

# KATI YAKITLARIN SOĞUK BAĞLAMA TEKNİĞİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yıldırım İ. TOSUN, Ahmet ŞENTÜRK, Lütfullah GÜNDÜZ  
Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 32260, Isparta

## ÖZET

Toz kömürlerin katı yakıt olarak değerlendirilmesinde önemli bir konu olan birikeltme yönteminin günümüzdeki koşullara uyarlanması gerekmektedir. Üretilen soğuk bağlayıcı biriketlerin teknik özellikleri belirlenerek endüstride kullanılabilirlik kriterleri tanıtılmaktadır.

*Kömür, Soğuk Bağlama, Biriket*

## GİRİŞ

Günümüzde kömür tozları ve kalitesiz kömürlerin katı yakıt olarak kullanımı giderek artmakta ve bunların kullanımı çevre kirliliği açısından da kamu oyunda olumsuz tepkilere yol açmaktadır. Çevre bilincinin geliştiği günümüzde, kömürün çevreye olan olumsuz etkileri, kömür tozlarının geliştirilen yöntemler ile değerlendirilerek endüstride kullanılabilme imkanlarını gündeme getirmektedir. Kömür birikeltme teknolojisi ile kömür tozlarının değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar sonucu elde edilen kömür biriketlerinin büyük bir kısmında arzu edilen özelliklere ulaşamadığı görülmüştür. Bu amaçla, kömür birikeltme teknolojisindeki güncel gelişmelere yeni bir boyut olarak, *soğuk bağlayıcı birikeltme prosesinin* kullanılabilirliğinin analiz edilmesi, ülkemiz enerji kullanımı açısından yararlı olacağı düşünülmektedir.

Kömür tozlarının parça olarak değerlendirilebilmesi için uygulanan birikeltme işleminde maksimum 6 mm tane boyutundaki toz kömürler bağlayıcı veya bağlayıcı olmayan bütünleştirilmektedir. Biriketlerin mekanik sağlıkları ve suya dayanımları, endüstride kullanıma uygun değerlerde olması istenmektedir. Mekanik sağlamlık olarak biriketlerden belirli basınç dayanımı - nokta dayanımı ve aşınmaya karşı direnç değeri arzu edilmektedir. Suyu dayanım özelliği, biriketlerin su emme miktarı ve suda dağılma özelliği olarak belirlenmektedir. Ayrıca biriketlerden termik şoklara dayanım özelliği aranmakta olup ateş içinde parçalanıp dağılması istenmektedir.

Bağlayıcı biriktlemede kullanılan zift, katran ve asfalt türü bağlayıcı maddeler genellikle tercih edilmektedir. Ancak bu maddelerin yanma esnasında çevreye yüksek miktarda is ve koku salan gazları bırakması, çevre açısından tehdit edici bir unsur olmaktadır. Bu yüzden, bu tür bağlayıcı elemanların en az seviyede biriktlere ilave edilmesi istenmektedir. Bağlayıcısız biriktlemede bu tür bağlayıcı elemanlar, kömüre ilave edilmediği için bu yöntem çevreci düşüncede en uygun yöntem olmaktadır. Ancak belirli plastik özelliği olan, özellikle Afşin Elbistan linyiti gibi kömürler bu şekilde biriktlenebilmektedir. Bu şekilde üretilen biriketlerin, suya dayanımları çok düşük olduğu için bunların dış yüzeylerinin hidrofobik reaktifler ile sıvanarak kullanılması gerekmektedir.

Demir ve krom cevherleri için uygulanan soğuk bağlayıcı biriktleme yöntemi, kömür tozları içinde kullanılabilceği düşünülerek bu çalışmada kömür biriktlemede yeni bir yöntem olarak soğuk bağlama tekniği geliştirilmektedir (1).

