

Kazı Arını Tasarımında Ampirik Yaklaşımların Kullanımı

Gamze ERDOĞAN ERTEN^{*1}, Mahmut YAVUZ¹

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği
Bölümü, Eskişehir

Geliş tarihi: 10.09.2019

Kabul tarihi: 20.12.2019

Öz

Maden planlama ve tasarlama süreci, doğal kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak ve madencilik sırasında ortaya çıkan maliyetlerin tümünü azaltmak açısından oldukça önemlidir. Yeraltı madenciliğinde seçilecek üretim yöntemine bağlı olarak, kazı arınlarının seyrelme ve cevher kaybını en aza indirecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu noktada kaya kütlesi karakterizasyonu ve kazı arını geometrisi gibi parametreleri göz önünde bulunduran ampirik kazı arını tasarımları dikkat çekmektedir. Duraylı kazı arınlarını tasarlamak üzere, ampirik duraylılık grafiği yönteminin de bu kapsamda yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Duraylılık grafiği yöntemi ilk olarak kazı arını tasarımlarını yapmak üzere ortaya konulmuş, ardından kazı arını tasarımı konusunda özellikle metal madenlerinde dünya çapında geniş kabul görmüştür. Yöntem, Tünel Kalitesi Q indeksine dayanmakta ve kazı arını tasarımını etkileyen en önemli faktörleri dikkate almaktadır. Duraylılık grafiği yönteminde geçmişten bugüne, kazı arınlarının duraylılık durumunu tahmin etmedeki güvenilirliğini artırmayı amaçlayan çeşitli gelişmeler yaşanmıştır. Bu çalışma öncelikle duraylılık grafiği yöntemini detaylı bir şekilde tanıtmakta ardından bu konuda yapılan gelişmeleri ele almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı maden üretimi, Kazı arını tasarımı, Ampirik duraylılık grafiği yöntemi

Using Empirical Approaches in Stope Design

Abstract

The studies in the mine planning and design process are crucial to ensure efficient use of natural resources and reduce the overall cost of mining. In underground mining, stopes should be designed to minimize the dilution and ore loss depending on the production method to be selected. At this point, empirical stope design that takes into account parameters such as the rock mass characterization and stope geometry draws attention. The empirical modified stability graph method to design stable stopes is known widely used in this context. The stability graph was introduced initially for open stope design and then it has gained wide recognition in open stope design around the world especially in metalliferous mining. The method is based on the tunnelling quality index Q and takes into account the most important factors affecting stope design. From the past to the present, there have been several improvements in the stability graph method aimed at increasing the reliability of the stope in predicting the stability status. This study firstly introduces the stability graph method in detail and then discusses the developments in this regard.

Keywords: Underground mine production, Stope design, Empirical stability graph method

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Gamze ERDOĞAN ERTEN, gerdogan@ogu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kazı arını tasarımı yeraltı maden üretiminde verimi etkileyen en önemli faktörlerden biridir ve tasarım esnasında yapılacak herhangi bir iyileştirmenin üretimde önemli oranda tasarruf sağlayabileceği bilinmektedir. Burada kazı arını “yeraltı üretim yöntemlerini kullanarak cevheri onu çevreleyen kaya kütesinden çıkarmak için oluşturulan üretim bölgesi” olarak tanımlanabilmektedir. Kazı arını tasarımı temel olarak; kazı alanlarının duraylılığı ve üretim esnasında cevher oranının seyrelmesiyle ilgilenmektedirler. Kaya sınıflama sistemi olarak sıklıkla kullanılan Barton’un Q sistemi [1] ve RMR gibi ampirik veri tabanları, yeraltı kazılarını tasarlarırken mühendisleri yönlendirmeye yardımcı olacak araçlar olarak geliştirilmiştir. Bu veri tabanları temelde düşük ila orta derinlikteki tünel çalışmalarına dayanmaktadır. Burada tüneller, yoğun trafiğe sahip kalıcı açıklıklar olarak tasarlanmaktadır. Bu yüzden büyük kazı arınlarının boyutlandırma ve destek tasarımına uygulanmakta zorluklarla karşılaşılabilir, çünkü bu sınırlı erişim alanlarının geçici yapılar olarak ve girişi olmayan kazı arınları durumunda tasarlanması gerekmektedir. Bu durumda tünel açma süreçleri için tasarlanan araçların yerini alacak ve yeraltı madenlerinde maliyeti en aza indirirken, üretimi en üst düzeye çıkaracak madencilğe özgü bir kazı tasarım aracına olan ihtiyaç ortaya çıkmıştır [2].

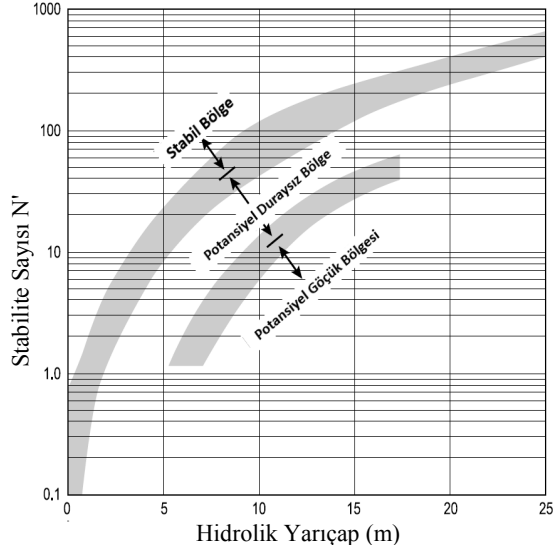
Uzun deliklerin delinmesiyle yapılan üretimler (Longhole Stoping) gibi büyük ölçekli açık kazı arını yöntemleri, sınırlayıcı bir kazı arını boyutu seçimine dayanmaktadır. İdeal olarak bu kazı arınları kendini destekleyecek şekilde tasarlanmaktadır. Bir tahkimat elemanının kullanılmasının zorunlu olduğu zemin koşulları veya daha büyük kazı arınlarına ihtiyaç duyulduğunda ise halat türü kaya saptamasının başarıyla uygulandığı bilinmektedir. Mathews ve arkadaşları [3] açık kazı arınlarının Q sınıflama sistemi bazında gerilme, yapısal yönelim ve yerçekimi etkilerine bağlı üç faktöre göre boyutlandırılması için “duraylılık grafik yöntemi” olarak adlandırılan ampirik bir yöntem

önermişlerdir. Yöntem bu üç faktörün birleşimine ve yüzeyin hidrolik yarıçapına (yüzey alanı/çevre) bağlı olarak kazı arınının her yüzeyinin ayrı ayrı boyutlandırılmasında kullanılmaktadır. Hidrolik yarıçap, yüzeyin büyüklüğü kadar şeklini de hesaba katmaktadır [4]. Mathews ve arkadaşları [3] tarafından önerilen duraylılık yöntemi, Kuzey Amerika’da sınırlı sayıda madenden elde edilen verilerin toplanmasına dayanmaktadır. Yöntem oluşturulduğundan bu yana defalarca revize edilmiş ve daha fazla veri eklenerek sürekli güncellenmiştir. İncelenen bu çalışma Mathews ve arkadaşları [3] ile başlayan duraylılık grafiği yönteminin temellerini, geçmişten bugüne gelişimini ele almakta ve sınırlamalarını ortaya koyup geliştirilmesi gereken yönlerini sunmaktadır.

