 gün	1 yıl	6.5 yıl	13 yıl
0.40	95.6	103.8	108.6	116.8	118.2
0.60	107.1	114.7	120.0	123.1	-
0.80	111.6	119.5	122.2	125.0	-

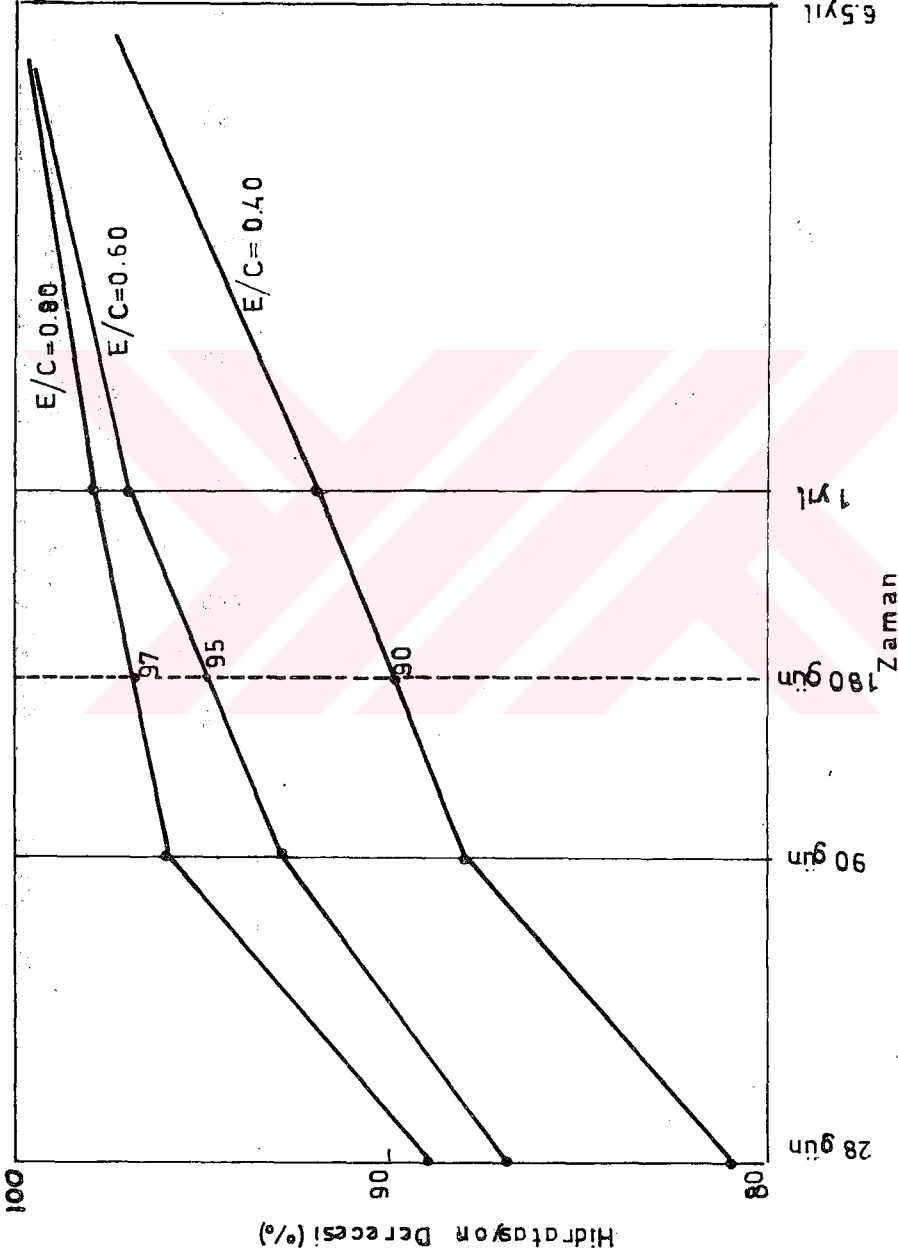
Hidratasyon ısısının hidratasyon derecesi ile orantılı olduğunu kabul etmek mümkündür (24). Diğer taraftan 0.40 Su/Çimento oranı için hidratasyonun 13 yılda, 0.60 ve 0.80 oranlarında ise 6.5 yılda tamamlandığı kabul edilirse, çeşitli zamanlarda aşağıdaki tabloda verilen hidratasyon dereceleri elde edilir.

Su/Çimen- to Oranı	Hidratasyon Derecesi				
	28 gün	90 gün	1 yıl	6.5 yıl	13 yıl
0.40	0.81	0.88	0.92	0.99	1.00
0.60	0.87	0.93	0.97	1.00	1.00
0.80	0.89	0.96	0.98	1.00	1.00

Bu tabloda elde edilen sonuçlar Şekil 3.49 da, zaman ölçeği logaritmik alınarak grafiğe geçirilmiştir. Bu grafikten, bizim numunelerimizin yaşı olan 180 gün için aşağıdaki hidratasyon dereceleri elde edilmektedir :

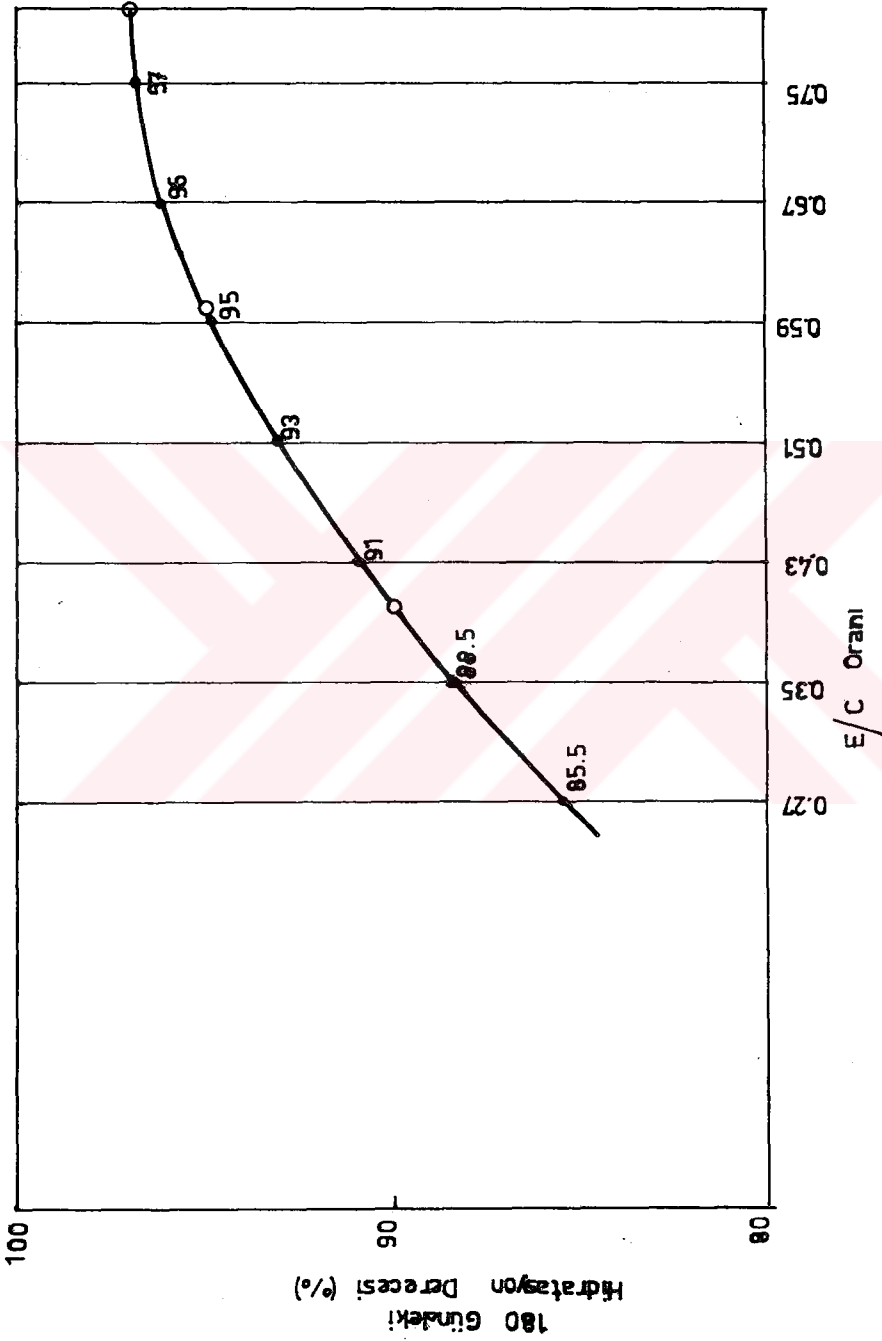
Su/Çimento oranı	180 gündeki hidratasyon oranı
0.40	0.90
0.60	0.95
0.80	0.97

Elde olunan bu 3 değer ise Şekil 3.50 de grafiğe geçirilmiş elde edilen eğriden yararlanarak araştırmamız-



Şekil 3.49

21°C su içinde tutulan ASTM - I tipinden Portland Çimentosunun çeşitli sürelerde ulaştığı Hidratasyon Dereceleri (Verbeck (30))



Şekil 3.50

Araştırmamızda Kullanılan Çeşitli Betonların Hidratasyon Derecelerinin Bulunması (Şekil 3.49'dan elde edilen sonuçlardan yararlanarak).

da kullanılan çeşitli Su/Çimento oranlarında 180 günde ulaşılan hidratasyon dereceleri, şekilden de görüldüğü üzere, Tablo 3.2 deki gibi bulunmuştur :

TABLO 3.2

Araştırmamızda kullanılan çeşitli Su/Çimento oranlarında 180 günde ulaşılan hidratasyon dereceleri

<u>Su/Çimento Oranı</u>	<u>180 günde ulaşılan hidratasyon derecesi (%)</u>
0.27	85.5
0.35	88.5
0.43	91
0.51	93
0.59	95
0.67	96
0.75	97

Tablo 3.2 de elde edilen bu sonuçlar (3.1) denkleminde E/C serisindeki çeşitli betonlar için Tablo 2.1 de verilen e, h ve C değerleriyle beraber yerine konursa, E/C serisindeki betonlarda Tablo 3.3 de verilen "Jel/Hacim" oranları bulunur :

TABLO 3.3

E/C Serisi Betonlarının Jel/Hacim Oranları

<u>E/C Oranları</u>	<u>E/C - A Betonları</u>	<u>E/C - B Betonları</u>
0.27	0.968	0.826
0.35	0.860	0.760
0.43	0.774	0.681
0.51	0.713	0.619
0.59	0.678	0.571
0.67	0.617	0.543
0.75	0.580	0.510

3.2. HS Serisi deney sonuçları

HS serisine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 3.51 ilâ Şekil 3.58 de verilmektedir. 3.1 paragrafında gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ile ilgili olarak verilen bilgiler bu eğriler için de aynen geçerlidir. Burada da aynı karışımdaki numuneler arasında karakteristik farklı davranışlar elde edilmişse, bu numunelere ait diagramlar ayrı ayrı verilmiştir.

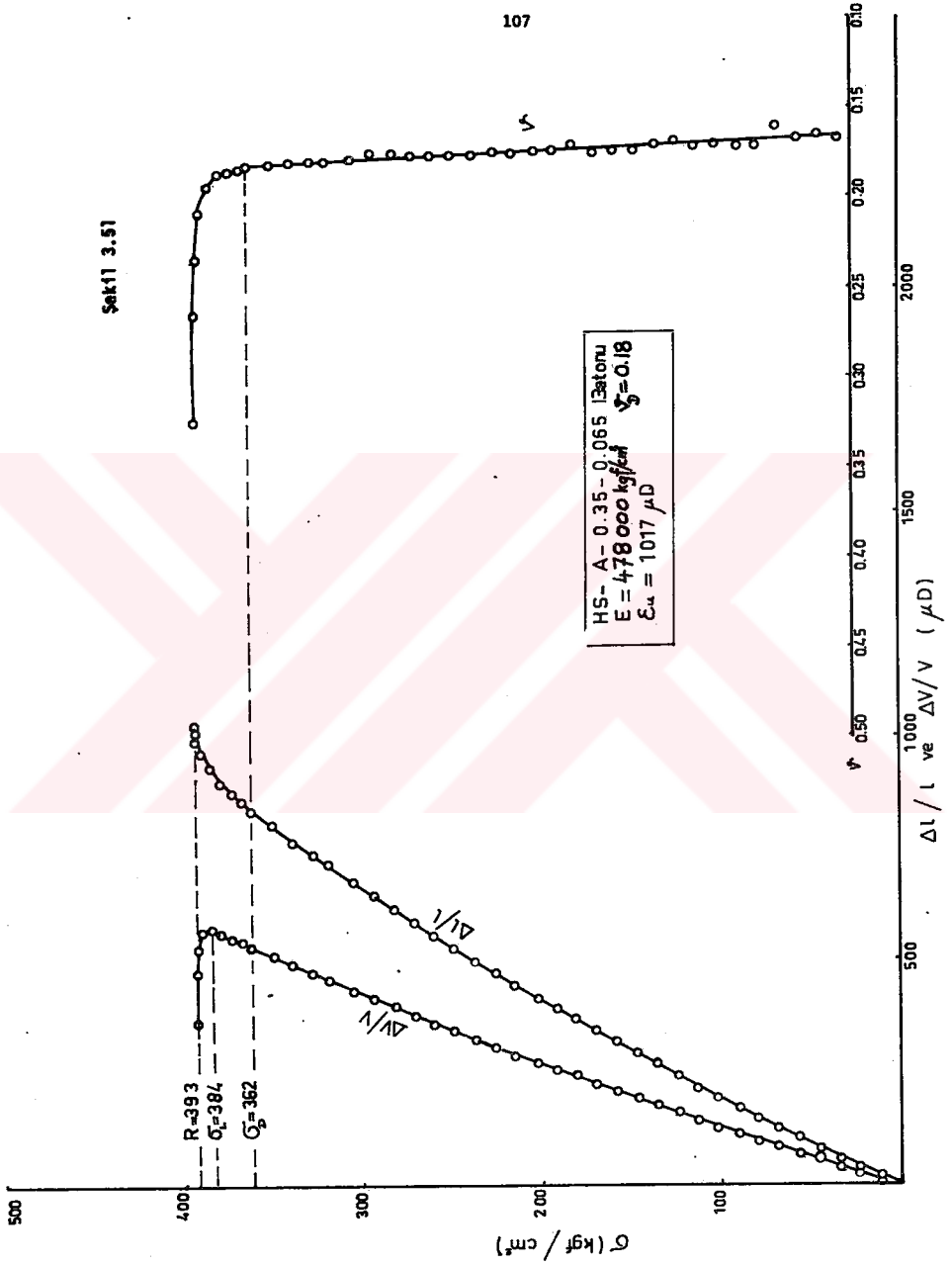
Tablo 3.4 de HS serisine ait betonların mekanik özellikleri verilmiştir. Bu değerler her bir karışım için 2 ilâ 3 değerın ortalamasıdır.

Şekil 3.59 ilâ Şekil 3.67 de HS serisine ait betonlarda kritik sınırlar basınç dayanımları, basınç dayanımındaki birim kısalma ve malzeme sabitleri ile ilgili özelliklerin bağlayıcı hamurun Jel/Hacim oranlarına göre değişimi incelenmektedir. Her nokta 2 ilâ 3 numunenin ortalamasına aittir. Buradaki Jel/Hacim oranları da (3.1) denkleminde yararlanarak hesaplanmıştır. Hidratasyon dereceleri Tablo 3.2 den, suyun ve havanın betonda kapladığı hacimler ve çimento ağırlıkları da Tablo 2.2 den alınmıştır. Neticede bulunan Jel/Hacim oranları Tablo 3.5 de verilmektedir. Şekil 3.59 ilâ Şekil 3.67 nin çiziminde bu Jel/Hacim oranları gözönüne alınmıştır.

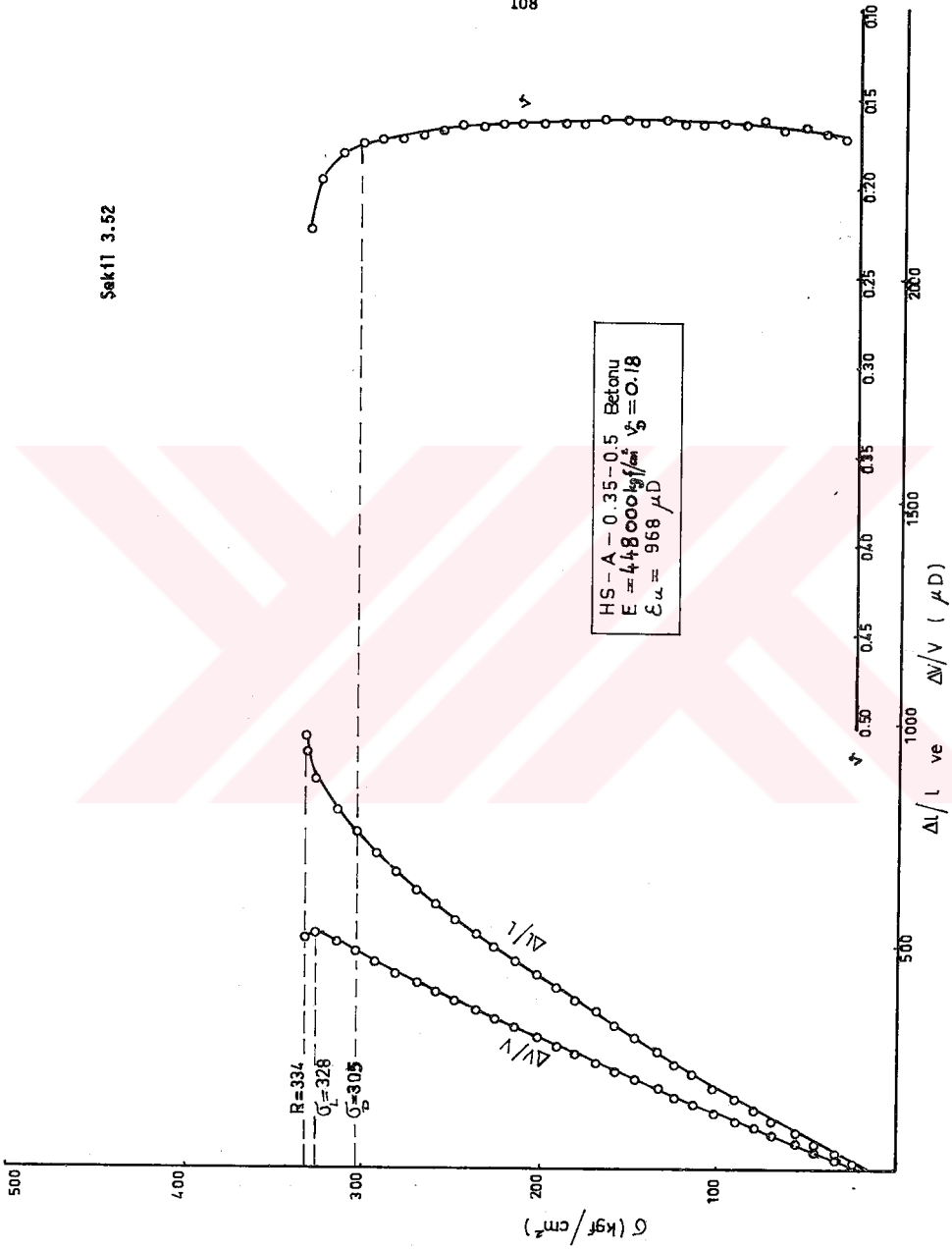
TABLO 3.5

HS Serisi Betonlarının Jel/Hacim Oranları

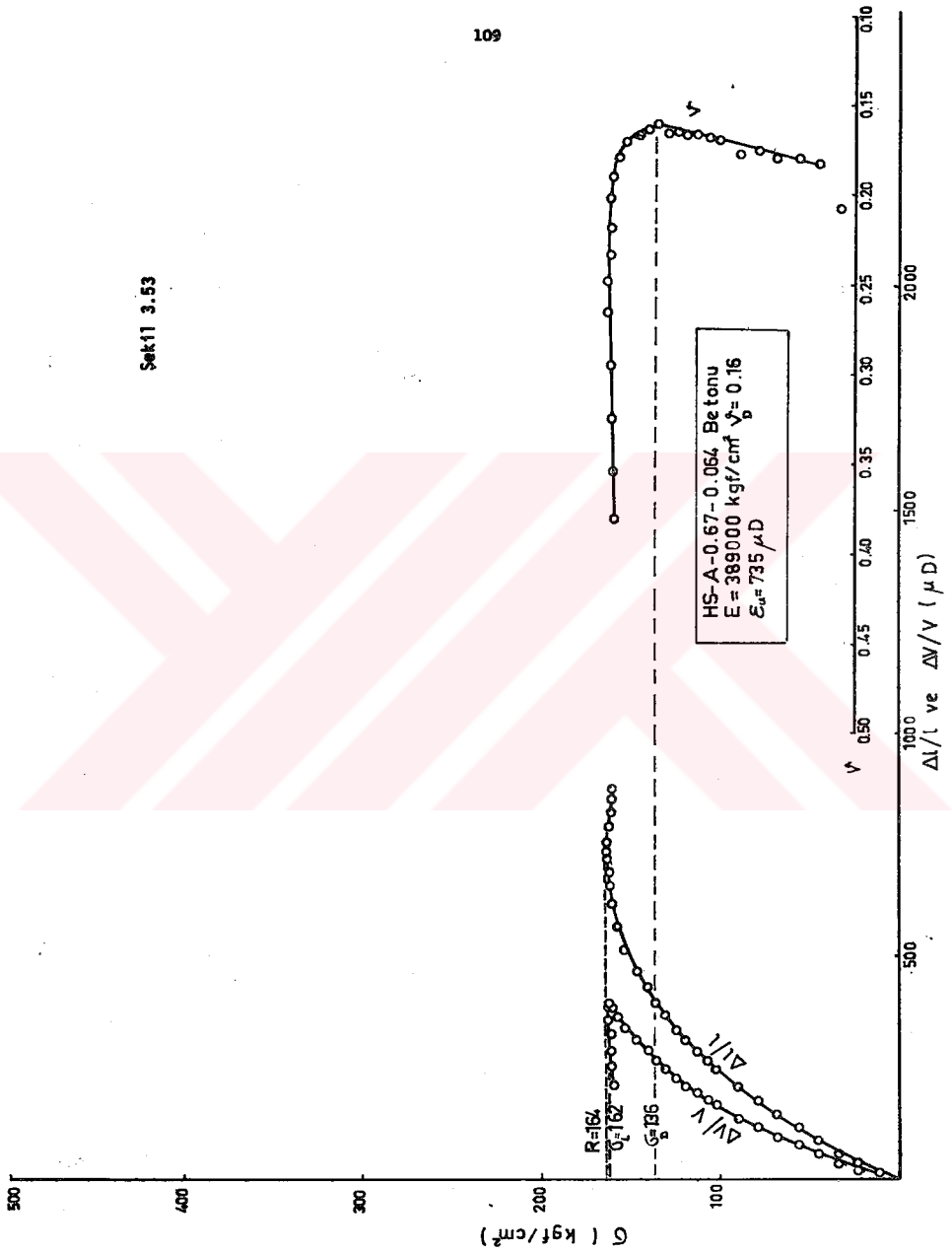
Karışım	Jel/Hacim Oranı
HS-A-0.35-0.065	0.764
HS-A-0.35-0.5	0.609
HS-A-0.67-0.064	0.449
HS-A-0.67-0.5	0.267
HS-B-0.43-0.06	0.604
HS-B-0.43-0.5	0.493
HS-B-0.75-0.035	0.435
HS-B-0.75-0.485	0.270