Bu makalede, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Kömür Hazırlama Teknolojisi ve Kaya Mekaniği laboratuvarlarında kömür tozlarının soğuk bağlayıcı elemanlar ile biriktleterek katı yakıt olarak kullanılabilirliği üzerine yapılmakta olan teknik bir araştırmanın analiz bulguları sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, değişik yörelere ait kömürler ile farklı kompozisyonlardaki katılı ve/veya katısız Portland çimentosu, sönmüş kireç, atık mermer tozları değişik dozalarda su/katı ve su/bağlayıcı eleman oranlarında hazırlanan 4800 adet biriket numunesi üzerinde değişik kür sürelerinde tekno-mekanik değerler etüd edilmiş, biriketlerin basınç dayanımı, Shatter dayanımı, su emme, suya dayanım, elastik ve rijitlik kriterleri belirlenmiştir. Soğuk bağlayıcı biriketlerin tekno-mekanik özelliklerine etkileyen faktör ve parametreler irdelenmiştir. Analiz bulguları, teorik ve pratik olarak fonksiyonel ifadelerle irdelenmekte, soğuk bağlayıcı kömür biriketlerinin endüstride kullanılabilirlik kriterleri sunulmaktadır.

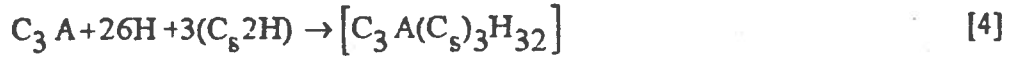
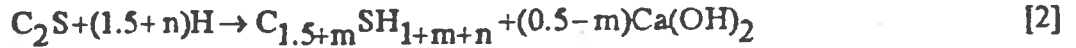
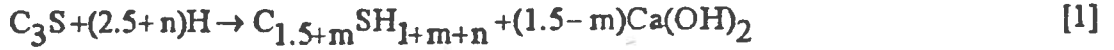
## **GENEL BİLGİ**

Soğuk bağlama yönteminde çimento esaslı bağlayıcı elemanlar kullanılarak toz malzemeler bütünleştirilmektedir. Soğuk bağlama yöntemin, bağlayıcı ve bağlayıcısız biriktlemeğe göre avantajları şöyle sıralanabilir:

- Bağlayıcı eleman olarak çimento, yüksek fırın çürufu gibi bağlayıcı malzemeler kullanıldığı için kömür biriketleri çevre dostu biriketler olmaktadır.
- Bağlayıcı ve bağlayıcısız biriktlemede uygulanan kurutma işlemleri yoktur.
- Bağlayıcı biriktlemede kullanılan ısı yoğurma işlemleri ve ekipmanlara ihtiyaç yoktur.
- Bağlayıcı ve bağlayıcısız biriktlemede esas olarak bütünleştirme basıncını sağlayan biriktleme presine gerek yoktur.
- İlk yatırım ve işletme maliyeti düşük olmaktadır.

Bu yöntemin diğer birikeltme yöntemlerine olan dezavantajı ise, kömür biriketlerinin ısı değerleri azalmakta ve kül miktarları artmaktadır. Ayrıca, biriketlerin istenilen sağlamlığa ulaşabilmesi için açık havada belirli bir süre stoklanmaları gerekmektedir.

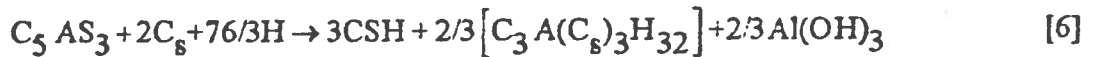
Çimento, su ve kömür karışımından hazırlanan biriketlerde soğuk bağlama görevini üstlenen kimyasal yapıların eşitlikleri (2):



Eşitlik 1 - 4 de kullanılan semboller;

C : CaO, A : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S : SiO<sub>2</sub>, H : H<sub>2</sub>O, C<sub>s</sub> : CaSO<sub>4</sub> simgelemektedir.