1.1. Duraylılık Grafik Yöntemi

Duraylılık grafiği, belirli bir duraylılık aralığına sahip çok sayıda kazı yüzeyini ele almaktadır. Duraylılık sayısı, duraylılık grafiğinin “y” eksenini oluşturur ve kazı etrafındaki kaya kütesi kalitesinin bir ölçüsüdür. Duraylılık grafikleri tüm kazıdan ziyade tek tek kazı yüzeyleriyle ilgilenmektedir. Tipik bir dikdörtgen kazı için, duraylılık grafiğinde beş kazı arını yüzeyi göz önünde bulundurulmaktadır (dört yan duvar ve tavan taşı). Duraylılık verileri bir kez işaretlendikten sonra kazı arınları sınır çizgileri ile bölgelere ayrılmaktadır.

Mathews ve arkadaşları [3] tarafından tasarlanan ilk duraylılık bölgeleri ve grafiği 26 saha gözlemine dayanmaktadır. Duraylılık bölgeleri gerçek madencilik verilerinin dağılımından tanımlanmakta ve daha sonra planlanan kazıların istikrarını tahmin etmekte kullanılmaktadır. Orijinal Mathews ve arkadaşları [3] duraylılık grafiği, duraylılık verilerinin dağılımına göre “duraylı”, “potansiyel duraysız” ve “potansiyel göçük” bölgelerine ayrılmıştır. Üç duraylılık bölgesi, duraylılık sınıfları ile sınırlardaki belirsizlik arasındaki geçişi yansıtacak şekilde geçiş bölgeleriyle (transitional zones) ayrılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Duraylılık grafiği (Mathews ve arkadaşları [3]'den sonra Potvin ve Hadjigeorgiou [5])

1.2. Modifiye Edilmiş Duraylılık Sayısı, N'

Mathews ve arkadaşları [3]'in orijinal çalışmasının ardından Potvin [6] 175 gözlem verisi ile bu yöntemi kalibre etmiş ve modifiye duraylılık numarasını (N') tanımlanmıştır. Bu parametre Mathews ve arkadaşları [3]'in önerdiği " N " değerine benzemekle birlikte farklı faktör ağırlıklarına sahiptir. Dünya'da yapılan çalışmalara bakıldığında farklı ülkelerin farklı duraylılık sayısını kullandıkları görülmektedir. Örneğin Kanada'da Potvin'in " N " sayısı kullanılırken Avustralya'da, Mathews ve arkadaşları [3] tarafından önerilen analiz kullanılmaktadır [4]. Bu çalışmada ise özellikle Potvin [6] tarafından önerilen Modifiye Edilmiş Duraylılık yöntemi üzerinde durulmaktadır.

Duraylılık grafiği yöntemi temel olarak kaya kütlelerinin özelliklerinin ve tünel tahkimat gereksinimlerinin belirlenmesi için Barton ve arkadaşları [7] tarafından ortaya konan tünelcilik niteliği indeksi olarak bilinen Q değerini kullanmaktadır. Bu indeksin hesabı Eşitlik 1 ile gösterilmektedir. Burada RQD kaya niteliği belirteci, J_n süreksizlik takımı sayısı, J_r süreksizlik

pürüzlülük sayısı, J_a süreksizlik ayrışma sayısı, SRF toplam gerilme değişkeni ve J_w etken normal gerilmeyi azaltarak süreksizliğin makaslama dayanımını azaltan su basıncının göstergesidir [8]. Özetle tünel kalite indeksi Q üç faktöre bağlıdır (Eşitlik 1):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Q bağıntısında kaya kütle yapılarını temsil eden birinci bölüm (RQD/J_n) blok veya parça büyüklüğünün kaba ölçüsüdür. İkinci bölüm (J_r/J_a) süreksizlik duvarlarının pürüzlülük ve sürtünme özelliklerini temsil etmektedir. Bu bölüm pürüzlü, bozulmamış kapalı süreksizlik üzerine dayandırılmıştır. Süreksizlik yüzeyleri dolgu veya ince kil mineralleri ile kaplandığında dayanım oldukça azalacaktır. Bununla birlikte küçük makaslama yer değiştirmeleri meydana geldiğinde oluşacak kaya duvar teması kazının duraylılığını artıracak, bu durumda hiçbir şekilde eklem yüzeylerinin teması olmadığı durumda duraylılık bozulabilecektir. Son bölüm (J_w/SRF) iki farklı gerilme parametresinden oluşan ve aktif gerilmeyi ifade eden karmaşık bir ampirik hesaplama faktörüdür.

Modifiye edilmiş tünelcilik niteliği indeksi (Q') orijinal Q sisteminden yararlanarak Eşitlik 2'deki gibi yeniden tanımlanmıştır. Orijinal sistemden, toplam gerilme değişkeni (SRF) için orta derecede gerilme ve su azaltma faktörü (J_w) için kuru kaya kütle şartları kabul edilerek bu parametrelere "1" değeri verilip sistemden çıkarmıştır. Yöntem daha sonra duraylılık sayısını (N') hesaplamak üzere gerilme faktörünü, süreksizlik yönelim faktörünü ve yüzey tasarım yönelim faktörlerini hesaba katarak geliştirilmiştir. Her kazı arını yüzeyi için, duraylılık sayısı (N') ise Eşitlik 3'deki gibi modifiye edilmiş tünelcilik niteliği indeksinin sırayla A , B ve C faktörleriyle çarpılmasıyla bulunmaktadır.