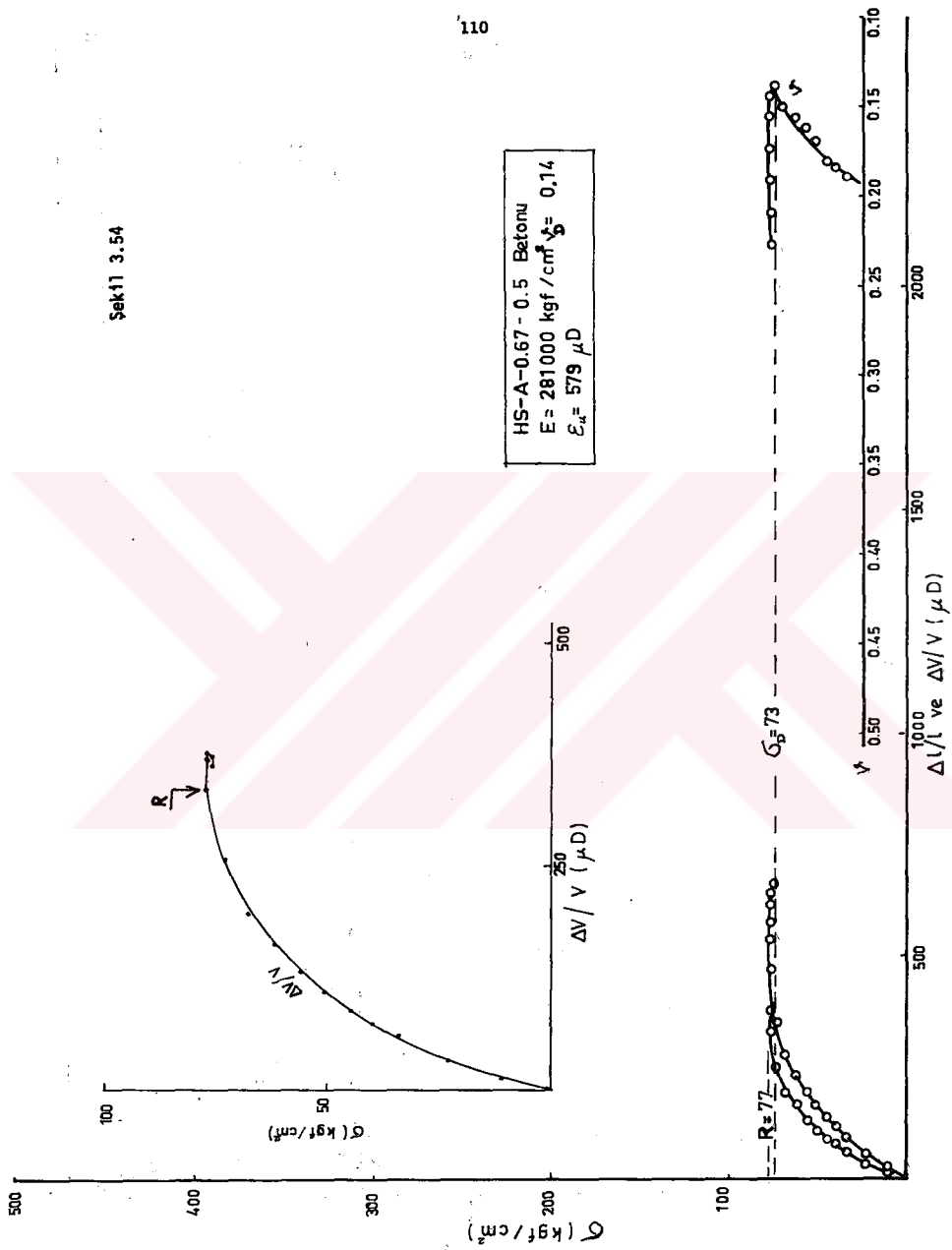
Sekt 11 3.52



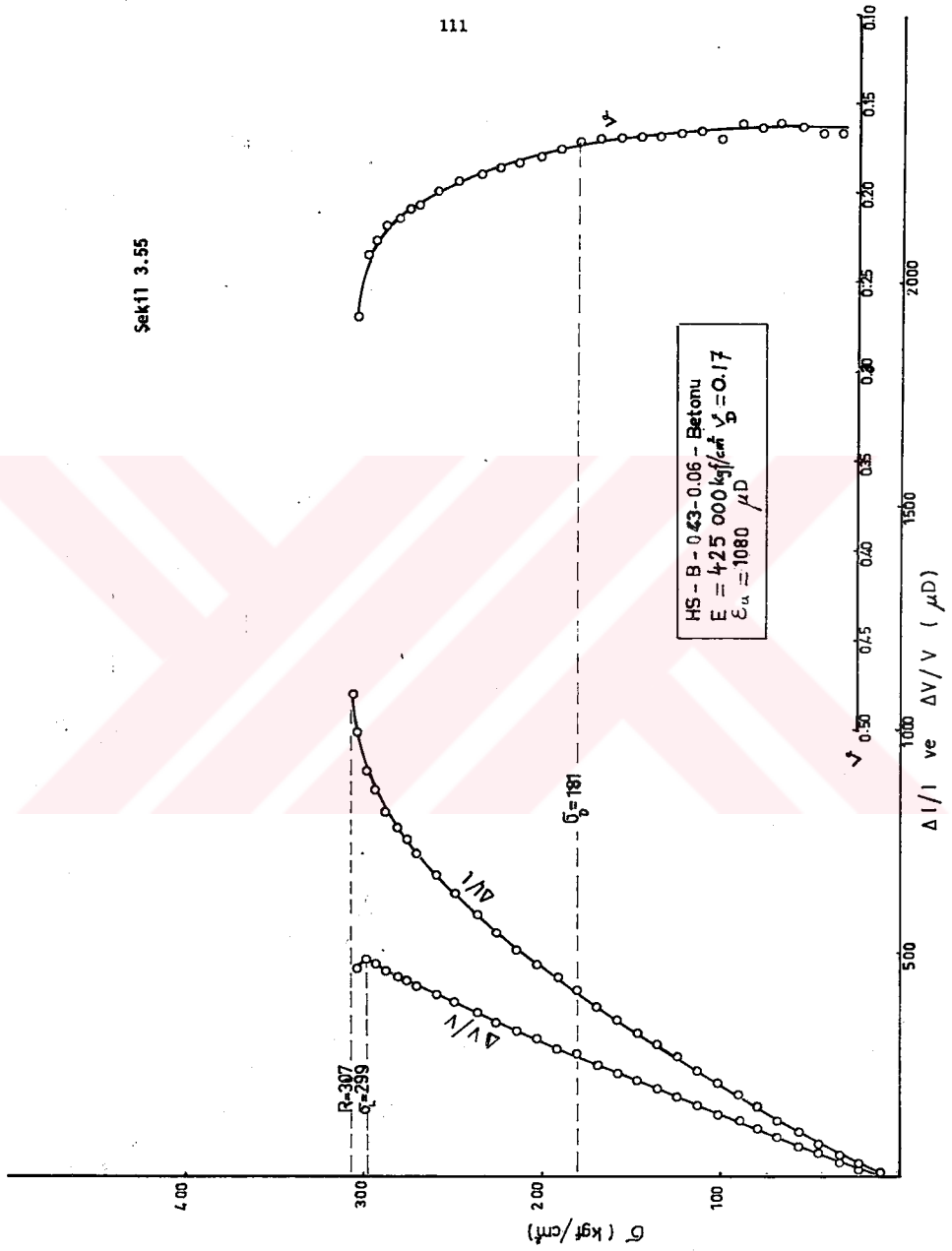
Sekt 11 3.53



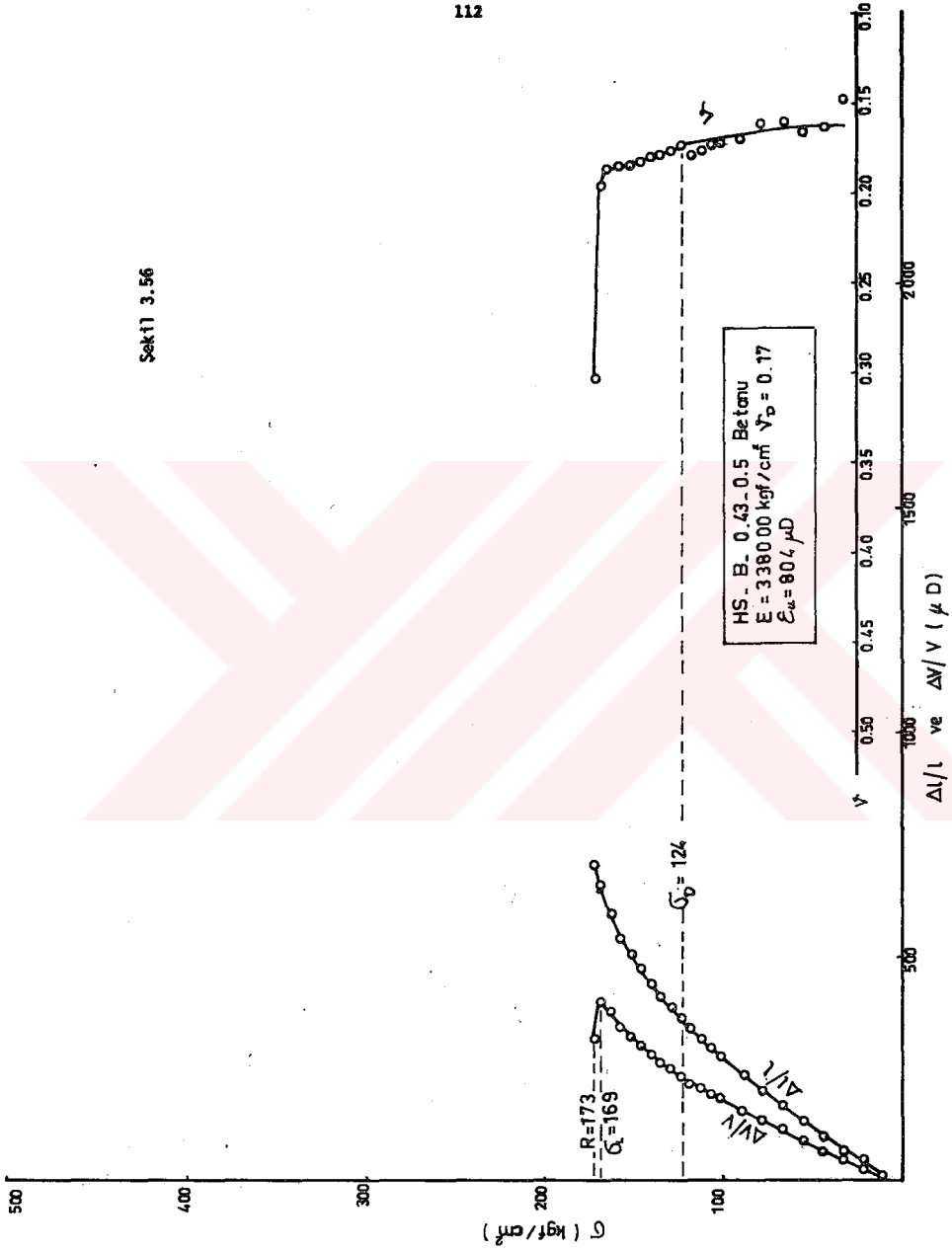
Sek11 3.54



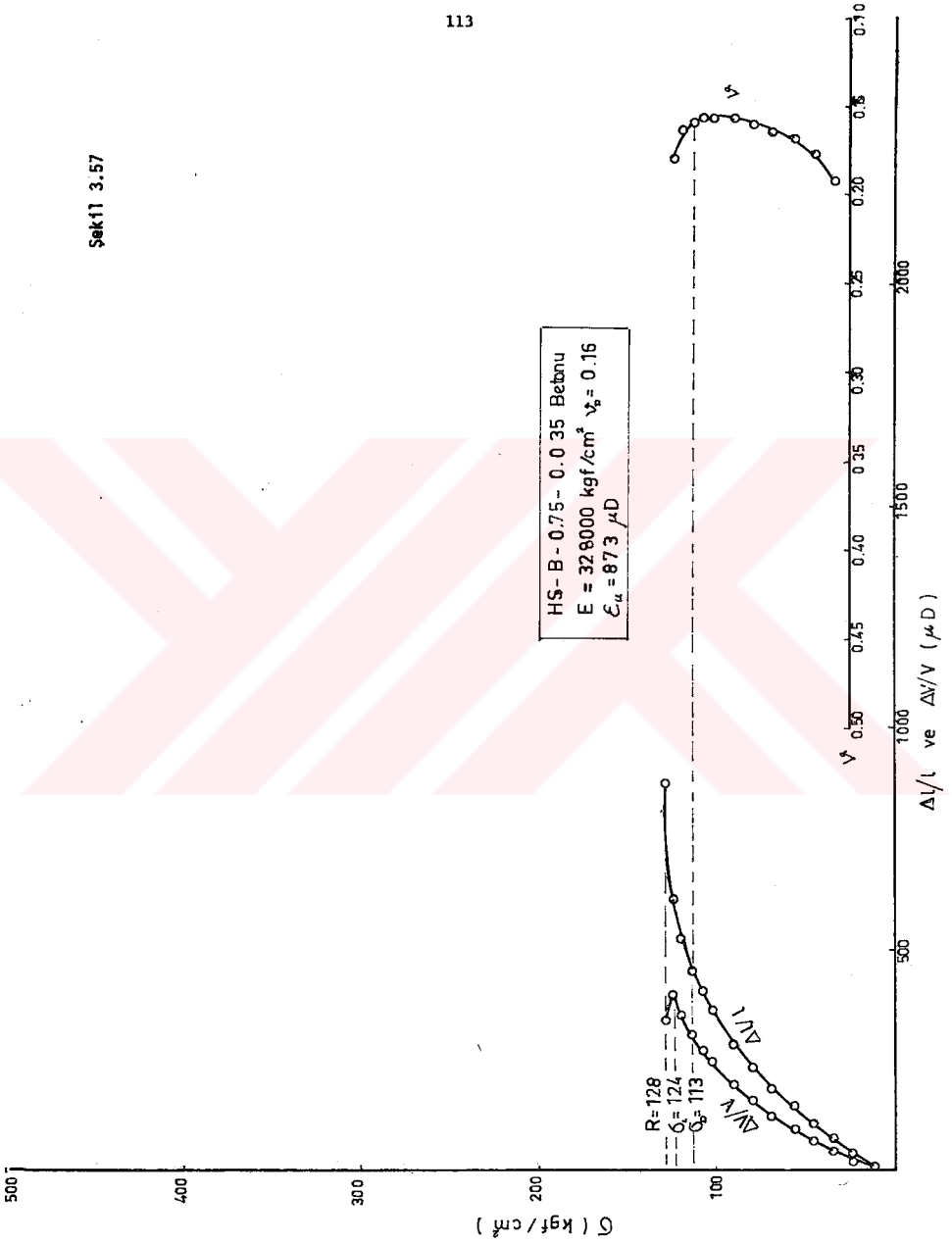
Sak 11 3.55



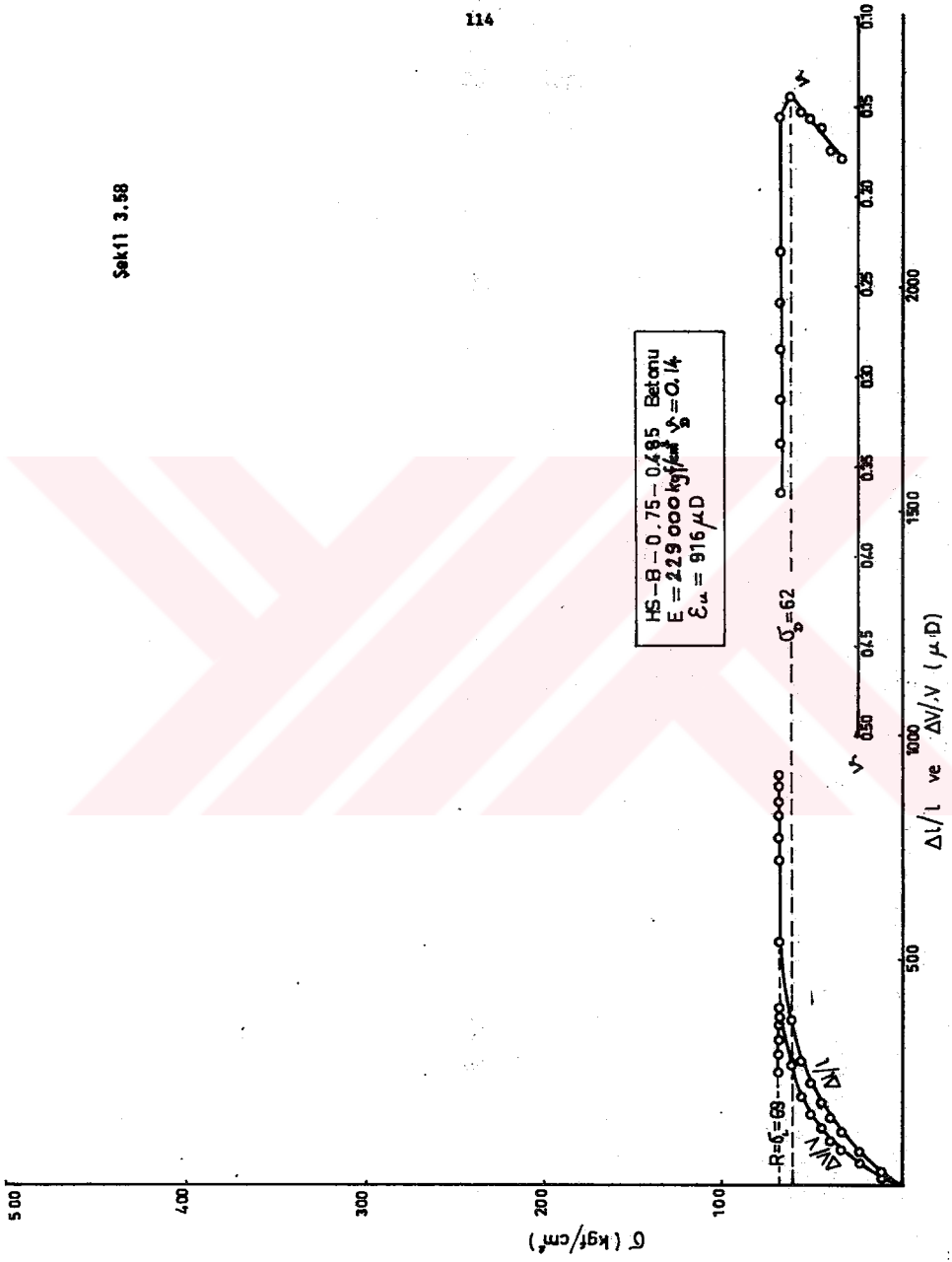
Sekt 3.56



Şekil 3.57



Şekil 3.58

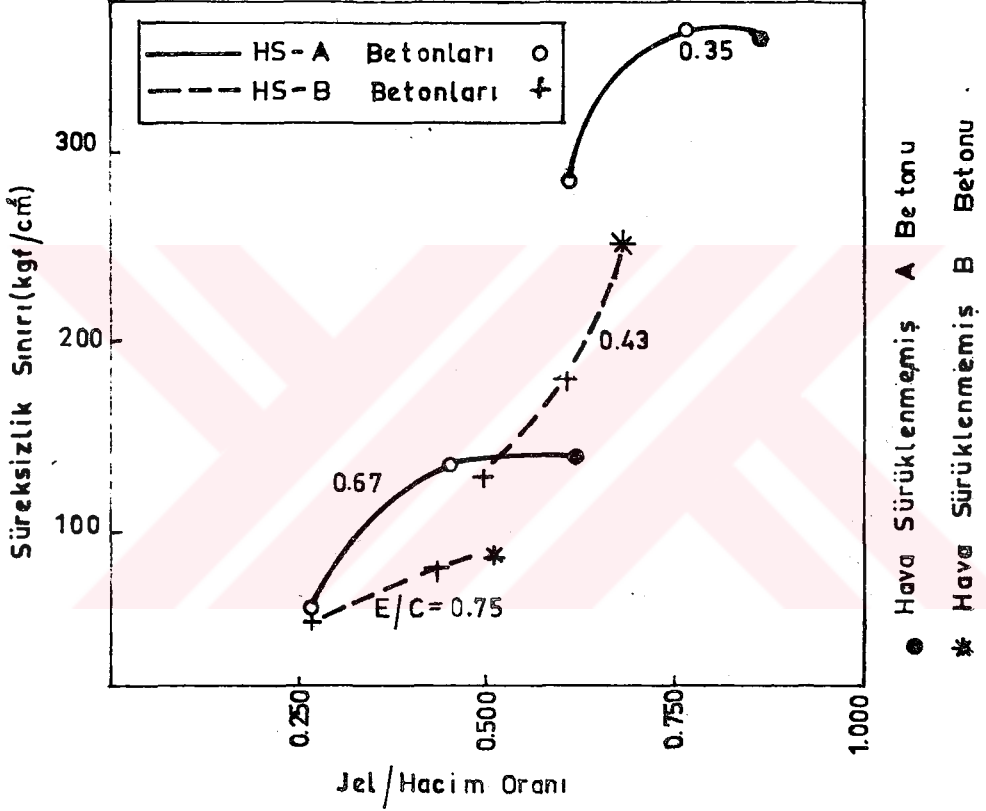


TABLO 3.4

HS Serisi Betonlarının 180 günlük Mekanik Özellikleri

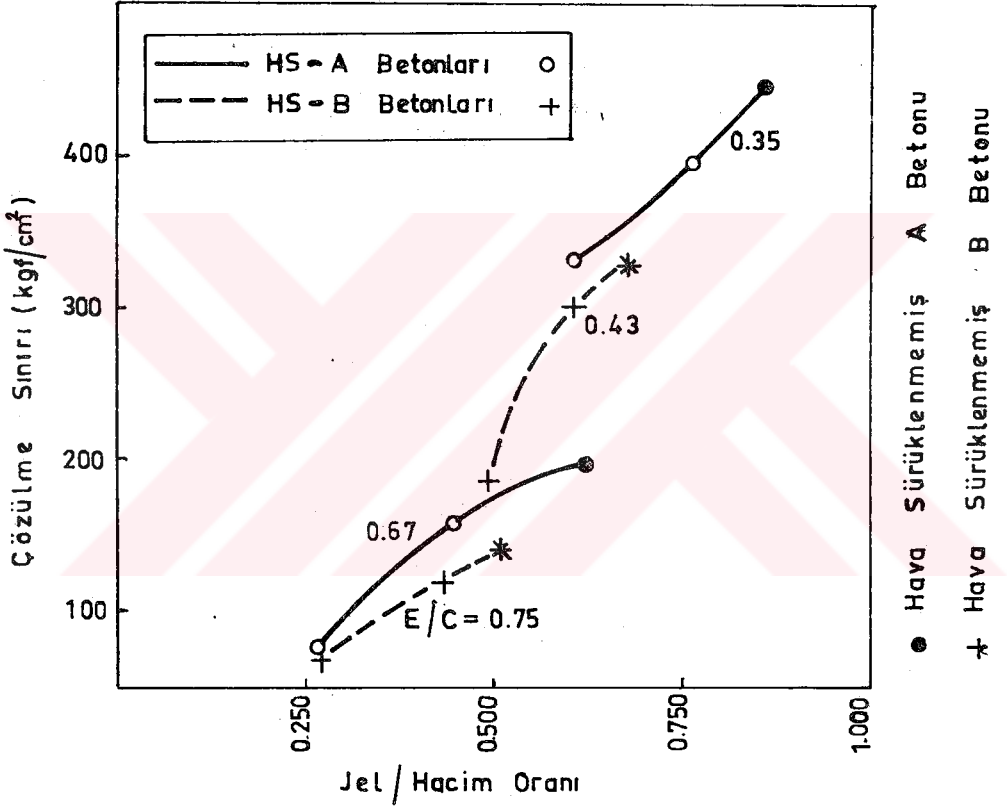
Karışım	Sürekli- lik sınırı (kgf/cm ²)	Çözülme sınırı (kgf/cm ²)	Basınç dayanımı (kgf/cm ²)	Basınç da- yanımındaki Birim K1 - salma (μD)	Elastiklik Modülü (kgf/cm ²)	Sürekli- lik sınırı rındaki Poisson O.	Basınç dayanımının % 40 ındaki Poisson Or.
HS-A-0,35-0,065	364	396	402	1090	490.000	0.180	0.170
HS-A-0,35-0.5	286	331	338	1022	454.000	0.181	0.168
HS-A-0,67-0,064	138	158	159	746	384.000	0.159	0.166
HS-A-0,67 - 0,5	62	-*	77	445	267.000	0.156	0.176
HS-B-0,43-0,06	181	299	307	1102	429.000	0.174	0.171
HS-B-0,43-0,5	130	186	189	838	344.000	0.173	0.166
HS-B-0,75-0,035	79	117	123	874	315.000	0.158	0.160
HS-B-0,75-0,485	54	68	68	683	204.000	0.158	0.176

* Basınç dayanımına kadar hacimde genişleme görülmediğinden çözülme sınırı verilmemiştir.

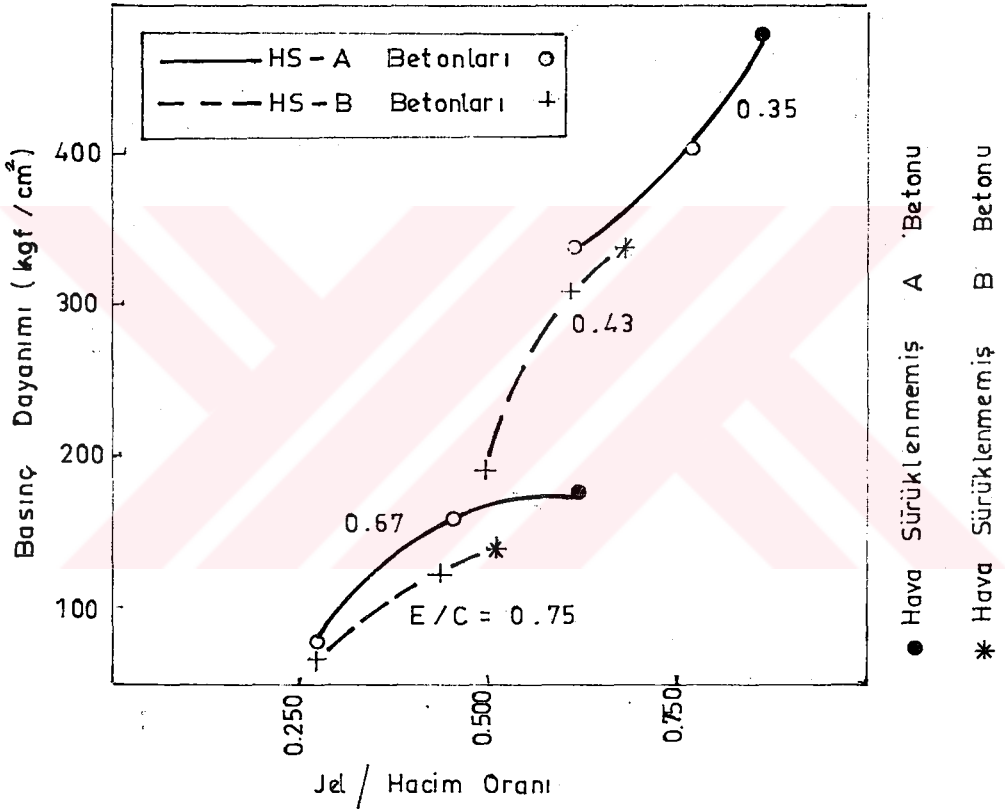


Şekil 3.59

HS Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının
Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi

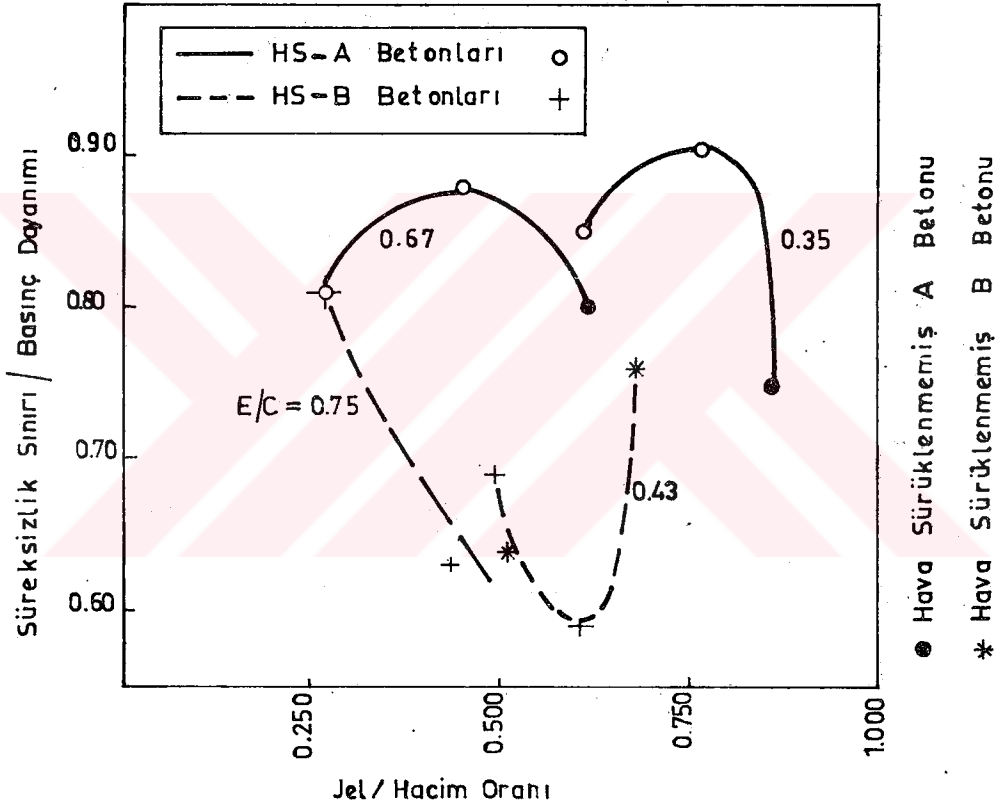


Şekil 3.60
HS Serisi Betonlarında Çözülme Sınırının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



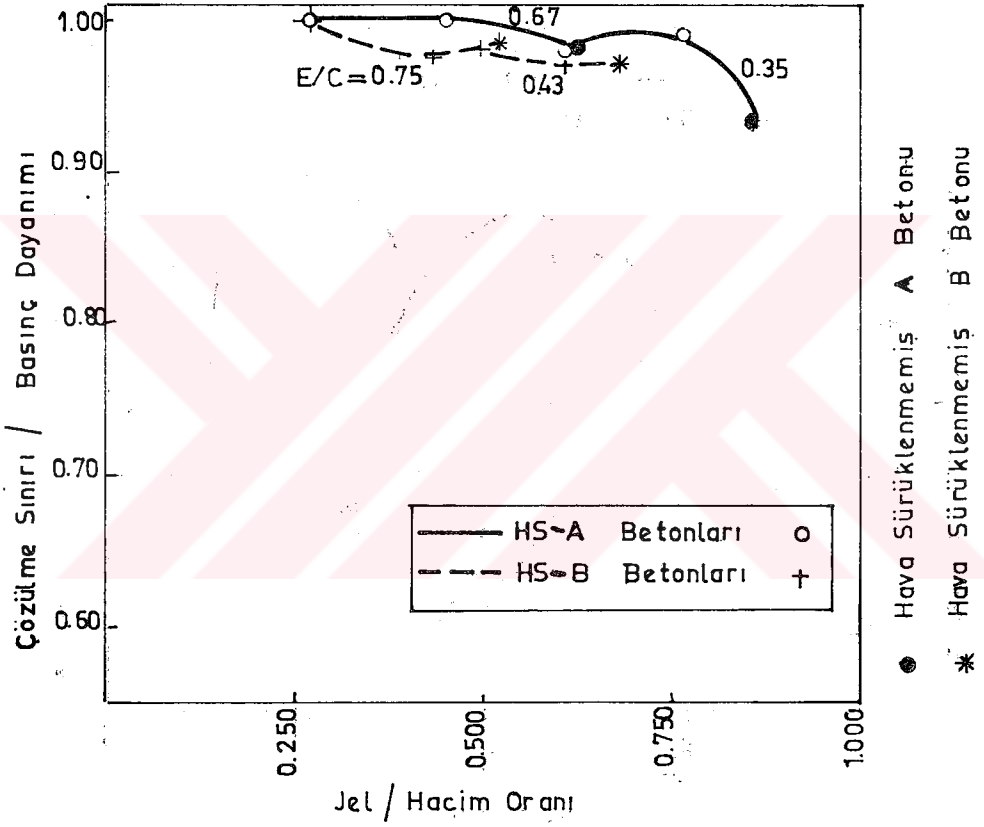
Şekil 3.61

HS Serisi Betonlarında Basmaç Dayanımının
Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



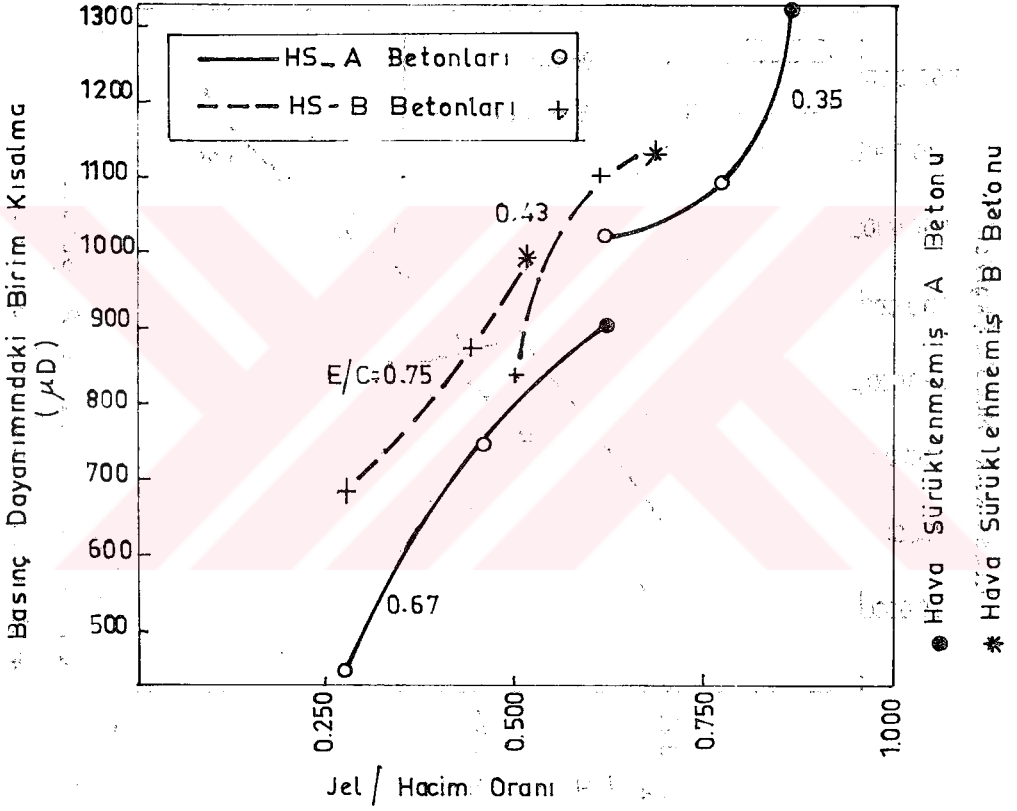
Şekil 3.62

HS Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/
Basınç Dayanımı Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



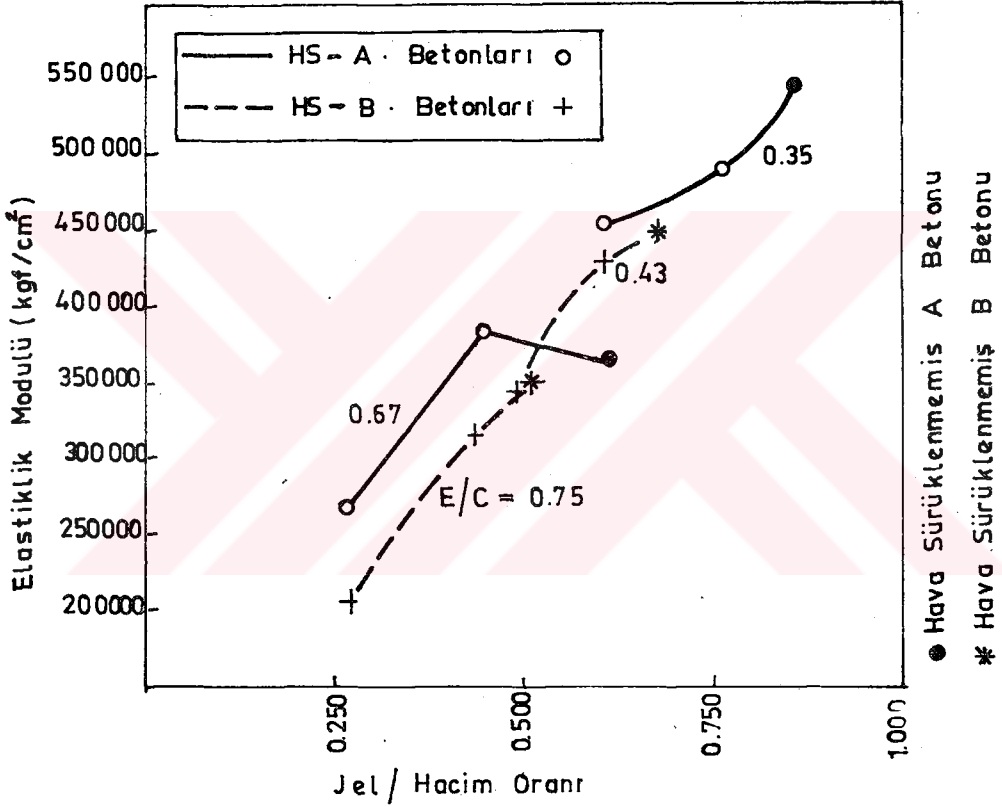
Şekil 3.63

HS Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/Basınc Dayanımı Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



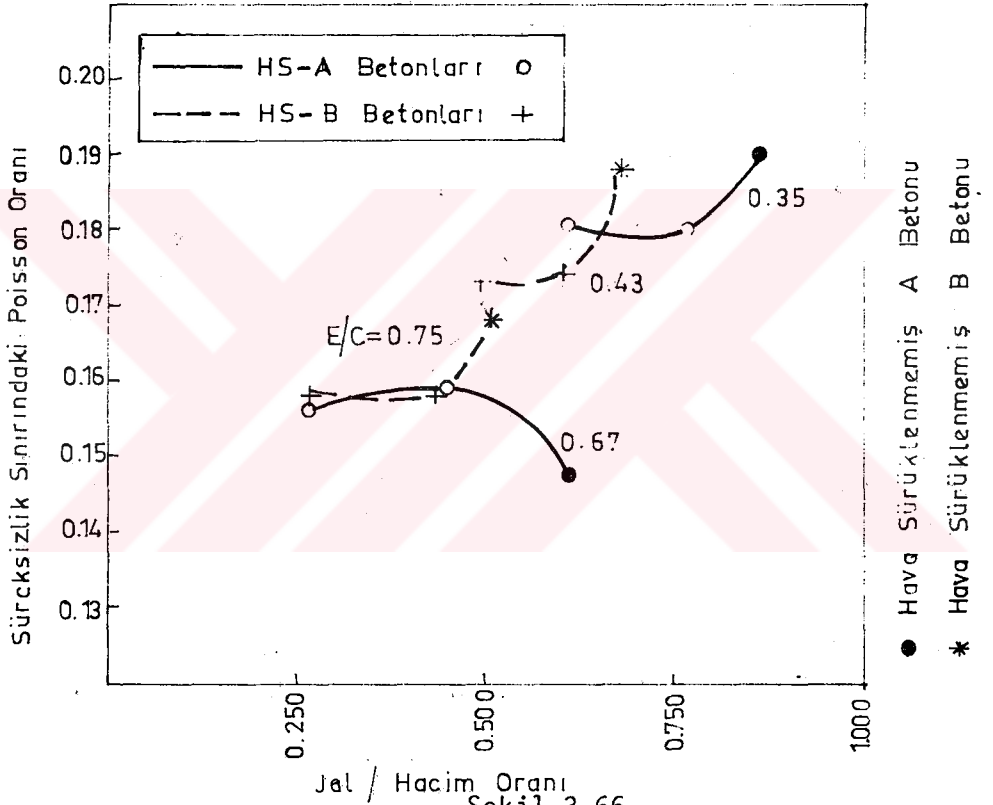
Şekil 3.64

HS Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısalmanın Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi

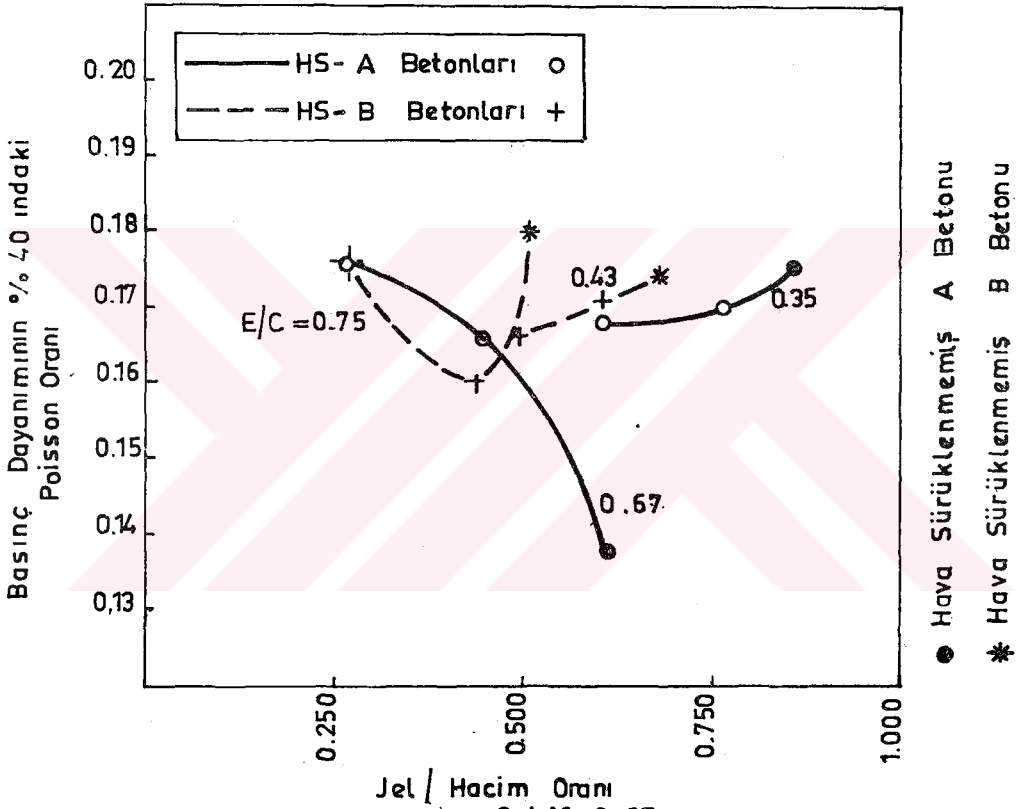


Şekil 3.65

HS Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün Jel/ Hacim Orânına göre Değişimi



Şekil 3.66
HS Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi



Şekil 3.67

HS Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının % 40'ındaki Poisson Oranının Jel/Hacim Oranına Göre Değişimi

3.3. UK Serisi deney sonuçları

UK serisine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 3.68 ilâ Şekil 3.71 de verilmektedir. 3.1 paragrafın - da gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ile ilgili olarak verilen bilgiler burada da geçerlidir. Aynı karışımdaki numuneler arasında karakteristik farklı davranışlar elde edilmişse, burada da bu numunelere ait diyagramlar ayrı ayrı gösterilmiştir.

Tablo 3.6 da UK serisine ait betonların mekanik özellikleri verilmiştir. Bu değerler herbir karışım için 2 ilâ 3 numuneye ait değerlerin ortalamasıdır.

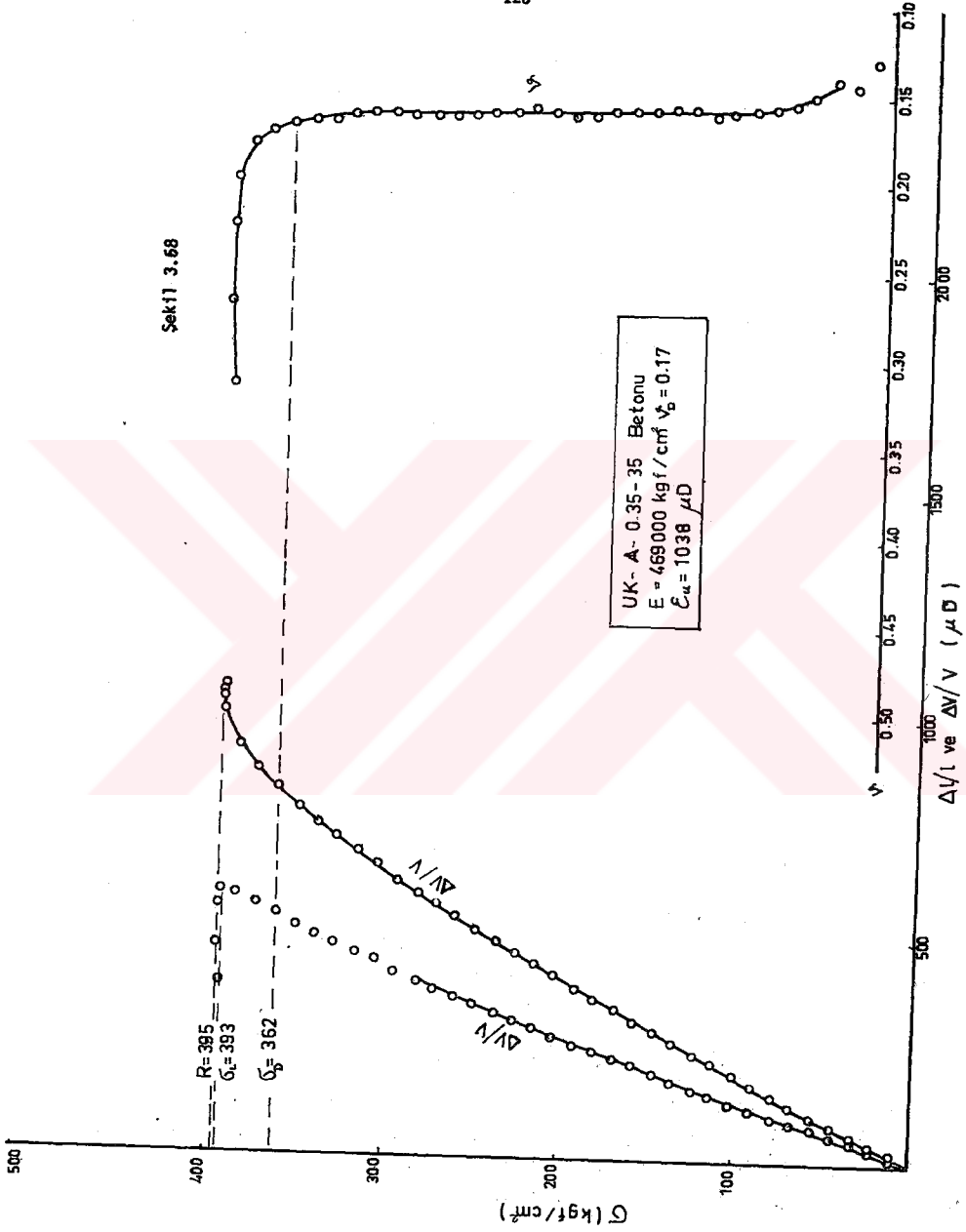
Şekil 3.72 ilâ Şekil 3.80 de ise UK serisine ait betonlarda kritik sınırlar, basınç dayanımları, basınç dayanımındaki birim kısalma ve malzeme sabitleri ile ilgili özelliklerin çimentoyu ikame eden uçucu kül miktarına bağlı olarak değişimi incelenmektedir. Burada da her nokta 2 ilâ 3 numunenin ortalamasına aittir.

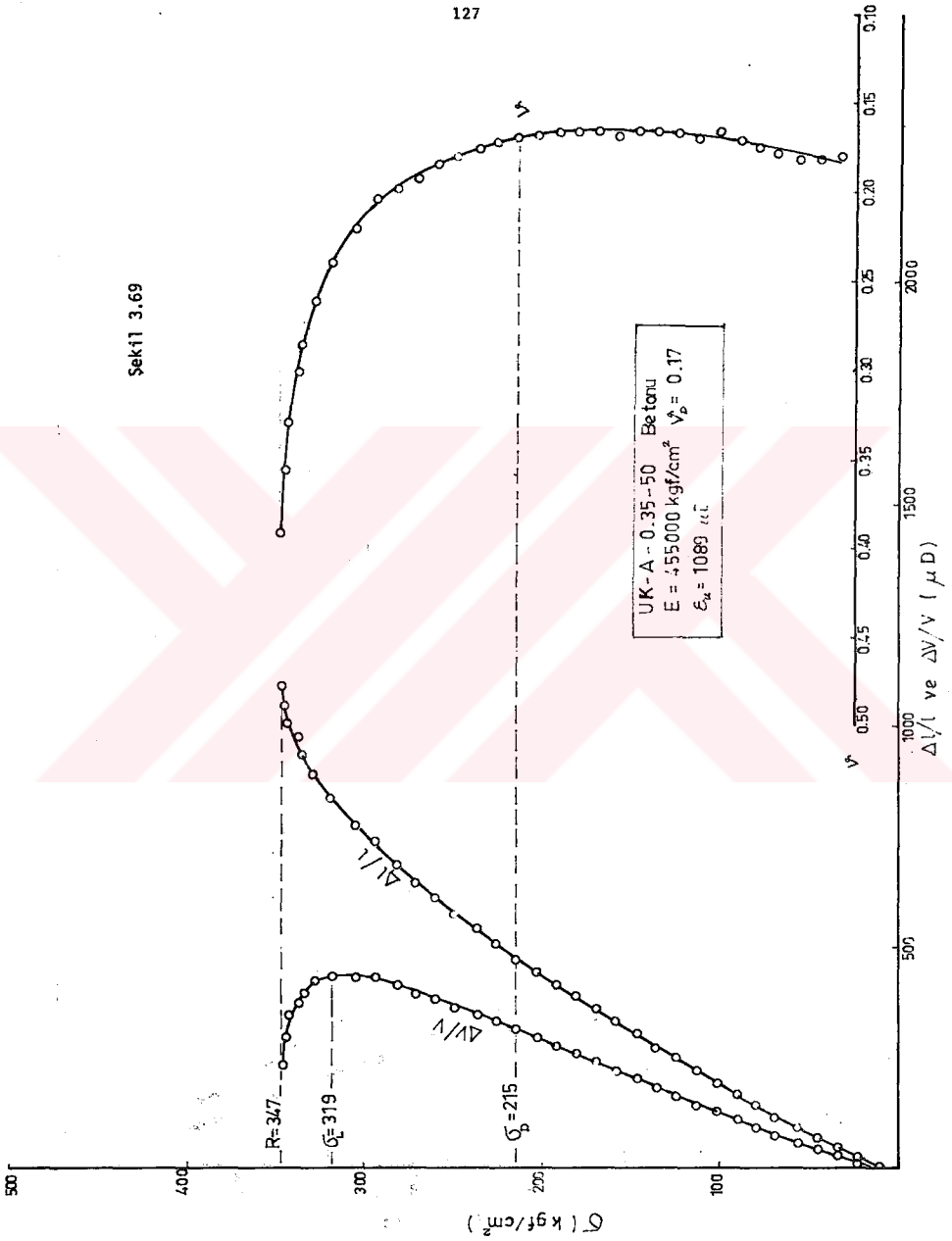
3.4. KF Serisi deney sonuçları

KF serisine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 3.81 ve Şekil 3.82 de verilmektedir. 3.1. paragrafında gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ile ilgili olarak verilen bilgiler burada da geçerlidir.

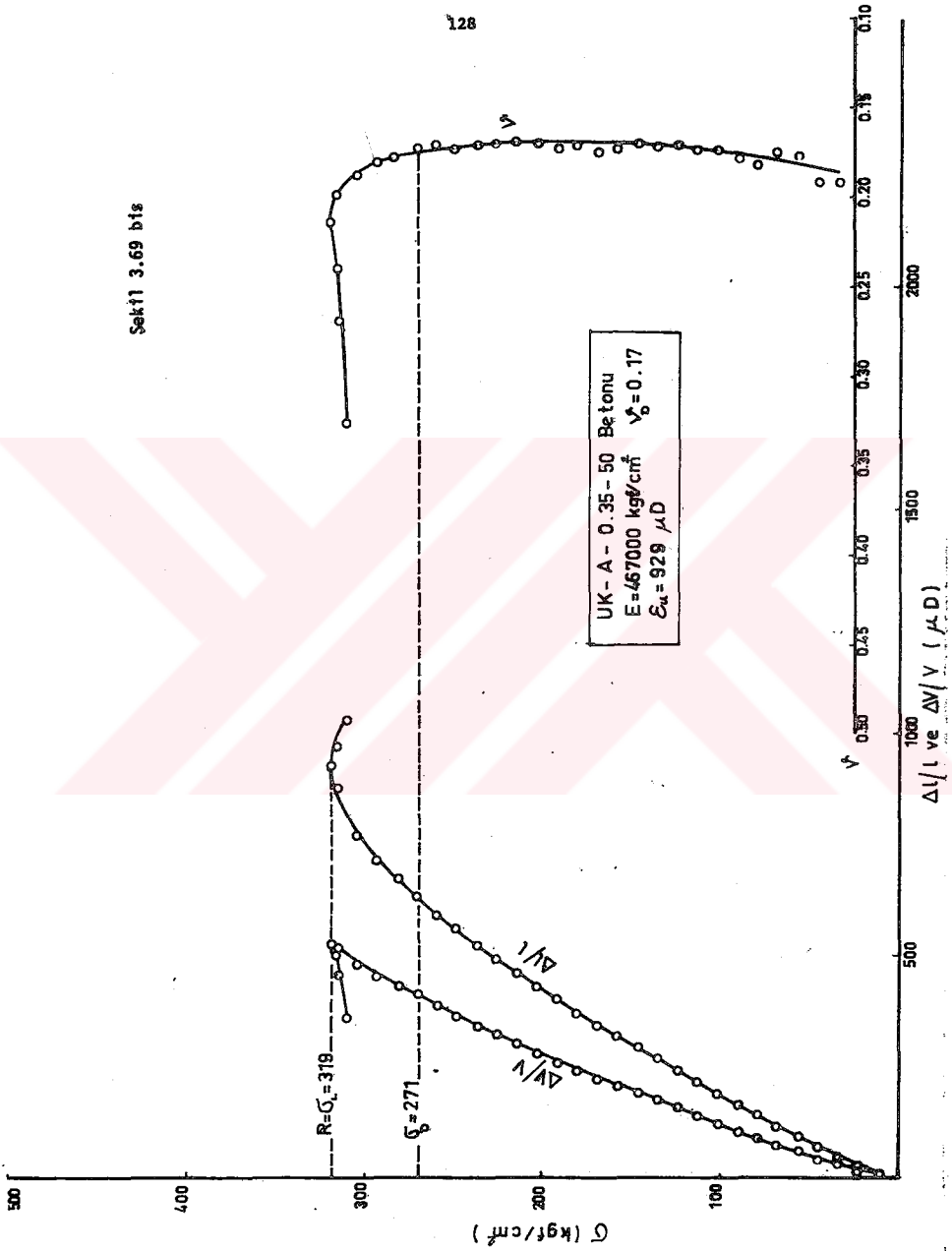
Tablo 3.7 de KF serisine ait betonların mekanik özellikleri verilmiştir. Bu değerler herbir karışım için 2 numuneye ait değerlerin ortalamasıdır.

