

PÜSKÜRTME BETONUN KIRILMA SONRASI DAVRANIŞININ KAYA – TAHKİMAT ETKİLEŞİMİNDE KULLANIMI

¹Erim GÜÇLÜ, ²Hakan TUNÇDEMİR

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*

²*İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*

¹guclueri@itu.edu.tr, ²tdemir@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 04.04.2014; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.05.2014)

ÖZET: Bu çalışmada, çevresinde yeni galeriler açılması sonucu gerilme koşulları değişen maden galerilerinde kullanılan püskürtme betonun kırılma sonrası davranışının arazi tepkime eğrisi ile birlikte kullanımını ele alan yeni bir model önerilmektedir. Hoek ve Brown tarafından 1980 yılında önerilen kaya tahkimat etkileşimi teorisi tasarımı kullanılmıştır. Püskürtme betonu enerji yutma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla 24 adet farklı karışım ve lif içeriklerine sahip numunelerde panel testi uygulanmıştır. Uygulanan panel testleri sonuçları kullanılarak akma teorisi ve doğrusal olmayan regresyon yardımıyla enerji yutma kapasite hesabı için yeni bir eşitlik önerilmiştir. Mevcut enerji yutma konsepti ile olan yüksek dereceli ilişkileri ortaya konulmuştur. Madencilik faaliyetleri sırasında başlangıçta bir galeri çevresindeki kaya ortamı kemerlenmiş olsa da çevrede açılan yeni boşluklarla yeni gerilme koşulları oluşabilmektedir. Dolayısıyla sabitleştirilmiş bu bölgeler yeniden harekete geçebilmektedir. Önerilen yeni modelle farklı gerilme durumlarına maruz kalan maden galerilerinin tepkime eğrisinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca yer değiştirmelerin aletli ölçmelerle takip edilmesi koşuluyla lifli püskürtme betonun kırılma sonrasında sökülüp ya da sadece tamir edilip yenilenmesi bunlar mümkün olmazsa yeni bir püskürtme beton tasarımı kararına varılabileceği mümkün olabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kırılma Sonrası Davranış, Püskürtme Beton, Enerji Yutma Kapasitesi

Post Crack Behavior of Shotcrete in Rock Support Interaction Curve

ABSTRACT: In this study, post crack behavior of shotcrete with ground reaction curve is investigated. Fiber reinforced shotcrete has also energy absorption capacity after failure. For this reason, modelling of post crack behavior of shotcrete is an important deal. In order to determine energy absorption capacity, 24 shotcrete panels were tested. A new support characteristic curve is proposed using yield line theory and nonlinear regression method. Proposed shotcrete characteristic curves are used in rock support interaction theory. New stress state can be seen after new mining operations around old one. Secondary stress states are evaluated with proposed curves in the theory. Deformation rates around underground opening is decreasing because of energy absorption of shotcrete even if it fails. In this scope, decision on repairing shotcrete or restoring a new designed one can be made after failure of shotcrete providing that ground reaction curve of new stress states are well determined and that displacements are measured.

Key Words: Post Crack Behavior, Shotcrete, Energy Absorption Capacity

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Püskürtme beton günümüzde maden galerilerinde kolaylıkla uygulanan bir malzemedir. Birçok kullanım yerinde özellikle maden ve inşaat tünellerinde normal betona kıyasla daha kullanışlıdır. Bu nedenle gün geçtikçe kullanımı artmaktadır. Ancak özel donanımlar gerektirdiğinden beton

kullanımından farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle püskürtme betonun ortama uygun olarak hazırlanması ve uygulaması; makine, inşaat ve maden mühendisliği gibi birçok disiplinin bir arada çalışmasını gerektiren bir faaliyettir. Püskürtme betonun daha verimli olarak uygulanması için yapılacak araştırmalar bu disiplinlerin ortak çalışması ile mümkün olacaktır (Spirig, 2004). Püskürtme beton için farklı amaçlarla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlar, püskürtme betonun mekanik özelliklerinin karışım oranlarıyla ilişkisi, mekanik özelliklerinin tespiti için geliştirilen metotlar, püskürtme betonun tahkimat elemanı olarak performansının belirlenmesi gibi alanlarda yoğunlaşmıştır.

Örneğin püskürtme betondaki lif yöneliminin ve lif geometrisinin eğilme dayanımında önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir (Banthia ve diğerleri, 1994). Başka bir çalışmada kullanılan liflerin kırılma sonrası performansları ve bu performansların neticesinde maliyetlerdeki etkisi incelenmiştir (Denney ve Hagan, 2004). Bunun yanında dairesel numunelerin kullanıldığı lif içeren püskürtme betonda plaka eğilme deneyleri yapılmış ve bu deneylerde numune kalınlığının performans üzerindeki etkisi belirlenmiştir (Bernard ve Pricher, 2013). Püskürtme betonun elastisite modülünün tahmini için de araştırmalar yapılmıştır (Galobardes ve diğerleri, 2014). Farklı araştırmacılar tarafından püskürtme betonla kaya arasındaki ara yüz özelliklerinin tanımlanabilmesi için çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir (Saiang ve diğerleri, 2005; Holmgren ve Hahn, 1979; Malmgren ve diğerleri, 2004). Bu araştırmalarda kaya ve püskürtme beton arasındaki tutunma dayanımı incelenmiş ve bunun normal ve kesme rijitliği arasındaki ilişkileri ortaya konmuştur. Kayaçta yer alan minerallerin, tutunma dayanımında yüzey pürüzlülüğünden daha fazla rol oynadığı tespit edilmiştir.

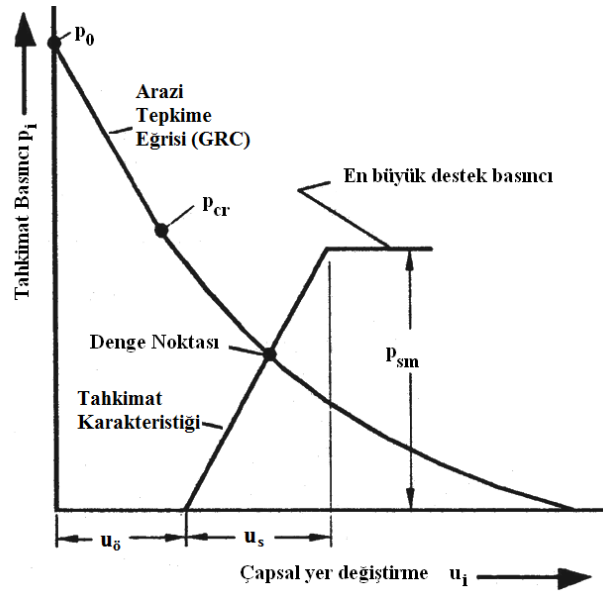
Her ne kadar inşaat tünellerinde püskürtme beton taşıyıcı malzeme olarak tasarımılandırılmasa da, maden galerilerinde uygulanan püskürtme betonun, gerilme koşullarının değişmesi sonucunda oluşan ek gerilmeleri sönmülmesi gerekir. Bu çalışma, hâlihazırda açılmış maden galerilerine uygulanmış püskürtme betonun, yakınlarda yeni bir galeri açıldığında ilk galeri çeperinde oluşan gerilmelerin artışı sonucu oluşan yüksek enerjiyi sönmüleyici olarak kullanılması konusunda yoğunlaşmış ve çalışmada bu konuda yapılmış bazı deneysel, nümerik ve teorik çalışmalara özet olarak değinilmiştir. Bu çalışmaların bazılarında püskürtme betonun lifle güçlendirildiğinde davranışının nasıl değiştiği belirlenmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak temel amaç, püskürtme betonun enerji yutma kapasitesi göz önünde bulundurularak çeşitli madencilik faaliyetleri sebebiyle galerilerde değişen gerilme koşullarındaki performansının değerlendirilmesidir. Bu amaçla püskürtme betonun tahkimat karakteristik eğrisinin plaka eğilme deneyi kullanılarak tespit edilmesi ve formüle edilmesi hedeflenmiş, bunun galeri çevresinde yeni teknik girişimler sebebiyle oluşan yeni gerilme koşulları ile arasındaki ilişkisi irdelenmiştir.