Yukarıdaki eşitliklerde verildiği gibi çimento ve su karışımı malzemeyi kalsiyum silikatların hidratasyon reaksiyonları sonunda bütünleştirmektedir. Bu hidratasyon reaksiyonlarında çimento içindeki kalsiyum alüminat da hidrate olmaktadır. Kalsiyum alüminatın hidratasyon kinetiği yüksek olduğu için kalsiyum silika hidroksit oluşumunu yavaşlatmaktadır. Jips ilavesi ile bu sorun ortadan kaldırılabilmektedir. Bağlayıcı eleman olarak çimentonun yerine yüksek fırın cürufu kullanılırsa, aşağıdaki eşitliklerden elde edilen ürünler bağlayıcı görevini yapmaktadır (2).



Eşitlik 5 - 6 da kullanılan semboller;

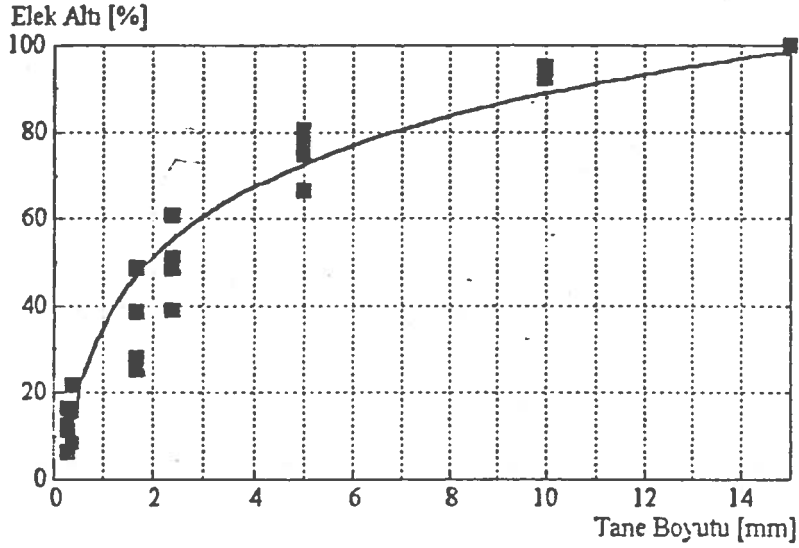
C : CaO, A : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S : SiO<sub>2</sub>, H : H<sub>2</sub>O, C<sub>s</sub> : CaSO<sub>4</sub> simgelemektedir.

Yüksek fırın cürufu, çimento yerine bağlayıcı olarak kullanıldığında hidratasyon reaksiyonları sonunda oluşan katı bağların kimyasal yapıları çok farklı olmamaktadır. Bu yüzden yüksek fırın cürufu ile elde edilen biriketlerin özellikleri çimentolu biriketlerden çok farklı olmamaktadır.

Araştırmacılar toz demir cevherlerinin peletlenmesinde soğuk bağlama tekniğini uygulayarak başarılı sonuçlar almışlardır. Yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri 12.5 mm çaplı pelletlerin 75-115 kg/pellet dayanımına ulaştıklarını belirtmişlerdir.

## SOĞUK BAĞLAMA TEKNİĞİ ANALİZ BULGULARI

Laboratuvar incelemelerinde örnek olarak Tunçbilek linyit kömürleri kullanılmış olup, parça şeklindeki kömürler primer ve sekonder kırıcılarda kırılarak tamamı -10mm boyutunun altına indirilmiştir. Soğuk bağlayıcı biriket yapımı için -10mm boyutuna ufalanmış malzeme, farklı boyut fraksiyonlarının karışımlarda kullanılması amacıyla sınıflandırma işlemine tabi tutulmuş ve elek analizi Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel olarak kullanılan katı malzeme elek analizi.

Toz halindeki kömürlerin, soğuk bağlama tekniği ile biriktelenerek katı yakıt olarak değerlendirilebilmesi ve optimum maliyet ekonomisi amacıyla karışımlarda kullanılacak malzemelerin en uygun oranlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Soğuk bağlayıcı biriketlerin kullanım optimizasyonunun belirlenebilmesi için basınç dayanım karakteristiği, dinamik elastisite özelliği, su emme özelliği, Shatter dayanım performansı gibi tekno mekanik faktör ve parametrelerin analiz edilerek irdelenmesi gerekmektedir. Karışım parametreleri olarak; su/katı oranı, su/çimento oranı, katı malzeme boyut dağılımı, ilave bağlayıcı eleman türü ve kullanım oranı, kür süresi gibi değişkenler en etkin parametreler olarak belirlenmektedir (3).