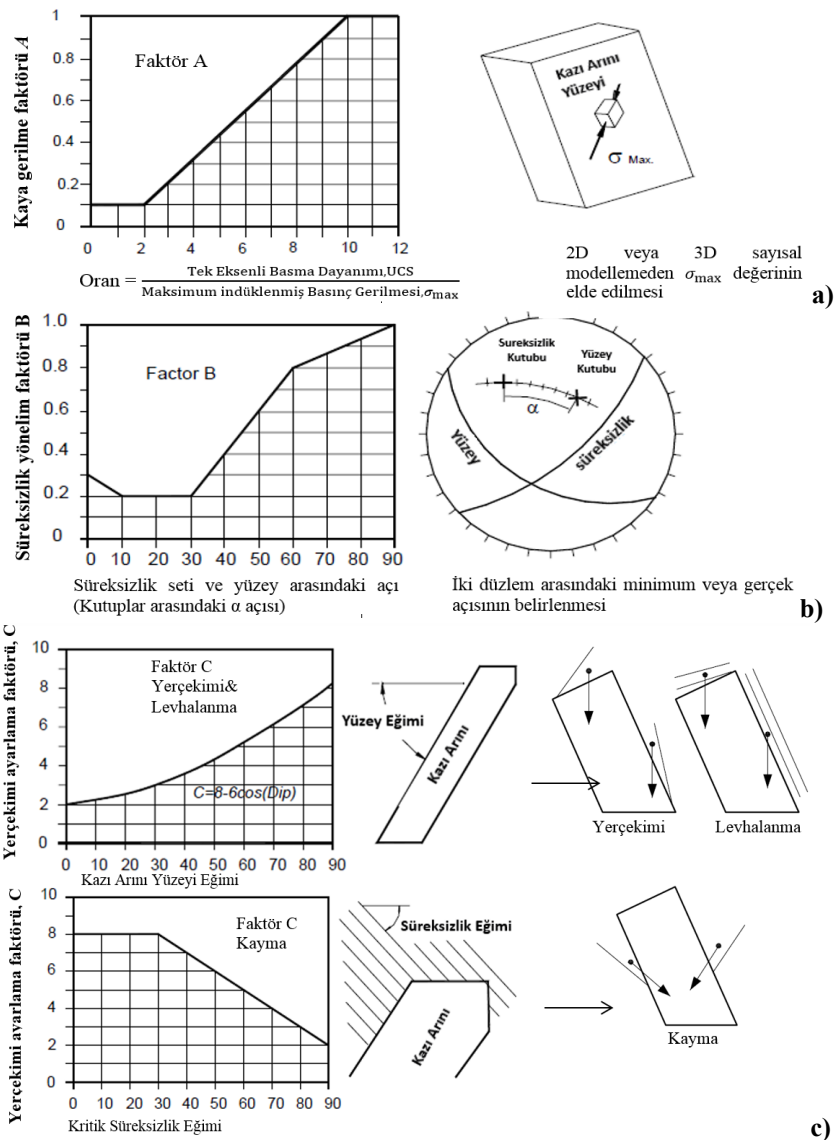
$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (2)$$

$$N' = Q' \times A \times B \times C \quad (3)$$

1.3. Modifiye Edilmiş Duraylılık Grafiği Yönteminin Girdi Parametreleri

Kaya gerilme faktörü A , başlangıçta orijinal Q sistemindeki [7] SRF yani gerilme indirgeme kat sayısı ile yer değiştirmek için tasarlanmıştır. SRF 'ye benzer bir şekilde bu faktör de sağlam (bozulmamış) kaya geriliminin, kazı arını üretildiğinde oluşacak indüklenmiş gerilmeye bölünmesi ile bulunmaktadır. Kaya gerilme faktörü

A 'nın hesaplanmasında, kaya kütlelerinin UCS değeri tek eksenli basınç dayanımı testi ve kazı arını yüzeyinin merkezinden ölçülen maksimum indüklenmiş gerilmesi *Phase2* gibi sayısal bir yazılım kullanılarak belirlenebilmektedir. Daha sonra Şekil 2.a'da gösterilen grafik yardımıyla A faktörü bulunmaktadır. A faktörünün değeri 1'e eşit olduğunda kazı arını yüzeyinin gerilme olmaksızın (relaxation) olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 2. Duraylılık grafik yönteminin a. A faktörünün, b. B faktörünü ve c. C faktörünün belirlenmesi [4,6]

Süreksizlik yönelim faktörü B , her kazı arını yüzeyinin duraylılığını muhtemelen azaltacağı düşünülen süreksizlik setlerin yönelimini temel alan bir ağırlıklandırma faktörüdür. Kazı açıklığı yüzeyinin duraylılığı üzerinde kritik süreksizliklerin etkisi eğer doğrultu serbest yüzeye paralel ise en yüksek, tabakalar birbirine dik açıyla konumlanıyorsa en düşüktür. Süreksizlik seti ile bir kazı arınının serbest yüzeyi arasındaki açı elle veya *RocScience* yazılımları arasında bulunan DIPS gibi araçlar kullanılarak belirlenebilmektedir [9]. Şekil 2.b’de faktör B için geliştirilen grafik gösterilmektedir.

Yüzey tasarım yönelim faktörü C , kazı arını yüzeyinin duraylılığı üzerinde yer çekiminin etkisini hesaba katmak için geliştirilmiştir.

Yenilme tavandan yerçekimi kaynaklı olarak veya kazı arını yüzeylerinin kayma veya kavaklanmasıyla meydana gelebilmektedir. Potvin [6] hem yerçekimi hem de kavaklama yenilmelerinin kazı arını yüzeyinin eğim açısına bağlı olabileceğini söylemiştir. C faktörü belirlenmeden önce kaya kütleindeki eklem setlerinin varlığından kaynaklanan en olası yenilme türünün belirlenmesi gerekir. Faktör C burada düşey yüzeylerle maksimum 8 değerini alabilmektedir (Şekil 2.c). Kayma yenilmeleri ise kritik süreksizlerin eğim açısına bağlı olarak Şekil 2.c’de gösterildiği gibi değişmektedir. Bunlarla birlikte Çizelge 1 A, B ve C faktörlerinin değer aralıklarını göstermektedir.

Çizelge 1. Faktörlerin değer aralıkları [4]

Aralık	RQD/Jn	Jr/Ja	A	B	C	N'
Maksimum	0,5-200	0,025-5	0,1-1	0,2-1	2-8	0,0005-8000
Tipik	2,5-25	0,1-5	0,1-1	0,2-1	2-9	0,1- 1000

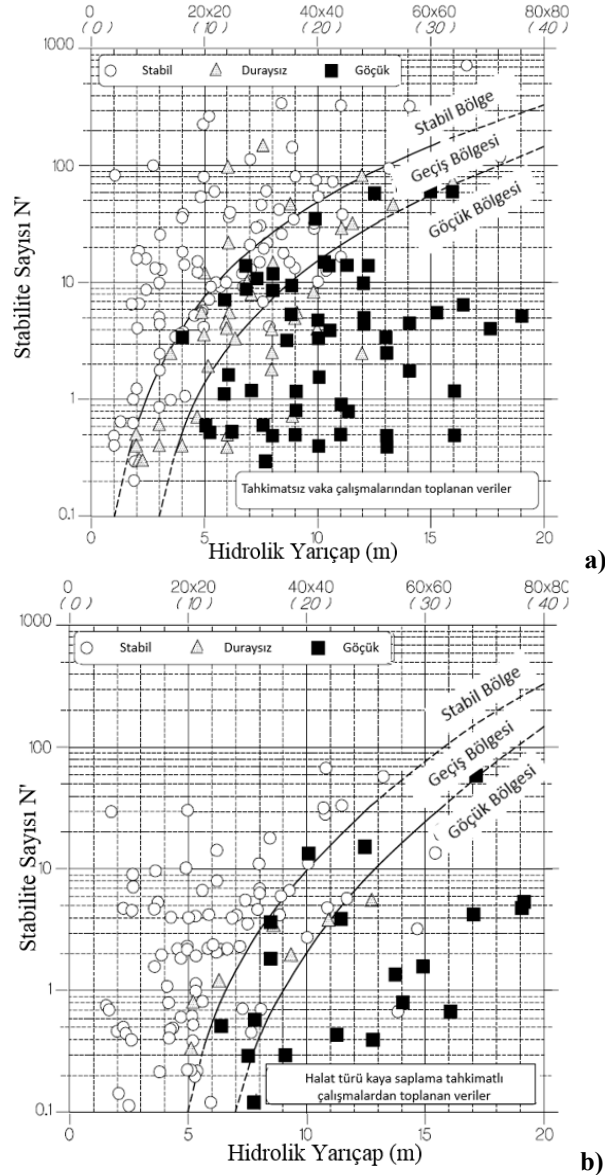
Hidrolik yarıçap: Duraylılık grafiği yönteminde yukarıda bahsedilen girdi parametrelerinin yanında hidrolik yarıçap tanımına da ihtiyaç bulunmaktadır. Hidrolik yarıçap Laubscher ve Taylor [10] tarafından kazı duraylılığı üzerindeki boyut ve şeklin ortaklaşa etkisini ortaya çıkarmak üzere tanımlanmıştır.

Bu çap analiz edilen kazı arını yüzeyinin kesit alanının bu yüzeyin çevresine olan oranıyla ifade edilmektedir ve genellikle kare şekillerden ziyade uzun ve dar şekilleri tercih etmektedir. Çoğu kazı arını şekli çok karmaşık olmadığından hidrolik yarıçapı değerlendirmek kolay olabilmektedir. Hidrolik yarıçap ve kazı alanı genişliği arasındaki ilişki Eşitlik 4 ve 5’deki bağıntılar ile tanımlanabilmektedir [11]. Burada “ HR ” hidrolik yarıçapı ve “ H ” ve “ L ” sırayla kazı arını yüzeyinin yükseklik ve uzunluğunu ifade etmektedir.

$$HR = \frac{(H)(L)}{2(H+L)} \quad (4)$$

$$L = \frac{2(H)(L)}{H-2(HR)} \quad (5)$$

Tahkimatsız açık kazı arınlarının duraylılığının grafiksel olarak belirlenebilmesi için Potvin [6] tarafından 175 ve Nickson [12] tarafından 13 vaka analizi ile Şekil 3.a’da gösterilen Duraylılık Grafiği çizilmiştir. Burada modifiye edilmiş duraylılık sayısı, “ N ” ve hidrolik yarıçap, “ HR ”, önceki bölümlerde belirtildiği gibi her vaka analizi için hesaplanmaktadır. Grafik üzerinde gösterilen duraylı kazı arınları çalışma süresi boyunca çok az veya hiç bozulma göstermemektedir. Duraysız kazı arınları, sınırlı yüzey yenilmeleri ve/veya yüzey alanının %30’undan daha azını içeren blok düşmeleri göstermektedir. Göçük kazı arınları ise kabul edilemez yenilmeler göstermektedir. Potvin [6] Şekil 3.a’da de gösterilen duraylı bölgeyi göçük bölgesinden ayırabilmek için iki bölge arasında bir geçiş bölgesi çizmiştir. Bu bölgenin üst sınırı, kazı arını tasarımında tahkimatsız sınırı temsil etmektedir.



Şekil 3. a. Tahkimatsız duraylılık grafiği [6,12], b. Tahkimatlı duraylılık grafiği [4]

2. KAZI ARINI DURAYLILIĞI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Mathews ve arkadaşları [3] tarafından duraylılık grafiğinin tanıtılmasından bu yana yöntem çok sayıda yazar tarafından çeşitli derinliklerde ve

kaya kütlesi koşullarında test edilip, orijinal veri tabanının da genişletilmesiyle tüm dünyada uygulanmaya başlamıştır. Yöntem bu tarihten itibaren tümü kazı arınlarının duraylılığını tahmin etme doğruluğunu arttırmayı amaçlayan birçok gelişme yaşamıştır. Bu gelişmeler duraylılık grafiği sayı faktörlerinin ve geçiş bölgelerinin yeniden tanımlanmasını, ayrıca yeni faktörlerin

eklenmesini içermektedir. Bununla birlikte halat tipi kaya saplama tasarımı gibi farklı amaçlar için de yıllar boyunca çeşitli tiplerde duraylılık grafikleri ortaya çıkmıştır. Bu bölümde duraylılık grafiği yöntemi için yapılan gelişmeler ve güncellemeler ele alınmıştır.

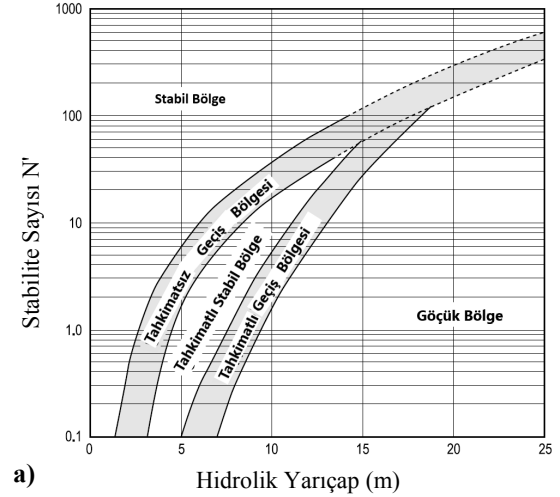
2.1. Duraylılık Grafiği Türleri

Daha önce de belirtildiği üzere, ilk kez Mathews ve arkadaşları [3] sınırlı veriyle (26 vaka analizi) şekil faktörüne (hidrolik yarıçap) karşı duraylılık sayısını (N) çizdirerek duraylılık grafiğini ortaya koymuşlardır (Şekil 1). Ardından Potvin [6] daha önemli bir veri tabanı oluşturarak (175 vaka analizi) ve girdi faktörlerini modifiye edilmiş duraylılık sayısını (N') oluşturmak için yeniden tanımlayıp, duraylı ve duraysız davranışlar arasındaki geniş geçiş bölgesini azalttığına yöntemin daha fazla kabul görmesi sağlanmıştır (Şekil 3.a).

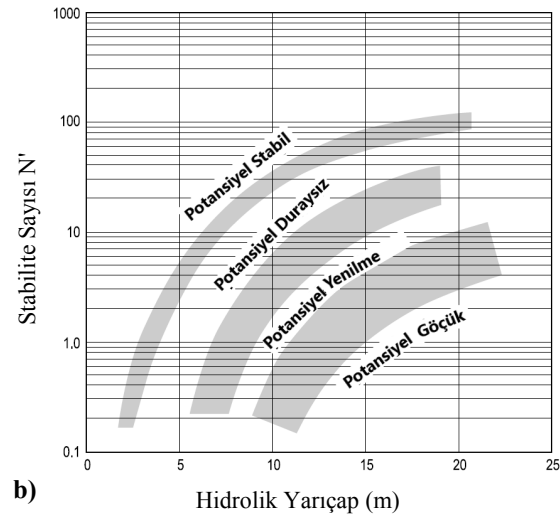
Açık kazı arını tasarımlarının yanında, halat türü kaya saplama desteği gereken kazı arını tasarım çalışmaları da bu süreçte hız kazanmıştır. Potvin [6] ve Potvin ve Milne [13], halat türü kaya saplamalarının kullanıldığı 66 kazı arını vaka analizini ele almışlardır. Ardından Nickson [12] bu veri tabanına 46 örnek vaka analizi daha eklemiştir (Şekil 3.b). Yazarlar halat türü kaya saplamalarının daha büyük sabit açıklıklara (daha büyük hidrolik yarıçaplara) yol açan gelişmiş duraylılık gösterdiklerini ortaya koymuşlardır. Bu veri tabanı kalite kontrolü gibi hususları dikkate almamakla birlikte, uygun bir halat türü kaya saplama etkinliğinin gösterilmesini sağlamaktadırlar [4].

Potvin [6] ve Nickson [12]'in istatistiksel yöntemler ve ek veriler kullanarak değiştirdiği halat türü kaya saplama etkinliği için bir sınır çizmiştir. Şekil 3.b' de çizilen üst eğri, güvenilir halat türü kaya saplama performansı sınırını temsil etmektedir. Bu çalışmadan sonra Nickson [12] halat türü kaya saplamalarının uygulanabilmesi durumunda yaratılan duraylı açıklıkları gösteren bir başka bölge daha eklemiştir (Şekil 4.a). Diederichs ve Kaiser [14] ise halat türü kaya saplama türünün, uzunluğunun ve aralığının

seçildiği detaylı halat türü kaya saplama tasarımı için duraylılık grafiğini kullanmışlardır.



a)



b)

Şekil 4.a Duraylılık Grafiği a. Nickson [12]'den, b. Stewart ve Forsyth [15]'den

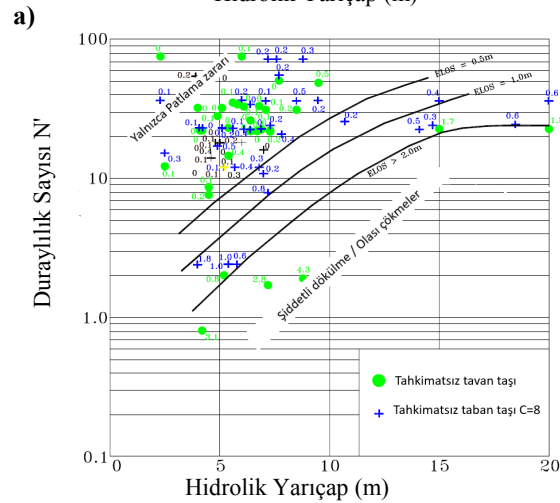
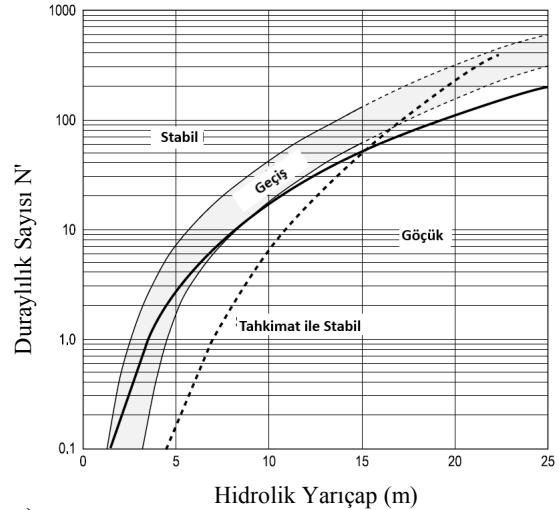
Stewart ve Forsyth [15], duraylılık grafiği yönteminde Potvin [6]'in tanımladığı tek geçiş bölgesinin oldukça hassas olduğu ve bu nedenle bir kazı arınının yanlışlıkla kesin duraylı veya kesin göçük bölgesinde tanımlayabileceğini ifade etmişlerdir. Ardından yazarlar deneyimlerine dayanarak, duraylılık bölgelerini kalitatif bir şekilde ancak seyrelme yüzdelerinin tahminlerine göre yeniden tanımlamışlardır. Stewart ve Forsyth

[15] duraylılık grafiğine potansiyel duraylı, potansiyel duraysız, potansiyel yenilme ve potansiyel göçme olarak tanımlanan dört bölge için üç sınır önermişlerdir (Şekil 4.b).

Stewart ve Forsyth [15] tarafından sunulan bu çalışmanın en önemli noktalardan biri tasarım yöntemlerinin, çok zayıf veya düşük kaliteli kaya kütlelerine sahip madenlerden çok az veriye dayanarak oluşturulmasıdır [2]. Bir diğer önemli nokta da her madenin benzer yöntemleri kullanırken fay gibi göz ardı edilebilecek faktörlerin bir sonucu olarak tahminlerden önemli sapmaların fark edilerek kendi tasarım çizgilerini yaratmalarını önermesidir. Hadjigeorgiou ve arkadaşları [16] duraylılık grafiğini, sağlam kayalarda tavan taşlarının tasarımını daha doğru şekilde göstermek amacıyla değiştirmişlerdir (Şekil 5.a). Yazarlar duraylı ve duraysız kazı arınları arasındaki geçiş bölgesini doğrulamak için bağımsız olarak istatistik analizleri kullanmışlar ve Potvin [6]'in tanımladığı geçiş bölgesinin yeterince doğru olduğu sonucuna varmışlardır.

Görüldüğü üzere geleneksel duraylılık grafiklerinde “kazı arını yüzey duyarlılığı” nitelik bakımından olarak duraylı, duraysız ve göçük olarak tanımlanmaktadır. Kazı arınlarının boyutlandırılması ve tahkimat tahmini yapılmasında bu bölgeler yeterli olsa da, seyrelme seviyelerinin miktarının tahmininde bunlar çok faydalı olamamaktadırlar. Nitekim madencilik faaliyetlerinde ne kadar seyrelme olacağı ve bunun ne kadarının kabul edileceği ile de ilgilenilmektedir. Bu amaçla Clark ve Pakalnis [17] ELOS (Equivalent Linear Over break\Slough) faktörünü kazı arını genişliğinden bağımsız olarak tanımlamışlardır. ELOS faktörü kazı arını yüzeyinden gelen dökülme (sloughing) hacminin hidrolik yarıçapa (HR) bölünmesiyle bulunmaktadır. Seyrelme grafiği (Şekil 5.b), ELOS değerlerinin modifiye edilmiş duraylılık grafiğinde gösterilmesi ve en uygun tasarım çizgilerinde hazırlanmasıyla geliştirilmiştir. Ayrıca yazarlar tarafından grafiğin topuk taşı durumlarını içerdiği ve esas olarak kaliteli kaya kütlelerinde bulunan çalışmalardan elde edildiği belirtilmektedir.

Bununla birlikte, patlatma hasarı 0,5 m sabit hasar değer varsayımıyla ELOS’da hesaba katılmaktadır. Ancak yazarlar sabit bir değer alınmasının oldukça basitleştirilmiş olduğunu ve bu konuda daha detaylı bir çalışma gerektiğini belirtmektedirler.

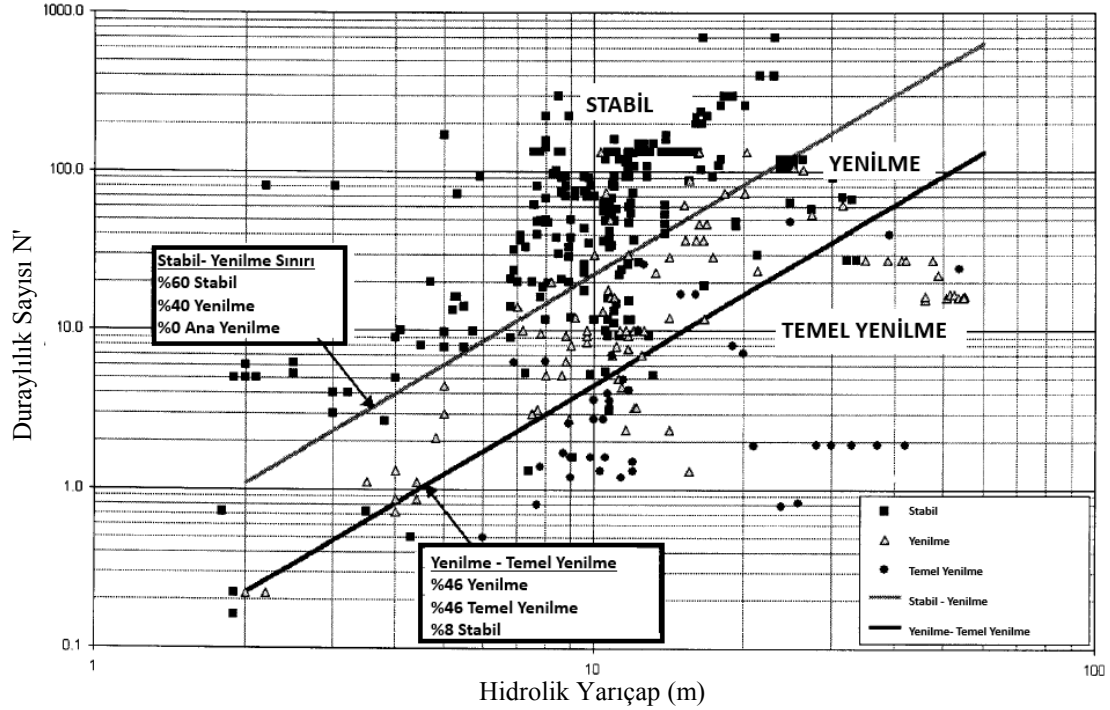


Şekil 5. a. Duraylılık grafiği [16], **b.** Seyrelme grafiği [17,18]

Bu çalışmaların yanı sıra Mawdesley ve arkadaşları [19] tarafından duraylılık bölgelerinin istatistiki olarak yerleşimini tanımlamak ve optimize etmek amacıyla, 400’den fazla vaka analizi içeren genişletilmiş veri tabanında lojistik

regresyon uygulanmıştır. Bu çalışmada tüm duraylılık sonuçları için eş olasılık kontur çizgileri üretilmiştir. Yazarlar lojistik regresyon kullanmanın avantajını, maksimum olasılık tahminleri kullanılarak yöntemde yansıtılan belirsizlikleri en aza indirmeye kabiliyeti olarak

açıklamaktadırlar. Bu yüzden Mathews [3] yönteminin kullanımıyla ilişkili riskleri ölçebilmektedirler. Genişletilmiş Mathews duraylılık grafiği (Şekil 6) [3] yeni verileri ve istatistiksel olarak belirlenmiş duraylılık bölgelerini içermektedir.

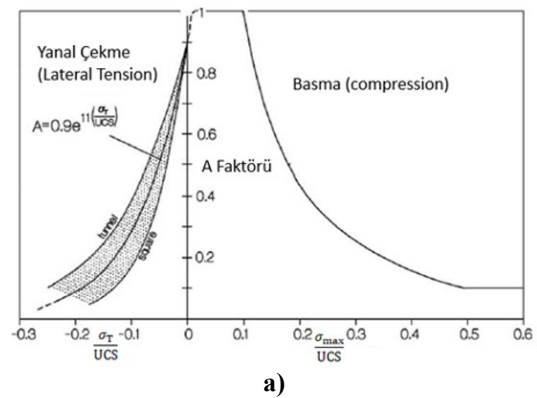


Şekil 6. Lojistik regresyona dayalı genişletilmiş duraylılık grafiği [19]

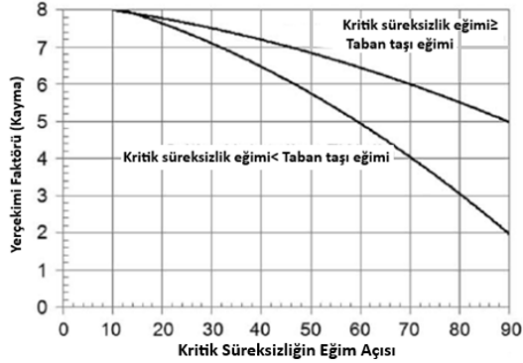
2.2. Duraylılık Grafiği Yönteminin Geliştirilen Faktörleri

Duraylılık sayısını oluşturan A, B ve C faktörleri ilk olarak Potvin [6] tarafından modifiye edilmiştir. Ardından yapılan çalışmalarda bu faktörlerden A ve C için yeni tanımlamalara ihtiyaç duyulmuş ve Diederichs ve Kaiser [14] tarafından A faktörü için bir gerilme (tension) bileşeni önerilmiştir (Şekil 7.a). Ancak önerilen yeni çizelgenin düzenlenmesi ve tamamen test edilmesi gerekmektedir [20]. Öte yandan yerçekimi faktörü (C) ilk tanımlandığında taban taşın ele alınmadığından Neumann [21] bu konudaki eksikliği gidermek amacıyla kayma türü

yenilmeler için yeni bir çizelge hazırlamıştır (Şekil 7.b).



a)



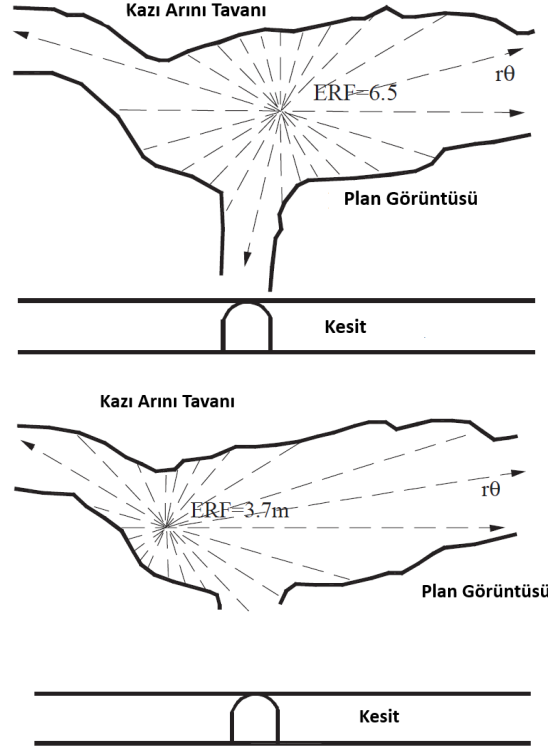
Şekil 7. Modifiye edilmiş grafiğin geliştirilen, a. A faktörü ve b. C faktörü [20].

Q' sisteminde fay yapısı tanıtılmadığından, geleneksel duraylılık grafik yönteminde de madencilik açısından oldukça önemli bu ölçüt göz ardı edilmektedir. Bu amaçla Suorineni ve arkadaşları [22] duraylılık sayısına Eşitlik 6'da gösterildiği gibi yeni bir fay faktörü eklemiştir. Duraylılık sayısı, seyrelmeye oldukça etkisi olacağından fay olduğu düşünülen bölgelerde bu faktörü de hesaba katarak ve yazarların oluşturduğu çizelge kullanılarak hesaplanabilir.

$$N'_f = Q' \times A \times B \times C \times F \quad (6)$$

Hidrolik yarıçap faktörünün kazı arınının karmaşık geometrilerinde kullanıldığında yetersiz performans gösterdiği düşünülmektedir. Bu amaçla tasarımda basit düzlemsel biçimlerden önemli ölçüde ayrılan kazı arını yüzeyleri için Eşitlik 7'de gösterilen yarıçap faktörü (ERF) önerilmiştir [23]. Burada r_θ kazı arını yüzeyinden θ açısında kenarlara olan uzaklığı ifade etmektedir (Şekil 8). Planlama aşamasında basitçe tanımlanan kazı arını geometrileri patlatma çalışmasına ve delme doğruluğuna bağlı olarak karmaşık bir hale gelebilmektedir. Bu nedenle kazı arını duraylılığını tanımlamada bu faktör eğer gerçek kazı arını geometrisi tahmin edilebiliyorsa daha pratik olabilmektedir.

$$ERF_{max} = \frac{0,5}{\frac{1}{n} \sum_{\theta=1}^n \frac{1}{r_\theta}} \quad (7)$$



Şekil 8. Hesaplanan ERF faktörü değerini gösteren düzensiz kazı arını tavanları [23]

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Açık kazı arınlarının tasarlanmasında genel olarak *analitik*, *sayısal* veya *ampirik* yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ampirik çalışmalar, yenilme mekanizmalarının gözlemlenmesi ile ortaya çıkan yenilme ve duraylı kalma durumları gibi geniş deneyimlerden elde edilen bir yenilme ölçütüne dayanmaktadır. Burada kaya kütlesi karakterizasyon verileri (RQD vb) ve açıklık geometrisi ölçümleri vaka çalışmaları için incelenmekte, böylece doğrudan ölçümler kullanılmadan duraylılığı etkileyen önemli unsurlar ortaya konulabilmektedir. Bu bakımdan ampirik tasarım tekniklerinin, kolay bir şekilde toplanabilen saha verileri gerektirdiğinden çok etkili araçlar oldukları bilinmektedir [2].

Ampirik bir yöntem olan ve jeoteknik verilerden yararlanan "duraylılık grafik yöntemi" açık kazı

arını tasarımı için tanımlandığı günden bugüne, çok sayıda değişim ve gelişim göstererek bugün oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Başlangıçta yalnızca 3 madenden elde edilen 26 veriyle yapılan çalışmalar, zaman içinde 400'den fazla verinin oluşturduğu veri tabanına ulaşmıştır. Vaka çalışmalarının, yani veri sayısının artması da yönteme olan güveni artırmıştır. Bunun yanında orijinal duraylılık grafiğinin önemli bir bileşeni olan “duraylılık sayısı N” üzerinde de, artan vaka çalışmalarıyla orantılı bazı değişimler yaşanmış ve “modifiye edilmiş duraylılık sayısı N” tanımlanmıştır. Günümüzde kazı arını tasarımı için farklı madenlerde bu iki duraylılık sayısı (N veya N') tamamen tercihe bağlı olarak seçilmektedir.

Çeşitli çalışmalarla orijinal ve modifiye edilmiş duraylılık grafiklerinde bazı sınırlamalar da ortaya konulmuştur. Bunlardan en önemlileri; üretim topuklarındaki kayma yenilmelerinin ağırlık faktörü C ile zayıf bir şekilde temsil edilmesi, stres faktörü A'nın gerilimden (tension) kaynaklanan dengesizlikleri hesaba katamaması, karmaşık kazı arını geometrilerinin çoğu zaman basitleştirilmesi, kötü patlatma etkilerinin genellikle göz ardı edilmesi ve duraylılık grafik bölgelerinin tanımlanmasındaki öznellik olarak sıralanmaktadır. Bu çalışma, özellikle değişen duraylılık grafik bölge tanımlarına ve güvenilirliği artırmak için bahsedilen bu sınırlamaların etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalar üzerine bir literatür sunmaktadır. Sonuç olarak yazarlar sınırlamaların azaltılmasına yönelik çalışmalar ve farklı duraylılık grafiklerinin, ilgilenilen çalışmanın amacına bağlı olarak dikkatle seçilmesini önermektedirler.

Duraylılık grafikleri ile ilgili literatürde sunulan eksikliklere, düşük kaliteli kaya kütleleri için önemli veri eksikliği olduğu da eklenmelidir. Ayrıca, Suorineni [20] duraylılık grafiği yaklaşımının dar damarlı madenler için çalışmadığını belirtmektedir. Bu sebeplerle yöntemin geliştirmesi amacıyla gelecekteki çalışmalar bahsedilen konulardaki eksikliği gidermeye yönelmelidir. Son olarak, yeni eklenen faktörlerin (örneğin fay faktörü) ölçümünün, sadece sahaya özgü düzeltme faktörleri olarak

ortaya çıkmasından dolayı bu konularda daha detaylı çalışmalara gerek duyulmaktadır.

4. KAYNAKLAR

1. Barton, N., 1988. Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-System, L. Kirkaldie, Editor. ASTM International: West Conshohocken, PA. 59-88.
2. Capes, G.W., Open Stope Hangingwall Design Based on General and Detailed Data Collection in Rock Masses With Unfavourable Hangingwall Conditions, Ph.D Thesis. 2009, in the Department of Geological and Civil Engineering University of Saskatchewan Saskatoon.
3. Mathews, K.E., Hoek, E., Wyllie, D.C., Stewart, S.B.V., 1981. Prediction of Stable Excavation for Mining at Depth Below 1000 m in Hard Rock. CANMET Report, DSS Serial No: 0sQ80-00081., Ottawa, 1981.
4. Hutchinson, D.J., Diederichs, M.S., 1996. Cablebolting in Underground Mines. Vol. 477. BiTech Publishers Richmond, BC.
5. Potvin, Y., Hadjigeorgiou, J., 2001. The Stability Graph Method for Open-stope Design. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals International Case Studies. Society of Mining, Metallurgy Exploration, Shaffer Parkway, Littleton, CO 80127, USA, 513-520.
6. Potvin, Y., 1988. Empirical Open Stope Design in Canada, Ph.D Thesis. 1988, Vancouver: Dept Mining & Mineral Processing, University of British Columbia.
7. Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, 6(4), 189-236.
8. Karpuz, C., Hindistan, M.A., 2006. Kaya mekaniği: ilkeleri, uygulamaları. TMMOB Maden Mühendisler Odası. 233-247.
9. QueensMineDesignWiki, Stability Graph Method. Retrieved from http://minewiki.engineering.queensu.ca/media/wiki/index.php/Stability_Graph_Method, 2019.
10. Laubscher, D., 1977. Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses-mining

- Applications. Trans. Instn. Min. Metall, 86, A1-8.
11. Villaescusa, E., 2014. Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping. CRC Press. 207-209.
 12. Nickson, S.D., 1992. Cable Support Guidelines for Underground Hard Rock Mine Operations, M.A.Sc. Thesis. University of British Columbia.
 13. Potvin, Y., Milne, D., 1992. Empirical Cable Bolt Support Design. in Proceedings of International Symposium on Rock Mechanics. Sudbury, ON, Canada.
 14. Diederichs, M., Kaiser, P., 1999. Stability of Large Excavations in Laminated Hard Rock Masses: the Voussoir Analogue Revisited. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(1), 97-117.
 15. Steward, S., Forsyth, W., 1995. The Mathews Method for Open Stop Design. CIM Bull, 88, 45-53.
 16. Hadjigeorgiou, J., Leclair, J., Potvin, Y., 1995. An Update of the Stability Graph Method for Open Stope Design. CIM Rock Mechanics and Strata Control session, Halifax, Nova Scotia, 14-18.
 17. Clark, L., Pakalnis, R., 1997. An Empirical Design Approach for Estimating Unplanned Dilution from Open Stope Hangingwalls and Footwalls. in Presentation at 99th Canadian Institute of Mining annual conference. Vancouver, BC.
 18. Clark, L.M., 1998. Minimizing Dilution in Open Stope Mining With a Focus on Stope Design and Narrow Vein Longhole Blasting, M.A.Sc. Thesis. University of British Columbia.
 19. Mawdesley, C., Trueman, R., Whiten, W., 2001. Extending the Mathews Stability Graph for Open-stope Design. Mining Technology, 110(1), 27-39.
 20. Suorineni, F.T., 2010. The Stability Graph After Three Decades in Use: Experiences and the Way Forward. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 24(4), 307-339.
 21. Neumann, M., 1999. Stability Graph Design Method-A Mining Operator's Guide. in CIM Mine Operators' Conference. Bathurst, New Brunswick.
 22. Suorineni, F., Tannant, D., Kaiser, P., 1999. Fault Factor for the Stability Graph Method of Open-stope Design. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section A-Mining Industry, 108, A92-A104.
 23. Milne, D., Pakalnis, R., Grant, D., Sharma, J., 2004. Interpreting Hanging Wall Deformation in Mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(7), 1139-1151.