Şekil 3.83 ilâ Şekil 3.91 de ise KF serisine ait betonlarda kritik sınırlar, basınç dayanımları, basınç dayanımındaki birim kısalma ve malzeme sabitleri ile ilgili özelliklerin çimentoyu ikame eden kalker filleri miktarına bağlı olarak değişimi incelenmektedir. Grafiklerdeki her nokta 2 numunenin ortalamasına aittir.

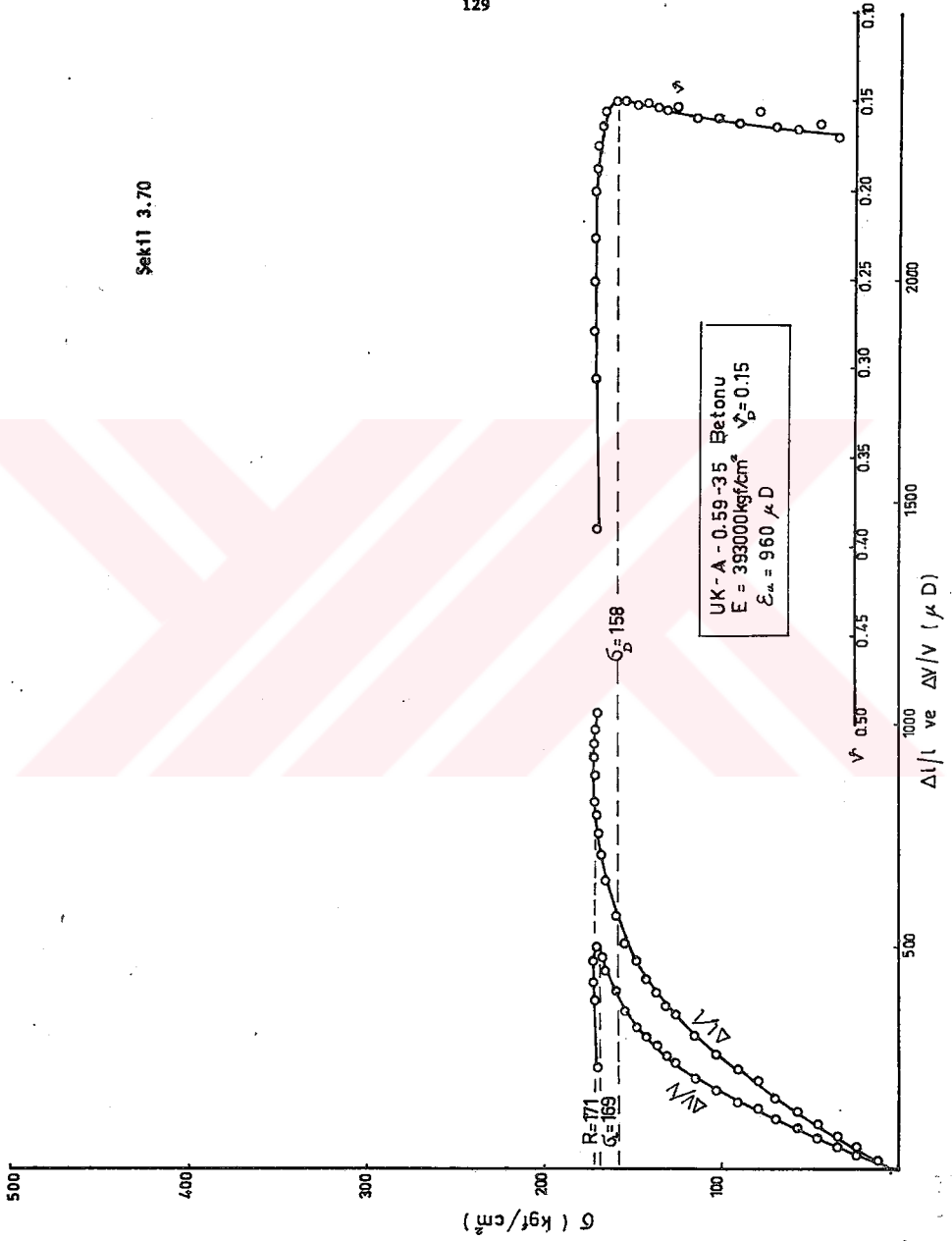




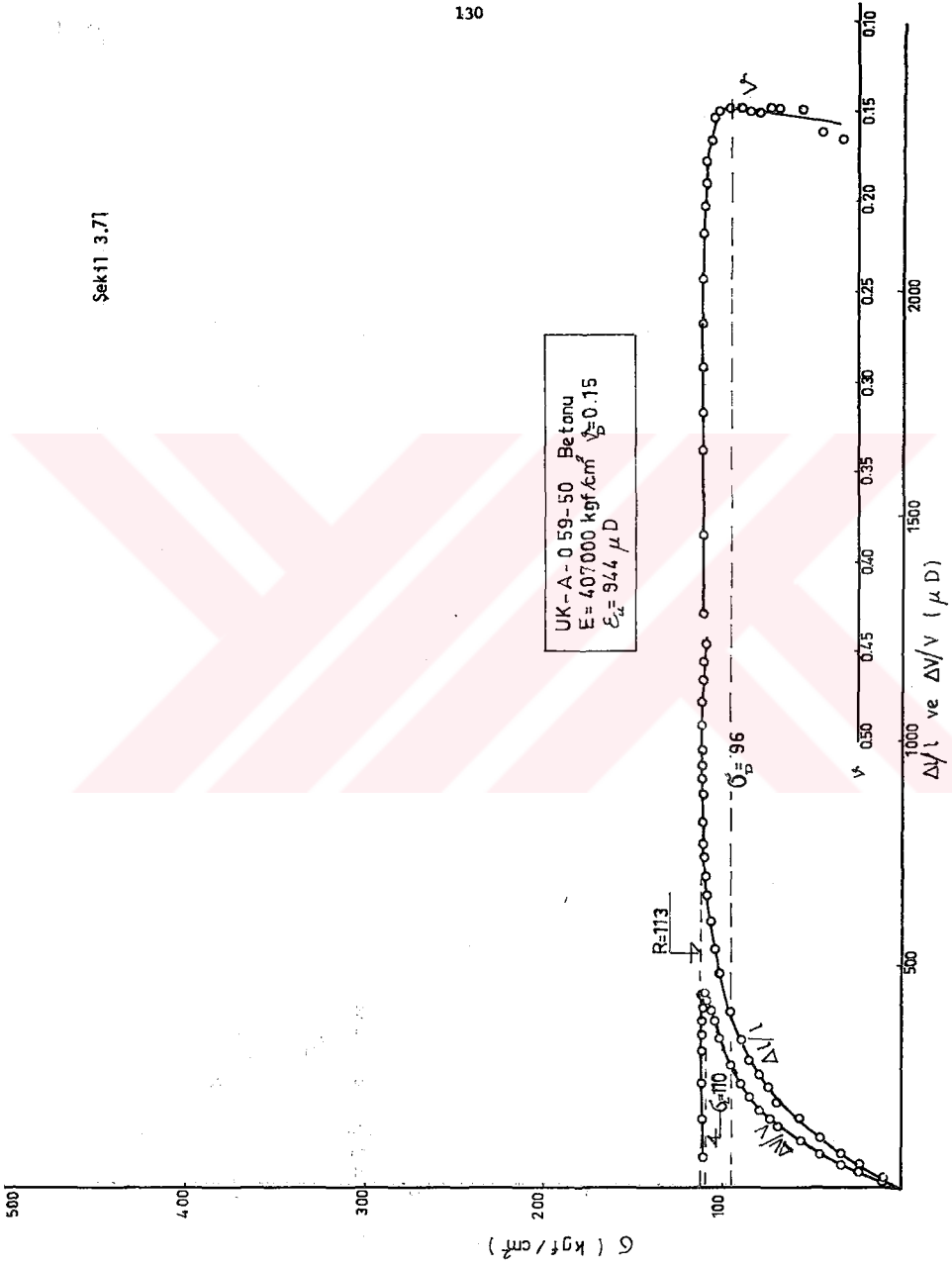
Sekt 3.69 b1s



Sekt11 3.70



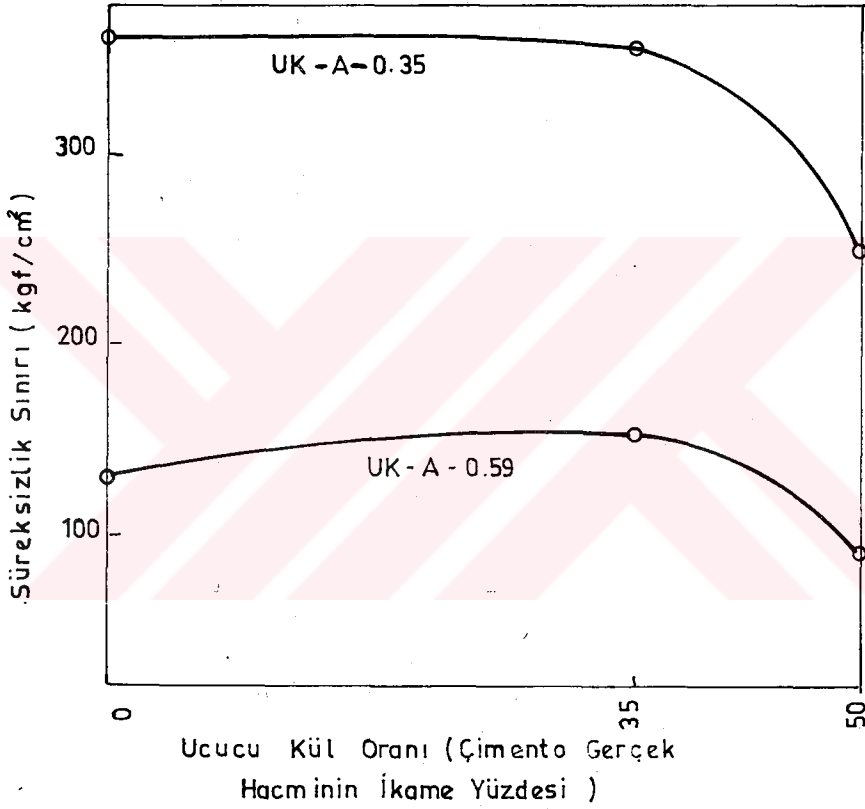
Sekt 3.71



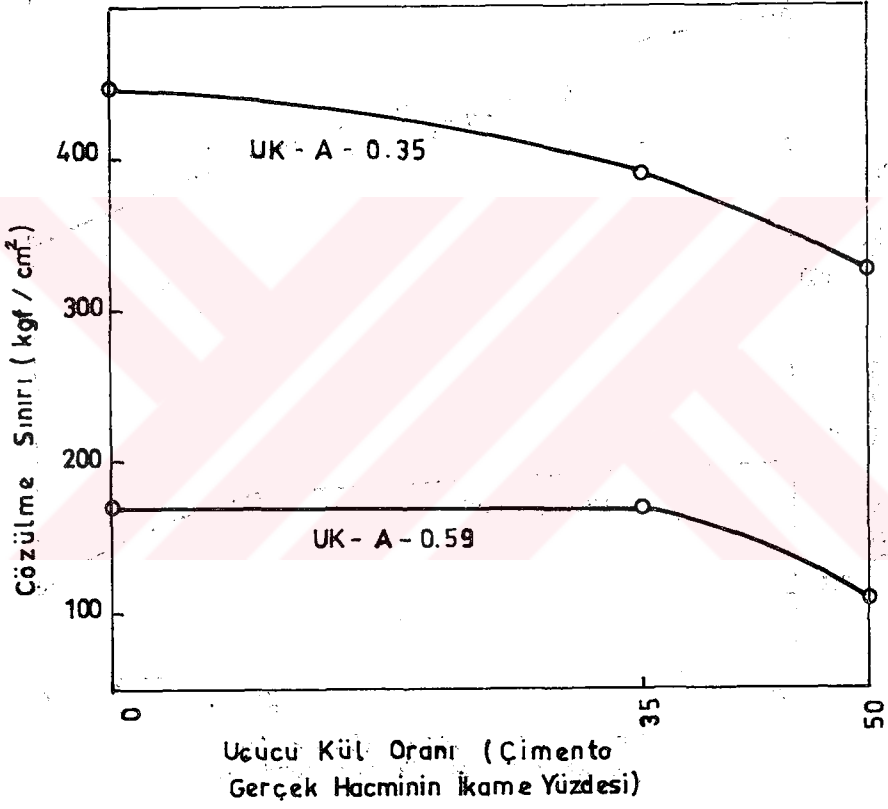
TABLO 3.6

UK Serisi Betonlarının 180 günlük Mekanik Özellikleri

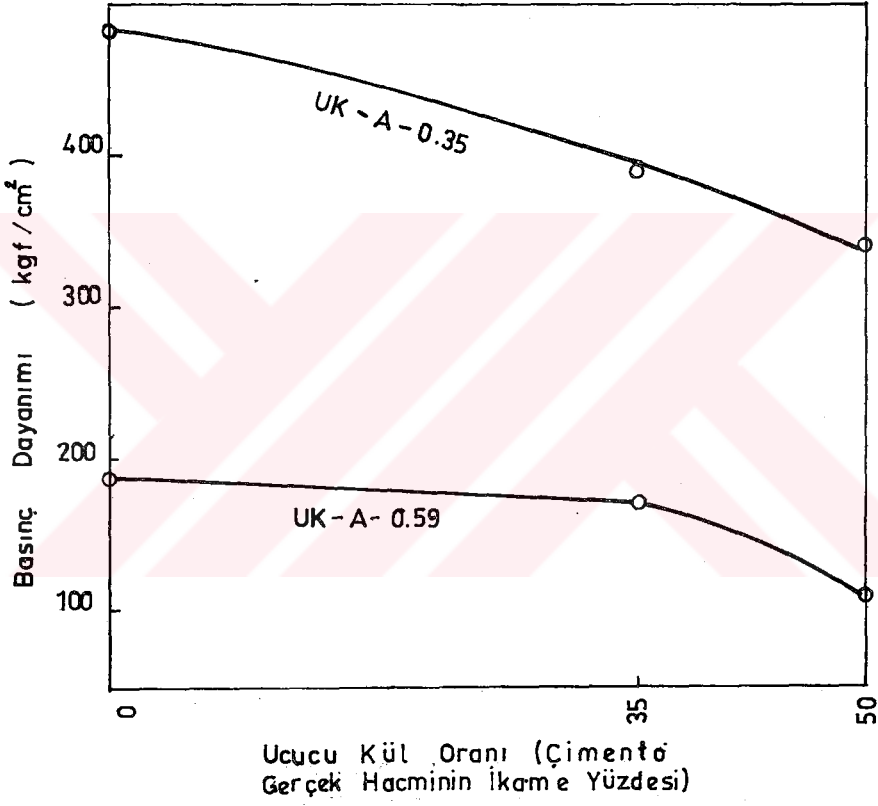
Karışım	Süreksizlik sınırı (kgf/cm ²)	Çözülme sınırı (kgf/cm ²)	Basınç dayanımı (kgf/cm ²)	Basınç da- yanımında- ki birim kısılma(μ D)	Elastiklik modülü (kgf/cm ²)	Süreksiz- lik sınırı rındaki Poisson O.	Basınç dayanımının % 40 ındaki Poisson Or.
UK-A-0.35-35	356	389	390	1054	494.000	0.175	0.158
UK-A-0.35-50	249	325	338	1003	461.000	0.180	0.176
UK-A-0.59-35	152	168	170	1010	393.000	0.150	0.161
UK-A-0.59-50	88	108	110	906	383.000	0.156	0.159



Şekil 3.72
UK-A Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının Değişimi

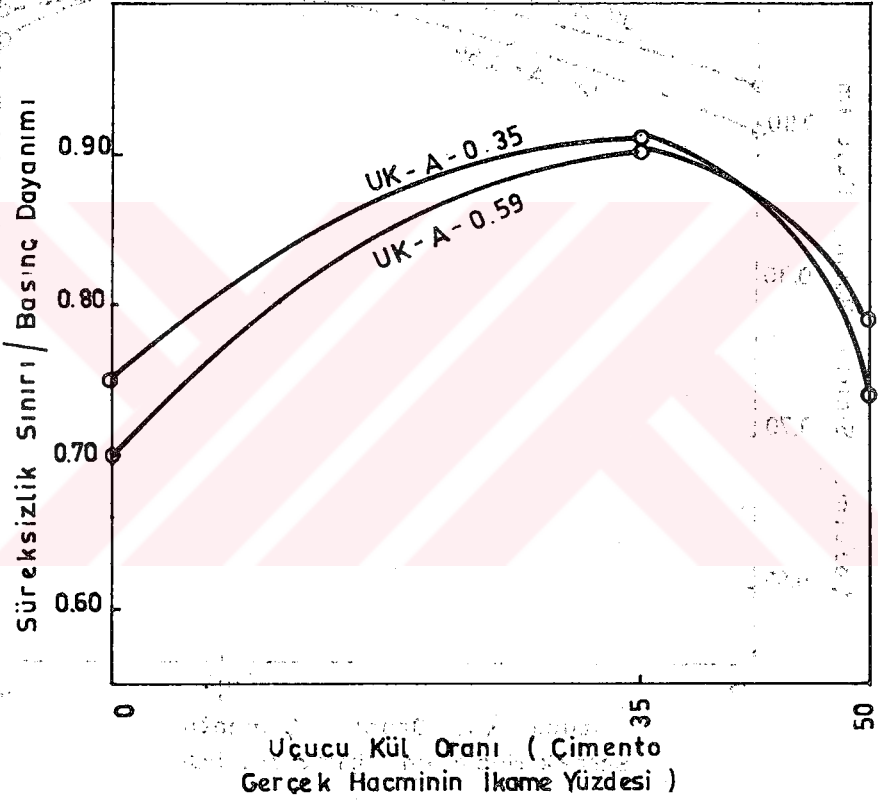


Şekil 3.73
UK-A Serisi Betonlarında Çözölme Sınırının
Değişimi



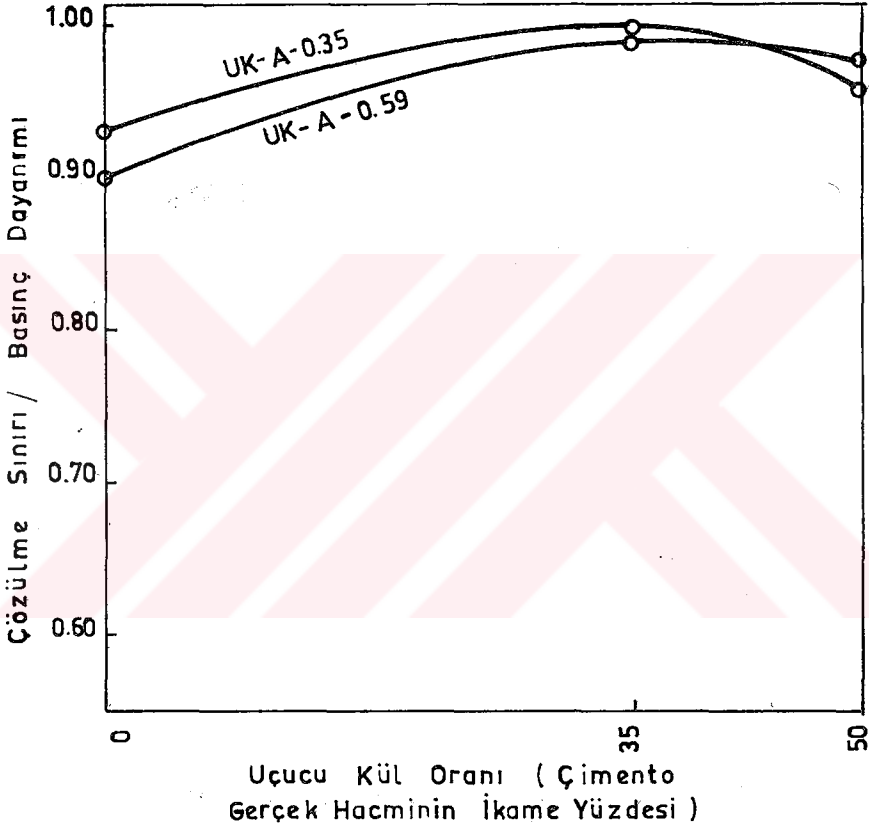
Şekil 3.74

UK-A Serisi Betonlarında Basma Dayanımının Değişimi



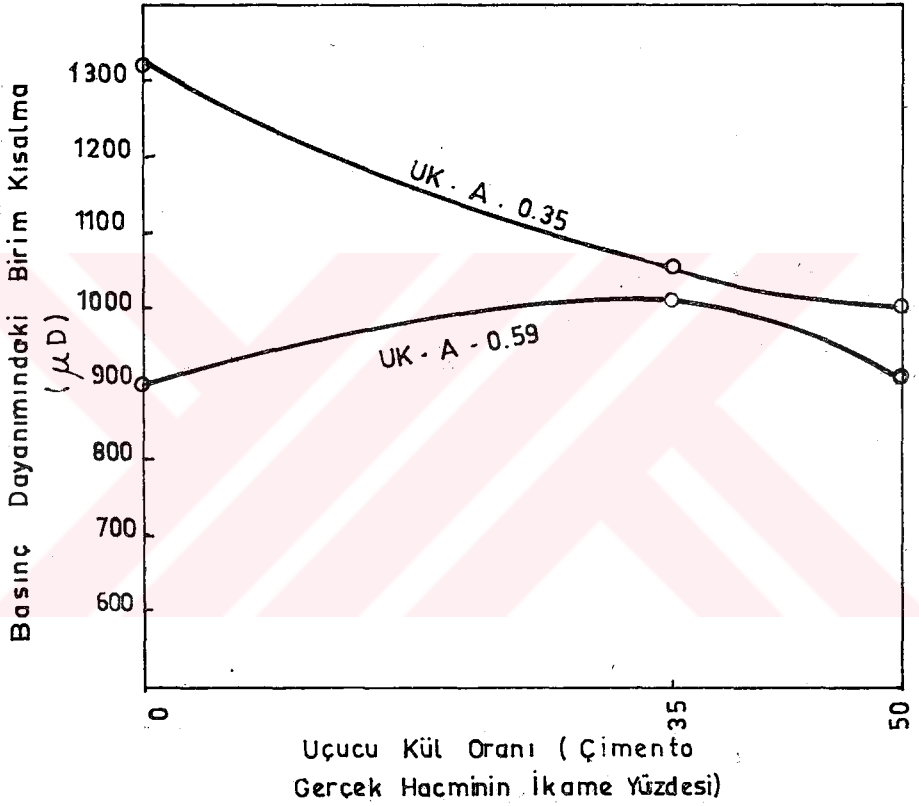
Şekil 3.75

UK-A Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/
Basınc Dayanımı Oranının Değişimi



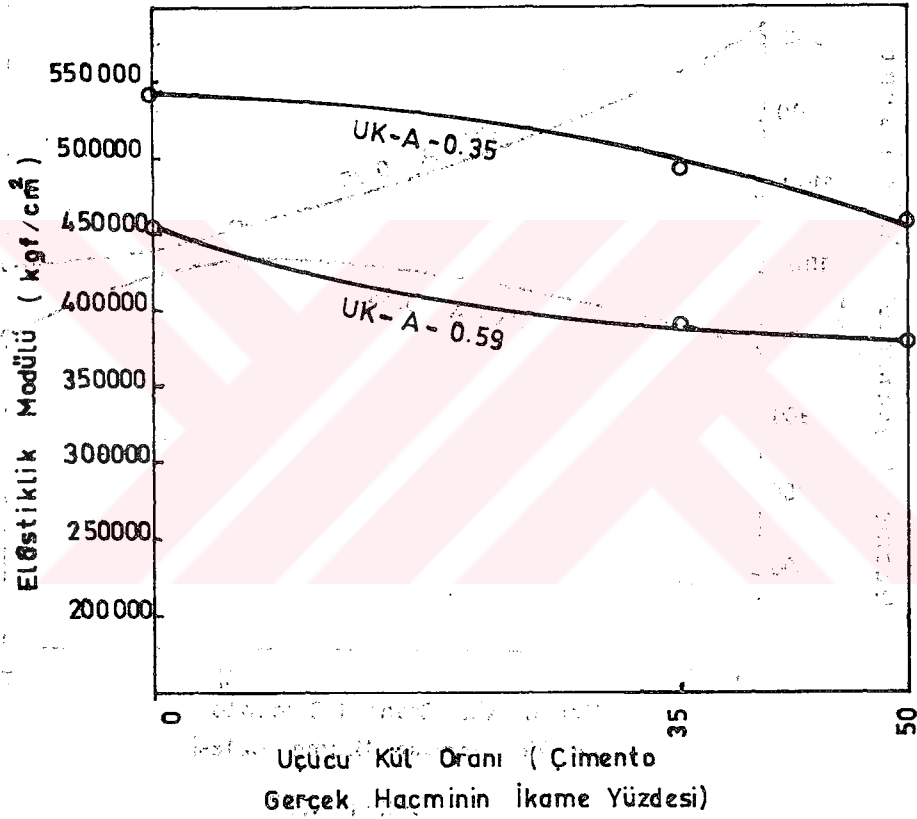
Şekil 3.76

UK-A Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Değişimi



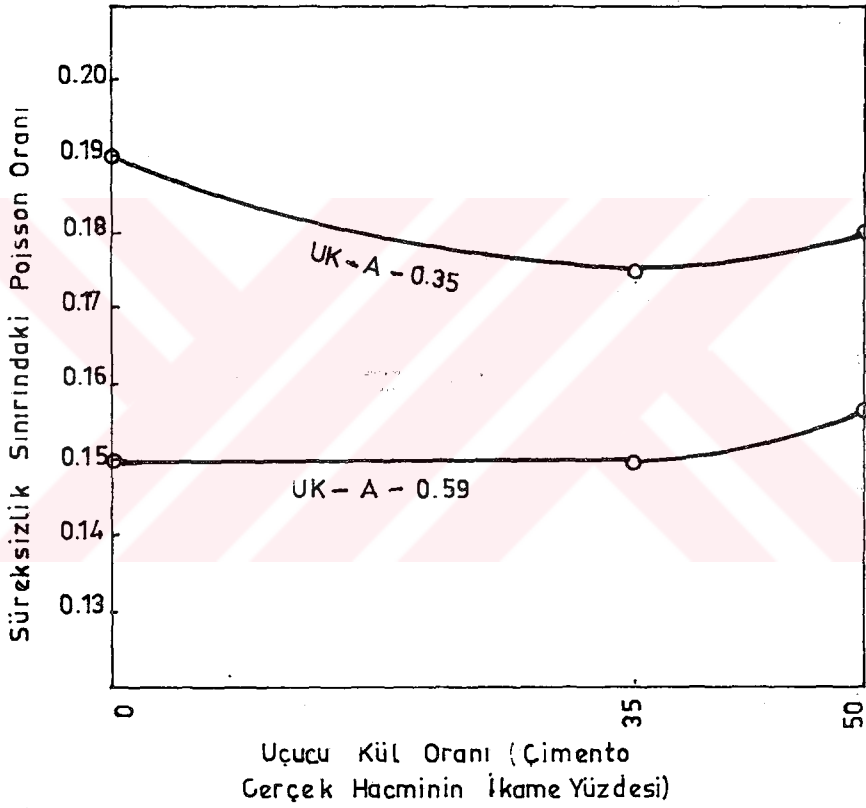
Şekil 3.77

UK-A Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Değişimi



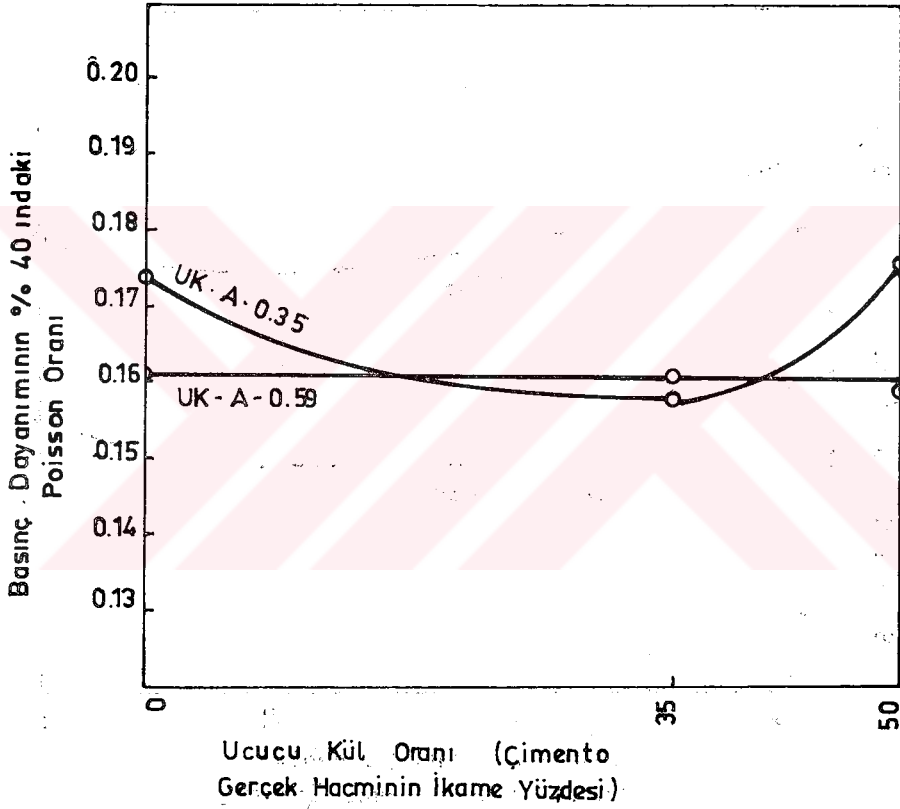
Şekil 3.78

UK-A Serisi Betonlarında Elâstiklik Modülünün Değişimi



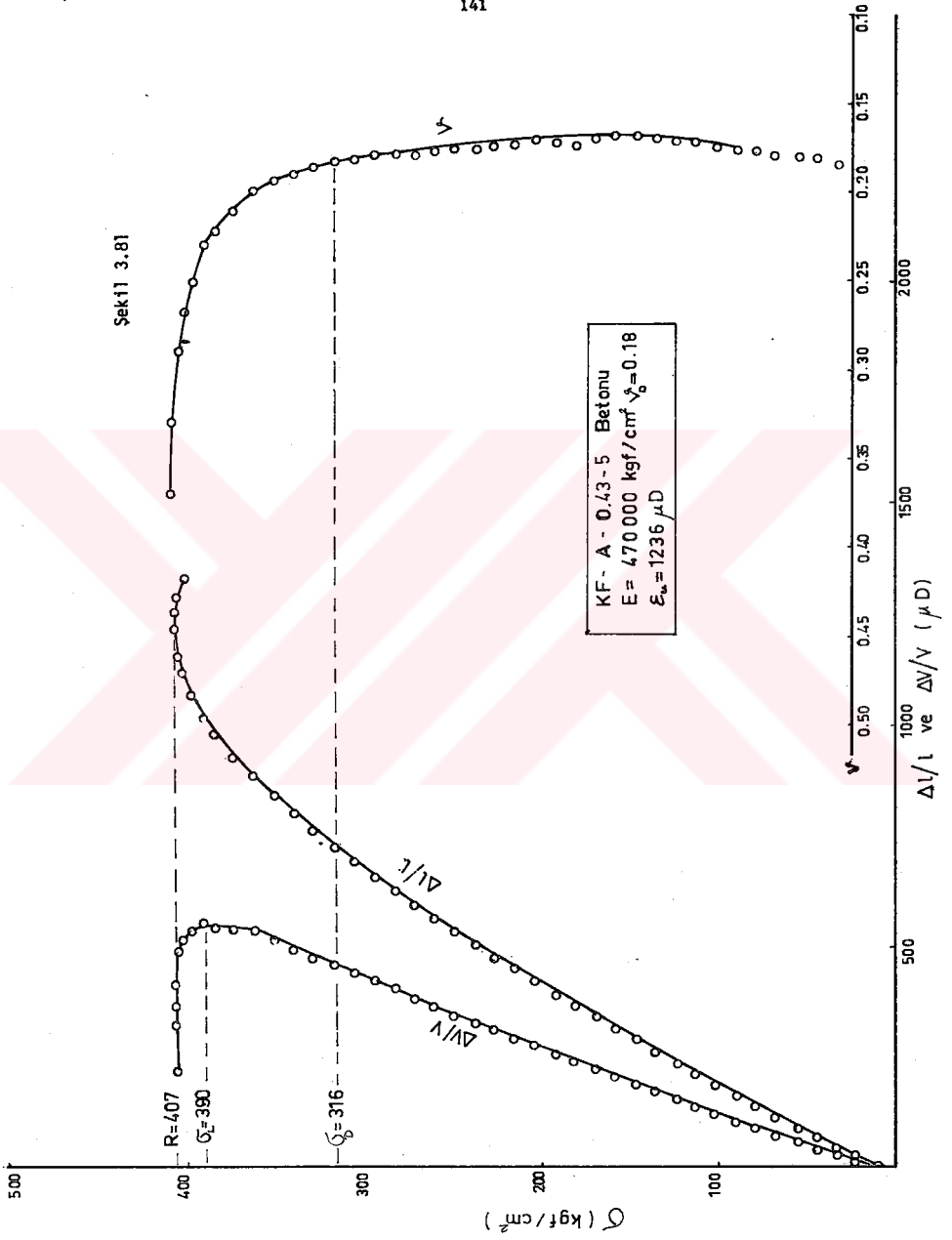
Şekil 3.79

UK-A Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Değişimi

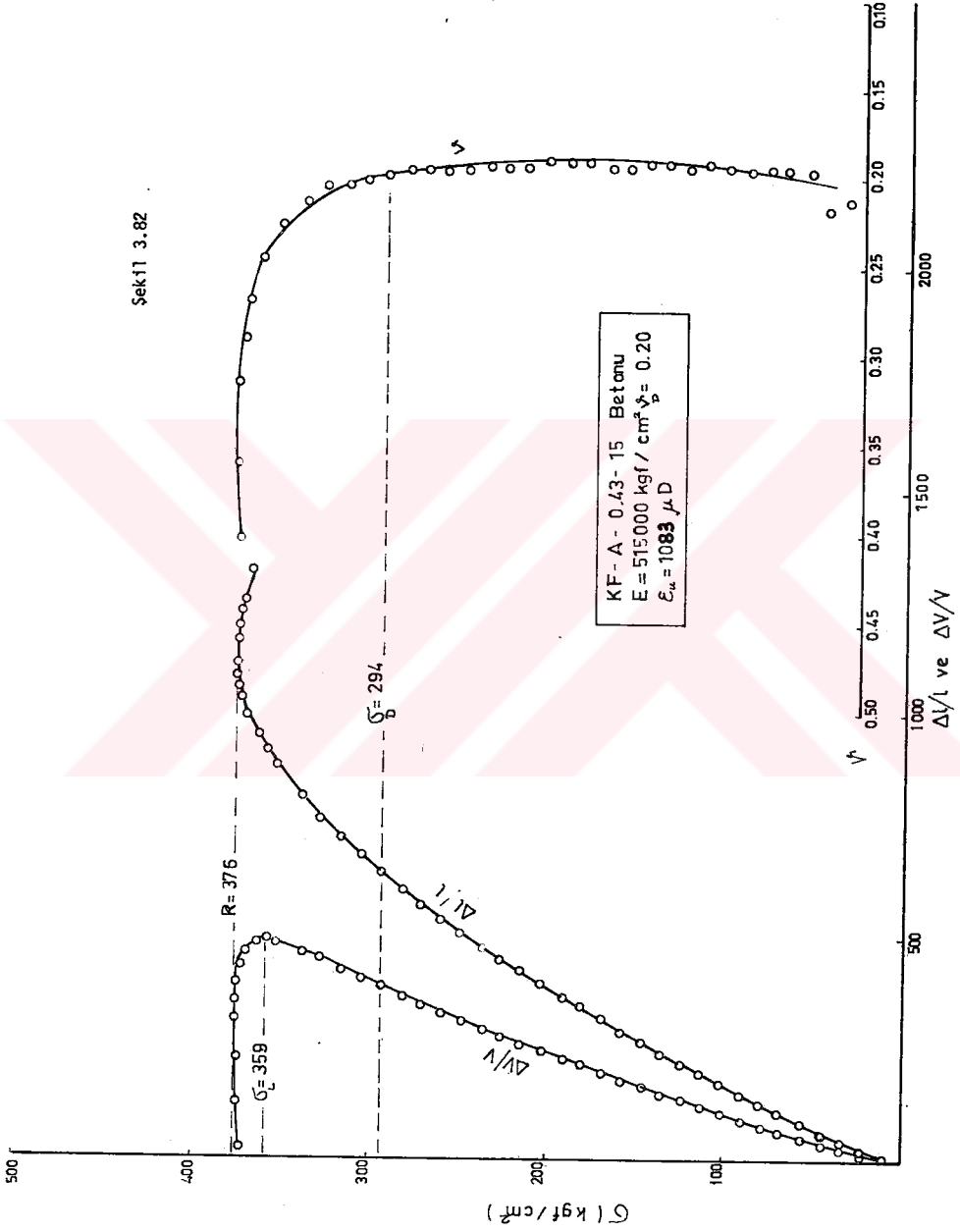


Şekil 3.80

UK-A Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının
% 40'ındaki Poisson Oranının Değişimi