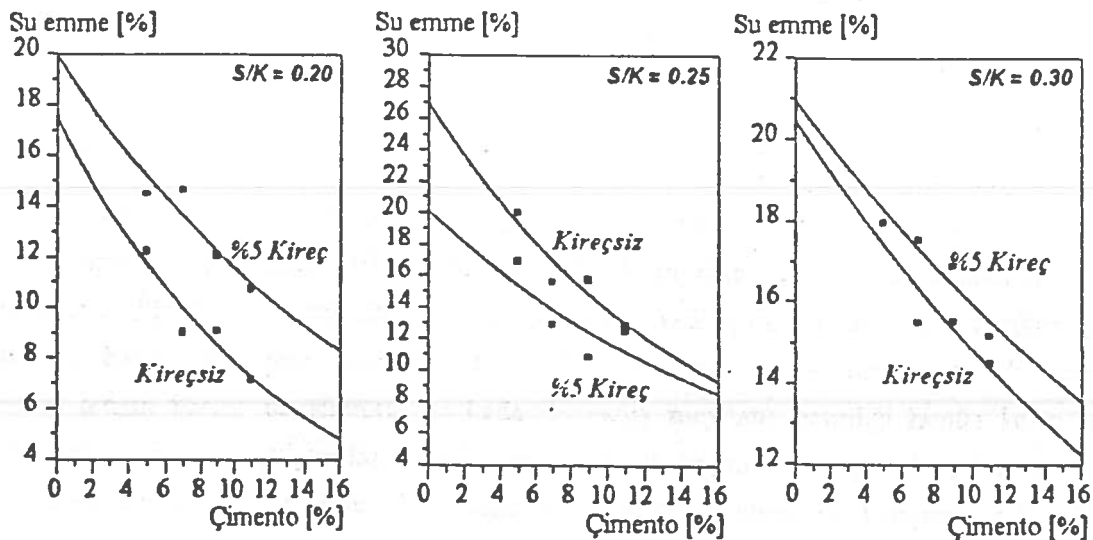
Kömür hazırlama teknolojisi ve Kaya mekaniği laboratuvarlarında farklı kompozisyonlarda -10mm toz kömür ile hazırlanan çimento+katı ve çimento+ilave bağlayıcı eleman+katı karışımları üzerinde bir dizi tekno mekanik analizler yapılmıştır. Analizlerde Afyon Çimento Fabrikası üretimi KPÇ 325 (Katkısız Portland Çimentosu) kullanılmıştır. Deneysel KPÇ 325 çimento karışımları için hacimce %5, %7, %9 ve %11 oranları kullanılmıştır. Soğuk bağlayıcı karışımlarda 0.20 - 0.30 su/katı (S/K) oranları kullanılmıştır. Soğuk bağlayıcı biriketlerde gerek kükürt tutma ve gerekse ilave bağlayıcı eleman özelliği göstermesi bakımından toz halinde sönmüş kireç %3-%9 oranlarında kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler ise nominal boy/çap (h/d) oranı 2 olacak şekilde 100mmx50mm boyutlu

silindirik kalıp numuneleri hazırlanmış ve testler normal oda sıcaklığında 2, 4, 6, 8, 12, 20, 24, 28 ve 32 günlük kür sürelerinde yapılmıştır. Analiz bulgularına göre, basınç dayanım performans karakteristiğinin tahmini amacıyla, dayanıma etkiyen parametreler arasında, istatistiksel lineer regresyonel ilişkiler araştırılmış ve değişik karışım kombinasyonlarına sahip karışım türleri için pratik olarak kullanılabilir istatistiksel performans tahmin metodu geliştirilmiştir. Karışım malzemelerinin kür süresine bağımlı olarak su emme değerleri belirlenmiş ve ayrıca karışım numuneleri üzerinde, ultrases hız ölçümleri yapılarak karışım malzemelerin dinamik elastisite özellikleri belirlenmiştir.

Yapılan tekno mekanik etüdlerle, farklı kombinasyonlarda hazırlanmış olan soğuk bağlayıcı birikeler üzerinde, karışımların basınç dayanım performansında etkili olan kür süresi, çimento oranı, Su/Katı oranı, tane boyutu dağılımı, Katı/Çimento oranı, Su/Çimento oranı gibi bağımsız faktörlerin yanısıra,

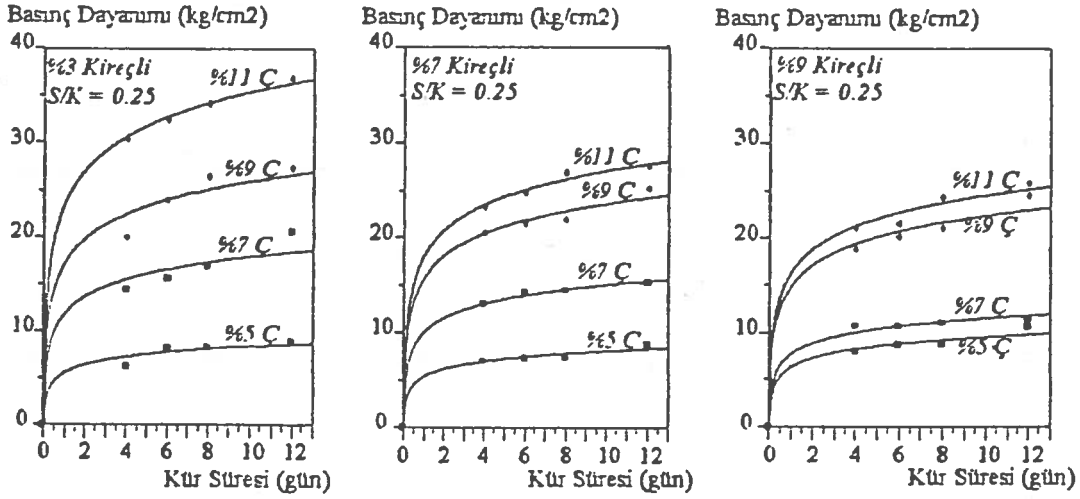
- ilave bağlayıcı eleman olarak kireç kullanımı,
- tane boyutu dağılımının tekno-mekanik özellikler üzerine etkisi gibi parametrelerde irdelenmiştir.

Katı yakıtların normal atmosfer şartlarında, yakma kolaylığı ve yanma performansı açısından su emme değerlerinin minimum seviyede olması arzu edilmektedir. Bu bakımdan, elde edilecek katı yakıt birikelerin su emme özelliğinin iyileştirilmesi, malzeme kompozisyonu ve karışım oranlarının uygun olarak belirlenmesine bağımlı olmaktadır. Analiz bulgularına göre, soğuk bağlama tekniği ile elde edilen katı yakıt birikelerin, değişik bağlayıcı eleman kullanım oranına ve karışımların Su/Katı (S/K) oran değişimine bağımlı genel karakteristiği Şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 2. Soğuk bağlayıcı birikelerin su emme karakteristiği.

Biriktelenmiş katı yakıtların günlük hayatta kullanılabilirliğini belirleyen temel parametrelerden biri, biriketin basınç dayanım değeridir. Basınç dayanım değerine göre, biriketin ne kadar uzun zaman sürecinde dağılmadan kullanılabilirliği, silolanabilirliği ve taşınabilirliği gibi işlevler irdelenebilmektedir. Laboratuvarında ELE marka 300 tonluk preste TS 699'a uygun olarak gerçekleştirilen analiz bulguları, basınç dayanımının artması ile birlikte basınç direncinde artışı gözlenmiştir. Analiz bulgularına göre soğuk bağlayıcı biriketlerin basınç dayanım karakteristiklikleri, kür süresi, su/katı oran değişimi, bağlayıcı eleman oran değişimine bağlı olarak Şekil 3 de verilmiştir.



Şekil 3. Soğuk bağlayıcı biriketlerin basınç dayanım karakteristiklikleri.

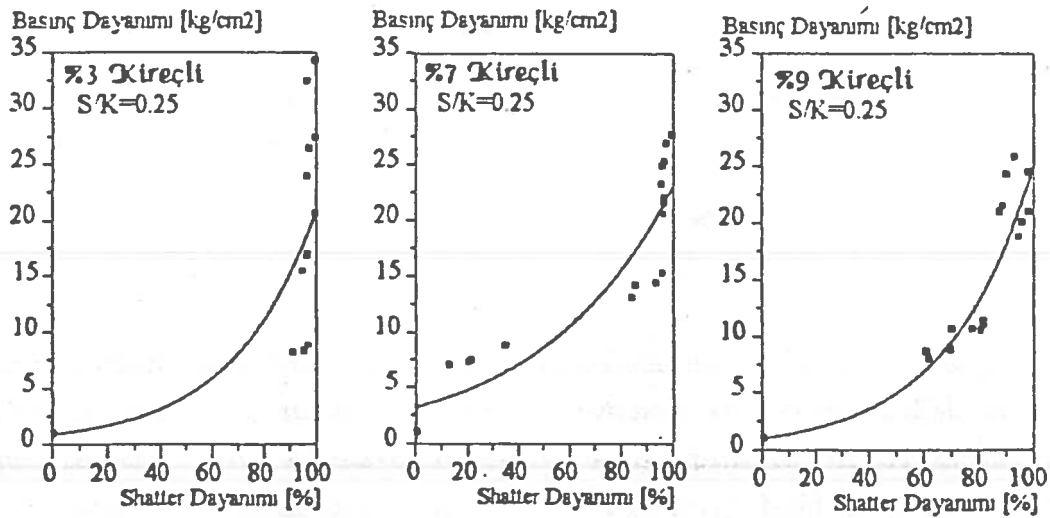
Karışım kompozisyonlarının basınç dayanımına etki eden faktörlerinin incelenmesindeki amaç, karışım bileşiminin ne gibi kurallara uyarak tesbit etmek gerektiğini anlamaktır. Böylece, basınç dayanımı yüksek malzeme üretmek mümkün olacaktır. Ancak, karışım oranları doğru esaslara uyularak tesbit edilse bile basınç dayanımı, bileşim dışında çimento ile ilgili parametreler, su miktarı, karışımın kompozitesi gibi daha pekçok değişik faktörlerin etkisi altında bulunmaktadır. Analiz bulguları incelendiğinde, karışımlarda çimento kullanım oranlarının artması ile birlikte, beton karışımlarının basınç dayanım karakteristiğinde bir iyileşme olmaktadır. Ancak, çimento miktarındaki artışın basınç dayanımına ne kadar bir artış meydana getirdiği henüz kesin olarak anlaşılamamıştır. Test bulgularından edinilen sonuçlar ile optimum karışım kompozisyonlarının belirlenmesinde en önemli parametreler, bağlayıcı eleman tüketimi ve karışımın nihai basınç karakteristiği olarak gözlenmiştir. Bu amaçla, -10 mm katı malzeme boyut fraksiyonu, katı, su, çimento ve ilave bağlayıcı eleman kullanım oranlarına bağlı nihai basınç karakteristiğini algoritmik olarak sembolize eden çok değişkenli regresyonel eşitlikler belirlenmiştir:

- Su/Katı = 0.20 ⇨ Kireçsiz  $\sigma_c = 3.289 \times 10^{0.049} C + 4.218 \times 10^{0.054} C \log T$
- Su/Katı = 0.25 ⇨ Kireçsiz  $\sigma_c = 1.306 \times 10^{0.093} C + 1.574 \times 10^{0.100} C \log T$
- Su/Katı = 0.30 ⇨ Kireçsiz  $\sigma_c = 1.023 \times 10^{0.093} C + 1.471 \times 10^{0.091} C \log T$
- Su/Katı = 0.20 ⇨ %5 Kireç  $\sigma_c = 3.014 \times 10^{0.068} C + 4.512 \times 10^{0.065} C \log T$
- Su/Katı = 0.25 ⇨ %5 Kireç  $\sigma_c = 2.589 \times 10^{0.076} C + 3.806 \times 10^{0.074} C \log T$
- Su/Katı = 0.30 ⇨ %5 Kireç  $\sigma_c = 1.253 \times 10^{0.086} C + 1.636 \times 10^{0.089} C \log T$
- Su/Katı = 0.25 ⇨ %3 Kireç  $\sigma_c = 1.284 \times 10^{0.102} C + 1.788 \times 10^{0.102} C \log T$
- Su/Katı = 0.25 ⇨ %7 Kireç  $\sigma_c = 1.483 \times 10^{0.087} C + 1.897 \times 10^{0.090} C \log T$
- Su/Katı = 0.25 ⇨ %9 Kireç  $\sigma_c = 1.765 \times 10^{0.074} C + 2.251 \times 10^{0.077} C \log T$

burada

- $\sigma_c$  : Tek eksenli basınç dayanımı, kg/cm<sup>2</sup>,
- C : Çimento oranı, %
- T : Kür süresi, gün.

Karışımların basınç dayanımına etkiyen bağımlı ve bağımsız değişkenlerin, farklı kombinasyonlardan elde edilen değerlerle oluşturulan grafikler üzerinde optimum performans tahmin kriteri bulunmaya çalışılmıştır. Soğuk bağlayıcı biriketlerin, basınç dayanımlarının yanısıra Shatter Dayanımları da kür sürelerine bağımlı olarak farklı bağlayıcı eleman kombinasyonlarında analiz edilmiş ve irdeleme sonuçları Şekil 4 de katı yakıtların basınç dayanımı ile Shatter dayanımları arasındaki karakteristik ilişkileri sembolize edilmiştir.



Şekil 4. Soğuk bağlayıcı biriketlerin basınç dayanımı ile Shatter dayanımları ilişkisi.

Şekil 4 irdelendiğinde, katı yakıt biriketlerin basınç dayanımları ile Shatter dayanımları arasında çimento, kireç ve su kullanım miktanna bağımlı olarak üstel ve polinomial fonksiyonel bir ilişkinin varlığı gözlenmektedir. Bu fonksiyonel ifadelemede, basınç dayanımı ile Shatter dayanımı arasındaki ilişkide öncelikle katı malzeme boyut fraksiyonunun rolü üzerinde durulmakta ve karışım kombinasyonunun birim ağırlığına olan etkisi analiz edilebilmektedir. Bu çalışmadan edinilen tecrübe ile, sabit bağlayıcı eleman miktarında, az su kullanım oranına bağımlı olarak gerek Shatter dayanımı ve gerekse basınç dayanımında lineer bir iyileşme görülmektedir. Analiz bulguları doğrultusunda, basınç dayanımının Shatter dayanımı ve Su/Katı oran değişimine bağımlı olarak karakterize edildiği yüksek korelatif değerlere sahip üstel regresyonel ifadeler elde edilmiştir:

- Kirecsiz  $\sigma_c = 0.225 \cdot 10^{(3.66 SK + 0.011 SH)}$
- %5 Kireçli  $\sigma_c = 0.058 \cdot 10^{(5.54 SK + 0.014 SH)}$
- S/K = 0.25 oranında Kireçli  $\sigma_c = (1.070 - 0.141 \log KRÇ) \cdot 10^{0.014 SH}$

burada

$\sigma_c$  : Tek eksenli basınç dayanımı, kg/cm<sup>2</sup>,

SK : Su/Katı oranı, %

KRÇ : Kireç kullanım oranı, %

Katı yakıt biriketlerde, ultrases hızı ile dinamik elastisite modülünün birbiriyle yakından ilgili olduğu görülmektedir. Ultrases hızının ve Poisson's oranının tayin edilmeleri ile dinamik elastisite modülü bulunabilmektedir. Yüksek ultrases hızlarında, dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü arasındaki farkın azaldığı belirlenmiştir. Elasto-plastik özellik gösteren karışımlarda, dinamik elastisite modülü sert ve sağlam, elastik özellikteki karışımlara nazaran daha düşük bir değerde olduğu gözlenmiştir. Laboratuvarında NX (50mm  $\Phi$ ) kalıp numuneler üzerinde PUNDIT C.N.S. marka sismik hız ölçer aleti ile yapılan deneyler sonucunda ultrases hızının numune içinden geçiş süresi ve numunenin boyundan yararlanılarak sismik hız tayini yapılmıştır. Yapılan analizlerde, katı yakıt biriketlerin basınç dayanımı, ultrases hızının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Ultrases hız artışı ile birlikte karışımların basınç dayanımının da arttığı gözlenmiştir. Basınç dayanımı ile ultrases hızı arasında çimento kullanım miktarı ve su kullanım oranına bağımlı olarak üstel ve polinomial fonksiyonlarla tanımlanmıştır.

Analiz bulguları dikkate alındığında, basınç dayanım performansının tahmininde bağlayıcı eleman olarak kullanılan su/çimento, su/katı oranı ve kür süresinin en kuvvetli değişkenler olduğu gözlenmiştir. Elde edilen yüksek korelasyonlar sebebiyle, karışım parametrelerinin irdelenmesinde çok değişkenli regresyon analiz tekniğinin efektif olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. Diğer taraftan, çimento oranı ve kür süresi haricindeki diğer bağımsız değişkenler ile performans kriteri arasında da kabul edilebilir korelasyonlar görülmüştür.

## SONUÇ

Soğuk bağlayıcı katı yakıt biriket kombinasyonları üzerinde yapılan bu çalışmada, basınç dayanımına etkiyen kuvvet bileşenlerinin tane boyutu dağılımı, su/katı oranı, su/çimento oranı, katı/çimento oranı ve katı malzeme türü gibi kompozisyonel faktörler olduğu gözlenmiştir. Bu araştırma bünyesinde 4800 adet numune üzerinde yapılmış analiz bulgularından çıkarılabilecek sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- Soğuk bağlayıcı kömür biriketlerinin katı yakıt olarak kullanılabilmesi açısından, tekno-mekanik tüm parametrelerin (basınç dayanımları, elastisite özellikleri, ultrases karakteristikleri, rijitlik özellikleri) belirlenmesi, dayanım performansının irdelenmesi açısından son derece önem taşımaktadır.

- Malzeme kompozisyonu, çimentolu karışımların basınç dayanım performansında en etkili parametre olarak belirlenmektedir.

- Karışımlarda su/çimento oranı arttıkça, su emme değeri azalmaktadır. Karışımlardaki tane boyutunun ince olması su emme oranını yükseltmektedir. Bunun paralelinde, çimento kullanım oranı arttıkça basınç dayanım performansı da iyileşmektedir. Kullanılacak su miktarının belirlenmesi, basınç dayanımı açısından kritik bir faktör olup karışımdaki su miktarı azaldıkça, basınç dayanımında iyileşme görülmektedir.

Elde edilen biriketlerin ateşe dayanımlarının yüksek olduğu kadar, biriketlerin çevre dostu oluşu, bu teknolojinin kullanılabilirliği önem kazanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- (1) Goksel M.A., 1977, Fundamentals of Cold Bond Agglomeration Processes, Agglomeration 77, AIME, Vol.2., pp 877-901.
- (2) Van Vlack L.H., 1964, Physical Ceramics For Engineers, Addisa-Wesley Publishing Co., London.
- (3) Brown E.T., 1981, Rock Characterisation Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, Oxford.