MADENCİLİK FAALİYETLERİNİN ARAZİ TEPKİME EĞRİSİNE ETKİSİ (EFFECT OF MINING OPERATIONS ON GROUND REACTION CURVE)

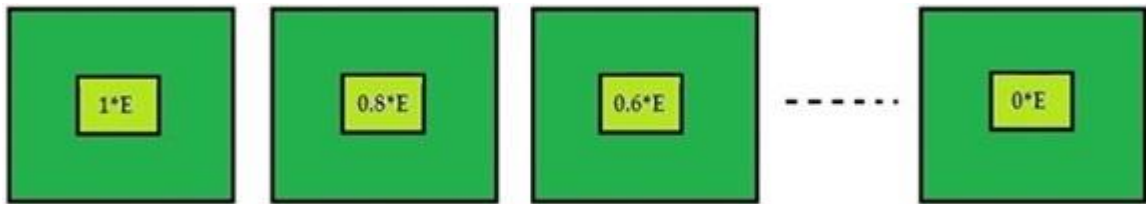
Kaya tahkimat etkileşimi incelenirken en çok kullanılan yöntemlerden biri arazi tepkime eğrisi ile tahkimat karakteristiği eğrisinin birlikte çözümlenerek tahkimatın hangi yer değiştirme miktarında ve ne zaman yerleştirileceğine karar verildiği Hoek ve diğerleri tarafından 1995 yılında önerilen ve Şekil 1' de gösterilen yöntemdir. Bu yöntemde bazı ön kabuller yapılmıştır. Bunlar çalışılan kaya ortamının homojen bir yapıda olduğu ve hidrostatik basınç altında yüklendiği, yeraltındaki açıklığın dairesel kesitli olduğu kabulüdür. Yöntemde püskürtme betonda kırılma olmadığı varsayılmakta ve zamana bağlı olarak azalan tahkimat basıncı zamana bağlı olarak artan tahkimat (püskürtme beton) direnci ile karşılandığında ortamın duraylı olduğu düşünülmektedir. Oysa yeni oluşan gerilme koşulları dolayısıyla püskürtme beton direnci aşırsa bu durumda püskürtme betonun kırılma sonrası enerji sönmülme kapasitesi son derece önem kazanmaktadır. Kırılmaya sebep olan yüksek enerji püskürtme beton tarafından sönmülenebiliyorsa ve ortamı yeniden denge haline getirebiliyorsa bu durumda püskürtme betonun tamirat işlemi yapıp ortam duraylı hale gelebilir ancak sönmülenemiyorsa bu kez yenilen bu kabuğun yerinden sökülerek yeni bir tasarımla yeniden yerleştirilmesi gerekebilir. Dolayısıyla yöntemin bu açıdan irdelenmesi daha efektif bir galeri tahkimatı yapmak açısından gereklidir. Bunu yapmak için de öncelikle

değişik lifler kullanılmış, değişen oranlarda lif katkısı yapılmış ve/veya farklı içeriklerde hazırlanmış püskürtme beton karışımlarının bir dizi panel testine tabi tutularak enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesi gerekir.



Şekil 1. Arazi tepkime eğrisi ile tahkimat karakteristiği arası ilişki (Relationship between ground reaction curve and support characteristic -) (Hoek ve diğerleri, 1995)

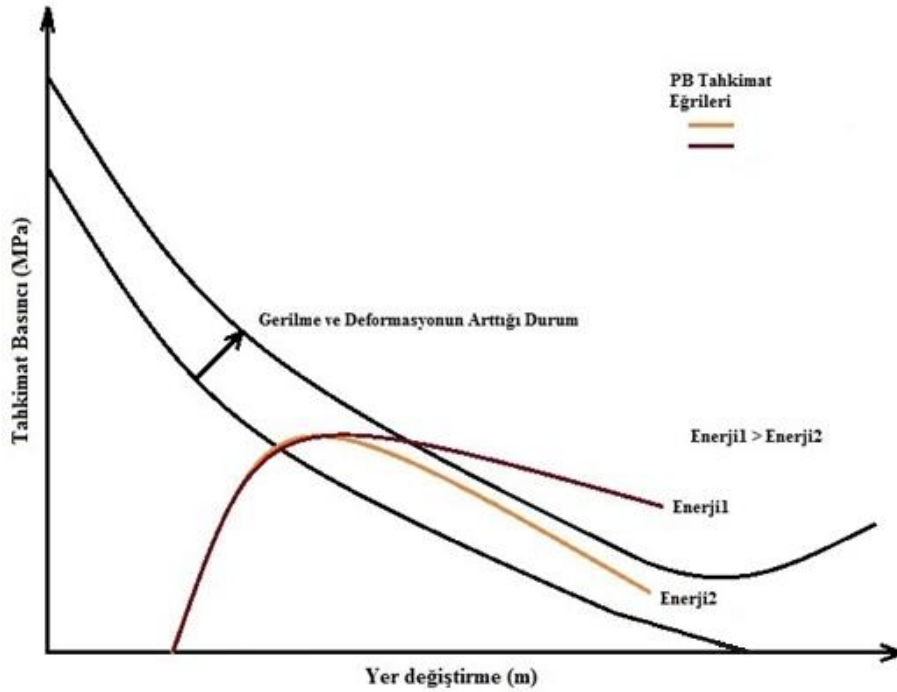
Yukarıda koşulların sağlanmadığı durumlarda nümerik yöntemler yardımıyla da kaya ortamının karakteristik eğrisi (arazi tepkime eğrisi) oluşturulabilir. Örneğin, kare kesitli olarak açılan bir galeride, Moldovan ve Popa'nın 2012'de sunduğu Young modülünü kademeli olarak azaltma yöntemiyle kayaç karakteristik eğrisi oluşturulabilmektedir. Bu yöntemde farklı indirgeme oranları kullanılarak her aşamada Young modülü azaltılıp ve en son aşamada Şekil 2'de görüldüğü gibi kazıya geçilmektedir. Her aşamada galeride basıncın ve deplasmanın en fazla olduğu noktalarda gerilme ve yer değiştirmeler kaydedilmekte ve galerinin kaya ortamı karakteristik eğrisi ortaya çıkarılmaktadır.



Şekil 2. Young modülü azaltma metodu (Stiffness reduction method) (Moldova ve Popa, 2012)

Madencilik faaliyetleri sırasında açılmış ve tahkimat ünitesi yerleştirilmiş galeride ikincil gerilme koşulları oluşabilmektedir. Bu duruma örnek olarak yeraltı su seviyesindeki değişimler gösterilebilir (Shin ve diğerleri, 2011; Lee ve diğerleri, 2006)ya da galeriye yakın bir yerde başka bir galeri açılması ile ilk galeri çevresindeki gerilme durumunun değişmesi örnek olarak gösterilebilir. Bu nedenle kaya ortamı tepkime eğrisi, bu gibi ikincil gerilme koşulları ile değişim göstermektedir. Bu durumda kaya ortamı karakteristik eğrisi artan gerilme ve deformasyonu temsil edecek şekilde davranış değişikliği göstermekte ve Şekil 3'te çizilen kuramsal grafikte olduğu gibi yukarıya doğru ötelenmektedir. Şekil 3'te ayrıca Şekil 1'de görülen tahkimat karakteristik doğruları yerine panel testlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri de kullanılmıştır. Buradaki yük değerleri ileriki bölümlerde açıklanacağı üzere basınca dönüştürülür. Bu arazi tarafından püskürtme betona uygulanan ve kemerlenme sebebiyle zamanla azalan tahkimat basıncı olarak tariflenmektedir. Burada enerji 1 olarak adlandırılan eğri, o eğri için gerilme – deformasyon eğrisinin altında kalan alanı ifade etmekte ve ilgili püskürtme beton malzemesinin enerji

sönümlenme kapasitesini sayısallaştırmaktadır. Enerji 2 de diğer gerilme - deformasyon eğrisinin altında kalan alana karşılık gelmekte ve daha değişik püskürtme beton malzemesine sahip ancak enerji sönümlenme kapasitesi daha az olan bir gerilme - deformasyon eğrisine karşılık gelmektedir. Şekilden elde edilen en önemli çıkarım ise bu iki püskürtme beton malzemesinin de başlangıçtaki gerilme koşulunu sağladığı ancak galeri çevresindeki başka bir teknik girişim ve su etkisi ile gerilme koşullarının artması ile Enerji 1 ile gösterilen püskürtme betonun artık yeni gerilme değerlerini karşılayamadığı görülmektedir. Bu durumda ek destekleme işlemi belli bir zaman içinde tamamlanamazsa göçük kaçınılmazdır. Ancak Enerji 1 ile adlandırılan püskürtme beton malzemesi ise kırılma bile belirli bir deformasyona izin verildikten sonra kemerlenmeye gerilmelere karşı koyacak ve ortamın duraylılığı sağlanacaktır. Bu çalışmanın temel amacı da panel testleri ile yük-deformasyon, basınç-deformasyon ve enerji sönümlenme değerleri belirlenmiş püskürtme betonların yeni oluşan gerilme koşullarını karşılayıp karşılamayacağı konusunda bir irdelemenin yapılması ve bunun sonucunda tahkimatın tamir edilmesi, sökülüp yenilenmesi ya da yeni bir tasarımın yapılması kararını vermekte yardımcı olunmasıdır.



Şekil 3. Arazi tepkime ve püskürtme beton karakteristik eğrileri (Ground reaction and shotcrete characteristic curves)

Kaya kütleindeki ikincil gerilme koşulları sonucunda tahkimat eğrisindeki meydana gelen değişimle farklı enerji sönümlenme kapasitesine sahip iki püskürtme beton malzemesinin bu değişimler ardından nasıl davrandığını anlamak, tasarımlandırma sırasında büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle püskürtme betonun tahkimat karakteristik eğrisinin enerji yutma kapasitesi ile nasıl değiştiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla sonraki bölümlerde bahsedilecek olan deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu enerjinin tahmini yeni geliştirilen bir eğri eşitliği ile ifade edilmiştir.

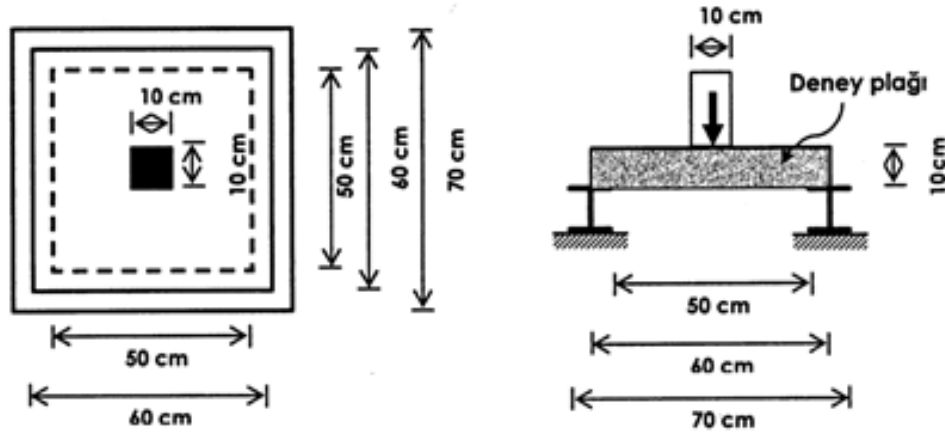
DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Püskürtme betonun kalite kontrolünün yapılması ve mekanik davranışının incelenmesi ile ilgili pek çok deney mevcuttur. Bu deneylere ait pek çok standart geliştirilmiştir. ASTM, British Standards, EFNARC ve TSE gibi farklı kuruluşların önerdiği deneyler farklı koşullarda gerçekleştirilmektedir (Güçlü ve diğerleri, 2013). Bu deneylerden en yaygın olarak kullanılanları giriş eğilme deneyi ve plaka eğilme

deneyleriyle püskürtme betonun yük altında enerji sönümle karakteristiklerinin belirlenmesini sağlayan deneylerdir. Plaka eğilme deneyleri daha önce de belirtildiği gibi farklı numune geometrileri ile gerçekleştirilmektedir. ASTM'nin 2012 yılında önerdiği deneyde numuneler dairesel şekilli olup yükleme sırasında kuvvetlerin her yöne doğru dik ve eşit miktarda dağıtılması sağlanmaktadır. EFNARC'ın 1996 yılında püskürtme betonlar için yayınladığı kılavuzda ise numuneler kare kesitli olarak seçilmiştir.

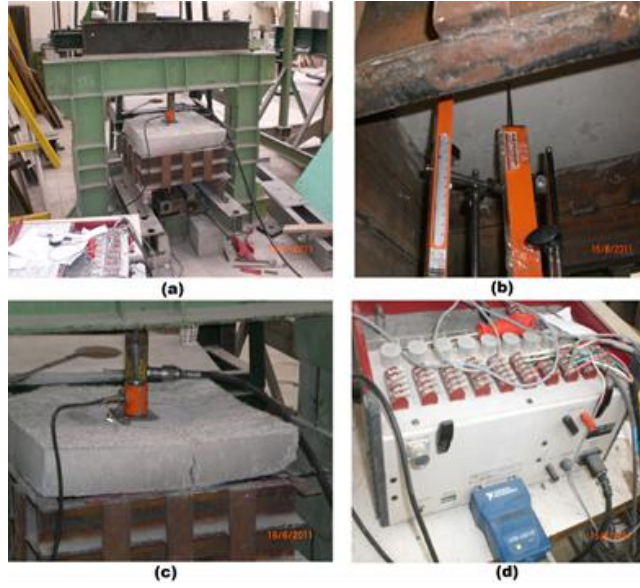
Bu çalışmada ve pratikte bu deneyin seçilmesinin nedenleri şöyle açıklanabilir. Yeraltı yapılarında püskürtme beton kaplaması hem enine hem de boyuna eğilmeye çalışmaktadır. Mesnetleri ise genellikle tavan saplamaları oluşturmaktadır. Dolayısıyla püskürtme beton kaplamasının kirişten ziyade plaka olarak modellenmesi daha gerçekçi olacaktır (Arıoğlu ve diğerleri, 2008). Yapılan bir çalışmada lifle güçlendirilmiş püskürtme betonun statik ve dinamik yükler altındaki davranışı kiriş ve plaka deneyleri kullanılarak incelenmiştir. Plaka numunelerin statik ve dinamik koşullar altında benzer davranış gösterdiği tespit edilmiştir (Banthia ve diğerleri, 1999).

EFNARC plaka eğilme deneyi Avrupa Birliği'nde püskürtme beton kaplamasının tokluk ve enerji yutma büyüklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi 60x60x10 cm'lik numune yükleme düzeneğinin 4 kenarına serbestçe oturtulur ve plak ortasındaki sehimin hızı 1 mm/dak olacak şekilde yüklenir. Standartta 25 mm'lik plaka ortası sehim kadar yutulan enerji esas alınmaktadır. Deney lifle güçlendirilmiş püskürtme betonlara uygulandığı gibi çelik hasırla güçlendirilmiş püskürtme betonlara da uygulanabilmektedir. İnşa işinden önce püskürtme betonun kalitesinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır (EFNARC, 1996).



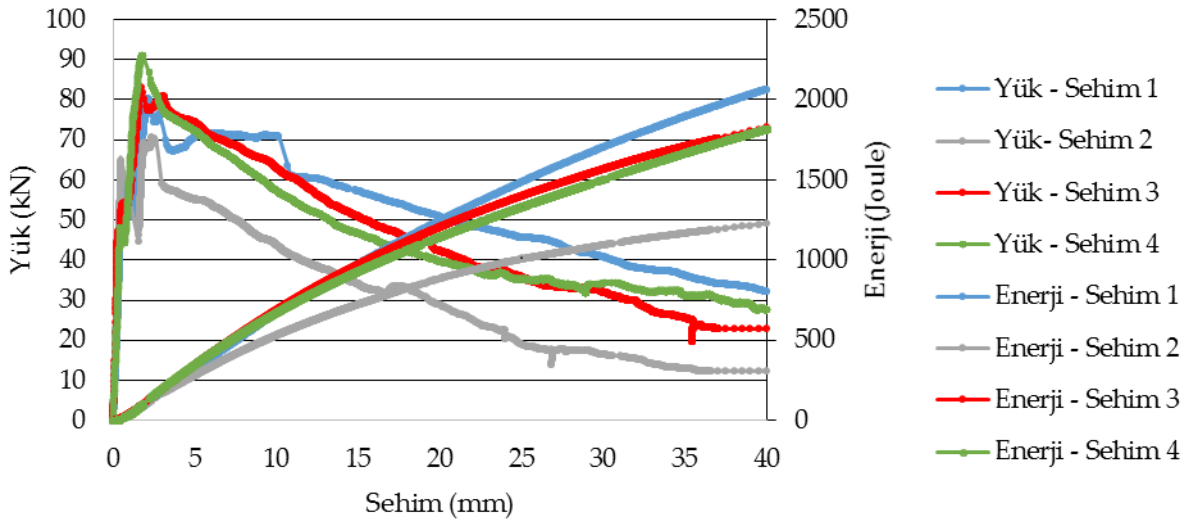
Şekil 4. Plaka eğilme deneyi için kurulması gerekli düzeneğin (Setup for panel tests)

Bu çalışma kapsamında yapılan EFNARC panel testleri için Şekil 5'te görüldüğü gibi deney düzeneği oluşturulmuş (a) ve standarda uygun olarak panel örnekler hazırlanarak deney gerçekleştirilmiştir. LVDT (b), yük hücresi (c) ve veri kaydedici (d) kullanılarak eş zamanlı olarak yük ve sehim ölçümleri kaydedilmiştir. Yük-sehim eğrileri oluşturularak enerji yutma kapasiteleri ve tokluk sınıfları belirlenmiştir.



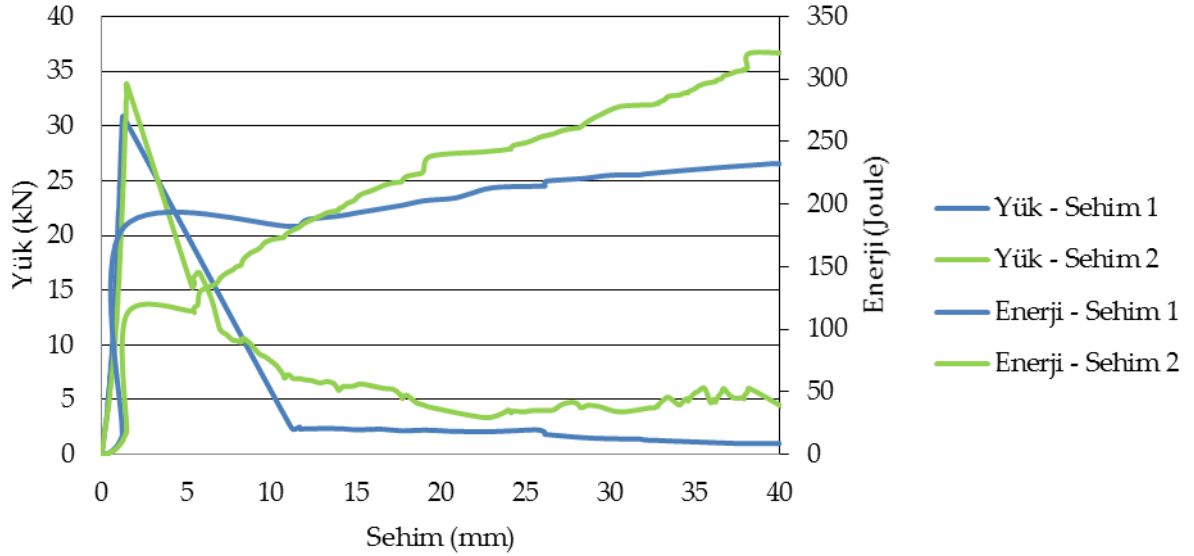
Şekil 5. Deneysel çalışma düzenekleri (Setup used for experiment)

Deneyler on farklı karışımda püskürtme beton için gerçekleştirilmiştir. Yük ve sehim eğrileri her bir numune için elde edilmiştir. Deney, numunelerde 40 mm'lik sehim gerçekleşene kadar devam ettirilmiştir. Şekil 6 ve 7'de sırasıyla lif içeren püskürtme beton ve hiçbir lif içermeyen normal püskürtme betona ait yük sehim eğrilerinden bazıları sunulmuştur. Eğrilerin altında kalan alan püskürtme betonun enerji yutma kapasitesini ifade etmektedir. Bu grafiklerde ikinci bir ordinat ile enerji ve sehim arasındaki değişim de gösterilmektedir. Buradan da aynı malzeme için yapılmış üç ayrı deneyin yük sehim ve enerji sehim eğrilerinin sınırları gözükmemektedir. Ayrıca EFNARC standardında tokluk sınıflaması yapılması için gereken 25 mm sehimdeki enerji değerleri de yaklaşık olarak bulunabilir.



Şekil 6. Lif içeren püskürtme beton panellerine ait yük – sehim ve enerji – sehim eğrileri (Load – deflection and energy – deflection curves of fiber reinforced shotcrete panels)

Lif içermeyen püskürtme betonun en büyük kırılma yükünün ve enerji yutma kapasitesinin de lif içerene göre son derece düşük olduğu görülmektedir. Malzeme Şekil 7'de görüldüğü üzere tam olarak kırılğan malzeme özelliği göstermektedir. Bu da kırıldıktan sonra çok az enerji sönmüleyebileceği anlamına da gelmektedir.



Şekil 7. Lif içermeyen püskürtme betona ait yük – sehım eğrileri (Load – Deflection curve of plain shotcrete specimens)

Plaka deneyi yapılan püskürtme beton numunelerine ait genel bilgiler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Numunelere ait bilgiler ve enerji yutma kapasiteleri (Specimen informations and energy absorption values)

FT	W	FM	Sl	KZ	UCSCb	UCSCy	FT	W	FM	Sl	KZ	UCSCb	UCSCy
				1	NA	12.35					1	NA	6.08
2011-1	150	40	24	3	20.19	13.06	2011-3	130	5	22	3	22.16	9.49
				7	29.27	24.64					7	30.31	13.22
				28	44.31	36.90					28	41.13	19.10
				1	NA	9.55					1	NA	NA
2012-5	120	40	NA	3	25.50	11.20	2012-1	150	7	13.5	3	29.90	NA
				7	27.97	11.54					7	33.10	NA
				28	34.08	18.53					28	41.13	NA
				1	NA	10.43					1	NA	11.19
2011-2	150	1.1	17	3	11.82	9.25	2012-2	150	7	20.5	3	27.79	14.46
				7	34.22	14.78					7	30.20	19.25
				28	35.70	23.53					28	38.62	19.67
				1	NA	NA					1	NA	9.75
2012-4	130	4	NA	3	30.78	NA	2012-3	130	4	21.5	3	24.04	14.73
				7	32.06	NA					7	31.49	17.20
				28	37.81	NA					28	37.83	24.54
				1	NA	8.86					1	NA	2.85
2011-5	120	0	23	3	20.21	10.09	2011-4	130	5	22	3	25.24	7.87
				7	28.32	15.18					7	34.50	10.95
				28	23.07	11.24					28	36.89	13.99

KZ = Kür Zamanı (gün), Sl:Slump (cm), FM: Lif Miktarı (kg), W= Su (kg), FT= Fiber Tipi, UCSCb= UCS Kübik (MPa), UCSCy = UCS Silindirik (MPa), PS: Lifsiz Püskürtme Beton, NA: Veri mevcut değil

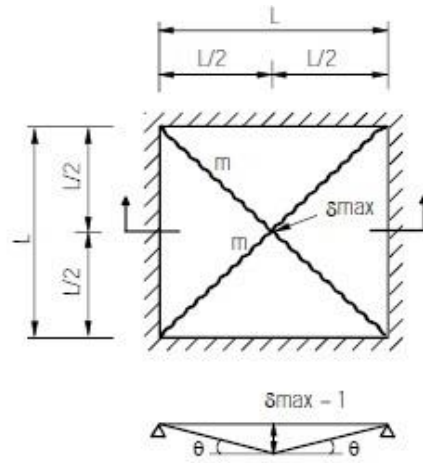
Bu deney sonuçları ileride önerilen tahkimat tasarımılandırılmasıyla ilgili teorik çalışmada kullanılarak püskürtme betonun kırılma sonrası davranışı açısından değerlendirilecektir. Deney sonuçlarında görüldüğü üzere püskürtme beton kırıldıktan sonra da taşıyıcılığına devam etmektedir. Bu

durum enerji yutma kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. O kadar ki kırılma sonrasında yuttuğu enerji miktarı kırılma öncesine kıyasla çok daha fazladır.

PÜSKÜRTME BETONUN KARAKTERİSTİK EĞRİSİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF SHOTCRETE CHARACTERISTIC CURVE BY YIELD LINE THEORY)

Püskürtme betonun karakteristik eğrisinin oluşturulmasında Ingeslev'in 1921'de geliştirdiği Akma hattı (çizgisi) teorisi (Yield Line Theory) (AHT) kullanılmıştır. Bu teori daha sonra Holmgren tarafından 1993'te güçlendirilmiş beton plakalara uyarlanmıştır. Teori güçlendirilmiş beton plakaların eğilmeye karşı direncinin belirlenmesinde 1960'lı yıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Teoride, plastik moment direncinin belirlenmesi için harcanan enerji kullanılmaktadır. Plaka, yenilme olan bölgeler dikkate alınarak uygulanan kuvvet sonucu döndürülen parçalara ayrılmaktadır. Yenilme olan bu bölgeler "akma hattı" olarak adlandırılmaktadır. Yenilme bölgelerinde etkin olan enerji iç ve dış kuvvetler için hesaplanmaktadır. Denge koşulunun sağlanabilmesi için iç ve dış kuvvetler için hesaplanan enerjinin toplamının sıfır olması gerekmektedir. Akma hattı tamamen oluştuğundan sonra plakada yenilme gerçekleşmektedir. Teoride kare plaka numuneleri için kullanılan boyutlar ve notasyonlar Şekil 8'de verilmiştir (Uotinen L.K.T., 2011).

AHT farklı numune boyutlarında farklı sınır koşulu olan problemlerde uygulanabilen bir metottur. EFNARC plaka testinde Şekil 5'te görüldüğü gibi numuneler bütün kenarlarından sabitlenmiştir. Bu deney koşullarının bulunduğu problem, akma hattı teorisi kullanılarak Kennedy ve Goodchild tarafından 2004'te çözümlenmiştir.



Şekil 8. AHT'nde kullanılan kare plakanın boyutları ve notasyonlar (dimensions and notations of a square plate in the yield line theory)

Bu durumda oluşan momentin büyüklüğü Eşitlik 1, 2, 3 ve 4'teki gibi ifade edilebilmektedir. Bu formüllerde m momenti, σ_t çekme gerilmesini, L panelin kenar uzunluğunu $W_{Dış}$ dışarıdan uygulanan enerjiyi $W_{iç}$ numuneye uygulanan iç enerji, δ sehim ve W enerjiyi ifade etmektedir.

$$m = \frac{\sigma_t \cdot L^2}{24} \quad (1)$$

AHT kullanılarak kare şeklindeki plakalar için iç ve dış kuvvetlerden kaynaklanan enerjilere ait Eşitlik 2 ve 3 aşağıdaki gibidir:

$$W_{iç} = -9.6 * m * \delta \quad (2)$$

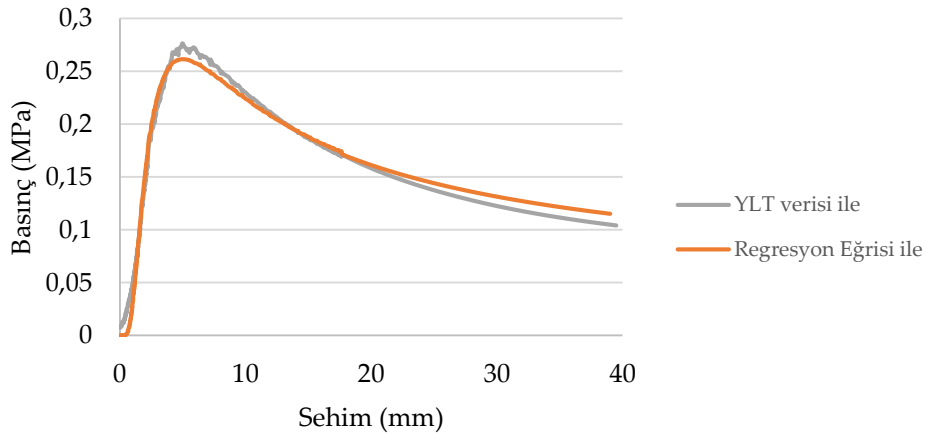
$$W_{dtş} = F * \delta \quad (3)$$

Burada $W_{Dtş}$ deney sırasında plakaya uygulanan enerji olmaktadır. Eşitlik (1) moment (m) denklemi kullanılarak $W_{iç}$ eşitliği tekrar yazılmıştır.

$$W_{iç} = 0.4 * \sigma_T * L^2 * \delta \quad (4)$$

Eşitlik 3'te EFNARC'ın kare kesitli plaka deneyleri için Şekil 4'te belirtilen L uzunluğu 60 cm alınmıştır. Bu sayede sehim ile uygulanan basınç arasındaki eğri de elde edilmiştir. Bu eğrinin Hoek ve diğerlerinin (Hoek ve diğerleri,1980) teorisinde düz çizgilerle gösterilen tahkimat karakteristik çizgileri yerine püskürtme betonun karakteristik eğrisi olarak kullanılması mümkündür ve daha gerçekçi olacağı düşünülmektedir. Çünkü lifli ya da güçlendirilmiş püskürtme beton kırılma sonrasında kırılma bir davranış değil sünek bir davranış göstermektedir. Enerji yutma kapasitesi de daha önceden belirtildiği üzere kırılma öncesinde kırılma sonrasına kıyasla çok daha düşüktür. Bu nedenle enerji yutma kapasitesi; lif içeriği ve karışım özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Plaka yüklendiğinde yük – sehim eğrisi en yüksek dayanıma kadar sıkıştırma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Ancak kırılma gerçekleştiğinden sonra bu yerini Şekil 8'de gösterilen çapraz doğrulara dik yöndeki çekme gerilmelerine bırakmaktadır (Desayi ve Muthu, 1987). Bir diğer deyişle kırılma gerçekleştiğinden sonra betondaki lifler çekmeye karşı direnç göstermekte ve artık kaydedilen yük değeri aslında liflerin betona tutunarak ve sehim gerçekleştiğince liflerin esnemesine sebep olmaktadır. Liflerin kopana kadar esnemesi püskürtme betonun daha sünek bir davranış göstermesi ve daha çok enerji yutması (sönümlenmesi) demektir. Bu davranış ancak yukarıdaki eşitlikte birikimli (kümülatif) enerji ve sehim kullanılarak ortaya konulabilmektedir. Yukarıda belirtilen Eşitlik 3' teki σ_T ile de çekme gerilmesi ifade edilmektedir.

Bu çerçevede bu çalışmada EFNARC panel testlerinden elde edilen yük sehim eğrilerinin her biri için AHT kullanılarak farklı enerji yutma kapasitelerindeki numunelerin basınç – sehim eğrileri oluşturulmuştur. Basınç ve sehim eğrileri, tahkimat tasarımı sırasında kolayca kullanılabilmesi için doğrusal olmayan regresyon analizi ile formüle edilmiştir. Analizlerde, azaltılmış en küçük kareler yöntemine göre eğri geçirilmesini sağlayan Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. AHT verisi ve regresyon analizi ile elde edilen basınç – sehim eğrilerinden bir örnek Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. AHT verisi ve regresyon analizi sonucu elde edilen örnek basınç – sehim eğrisi. (Stress – deflection curve plotted by Yield Line Theory and regression data)

Regresyon analizi sırasında, basınç ve sehim arasında, bu çalışma kapsamında geliştirilen Eşitlik 5'teki gibi bir ilişki olduğu belirlenmiştir. EFNARC panel deneylerinden elde edilen her bir basınç - sehim eğrisinin verileri ile azaltılmış en küçük kareler yöntemiyle hesaplama yapan Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak üretilen eğrilere ait olan ve bu eşitlikte verilen a, b, c katsayılarının alt ve üst sınırları her bir panel için belirlenmiş olur. Bu da, çalışma kapsamında her bir püskürtme beton karışımı için yapılan en az 3 deney için a, b, c katsayılarının hangi aralıklarda değiştiğinin gösterildiği anlamına gelmektedir. Bu sayede ilgili karışımlar için bu eğriden üretilen enerji yutma kapasitesi sınırlarının ~~belirlenebileceği~~ ortaya belirlenebileceği ortaya çıkmış olur. Böylece uygulamacıların 25 mm'deki enerji yutma kapasitesini de ilgili püskürtme beton karışımı için belirlemesi mümkün olabilmektedir.

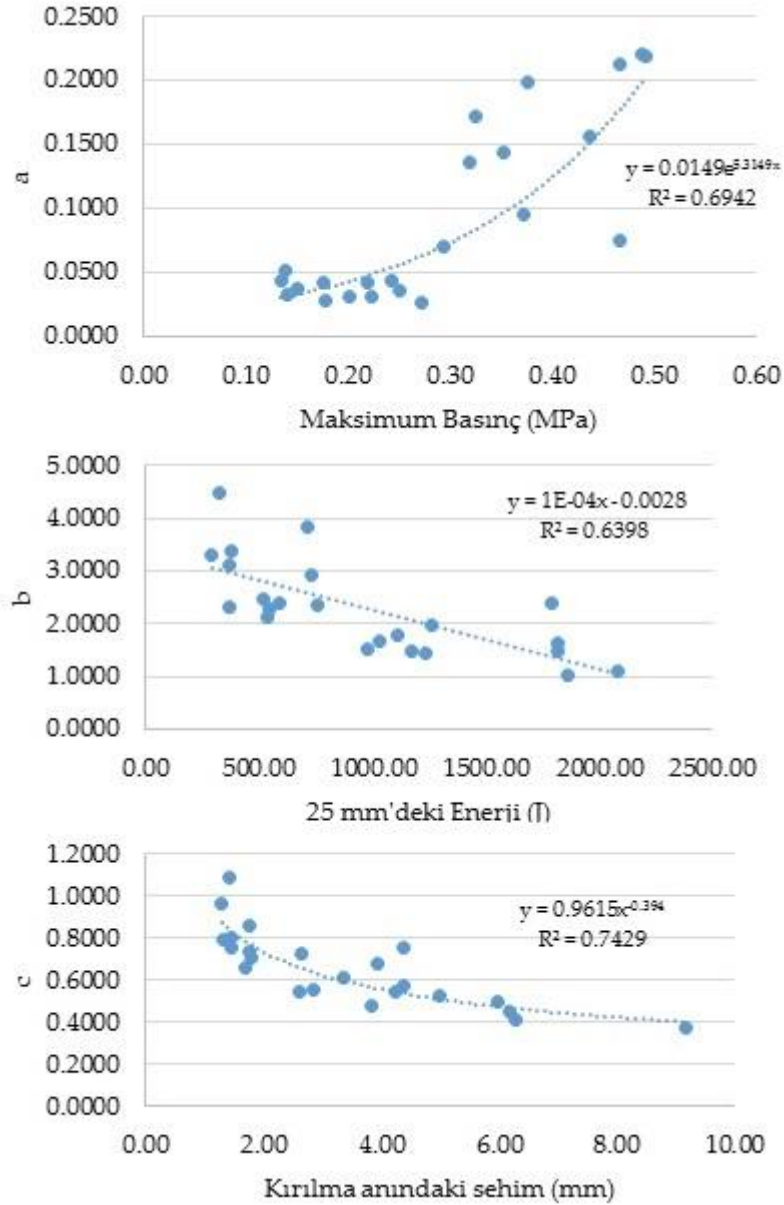
$$\sigma_T = a * \delta^{\left(\frac{b}{\delta c}\right)} \quad (5)$$

Belirlenen bu a, b ve c katsayıları ile maksimum basınç kırılma anındaki sehim ve enerji yutma kapasitesi arasında istatistiksel ilişkiler de Çizelge 2'de listelenmiştir.

Çizelge 2. Doğrusal olmayan regresyon için analiz sonuçları (Results of ~~non-linear~~ nonlinear regression analysis)

Sıra No	a	b	c	r ²	Maksimum Basınç (MPa)	Kırılma Anındaki Sehim (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	25 mm'deki Enerji (J)
1	0.0426	2.3874	0.5413	0.9675	0.22	2.60	40.95	591.00
2	0.0359	2.9204	0.5553	0.9835	0.25	2.83	45.99	727.00
3	0.0263	3.8293	0.6139	0.967256	0.27	3.36	53.65	715.00
4	0.0308	2.4485	0.4939	0.9434	0.20	5.98	34.18	520.00
5	0.0308	2.3509	0.4472	0.9772	0.22	6.16	36.90	756.00
6	0.0441	1.6526	0.3723	0.9751	0.24	9.18	41.35	1030.00
7	0.0329	3.1181	0.7311	0.9511	0.14	1.74	36.83	370.00
8	0.0522	3.2941	1.0847	0.9351	0.14	1.42	33.50	289.00
9	0.0439	2.3210	0.7547	0.9453	0.13	1.44	29.57	370.00
10	0.0421	2.1319	0.5708	0.9734	0.18	4.36	33.01	534.00
11	0.0704	2.2606	0.7542	0.9412	0.29	4.38	32.38	542.00
12	0.0281	3.3824	0.6737	0.9667	0.18	3.92	33.92	375.00
13	0.0371	4.4760	0.9670	0.8372	0.15	1.28	30.88	319.00
14	0.2207	1.4772	0.6628	0.7904	0.49	1.69	83.28	1818.00
15	0.2183	1.6187	0.7103	0.9019	0.49	1.80	91.10	1818.00
16	0.2134	1.0214	0.5271	0.9111	0.47	5.00	76.28	1861.00
17	0.1558	1.1129	0.4103	0.9468	0.44	6.27	72.49	2085.00
18	0.1713	1.4782	0.7962	0.7566	0.32	1.31	57.51	1173.00
19	0.1990	1.4430	0.8620	0.7749	0.37	1.76	57.57	1233.00
20	0.1435	1.5091	0.8036	0.8130	0.35	1.46	47.50	979.00
21	0.0743	2.3762	0.4800	0.9263	0.47	3.84	83.05	1789.00
22	0.1355	1.7706	0.7286	0.8511	0.32	2.64	52.66	1110.00
23	0.0951	1.9734	0.5402	0.8905	0.37	4.24	63.66	1263.00

Elde edilen a, b ve c katsayıları ile 25 mm'deki enerji yutma kapasitesi, kırılma anındaki sehim ve maksimum basınç arasındaki ilişkileri gösteren grafikler Şekil 10'da verilmiştir. Bu da bu katsayılarla dahi enerji yutma kapasitesi ve maksimum basınç arasında ilişki izleri olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. 25 mm'deki enerji yutma kapasitesi, kırılma anındaki sehim ve maksimum basınç ile a, b, ve c katsayıları arasındaki ilişki (Relationship between energy absorption level at 25 mm deflection, deflection at failure, maximum pressure and a, b, c coefficients, respectively)

Katsayıların bulunması ve deney sonuçlarındaki bazı parametreler ile ilişkilendirilmiş olması tahkimat eğrisinin karakteristiğinin oluşturulmasında kolaylık sağlamaktadır. Değişik oranlara sahip püskürtme beton karışımından farklı panellerle daha fazla deney yapılması ve yukarıda anlatılan yöntemle göre analizlerinin yapılması sonucunda, tahkimat karakteristik eğrisine ilişkin farklı enerji yutma özelliklerindeki püskürtme betonlar için oluşturulan model geliştirilebilecektir.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Özellikle zayıf formasyonlarda açılan maden galerilerinde kaya ile püskürtme beton arasındaki etkileşim son derece önemlidir. Bunun için öncelikle püskürtme beton malzemesinin kalitesinin belirlenmesi ve taşıyıcılık karakteristiğinin ortaya konulması gerekmektedir. Bu da EFNARC panel testleri

ya da dairesel panel testleri ile mümkün olmaktadır. Bu testler sonucunda 25 mm ya da 40 mm'deki enerji yutma kapasiteleri belirlenip tasarım aşamasında bu değere kadar enerji sönmüldüğü düşünülmektedir. Bundan sonra da arazi gerilmeleri ve dolayısıyla yüklerinin belirlenerek kalitesi ortaya konmuş püskürtme betonun kaya ile birlikte davranışının, başka bir deyişle enerji yutma kapasitesinin ortaya konulması ve bu gerilmeleri karşılayıp karşılamadığının analizi gerekir. Böylece püskürtme betonun kırılma sonrasında galeri etrafında oluşan plastik özellik gösteren bölgedeki kemerlenmeye yardımcı olup olmadığı ya da yeniden sökülüp yerleştirilmesi kararı hakkında fikir edinilebilir.

Bir doktora çalışmasının parçası olan bu çalışmada öncelikle karışım oranları belli olan değişik lifli ve lif içermeyen püskürtme beton malzemesinin kırılma öncesi ve sonrası karakteristiği ortaya konulmuştur. Taşıyıcılık kapasitesi belirlendikten sonra mevcut kaya tahkimat etkileşimi yöntemleri içerisine entegre edilmiştir. Ancak mevcut yöntemler hidrostatik basınç koşullarında, homojen kaya ortamında ve dairesel kesitler için önerilmektedir. Çalışma sahasında ise yukarıda belirtilen koşulların dışında davranış gözlenmektedir. Örneğin kesit; kare, kaya koşulları; heterojendir. Ayrıca bir galeri açıldıktan sonra her ne kadar kemerlenme oluşup yer değiştirmeler sınırlandırılrsa da yapılan madencilik çalışmaları gereği bu galeriye yakın bir yerde başka bir galeri açılması sonucunda gerilme koşulları değiştiğinden püskürtme beton üzerine gelen yükler artmakta ve arazi tepkime karakteristiği yüksek gerilme ve deformasyon koşullarını sağlayacak bölgeye kaymaktadır. Bu durumda yeni oluşan bu gerilme koşulunun sonucunda, hali hazırda yerleştirilen püskürtme betonun kırılma sonrası davranışının kontrol edilmesi ve yerinde yer değiştirme ölçümleri ile takip edilmesi gerekmektedir. Elde edilen bu arazi verileri mutlaka değerlendirilmeli ve stabilite açısından yorumlanmalıdır. Örneğin, püskürtme betonun kırılma sonrası davranışını gösteren karakteristik eğrisi yukarıya atımlanmış arazi tepkime eğrisi ile yeniden kesişiyorsa tamirat yapıp gözlemlenmeye devam edilebilir. Ancak kesişmiyorsa tekrar sökülüp yeni tasarlanan tahkimatın uygulanması söz konusudur.

Bu amaçla çalışmada kırılma sonrasında püskürtme betonun farklı enerji yutma kapasiteleri için tahkimat tasarımında önemi araştırılmıştır. Bunun için EFNARC'ın standart deney olarak kullandığı bir dizi plaka eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda farklı enerji yutma kapasitelerine sahip 10 ayrı fiber karışımı için 24 adet panel örneğinin yük sehim eğrileri belirlenmiştir. Bu eğriler AHT ile basınç sehim eğrilerine dönüştürülmüş daha sonra Levenberg-Marquardt algoritması ile üretilen yeni basınç sehim eğrileri ile yüksek korelasyonla karşılaştırılmış ve bu çalışma kapsamında geliştirilen ve bu eğrileri matematiksel olarak ifade eden eşitlik 5'in a, b ve c katsayıları da belirlenmiştir. Bu da püskürtme beton için enerji yutma kapasitelerinin örneğin 25 mm sehimde katsayılara göre hangi sınırlarda değişebileceğinin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Eğrilerin katsayıları ile eğrilerdeki kırılma sonrası sehim, maksimum basınç ve 25 mm sehimdeki enerji arasında ilişkiler bulunmuştur. Bu sayede yapılan herhangi bir deney sonucunda püskürtme beton tahkimat eğrisinin oluşturulması kolaylaştırılmıştır.

Püskürme betonun kırılana kadar bir diğer deyişle yük – sehim grafiğindeki maksimum yük değerine ulaşılan kadar numune de sıkışma gerilmesi olduğu, kırılmadan sonra ise bu sıkışma gerilmesinin yerini kırılma hattı boyunca çekme gerilmelerine bıraktığı bilinmektedir. Bu durumda kırılma öncesi enerji aslında sıkışma gerilmesine karşı koyulan toplam işi, kırılma sonrasında oluşan enerjide çekme gerilmesine karşı koyulan işi ifade etmektedir. Ancak kırılma sonrası çekme gerilmesi lif veya başka bir malzemeyle güçlendirilmemiş püskürtme betonda hemen hemen olmadığı için kırılma sonrasında enerji yutma kapasitesi de bu durumda hemen hemen hiç yoktur.

Basınç ve yer değiştirme eğrisinin karakteristiği kırılma sonrasında enerji yutma kapasitesine göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmaya konu olan maden galerileri Şekil 1'deki gibi başlangıçta kemerlenmiş ve stabilize olmuş galerilerdir ancak yakınlarda bir başka galerinin açılması ile Şekil 3'te verilen davranışı sergilemektedirler. Yani eğer Enerji 2'ye bağlı bir tahkimat karakteristiği ile destelemek söz konusu olursa tahkimat hiçbir zaman yeni oluşan gerilme koşulunu karşılayamayacak ve ortamda muhtemel bir göçük beklenmektedir. Ancak enerji yutma kapasitesi yüksek olan püskürtme betonun tahkimat eğrisi (Enerji 1) ikincil gerilme koşulları altında oluşan kaya ortamını eğrisi ile tekrar çalışmakta ve denge koşulu sağlanmaktadır. Bu iki eğri, enerji yutma kapasitesi arttıkça daha yüksek yer değiştirmelerin olduğu yerlerde kesişmekte buna rağmen belirli bir deplasman sonunda kemerlenme

gerçekleşmektedir. Bu da bu gibi yerlerde kırılan betonun tamir edilmesi ve ölçme aletleriyle gözlenmesi kararının verilebilmesine yardımcı olur. Eğer Enerji 2'deki gibi bir davranış varsa da kırılıp yenilen püskürtme beton sökülerek yerine ya Enerji 1 deki gibi bir karışım içeren püskürtme beton uygulanmalı ya da bu çalışmanın konu alanının dışında kalan kaya saplamaları gibi daha başka sağlamlaştırma işlemleri ile tahkimat karakteristiği daha sağlam bölgelere kaydırılmalıdır.

Sonuç olarak püskürtme beton kullanıcıları kullandıkları karışımın kırılma sonrasında da püskürtme betonun taşıyıcılığına devam etmesi, başka bir deyişle kaya tarafından aktarılan hareket enerjisini sönmülemeye devam etmesini istemektedir. Bunu ne düzeyde sönmülemeye devam edeceği ve bu düzeyin yeterli olup olmadığının araştırılması bu çalışmanın başlıca konusunu teşkil etmektedir. Çalışma sonucunda ortaya konan teoriyle kullanılan püskürtme betonun tamir edilmesi veya sökülüp yeni bir tahkimat yapılmasına karar verilmesi mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Arioğlu, E., Yüksel, a., Yılmaz, A.O., 2008. "Püskürtme beton bilgi föyleri – çözümlü problemler", *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını*, ISBN 978-9944-89-565-1, Mayıs, İstanbul.
- ASTM C 1550, 2012, "Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (Using centrally loaded round panel)", DOI: 10.1520/C1550-12A.
- Banthia, N., Gupta, P., Yan, C., 1999, "Impact resistance of fiber reinforced wet – mix shotcrete Part2: plate tests", *Materials and Structures*, Cilt 32, ss. 643-650.
- Banthia, N., Troittier, J., Beaupre, D., 1994, "Steel fiber reinforced wet mix shotcrete comparisons with cast concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Cilt 6, Sayı, ss. 430-437.
- Bernard, E., Pircher, M., 2001, "The influence of thickness on performance of fiber – reinforced concrete in a round deteminate panel test", *Cement, concrete and Aggregates*, Cilt 23, sayı 1, ss. 27-33.
- Denney, J.M., Hagan, P.C., 2004, "A study on the effect of changes in fiber type and soage rate on fiber reinforced shotcrete performance", *Shotcrete More Engineering Developments*, ISBN 04 1535 898 1, ss. 103-108.
- Desayi, P., Muthu, K.U., 1988, "A brief on strength, deflection and cracking of rectangular, skew and circular reinforced concrete slabs", *Journal of Indian Institute Science*, Cilt 68, ss. 91-108.
- EFNARC, 1996, "European specification for sprayed concrete and guidlines for specifiers and contractors", ISBN 0 9522483 6 0.
- Galobardes, I., Cavalaro S.H., Aguado, a., Garcia, T., 2014, "Estimation of the modulus of elasticity for sprayed concrete", *Conctruction and Building Materials*, Cilt 53, ss. 48-58.
- Güçlü, E., Tunçdemir, H., Bayram, O., 2013, "A Compilation of Shotcrete Standards to Reinforce Underground Openings", 3. *Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu*, ss. 519-528, 29 – 30. Kasım.
- Hahn, H., Holmgren, J., 1979, "Adhesion of shotcrete to various types of rock surfaces", *4th ISRM Congress*, ss. 431-439, 2-8 September, Montreux, Switzerland.
- Hoek, E, Brown, E.T., 1980. "Underground excavation in rock", *Institution of Mining and Metallurgy*, London, s.527.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden. W.F. 1995. "Support of underground excavations in hard rock", Rotterdam: Balkema.
- Homgren, J., 1993, "The use of tyield line theory in the design of steel fiber reinforced concrete slabs", *Shotcrete for Underground Support IV Proceeding of Engineering Foundation Conference*, ss. 91-98, Niagara –on-the-lake, Canada, 2-6 Mayıs.
- Kennedy, G., Goodchild, G.H., 2004, "Practical yield line design", *Concrete Center Publication*, 175 ss., ISBN 1-904818-08-0, Surrey,UK.

- Lee, S., Jung, J., Nam, S., Lee, I., 2006, "The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt 22, ss. 28-38.
- Malmgren, L., Nordlund, E., Rolund S., 2005, "Adhesion strength and shrinkage of shotcrete", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Cilt 20, ss. 33-48.
- Moldovan, A.R., Popa A., 2012, "Finite element modelling for tunnelling excavation", *Civil Engineering & Architecture*, Cilt 55, Sayı 1, ss. 98-113.
- Saiang, D., Malmgren, L., Nordlund, E., 2005, "Laboratory tests on shotcrete – rock Joints in direct Shear, Tension and Compression", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Cilt 38, sayı 4, ss. 275-297.
- Shin, Y., Song, K., Lee, I., Cho, G., 2011, "Interaction between tunnel supports and ground convergence – Consideration of seepage forces", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Cilt 47, ss. 394-405.
- Spirig, C., 2004, "Sprayed concrete systems in the Gotthard base tunnel", *Shotcrete: More Engineering Developments*, ISBN 04 1535 898 1, Taylor and Francis Group, ss.175-249.
- Uotinen, L.K.T., Salo, O., Rinne, M., 2013, "Design of sprayed concrete as hard rock reinforcement using yield line theory", *Sinorock2013*, 18-20 Haziran, Şangay, Çin.