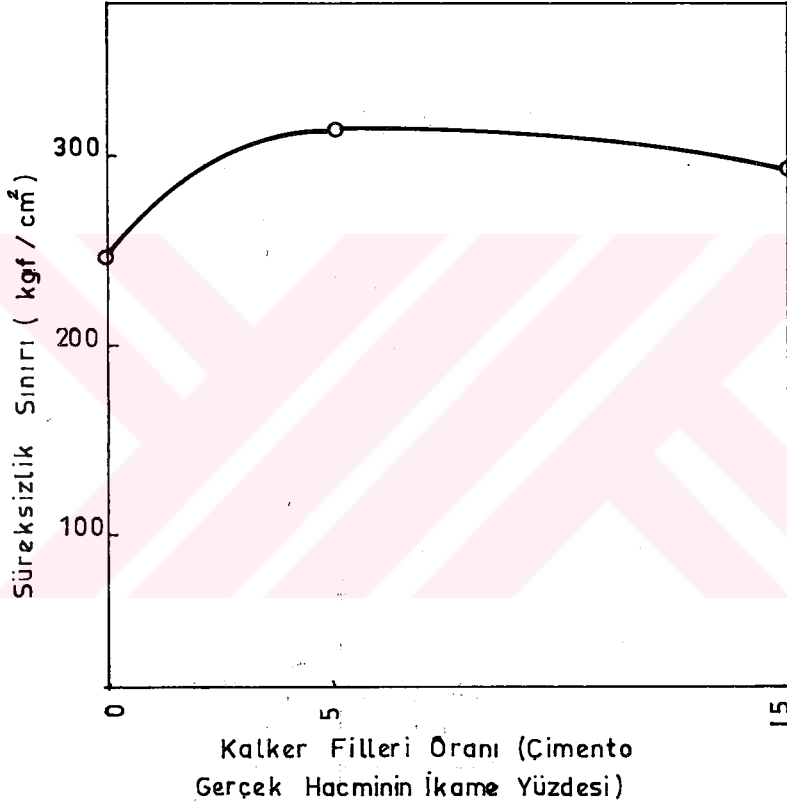
Sekt'11 3.82



TABLO 3.7

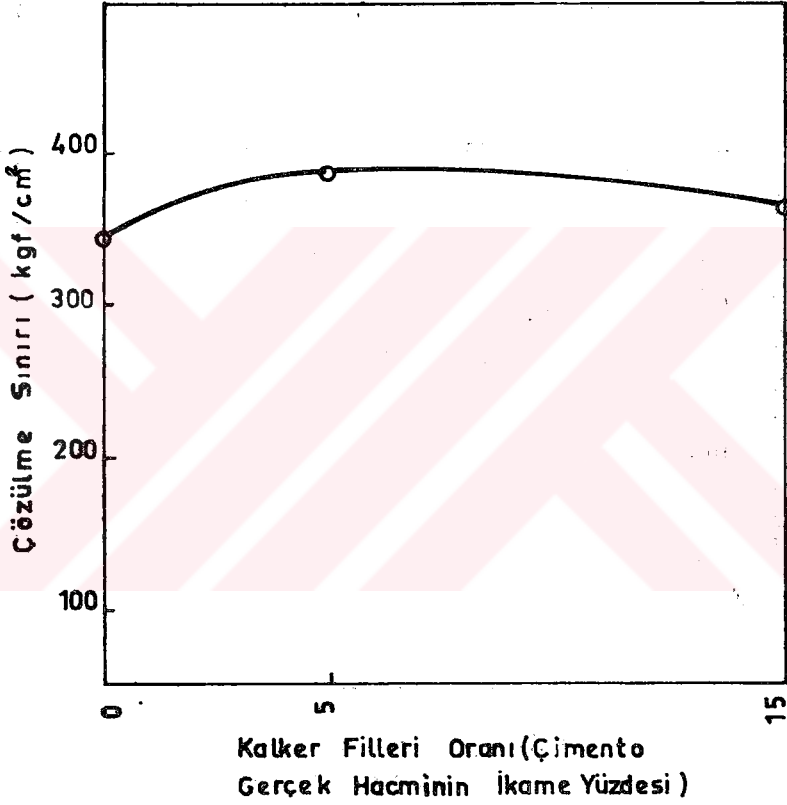
KF Serisi Betonlarının 180 günlük Mekanik Özellikleri

Karışım	Süreksizlik sınırı (kgf/cm ²)	Çözülme sınırı (kgf/cm ²)	Basınç dayanımı (kgf/cm ²)	Basınç dayanımındaki birim kısalma (μD)	Elastiklik modülü (kgf/cm ²)	Süreksizlik sınırındaki Poisson oranı	Basınç dayanımının %40 ındaki Poisson oranı
KF-A-0.43- 5	316	387	404	1220	483.000	0.188	0.176
KF-A-0.43-15	294	364	382	1162	502.000	0.191	0.186



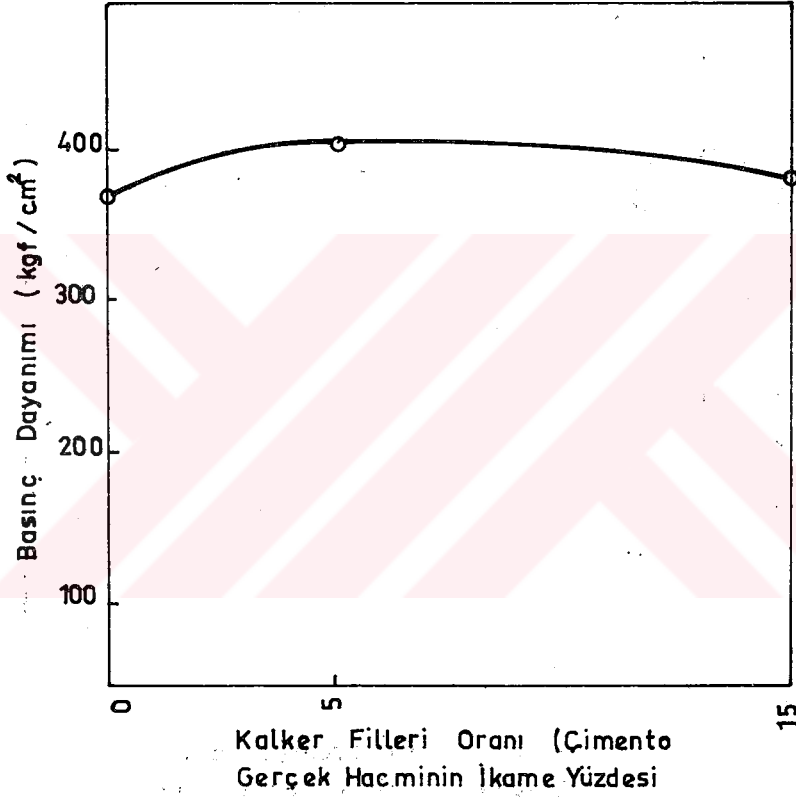
Şekil 3.83

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırının Değişimi



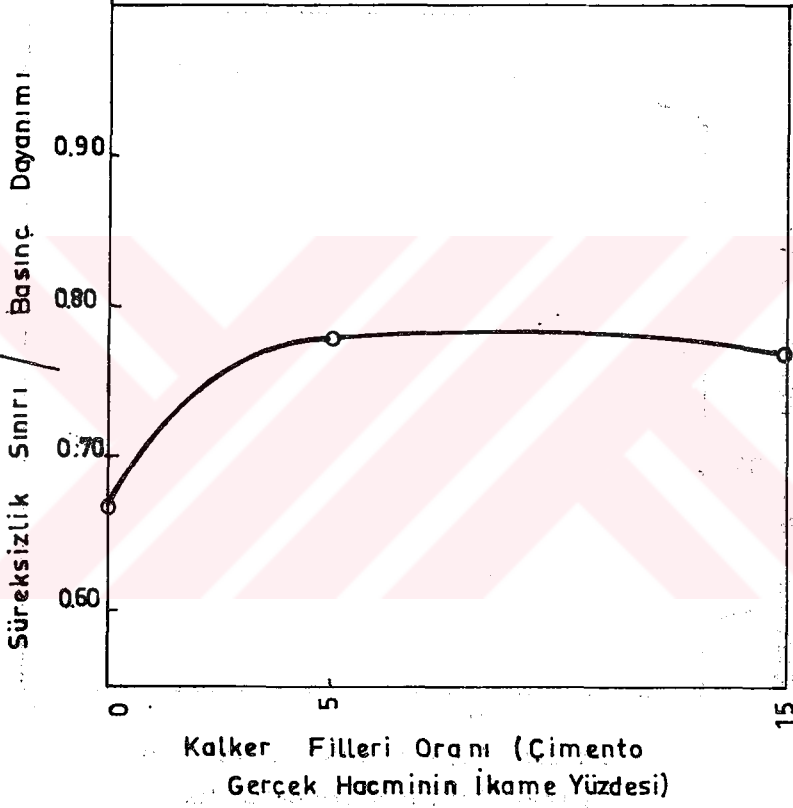
Şekil 3.84

KF-A- 0.43 Serisi Betonlarında Çözölme Sınırının Değişimi



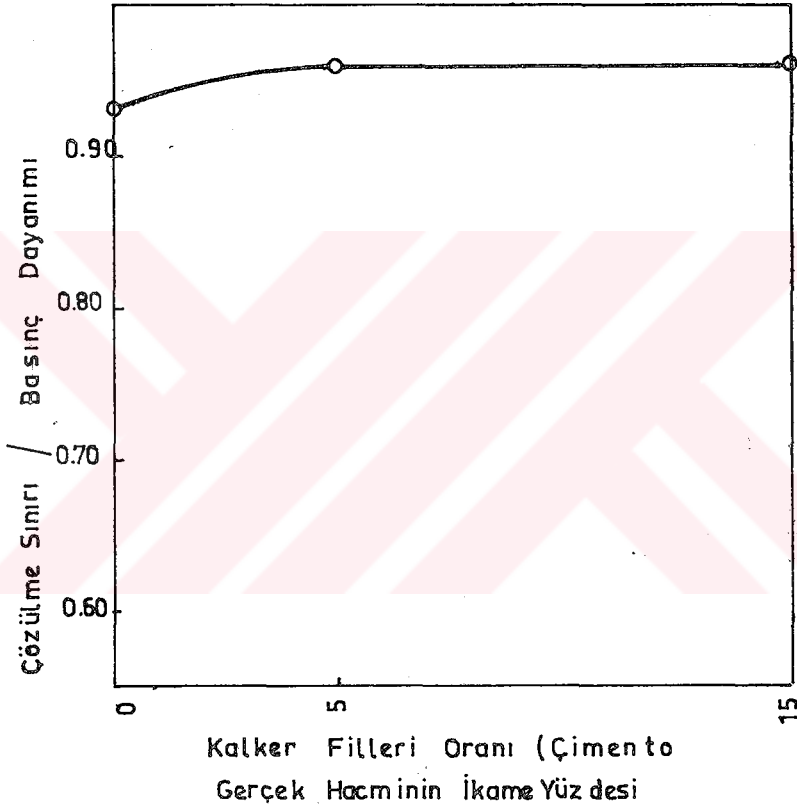
Şekil 3.85

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Basınç
Dayanımının Değişimi



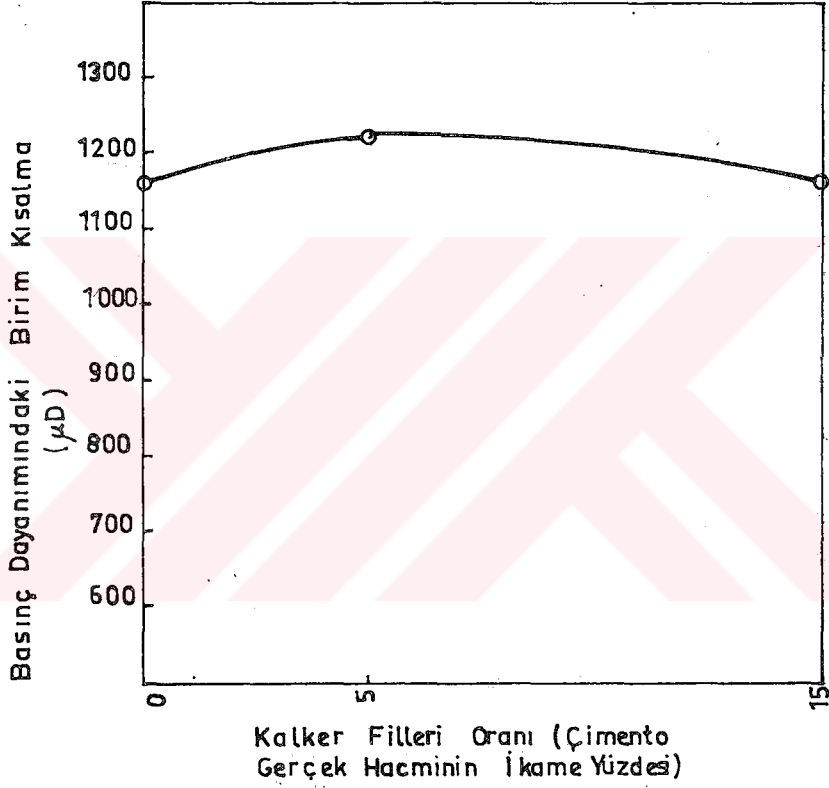
Şekil 3.86

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Değişimi



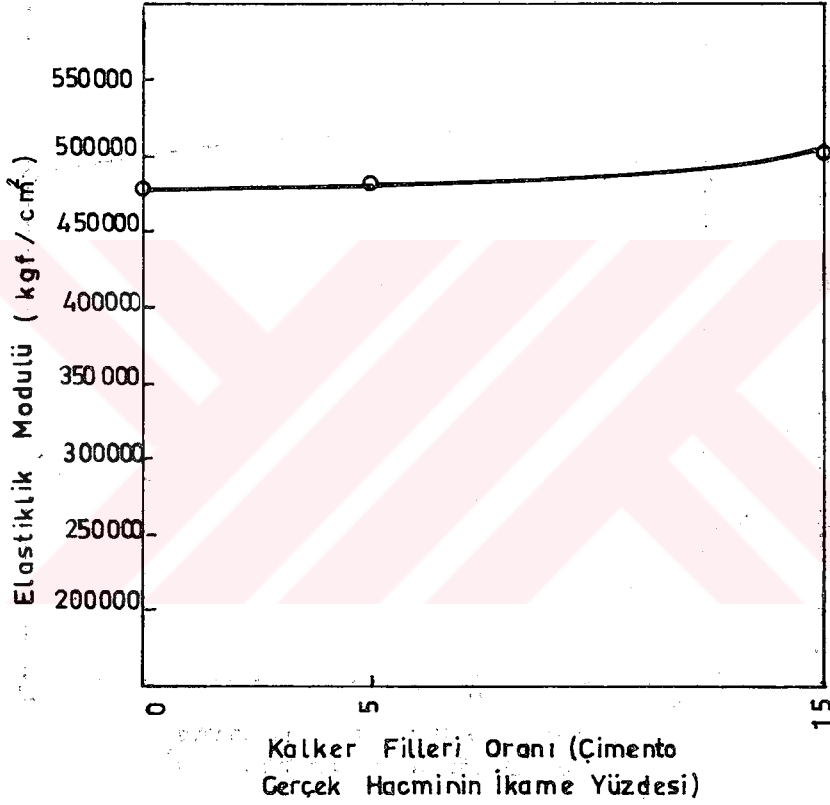
Şekil 3.87

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı Oranının Değişimi



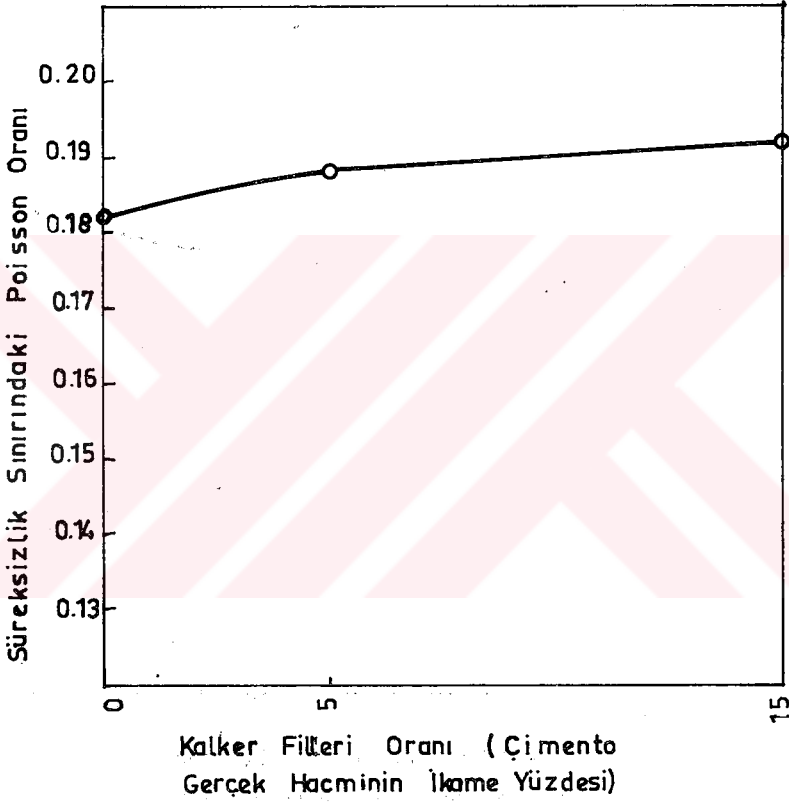
Şekil 3.88

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Basınç Dayanımındaki Birim Kısılmanın Değişimi



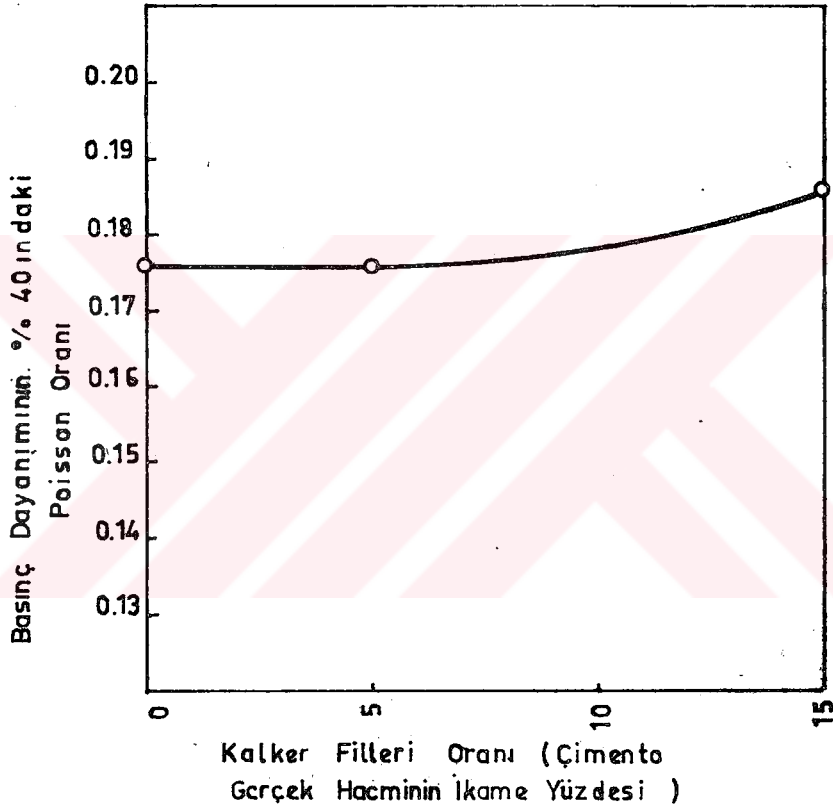
Şekil 3.89

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Elastiklik Modülünün Değişimi



Şekil 3.90

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Süreksizlik Sınırındaki Poisson Oranının Değişimi



Şekil 3.91

KF-A-0.43 Serisi Betonlarında Basınç Dayanımının
% 40'ındaki Poisson Oranının Değişimi

BÖLÖM IV

DENEY SONUÇLARININ İNCELENME VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde Bölüm III de verilen deney sonuçları, denen beton serileri ayrı ayrı ele alınarak ayrıntılı bir şekilde incelenip değerlendirilmektedir. Her serinin incelenmesinden sonra bu seride varılan sonuçlar ayrı birer paragraf halinde özetlenmiştir.

Bölümün sonunda, varılan sonuçlar tümüyle ele alınarak, bağlayıcı hamurun yapısının betonun basınç altındaki kısa süreli inelastik davranışındaki işlevinin belirlenmesine çalışılmıştır.

4.1. E/C Serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi

Bölüm II de daha önce ayrıntılı olarak belirtildiği gibi, bu seride, bütün özellikleri (cins, granülometri, beton içinde kaplanan gerçek hacim) aynı olan agregaları birbirine bağlayan hamurun Su/Çimento oranı değiştiğinde, ortaya çıkan betonların inelastik davranışlarındaki değişiklikler incelenmiştir. İncelemeler A ve B diye adlandırılan 2 ayrı agrega granülometrisine sahip beton grubunda yapılmıştır. Her grupta 7 Su/Çimento oranında beton üzerinde deneyler yürütülmüştür.

Bu seriye ait deney sonuçlarının incelenmesine gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini gözönüne alarak başlatalım.

Şekil 3.1 ilâ Şekil 3.14 de bu seriye ait betonlarda, gerilmeye göre birim kısalma ($\Delta l/l$), Poisson oranı (ν), ve hacımsal birim şekildeğiştirme ($\Delta V/V$) nin değışimleri verilmektedir. Bu eğriler arasında hacımsal birim şekildeğiştirme eğrisinin karakteristik değışimler gösterdiği görülmektedir. Bölüm I de etraflıca açıklandığı gibi bu eğrinin maksimumdan geçtiğı gerilme değeri, betonda "çözölme sınırı" na karşı gelmektedir. E/C-A serisi betonlarına ait hacımsal birim şekildeğiştirme eğrileri incelendiğinde, çözölme olayının Su/Çimento oranı 0.51 e kadar (Jel/Hacim oranı 0.713) olan betonlarda belirli bir şekilde var olduğı, daha yüksek Su/Çimento oranlarında bu olayın yavaş yavaş kaybolduğı ve nihayet Su/Çimento oranının 0.75 değeriinde (Jel/Hacim oranı 0.580) çözölme olayının hemen hemen bütünölle ortadan kalkıp, pratik olarak betonda hacim genişlemesi başlamasıyla kısa süreli basınç yükleri altında dayanımın kaybolma - sının aynı gerilme değeriinde olduğı görölmektedir (Şekil 3.7). Buradan, çözölme olayının var olması için hamurun Jel/Hacim oranının belli bir değeriinden büyük olması gerektiğı sonucu çıkarılabilir.

E/C-B serisi betonlarında ise biraz daha değışik durumlarla karşılaşıyoruz. Bu seride Jel/Hacim oranı en yüksek (0.826) olan E/C-B-0.27 betonunda çözölme olayı çok belirsiz olarak görölüyor (Şekil 3.8). Jel/Hacim oranı biraz daha düşük (0.760) olan E/C-B-0.35 betonunda ise iki ayrı numunede çok farklı iki davranışla karşılaşıyoruz (Şekil 3.9 ve Şekil 3.9 bis.). Birinci numunede (Şekil 3.9) çözölme olayı çok belirsiz olmasına rağmen ikinci numunede (Şekil 3.9 bis.) çok belirli olarak ortaya çıkmaktadır. Şimdi bu 2 numuneye ait eğrileri biraz daha yakından ince - leylim. Bunun için önce 2 numuneye ait karakteristik mekanik özellikleri aşğıdaki tabloda toplayalım :

	Çözülme olayı çok Belirsiz numune	Çözülme olayı Belirli numune
Çözülme sınırı (kgf/cm^2)	390	395
Basınç dayanımı (kgf/cm^2)	395	435
Çözülme sınırındaki birim hacımsal şekildeğiştirme (μD)	618	496
Çözülme sınırındaki birim kısalma (μD)	1078	982
Basınç dayanımındaki birim kısalma (μD)	1204	1287

İlk dikkati çeken husus, basınç dayanımlarının belirli derecede farklı olmasına rağmen, çözülme sınırlarının hemen hemen eşit olmalarıdır. Bu durum 2 numunenin davranışları arasındaki başlıca farkın çözülme sınırından sonra olduğunu düşündürmektedir. Buna göre birinci numunede çözülme olayının hemen arkasından kırılma meydana gelmekte, ikincisinde ise kırılmanın meydana gelmesi daha gecikmektedir. Çözülme sınırındaki ve basınç dayanımındaki birim kısaltmaların farklarının incelenmesi de bu düşüncüyü doğrulamaktadır : birinci numunede bu fark $1204 - 1078 = 126\mu\text{D}$ dur; ikincisinde ise $1287 - 982 = 305\mu\text{D}$ olup bu numunede çözülmeden sonra kırılmanın daha çok geciktiğini göstermektedir.

Ancak başka mekanik karakteristiklerin incelenmesi çözülme sınırına varılmadan önce de iki numune arasında bazı davranış farklarının bulunduğunu ortaya koymaktadır. Çözülme sınırındaki birim hacımsal şekildeğiştirme ve bu sınırdaki birim kısalma, çözülme olayı belirli olan numunede önemli derecede daha azdır. Yani, daha açık deyişle, çözülme olayının belirli olarak meydana geldiği numune basınç yükleri altında daha az bir hacımsal sıkışmadan sonra genişlemeye başlamakta ve bu genişleme olayı daha uzun süre devam etmektedir; diğer numunede tersi durum vardır. Diğer bir farklı davranış Poisson oranının değişimindedir.

Çözülme olayının belirli olduğu numunede Poisson oranı baştan beri artarak gelişmektedir (Süreksizlik sınırında artış hızı doğal olarak artıyor), buna karşı diğerinde süreksizlik sınırına kadar olan kısımda ve bilhassa en başlarda Poisson oranının artış hızı çok daha yavaştır ; bu da çözülme olayının belirli olduğu numunenin yapısının daha az boşluklu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır ; zira diğer numunede uygulanan ilk basınç yükleri altında boşluklar yavaş yavaş kapanmaya başlamakta ve bu hal yanıl genişlemeleri ve dolayısıyla Poisson oranının artış hızını azaltmaktadır.

Bu davranış farkları yalnız E/C-B-0.35 betonunda görülmektedir. Benzer durumlar bu karışımdan başka E/C-B-0.51 ve E/C-B-0.59 betonlarında da ortaya çıkmıştır. E/C-B-0.51 karışımındaki durum yukarıda incelenen E/C-B-0.35 karışımındaki durumun aynıdır (Şekil 3.11 ve 3.11 bis.). E/C-B-0.59 betonunda ise biraz farklı bir davranışla karşılaşıyoruz (Şekil 3.12 ve 3.12 bis.). Bu karışıma ait 2 numunenin karakteristik mekanik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir :

	Çözülme olayı çok Belirsiz numune	Çözülme olayı Belirli numune
Çözülme sınırı (kgf/cm ²)	192	209
Basınç dayanımı (kgf/cm ²)	193	222
Çözülme sınırındaki birim hacımsal şekildeğiştirme (μD)	519	396
Çözülme sınırındaki birim kısalma (μD)	959	782
Basınç dayanımındaki birim kısalma (μD)	1175	1054

Burada yine yukarıda incelenen durum gibi çözülme sınırındaki birim hacımsal şekildeğiştirme ve bu sınırdaki birim kısalma çözülme olayının belirli olduğu numunede da-

ha azdır. Ayrıca basınç dayanımındaki ve çözülme sınırındaki birim kısalmalar arasındaki farklar çözülme olayının belirli olduğu numunede, yine yukarıda incelenen hal gibi, daha fazladır.

Ancak burada öncekilerden farklı olarak çözülme olayının belirsiz olduğu numune, diğerinin daha çözülme sınırına dahi varamadan dayanımını kaybetmektedir.

Şimdi, bu sonuçların incelenmesinden sonra hemen akla gelen şu sorunun cevaplandırılmasına geçebiliriz :

Araştırmamızda, paragraf 2.1.4.4 de ayrıntılı olarak belirtildiği gibi, numunelerin homojen bir şekilde yerleştirilmesine elden gelen bütün özen gösterildiği halde neden aynı karışıma ait 2 numunede bu derece belirli davranış farkları ortaya çıkmaktadır?

Önce bu farklı davranışların E/C-A serisinde değil, fakat E/C-B serisinde görüldüğüne tekrar dikkati çekelim . Tablo 2.1 den görüleceği üzere taze betondaki hava boşluğu E/C-A serisinde % 0.6 ilâ % 1.7 arasında bulunurken E/C-B serisinde % 4.2 ilâ % 5.1 arasında olup E/C-A serisine oranla önemli derecede fazladır.

Bu durumu belirttikten sonra sorunun cevaplandırılmasına geçelim. Kanımızca bu davranış farklarının nedeni, numunelerin kalıplarına yerleştikten sonra yerçekiminin etkisi altında yaptıkları oturmaların birbirinden farklı olmasıdır. Gerçekten araştırmamızda kullandığımız betonları üretirken, bunların kalıplarına yerleştikten sonra zamanla bazı kalıpların altından hafif su sızıntıları olduğunu gördük. Bu sızıntılar esas olarak sudan ibaretti ve görünüşlerinden içlerinde kayda değer miktarda çimento taşımadıkları kolayca anlaşıliyordu. Çalışmalarımızın başından itibaren numunelerin üniformluğunu bozabilecek bu sızıntıları bütünüyle ortadan kaldırmayı amaç edindik ve bunu sağlamak için parçaların birbirine iyi geçtiği dökme demirden yapılmış kalıplar kullandık ve ayrıca kalıplardaki birleşim yerlerine gres yağı sürdük. Ancak, buna rağmen, sızıntıları tam olarak önleyemedik ve birçok karışımda bir veya daha fazla numunede sızıntıların ortaya çıkabildiğini gördük .

Kanımızca, işte tam olarak kontrol edilemeyen bu etken, numuneler arasında yukarıda anlatılan farklı davranışlara yol açmıştır. Taze betondaki (daha açık deyimle bağlayıcı hamurdaki) hava oranı yüksek olan E/C-B betonlarına ait bir numunede böyle bir sızıntının meydana gelmesi, betonun yerçekimi etkisiyle tümüyle yaptığı oturmanın da yardımıyla, beton prizini yapana kadar geçen zaman içinde, daha az boşluklu bir hamur yapısının oluşmasına yol açmış ve neticede sızıntı yapmamış benzer bir numune daha boşluklu bir hamur yapısına sahip olduğundan basınç dayanımı daha düşük ve çözülme olayını hemen hemen göstermezken, bu numune daha yüksek bir basınç dayanımına kavuşmuş ve belirli bir çözülme olayı göstermiştir. Burada bu sızıntı ve oturma olayından etkilenen başlıca beton bileşeninin "bağlayıcı hamur" olduğuna bilhassa dikkati çekelim. Gerçekten böyle bir oturma olayından sonra birim hacimdeki agrega miktarında önemli bir artış olmaz ve bu kadarcık bir artıştan betonun kırılma mekanizmasının bu derece önemli değişimler göstermesi beklenemez. Bu olaydan asıl etkilenen bağlayıcı hamurun yapısıdır ve bu yapıda meydana gelen değişim kırılma mekanizmasındaki bu önemli farkların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Özetlemek gerekirse, oldukça yüksek hava içeriğine sahip olan E/C-B betonlarında, bu boşluklu hamur yapısından dolayı, düşük Su/Çimento (veya yüksek Jel/Hacim) oranlarında dahi, çözülme olayını hemen ardından kırılma izlemektedir. Ancak böyle bir beton sızıntılar etkisiyle daha dolu bir hamur yapısına kavuşursa belirli bir çözülme olayı gösterebilmektedir. Burada, olayın biraz daha iyi değerlendirilmesinde Rüşch (15) ün ileri sürdüğü bir düşünce çok yararlı olacaktır : Rüşch'e göre çözülme sınırından sonra betonun bir müddet daha dağılmadan durabilmesinin nedeni "malzemenin viskoz bileşeni" dir. Elde ettiğimiz sonuçlara göre, betonun böyle bir "viskoz bileşene" sahip olabilmesi, bağlayıcı hamurun yapısıyla çok duyarlı bir şekilde ilgili olabilmektedir. Yukarıda gördüğümüz gibi, E/C-B betonları, ilk hava içeriğinin yüksek olmasının etkisiyle böyle bir "bileşene" sahip olamamakta, fakat bir miktar su sızıntısının oluşturduğu bağlayıcı hamurdaki yapı değişimiyle, "viskoz bileşen" belirli bir şekilde ortaya çıkmaktadır .

Gözlenen bu davranış farklarının kalıpların altındaki farklı su sızıntılarıyla ilgili olduğu yolundaki kanımızı sınamak için, sonradan bir seri kontrol deneyi

yaptık. Bunun için E/C-B-0.51 karışımı yeniden üretildi, ancak burada çeşitli kalıplarda sızıntıların farklı olması için bilhassa önlem alındı. Bu şekilde 5 numune üretildi. Bu numuneler üretimlerinden 1 gün sonra kalıptan çıkarılıp 5 gün süreyle su içinde saklandı sonra laboratuvar atmosferine çıkarıldı. Numunelerde üretimlerinden itibaren 8 inci ve 9 uncu günlerde asıl deneylerde uyguladığımız aynı koşullarda basınç deneyleri uygulandı. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

8.nci gündeki deney sonuçları (3 numune üzerinde)

	Basınç dayanımı (kgf/cm ²)
Kalıbın altından su sızdırmayan numune	122
Biraz sızdıran numune	139
Belirli şekilde sızdıran numune	144

	Çözülme sınırı/ Basınç dayanımı
Kalıbın altından su sızdırmayan numune	0.99
Belirli şekilde sızdıran numune	0.96

Geriye kalan 2 numunede 9 uncu günde basınç deneyi uygulandı. Gerek aradan geçen bir günün, gerekse bu arada numunelerin biraz daha kurummasının etkisiyle dayanımlarda 8 nci güne oranla biraz artma olduğu görüldü. 9 ncu günde elde edilen sonuçlar aşağıdadır :

Basınç dayanımı
(kgf/cm²)

Kalıbın altından su sızdırma-
yan numune

149

Belirli şekilde sızdıran
numune

156

Elde ettiğimiz bu sonuçlar E/C-B serisi betonlarında aynı karışıma ait çeşitli numunelerde gözlenen davranış farklarını kalıplardaki sızıntıya bağlayan görüşümüzü doğrulayıcı yöndedir. Aslında biraz raslantı sonucunda elde ettiğimiz bu bulgunun değerlendirilip, olayın ileride sadece bu konu üzerinde yoğunlaşacak sistematik bir araştırmayla daha iyi bir şekilde aydınlatılması uygun olacaktır. Bu sızıntıların betonun inelastik davranışı açısından önem taşıması, betondaki terleme (bleeding) olayının ve hamurun su tutma yeteneğinin de aynı açıdan önemli olabileceğini düşündürmektedir. Bunların da ileride sistematik araştırmalarla ele alınması yerinde olacaktır.

Bu davranış farklarını önceden fazla hava içeren betonlarda sonradan kalıplarda meydana gelen sızıntılara bağlayan görüşümüzü destekleyen bir başka husus da şudur : ileride ele alınacak HS serisi (hava sürükleyici katkı maddesi kullanılan seri) betonlarında da, düşük E/C oranlarında dahi belirli bir çözülme olayı görülmemektedir (Bu betonlarda hava boşluğu % 4.5 ilâ % 11.4 arasındadır). Ayrıca bu betonlarda hiçbir numunede E/C-B serisinde olduğu gibi belirli bir çözülme olayı bazen ortaya çıkamamaktadır. Bunun nedeni hava sürükleyici katkı maddesi katılmış betonların suyu çok iyi tutan bir özellik kazanmış olmaları ve böylece kalıplarda sızıntı meydana gelmemesidir.

Şimdi E/C serisine ait betonların çeşitli mekanik karakteristiklerini inceleyen grafikleri gözönüne alalım. (Şekil 3.15 ilâ 3.48). Bu grafiklerdeki her nokta belli bir karışımın ortalama değerine karşı gelmektedir.

Şekil 3.15 ilâ 3.31 de mekanik özelliklerin Jel/Hacim oranlarına göre, Şekil 3.32 ilâ 3.48 de ise Su/Çimento oranlarına göre değişimleri verilmiştir. Şekillerin ayrıntılı incelemesine girmeden önce, bu 2 gösteriş tarzı arasında ortaya çıkan önemli bazı farklara değinelim. Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç dayanımının değişimlerini gözönüne alırsak, Jel/Hacim oranına göre çizilen diyagramlarda (Şekil 3.15 ilâ 3.17) A ve B granülometreleri için çizilen eğrilerin birbirine göre önemli derecede ayrı durduğunu, buna karşı Su/Çimento oranına göre çizilen diyagramlarda (Şekil 3.32 ilâ 3.34) eğrilerin oldukça büyük genişlikteki bir bölgede (Su/Çimento oranı yaklaşık olarak 0.40-0.60 arası) hemen hemen çakıştığını görüyoruz. Yani, başka bir deyimle, A ve B granülometrelerinde, önemli genişlikteki bu bölgede aynı Su/Çimento oranında süreksizlik ve çözülme sınırları ile basınç dayanımı yaklaşık olarak eşitken, aynı Jel/Hacim oranında birbirine göre büyük farklar göstermektedir. Bu bize dayanımların (süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç dayanımı) belirtilmesinde, Su/Çimento oranının, Jel/Hacim oranına göre daha güvenilir bir parametre olduğunu düşündürmektedir; çünkü eğrilerin çok yakın olduğu bölgede herhangi bir Su/Çimento oranı, granülometrinin A veya B olmasına bağlı olmaksızın hemen hemen bir tek dayanım değeri verirken, Jel/Hacim oranında böyle bir üstünlük bulunmamaktadır. Bu durum sadece dayanımlarda görülmemektedir. Süreksizlik sınırı ile ilgili bütün şekildeğiştirmelerde de, aynı durum ortaya çıkmaktadır. Süreksizlik sınırındaki birim kısalma (Şekil 3.20 ve 3.37), Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısalma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısalma (Şekil 3.23 ve 3.40), Süreksizlik sınırındaki enine birim uzama (Şekil 3.25 ve 3.42), süreksizlik sınırındaki birim hacımsal şekildeğiştirme (Şekil 3.27 ve 3.44) diyagramlarında da aynı olgu karşımıza çıkıyor. Buna karşı elâstiklik modülü eğrilerinde (Şekil 3.29 ve 3.46) ters durumun olduğunu görüyoruz. Burada Jel/Hacim oranına göre çizilen diyagramda (Şekil 3.29) A ve B granülometresine sahip betonların eğrileri hemen hemen birbirine karışmakta, buna karşı Su/Çimento oranına göre çizilen diyagramda (Şekil 3.46) B granülometresine sahip betonların eğrisi biraz daha aşağıdan gitmektedir. Yani burada ortaya şu durum çıkmaktadır : aynı Jel/Hacim oranına sahip bir A ve bir B betonunun elâstiklik modülleri eşit olmakta, buna karşı aynı Su/Çimento oranına sahip A ve B beton-

larından, B granülometrisine sahip olanın elâstiklik modülü biraz daha düşük bulunmaktadır. Aslında betonun elâstiklik modülü, agreganın ve bağlayıcı hamurun elâstik modüllerinin ve bu bileşenlerin beton içindeki hacimlerinin bir fonksiyonudur. Betonun elâstik davranışını sembolize eden çeşitli kompozit malzeme modellerinde daima bu ilkedен hareket edilmektedir (31). Yani, başka bir deyimle, betonun elâstiklik modülü üzerinde, bir agreganın, bir de bağlayıcı hamurun katkısı olduğu daima kabul edilmektedir. Şimdi şu soruyu soralım : Acaba, betonun elâstiklik modülünde bağlayıcı hamurun katkı derecesini göstermesi bakımından, Jel/Hacim oranı mı, yoksa Su/Çimento oranı mı daha uygun bir parametredir ?

Bunu cevaplandırmak için Akyüz (32) ün kuramsal çalışmasına başvurmak uygun olacaktır. Bu araştırmacı düzlem elâstisite kuramını kullanarak, dağılı fazı altıgen simetriye göre dizilmiş kompozit malzemelerin üniform yük altında gerilme dağılımını ve malzeme sabitlerini saptamıştır . Akyüz kullandığı modeli sürekli granülometrilili sistemlere de uygulamaktadır. Akyüz'ün hesaplamalarına göre, eğer dağılı fazın ve matrixin elâstiklik modülleri ve dağılı fazın kompozit malzeme içindeki hacim oranı sabit ise, granülometri ne olursa olsun kompozit malzemenin elâstiklik modülü hep aynı kalmaktadır ; yani elâstiklik modülü granülometriden bağımsızdır. Zaten, daha önce betonun elâstik davranışını sembolize eden daha basit kompozit malzeme modellerinde de (31) agrega granülometrisi gözönüne alınmamıştır. Öyleyse, bizim çalışmamıza dönersek, bir beton ister A isterse B granülometrisine sahip olsun, eğer bağlayıcı hamurun betonun elâstiklik modülüne katkısı değişmiyorsa, betonun elâstiklik modülünün granülometriye bağlı olmaksızın aynı kalması gerekir. Buradan, yukarıda verilen sonuçlar gözönüne alındığında, Jel/Hacim oranının betonun elâstiklik modülünde bağlayıcı hamurun katkı derecesini daha iyi temsil eden bir parametre olduğu sonucuna varılır.

Genel malzeme biliminde, kristal bünyeli cisimlerin özellikleri 2 grupta toplanmaktadır (33) :

1. Yapıya duyarlı olmayan özellikler
2. Yapıya duyarlı özellikler.

Yapıya duyarlı olmayan özellikler kristal yapıdaki kusurlardan etkilenmemektedir. Malzemenin yoğunluğu ve elâstik sabitleri buna örnek olarak verilebilir. Buna karşı mekanik dayanım ve süneklik gibi özellikler kristal yapıdaki kusurlardan önemli derecede etkilenmektedir : bunlar yapıya duyarlı özelliklerdir.

Bağlayıcı hamurun yapısının betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelerken de böyle bir sınıflamaya gitmek, kanımızca uygun olacaktır. Yalnız burada tarifleri biraz değiştirmek gerekmektedir. Bizim araştırmamızda yapıldığı gibi agrega fazının bütün özelliklerinin sabit tutulduğunu kabul edelim. Eğer herhangi bir özellik, bu agrega taneleri arasına giren jelin sadece miktarına bağlı ise bunun bağlayıcı hamurun mikroyapısına (kılcal boşluk yapısına) duyarlı olmadığını söylemek uygun olacaktır *. Buna karşı jelin

* Bundan sonra "hamurun yapısı" ve "hamurun mikroyapısı" deyimleri çeşitli yerlerde kullanılacaktır. "Hamurun yapısı" kavramında, agrega tanelerinin arasını dolduran hamur tümüyle gözönüne alınmaktadır ; yani hapsolmuş havanın doğurduğu makroskopik boşluklar, ve-şayet varsa- terlemeden dolayı iri agregaların altında oluşan su ceplerinin doğurduğu boşluklar da "hamurun yapısına" dahildir. "Hamurun mikroyapısı" ise bu büyük boşlukları içine almamaktadır ; yani hamurun mikroyapısı çimento jelinden ve bu jeli kateden kılcal boşluklardan meydana gelmektedir (ile-ride, hava sürüklenmiş betonlarda, sürüklenen küçük çaplı küresel hava boşluklarının da mikroyapı içinde düşünülmesinin uygun olduğu görülecektir).

Çimento hamuru içindeki suyun bir kısmı jel suyunu oluşturur ; fazlası ise kılcal boşluklar içinde yer alır. E/C oranı ne kadar büyükse hamurdaki kılcal boşluk miktarı da o derecede fazla olur. Taze betondaki terleme olayından dolayı kılcal boşlukları dolduran su buraları terk ederek iri agregaların altında gözle görülebilecek kadar büyük su cepleri oluşturabilir. Ancak araştırmamızda kullandığımız betonlar üzerinde sertleşmeden sonra yapılan gözlemler, bu olayın ya hiç görülmediğini veya ihmal edilecek kadar az miktarda meydana geldiğini göstermiştir. Bu bakımdan araştırmamızdaki betonlarda serbest suyun (jel suyunun dışındaki) kılcal boşlukları oluşturduğunu ve E/C oranının da doğrudan doğruya kılcal boşluk yapısını (mikroyapıyı) belirlediğini her zaman kabul edebiliriz.

inşa ettiği hamurun mikro yapısına (hamurdaki kılcal boşluk miktarına, bunların boyutlarına vb.) bağlı olan özellikleri bağlayıcı hamurun mikro yapısına duyarlı olarak niteleyebiliriz.

Örneğin, elde ettiğimiz sonuçlara göre, elâstiklik modülü bağlayıcı hamurun mikro yapısına duyarlı değildir. Çünkü betonun elâstiklik modülünde bağlayıcı hamurun katkısını en iyi Jel/Hacim oranı temsil etmektedir. Jel/Hacim oranı ise, Bölüm III de tarif edildiği gibi, agregalar arasında kalan boşluğun ne miktar jelle doldurulduğu ile ilgili bir parametredir. Buna karşı bu jelin inşa ettiği hamurdaki kılcal boşluk miktarını ve boyutlarını göstermemektedir. Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırı ile ilgili bütün şekildeğiştirmeler gibi özellikler ise bağlayıcı hamurun mikro yapısına duyarlıdır. Yukarıda görüldüğü gibi bu özellikleri Su/Çimento oranı daha iyi karakterize etmektedir ; Su/Çimento oranı ise agregaların arasına giren jelin miktarını değil, fakat bu jelin inşa ettiği hamurun kılcal boşluk yapısını temsil etmektedir. Öyleyse bu özellikler bağlayıcı hamurun mikro yapısına duyarlıdır.

Özellikleri bu şekilde iki sınıfa ayırdıktan sonra, betonla ilgili olarak mühendislik uygulamasında kullanılan iki grup formüle burada değinmek uygun olacaktır. Bunlardan birincisi beton basınç dayanımı formülleri, ikincisi ise betonun basınç dayanımı ile elâstiklik modülü arasındaki bağıntılardır.

Beton basınç dayanımı formüllerinin klâsik olanlarından önemli bir kısmı (Abrams, Graf, Bolomey formülleri) basınç dayanımını C/E parametresi ile ifade etmektedirler. Bu formülasyonların, basınç dayanımının bağlayıcı hamurun mikroyapısına duyarlı bir özellik olduğu ve bu sınıf özelliklerin de en iyi bir şekilde Su/Çimento oranı ile temsil edildiği düşünülürse, uygun oldukları görülür.

Klâsik formüllerden Feret formülü ise, bilindiği gibi :

$$R = K \left(\frac{c}{1 - a} \right)^2 \quad \text{şeklindedir. Burada :}$$

R : Basınç dayanımı

K : Katsayı

c : 1 m^3 betonda çimento gerçek hacmi

a : 1 m^3 betonda agrega gerçek hacmi dir,

$a + c + e + h = 1$ olduğundan, $1 - a = c + e + h$ olur.

Buna göre :

$$R = K \left(\frac{c}{c + e + h} \right)^2 \quad \text{olur.}$$

Parantez içindeki ifadenin pay ve paydası c ye bölünürse :

$$R = K \left(\frac{1}{1 + \frac{e+h}{c}} \right)^2 \quad \text{bulunur.}$$

Yani Feret formülünde dayanım $\frac{e+h}{c}$ parametresi cinsinden ifade edilmektedir. Powers tarafından hava boşluğu içeren hamurlar için tarif edilen Jel/Hacim oranı ise Bölüm III'de görüldüğü gibi,

$$X = \frac{0.652 \alpha}{0.316 \alpha + \frac{e+h}{c}}$$

şeklinde idi. Powers bu oran ile sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımı arasında bir bağıntı önermektedir (29); $\frac{e+h}{c}$ ye göre daha gelişmiş bir parametre olan Jel/Hacim oranı α hidratasyon derecesini de içermektedir. Feret formülünde ise K katsayısı değişik yaşlarda değişik değerler almakta ve bu şekilde α nın etkisi gözönünde tutulmaktadır. α bu bakımdan bir yana bırakılırsa, Feret formülünde de bağlayıcı hamurun henüz hidratasyon başlamadan önceki yapısının basınç dayanımındaki etkisinin Jel/Hacim kavramının tarifinde kullanılan $\frac{e+h}{c}$ parametresi ile belir-

tildiği ve Feret formülündeki temel düşünce ile basınç dayanımının Jel/Hacim oranına bağlamadaki düşüncenin aslında farklı olmadığı görülür. Zaten Powers da sertleşmiş çimento hamurlarının dayanımlarını Jel/Hacim oranına bağlarken bunu belirtmekte ve Jel/Hacim oranının boşluklu hamurlardaki bu ifadesini belirten X harfini Feret'in adına izafeten F endisini koyarak X_F şeklinde yazmaktadır. Jel/Hacim oranının betonun dayanımını belirlemede Su/Çimento oranına göre daha az uygun bir değişken olduğunu yukarıda gördük. Öyleyse Feret formülünün de dayanımı belirlemede C/E oranını kullanan diğer klâsik formüllerden daha az uygun olduğunu söyleyebiliriz.

Bolomey formülünün, halen İsviçre'de kullanılan geliştirilmiş şekli :

$$R = K \left(\frac{C}{E+h} - K' \right) \quad (K, K' : \text{Katsayı})$$

şeklinde olup, yine aynı nedenden dayanımı C/E ye bağlayan eski Bolomey formülünden ve diğer klâsik formüllerden daha az uygun olduğu söylenebilir.

Powers'in tarif ettiği Jel/Hacim oranı biraz değişik bir görüşle betonun basınç dayanımını ve hamurun mikroyapısına duyarlı bütün diğer özelliklerini iyi karakterize eden bir parametre haline dönüşebilir. Aslında Jel/Hacim oranı içine hidratasyon derecesini de aldığından betonun yaşını da ifade eden gelişmiş bir parametredir. Jel/Hacim oranının şimdiye kadar kullandığımız ifadesi, Powers'ın hava boşluğu içeren hamurlar için verdiği ifadedir ; bizim betonlarımızda hava boşluğu bulunduğundan yukarıdaki incelemelerimizde bu ifadeyi esas aldık ve görüldüğü gibi bunun hamurun mikroyapısına duyarlı özelliklerin belirtilmesinde Su/Çimento oranı kadar başarılı olmadığını gördük. Powers, hiç hava boşluğu içermeyen hamurlarda, Bölüm III de görüldüğü gibi, $h = 0$ alarak, Jel/Hacim oranı için

$$X = \frac{0.652 \alpha}{0.316 \alpha + \frac{e}{C}}$$

bağıntısını vermektedir. Kanımıza göre, bu ifadeyi hava boşluğu içeren betonlarda da aynen kullanmak (h yı hiç gözönüne almadan) bu betonların hamur mikroyapısına duyarlı özelliklerini incelemeye yararlı olacaktır. Çünkü burada parametre aslında Su/Çimento oranına bağlıdır ve böylece bu iş için uygun olmaktadır ; hidrasyon derecesini de içine aldığından klâsik C/E parametresinden daha gelişmiş bir değişkendir. Örneğin, çok sayıda numune üzerinde istatistik yöntemlerini kullanarak basınç dayanımı ile bu şekilde tarif edilen (Hava boşluksuz) Jel/Hacim oranı arasındaki ilişkiyi incelemekle klâsik dayanım formüllerinden daha gelişmiş bir formülasyona varmak olanak dahilindedir. Betonun hamur mikroyapısına duyarlı olmayan özelliklerini (örneğin elâstiklik modülü) belirtmede ise, yukarıda söylendiği gibi Jel/Hacim oranının hava boşluğunu da gözönüne alan ifadesi uygun olmaktadır.

Betonun basınç dayanımı ile elâstiklik modülü arasındaki bağıntılar da mühendislik uygulamasında çok kullanılmaktadır. Bunların başlıcaları arasında

$$E = K \sqrt{R} \quad (L'Hermitte)$$

$$E = K \sqrt[3]{R} \quad (Chef de Ville)$$

$$E = \frac{600000 R_p}{200 + R_p} \quad (\text{İsviçre LFBM formülü,}$$

R_p : Kare prizma numunenin dayanımı)

sayılabilir.

Yukarıda vardığımız sonuçlara göre betonun elâstiklik modülü bağlayıcı hamurun mikroyapısına duyarlı olmayan bir özelliktir ve en iyi bir şekilde Jel/Hacim parametresi ile (veya daha basit bir görüşle $\frac{E+h}{C}$ parametresi ile)

ifade edilebilmektedir. Basınç dayanımı ise, tam tersine bağlayıcı hamurun mikroyapısına duyarlıdır ve E/C parametresi ile iyi bir şekilde ifade edilmektedir. Buna göre elâstiklik modülü ile basınç dayanımı arasındaki yukarıda verilen ve benzeri bağıntıların, istatikselsel anlamdaki bir

ilgiden öteye gitmediği söylenebilir. İkisi arasında yapısal bir bağıntı bulunduğu söylenemez, çünkü elâstiklik modülü $\frac{E+h}{C}$ yapısal parametresine, basınç dayanımı ise bir başka $\frac{E}{C}$ yapısal parametresine bağlıdır ("Yapısal bağıntı" deyimi, aynı yapısal parametreye bağlı 2 ayrı malzeme karakteristiği arasında bulunabilecek bağıntı olarak anlaşılmalıdır).

Burada, şimdiye kadar ileri sürdüğümüz görüşleri sınırlı bir bölge için savunduğumuza dikkati çekmek ve bu sınırları belirtmek isteriz. Biz görüşlerimizi iyi bir şekilde yerleşmiş, agregata granülometrisinin A ve B eğrileri (Bunlar yaklaşık olarak DIN 1045 deki D - E eğrilerine karşı geliyor) ve Su/Çimento oranının da yaklaşık olarak 0.40 - 0.60 arasında değiştiği katkısız E/C serisi betonlarında hidratasyonunu büyük ölçüde tamamlamış numunelerde elde ettiğimiz sonuçlara dayadık. Bu kısıtlamalara rağmen bu sınırlar mühendislik uygulamalarının, çoğunu içine almaktadır. Görüşlerimiz bu sınırlar içinde ileri sürülmüştür. Bu sınırların dışında geçerlilikleri ayrı bir araştırma konusudur. İncelemelerimizde agreganın gerçek hacminin sabit olduğu ve bu büyüklüğün değişimleri incelenmediği için fazla genellemelere gitmenin doğru olmadığı da akla gelebilir. Ancak uygulamada kullanılan betonların çok büyük bir kısmında agregata gerçek hacmi bizim kullandığımız miktara göre $\pm$ % 5 den fazla fark etmemektedir. Bu kadarlık bir farkın gözlediğimiz değişimlerin temel özelliklerini değiştirmesi beklenmez. Bundan başka agregata cinsini değiştirmemiş olduğumuz akla gelebilir. Bu konuda biraz ihtiyatlı davranarak ileri sürdüğümüz görüşlerin normal doğal kum ve çakılla yapılan betonlarda geçerli olduğunu diğer tip agregalı(kırmataş ve daha özel agregalar) betonlarda bu konuların ayrıca araştırılması gerektiğini söyleyebiliriz.

Son olarak akla şu soru gelebilir : Betonun basınç dayanımı ve diğer hamur mikroyapısına duyarlı özellikleri en iyi bir şekilde E/C parametresi ile ifade edildiğine göre, taze betondaki hapsolmuş (sürüklenmiş hava burada konumuzun dışındadır) hava boşluğunun bu özellikler üzerinde hiç mi etkisi yoktur ? (Buradaki hava kötü yerleşmeden dolayı değil, yerleştirmenin iyi bir şekilde yapılmasına rağmen bileşimle ilgili özelliklerden dolayı kalan hava olarak anlaşılmalıdır).

Betonun hamur mikroyapısına duyarlı birçok özeliğinin ve bu arada basınç dayanımının E/C oranının 0.40 ilâ 0.60 değerleri arasında, aynı E/C oranı için, A ve B betonlarında eşit olduğunu gördük. Bu aralıkta A betonlarında taze betondaki hava boşluğu oranı % 0.6~1.7, B betonlarında ise % 4.9~5.1 arasında değişmektedir. Demek ki, oldukça önemli sayılabilecek bu farkın bir etkisi olmamıştır. Uygulamadaki katkısız normal betonlarda hava boşluğu bu sınırların dışına pek çıkmaz. Bu bakımdan uygulamada kullanılan yeterli derecede yerleşmiş katkısız betonlarda hava boşluğundaki değişimler basınç dayanımını ve hamur mikroyapısına duyarlı diğer özellikleri etkilemeyecek sınırlar içindedir. Ancak hava boşluğunun daha büyük değerler alması halinde bu özellikleri etkilemesi doğaldır. Hava boşluğunun hangi orandan sonra bu özellikleri etkilemeye başladığının ileride yapılacak bir araştırma ile bulunması uygun olacaktır. Bu konuya biraz aşağıda tekrar, çimento dozajının etkisi dolayısıyla dönülecektir.

Yalnız burada, hava boşluğunun, bizim B betonlarındaki sınırlar içinde kalsa dahi inelastik davranış üzerindeki özel etkisini hatırlatalım : yukarıda gördüğümüz gibi, yaklaşık % 4-5 civarında hava içeren B betonlarında, bu havanın etkisiyle çözülme olayını hemen ardından kırılma izlemektedir. Böyle bir beton eğer prizini tamamlamadan su sızıntılarından dolayı daha iyi yerleşirse beton çözülme sınırının üstünde de bir süre yük taşıyabilmektedir.

Mekanik özelliklerin Su/Çimento oranı ile veya Jel/Hacim oranı ile gösterilmesi arasında ortaya çıkan farklara ve bunların ulaştırdığı sonuçlara bu şekilde değindikten sonra şimdi elde edilmiş bulunan grafikleri daha yakından inceleyeceğiz. Bu incelemede, yukarıdaki paragraflarda varılan sonuçların ışığında, genellikle hamurun mikroyapısına duyarlı özellikler Su/Çimento oranına göre, duyarlı olmayanlar Jel/Hacim oranına göre gözönüne alınacaktır.

Şekil 3.32 de süreksizlik sınırının Su/Çimento oranına göre değişimi verilmektedir. E/C-A betonlarında süreksizlik sınırı E/C nin 0.59 değerine kadar E/C arttıkça hızla azalmaktadır, buna karşı 0.59 dan sonra yavaş bir artma göstermektedir. E/C-B betonlarında ise süreksizlik sınırı E/C arttıkça sürekli olarak azalmaktadır. Dikkati çeken husus Su/Çimento oranının yaklaşık olarak 0.40 ilâ 0.60

değerleri arasında süreksizlik sınırının her iki granülometriye sahip betonda da hemen hemen eşit olmasıdır. Önce bu bölgeyi açıklamaya çalışalım. Betonda, süreksizlik sınırına İri agregat - Harç bağ çatlaklarının ani gelişmesiyle ulaşıldığı Bölüm I de açıklanmıştı. Bu bakımdan süreksizlik sınırının değerini bu bağların dayanımı ve basınç yükü altında bu bağlara etkiyen gerilmelerin değeri belirler. Aynı Su/Çimento oranında A ve B betonlarında İri Agregat - Harç dayanımlarının arasında büyük farklar olması beklenemez ; çünkü Su/Çimento oranından başka agregat ve çimentonun cinsi de aynıdır. E/C nin 0.40 ile 0.60 değerleri arasında her 2 granülometride süreksizlik sınırları eşit olduğundan, burada bağ dayanımlarından başka bağlara gelen gerilmelerin de eşit olduğu akla gelmektedir. Ancak burada ilk bakışta bir soru ortaya çıkıyor : İri agregat konsantrasyonunun oldukça farklı olduğu bu betonlarda (A granülometrisinde 4 no.lu eleğin üzerinde kalan taneler % 66, B de % 48 idi) bu durum iç gerilme yayılımını hiç etkilemiyor mu?

Bu sorunun cevabını yine Akyüz'ün yukarıda bahsi geçen çalışmasında bulabiliriz. Orada da söylendiği gibi Akyüz çalışmasını elâstisite kuramını kullanarak yapmıştır, yani sonuçları elâstik şekildeğiştirmeler bölgesinde geçerlidir. Ancak, süreksizlik sınırına varana kadar betonun elâstik bir malzeme gibi davrandığını, çok zayıf betonların dışında, yaklaşık olarak kabul etmek mümkündür. Şekil 3.1 ilâ 3.14 incelendiğinde, bu varsayımın, E/C serisi betonları içinde, 0.67 ve 0.75 Su/Çimento oranına sahip olanların dışında kabul edilebileceği görülmektedir. Buna göre, Akyüz'ün ideal elâstik halde bulduğu iç gerilme yayılışları, E/C serisi betonlarının önemli bir kısmında süreksizlik sınırına varılması olayını açıklamada yardımcı olacaktır.

Akyüz'ün sonuçlarına göre, agregat granülometrisi kalınlaştıkça İri Agregat - Harç Sınırlarında basınç kuvvetine dik yönde meydana gelen çekme gerilmesi hızla artmaktadır (Akyüz'ün sonuçlarını kullanarak yapılan yaklaşık bir hesap A granülometrisinde bu gerilmelerin B granülometrisindeki -lerin 4 katı mertebesinde olduğunu gösteriyor). Buna karşı İri Agregat - Harç sınırlarında kuvvetle eğik açılar yapan bölgelerde meydana gelen "Normal gerilme + Kayma gerilmesi" gerilme durumu granülometrinin A dan B ye geçmesine karşı gelen bir değişimden ihmal edilecek kadar az etkilenmekte-

dir. Bu durum karşısında, gözönüne alınan bölgede süreksizlik sınırının A ve B betonlarında eşit olduğu da hatırlanır, bu bölgede süreksizlik sınırında İri Agregata - Harç temas yüzeylerinde meydana gelen ilk mikroçatlakların, yükleme eksenine göre eğik açılar yapan ve bu yüzeylerdeki "Normal gerilme + Kayma gerilmesi" etkisiyle oluşan mikroçatlaklar olduğu kolayca anlaşılır.

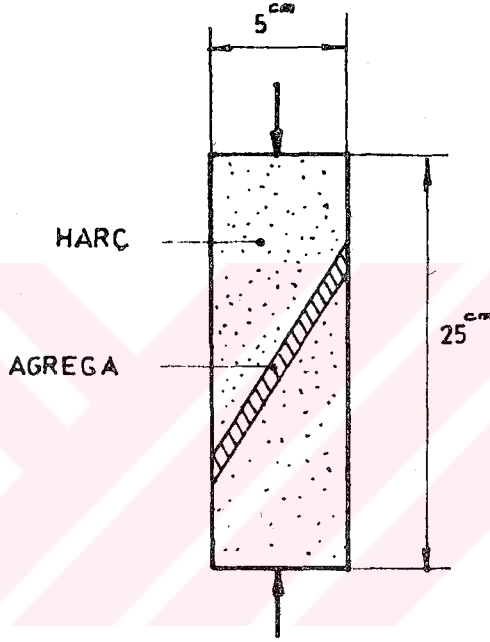
Şimdi bir başka hususa değinelim. Gözönüne aldığımız bu bölgede ve bunun solundaki (E/C daha düşük) kısımda süreksizlik sınırı Su/Çimento oranının düşmesiyle hızla artmaktadır. Bunun 2 nedeni akla gelebilir :

1. Su/Çimento oranının düşmesiyle betonun harç fazının elâstiklik modülü büyür. Böylece "Harç Fazının Elâstiklik Modülü/İri Agreganın Elâstiklik Modülü" oranı büyür ve bu değişim İri Agregata - Harç sınırlarında oluşan gerilmeleri küçültücü yönde bir etki yapar. Bundan dolayı süreksizlik sınırına daha büyük bir kuvvet altında varılır.

2. Su/Çimento oranının düşmesiyle İri Agregata - Harç bağ dayanımlarında önemli artışlar olur ve böylece süreksizlik sınırı yükselir.

Akyüz'ün hesapları birinci olasılığın geçerli olmayacağını göstermektedir. İri agregası harcından daha rijit olan betonlarda (Normal betonlar) elâstiklik modüllerinin oranının değişiminden dolayı İri Agregata - Harç sınırlarındaki gerilmelerin değişimi son derece yavaştır ve bu değişim süreksizlik sınırlarındaki bu hızlı değişimin nedeni olamaz.

Öyleyse süreksizlik sınırının Su/Çimento oranının düşmesiyle gösterdiği bu hızlı değişime ancak, Su/Çimento oranının düşmesiyle bağ dayanımlarının önemli derecede artması neden olabilir. Bu sonuç Taylor - Broms (34) un bulgusuna aykırı düşmektedir. Bu araştırmacılar Şekil 4.1 de gösterilen İri Agregata - Harç temas yüzeyi modeli üzerinde yaptıkları deneyler sonunda, temas yüzeyinin "Normal gerilme + Kayma gerilmesi" gerilme halindeki dayanımının Coulomb-Mohr kırılma kuramına uyduğunu ; harcın Su/Çimento oranındaki değişimlerin ise temas yüzeyinin kayma dayanımını ancak az bir miktarda etkilerken, yüzeyin iç sürtünme katsa-



Şekil 4.1

Taylor - Broms (34) un Agrega - Harç
Kayma Dayanımını İnceledikleri Model

yısını pratik olarak değiştirmediğini bulmuşlardır. Buna göre, Taylor - Broms'un sonuçları bizim incelediğimiz durumda geçerli olsaydı, yukarıda izlediğimiz düşünce şek - line göre, süreksizlik sınırının değerlerindeki hızlı değişimi görmememiz gerekirdi. Kanımızca, ilk bakışta e - lişki gibi gözüken bu durum, Taylor - Broms tarafından ya - pılan bu modellerin betonu tam olarak temsil edememesinden doğmaktadır. Bu modeller sadece 5 x 5 x25 cm boyutunda - dır ve ayrıca kalıplar yatay olarak dururken harç doldu - rulmuş ve prizini tamamlamıştır. Bu bakımdan böyle bir mo - delde taze bir beton kütlesinden yerçekiminden dolayı olu - şan oturma olayının ve bunun etkisiyle iri agregaların sı - nırlarında meydana gelen kusurların aynen gerçekleştirile - bilmesi mümkün değildir. Gerçek bir betonda Su/imento o - ranının artmasıyla oturmanın artması sonucu bu kusurlar da önemli derecede artmaktadır. Taylor - Broms'un modelinde ise bu artış aynı oranda olmaktan uzaktır. Bu düşüncemiz, zaten, Farran (35) ın harlardaki Agreg - Hamur bağlarını özel bir mikroskopik teknikle incelerken gözlediği bulgu - larla uyum halindedir. Bu araştırmacı Su/imento oranı b - ydke Agreg - Hamur sınırlarında gittikçe daha önemli temas kusurları oluştuğunu saptamıştır.

Bir agreg - tanesiyle imento hamuru arasında genel - likle 2 cins aderanstan söz edilir (35) :

1. Mekanik aderans :

Bu agreg - yüzeyinin pürüzlülüğü ve temas yüzeyin - deki kusurlar ile ilgili bir aderanstır. Pürüzlülük ne ka - dar çoksa ve kusurlar ne kadar azsa bu aderans o kadar büyük olur. Ayrıca imento taneleri ne kadar ince olursa, bunlar agreg - przlerine o kadar iyi yerleşeceklerinden, mekanik aderans o ölçüde artar. Mekanik aderans imento - nun ve agreganın cinsinden bağımsızdır (Normal sağlamlık - taki agregalar için)

2. Epitaksik aderans :

Bu daha küçük ölçekteki ve ender durumlarda gerçek - leşebilen bir aderans türüdür. Bir imentonun hidratasyo - nu sırasında bazı kristal yapılı bileşenler (rneğin Port - land imentolarında $Ca(OH)_2$ kristalleri) ilk önce ke -

lirler ve bunlar agregaların yüzeyini ince bir tabaka halinde kaplarlar. Eğer bu çökelen ince tabakanın kristal yapısı ile agreganın kristal yapısının kafes sistemleri birbirine uygunsa, bu yapılar bir süreklilik oluşturlar ve mekanik aderansa ek olarak, bu daha küçük ölçekteki epitaksial aderans da gerçekleşir.

Şayet varsa, epitaksial aderansın hamurun Su/Çimento oranından etkilenmesi beklenmez. Çünkü Su/Çimento oranının agrega yüzeyine çökelen ince tabakanın yapısını belirli derecede değiştirmesi bahis konusu olamaz.

Bu açıklamalara göre, Su/Çimento oranının artması ile İri Agregat-Harç bağ dayanımının önemli derecede azalmasının nedeni, bu durumda kusurların artması sonucu mekanik aderansın düşmesidir.

Şimdi E/C nin 0.40 ilâ 0.60 arasında değiştiği bölgenin dışına çıkalım. Bu bölgenin gerek solunda ($E/C < 0.40$) gerekse sağında ($E/C > 0.60$) A ve B granülometrilili betonların süreksizlik sınırları artık eşit değildir ; her 2 bölgede de A granülometrisine sahip betonların süreksizlik sınırları daha yüksektir.

E/C nin 0.40 dan küçük olduğu bölgede A granülometrisine sahip betonların eğrisinde bir sapma görülüyor ; eğri $0.40 < E/C < 0.60$ bölgesindeki gibi devam ediyor (Sadece E/C - A - 0.27 karışımına ait değerin düşük olduğu görülüyor. Bu, çok kuru olan bu karışımın yerleştirilmesinde başarılı olunamadığını gösteriyor). Buradan A betonlarının kırılma mekanizmalarının bu bölgede de yukarıda incelenen $0.40 < E/C < 0.60$ bölgesindeki gibi olduğu düşünülebilir.

Bu bölgede B betonlarına ait eğrinin E/C küçüldükçe eğiminin azaldığı görülüyor. Kanımızca bu durum B betonlarının bu bölgede gittikçe zor yerleştirilebilir hale gelmesinden doğmaktadır. Kötü yerleşme daha küçük İri Agregat-Harç bağ dayanımlarına ve dolayısıyla daha küçük süreksizlik sınırlarına yol açmaktadır.

Özetlemek gerekirse $E/C < 0.40$ bölgesinde $0.40 < E/C < 0.60$ bölgesine nazaran gözlenen farklar bu bölgede betonların daha zor yerleştirilebilmesinden doğmaktadır. Eğer bu bölgede de iyi bir yerleştirme sağlanabil-

seydi, $0.40 < E/C < 0.60$ bölgesindeki eğriler bir kırıklık göstermeden devam edecekti .

$E/C > 0.60$ bölgesinde ise çok farklı bir durumla karşılaşılıyor. A betonlarında $E/C = 0.60$ a kadar süren hızlı düşüş burada duruyor ve süreksizlik sınırı buradan itibaren yükselmeye başlıyor. B betonlarında ise $E/C = 0.60$ a kadar görülen hızlı düşüş bu bölgede daha yavaş bir düşüş halini alıyor.

E/C oranı arttığı, yani hamur zayıfladığı halde, A betonlarının süreksizlik sınırları neden yükseliyor ve B betonlarının süreksizlik sınırlarındaki düşme hızı neden azalıyor ?

Bu olayları bağlayıcı hamur (dolayısıyla harç fazı) zayıfladıkça iri agregaların yük altında birbirlerine daha iyi kenetlenebilmeleri ile açıklayabiliriz. İri agregaların daha sık bulunduğu A betonlarında iri agregaların kenetlenerek betonun taşıyıcı gücüne yaptıkları katkı daha büyük olmuş ve süreksizlik sınırı $E/C = 0.60$ dan itibaren yükselmeye başlamıştır. İri agregaların daha seyrek bulunduğu B betonlarında ise bu olumlu katkı daha az olmuş ve ancak süreksizlik sınırındaki düşme hızı azalmıştır.

Şimdi bu "kenetlenme" olayının niteliğini ve bunun doğurduğu sonuçları biraz daha açıklamaya çalışalım. Betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde aslında tam olarak doğrusal bir kısım en başlarda bile yoktur. Ancak basınç dayanımının $1/3$ üne kadar $\sigma - \epsilon$ eğrisinin yaklaşık olarak doğrusal olduğu kabul edilmektedir. Bu durum bizim deneylerimizde de (bazen daha yüksek değerlere kadar korunarak da) sağlanmıştır. Bu bölgede henüz uygulanan yükten dolayı önemli derecede bir çatlak teşekkülü olmamıştır ; burada betonu yaklaşık olarak elâstik harç matrixi içinde dağılı iri agrega enklüzyonlarından (bunların zaten beton kırılana kadar elâstik davranış içinde bulundukları söylenebilir) oluşan elâstik bir kompozit malzeme gibi düşünebiliriz. Mikroçatlaklar oluşmağa başladığında önce İri Agreg-Harç bağlarının rijitliği, sonra da yavaş yavaş harcın rijitliği azalmağa başlar. Böylece yük artıkça beton daha zayıf bir malzeme olur (Şekildeğiştirme yumuşaması gösteren malzeme = Strain Softening material). Elâstiklik modülü (ϵ)

gittikçe düşme ve gerilme-şekildeğiştirme eğrisi gittikçe yatıklaşma eğilimine girer. Ancak bu olaylar bir yandan bu şekilde gelişmekte iken, diğer yandan betonun basınç yükleri altında gittikçe hacmi küçülmekte ve bundan dolayı iri agregalar birbirine yaklaşmaktadır. İşte bu sırada yavaş yavaş bu iri agregaların birbiriyle kenetlenmeye başlamasından doğan olumlu (yani betonun taşıma gücünü artırıcı) bir etki betonu zayıflatan mikroçatlak gelişimi olayının karşısına çıkar. Bu iki zıt etki birlikte gelişerek çözülme sınırına varılır. Çözülme sınırında artık mikroçatlaklar harç içinde çok fazla yayılmış ve bu fazı çok zayıflatmış olduklarından, adeta labil bir duruma geçmiş harç fazı içinde kenetlenme olayı da artık süremez ve betonun tümüyle hacmi artmaya başlar. Bundan sonra betonu basınç dayanımına kadar sadece iç sürtünme kuvvetleri taşır.

Kenetlenme olayı hangi koşullarda etkilidir ?

Akman (7) ın sonuçlarına göre bu olay İri Agregat/Kum oranının 1 den büyük değerleri için ortaya çıkmakta ve bu oran artıkça daha etkin bir hal almaktadır. Buradaki sonuçlardan ise bu kritere bir etken daha katabiliriz : Kenetlenme olayı zayıf hamurlu betonlarda etkilidir. Çünkü E/C nin 0.60 dan küçük değerleri için Şekil 3.32 den görüldüğü gibi süreksizlik sınırı A ve B betonlarında eşittir (E/C nin 0.40 dan küçük değerlerindeki ayrılmanın aslında iyi yerleştirilememekten doğan yanlıtıcı bir ayrılma olduğu söylenmişti). Şekil 3.33 ve 3.34 den çözülme sınırı ve basınç dayanımı için de aynı durumun geçerli olduğunu görüyoruz. Halbuki A betonu B betonuna göre önemli derecede daha fazla iri agregat içermektedir. Eğer kenetlenme olayı E/C nin 0.60 dan küçük değerleri için de etkili olsaydı bu bölgede de A granülometrisine ait eğrilerin daha üstten gitmesi gerekirdi. Halbuki ancak E/C nin 0.60 dan büyük değerleri için A eğrisi B eğrisinin üstüne çıkıyor. Demek ki kenetlenme olayı buradan itibaren etkili olmaya başlamaktadır. Buna göre diyebiliriz ki, orta derecede sağlam veya sağlam bir hamur (dolayısıyla harç) iri agregaların kenetlenme etkisini engelleyici bir rol oynamaktadır. İri agregaların arasındaki zayıf bir harç ise iri agregaların kenetlenmesine izin vermektedir. Burada $E/C = 0.60$ değerini değişmez bir büyüklük olarak görmek yanlış olur. Bu değer herhalde hidratasyon derecesine bağlı olacaktır. Çünkü buradaki gibi

hidratasyonunu büyük ölçüde tamamlamış değil de, daha genç hamurlar sözkonusu olsaydı, doğal olarak bunların dayanımları da daha düşük olacak ve böylece kenetlenme olayı E/C nin daha küçük değerlerinde ortaya çıkacaktı.

Kenetlenme olayından dayanımların (Süreksizlik ve çözülme sınırları ile basınç dayanımı) etkilendiğini gördük . Şimdi kenetlenme olayının şekildeğiştirmeler üzerindeki etkisini inceleyelim. Şekil 3.37 den süreksizlik sınırındaki birim kısalmanın, Şekil 3.38 den çözülme sınırındaki birim kısalmanın, Şekil 3.39 dan basınç dayanımındaki birim kısalmanın, Şekil 3.42 den süreksizlik sınırındaki enine birim uzamanın, Şekil 3.43 den çözülme sınırındaki enine birim uzamanın, Şekil 3.44 den süreksizlik sınırındaki birim hacımsal şekildeğiştirmenin, Şekil 3.45 den çözülme sınırındaki birim hacımsal şekildeğiştirmenin dayanımlara benzer şekilde kenetlenme olayından etkilendikleri görülmektedir. Aradaki ufak tefek farklar bir yana bırakılırsa, durum hem gerilme, hem de şekildeğiştirme değerleri için aynıdır : A betonlarında E/C nin yaklaşık olarak 0.60 dan daha büyük değerlerinde kenetlenme olayının ortaya çıkması, A betonunda süreksizlik sınırına, çözülme sınırına ve basınç dayanımına varılmasını hem gerilmeler bakımından hem de şekildeğiştirmeler bakımından geciktirmiştir. Yani E/C lerin bu bölgesinde E/C oranı arttığında A betonlarında kenetlenme olayının daha çok açığa çıkmasıyla süreksizlik sınırına, çözülme sınırına ve basınç dayanımına gittikçe daha büyük gerilmelerde ve daha büyük şekildeğiştirmelerde varılmaktadır.

Bütün bunlardan, kenetlenme olayının bir "sıkışıp kalma" olayı olmayıp, betonun süreksizlik ve çözülme sınırlarına varmasını erteleyen (yani betonun bu sınırlara varmasına ancak daha büyük şekildeğiştirmelerden sonra izin veren) bir olay mahiyetinde olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü, esasen, bu olay esnasında normal betonlarda (prepakt olmayan) iri agregalar sıkışıp kalacak kadar birbirine yakın değildir.

Kenetlenme olayının elâstiklik modülü üzerinde bir etkisi doğal olarak söz konusu değildir. Çünkü kenetlenme olayı yüklemenin ileri aşamalarında (gerilme-şekildeğiştirme eğrisi doğrusallıktan belirli derecede ayrıldıktan son-

ra) ortaya çıkmaktadır. Elâstiklik modülü ise ilk ufak yüklerdeki şekildeğiştirmelerle ilgilidir. Bu durum Şekil 3.29 da açıkça görülmektedir. Belki daha ilginç olanı, süreksizlik sınırındaki Poisson oranı üzerinde de bir etkinin bulunmamasıdır (Şekil 3.30). Çünkü, yukarıda görüldüğü gibi, E/C si 0.60 dan büyük betonlarda açığa çıkan kenetlenme olayı süreksizlik sınırını ve bununla ilgili şekildeğiştirmeleri etkiliyordu. Süreksizlik sınırındaki Poisson oranını etkilememesi bu sınırdaki boyuna ve enine şekildeğiştirmeleri aynı yönde (mutlak değerlerini artırıcı yönde) etkilemesiyle bir ölçüde açıklanabilir. Ancak burada betonun Poisson oranının çok karmaşık karakteri unutulmamalıdır. Bu konuya ileride değinilecektir.

Kenetlenme olayını ve bunun etkilerini bu şekilde gördükten sonra, şimdi daha yukarıda tarif ettiğimiz "hamurun mikroyapısına duyarlı özellik" kavramına, o sırada zorunlu olarak eksik bıraktığımız bazı hususları tamamlamak bakımından dönmek uygun olacaktır. Önce Şekil 3.32 de süreksizlik sınırının Su/Çimento oranı ile değişimini gözönüne alalım. Gördük ki, eğer E/C nin 0.40 dan küçük değerleri için ortaya çıkan yerleştirme zorlukları olmasaydı A ve B granülometrilere ait eğriler bütün E/C < 0.60 bölgesinde çakışacaklardı. Yani bütün bu bölgede hamurun mikroyapısı süreksizlik sınırının değerini belirleyen tek etken olacaktı (Bu genel anlamda anlaşılmamalıdır. Daha önce de belirttiğimiz gibi, bizim araştırmamızda seçtiğimiz sınırlar içinde kaldığımızı düşünüyoruz. Bundan sonraki düşüncelerimizde de bu sınırlar içinde bulunduğumuzu kabul edeceğiz). Öyleyse bu bölgede süreksizlik sınırı hamurun mikroyapısına duyarlı olduğundan başka, yalnızca bu mikroyapı tarafından belirlenmektedir. E/C > 0.60 bölgesinde ise süreksizlik sınırı yine hamur mikroyapısına duyarlı olarak kalmakta, ancak işin içine bir de kenetlenme olayı girmektedir. Böylece bu bölgede süreksizlik sınırının değerini hamurun mikroyapısı ve kenetlenme olayı birlikte saptamaktadır.

Tamamen aynı durum, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırı ile ilgili bütün şekildeğiştirme özellikleri için de geçerlidir (Şekil 3.33, 34, 37, 42, 44).

Dikkati çeken husus şudur : Çözülme sınırı ve basınç dayanımı E/C < 0.60 bölgesinde yalnızca hamurun mikroyapısı

tarafından belirlenirken, bunlarla ilgili şekildeğiştirmeler ayrıca betonun granülometrisinden etkilenmektedir. Bu bölgedeki çözülme sınırı ve basınç dayanımı ile ilgili bütün şekildeğiştirmelerin B tipi betonlarda daha yüksek olduğu (çok kuru betonlarda yerleştirme zorluğundan çıkan farklar bir yana bırakılırsa) görülmektedir (Şekil 3.38, 3.39, 43, 45). Bunu şöyle açıklayabiliriz: Süreksizlik sınırını aşan bir betonda çatlak ilerlemesi artık harç fazında olur (Bu çözülme sınırına kadar yavaş, çözülme sınırından sonra hızlı bir çatlak ilerlemesi şeklindedir). Harç fazında yeni mikroçatlaklar oluştukça beton gittikçe daha kolay şekildeğiştirebilen bir malzeme (şekildeğiştirme yumuşaması gösteren malzeme) haline gelir ve boyuna ve enine şekildeğiştirme eğrileri gittikçe yatıklaşır. Betonda harç fazı ne kadar çoksa bu fazda oluşabilecek mikroçatlak miktarının ve dolayısıyla malzemede süreksizlik sınırı ile çözülme sınırı arasında meydana gelecek şekildeğiştirmelerin o kadar çok olacağını düşünebiliriz. Kanımızca, işte bu yüzden süreksizlik sınırındaki şekildeğiştirmeler A ve B betonlarında eşitken, çözülme sınırında (bu betonlarda süreksizlik ve çözülme sınırlarının değerlerinin eşit olmasına rağmen) B betonunda meydana gelen şekildeğiştirmeler daha fazla olmuştur. B betonlarında çözülme sınırına kadar daha fazla şekildeğiştirme meydana geldiğinden, bunun etkisiyle, çözülme sınırından biraz sonra gelen basınç dayanımındaki şekildeğiştirmeler de daha fazla olmuştur. $E/C > 0.60$ bölgesinde ise, çözülme sınırı ve basınç dayanımındaki şekildeğiştirmeleri belirleyen bu etkenlere, bir de, bilhassa A betonlarında çok etkin olan kenetlenme olayı katılmaktadır. Kenetlenme olayının çözülme sınırı ile ilgili şekildeğiştirmelerde önemli olduğunu görüyoruz : Çünkü en sulu $E/C = 0.67$ ve 0.75 betonlarında, bu olayın etkisiyle çözülme sınırındaki şekildeğiştirmeler A betonlarında B betonlarından daha fazla olabilmektedir (Şekil 3.38, 43, 45). Yine bu olayın etkisiyle basınç dayanımındaki birim kısalma en sulu ($E/C = 0.75$) A ve B betonlarında yaklaşık olarak eşit olmaktadır (Şekil 3.39).

En zayıf betonların bazılarının inelastik davranışlarında, yukarıda belirtilen etkenlerden başka, bir de "boşlukların yük altında yerleşmesi" mekanizmasının katkısı vardır. Şekil 3.7, 13 ve 14 de $E/C - A - 0.75$, $E/C - B - 0.67$ ve $E/C - B - 0.75$ betonlarında (Bilhassa B tipindeki son

2 betonda) Poisson oranının süreksizlik sınırına varılmadan önce belirli derecede bir azalma gösterdiği ve süreksizlik sınırından sonra hızla arttığı görülmektedir. Süreksizlik sınırına kadar olan azalma, fazla boşluklu olan bu betonlarda, bu boşlukların yük altında yerleşmesinden ve böylece yanal genişlemelerin fazla olamamasından doğmaktadır. Bu betonlarda dikkati çeken bir diğer husus, boyuna şekildegıştirme eğrisinin orantı sınırının, Poisson oranının değışi miyle tariflenen süreksizlik sınırının bir hayli altında olmasıdır. Bu durum, bu tür betonlarda mikroçatlak oluşumunun süreksizlik sınırından evvel başlayabileceğini, ancak Poisson oranındaki artışların, boşlukların yerleşmesinden dolayı gecikebileceğini düşündürmektedir. Bu konu, yine bu paragraf içinde, biraz ileride "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı"nın değışimi incelenirken daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Şimdi, "hamurun mikroyapısına duyarlı özellik" kavramına (Daha önce de belirttiğimiz gibi genel anlamda olmayıp araştırmamızdaki sınırlar içinde), son vardığımız sonuçları da gözönüne alıp, daha iyi bir açıklık getirebiliriz :

Betonda yük altında tahribat başlamadan önceki mekanik özellikler (örneğin elastiklik modülü) hamurun mikroyapısına duyarlı değildir. Bunlar agregalar arasına giren jel miktarından etkilenmektedir. Betonda tahribatın (Mikroçatlakların) başlamasıyla birlikte ortaya çıkan bütün özellikler hamurun mikroyapısına duyarlıdır. Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırındaki bütün şekildegıştirmeler, kenetlenme olayının etkin olduğu yüksek ve orta dayanımlı betonlarda, yalnızca hamurun mikroyapısı tarafından saptanmaktadır. Yine kenetlenme olayının etkin olmadığı betonlarda, çözülme sınırındaki ve basınç dayanımındaki şekildegıştirmeler, hamurun mikroyapısından başka, bir de agrega granülometrisi tarafından saptanmaktadır. Kenetlenme olayının etkin olduğu betonlarda (zayıf betonlar) bu esaslar aynen geçerli olmakta, ancak tahribat başladıktan sonra ortaya çıkan bütün özelliklerde (eğer iri agregaya yeterli miktarda ise) bir de kenetlenme olayı etkili olmaktadır. Yani bu betonlarda süreksizlik sınırını, çözülme sınırını, basınç dayanımını ve süreksizlik sınırındaki bütün şekildegıştirmeleri "Hamurun Mikroyapısı" + "Kenetlenme Olayı", çözülme sınırı ve basınç dayanımındaki bütün şekildegıştirmeleri de, "Hamurun Mikroyapısı" + "Ag -

rega Granülometrisi" + "Kenetlenme Olayı" saptamaktadır. Bir de en zayıf betonların bazılarında "boşlukların yük altında yerleşmesi" mekanizmasının katkısı olmaktadır.

Fiziksel Metalürjide bir metal içinde sürekli ağ oluşturan fazın o metale kendi özelliklerini büyük ölçüde kazandırdığı kabul edilir. Yukarıdaki sonuçlar bu düşüncenin beton için de geçerli olabileceğini düşündürmektedir. Bağlayıcı hamurun mikroyapısının betonun inelastik davranışı ile ilgili bütün özelliklerde katkısı vardır. Agregaları bir arada tutarak "beton" olmasını sağlayan bağlayıcı hamur etkisini inelastik davranışın bütün aşamalarında duyurmaktadır. Agreg granülometrisi ve Su/Çimento oranı uygulamada kullanılan sınırlar içinde kaldığı sürece süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırındaki şekildeğiştirmeler başlıca hamurun mikroyapısı tarafından saptanmaktadır ; diğer inelastik özelliklerin (çözülme sınırındaki ve basınç dayanımındaki şekildeğiştirmeler) belirlenmesinde agrega granülometrisinin de katkısı olmaktadır . Ayrıca zayıf betonlarda ($E/C > 0.60$) iri agreganın yük altında kenetlenmesi ve bazen de boşlukların yerleşmesi etkin olmaktadır.

Özetlemek gerekirse, betonun kısa süreli inelastik davranışında (bizim E/C serisinde incelediğimiz sınırlar içinde) şu etkenlerin katkısı olmaktadır :

1. Hamurun mikroyapısı (kılcal boşluk yapısı)
2. Agreganın granülometrisi
3. Kenetlenme olayı
4. Boşlukların yük altında yerleşmesi

Aslında bu 4 etkenin sadece 2 yapısal etkene indirgenebileceği kolaylıkla görülebilir. Çünkü, 4 ncü etken hamurun fazla boşluklu olmasıyla ilgilidir ve birinci etkenle (hamurun mikroyapısı = kılcal boşluk yapısı) birlikte düşünüldüğünde bu ikisi kısaca "hamurun yapısı" olarak adlandırılabilir. 3 ncü etken ise "Hamurun yapısı" ve "Agreganın granülometrisi" etkenlerinin bazı koşulları sağlaması durumunda ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bağımsız

bir etken değildir. Demek ki incelediğimiz sınırlar içinde, betonun inelastik davranışı 2 etken tarafından belirlenmektedir :

1. Hamurun yapısı
2. Agreganın granülometrisi

Bunlar zaten bizim E/C serisinde değiştirdiğimiz 2 değişkenden başka bir şey değildir. Ancak önemli olan şudur: Hamurun yapısı inelastik davranış ile ilgili her özeliği etkilemektedir. Agreganın granülometrisinin ise ancak bazı özelliklere katkısı olmaktadır.

Bu sonuçlar genel olarak düşünülürse, doğal kum ve çakılla uygulamadaki bileşim sınırları içinde yapılan betonların kısa süreli inelastik davranışında bağlayıcı hamurun yapısının temel rolü oynadığı söylenebilir. Agreganın granülometrisinin işlevi bu temele katkılar koymak şeklindedir.

Hamurun mikroyapısına duyarlı özelliklerde taze beton içindeki hava boşluğunun belirli sınırlar içinde önemli bir etkisi olmadığını yukarıda görmüştük. Burada, bu özellikler üzerinde, yine belirli sınırlar arasında kalmak koşuluyla, çimento dozajının da önemli bir etkisi olmadığını belirtelim. Gerçekten A ve B betonlarının önemli bir bölümünde dozajlar belirli derecede fark ettiği halde E/C oranları aynı olduğu için süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırındaki şekildeğiştirmeler eşittir. Bunlara aşağıdaki örnekler verilebilir :

E/C Oranı	A Betonunun Dozajı (kg/m ³)	B Betonunun Dozajı (kg/m ³)
0.43	358	319
0.51	326	287
0.59	304	266

Bu sonuç zaten beton dayanımı formüllerinde gözönüne alınmaktadır. Yukarıdaki bu konuyla ilgili kısımlarda da görüleceği gibi çimento dozajı mutlak değer olarak hiç-

bir formülün içinde yer almamaktadır. Bizim sonuçlarımıza göre, normal uygulama sınırları içinde çimento dozajı basınç dayanımından başka, hamurun mikroyapısına duyarlı diğer özellikleri de etkilememektedir. Ancak bunun için de taze beton içindeki hapsolmuş havanın etkisini tartışırken belirttiğimiz hava boşluğu sınırlarının aşılması gerekir.

Şimdi E/C serisi içinde elde edilen sonuçları ince - lemeye devam edelim :

Şekil 3.35 de Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı oranının Su/Çimento oranı ile değişimi verilmektedir. Su/Çimento oranının, süreksizlik sınırının mutlak değerini olduğu gibi, bu sınırın basınç dayanımına olan oranını da önemli ölçüde etkilediği şekilden görülmektedir. Gerek A, gerekse B betonlarında eğrilerin sol tarafında (E/C oranının küçük olduğu bölge), E/C oranı büyüdükçe σ_D/R oranının düştüğü görülmektedir. Buradan, bu bölgede, E/C oranının düşmesiyle süreksizlik sınırındaki düşüşlerin basınç dayanımındaki düşüşlerden daha fazla olduğu (veya süreksizlik sınırının basınç dayanımına göre hamurun mikroyapısına daha duyarlı olduğu) sonucu çıkmaktadır. E/C oranının bağ dayanımlarını beton basınç dayanımına oranla daha fazla etkilediği de söylenebilir. Eğrilerin sağ tarafında ise (Büyük E/C oranları) E/C oranı büyüdükçe σ_D/R oranının da büyüdüğü görülmektedir. Yalnız eğrilerdeki yükselme, A betonlarında, B betonlarına göre çok daha belirlidir. Süreksizlik sınırının E/C oranıyla değişiminin incelenmesinde ileri sürülen düşünceler hatırlanırsa, bu yükselmelerin de iri agregaların yük altında kenetlenmeleriyle ilgili olduğu kolaylıkla anlaşılır. Buradaki sonuçlar kenetlenme olayının süreksizlik sınırını basınç dayanımına göre daha çok artırdığını göstermektedir. Burada, zayıf betonlarda, Poisson oranında önemli artışların başladığı sınır olarak tarif edilen süreksizlik sınırının "Gerilme - Boyuna kısalma" eğrisinin orantı sınırının epeyi üstünde bulunduğu hatırlanmalıdır. Bu durumda, büyük bir olasılıkla, İri Agregalar sınırlarındaki bağ çatlakları orantı sınırında başlamakta fakat iri agregası çok olan A betonlarında o sıralarda etkili olmaya başlayan kenetlenme olayından dolayı, hava boşluğu fazla olan B betonlarında ise, boşlukların yük altında yerleşmesi henüz tamamlanmamış olduğundan, Poisson oranındaki (veya yanal genişlemelerdeki) hızlı artış bir

süre gecikmektedir. Bu bakımdan zayıf betonlarda süreksizlik sınırını Poisson oranındaki hızlı artışa bağlamak hatalı görülmektedir ; büyük bir olasılıkla mikroçatlaklar bu hızlı artışın ortaya çıkmasından daha önce (orantı sınırı civarında) başlamaktadır. Dikkat edilirse, zayıf betonlarda, yanıl genişlemelerdeki hızlı artışın mikroçatlakların ilk oluşmasına göre ertelenmesi, A ve B betonlarında farklı nedenlere dayanmaktadır. İri agreganın fazla, hava boşluklarının az olduğu A betonlarında bunun başlıca nedeni kenetlenme olayıdır. İri agreganın daha az, hava boşluğunun fazla olduğu B betonlarında ise bunun başlıca nedeni boşlukların mikroçatlaklar başladıktan sonra da yerleşmeye devam etmesidir . Şekil 3.35 den, bu 2 farklı mekanizmadan kenetlenme olayının yanıl genişlemelerdeki artışı ertelemeye çok daha etkin olduğu görülmektedir. Çünkü A betonlarında süreksizlik sınırı (Poisson oranının hızlı artışı) basınç dayanımına B betonlarına göre daha çok yaklaşmıştır. Bunu şu şekilde yorumlayabiliriz : A betonlarında, yanıl genişlemelerin hızlı artışı kenetlenme olayı etkisiyle harç fazında epeyi mikroçatlak meydana gelene kadar ertelenmiştir. Çünkü bu hızlı artıştan kısa bir süre sonra çözölme sınırına ve basınç dayanımına ulaşmaktadır. Buna karşı B betonlarında boşluklar yerleşip Poisson oranındaki hızlı artış başladığında mikroçatlaklar harç fazına o kadar çok yayılmamıştır. Bundan dolayı çözölme sınırına ve basınç dayanımına varılması epeyi sonra olmaktadır.

Şekil 3.40 da "Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısalma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısalma" oranının Su/Çimento oranına göre değişimi görülmektedir. Buradaki eğrilerin gidişi Şekil 3.35 deki "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" eğrilerinininkine benzemektedir. Hamurun mikroyapısı şekildeğiştirmelerin bu oranını da önemli derecede ve gerilmelerin oranıyla aynı yönde etkilemektedir. Bu eğrilerin gidişindeki değişimler de aynı iç yapı olaylarına bağlıdır.

Şekil 3.36 da "Çözölme Sınırı/Basınç Dayanımı" oranının Su/Çimento oranıyla değişimi görülmektedir. Bu değişim "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" nın değişimine oldukça benzemektedir, yalnız değişim aralıkları çok daha ufaktır. E/C nin küçük değerlerinde, E/C oranı büyüdükçe "Çözölme Sınırı/Basınç Dayanımı" oranı yavaş bir düşme göstermektedir. Bunu şu şekilde düşünebiliriz : E/C oranı bü-

yüyükçe harcın çekme dayanımının düşmesiyle çözülme olayı, yani harç içinde sürekli bir çatlak ağı oluşumu daha düşük bir gerilmeye olur. Bundan sonra betonu ancak iç sürtünme kuvvetleri taşıyacaktır. Bu duruma ne kadar küçük bir gerilme altında varılırsa, yük artmaya devam ederken iç sürtünme kuvvetlerinin betonu taşıyabileceği süre o kadar uzun olur. Bu duruma yüksek bir gerilmeye varılmışsa, bu yüksek gerilme iç sürtünme kuvvetlerini çabukça yener ve basınç dayanımına varılır.

E/C nin büyük değerlerinde, E/C oranı büyüdükçe "Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı" oranı da, A betonlarında daha belirli olmak üzere bir artış göstermektedir. Gerek A, gerekse B betonlarındaki bu artış E/C oranının bu yüksek değerlerinde hamurun boşluklu olmasından doğmaktadır. Boşluklu bir hamura sahip bir betonda, çözülme sınırından sonra betonu taşıyabilecek iç sürtünme kuvvetleri pek doğamamaktadır. Artışın A betonlarında B betonlarına göre daha fazla olmasını ise, bu betonlarda kenetlenme olayının etkisiyle çözülmenin gecikmesine bağlamak uygun olacaktır. Çözülme olayı iri agregaların kenetlenmesinden dolayı geciktiği için daha yüksek bir gerilmeye meydana gelmektedir. Ancak A betonlarında bir kere çözülme olunca, gerilme bu gecikmeden dolayı yükselmiş olduğu için iç sürtünme kuvvetleri çabuk yenilip basınç dayanımına kısa bir süre sonra varılmaktadır.

Şekil 3.41 de "Çözülme Sınırındaki Birim Kısalma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısalma" oranının Su/Çimento oranı ile değişimi görülmektedir. Genel gidiş "Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı" eğrilerinden çok farklı değildir ; yalnız B betonları için zayıf betonlar bölgesinde bir yükselme yoktur. Zayıf betonlar bölgesindeki bu durum Şekil 3.36'nın değerlendirilmesinden çıkan sonuçlarla birlikte düşünüldüğünde şu şekilde bir sonuca varılabilir : Bir betonda bağlayıcı hamurun boşluklu olması çözülme sınırını basınç dayanımına yaklaştırmaktadır. Ancak gerilmeler bu şekilde birbirine yaklaşırken, çözülme sınırındaki ve basınç dayanımındaki birim kısaltmalar, yalnızca hamurun boşluklu olmasından dolayı birbirine yaklaşamamaktadır. Ancak boşluklu hamur yapısına ek olarak bir de kenetlenme olayından dolayı çözülmenin belirli bir şekilde gecikmesi olgusu varsa, o zaman birim kısaltma değerleri de birbirine yaklaşmaktadır. Şekil 3.41 de dikkati çeken bir başka husus, değişim

aralıklarının gerilmelerin oranının değişimlerine göre (Şekil 3.36) çok daha büyük olmasıdır. "Çözülme Sınırındaki Birim Kısılma/Basınç Dayanımındaki Birim Kısılma" oranı, Su/Çimento oranının değişmesiyle 0.55 ilâ 0.96 arasında değişen değerler olmaktadır. Bu oranın, Shah-Chandra (10) tarafından, betonun inelastik davranışında Su/Çimento oranının etkisinin incelenmesinde kullanılan ve Şekil 1.1 de ordinat eksenini oluşturan oran olduğunu hatırlatalım. Shah-Chandra, pek sistematik olmayan deney sonuçlarına dayanarak, bu oranın Su/Çimento oranından az etkilendiği ve buradan da Su/Çimento oranının betonun kısa süreli inelastik davranışını pek etkilemediği sonucuna varıyorlardı. Şekil 3.41 de, konu sistematik olarak incelendiğinde, bu oranın da Su/Çimento oranından, veya daha genel bir deyimle hamurun yapısından önemli derecede etkilendiği görülmektedir,

Şekil 3.47 de süreksizlik sınırındaki Poisson oranının Su/Çimento oranı ile değişimi görülmektedir. Burada E/C nin 0.51 değerine kadar, A ve B betonlarında Poisson oranının hemen hemen eşit olduğu görülmektedir; buna karşı Jel/Hacim oranına göre çizilen eğride (Şekil 3.30) bu uyum sağlanmamaktadır. Buradan süreksizlik sınırındaki Poisson oranının hamurun mikroyapısına duyarlı bir özellik olduğu söylenebilir.

Neville (24), Poisson oranının betonun yaşı, dayanımı ve diğer özellikleriyle değişimi hakkında güvenilir bir bilginin elimizde bulunmadığını belirttikten sonra, genellikle yüksek dayanımlı betonlarda Poisson oranının daha düşük olduğunun sanıldığını söylüyor. Şekil 3.47 deki eğriler genellikle bu kanının ters yönünde bir gidiş göstermektedirler. A granülometrilili betonlarda (Yerleşmenin tam sağlanamadığı 0.27 Su/Çimento oranlı betonun dışında), E/C oranı büyüdükçe, yani dayanım düştükçe Poisson oranı sürekli ve belirli bir şekilde düşmektedir. Buna karşı B tipi betonlarda düşüş E/C oranının 0.51 değerine kadar sürmekte, bundan sonra Poisson oranı sabit kalmaktadır. Ancak, bunun dışında, Poisson oranı, gerek uygulanan gerilme ile, gerekse hamurun yapısı ile karmaşık değişimler göstermektedir. Şekil 3.48 de, basınç dayanımının % 40 ında Poisson oranının aldığı değerini çizilmiştir. A betonlarının Poisson oranlarında E/C nin artmasıyla görülen düşme, bu gerilme düzeyinde de ortaya çıkmaktadır. Buna karşı burada B betonlarının Poisson oranları Su/Çimento oranından etki-

lenmemektedir. Bundan başka, Poisson oranının değişimi, hamurun yapısından da çok etkilenmektedir. İleride ele alınacak diğer serilerde, hamur içine çeşitli katkıları katıldığında, bazı durumlarda dayanım arttıkça Poisson oranının düştüğü de gözlenmiştir. Bu karışık durum, kanımızca Poisson oranının yüklerle beraber değişiminin, çeşitli hamur yapılarında çok farklı şekiller almasından ortaya çıkmaktadır. Ancak E/C serisinin içinde kalırsak, doğal kum ve çakılla normal Portland çimentosu kullanılarak yapılmış, granülometrisi uygulama sınırları içinde kalan ve hidrasyonu büyük ölçüde tamamlamış betonların Poisson oranlarının, hamurun dayanımı arttıkça yükselme veya sabit kalma eğiliminde olduğunu söyleyebiliriz.

4.2. E/C serisi deneylerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar

E/C serisi deneylerinin değerlendirilmesinden başlıca aşağıdaki sonuçlara varılabilir.

1. Bilindiği gibi gerilme-şekildeğiştirme diyagramında tamamen doğrusal bir kısım yoktur : bununla beraber dayanımın 1/3 üne kadar diyagramın yaklaşık olarak doğrusal olduğu ve burada yük altında iç tahribatın (mikroçatlakların) henüz oluşmadığı kabul edilebilir. Bu bölgedeki mekanik özellikler (örneğin elastiklik modülü) üzerinde bağlayıcı hamurun katkısını en iyi bir şekilde Jel/Hacim oranı temsil etmektedir. Başka bir deyimle, bu özellikler hamurun kılcal boşluk yapısına (mikroyapısına) değil, agrega taneleri arasına giren jel miktarına bağlıdır. Bu bakımdan bu özelliklere "hamurun mikroyapısına duyarlı olmayan özellikler" denmesi uygun olur. Gerilme-şekildeğiştirme eğrisi orantı sınırını aştıktan sonra betonda mikroçatlak oluşumu başlar. Bu bölgede ortaya çıkan özellikler (süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve bunlarla ilgili şekildeğiştirme değerleri) üzerinde bağlayıcı hamurun katkısını en iyi bir şekilde Su/Çimento oranı temsil etmektedir. Yani bu özellikler -betonda hapsolmuş hava boşluğu % 4-5 i aşmadıkça-(hapsolmuş hava ile ilgili olarak aşağıdaki 9 uncu maddedeki uyarı geçerli olmak koşuluyla) agrega taneleri arasına giren toplam jel miktarına değil, hamurun kılcal boşluk yapısına bağlıdır. Bu bakımdan, bu özelliklere "hamurun mikroyapısına duyarlı özellikler" denmesi uygun olur.

2. İyi bir şekilde yerleşmiş, granülometrilere uygun - lamadaki normal sınırlar içinde değişen doğal kum ve çakılla yapılmış ve hidratasyonlarını büyük ölçüde tamamlamış betonların çeşitli inelastik özelliklerini saptayan etkenler aşağıdaki şekilde özetlenebilir :

a) Yüksek ve orta dayanımlı betonlarda, süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırındaki bütün şekildeğiştirmeler yalnızca hamurun mikroyapısı tarafından saptanmaktadır. Çözülme sınırındaki ve basınç dayanımındaki şekildeğiştirmeler ise, hamurun mikroyapısından başka, bir de agrega granülometrisi tarafından saptanmaktadır.

b) Zayıf betonlarda, yukarıdaki esaslar aynen geçerli olmakta, yalnız bu betonların inelastik özelliklerinde (eğer iri agrega yeteri kadar varsa) bir de iri agreganın yük altında kenetlenmesi etkili olmaktadır. Bir de bazı zayıf betonlarda boşlukların yük altında yerleşmesi inelastik davranışta etkili bir mekanizma olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu sonuçlara göre, bağlayıcı hamurun mikroyapısı, her durumdaki bütün inelastik özellikler üzerinde etkilidir. Agreganın granülometrisi ise ancak bazı durumlardaki bazı özellikler üzerinde etkilidir. Buna göre, yukarıda tarif edilen betonların basınç altındaki kısa süreli inelastik davranışında bağlayıcı hamurun yapısının temel rolü oynadığı söylenebilir. Agreganın granülometrisinin işlevi bu temele katkılar koymak şeklindedir.

Yukarıda açıklanan etkiler altında, E/C serisi betonlarının inelastik özellikleri (Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve bunlarla ilgili şekildeğiştirmeler) genel olarak paralel bir değişim göstermektedir. Bu değişimler aşağıdaki şekilde özetlenebilir,

a) Yüksek ve orta dayanımlı betonlarda (E/C oranının yaklaşık % 60 a kadar olduğu betonlar) Su/Çimento oranı yükseldikçe bu özellikler belirli bir şekilde düşmektedir. Kuru betonlarda yerleşmenin tam sağlanamamasından doğan farklar bir yana bırakılırsa, bu bölgede süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırındaki şekildeğiştirmeler agrega granülometrisine bağlı değildir (Granülometri uygulamasındaki normal sınırlar içinde). Buna

karşı çözülme sınırındaki ve basınç dayanımındaki şekilde-
ğiştirmeler, kumu fazla olan betonda (B betonu) daha faz-
ladır.

b) Zayıf betonlardan ($E/C > 0.60$), iri agregası faz-
la olan betonlarda (A betonu) Su/Çimento oranının artması-
yla kenetlenme olayı daha etkin bir hale gelmekte ve bunun
etkisiyle inelastik özellikler (gerilmelerle ilgili olanlar
daha az, şekildeğiştirmelerle ilgili olanlar daha çok ol-
mak üzere) büyümektedir. Bu betonlarda inelastik özellikle-
rin artmasında ikinci derecede de boşlukların yük altında
yerleşmesi mekanizması etkili olmaktadır. İri agregası az
olan betonlarda (B betonu) bu bölgede, E/C oranının artma-
sıyla $E/C < 0.60$ bölgesinde görülen düşmenin hızı azalmak-
tadır. Bunun nedenleri bu betonlarda daha az etkili olan
kenetlenme olayı ve bir de buna eklenen boşlukların yük al-
tında yerleşmesi mekanizması olarak düşünülebilir.

3. Bağlayıcı hamurun yapısı, inelastik özelliklerin
mutlak değerlerini etkilediği gibi, bunların birbirine o-
ranlarını da önemli ölçüde etkilemektedir. "Süreksizlik
Sınırı/Basınç Dayanımı", "Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı",
"Süreksizlik Sınırındaki Birim Kısalma/Basınç Dayanımında-
ki Birim Kısalma" ve "Çözülme Sınırındaki Birim Kısalma/
Basınç Dayanımındaki Birim Kısalma" oranlarının eğrileri,
her 2 granülometride de (A ve B granülometrilere), değişim
hızlarında bazı farklar görülse de, esas olarak aynı ka-
rakterdedir : Bu eğrilerin hepsi, yaklaşık olarak zayıf
betonların başladığı sınırdan minimumdan geçmektedir. Bu ge-
nel gidiş, yine 2 inci madde de belirtilen yapısal etkenler
ve iç yapıda yük altında ortaya çıkan mekanizmalardan doğ-
maktadır.

4. Genel olarak, çözülme sınırının ve basınç dayanı-
mının birbirinden belirli derecede farklı değerler alabil-
mesi için hamurun dolu bir yapıya sahip olması gerekli bir
koşul olarak görülmektedir ; E/C oranı yüksek betonların
hiçbirinde belirli bir çözülme olayına rastlanmamıştır ;
ayrıca düşük Su/Çimento oranlı $E/C-B$ betonlarında bile hap-
solmuş hava oranı % 5 civarında olduğu için basınç dayanı-
mı çözülme sınırından belirli bir şekilde farklı değildir
(Aşağıdaki 5.paragrafta bahsedilen sızıntılarla hamur daha
dolu bir hale gelmemişse).

Betonda bağlayıcı hamurun boşluklu bir yapıya sahip olması çözülme sınırını ve basınç dayanımını birbirine yaklaştırırken, bu gerilme düzeylerindeki birim kısaltmalar, yalnızca hamurun boşluklu olmasından dolayı birbirine yaklaşılamamaktadır. Ancak boşluklu hamur yapısına ek olarak bir de kenetlenme olayından dolayı çözülmenin belirli bir şekilde gecikmesi olgusu varsa, o zaman birim kısaltma değerleri de birbirine yaklaşmaktadır.

5. Bazı durumlarda inelastik davranış hamurun yapısında meydana gelen ufak değişimlere karşı çok duyarlı olabilmektedir. Hapsolmuş hava oranı oldukça yüksek (Yaklaşık olarak % 5) olan E/C oranı düşük B betonları, çözülme sınırına vardıktan sonra, daha büyük yükleri taşıyamamakta ve kırılmaktadır. Aynı betonlar, henüz taze durumda iken kalıplarda meydana gelen hafif su sızıntılarının etkisiyle biraz daha dolu bir hamur yapısına sahip olduklarında, çözülme sınırlarının üstündeki bir değerde kırılmaktadırlar ; yani bunlarda çözülme olayı belirli bir hale gelmektedir.

6. Su/Çimento oranının artmasıyla İri Agregat-Harç bağ dayanımları önemli derecede düşmektedir ; bunun nedeni, E/C oranı büyüdükçe, temas yüzeylerindeki kusurların artması sonucu mekanik aderansın düşmesidir. Bağ dayanımları, E/C oranından, beton basınç dayanımından daha çok etkilenmektedir.

7. Süreksizlik sınırına varıldığında İri Agregat-Harç sınırlarında ilk önce meydana gelen mikroçatlaklar, temas yüzeylerindeki "Normal gerilme + Kayma gerilmesi" bileşik gerilme halinin etkisiyle oluşan, yükleme eksenine eğik açılar yapan mikroçatlaklardır.

8. Beton dayanım formülleri içinde, değişkeni $\frac{C}{E}$ olanlar (Abrams, Graf, eski Bolomey vb.), değişkeni $\frac{C}{E+h}$ (Feret , değiştirilmiş Bolomey vb.) olanlara göre da-

ha uygundur (Kumlu çakılla yapılmış, bileşimi normal uygulama sınırları içinde kalan iyi bir şekilde yerleşmiş ve yaklaşık olarak % 5 den fazla hapsolmuş hava içermeyen betonlar için). Bu konuda en iyi bir yol, basınç dayanımını, Powers'in hava içermeyen hamurlar için tarif ettiği Jel/Hacim oranına bağlamakla bulunabilir.

9. Beton içinde hapsolmuş hava, yaklaşık olarak % 5 i aşmadıkça mikroyapıya duyarlı özellikleri belirli bir şekilde etkilememektedir (Buradaki hava, kötü yerleşmeden dolayı değil, yerleştirmenin iyi bir şekilde yapılmasına rağmen bileşimle ilgili özelliklerden dolayı kalan hava olarak anlaşılmalıdır). Buna karşı mikroyapıya duyarlı olmayan özellikleri (örneğin elastiklik modülünü) etkilemektedir.

10. Mühendislik uygulamasında kullanılan, betonun elastiklik modülü ile basınç dayanımı arasındaki çeşitli bağıntıların istatistiksel anlamdaki bir ilgiden öteye gitmediği söylenebilir. Bu 2 değişken arasında yapısal bir bağıntı bulunduğu söylenemez, çünkü elastiklik modülü $\frac{E+h}{C}$ yapısal parametresine, basınç dayanımı ise bir başka $\frac{E}{C}$ yapısal parametresine bağlıdır ("Yapısal bağıntı" deyimi, aynı yapısal parametreye bağlı 2 ayrı malzeme karakteristiği arasında bulunabilecek bağıntı olarak anlaşılmalıdır).

11. Betonun Poisson oranı, gerek uygulanan gerilme ile, gerekse hamurun yapısı ile karmaşık değişimler göstermektedir. Ancak, doğal kum ve çakılla normal Portland çimentosu kullanılarak yapılmış iyi bir şekilde yerleşmiş, granülometrisi uygulama sınırları içinde kalan ve hidrasyonu büyük ölçüde tamamlamış betonların Poisson oranlarının, hamurun dayanımı arttıkça yükselme veya sabit kalma eğiliminde olduğu söylenebilir.

4.3. HS serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi

HS serisinin deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesine de, E/C serisinde olduğu gibi, önce gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini gözönüne alarak başlayalım. Şekil 3.51 ilâ Şekil 3.58 de bu seriye ait gerilme-şekildeğiştirme eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerde dikkati çeken hususlardan biri, hiçbir betonda çözülme olayının belirli olmamasıdır ; yani çözülme sınırına varıldıktan kısa bir süre sonra kırılma olmaktadır. Bu durum, sürüklenmiş havanın da, hapsolmuş hava gibi, bu konuda aynı etkiyi yaptığını düşündürmektedir. Hatırlanacağı gibi hapsolmuş hava

boşluğu yaklaşık olarak % 5 olan E/C-B serisi betonlarında da, düşük E/C oranlarında dahi, çözülme sınırını hemen basınç dayanımı izliyordu. Burada HS serisinde de tamamen aynı durumun olduğunu görüyoruz (HS serisinde düşük E/C oranlarındaki sürüklenmiş hava oranı Tablo 2.2 den görüldüğü gibi, % 4.5 ilâ % 11.4 arasında değişmektedir). Ancak E/C-B betonlarında kalıplarda bazen meydana gelen hafif su sızıntıları nedeniyle belirli bir çözülme olayı ortaya çıkabiliyordu. HS serisinde ise bu olay hiç gözlenmemiştir. Bunun nedeni hava sürükleyici katkı maddesi katılmış betonların suyu çok iyi tutan bir özellik kazanmış olmaları ve böylece sızıntıların meydana gelmemesidir. Yüksek E/C oranlı betonlarda ise, yine E/C serisinde olduğu gibi, belirli bir çözülme olayı görülmemektedir. Sonuç olarak çözülme olayının belirli olması için hamurun dolu bir yapıya sahip olması gerektiği, bir defa daha görülmektedir.

Hamurun yapısının betonun inelastik davranışını ne ölçüde etkileyebileceğinin ilginç sayılabilecek bir örneği Şekil 3.54 de görülmektedir. Sürüklenmiş hava oranı çok yüksek (% 17.1) olan HS-A-0.67-0.5 betonuna ait bu diyagramlarda, basınç dayanımına varıldığı halde henüz hacmin genişlemeye başlamadığı görülmektedir ; betonun hacmi basınç dayanımı aşıldıktan sonra büyümektedir. Burada süreksizlik sınırının (Poisson oranının hızla artmaya başladığı gerilme) basınç dayanımına çok yakın olması da (Süreksizlik sınırı = 73 kgf/cm^2 , Basınç dayanımı = 77 kgf/cm^2) ayrıca dikkati çekmektedir. Eğrilerin genel olarak incelenmesiyle şu kanıya varılabilir : Çok boşluklu bir bağlayıcı hamur yapısına sahip bu betonun davranışı normal betonlarınkinden tamamen farklıdır. Buradaki inelastik davranışta en etkili mekanizma boşlukların yük altında yerleşmesidir. Bu mekanizma yanıl genişlemeleri geciktirmekte ve böylece Poisson oranındaki hızlı artış ancak basınç dayanımına çok yakın bir düzeyde gözlenebilmektedir ; aslında bu düzeyde mikroyarıkların bir hayli ilerlemiş olması gerekir, çünkü boyuna kısalmalarda orantı sınırı olarak kabul edilebilecek gerilme, Şekil 3.54 den görülebileceği gibi, epeyi aşağıdadır. Aynı gecikme, betonun hacminde artma başlamasını da basınç dayanımının aşılmasından sonraya kadar erteliyebilmektedir. Bu durumda, gerek süreksizlik sınırının, gerekse çözülme sınırının iç yapı bakımından ifade ettiği anlamlar,

böyle bir betonda, normal bir betona göre çok farklıdır. Çünkü, burada süreksizlik sınırına varıldığında mikroçatlaklar epeyi ilerlemiş bir durumdadır ; çözülme sınırına varıldığında ise, basınç dayanımı aşılmış olduğu için, mikroçatlaklar daha önceden sürekli bir ağ oluşturmuştur.

Beton, aslında taneli (granüler) bir malzeme olan agreganın, katı bir malzeme olan sertleşmiş çimento hamuru tarafından bir arada tutulmasıyla meydana gelen bir katı malzemedir. Hamur, yukarıdaki örnekte olduğu gibi çok zayıf bir hal aldıkça, agreganın "taneli malzeme" karakteri kendini büyük ölçüde açığa çıkarmakta, beton da "taneli malzeme" karakterine yaklaşmaktadır.

HS serisine ait gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinde dikkati çeken bir başka husus da Poisson oranının uygulanan basınç gerilmesi ile değişimidir. Su/Çimento oranı 0.67 ve 0.75 olan betonlarda Poisson oranı süreksizlik sınırına kadar sürekli ve belirli bir düşme gösterdikten sonra, bu sınır aşılınca hızlı olarak büyümektedir. Hatırlanacak olursa benzer durum E/C serisi betonlarında da Su/Çimento oranının yine 0.67 ve 0.75 olması halinde görülmüştü ; ancak orada buradakiler kadar belirgin değildi. O sırada da belirtildiği gibi, bu olay yük altında boşlukların yerleşmesinin inelastik davranışta etkili bir mekanizma haline geldiğini göstermektedir. Buna karşı, bu durum, E/C oranının düşük olduğu (0.35 ve 0.43) betonlarda, oldukça yüksek sürüklenmiş hava içeriklerine (% 11.4 e kadar varan) rağmen görülmemektedir ; yani, sağlam bir mikroyapıya (yani az miktarda kılcal boşluk içeren bir yapıya) sahip bir hamurun içine (veya bu hamurla agrega taneleri arasına) sürüklenmiş küçük çaplı küresel hava boşlukları basınç yükü altında pek kapanmamaktadırlar. Buna karşı zayıf bir mikroyapının içindeki fazla miktardaki kılcal boşluklar yük altında kapanmaktadır (E/C serisinin en zayıf betonlarında olduğu gibi); bu kılcal boşluklara eklenen sürüklenmiş hava boşlukları da yük altında kapanmaktadır. Bu durumda zayıf mikroyapılı bir hamur içine sürüklenen küçük çaplı küresel hava boşluklarının grup grup birleşip daha büyük boşluklar doğurması olasılığı da akla gelmektedir. Konunun ileride iç yapıyı gözlemeye elverişli tekniklerle aydınlatılması uygun olacaktır.

Şekil 3.59 ilâ Şekil 3.67 de HS serisine ait betonların çeşitli mekanik özelliklerinin, bağlayıcı hamurun Jel/Hacim oranına göre değişimleri çizilmiştir. Burada da, E/C serisinde olduğu gibi, her nokta, 2 ilâ 3 numunede elde edilen değerlerin ortalamasına karşı gelmektedir. Bu diya-gramlarda aynı Su/Çimento oranına sahip olan noktalar (Her E/C oranı için 3 nokta) birer eğri parçası ile birleştirilmiştir. Her eğri parçasının en sağındaki nokta hiç hava sürüklenmemiş numuneye (Bu sonuç E/C serisinden alınmaktadır) karşı gelmektedir.

Şekil 3.59, 60 ve 61 de, sırasıyla süreksizlik sınırının, çözülme sınırının ve basınç dayanımının Jel/Hacim oranına göre değişimi verilmektedir. Genellikle, Jel/Hacim oranı artıkça, bu özellikler de yükselmektedir.

Burada asıl ilginç olan aynı Jel/Hacim oranındaki farklı hamur yapılarının betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkileridir. Şekillere dikkat edilirse, A granülometrilili betonlarda, 0.67 E/C oranına sahip olan hava sürüklenmemiş betonla, 0.35 E/C oranına sahip ve en çok hava sürüklenmiş (Jel/Hacim oranı en küçük) betonun, B granülometrilili betonlarda ise 0.75 E/C oranına sahip hava sürüklenmemiş betonla 0.43 E/C oranına sahip ve en çok hava sürüklenmiş betonun Jel/Hacim oranlarının hemen hemen eşit olduğu görülür. Her 2 çift betonda da, hava sürüklenmiş olan betonun dayanımları (süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı) aynı Jel/Hacim oranındaki hava sürüklenmemiş betondan daha yüksektir (Bilhassa A betonlarında, şekillerden görüldüğü gibi % 100 e kadar varan farklar vardır). Bu durum, bu dayanımların hamurun mikroyapısına duyarlı birer özellik olduğu hatırlanırsa, kolayca açıklanabilir : agregalar arasına giren toplam jel miktarı değişmese de, bu jelin arasına giren boşlukların karışık şekilli kılcal boşluklar olacağına küçük çaplı küresel boşluklar olması, daha sağlam bir hamurun oluşmasını ve hamur mikroyapısına duyarlı bu özelliklerin yükselmesini sağlayabilir. Buradaki durum, bir defa daha, basınç dayanımının ve mikroyapıya duyarlı diğer özelliklerin $\frac{E+h}{C}$ parametresi ile ifade edilemeyeceğini göstermektedir.

Ancak burada, hava sürüklenmemiş durumda dayanımların (Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç dayanımı) belirlenmesinde 4.1 paragrafında belirtilen bileşim sınırları içinde tek başına yeterli olan E/C parametresinin de, hava sürüklenmiş betonlar durumunda yeterli olmadığı açıkça görülmektedir. Çünkü aynı E/C oranında sürüklenen hava miktarı artıkça (HS-A-0.35-0.065 betonunda görüldüğü üzere hava oranı % 5 i aşmasa bile) dayanımlar düşmektedir.

Özetlemek gerekirse, şu 2 sonuca varıyoruz :

1. Hava sürüklenmiş betonların süreksizlik sınırını, çözülme sınırını ve basınç dayanımlarını tek başına $\frac{E+h}{C}$ parametresi belirtmez. Şekil 3.59, 60 ve 61 deki sonuçlar bunu göstermektedir.

2. Hava sürüklenmemiş betonlarda, hapsolan hava % 5 i aşmadıkça (ve E/C serisi değerlendirilirken belirtilen diğer kısıtlamalarla) tek başına E/C parametresi bu dayanımları belirliyordu. Buradaki sonuçlardan sürüklenen hava miktarının da dayanımları etkilediği anlaşılmaktadır.

Aslında, temel ilkede değişen bir şey yoktur : hamurun mikroyapısına duyarlı birer özellik olan dayanımların belirlenmesinde bu mikroyapı etken olmaktadır. Katkı maddeleri ile sürüklenen hava kabarcıklarının boyutları 0.05 ilâ 1.25 mm arasında olup büyük bir kısmı hapsolan hava boşluklarından çok daha küçüktür. Hapsolan hava boşluklarını, boyutlarının büyüklüğünden, hamur mikroyapısının dışında düşünmek gerekmesine karşı, sürüklenen hava kabarcıklarının büyük bir kısmı küçük boyutta olduklarından, bunları mikroyapının içinde düşünmek gerekmektedir. Yani hava sürüklenmemiş betonda hamur mikroyapısı yalnız E/C nin fonksiyonu iken, hava sürüklenmiş betonlarda E/C nin ve h^* ın fonksiyonudur (h^* taze betondaki sürüklenmiş küçük hava kabarcıklarının hacmini göstermektedir).

Buna göre, hava sürüklenmiş betonlarda :

Dayanımlar = $f\left(\frac{E}{C}, h^*\right)$ şeklinde 2 değişkenli bir

fonksiyonla ifade edilmesi düşünülebilir ("Dayanımlar" sözcüğü, süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç dayanımını ifade etmektedir).

Ancak, bu ifade, kuramsal olarak doğru olsa da, ortaya pratik bir zorluk çıkmaktadır : Aslında hava sürüklenmiş betonlarda dahi, bir miktar hapsolmuş hava kalmaktadır; ayrıca sürüklenen hava kabarcıklarının bir kısmı da mikroyapı içinde düşünülemeyecek kadar büyük olabilir. Halbuki, bu tür betonlarda genellikle yalnız, sürüklenmiş ve hapsolmüş havanın toplamı olan toplam hava içeriği ölçülebilmektedir. Bu bakımdan yukarıdaki ifadenin deney yoluyla belirlenmesi zor olacaktır. Bu güçlükten kurtulmak için, hava sürüklenmiş betonlarda tüm hava boşluklarının mikroyapı içinde düşünülebilecek kadar küçük kabarcıklardan oluştuğu şeklinde oldukça kaba bir kabul yaparak h^* yerine, taze betondaki toplam hava içeriğini gösteren h_t nin konması düşünülebilir. Bu durumda, yukarıdaki ifade :

$$\text{Dayanımlar} = f\left(\frac{E}{C}, h_t\right)$$

şeklini alır.

E/C oranı yerine, 4.1 paragrafında söylendiği gibi, Jel/Hacim oranının Powers tarafından hava boşluğu içerme - yen hamurlarda kullanılan şeklini koymak, hamurun hidrasyon derecesi de ifade olunacağı için, yerinde olacaktır. Yukarıda verilen denkleme açık şekiller, ancak çok sayıda numune üzerinde yapılacak deneylerin istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmesi sonucu verilebilir. Ancak şimdiden özellikle söylenebilecek şey, uygulamada kullanılan basınç dayanımı formüllerinin, hava sürüklenmiş betonlarda yeterli olmadığıdır. 4.1 paragrafında da belirtildiği gibi bu formüller dayanımı $\frac{C}{E}$ veya $\frac{C}{E+h}$ parametresine bağlanmaktadır. Hava sürüklenmiş betonların basınç dayanımlarının belirlenmesinde yalnız $\frac{C}{E}$ ye bağlı formüller esasen

uygulamada kullanılmamaktadır; çünkü sürüklenen havanın dayanımı düşürdüğü öteden beri bilinmektedir. Ancak yukarıdaki incelemeler, uygulamada bu amaçla genellikle kullanılan $\frac{C}{E+h}$ ya bağlı formüllerin de yetersizliğini ortaya koymaktadır.

Konuya biraz daha genel açıdan bakarsak, betonun basınç dayanımı (ve mikroyapıya duyarlı diğer bütün özellikleri) üzerinde çeşitli boşluk tiplerinin (hapsolmuş hava, sürüklenmiş hava, kılcal boşluk) önemli derecede farklı etkileri olduğunu söyleyebiliriz. Halbuki genellikle (24, 29, 36 gibi) her tip boşluğun dayanımı benzer şekilde etkilendiği kabul edilmektedir. Gerek E/C serisinde, gerekse burada varılan sonuçlar, oldukça yerleşmiş bu kaniya katılmaya olanak olmadığını göstermektedir. E/C serisinde görüldüğü gibi, makroskopik boyuttaki hapsolmuş boşluklar (bu boşluklarla ilgili olarak 4.2 paragrafının 9 uncu maddesindeki uyarı hatırlanmalıdır) % 5 e kadar çıkmalarına rağmen, basınç dayanımını (ve aynı zamanda süreksizlik ve çözülme sınırlarını) etkilemiyordu ; buna karşı E/C oranının temsil ettiği kılcal boşluklar basınç dayanımını (ve süreksizlik ve çözülme sınırlarını) çok belirli bir şekilde etkiliyordu. Biraz yukarıda ise, katkı maddesiyle sürüklenen küçük hava kabarcıklarının, hapsolmuş makroskopik hava boşluklarının tersine, dayanımları etkilediğini gördük. Ancak bu etkinin kılcal boşluklarındaki kadar fazla olmadığını söyleyebiliriz. Çünkü $\frac{C}{E+h}$ oranı aynı olan iki betondan, (E) si daha büyük yük olanın dayanımları (h) sı daha büyük olana göre belirli derecede daha düşüktür. Buna göre, dayanımlar üzerinde en fazla etkiye kılcal boşluklar sahip olmakta, bunları sırasıyla sürüklenmiş küçük hava kabarcıkları ve hapsolmuş makroskopik boşluklar izlemektedir. Bu durumda şu şekilde bir kural konması mümkündür : Yeterli bir şekilde yerleştirilmiş bir betondaki boşluklardan (Daha önce de belirtildiği gibi yetersiz bir yerleştirmeden kalan çok büyük boşluklar daima konumuzun dışındadır) dayanımlar üzerinde en kötü etkiye sahip olanlar en küçük çaplı boşluklardır ; boşlukların çapı büyüdükçe dayanımlar üzerindeki zararlı etkisi de azalmaktadır (Buradaki zarar, toplam hacimleri eşit olan boşlukların doğurduğu zarar olarak düşünülmektedir).

Şimdi HS serisine ait grafikleri incelemeye devam edelim. Şekil 3.62 de "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranının değişimi görülmektedir. Eğriler, çeşitli Su/Çimento oranlarında ve çeşitli granülometrilere betonlar içine hava sürüklenmesinin bu oranı çok farklı şekillerde etkileyebileceğini göstermektedir. A granülometrilili betonlar-

dan 0.35 E/C oranına sahip olanına bir miktar hava sürüklenerek toplam havanın % 4.5 a (HS-A-0.35-0.065 Betonu), 0.67 E/C oranına sahip olanında ise % 8.4 e (HS-A-0.67-0.064 Betonu) çıkarılması "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranında bir miktar yükselmeye neden olmuş, ancak sürüklenen havanın daha da artırılması bu oranı tekrar düşürmüştür. B granülometrilili betonlardan 0.43 E/C oranına sahip olanında ise A granülometrilili betonlarda görülen etkinin tam tersi görülmektedir : bu betona bir miktar hava sürüklenerek toplam havanın % 7.4 e (HS-B-0.43-0.06 Betonu) çıkarılması, "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranını düşürmüş, ancak havanın daha da artırılmasıyla tekrar bir miktar yükselme sağlanmıştır. B granülometrilili betonlardan 0.75 E/C oranına sahip olanında ise daha da farklı bir durum vardır: bu betonda havanın % 7.9 a (HS-B-0.75-0.035 Betonu) çıkarılması oranı hiç etkilememiş, buna karşı havanın % 15.4 e kadar çıkarılması oranı önemli derecede yükseltmiştir. Bu oldukça karışık durumdan 2 sonuç çıkarabiliriz :

1. Betonlarda hava sürüklenmesi "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranını önemli derecede değiştirebilmektedir. Örneğin, hava sürüklenmesiyle, 0.35 E/C oranına sahip A betonlarında bu oranın 0.75 ilâ 0.91 arasında, 0.43 E/C oranına sahip B betonlarında ise aynı oranın 0.76 ilâ 0.59 arasında değiştiği gözlenmiştir.

2. Ancak bu oranın hava sürüklenmesiyle değişimi karmaşık bir karakter göstermektedir. Bu durumun, hava sürüklenmesiyle betonun iç yapısında meydana gelen karışık fiziksel olaylara bağlı olduğunu düşünmek yerinde olacaktır. Betonda hava sürüklenmesinin "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" üzerindeki etkisinin tam olarak açıklığa kavuşması için, geniş sayıda sistematik deneyler gerektiği görülmektedir.

Şekil 3.63 de, "Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı" oranının değişimleri çizilmiştir. Daha yukarıda da söylendiği gibi, beton içine hava sürüklenmesi çözülme sınırını basınç dayanımına yaklaştırmakta ve çözülme olayı belirli olmaktan çıkmaktadır (Yine yukarıda belirtildiği gibi sürüklenmiş hava, bu konuda, hapsolmuş hava ile benzer sonucu vermektedir). Şekil 3.63 deki eğriler de çeşitli granülometri - lerde ve çeşitli Su/Çimento oranlarında bu olayın daima gerçekleşmekte olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.64 de basınç dayanımındaki birim kısalmanın değişimi verilmektedir. Bu birim kısalmanın genel olarak Jel/Hacim oranı azaldıkça azaldığı görülmektedir. Bu bakımdan Şekil 3.22 deki E/C serisindeki eğrilerle genel olarak bir uyum sağlanmaktadır. Ancak ortada ilginç bir fark vardır. Şekil 3.22 de görüldüğü gibi E/C-A-0.59 betonundan itibaren hamur zayıfladıkça kenetlenme olayı etkin olmaya başlıyor ve basınç dayanımındaki birim kısalma E/C-A-0.75 betonuna kadar bir yükselme gösteriyordu. E/C-A-0.75 betonuna göre daha zayıf hamurlarda ortaya çıkan durumu Şekil 3.64 de bir dereceye kadar görmek mümkündür. Çünkü E/C-A-0.75 betonunun Jel/Hacim oranı 0.580 iken, burada $E/C = 0.67$ eğrisindeki hava sürüklenmiş betonların Jel/Hacim oranları 0.449 ve 0.267 dir. Bilindiği gibi basınç dayanımındaki birim kısalma mikroyapıya duyarlı bir özellik - tir. Bu bakımdan bunun Jel/Hacim oranı cinsinden ifadesi uygun olmayabilir. Ancak özellikle kenetlenme olayı daha ziyade hamurun zayıf olmasıyla etkin duruma geçen bir olay - dır. Bu bakımdan kenetlenme olayının etkinliğinin değişimi Jel/Hacim oranı üzerinden izlemek pek hatalı sayılabılır. Bu şekilde düşünülürse, E/C-A-0.75 betonuna kadar (E/C-A-0.59 betonundan başlamak üzere) gittikçe etkisini artıran kenetlenme olayının, daha zayıf hamurlarda ortadan kalkma eğilimine girdiği görülür. Çünkü, Şekil 3.64 de görüldüğü gibi, 0.67 eğrisinde sürüklenen hava miktarı artıkça basınç dayanımındaki birim kısalma azalmaktadır ; eğer kenetlenme olayı etkisini artırarak sürseydi, bu birim kısalmanın artması gerekirdi. Bu sonuca göre, kenetlenme olayı iri agregası fazla olan betonlarda hamur zayıfladıkça belirli bir noktada ortaya çıkan ve zayıflama devam ettikçe etkisini artıran bir olaydır ; ancak hamur belli bir dereceden daha da zayıfladı mı, kenetlenme olayının etkisi tekrar ortadan kalkmaktadır. Bu sonuç, bir bakıma doğaldır ; çünkü hiç bağlayıcısı olmayan bir agregaya yığının kenetlenip tek eksenli bir basınç yükünü taşıması mümkün değildir. Kenetlenme olayının etkin olabilmesi için zayıf da olsa, yine de belli bir derecede taşıyıcı özeliği olan bir bağlayıcı hamurun bulunması şarttır.

Şekil 3.65 de elâstiklik modülünün değişimi çizilmiştir. Hamur mikroyapısına duyarlı olmayan bir özellik olan elâstiklik modülü üzerinde bağlayıcı hamurun katkısının en

iyi bir şekilde Jel/Hacim oranı ile belirlenebileceği burada da görülmektedir. Bu oran çeşitli Su/Çimento oranlarında ve çeşitli miktarlarda hava sürüklenmiş betonlarda bu özelliğini sürdürmektedir.

Şekil 3.66 da süreksizlik sınırındaki, ve Şekil 3.67 de ise basınç dayanımının % 40 ındaki Poisson oranlarının değişimleri verilmektedir. Poisson oranının uygulanan gerilme ile ve hamurun yapısı ile karmaşık değişimler gösterdiği 4.1 paragrafında belirtilmişti. Burada da çeşitli granülometrilere ve çeşitli E/C oranlarındaki betonlara hava sürüklenmesinin her 2 gerilme düzeyindeki Poisson oranını da çok değişik şekillerde etkilediği görülmektedir. Bu karmaşık değişimlerin kesin yasalarının bulunabilmesi için çok sayıda sistematik deneyin yapılması şart görülmektedir.

4.4. HS serisi deneylerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar

HS serisi deneylerinin değerlendirilmesinden başlıca aşağıdaki sonuçlara varılabilir :

1. Yeterli bir şekilde kalıbına yerleştirilmiş betonun basınç dayanımı (ve hamur mikroyapısına duyarlı diğer özellikleri) üzerinde çeşitli boşluk tiplerinin (hapsolmuş hava, sürüklenmiş hava, kılcal boşluk) önemli derecede farklı etkileri vardır. Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç dayanımı üzerinde en zararlı etkiyi kılcal boşluklar doğurmakta, bunları sırasıyla sürüklenmiş küçük hava kabarcıkları ve hapsolmuş makroskopik boşluklar izlemektedir. Bu durumda eşit hacimdeki boşluklar için, boşlukların çapı büyüdükçe süreksizlik ve çözülme sınırlarıyla basınç dayanımı üzerindeki zararlı etkilerinin azaldığı söylenebilir.

2. Uygulamada kullanılan basınç dayanımı formülleri, çeşitli boşluk tiplerinin dayanım üzerindeki etkilerinin farklı olduğu olgusunu gözönüne almadığından, hava sürüklenmiş betonlarda yeterli değildir.

Hava sürüklenmiş betonlarda basınç dayanımı ile süreksizlik ve çözülme sınırları (Bunların hepsi kısaca "dayanımlar" diye adlandırılırsa) hamurun yapısına ancak

$$\text{Dayanımlar} = f \left(\frac{E}{C}, h^* \right)$$

şeklinde iki değişkenli bir fonksiyonla bağlanabilir (h^* : 1 m^3 yerleşmiş taze betondaki sürüklenmiş küçük hava kabarcıklarının hacmi)

h^* ın saptanma zorluğu gözönünde tutularak, (h_t) 1 m^3 yerleşmiş taze betondaki toplam hava hacmini göstermek üzere, yukarıdaki ifadenin, biraz daha kaba bir şekilde :

$$\text{Dayanımlar} = f \left(\frac{E}{C}, h_t \right)$$

şeklinde yazılması düşünülebilir.

Yukarıdaki denklemlerde, $\frac{E}{C}$ yerine, Powers'in hava içermeyen hamurlar için verdiği Jel/Hacim ifadesini koy - mak, dayanımlar üzerinde hidratasyon derecesinin etkisini de belirten daha gelişmiş formüllerin elde edilmesini sağlar.

3. Sağlam mikroyapılı bir hamura sahip olan betonlara oldukça yüksek oranda hava sürüklense dahi, bu hava kabarcıkları, betona uygulanan basınç yükleri altında pek kapanmamaktadır. Buna karşı zayıf mikroyapılı bir hamurun içindeki fazla miktardaki kılcal boşluklar yük altında kapanmaktadır ; bu kılcal boşluklara eklenen sürüklenmiş hava boşlukları da yük altında kapanmaktadır. Bu durumda zayıf mikroyapılı bir hamur içine sürüklenen küçük çaplı küresel hava boşluklarının grup grup birleşip daha büyük boşluklar doğurması olasılığı da akla gelmektedir. Konunun ileride iç yapıyı gözlemeye elverişli tekniklerle aydınlatılması uygun olacaktır.

4. Daha önce görüldüğü gibi, kenetlenme olayı, iri agregası fazla olan betonlarda hamur zayıfladıkça belirli bir noktada ortaya çıkan ve zayıflama devam ettikçe etkisini artıran bir olaydır. Ancak, hamur belli bir dereceden daha çok zayıfladı mı, kenetlenme olayının etkisi tekrar ortadan kalkmaktadır.

T. C.

**Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi**

5. Hava sürüklenmiş betonlarda, düşük Su/Çimento oranlarında bile, hapsolmuş hava içeriğinin oldukça yüksek olduğu E/C-B betonlarında olduğu gibi, belirli bir çözülme olayı görülmemekte, çözülme sınırına varıldıktan kısa bir süre sonra kırılma olmaktadır. Buna göre, sürüklenmiş hava, bu konuda, hapsolmuş hava ile aynı etkiyi yapmakta -dır. Ancak, hava sürüklenmemiş betonlarda, kalıplardabazen meydana gelen hafif su sızıntıları nedeniyle belirli bir çözülme olayı ortaya çıkabiliyordu. Hava sürüklenmiş betonlarda ise, bu betonların suyu çok iyi tutan bir özellik kazanmış olmalarından dolayı, çözülme olayı hiçbir zaman belirli bir şekilde meydana gelememektedir.

6. Betonlarda hava sürüklenmesi "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranını önemli derecede değiştirebilmek -tedir ; ancak bu değişim karmaşık bir karakter göstermek -tedir. Bu değişimin kesin yasaları, ancak çok sayıda sistematik deneyden sonra açıklığa kavuşabilir.

7. Aynı şekilde Poisson oranı da betonların içine hava sürüklenmesiyle karmaşık bir değişim göstermektedir. Bu konunun aydınlığa kavuşması için de çok sayıda sistematik deney gerekmektedir.

4.5. UK serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi

Bu serinin deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesine de gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini gözönüne alarak başlayalım. Bu eğriler Şekil 3.68 ilâ Şekil 3.71 de verilmektedir. Burada UK-A-0.35-35 (Şekil 3.68) ve UK-A-0.35-50 (Şekil 3.69 ve 69 bis) betonlarına ait $\Delta V/V$ eğrilerinin durumu bilhassa dikkati çekmektedir . Bu betonlar A granülometrisine sahip olmalarına ve Su/Bağlayıcı oranı düşük olmasına rağmen, bunların önemli bir kısmı belirli bir çözülme olayı göstermemektedir (Şekil - 3.68 den görüldüğü gibi UK-A-0.35-35 betonunda belirli bir çözülme olayı yoktur. Bu karışıma ait olarak 3 numune denenmiş ve 3 ünde de benzer davranış ortaya çıkmıştır. UK-A-0.35-50 karışımında ise, Şekil 3.69 da eğrileri verilen numunede yine belirli bir çözülme olayı yoktur ; Şekil 3.69 bis de verilen numunede ise çözülme olayı belirlidir). Halbuki E/C serisi betonlarında A gra-

nülometrisine sahip ve düşük Su/Çimento oranlı numunelerin hepsinde çözülme olayı belirli idi. Kanımızca, iki seri arasında gözlenen bu farklı durum, saf çimento hamuru ile "Çimento+Uçucu Kül" karışımından elde edilen hamurun çökelme eğilimlerinin farklı olmasından ileri gelmektedir. Aşağıda bu konu ile ilgili kısa bir bilgi verilmektedir.

"Çimento+Uçucu Kül" hamurunun veya daha genel olarak "Çimento+Puzolan" hamurlarının çökelme eğilimleri ile ilgili olarak literatürde 2 görüşle karşılaşırız. Daha eski olan Rechetnikov (37) un görüşüne göre, genel olarak mineral tozlarının çökelme eğilimleri, bu tozların taşıdıkları elektrik yüküne bağlıdır. Çimento taneleri suda elektropozitif süspansiyonlar verir. Puzolanlar ise elektro - negatif süspansiyonlar verir. Bundan dolayı "Çimento+Puzolan" hamurundaki çimento ve puzolan taneleri birbirini çeker ve böylece bu hamurların çökelme eğilimleri saf çimento hamurunkinden fazla olur. Yani böyle bir hamurla yapılmış bir betonda bağlayıcı taneleri birbirine daha çok yaklaşacaklar ve böylece terleme olayı ve bunun doğurduğu boşluklar fazla olacaktır.

Steopoe (38), konuyu tekrar ele almış ve daha büyük bir açıklık getirmiştir. Bu araştırmacıya göre, çimentoya mineral tozlarının katılmasıyla elde edilen hamurların çökelme mekanizmaları daha karışık bir durum göstermektedir. Çökelme olayında yalnızca tozların elektrik yükleri etkin değildir. Karışımda bulunan tozların mineralojik cinsine ve öğütülme inceliğine bağlı olarak bazı fiziksel ve kimyasal olaylar meydana gelmektedir. Steopoe, çok aktif bir Romanya trası ve çimento karışımları üzerinde yaptığı deneylerde, çimentoya tras karıştırılmasının çimentonun çökelme eğilimini azalttığını bulmuştur. Steopoe bu bulgusunu şu şekilde yorumlamaktadır : Doğal ve yapay puzolanların asid karakteri vardır, buna göre suda elektronegatif süspansiyonlar verir. Bu karakterlerinden ve etkin emici güçlerinden dolayı, puzolanlar C_3S in hidrolizi esnasında açığa çıkan Ca^{+2} iyonlarını tutarlar ve elektropozitif süspansiyon haline dönüşürler. Bu dönüşümden sonra puzolanlar tutulan suyun miktarının artmasına ve çökeleğin hücresel iskeletinin pekleşmesine katkıda bulunurlar. Bu nedenden dolayı puzolan katılmış çimentoların çökelekleri aynı miktarda saf çimentodan meydana gelmiş çökeleklerden

daha hacimlidir. Bu olay aktif silis içeren bütün maddelere şamildir ve aktif silis içeriğine ve bilhassa öğütülme inceliğine bağlıdır. İncelik artıkça iskelet oluşturma eğilimi artmaktadır.

UK serisindeki betonların belirli bir çözülme olayı göstermemeleri, çimentoya kattığımız uçucu külün etkisiyle saf çimento hamuruna göre daha boşluklu bir hamur oluşmasıyla açıklanabilir. Çünkü, daha önce de söylendiği gibi, çözülme olayının belirli olması ancak dolu bir hamurun varlığıyla mümkündür. Ancak puzolan kullanarak yapılan ve uzun süre suda saklanan betonların içinde meydana gelen toplam jel miktarının arttığı bilinmektedir (38). Buna göre böyle bir betonun normal betona göre daha boşluklu bir hamur yapısına sahip olması, ancak hamurun agrega boşlukları içinde daha fazla çökmesiyle mümkün olabilir. Bu durumda, katılan uçucu külün etkisiyle çimentonun çökme eğilimi artmıştır. Bu sonuç, Rechetnikov'un görüşüne uygun, Steopoe'nin görüşüne ise ilk bakışta aykırı düşmektedir. Kanımızca bu durum, paragraf 2.1.3.2 de belirtilen gibi, kullandığımız uçucu külün inceliğinin az olmasından ileri gelmektedir. Buna göre, incelik derecesi az olan bir uçucu kül (puzolan), Steopoe'nin bahsettiği iskeleti kuramamakta ve Rechetnikov'un bahsettiği gibi elektropozitif bir toz etkisi yaparak elektropozitif çimento tanelerini çekmekte ve çökme eğilimini artırmaktadır. Ancak, bizzat Steopoe'nin de puzolanların çökme eğilimini azaltmalarının bunların inceliğine bağlı olduğunu öne sürdüğü hatırlanmalıdır.

Çözülme olayının belirliliğini kaybetmesi, Su/Bağlayıcı oranının 0.59 olduğu karışımlarda da görülmektedir. E/C-A-0.59 betonunda çözülme olayı belirli bir şekilde görülebiliyordu (Şekil 3.5). UK-A-0.59-35 ve UK-A-0.59-50 betonlarında ise çözülme olayı belirsizdir (Şekil 3.70,71). UK serisi içinde çözülme olayı belirli bir şekilde yalnızca Şekil 3.69 bis de eğrileri verilen, UK-A-0.35-50 karışımına ait numunede görülmektedir. Paragraf 4.1 de yapılan açıklamalara göre bu numunedeki bu durumun, kalıplarda meydana gelen hafif sızıntıların etkisiyle hamurun daha dolu bir yapıya kavuşmasından ileri gelmesi gerekir.

UK serisi betonlarının iç yapıları üzerinde çıplak gözle yaptığımız gözlemler uçucu kül etkisiyle artan çökme eğiliminin sonuçlarını görmemize olanak vermemiştir. Artan çökme eğiliminden dolayı gözle görülebilen terleme cepleri oluşmamaktadır. Buna göre çökme eğiliminin artmasının hamurun yapısında doğurduğu değişimlerin, gözle görülemeyecek ölçekte, kılcal boyutlarda veya biraz daha büyük değişimler olması gerekir. Ancak bu ölçekteki değişimler bile, betonun çözülme olayından sonraki inelastik davranışını tamamen değiştirmeye yeterlidir. Bu durumda, çözülme sınırından sonraki inelastik davranışın hamurun yapısında meydana gelen ufak değişimlere karşı bile çok duyarlı olduğu anlaşılmaktadır. Kalıplarda meydana gelen hafif sızıntıların da bu davranışı tamamen değiştirmeye yeterli olması, bu kanıyı desteklemektedir.

Şekil 3.72 de süreksizlik sınırının çimentoyu ikame eden uçucu kül yüzdesiyle değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, çimentonun gerçek hacminin % 35'inin uçucu külle ikame edilmesi, süreksizlik sınırının değerinde bir düşmeye neden olmamaktadır. Hatta 0.59 Su/Bağlayıcı oranına sahip karışımda bir miktar artma da görülmektedir. Buradan, 4.1 paragrafında Akyüz (32) ün çalışmasına dayanılarak ileri sürülen görüşler de hatırlanırsa, çimentonun bu oranda uçucu külle ikame edilmesiyle, İri Agregat-Harç bağ dayanımlarının düşmediği anlaşılmaktadır. Bu sonucun kesin bir yorumunu yapmak çok zor görülmektedir, çünkü literatürde puzolan içeren bağlayıcı hamurların agregalarla oluşturduğu temas yüzeylerini inceleyen bir çalışmaya pek rastlanmamaktadır. Farran (35) ın kullandığı veya benzeri tekniklerin bu duruma uygulanmasıyla konuyu kesinlikle açıklamak mümkün olabilir. Ancak, çimentoya uçucu kül katılmasıyla İri Agregat-Harç temas yüzeylerinde meydana gelebilecek değişiklikleri eldeki bilgilerin ışığında şu şekilde belirtebiliriz : Uçucu külün katılması ile çimento içindeki serbest kireç uçucu külün içindeki aktif silis tarafından tutulur ve böylece iri agregaların yüzeyinde bir kalsiyum hidroksit tabakası oluşmaz ; bu durumda hidrasyon sonucunda oluşan jel doğrudan doğruya agrega yüzeyine değer. Bundan başka, puzolanlı bir beton (bizim araştırmamızda olduğu gibi) uzun süre su içinde saklanırsa, meydana gelen jel miktarı, saf çimentoyla yapılmış bir betona göre daha fazla olur (38). Jel miktarı-

rının artmasıyla jelin, agrega yüzeyindeki pürüzlere daha iyi girebileceği ve bu şekilde iyi bir mekanik aderans oluşmasının araştırmamızda görüldüğü gibi, katılan uçucu küle rağmen bağ dayanımlarının düşmemesine yardımcı olacağı düşünülebilir.

İlginç olan bir başka husus, uçucu kül katılmasıyla çökelme eğiliminin artmasına rağmen, süreksizlik sınırının sabit kalabilmesidir. Çökelme eğiliminin artmasıyla iri agregalarla bağlayıcı hamur arasında oluşan boşluklar bağ dayanımlarını düşürmeyecek midir? Bu soruyu cevaplandı - rırken, önce, ortaya çıkan sonucun çeşitli etkenlerin et - kilerinin toplamından doğduğu düşünülmelidir. Çökelme eği - liminin artmasının doğurduğu zararlı etki diğer faydalı yöndeki olayların (örneğin jel miktarının artmasının) et - kileriyle dengelenmekte ve ortaya bu sonuç çıkmaktadır. İnceliği fazla ve bu yüzden büyük bir olasılıkla çökelme eğilimini azaltıcı yönde etkiliyecek bir uçucu kül kulla - nılsaydı gerek çökelmenin azalması, gerekse inceliğin art - masının doğuracağı diğer faydalı etkilerle, süreksizlik sınırının artacağı da düşünülebilirdi (Araştırmamızda ol - duğu gibi betonlar uzun süre suda saklanıp daha sonra da yüksek rutubette tutularak jellerin çok miktarda meydana gelmesinin sonra da kuruma etkisiyle çatlamaların önlen - mesinin sağlanması koşuluyla). Bunlardan başka, çökelme eğiliminin artmasına rağmen süreksizlik sınırının düşmeme - sinin 2 muhtemel nedeni görülmektedir. Bir defa, yukarıda da söylendiği gibi, çökelme eğiliminin artmasının hamur ya - pısında meydana getirdiği değişiklikler yaklaşık olarak kılcal boyutlardadır ; gözle görülebilecek kadar büyük de - ğişiklikler olsaydı, büyük bir olasılıkla süreksizlik sınırı düşerdi. Bundan başka, çökelme eğiliminin artması da - ha çok iri agregaların altlarında (dökülme yönüne göre) boşluklar (bizim durumumuzda kılcal) doğurmaktadır. Parag - raf 4.1 de yapılan açıklamalara göre, süreksizlik sınırı - na varıldığında oluşan ilk mikroçatlaklar kuvvet ekseniiyle eğik açılar yapmaktadır ve bizim durumumuzda bu boşlukla - rın bulunduğu yerlere rastlamamaktadır.

Şekil 3.72 de, uçucu kül oranının % 50 ye çıkmasıyla, hem 0.35 hem de 0.59 Su/Bağlayıcı oranlarında süreksiz - lik sınırının düştüğü görülmektedir. Bu kadar yüksek bir oranda zararlı etkiler ön plâna geçmiştir.

Şekil 3.73 de çözülme sınırının, Şekil 3.74 de ise basınç dayanımının çimentonun gerçek hacmini ikame eden uçucu kül oranıyla değişimi görülmektedir. Çimentonun gerçek hacminin % 35 inin uçucu külle ikame edilmesi Su/Bağlayıcı oranının 0.35 olduğu betonda çözülme sınırını ve basınç dayanımını belirli bir şekilde düşürmektedir. Buna karşı Su/Bağlayıcı oranının 0.59 olduğu betonda düşüş daha azdır. Uçucu kül oranının % 50 ye çıkması durumunda ise, her iki Su/Bağlayıcı oranında da çözülme sınırı ve basınç dayanımı belirli bir şekilde düşmektedir.

Şekil 3.75 de "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranının uçucu kül oranıyla değişimi görülmektedir. Çimentonun gerçek hacminin % 35 inin uçucu külle ikame edilmesi durumunda, bu oran, hiç uçucu kül kullanılmaması haline göre önemli derecede büyümektedir. Bu durum Şekil 3.72 ve 3.74 beraberce gözönüne alındığında da görülebilir. Bu oranda uçucu kül kullanılması süreksizlik sınırını düşürmezken (hatta Su/Bağlayıcı oranının 0.59 olduğu betonda biraz büyütürken), basınç dayanımı (bilhassa 0.35 Su/Bağlayıcı oranlı betonda) düşürmektedir. Bu sonuçlara göre uçucu külün bu oranda katılmasının basınç dayanımını düşürürken, süreksizlik sınırını zararlı yönde etkilemediği düşünülebilir. Ancak bu konuda şimdiden fazla bir genelleme yapılması ihtiyatsızlık olur. Araştırmamızda oldukça dar sınırlar ve bilhassa betonların uzun süre suda saklanıp sonradan da oldukça yüksek bir rutubet durumunda denendiği unutulmamalıdır. Çimentonun gerçek hacminin % 50 sinin uçucu külle ikame edilmesi durumunda, "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranı yaklaşık olarak hiç uçucu kül kullanılmayan değere düşmektedir.

Şekil 3.76 da "Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı" oranının kullanılan uçucu kül oranıyla değişimi görülmektedir. Her iki Su/Bağlayıcı oranında da bu oran uçucu külün % 35 oranına kadar büyümekte, % 50 oranında ise, hiç uçucu kül kullanılmayan duruma göre yine yüksek kalarak, biraz düşmektedir. Kanımızca, bu oranın hiç uçucu kül kullanılmayan duruma göre daima daha yüksek olması, bu paragrafın başında verilen açıklamaların ışığında, kullanılan uçucu külün inceliğinin az olması dolayısıyla hamurun çökme eğilimini artırmasından doğmaktadır. Şekil 3.77 de basınç dayanımındaki birim kılmanın kullanılan uçucu kül ora -

nıyla değişimi görülmektedir. Su/Bağlayıcı oranının 0.35 olduğu betonlarda, çimentoyu ikame eden uçucu kül oranı artıkça basınç dayanımındaki birim kısalma düşmektedir. Bu durum E/C ve HS serisindeki sonuçlarla uyum halindedir. Bu serilerde kenetlenme olayının önem kazandığı zayıf betonların dışında hamur zayıfladıkça (Basınç dayanımı düştükçe) basınç dayanımındaki birim kısalma azalıyordu. Burada da aynı durum vardır.

Su/Bağlayıcı oranının 0.59 olduğu betonlarda ise, çimentonun gerçek hacminin % 35 inin uçucu külle ikame edilmesi durumunda (UK-A-0.59-35 betonu) basınç dayanımındaki birim kısalma biraz yükselmekte, uçucu kül oranının % 50 ye çıkması halinde (UK-A-0.59-50 Betonu) ise bu değerde bir miktar düşme olmaktadır. Kanımızca bu durumun nedeni, kenetlenme olayının UK-A-0.59-35 betonunda etkin olması, daha zayıf UK-A-0.59-50 betonunda ise bağlayıcı hamur fazla zayıfladığından artık kenetlenme olayının etkinliğini önemli oranda kaybetmesidir. Daha önce incelenen E/C serisinde, Şekil 3.39 da, E/C-A-0.59 betonundan itibaren, Su/Çimento oranı artıkça kenetlenme olayının etkili olmaya başladığı ve bundan dolayı basınç dayanımındaki birim kısalmanın arttığı görülmüştü. Bu bölgedeki betonların basınç dayanımları ve basınç dayanımındaki birim kısalmaları aşağıda verilmektedir :

Karışım	Basınç Dayanımı (kgf/cm ²).	Basınç Dayanımındaki Birim Kısalma (μ D)
E/C-A-0.59	188	898
E/C-A-0.67	201	902
E/C-A-0.75	189	1018

E/C-A-0.59 betonunda çimentonun gerçek hacminin % 35 inin ve % 50 sinin uçucu külle ikame edilmesi halinde ortaya çıkan ve bu paragrafta incelemekte olduğumuz UK-A-0.59-35 ve UK-A-0.59-50 betonlarının basınç dayanımları ve basınç dayanımındaki birim kısaltmaları ise, E/C-A-0.59 betonuna ait değerlerle birlikte, aşağıda verilmektedir :

Karışım	Basınç Dayanımı (kgf/cm ²)	Basınç Dayanımındaki Birim Kısalma (μD)
E/C-A-0.59	188	898
UK-A-0.59-35	170	1010
UK-A-0.59-50	110	906

Yukarıda verilen tablolara göre, UK-A-0.59-35 betonunun basınç dayanımı, kenetlenme olayının etkili olduğu E/C-A-0.67 ve E/C-A-0.75 betonlarının dayanımları ile aynı mertebededir. Bu nedenden, bu betonda da kenetlenme olayı etkili olmakta ve basınç dayanımındaki birim kısalma E/C-A-0.59 betonunun kısalmasının üstüne çıkmaktadır. UK-A-0.59-50 betonunun basınç dayanımı ise bu betonlardan belirli derecede daha düşüktür. Bu betonda bağlayıcı hamur kenetlenme olayının fazla etkin olmasını sağlayamayacak kadar zayıftır ve bu nedenden dolayı basınç dayanımındaki birim kısalma düşmektedir. Ancak kenetlenme olayının bu betonda bile bir ölçüde etkili olduğu görülmektedir : çünkü basınç dayanımındaki birim kısalma henüz hiç uçucu kül kullanılmayan E/C-A-0.59 betonunun altına düşmemiştir. Sonuç olarak, kenetlenme olayının bağlayıcı hamurun belirli bir derecede zayıflaması durumunda tedricen ortaya çıktığı, ancak hamurun sağlamlığı belirli bir sınırın altına düştükten sonra kenetlenme olayının etkinliğini yavaş yavaş kaybettiği, bir defa daha görülmektedir.

Şekil 3.78 de elâstiklik modülünün çimentoyu ikame eden uçucu kül yüzdesiyle değişimi görülmektedir. Kullanılan uçucu kül oranı artıkça, her iki Su/Bağlayıcı oranında da, elâstiklik modülü düşmektedir. Daha önce, Paragraf 4.1 de de söylendiği gibi, betonun elâstiklik modülü üzerinde, bir agreganın, bir de bağlayıcı hamurun katkısı vardır. Burada agreganın katkısı değişmediğine göre, çimentonun bir bölümünün uçucu külle ikame edilmesi durumunda, bağlayıcı hamurun elâstiklik modülünde bir miktar düşme olduğu söylenebilir.

Şekil 3.79 da süreksizlik sınırındaki, Şekil 3.80 de ise basınç dayanımının % 40 ındaki Poisson oranının, çimentoyu ikame eden uçucu kül yüzdesiyle değişimi görül-

mektedir. Poisson oranının değişimi diğer serilerde bahsedilen karmaşık karakterini korumaktadır. Ancak çimentonun bir bölümünün uçucu külle ikame edilmesinin Poisson oranının bu değerlerinde büyük değişimlere neden olmadığı şekillerden görülmektedir.

4.6. UK serisi deneylerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar

UK serisi deneylerinin değerlendirilmesinden başlıca aşağıdaki sonuçlara varılabilir :

1. Çimento içine uçucu kül katılmasıyla hamurun çökme eğilimi her zaman azalmamaktadır. Kullanılan uçucu külün inceliği az ise, bu kül elektronegatif bir toz etkisi yaparak elektropozitif çimento tanelerini çekmekte ve çökme eğilimini artırmaktadır. Ancak, çökme eğiliminin bu şekilde artmasının betonun bağlayıcı hamurunun yapısında doğurduğu değişimler çıplak gözle görülemeyecek ölçekte, kılcal veya biraz daha büyük boyuttadır. Bununla beraber bu ölçekteki değişimler bile, betonun çözülme sınırının hemen üstünde basınç dayanımına ulaşmasına neden olmaktadır. Bu durumda, çözülme sınırından sonraki inelastik davranışın hamurun yapısında meydana gelen ufak değişimlere karşı bile çok duyarlı olduğu bir defa daha doğrulanmaktadır.

2. Çimentonun gerçek hacminin % 35 inin uçucu külle ikame edilmesi, eğer betona uzun süre su içinde hidrasyonu büyük ölçüde tamamlatılıyor ve sonradan yine yüksek rutubette saklanıp kuruma çatlakları önleniyorsa, basınç dayanımını düşürdüğü halde süreksizlik sınırını düşürmemektedir. Uçucu kül oranı % 50 ye çıkarsa, süreksizlik sınırı da düşmektedir.

3. Kenetlenme olayının bağlayıcı hamurun belirli bir derecede zayıflaması durumunda tedricen ortaya çıktığı ancak hamurun sağlamlığı belirli bir sınırın altına düştükten sonra kenetlenme olayının etkinliğini yavaş yavaş kaybettiği, bu seride bir defa daha görülmüştür.

4. Çimentonun bir bölümünün uçucu külle ikame edilmesi durumunda betonun elâstiklik modülünde bir miktar düşme olduğu gözlenmiştir.

5. Poisson oranının hamurun yapısındaki değişikliklerden doğan değişiminin karmaşık karakteri bu seride de gözlenmiştir. Ancak çimentonun bir bölümünün uçucu külle ikame edilmesi, Poisson oranında büyük değişimlere neden olmamıştır.

4.7. KF serisi deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesi

Bu seride de deney sonuçlarının incelenme ve değerlendirilmesine gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini gözönüne alarak başlayalım. Bu eğriler Şekil 3.81 ve Şekil 3.82 de verilmektedir. Bu şekillerde incelenen KF-A-0.43-5 ve KF-A-0.43-15 karışımları, E/C-A-0.43 karışımında çimento - nun gerçek hacminin sırasıyla % 5 i ve % 15 i mavi kalker filleriyle ikame edilmesiyle elde edilmiştir (Bkz.Bölüm II). Bu şekilde elde edilen karışımlara ait eğrilerin şeklen E/C-A-0.43 betonuna ait eğrilere benzediği görülmektedir (Şekil 3.3). Özellikle, çözülme olayı bu betonlarda da belirlidir. Bu durum bize kalker fillerinin çimentonun çökelme eğilimini artırmadığını göstermektedir. Bu gözlem, Steopoe (38) nin gözlemleriyle uyum halindedir. Steopoe'ye göre, "kalker tozları, çimento çökeleklerinde, atıl ve hafif bir toz gibi rol oynayıp çökeleğin hacmini büyötmektedir".

Şekil 3.83, 84 ve 85 de, sırasıyla süreksizlik sınırının, çözülme sınırının ve basınç dayanımının çimentoyu ikame eden kalker filleri miktarıyla değişimi görölmektedir. Her üç dayanım değeri de, çimentonun gerçek hacminin % 5 inin kalker filleri ile ikame edilmesi durumunda biraz yükselmekte, çimento gerçek hacminin % 15 inin kalker filleri ile ikame edilmesi durumunda ise, saf çimento kullanılan karışımdaki değeri altına düşmemektedir. Genellikle atıl olduğu kabul edilen böyle bir fillerin bu durumu yaratması ilginçtir. Ancak, bu konu, aslında 1948 den beri bilhassa İskandinav ölkelerinde çeşitli araştırma ve tartışmalara neden olmaktadır. Soroka ve Stern, yeni bir çalışmada (39), bu konudaki çeşitli araştırmaları ve sorunun çözümünün günümüzde vardığı son durumu özetlemektedirler. Bu çalışmada bildirildiğine göre, kalker fillerinin çimentonun dayanımı üzerindeki faydalı etkilerinin iki yönden olduğu düşünülmektedir. Birincisi, CaCO_3 ün,

hidrate olmakta olan çimento ile reaksiyona girip kalsiyum-karboalüminatlar oluşturmaktadır. Bu oluşumların etkisiyle çimentonun mekanik dayanımının ve ayrıca sülfat etkisine karşı dayanımının arttığı sanılmaktadır. İkinci faydalı mekanizma olarak, bir kalker fillerin veya herhangi bir fillerin çimento içindeki varlığının çimentonun hidratasyon hızını artırdığı düşünülmektedir. Konu, henüz kesin bir çözüme ulaşmış değildir. Az sayıda deneylerden elde ettiğimiz yukarıdaki sonuçlar da çimento üretiminde atıl kalker fillerinden yararlanılmasının mümkün olduğu yönünde ufak bir destek sağlamaktadır. Soroka ve Stern'in bildirdiğine göre, halen yürürlükte bulunan Macar ve Çin standartları çimentoya % 10-15 oranında hidrolik olmayan filler katılmasına izin vermektedir. Yurdumuz açısından çimento üretiminde bu çeşit uygulamaların sağlayacağı büyük tasarruf meydandadır. Bu bakımdan, kanımıza göre, yurdumuzda da bu yönde sistematik ve derinlemesine araştırmalara başlanması çok faydalı olacaktır.

Şekil 3.86 da "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranının kalker fillerin çimentonun bir bölümünü ikame etmesiyle, incelenen beton için, 0.67 iken yaklaşık olarak 0.78 e çıktığı görülmektedir. Bu da uygulama yönünden faydalı bir etkidir. Ayrıca, Şekil 3.87 de, kalker fillerin çimentonun bir bölümünü ikame etmesiyle, "Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı" oranında da ufak bir yükselme görülmektedir.

Şekil 3.88 de, basınç dayanımındaki birim kışalmanın çimentoyu ikame eden kalker filleri yüzdesiyle değişimi görülmektedir. Eğrinin gidişi Şekil 3.85 deki basınç dayanımı eğrisine çok uymaktadır. Bundan önceki serilerde de basınç dayanımı ve basınç dayanımındaki birim kışalma eğrilerinin gidişleri benzer şekilde bir paralellik gösteriyordu.

Şekil 3.89 da elâstiklik modülünün çimentoyu ikame eden kalker filleri yüzdesi ile değişimi görülmektedir. Kalker filleri oranı yükseldikçe elâstiklik modülünde çok yavaş bir artış olmuştur. Bölüm II de belirtildiği gibi, kalker filleri betonda kırmataş olarak kullanılan bir malzemenin elde edilmiştir. Bu malzemenin elâstiklik modülünün çimento hamurundan daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu bakımdan buradaki sonuç doğaldır.

Şekil 3.90 da süreksizlik sınırındaki, Şekil 3.91 de ise basınç dayanımının % 40 ındaki Poisson oranının değişimi görülmektedir. Poisson oranı, her 2 gerilme düzeyinde de kalker filleri oranının artışıyla yavaş bir artış göstermektedir. Ancak Poisson oranının değişiminin karmaşık karakteri daha önceki serilerde belirtilmişti. Bu bakımdan buradaki az sayıdaki sonuçtan bir genellemeye gitmemelidir.

4.8. KF serisi deneylerinin değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar

KF serisi deneylerinin değerlendirilmesinden başlıca aşağıdaki sonuçlara varılabilir :

1. Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç dayanımı çimentonun gerçek hacminin % 5 inin kalker filleri ile ikame edilmesi durumunda biraz yükselmiş, çimento gerçek hacminin % 15 inin kalker filleri ile ikame edilmesi durumunda ise, saf çimento kullanılan karışımdaki değerlerin altına düşmemiştir. Az sayıdaki bu sonuçlardan bir genellemeye gidilmesi ihtiyatsızlık olabilir. Ancak, yine de bu sonuçlar, kalker fillerlerinin betonun mekanik dayanımına faydalı olduğu yönündeki bir kanıyı kuvvetlendiren ve henüz kesin bir sonuca ulaşmamış bazı araştırmalara ufak bir destek sağlamaktadır. Ayrıca, kalker fillerinin çimentonun bir bölümünü ikame etmesiyle "Süreksizlik Sınırı/Basınç Dayanımı" oranında belirli, "Çözülme Sınırı/Basınç Dayanımı" oranında ise ufak bir yükselme görülmüştür. Bütün bu sonuçlar, yurdumuzdaki çimento üretiminde bir miktar kalker filleri kullanılması için gerekli sistematik ve derinlemesine araştırmaların başlatılmasının, sağlanabilecek önemli tasarruf gözönünde bulundurulursa, çok yararlı olacağını düşündürmektedir.

2. Çimentoyu ikame eden kalker filleri oranı artıkça, betonun elâstiklik modülünde çok yavaş bir artış görülmüştür.

3. Kalker fillerinin çimentonun çökelme eğilimini artırmadığı, çözülme olayının belirliliğini kaybetmemesinden anlaşılmaktadır.

4.9. Betonun kısa süreli basınç yüklemesi altındaki inelastik davranışında bağlayıcı hamurun yapısının işlevinin belirlenmesi

Şimdiye kadar çeşitli karışım serilerinde elde edilen diyagramlar ayrıntılı olarak incelenip ortaya çıkan sonuçlar belirtilmeye çalışılmıştır. E/C serisinin incelenmesinden varılan sonuçlar 4.2 paragrafında, HS serisinininkiler 4.4 paragrafında, UK serisine ait olanlar 4.6 paragrafında ve KF serisinin sonuçları ise 4.8 paragrafında özetlenmiştir. Bu paragrafta bu sonuçlar tek tek tekrarlanmayacak, ancak bütün bu sonuçların ışığında, betonun kısa süreli basınç yüklemesi altındaki inelastik davranışında bağlayıcı hamurun işlevinin saptanmasına çalışılacaktır.

1.4.2 paragrafında, bu araştırmada betonun bağlayıcı hamurunun yapısının bu malzemenin kısa süreli basınç gerilmeleri altındaki inelastik davranışındaki işlevinin önemli olup olmadığı sorununun çözümleneceği ve eğer önemliyse bu işlevin başlıca yasalarının saptanmasına çalışılacağı söylenmişti. Buradaki incelememize önce bağlayıcı hamurun yapısının betonun bu davranışında önemli bir işlevi olup olmadığı sorunundan başlayalım.

Yukarıdaki paragraflarda varılan sonuçlar, betonun basınç altındaki inelastik davranışında, bağlayıcı hamurun yapısının çok etkili bir işleve sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Bir defa, bağlayıcı hamurun yapısı çeşitli inelastik karakteristiklerin değerlerinde çok önemli değişikliklere neden olmaktadır. Bundan başka, hamurun yapısı, bu karakteristiklerin birbirine oranını da önemli ölçülerde değiştirmektedir. Belki bütün bunlardan daha önemli olan husus şudur : 4.1 paragrafında E/C serisi betonlarında elde edilen sonuçlar üzerinde yapılan ayrıntılı bir analiz, betonun basınç altındaki inelastik davranışının bütün aşamalarında bağlayıcı hamurun yapısının önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşı agreganın granülometrisi, uygulamadaki normal sınırlar içinde kaldıkça, ancak bazı özellikler üzerinde etkili olmaktadır. Buna göre, bağlayıcı hamurun yapısının, betonun bu davranışında temel rolü oynadığı da söylenebilir.

Önemli olduğu görülen bu işlevin başlıca yasaları nelerdir ?

Bağlayıcı hamur, hiç şüphe yok ki, yapısı en çok değişim gösteren beton bileşenidir. Bu yapı, çimentonun kimyasal bileşimi ile, inceliği ile, Su/Çimento oranı ile, betonun yaşı ile, betonun saklanma koşulları ile, kullanılan çeşitli katkı maddeleriyle ve bunlara benzer daha bir çok nedenle, sonsuz denecek kadar çok çeşitlilik gösterebilir. Bundan dolayıdır ki, bağlayıcı hamurun yapısının incelenmesi, beton araştırmacılığı içinde, bağımsız ve çok büyük bir araştırma birikiminin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bir sonraki Bölüm V de bu birikime çok kısa olarak değinilecektir. Bu bakımdan, bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli basınç altındaki inelastik davranışındaki işlevinin tüm yasalarının bir tek araştırmada belirlenebileceği düşünülemez. Ancak, öyle sanıyoruz ki, bu çalışmada elde edilen sonuçlarla, bu yasalar hiç değilse bazı bakımlardan açıklanmaktadır. Bu çalışmada bu konuda varılan sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

En başta beliren husus şudur : Betonun elastik sayılabilecek özellikleri, bağlayıcı hamur açısından, agregalar arasına giren jelin yalnızca miktarı ile ilgilidir. Bu jellerin inşa ettikleri hamurun kılcal boşluk yapısı (mikroyapısı) elastik özellikleri etkilememektedir. Buna karşı, betonun iç tahribat başladıktan sonraki davranışı, yani inelastik davranışı, hamurun mikroyapısına son derece duyarlıdır. Hamurun mikroyapısı, inelastik davranış karakteristiklerinin değerlerinin belirlenmesinde başlıca rolü oynamaktadır.

Bir başka önemli husus şudur : betonun bağlayıcı hamur fazının içinde çeşitli tip ve boyutlarda boşluklar bulunur. Bunlar başlıca :

1. Çimentoya katılan sudan, hidrasyon için gerekenden fazlasının doğurduğu, karışık bir ağ şeklindeki kılcal boşluklar,
2. Katkı maddesiyle hamur fazı içine sürüklenen, çapları genellikle 0.05 mm ilâ 1.25 mm arasında değişen, küresel şekilli boşluklar,

3. Agrega granülometrisinin fazla boşluklu olmasından dolayı, bağlayıcı hamurun dolduramadığı, makroskopik boşluklardır. (Bir de beton iyi yerleştirilmediği veya ayrıştığı için meydana gelen çok büyük boşluklar vardır. Ancak, bu tür boşluklar incelemelerimizin dışında tutulmaktadır).

Şimdiye kadar, genellikle, bu 3 boşluk tipinin betonun basınç dayanımı üzerinde aynı etkiye sahip olduğu düşünülmektedir (24, 29 gibi). Bu kanıdan hareketle, beton basınç dayanımı formüllerinin bir kısmında (Dayanımı $C/E + h$ ya bağlayanlar) bu boşlukların taze betondaki hacimlerinin toplamı hesaplara girmektedir. Araştırmamızda elde edilen sonuçlar, çeşitli boşluk tiplerinin betonun basınç dayanımı ve diğer inelastik özellikleri (Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, gibi) üzerindeki etkilerinin, eşit kabul edilmesine olanak bulunmayacak kadar farklı olduğunu göstermiştir. Bu özellikler üzerinde en fazla zararlı olanlar, betonun başlıca E/C oranına bağlı olan kılcal boşluklardır. Bundan sonra, betonun içine sürüklenen hava boşlukları gelmektedir. En az zararlı etkiye ise, agrega granülometrisinin neden olduğu hapsolmuş makroskopik hava boşlukları sahiptir.

Elde edilen bu iki yasanın dışında, şu gibi hususlar söylenebilir :

- Betonun çözülme sınırını aştıktan sonraki davranışı, bağlayıcı hamurun yapısına karşı, bazı durumlarda, çok duyarlı olabilmektedir. Hapsolmuş hava oranının yüksek ve E/C oranının düşük olduğu betonlarda, taze betonda bir miktar su sızıntısı olması, biraz daha dolu bir hamur yapısına yol açmakta, ve bu betonlarda çözülme olayı belirsiz iken, belirli bir hale gelmektedir. Ters yönde gelişen bir başka örnek şudur : Belirli bir çözülme olayı gösteren betonlarda, çimentonun bir bölümü inceliği az olan bir uçucu külle ikame edildiğinde, hamurun çökme eğilimi artmış ve bu yüzden çözülme olayı belirsiz bir hale gelmiştir. Genel olarak, çözülme olayının belirli olması için gerek koşul, hamurun dolu bir yapıya sahip olmasıdır.

- Kenetlenme olayı ancak zayıf hamurlu betonlarda etkilidir. Fakat hamurun dayanımı belli bir sınırın altına düşürse, kenetlenme olayı yine etkili olmaktan çıkar.

BÖLÜM V

İLERİ ARAŞTIRMALAR

Bölüm I de de belirtildiği gibi, betonun mekanik davranışlarının incelenmesi, günümüze kadar, çok büyük bir araştırma birikiminin oluşmasına neden olmuştur. Bölüm I de, bu araştırmalardan, kısa süreli tek eksenli basınç gerilmesi altındaki inelastik davranışla ilgili olanlar belirtilmişti. Bunlardan başka, betonun uzun süreli yükler, tekrarlı yükler, çok eksenli gerilme altındaki davranışları da, önemli sayıda araştırmının konusu olmuştur. Günümüzde de bu çalışmalar sürmektedir.

Betonun uzun süreli yükler altındaki viskoelastik davranışında çimento hamurunun temel rolü oynadığı ortadadır. Herhalde bu nedenden, betonun sünmesinde bağlayıcı hamurun yapısının etkileri bir ölçüde incelenmiştir (40). Ancak betonun diğer mekanik davranışlarında bağlayıcı hamurun yapısından gelen etkiler, hemen hemen hiç ele alınmamıştır.

Diğer taraftan, bağlayıcı hamurun yapısının araştırılması, çok büyük bir başka araştırma birikimine neden olmuştur. Bu konuda çalışanların en başta gelenlerinden Powers bu yoğun çalışmaların bir özetini ve bu konuda çalışan başlıca araştırmacıları vermektedir (41). Powers'in

verdiği bilgilere göre bu çalışmalar bilhassa İkinci Dünya Savaşından sonra, başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere, başlıca Japonya, İsveç, Avusturya, Avustralya, Danimarka, Kanada gibi ülkelerde yoğunluk kazanmıştır. Günümüzde de bu çalışmalar sürmektedir.

Ancak bu çalışmaların betonun mekanik davranışları üzerinde uygulanması, yukarıda da belirtildiği gibi, çok sınırlıdır. Diğer bir deyimle, bu iki büyük araştırma birikimi birbirine bağlanmamıştır. Daha bu yıl (1976) toplanan bir konferansta Wittmann (42) çimento hamurunun mikroyapısı ile mühendislik özelliklerinin henüz birbirine bağlanmadığından bahsetmektedir. Aynı şekilde günümüzde çimento hamurunun yapısı ile betonun mühendislik özellikleri de birbirine bağlanmış olmaktan uzaktır.

Çimento hamurunun yapısının betonun mühendislik özellikleri, veya araştırmamızda gözönüne aldığımız konular itibariyle daha dar çerçevede söylemek gerekirse, mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek ilginç olabilir mi? Kanımızca, böyle bir incelemeye girmek, eğer bağlayıcı hamurun yapısı betonun mekanik davranışlarında önemli bir işleve sahipse, mühendislik açısından bir yarar sağlar. Araştırmamızda bu işlevin tek eksenli kısa süreli basınç yüklemesi altında önemli olduğu gösterilmiştir. Benzer çalışmalar betonun diğer mekanik zorlanma durumlarında da yapmak uygun olacaktır. Ancak betonun tek eksenli kısa süreli basınç yüklemesi altındaki süreksizlik ve çözülme sınırları ile diğer zorlanma durumlarındaki mekanik özellikleri arasında genellikle var olduğu kabul edilen ilgiler hatırlanırsa, bağlayıcı hamurun yapısının bu mekanik davranışlarda da büyük bir olasılıkla önemli bir işleve sahip olduğu söylenebilir.

Eğer herhangi bir mekanik zorlanma durumunda bağlayıcı hamurun yapısının önemli bir işleve sahip olduğu saptanırsa, bu mekanik zorlanma durumunda bağlayıcı hamurun yapısını ve agrega özelliklerini (cins, granülometri, miktar) değiştirerek araştırmaları genişletmek gerekecektir. Kolaylıkla görülmektedir ki, böyle bir yola gidilmesi, önemli hacimde bir araştırmanın gerçekleştirilmesini gerektirecektir.

Acaba bu derece büyük çapta bir araştırmaya gitmek mantıksal mıdır? Bu konuda harcanacak para ve emeklere değecek midir?

Kanımızca, bu, doğal olarak, çeşitli ekonomik etkenleri gözönüne alarak, en başta ve ayrıntılı olarak incelenmesi gereken sorundur. Özellikle ülkemiz açısından böyle bir inceleme mutlaka yapılmalıdır. Ancak, kanımızca, böyle bir inceleme sonunda, bu büyük araştırma hacminden, hiç değilse ekonomik açıdan en fazla önem taşıyanlarının ele alınmasına karar verilmesi için ortada kuvvetli nedenler vardır. Çünkü, gerek ülkemizde, gerekse dünyada, beton çok büyük miktarlarda kullanılan bir yapı malzemesidir. Diğer taraftan beton için bu şekilde büyük ekonomik kaynakların harcanması, mühendisleri, bu malzemeyi gittikçe daha şiddetli zorlamalar altında çalıştırmaya yöneltmektedir (Bilhassa ön gerilmeli beton tekniğinin ve prefabrikasyonun yapı mühendisliğine girmesinden sonra). Bu şekilde önemli kârlar sağlanmaktadır. Ancak, bu durumda, mühendisliğin temel koşulu olan "güvenlik" kavramını korumak, ancak betonun bu zorlanmalar altındaki davranışını kesinlikle bilmekle mümkündür.

Acaba, bağlayıcı hamurun yapısının betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelerken, bu derece geniş deneysel çalışmalara gitmek gerçekten gerekli midir? Sorun, bazı basitleştirici modellerle, hiç değilse bir ölçüde, çözümlenemez mi?

Bağlayıcı hamurun yapısının karmaşıklığı, bu yapının çeşitliliği, ayrıca bu yapının zamanla ve ortam şartlarıyla gösterdiği önemli değişimler, bunlardan ayrı olarak agrega yapılarının gösterdiği oldukça büyük çeşitlilik bu soruya olumlu bir cevap vermeyi çok güçleştirmektedir. Zaten, araştırmamızda da, bağlayıcı hamurun yapısının mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin karmaşık karakterde olduğu çeşitli örneklerde görülmüştür. Bu bakımdan, deneysel çalışmalar yapmadan, yalnızca modeller yardımıyla sorunları çözümlemek, imkânsız denecek kadar zordur. Ancak deneysel çalışmalardan elde edilecek sonuçlar yardımıyla gelişmiş bazı modeller kurulabilirse, bunlar şüphesiz, sorunların çözümünde yardımcı olacaktır.

Araştırmamızda varılan sonuçlar, bundan sonra yapılması gereken çalışmalar konusunda, genel olarak bunları düşündürmektedir. Ancak, bunların yanında, incelenmesinin yararlı olacağı görülen somut bazı konular da ortaya çık-

maktadır. Bunları şöyle sıralayabiliriz :

1. Hava sürüklenmiş betonlarda, bilinen basınç dayanımı formüllerinin geçerli olmadığı araştırmamızda görülmüştür. Bu betonlarda basınç dayanımının, genel olarak :

$$R = f(E/C, h^*) \quad , \quad \text{veya}$$

$$R = f(E/C, h_t)$$

şeklinde fonksiyonlarla ifade edilebileceği gösterilmiştir. Bu fonksiyonların açık şekillerinin araştırılması uygun olacaktır.

2. Basınç dayanımı ve diğer inelastik özellikler üzerinde, hamur fazı içindeki çeşitli boşluk tiplerinin (kılcal boşluk, sürüklenmiş hava, hapsolmuş hava) farklı etkileri olduğu araştırmamızda gösterilmiştir. Bilhassa basınç dayanımı üzerinde, bu boşluklarla ilgili karakteristik değerlerin etkilerinin incelenmesi yararlı olabilir.

3. Çimentonun bir bölümünün uçucu külle ikame edilmesi, yurdumuz açısından büyük bir ekonomik önem taşımaktadır. Ayrıca kalker fillерinin de önem taşıdığı hakkında ümitli olunabilir. Bu araştırmamızda, amacımız itibariyle, bu konularda dar tuttuğumuz çalışmalarını çeşitli yönlerde genişletmek ve bu arada mikroyapı düzeyindeki olayları da inceleyerek, bu maddelerin uygulamada kullanılması için gereken bütün araştırmaları tamamlamak, hiç şüphe yok ki, çok faydalı olacaktır. Bunların yanında, yurdumuzda gittikçe bir artık madde olarak üretimi artan yüksek fırın curuflarının da aynı paralelde incelenmesi yarar sağlayacaktır.

BÖLÜM VI

S O N U Ç L A R

Bu araştırmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir :

1. Bağlayıcı hamurun yapısı betonun tek eksenli basınç altındaki kısa süreli inelâstik davranışında önemli bir işleve sahiptir.

2. Betonun elâstik özellikleri (elâstiklik modülü gibi) bağlayıcı hamurun kılcal boşluk yapısına (mikroyapısına) karşı duyarlı değildir ; bu özellikler agregaların arasında bulunan toplam jel miktarı ile ilgilidir. Buna karşı inelâstik özellikler (Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve bu gerilmelerle ilgili şekildeğiştirmeler) hamurun mikroyapısına karşı duyarlıdır.

3. Bağlayıcı hamur içindeki çeşitli boşluk tiplerinin (kılcal, sürüklenmiş hava, hapsolmuş hava) inelâstik özellikler üzerindeki etkileri önemli derecede farklıdır. Toplam hacmi aynı olan boşluklardan, çapı küçük olanlar daha zararlı etkiye sahiptir ; boşluk çapı büyüdükçe zararlı etki de azalmaktadır.

4. Araştırmada incelenen sınırlar içinde, katkısız betonlarda, değişkeni C/E olan basınç dayanımı formülleri uygundur ; buna karşı değişkeni $C/(E+h)$ olanlar uygun değildir. Hava sürüklenmiş betonlarda ise halen kullanılan formüller yeterli değildir ; bu betonlarda $f(C/E, h)$ şeklinde daha gelişmiş yeni formüllerin bulunması gerekmektedir.

5. Betonun elâstiklik modülü ile basınç dayanımı arasındaki bağıntılar yapısal bağıntılar değildir (Bu iki büyük- lük farklı yapısal parametrelere bağlı olduğundan). Bu bağıntılar istatistiksel anlamda bir ilgiden ibarettir.

6. Betonun çözülme sınırını aştıktan sonraki davranışı, bağlayıcı hamurun yapısına karşı, bazı durumlarda çok duyarlı olabilmektedir. Çözülme olayının belirli olması için gerek koşul, hamurun dolu bir yapıya sahip olmasıdır.

7. Kenetlenme olayı, iri agregası fazla ve hamuru za- yıf betonlarda etkilidir. Ancak hamurun dayanımı belli bir sınırın altına düşerse, kenetlenme olayı etkili olmaktan çı- kar.

8. Su/Çimento oranı İri Agregası - Harç bağ dayanımları- nı çok etkilemektedir ; bu oranın bağ dayanımları üzerindeki etkisi, betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisinden de faz- ladır.

9. Poisson oranı, hamur yapısına bağlı olarak, çok karmaşık değişimler göstermektedir.

10. Çimentonun bir bölümünün uçucu külle veya kalker filleri ile ikame edilmesi ümit verici sonuçlar vermektedir. Bu konulardaki araştırmalar derinleştirilmelidir.

11. Bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli inelâstik davranışında önemli bir işleve sahip olması, şim - diye kadar betonun mekanik davranışları üzerinde yapılan a- raştırmalarla, bağlayıcı hamurların yapısı üzerindeki araş - tırmaların, yeni çalışmalarla birbirine bağlanmasının gerek- tiğini düşündürmektedir.

YAYIN LİSTESİ

- (1) WINTER, G., "The role of microcracking in inelasticity and fracture of concrete", *Stahlbetonbau, Berichte aus Forschung und Praxis, Festschrift Rüşch, Ed., Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1969, pp.47-59*
- (2) Colloquium on Nature of Inelasticity of Concrete and Its Structural Effects, Organized by G.Winter and H.Rüşch, Cornell University, 1965,
- (3) ÇETMELİ, E., Yeni Alman Betonarme Şartnamesi (DIN 1045, 1972) Betonarme Hesap Esasları, Kesitlerin Boyutlandırılması ve Donatının Yerleştirilmesi, Uluğ Kitabevi, İstanbul, 1974
- (4) BRANDTZAEG, A., "Failure of a material composed of non-isotropic elements", *Det.kgl. Norske (Trodhjem), Vid. Sels. Skrifter No.2, 1927*
- (5) JONES, R., "A method of studying the formation of cracks in a material subjected to stresses", *British Journal of Applied Physics, London, 3, 1952, No.7, pp.229-232*
- (6) L'HERMITE, R., *Idées Actuelles sur la Technologie du Béton, Documentation Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, 1955.*
- (7) AKMAN, M.S., İri Agrega-Kum Oranının Beton İç Yapısı ve Özelliklerine Etkisi, Doçentlik Tezi, İ.T.Ü.İnşaat Fakültesi, 1972 (yayınlanmadı).

- (8) ORTH, J.F., JACQUIN, P., BUVAT, M., BERROD, J.,
"Contribution à l'étude du comportement et des
caractéristiques élastiques des bétons fortement
solicités", Construction Tome XVII, No.6, 1962, pp.161-173
- (9) BERES, L., "Investigation on structural loosening of
compressed concrete", Matériaux et Constructions, Bulletin
RILEM, No.36, 1967, pp.185-190
- (10) SHAH, S.P., CHANDRA, S., "Critical stress, Volume change,
and microcracking of concrete", Journal of the ACI, 1968,
No.9, Proceed, V.65, pp.770-781.
- (11) DESAYI, P., VISWANATHA, C.S., "True ultimate strength of
plain concrete", Matériaux et Constructions Bulletin
RILEM, No.36, 1967, pp.163-174
- (12) JONES, R., KAPLAN, M.F., "The effect of coarse aggregate
on the mode of failure of concrete in compression and
flexure", Mag of concrete Research, Vol.9, No.26, 1957,
pp.89-94
- (13) ROBINSON, G.S., "Methods of detecting the formation and
propagation of microcracks in concrete", The Structure
of Concrete and its behaviour under load : Proceedings of
an International Conference, London, September 1965,
London, Cement and Concrete Association, 1968, pp.131-145
- (14) BERG, O.J., "Déformations longitudinales et transversales
du béton soumis à une charge de courte et de longue durée",
CNIIS , Moscou, 1965. (Bkz. BRANDT, A.M., "Les déformations
du béton d'après la mesure de six composantes", Cahier de
la recherche 29 de l'ITBTP, Ed. Eyrolles, (1971).
- (15) RÜSCH, H., "Physical problems in the testing of concrete",
Translation made by C.V. Amerongen, London, Cement and
Concrete Association, 1960, pp.21, Library Translation
Cj. 86
- (16) PELTIER, R., "Recherches expérimentales et théoriques sur
la rupture des bétons", Construction, Tome X, No.12, 1955,
pp. 518-522.

- (17) HSU, T.T.C., SLATE, F.O., STURMAN, G.M., WINTER, G., "Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve", Journal of the ACI, Feb. 1963, pp.209-224
- (18) SLATE, F.O., OLSEFSKI, S., "X-rays for study of internal structure and microcracking of concrete", Journal of the ACI, No.3, 1963, pp.575-588
- (19) SHAH, S.P., SLATE, F.O., "Internal microcracking, mortar- aggregate bond and the stress-strain curve of concrete", Proc. of an Inter Conf. on the Structure of Concrete and its Behaviour under Load, London, Sept.1965 pp. 82-92
- (20) KAPLAN, M.F., "Strains and stresses of concrete at initiation of cracking near failure", Journal of the ACI, Jul. 1963, pp.853-879
- (21) LOTT, J., KESLER, C.E., "Crack propagation in plain concrete", Symp. on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, Highway Research Board, Special Report 90, Washington D.C., 1966, pp.204-218
- (22) BÜYÜKÖZTÜRK, O., NILSON, A.H., SLATE, F.O., "Stress-strain response and fracture of a concrete model in biaxial loading", Journal of the ACI, Aug. 1971, pp. 590-599.
- (23) AKMAN, M.S., Kırmataş İri Agregalı Betonlarda Harç-Beton Sınırı Üzerinde Araştırmalar, İTÜ.İnş.Fak., Teknik Rapor, No.21, 1975
- (24) NEVILLE, A.M., Properties of Concrete, Pitman Publishing, Second (metric) edition, 1973
- (25) RÜSCH, H., "Forschungsaufgaben auf dem gebiet des Stahlbetonbauss", 9 Kongress Deutscher Beton, Verein, Berlin, 1952.
- (26) NEWMAN, K., "Criteria for the behaviour of plain concrete under complex states of stresses", Inter. Conf.on the Structure of Concrete, London, Sept.1965, Ed. Cement and Concrete Assoc., 1968, pp.255-274.

- (27) DURIEZ, M., ARRAMBIDE, J., Nouveau Traité de Matériaux de Construction, Tome I, Dunod, Paris 1961.
- (28) KEETON, J.R., "Strain distribution in compressively loaded concrete specimens", ASTM, Proceed., Vol.61, 1961, pp.1197-1220
- (29) POWERS, T.C., The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, PCA Res. Dept. Bull.90., 1958
- (30) VERBECK, G., "Energetics of the hydration of Portland cement", Proc., 4 th Inter. Symp. on the Chemistry of Cement, Washington, D.C., 1960, pp.453-465.
- (31) NEWMAN, K., "The structure and properties of concrete, an introductory review", Proc. of an Inter. Conf. on the Structure of Concrete, London, Sept. 1965, pp.XIII-XXXII.
- (32) AKYÜZ, S., Kompozit Malzeme Olarak Betonda Elâstik Bölgedeki Fazlar Arası Etkileşmenin Sayısal Bir Yöntemle İncelenmesi, Doçentlik Tezi, İTÜ,İnş.Fak. 1976(yayınlanmadı).
- (33) GUY, A.G., Introduction to Materials Science, McGraw-Hill 1972
- (34) TAYLOR, M.A., BROMS, B.B., "Shear bond strength between coarse aggregate and cement paste or mortar", Journal of the ACI, Aug. 1964, pp.939-958.
- (35) FARRAN, J., "Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés", Revue de Matériaux de Construction, Nos : 490, 491, 492, Juil-Août, Sept.1956, pp.155-171, 191-209.
- (36) SANDSTEDT, C.E., LEDBETTER, W.B., GALLAWAY, B.M., "Prediction of concrete strength from the calculated porosity of the hardened cement paste", Journal of the ACI, Febr. 1973, pp.115-116.

- (37) RECHETNIKOV, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., 1937, Vol.I, pp. 404 (Bkz. (38))
- (38) STEPOVE, A., "Sur la structure des suspensions aqueuses des ciments purs ou mélangés et sur les propriétés techniques de ces suspensions durcies", Revue des Matériaux de Construction, 1958, No.508, pp.1-9
- (39) SOROKA, I, STERN, N., "Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement", Cement and Concrete Research, Vol.6, No.3, May 1976, pp.367-376
- (40) ALI, I, KESLER, C.E., Rheology of Concrete : A Review of Research, Univ. of Illinois, Engineering Experiment Station, Bull. 476, 1965
- (41) POWERS, T.C., "The growth of basic research on the properties of concrete in the PCA laboratories", Symp., on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, Highway Research Board, Special Report 90, Washington, 1966, pp.3-8.
- (42) WITTMANN, F.H., "Invited contribution : The structure of hardened cement paste -a basis for a better understanding of the materials properties", Hydraulic Cement Pastes : Their Structure and Properties, Proceed of a Conf. held at University of Sheffield 8-9 April 1976, Cement and Concrete Association, 1976.



2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030

Ö Z G E Ç M İ Ş

Osman N.Oktar 1944 de İstanbul'da doğdu. Şişli Ondokuzmayıs İlkokulu, Saint Michel Fransız Ortaokulu, Saint Benoit Fransız Lisesini bitirdikten sonra 1962 yılında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesine girdi ve buradan 1967 de mezun oldu. 1967-69 arasında askerlik görevini yaptı. 1969 da İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Kürsüsüne teknisyen olarak girdi. 1971 de bu kürsünün asistan kadrosuna atandı. Halen aynı görevdedir.

T. G.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi