

JEOTERMAL AKIŞKAN ÜRETİM VE RE-ENJEKSİYON KUYULARI

Süleyman ÖZÜDOĞRU
Emre BABÜR

ÖZET

Sondaj; eski çağlardan beri insanoğlunun özellikle hammadde üretimine yönelik bir araçtır. Sondaj işlemlerinin tarih boyunca gelişmesi gereksinimler ve teknolojinin itici gücüyle günümüzde de devam etmektedir.

Her sondaj için değişmeyenler bilgili, deneyimli insanlar ve ekipmandır. Bunları kazılacak kuyunun nitelikleri belirler.

Sondaj işlemini bir bünyeye benzetirsek, mekanik bölümü bünyenin iskelet kas sistemine karşılık geliyorsa, pompa kalbe, sirkülasyon akışkanı da kana karşılık gelir. Amacına uygun bir sondaj işlemini ancak bunların uyumlu birlikteliği garanti eder.

Jeotermal sondajlar; yüksek sıcaklığa sahip ve genellikle jeolojik olarak yakın geçmişte veya günümüzde de devam eder şekilde hareketli, paralanmış formasyonlarda yapıldığından diğer sondajlara oranla bazı ek zorluklar içerirler.

Jeotermal bir sondajın bitirilmesi, kuyunun kazılması, borulanması ve kuyu bitirme testlerinin yapılması demektir.

1. GİRİŞ

Sondajcılığı diğer pek çok işlemden ayıran en önemli özellik görünmeyen bir derinlikte; ancak ağırlık, basınç ve diğer algılama tekniklerinin verdiği bilgilerle yapılıyor olmasıdır.

Bir jeotermal projede sondaj, başlangıçtan son aşamaya kadar ve işletme boyunca kullanılan bir araçtır. Bu tip projelerde sondaj başlangıçta bilgilenme, ardından bilgilenme ve üretim sonrasında bilgilenme, üretilen akışkanı yer altına verme gibi stratejik ve olmazsa olmaz işlevler üstlenir.

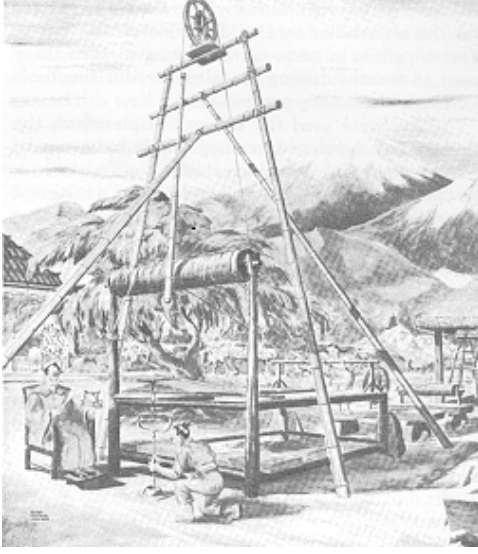
Sondajın temelini anlatımıyla başlanılan bu çalışmada, arada ve özel bir başlıkta jeotermal sondajların özel sorunlarından söz edilmiştir.

Anlatımda; özet bir kitap hazırlama düşüncesiyle, konuların aktarılmasına mümkün olduğunca temel bilgilerden başlanmış ve potansiyel okuyucular mühendis olacağı için formüllere yer verilmiştir, ancak çalışmanın çok boyutlu olacağı kaygısıyla örneklerden kaçınılmıştır.

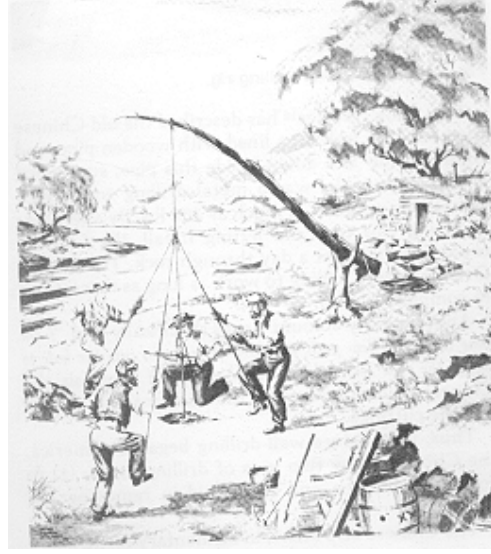
2. SONDAJIN TARİHÇESİ

Antik dönemlerde (birçok kitapta 4000 yıl kadar öce Çin’de yazıyor) günümüzde olduğu gibi içme suyu amaçlı bir çok kuyu kazılıyordu. İnsanlar daha sonra tuz amaçlı tuzlu su kuyuları da kazmaya başladılar.

Bir gezginin anılarına göre Çin’de kazı işlemi şöyle oluyordu. “ Hint kamışından yapılan bir halatla askıya alınmış ve ucunda metal bir başlık olan bambudan yapılmış boru dizisi yukarı kaldırılıp aşağıya vurularak ilerleme sağlanıyordu. En uçtaki metal delme aletinin ağırlığı 130 kg kadardı”. Çin’liler bu yöntemle, kayada 60 cm/gün hızla ilerleyebiliyor ve bir kuyuyu yaklaşık üç yılda bitirebiliyorlardı (Şekil 1) [13].



Şekil 1. Eski Çin sondajı



Şekil 2. Yakın Çağ'da sondaj

Bir başka kaynakta, çalışanların zaman zaman kuyuya birkaç kova su dökerek formasyonu yumuşatmaya çalıştıkları yazılmaktadır. Kırıntıları yukarı çıkartmak için kuyuya kova indiriliyordu.

Çin’liler çamurun iki kullanım amacını biliyorlardı.

- Formasyonu yumuşatmak.
- Kırıntıları yukarı taşımaya yardım.

Çin’liler ayrıca bugün modern sondaj çalışmalarının temelini oluşturan kule, boruları bağlama, çeşitli aletlerin tasarımı ve boru çimentolamasını uygulamışlardır. 19. yy’a kadar elle kazılan göreceli sığ kuyulardan sonra ABD’de ilk kaya sondajı David ve Joseph Ruffner tarafından 1806-1808 yılları arasında, 18 ayda, tuzlu su amacıyla kazılmıştır. Sondaj, eski Çin’lilerin ilkesinden yola çıkılarak, bir keskinin kuyu tabanına hızla vurulmasıyla yapılmıştır ve Ruffner kardeşler ilk çelik delme uçlarını geliştirmişlerdir. Buna benzer sırım yöntemi (Şekil 2) de görülmektedir. Burada, 12-15 m uzunluğunda, bir yanı sabitlenmiş ağaç sırımın ucundan sarkan ipin ucuna sondaj dizisi bağlıdır. Bu ipin üzerinde de çalışanların diziyeye baskı uyguladığı ipler bağlıdır. Bu tip kuleler sonraki elli senede geçerli olmuştur. Sırım genellikle 30° açıyla, bir kenarı sabit dururdu. 19. yy’da ABD endüstrisinin gelişmesiyle sondaj ekipmanları daha da gelişmiş ve 1829’da buhar enerjisi sondaj işlemlerinde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu dönemde sondajlarda petrol bulunması istenmeyen bir olaydı. Sondajcılıkta, sondaj akışkan sektörü açısından 1845 yılına kadar bir ilerleme olmamıştır. Yapılan, kazılan kuyuya su dökmekten ibaretti. 1845 yılında Fransız mühendis Fauvelle, Fransa’da sondaj ekipmanları içinden su akıtarak başarılı bir sondaj yapmış ve bu olay 1846 yılında Amerikan Teknik Bülteninde yayınlanmıştır. Bu ilke günümüzdeki modern kulelerin çamurla düz sirkülasyonlu sondajını andırmaktadır.

Bu olaydan önce Fauvelle 1833'de standart darbeli yöntemle kazılan bir kuyu izlemişti. Bu kuyuda, kazı basınçlı bir akifere girmiş ve kuyu başından su fışkırmaya başlamıştı. Olayı gözleyen Fauvelle dışarı fışkıran suyun formasyon parçacıklarını yukarı taşıdığını görmüş ve kazı sırasında bu durumun istenerek yaratılmasıyla kırıntıların yukarı taşınmasının çok kolay olacağını düşünmüştür.

Fauvelle bir dizi alet dizayn etti. Bunlar; içi boş, uçları vidalı dövme borular, dizinin en altında boru çapından geniş bir parça ve sisteme yukarıdan bağlı bir pompaydı. İlerleme darbe veya dönme hareketiyle sağlanıyordu.

Fauvelle'nin bu yönteminde yalnız su kullanılıyordu. Bu amaçla çamur kullanılması daha düşünülmemişti. Bu arada; motor ve aktarmalardaki gelişmeler, rotary (dönen) sondaj yönteminin darbeli yöntemin yerini almasıyla sondajcılıkta hızlı bir ilerleme yaşanmıştır. Petrolcüler bu yöntemde bazı noktalarda karşı gelmişlerdir. Bunlardan birincisi, su kullanılarak yapılan kazı sırasında petrolün yüzeyden fışkırmasının önlenememesi ve ikincisi, suyun formasyona sızarak suyun formasyondan petrol alınmasını engelleyebilmesiydi. Akademik çevreleri harekete geçiremeyen bu buluşla 1858'de 670 m, 1857'de ters sirkülasyon yöntemiyle sondajlar yapılmıştır. Sonra, benzer ilkelerle Albay Drake tarafından 1859 yılında ilk ticari petrol kuyusu (21 m) gelir. Ardından 1866'da P.S. Weeney'in patentiyle matkap konları döner, burgulu sistem gelir. Burada su borulara swivel yardımıyla veriliyordu ve matkaba baskı burguyla veriliyor, sondaj dizisi elle çevriliyordu.

1859'da Leschot basınçlı suyla ve motorla çevrilen ekipmanla 275 m derinliğinde kömür sondajı yaptı. 1870-80'lerde Fauvelle'in tekniğinin geliştirilmesiyle, Nobel kardeşler tarafından Bakú'de petrol sondajları yapılmıştır. Bu dönemde basınçlı suyla yapılan sondajlarda pompalar devamlı su basmıyorlardı. Her 50-60 cm kadar ilerlemenin ardından sondaj durduruluyor ve pompa çalıştırılarak kırıntılar dışarı atılıyordu.

Bu arada; motor ve aktarmalardaki gelişmeler, rotary (dönen) sondaj yönteminin darbeli yöntemin yerini almasıyla sondajcılıkta hızlı bir ilerleme yaşanmıştır (1882).

1880'lerde sondajcılar sirkülasyon sıvısı olarak çamurun değerinin farkına vardılar. 1887'de M. T. Chapman "plastik bir malzemeye ve bol suyla" sondaj yapılırken kuyu duvarlarında geçirimsiz bir ince duvarın oluştuğunu söylemiştir. 1889'da B. Andrews aynı konudan söz etmiş ve L. Buckingham'ın aldığı bir patentle sondajlarda sirkülasyon sıvısı olarak su yerine çamur kullanımı belgelenmiştir. Buckingham petrol bazlı çamurun kullanılabilirliğinden de söz etmiştir. Bunlar modern çamur mühendisliğinin başlangıcı olmuştur. Önce yalnız bir fonksiyonu olan sıvı (su) düşünülüyordu. Sonra, formasyonda karşılaşılan çatlaklardan dolayı sirkülasyon kaybını önlemek amacıyla suya kil, kepek, çimento, hububat unu vb. maddelerin katılması gündeme gelmiştir.

1890 yılında Hamill kardeşlerin yaptığı sondaj bataklık kumlarına girdi. Sondajcılar yakındaki sığır sürüsünün artıklarını suya karıştırarak sondaja devam edebilmişlerdir. Bu sondajda balık kuyruğu matkapla ilerleme yapılıyordu ve sonuçta 100 000 varil/gün debide petrol püskürmesi olmuştur. 1918'de Del Rey Oil Company çamuru ağırlaştırmak için 4.5 ton demir tozu kullandı. (Bundan iki sene önce 1648 m ile o zamana kadarki en derin sondaj yapılmıştı). 1926 yılında B. K. Stroud çamur ağırlaştırma elemanı olarak Baryum sülfat, demir oksit, kurşun oksit vb. kullanımının patentini aldı. Çamurda filtrasyon kavramından ilk defa Amerikan Maden Bürosu tarafından 1916 yılında yayınlanan bir makalede söz edilmiştir. Çamur teknolojisinin gelişmesi 1930'larda hızlandı. Yaklaşık 1940'larda çamur testi gündeme geldi.

Günümüzde sondajlarda sirkülasyon akışkanı olarak hava, su, petrol, sentetik bazlı sıvılar ve bunların karışımları, çeşitli kil mineralleri ve kimyasallarla bunların karışımları kullanılmaktadır. Sondaj işlemleri mekanik olarak metalürjinin gelişmesi, matkapların gelişmesiyle çok ilerlemiş hatta mekanik delmeden lazer enerjisiyle sondaja yönelik çalışmalar devam etmektedir.

3. SONDAJ MAKİNESİ VE EKİPMANLAR

Klasik bir jeotermal rotary sondaj makinesi ve yardımcı ekipmanları Şekil 3' de görülmektedir.



Burada ana parçalar;

a) Kule

- Drawworks
- Vinç sistemi
- Motorlar

b) Çamur sistemi

- Pompa
- Havalı çalışılacaksa kompresör, vb.
- Çamur hattı
- Çamur soğutma sistemi
- Katı madde ayırıcılar
- Su tankları

c) Sondaj sistemi

- Kelly
- Drill pipe
- Drill collar
- Matkap
- Tahlisiye (fishing) ekipmanları

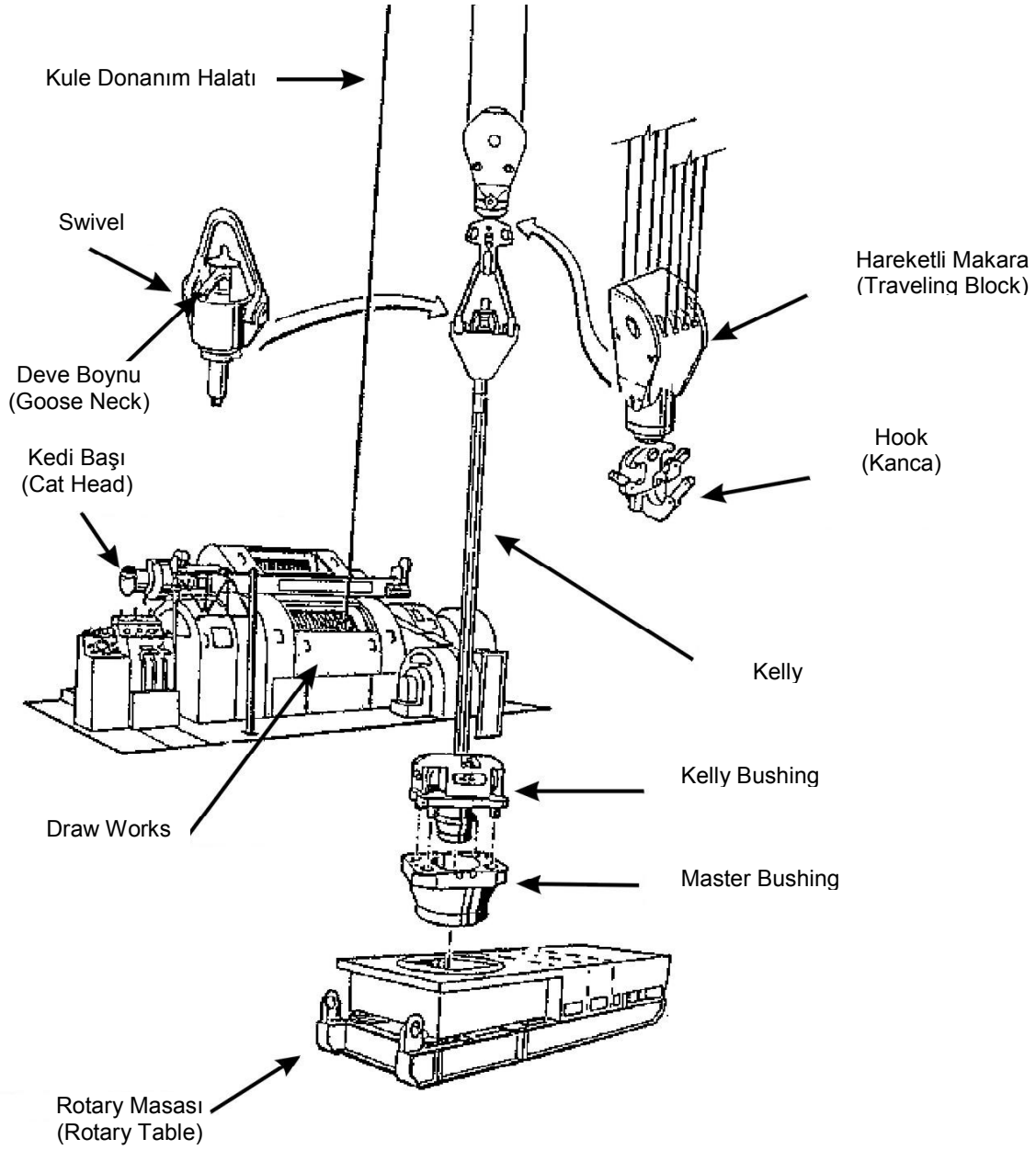
d) Kuyubaşı vana ve yardımcı ekipmanları

Şekil 3. Derin sondaj makinesi.

Sondaj lokasyonu hazırlanırken kuyu yerinde, kuyu başının içinde yer alacağı cellar çukuru denilen prizmatik bir boşluk oluşturulur. Bu boşluğun derinliği, kuyu başı ana vanasının alt flanşının yer yüzüne gelecek, ve genişliği içinde çalışmaya olanak verecek boyutlarda seçilmelidir.

Sondaj kulesi alışılmış (klasik) veya hareketli, bindirilmiş (mobil) olabilir. Klasik sondaj makinesinin kule parçaları lokasyona getirilir ve yerinde monte edilir. Belli bir zaman kaybına neden olan bu tip kuleler eski tiptir. Günümüzde modern makineler treylere bindirilmiş olarak hızla, bir çekici yardımıyla sondaj yerine getirilmekte ve az bir zaman harcanmasıyla kule sondaja hazır hale getirilebilmektedir. Hangi tip olursa olsun kule kurulduktan sonra teraziye alınır. Sondaj makinesinin kule yapısı sondaj ve boru dizisini statik ve hareketli olarak taşıyabilecek ve aynı zamanda belli bir rüzgar gücüne de dayanabilecek sağlamlıkta olmalıdır. Kulenin yüksekliği arttıkça bir defada alabileceği boru uzunluğu artar, dolayısıyla sondaj işlemi daha hızlı olur. Yaklaşık kapasitesi 2500 m olan bir makinenin kule yüksekliği 30 m kadardır.

Sondaj makinesinin boru dizisini taşıması, halatlı vinç sistemiyle sağlanmaktadır. Vinç sisteminde halatı çeken düzeneğin bulunduğu yapıya draw works denir. Draw works tambur, frenler, aktarmalar ve kedi başları gibi ana parçalardan oluşur (Şekil 4).



Şekil 4. Rotary sondaj makinesinin ana parçaları.

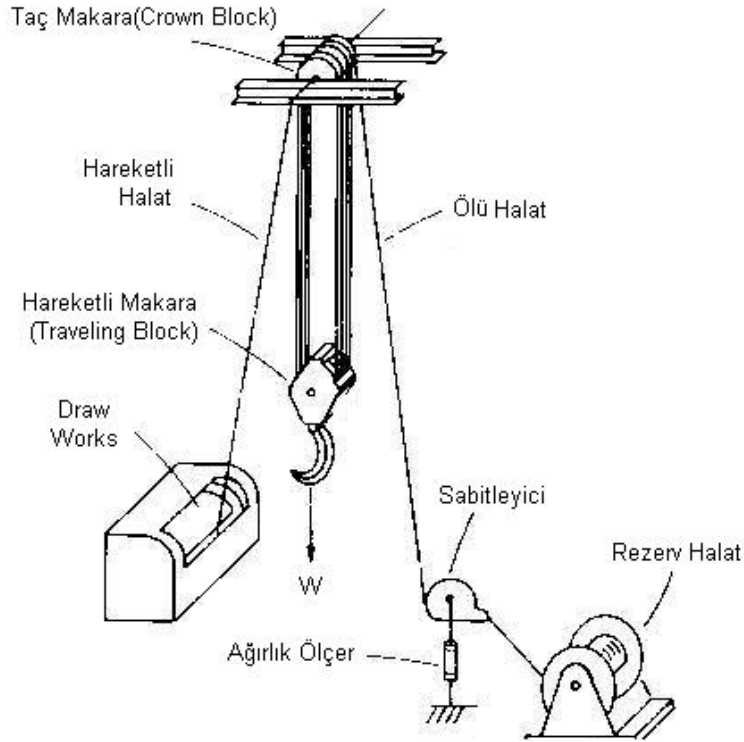
Tamburun çapı inilebilecek derinlikle doğru orantılıdır. Daha derinlere sondaj yapabilecek donanımlarda tambur çapı daha büyüktür. Bu büyüklük yaklaşık olarak, 1000-1500 m lik kapasite için 50 cm, 4000-6000 m lik kapasite için 80 cm dir. Tamburun çapı manevra sırasında üzerine sarılacak halatı alabilecek kadar olmalıdır. Halat tambur üzerine sarılırken sarımların düzgün ve yan yana gelerek birbirlerini yaralamamalarına özen gösterilir.

Ayrıca draw worksta boruların sıkılıp açılmasını sağlayan tong anahtarlarını çeken kedibaşları (cathead) bulunur. Borular hidrolik veya havayla çalışan otomatik tong anahtarlarıyla da sıkılıp açılabilir.

Tambur ağır takım dizisini yukarı çekmenin yanında aşağıya da indirecektir. Yani tamburun frenlemesi de güçlü olmalıdır. Bu frenleme klasik balatalı sistemle sağlanır. Yardımcı olarak özellikle büyük makinelerde yardımcı fren de vardır. Bunlar hidrodinamik veya elektromanyetik tipte olurlar. Draw workslar mekanik, hidrolik veya elektrikli olabilirler. Tambur çekme kapasitesi vites küçültülerek (devir

sayısını çeşitli oranlardaki dişli kutusu aracılığıyla arttırarak) ve/veya halat üzerinde palanga sistemi kullanılarak arttırılabilir.

Makaralar: Sondaj makinelerinde sondaj dizisini ve bunu taşıyan çelik halatı taşıyan, yönlendiren ve tamburun çekme kapasitesini arttırmak için kullanılan makaraları bünyesinde toplayan iki adet blok vardır. Makaraların sayısının artmasıyla tamburun yani kulenin çekme kapasitesi artacak fakat hız azalacaktır. Kulenin tepesinde bulunan ve hareketsiz olan makara bloğuna taç makara (crown block) denir. Crown bloğun içerdiği kadar makara içeren ve ucunda kanca (hook) bulunan hareketli makara (traveling block) palanga sisteminin diğer bileşenidir. Halat bu iki blok arasında sarılıdır ve bir ucu ile draw works tamburuna diğer ucu ile rezerv halat tamburuna bağlıdır. Halat, rezerv tamburundan önce kancaya binen yükü ölçmeye yarayan düzenekten geçer (Şekil 5).



Şekil 5. Sondaj makinesinin şematik görünümü

Tambur, halatı üzerine sarmak için döndüğünde hareketli makara dolayısıyla kanca ve ona takılı olan dizi yukarı çıkacaktır veya aşağıya doğru hareket edecektir.

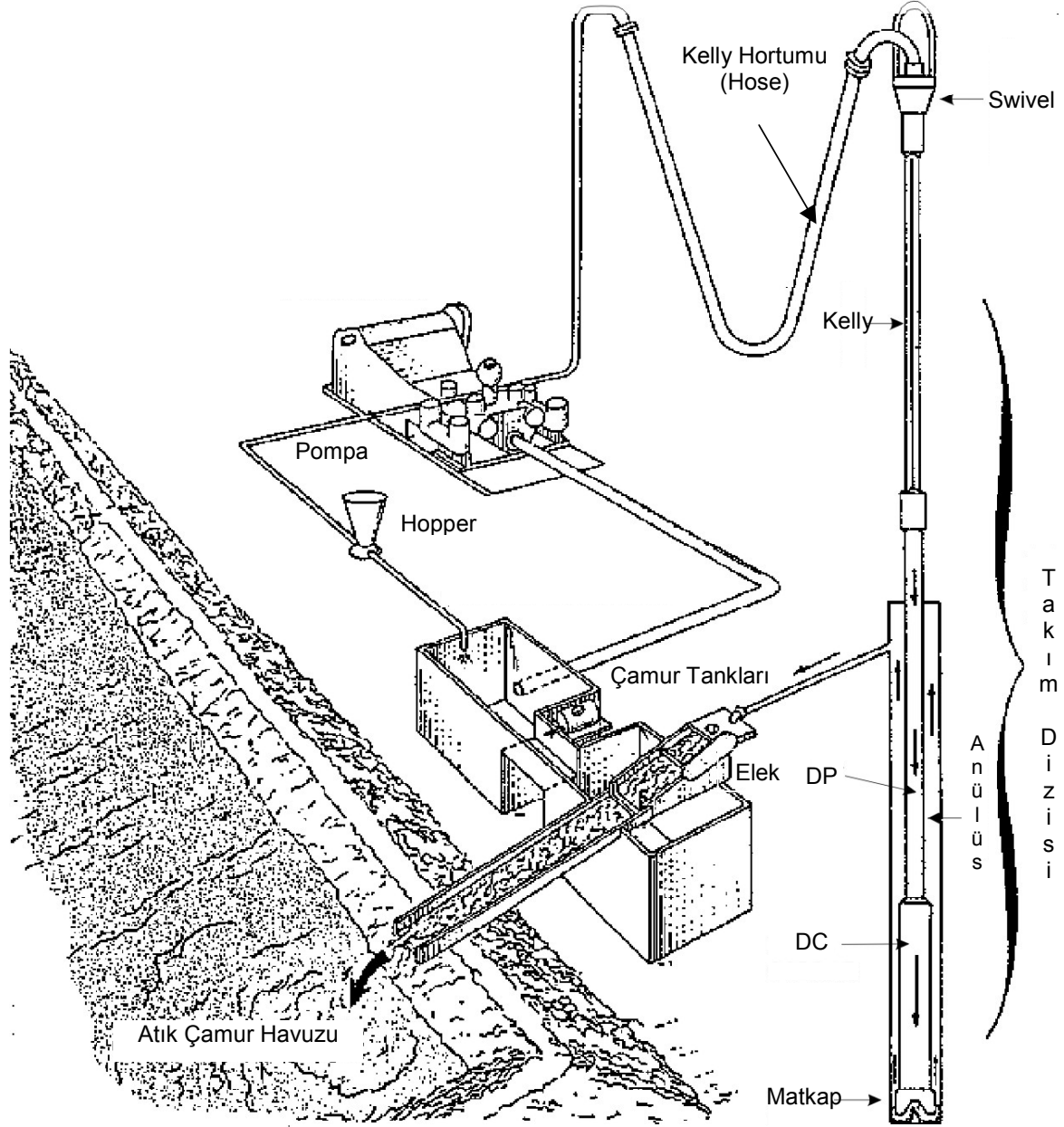
Makaralar arasında sarılı olan çelik halat kule yapımcısı tarafından belirlenen çap ve özellikte olmalıdır. Halatın, yükte çalışması nedeniyle zarar görerek kopması sonucu bir kaza olmaması ve halatı ekonomik kullanmak için zaman zaman kaydırmak gerekir. Yani belli bir dönem çalışan halat, rezerv tanktan kaydırılarak sisteme yorulmamış halat katılmasıyla tazelenir ve halatın aynı noktalarının ezilmesi önlenir.

Akışkanla sirkülasyonun birinci fonksiyonu, sondaj sırasında kırıntıları kuyudan uzaklaştırmaktır. Sirkülas-yon akışkanına sondajın kanı diyebiliriz. Şekil 6 da şematik bir sondaj sirkülasyon sistemi görülmektedir. Sondaj sıvısı olarak genelde su içinde kil ve diğer maddelerin süspansiyonları kullanıldığından, bu akışkana genel olarak sondaj çamuru adı verilir.

Sondaj çamuru; tanklardan pompaya ve buradan da yüksek basınçlı yüzey bağlantıları aracılığıyla sondaj dizisine ve matkaba, buradan da sondaj dizisiyle kazılan kuyu arasındaki boşluktan (anülüs)

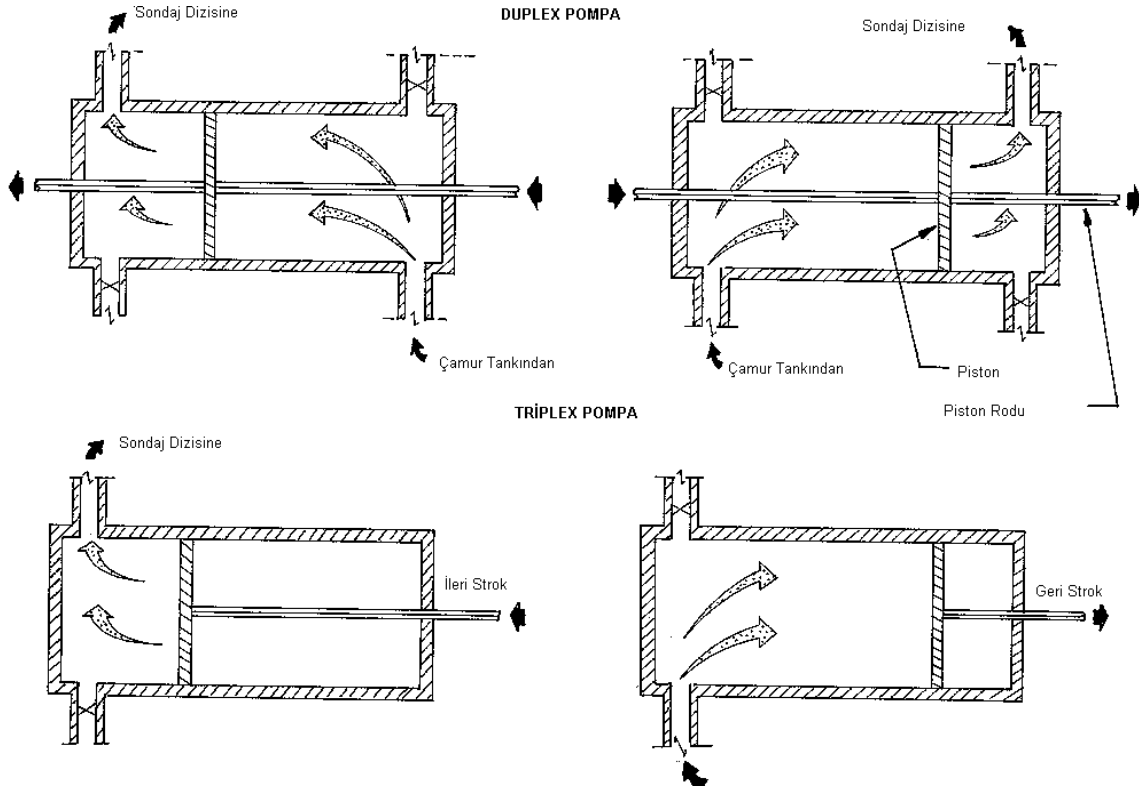
yüze gelir. Yüze gelen çamur bünyesindeki kırıntı v.b. maddeleri çeşitli ekipmanlar yardımıyla bırakarak tekrar başa, pompa tarafından emilmek üzere emme tankına gider.

Sondaj sirkülasyon sisteminin birincil bileşenleri; pompalar, tanklar, çamur hazırlama ve karıştırma ekipmanları ve çamur temizleyici donanımlardır.



Şekil 6. Sondaj sirkülasyon sistemi

Sondaj sektöründe kullanılan çamur pompaları pistonlu tip pompalardır. Bu pompalar genelde iki (duplex) ve üç (triplex) silindirli olurlar. Duplex pompalar olarak iki etkili, triplex pompalar ise tek etkili olurlar (Şekil 7). Genelde kulelerde iki adet sirkülasyon pompası bulunur. Daha çok debinin gerektiği geniş kuyuların kazılmasında (kuyuların başlangıcı) iki pompa paralel olarak çalıştırılır. Kuyu derinleştikçe sondaj tek pompayla yapılır, diğer pompa yedekte bekletilir.



Şekil 7. Çamur pompası tipleri

Çamur tankları; çamurun hazırlanması, depolanması ve sirkülasyonda pompanın çamuru emmesini sağlar. Kuyudan çıkan çamurun içindeki kırıntılar ve varsa gaz; elek, kum ayırıcı, silt ayırıcı, santrifüj ve gaz ayırıcılar yardımıyla temizlenir. Kuyudan çıkan sıcak çamurun pompa emmeden soğutulması amacıyla, gerekiyorsa soğutma kulesi de kullanılır.

Sirkülasyon akışkanı olarak hava kullanılması durumunda normal diziyile sondaj yapılabileceği gibi kuyu dibi tabancası da kullanılabilir.

Dönerek yapılan klasik sondajın ana parçaları Şekil 4 ve Şekil 6'da görülmektedir. Bunlar; swivel, kelly, rotary masası, drill pipe ve drill collardır.

Swivel, sondaj dizisi dönerken içinden basınçlı sirkülasyon akışkanının geçmesine izin verir ve dizinin tüm ağırlığını taşır. Swivel kanca aracılığıyla hareketli makaraya ve deve boynuyla (gooseneck) da hortum (rotary hose) aracılığıyla pompa hattına bağlıdır. Swiveller taşıma kapasiteleriyle anılırlar. Kelly; swivelin altındaki boruların ilk bölümünü oluşturur. Kellylerin kesitlerinin dış görünüşü kare veya altıgen olabilir. Görevi, rotary masası tarafından verilen dönme momentini diziye iletmektir. Tork, rotary masasından master bushing ve içindeki kelly bushing aracılığıyla kelye iletilir. Kellynin düzgün olması çok önemlidir. Biraz eğik olması bile büyük zararlara neden olabilir. Rotary masasının orta açıklığı kuyuda kullanılacak en büyük matkabın geçebileceği çapta olmalıdır. Rotary bushing'in içi, sondaj sırasında DP ve DC leri söküp takarken boruların düşmemesi için kullanılan slipleri taşıyabilecek formda olmalıdır. Rotary masasının güç kaynağına bağlantısı mekanik olabileceği gibi hidrolik de olabilir. Konvansiyonel swiveller yerine hidrolik motorla çalışan power swivel veya power sublar kullanılmasıyla kelly, kelly bushing ve rotary masası ortadan kalkmaktadır.

Kellynin altında, sondaj dizisinin ana parçasını oluşturan drill pipelar yer alır. DP lerin görevi; sondaj akışkanını matkaba iletmek ve takımı askıda tutmaktır. DP ler çelik çekme borulardır ve dış çapları, birim uzunluğunun ağırlığı (dolayısıyla borunun et kalınlığı), çelik derecesi ve uzunluk sınıfıyla anılırlar. DP ler için API standartları Tablo 1 de, uzunluk sınıfları tablonun altında görülmektedir.

Tablo 1. DP ler için API Standartları

Dış Çap (İnç)	Bağlantılı Ağırlık (Lb/ft)	Grade	İç Çap (İnç)	Çökme Dayanımı (psi)	İç Yield Basıncı (psi)	Boru Gövdesi Yield Yüğü (lb)
2 3/8 (60,33 mm)	4,85	D	1,995	6850	7110	70000
	6,65	D	1,815	11440	11350	101360
	4,85	E	1,995	11040	10500	97820
	6,65	E	1,815	15600	15470	138220
	6,65	X	1,815	19760	19600	175080
	4,85	G	1,995	13250	14700	137000
	6,65	G	1,815	21840	21660	193500
	4,85	S	1,995	16560	18900	176000
	6,65	S	1,815	28080	27850	248790
2 7/8 (73,03 mm)	10,40	D	2,151	12110	12120	157180
	6,85	E	2,441	10470	9910	135900
	10,40	E	2,151	16510	16530	214340
	10,40	X	2,151	20910	20930	271500
	6,85	G	2,441	12560	13870	190000
	10,40	G	2,151	23110	23140	300080
	6,85	S	2,441	15700	17830	245000
10,40	S	2,151	29720	29750	385820	
3 1/2 (88,90 mm)	13,30	D	2,764	10350	10120	199150
	15,50	D	2,602	12300	12350	236700
	9,45	E	2,992	10040	9520	194260
	13,30	E	2,764	14110	13800	271570
	15,50	E	2,602	16770	16840	322780
	13,30	X	2,764	17880	17480	343990
	15,50	X	2,602	21250	21330	408850
	9,50	G	2,992	12110	13340	272000
	13,30	G	2,764	19760	19320	380190
	15,50	G	2,602	23480	23570	451890
	9,50	S	2,992	15140	17140	350000
	13,30	S	2,764	25400	24840	488820
	15,50	S	2,602	30190	30310	581000
4,000 (101,60 mm)	14,00	D	3,340	8330	7940	209260
	11,85	E	3,476	8410	8600	230750
	14,00	E	3,340	11350	10830	285360
	14,00	X	3,340	14380	13720	361460
	11,85	G	3,476	10310	12040	323000
	14,00	G	3,340	15900	15160	399500
	11,85	S	3,476	12820	15470	415000
	14,00	S	3,340	20170	19490	513680
4 1/2 (114,30 mm)	16,60	D	3,826	7620,00	7210	242410
	20,00	D	3,640	9510,00	9200	302400
	13,75	E	3,958	7200,00	7900	270040
	16,60	E	3,826	10390,00	9830	330560
	20,00	E	3,640	12960	12540	412360
	16,60	X	3,826	12750	12450	418700
	20,00	X	3,640	16420	15890	522320

	13,75	G	3,958	8920	11070	378000
	16,60	G	3,826	13820	13760	462780
	20,00	G	3,640	18150	17560	577300
	13,75	S	3,958	10910	14230	486000
	16,60	S	3,826	16800	17690	595000
	20,00	S	3,640	23330	22580	742240
5,000 (127,00 mm)	19,50	D	4,276	7390	6970	290100
	16,25	E	4,408	6970	7770	328070
	19,50	E	4,276	10000	9500	395600
	16,25	X	4,408	8090	9840	415560
	19,50	X	4,276	12010	12040	501090
	25,60	X	4,000	17100	16620	671520
	16,25	G	4,408	8610	10880	459300
	19,50	G	4,276	12990	13300	553830
	25,60	G	4,000	18900	18380	742200
	16,25	S	4,408	9860	13990	590530
	19,50	S	4,276	15700	17100	712070
	25,60	S	4,000	24300	23630	954260
5,500 (139,70 mm)	21,90	D	4,778	6610	6320	320550
	24,70	D	4,670	7670	7260	364630
	21,90	E	4,778	8440	8610	437120
	24,70	E	4,670	10460	9900	497220
	21,90	X	4,778	10000	10910	553680
	24,70	X	4,670	12920	12540	629810
	21,90	G	4,778	10740	12060	611960
	24,70	G	4,670	14000	13860	696110
	21,90	S	4,778	12710	15510	786810
	24,70	S	4,670	17050	17830	895000
5,562 (141,28 mm)	19,00	D	4,975	4580	5090	267000
	22,20	D	4,859	5480	6090	317000
	25,25	D	4,733	6730	7180	369000
	19,00	E	4,975	5640	6950	365000
	22,20	E	4,859	6740	8300	432000
	25,25	E	4,733	8290	9790	503000
6,625 (168,28 mm)	22,20	D	6,065	3260	4160	307000
	25,20	D	5,965	4010	4790	358940
	31,90	D	5,761	5020	6275	463000
	22,20	E	6,065	4020	5530	418000
	25,20	E	5,965	4810	6540	489460
	25,20	G	5,965	6160	9150	685000
	25,20	S	5,965	6430	11770	881000

Sınıf Uzunluk (ft)

- | | |
|---|--|
| 1 | 18-22 |
| 2 | 27-30 |
| 3 | 38-45 Genellikle sınıf 2 DP' ler kullanılır. |

DP ler ve diğer elemanlar birbirleriyle bağlantılarla bağlanırlar. Bağlantının dişi ucu box, erkek ucu pin olarak adlandırılır. Tablo 2 de API Standartlarına göre bağlantılar ve karşılıkları verilmektedir.

Tablo 2 . API bağlantı karşılık tablosu

Genel İsim Stil	Çap	Erkek Uç Taban Çapı (Konik)	İnçteki Diş Sayısı	Koniklik (lb/ft)	Diş Formu	Eşdeğeri
Internal Flush (I.F.)	2 3/8	2.876	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	2 7/8" Slim Hole N.C. 26 ¹
	2 7/8	3.391	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	3 1/2" Slim Hole N.C. 31 ¹
	3 1/2	4.016	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4 1/2" Slim Hole N.C. 38 ¹
	4	4.834	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4 1/2" Slim Hole N.C. 46 ¹
	4 1/2	5.250	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	5" Extra Hole N.C. 50 ¹
Full Hole (F.H.) Extra Hole (X.H.) (E.H.)	4	4.280	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	5 1/2" Double Streamline 4 1/2" Double Streamline N.C. 40 ¹
	2 7/8	3.327	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	3 1/2" Double Streamline
	3 1/2	3.812	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4" Slim Hole
	4 1/2	4.834	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4 1/2" External Flush 4" Internal Flush N.C. 46 ¹
	5	5.250	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4 1/2" Internal Flush N.C. 50 ¹
Slim Hole (S.H.)	2 7/8	2.876	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	2 3/8" Internal Flush N.C.26 ¹
	3 1/2	3.391	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	2 7/8" Internal Flush N.C.31 ¹
	4	3.812	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	3 1/2" Extra Hole 4 1/2" External Flush
	4 1/2	4.016	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	3 1/2" Internal Flush N.C.38 ¹
Double Streamline(DSL)	3 1/2	3.327	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	2 7/8" Extra Hole
	4 1/2	4.280	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4" Full Hole N.C. 40 ¹
	5 1/2	5.250	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4 1/2" Internal Flush N.C. 50 ¹
Numbered Connection(N.C.)	26	2.876	4	2	(V-0.038 rad)	2 3/8" Internal Flush 2 7/8" Slim Hole
	31	3.391	4	2	(V-0.038 rad)	2 7/8" Internal Flush 3 1/2" Slim Hole
	38	4.016	4	2	(V-0.038 rad)	3 1/2" Internal Flush 4 1/2" Slim Hole
	40	4.280	4	2	(V-0.038 rad)	4" Full Hole
	46	4.834	4	2	(V-0.038 rad)	4 1/2" Double Streamline 4" Internal Flush 4 1/2" Extra Hole
	50	5.250	4	2	(V-0.038 rad)	4 1/2" Internal Flush 5" Extra Hole
External Flush(E.F.)	4 1/2"	3.812	4	2	V-0.065 (V-0.038 rad)	4" Slim Hole 3 1/2" Extra Hole

¹ Numbered Connections (N.C.) Yalnız V-0.038 radius diş formunda açılır.

Sondaj dizisinin alt bölümü DC lerden oluşur. Şekil 8 de düz ve spiral DC'ler görülmektedir. DC ler, DP lerden daha çok et kalınlığına sahiptirler ve matkabın üzerine baskı vermeye yarayan ağır borulardır. DC ler, DP lere oranla kazılan kuyu arasındaki boşlukları (DC ler DP lerden daha geniş çaplıdır) ve eğilmeye karşı eğilimleri daha az olduğundan, delinen kuyunun düzgünlüğünü de sağlarlar. Tablo 3'de API Standartlarında DC ağırlıkları görülebilir.

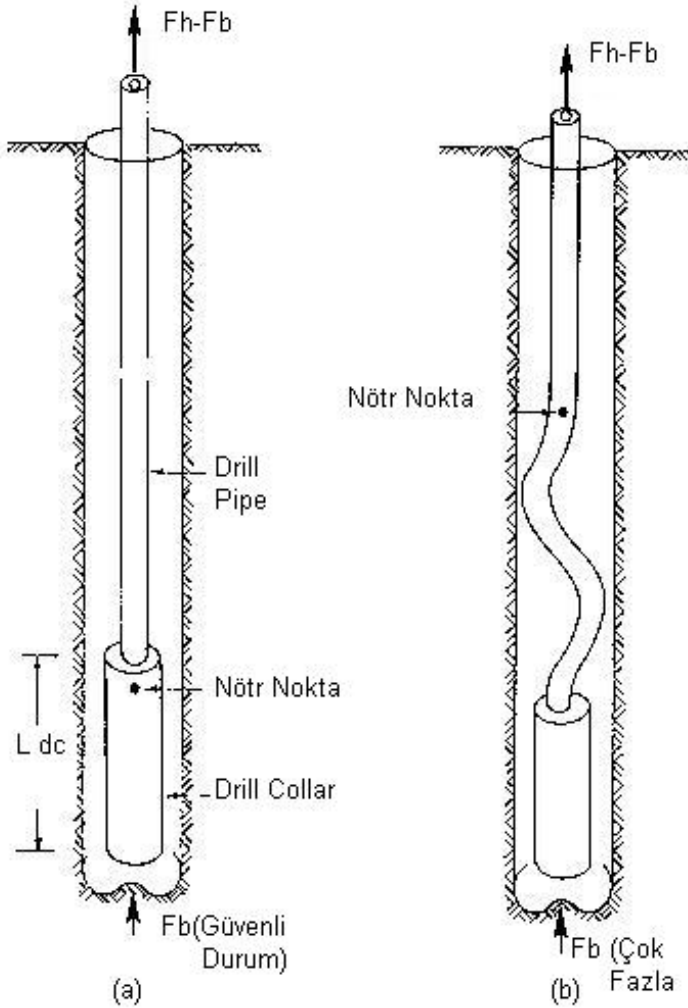


Şekil 8. Düz ve spiral DC

Tablo 3 . API Drill Collar ağırlıkları (lb/ft)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
DC Dış Çapı (inç)	DC İç Çapı (inç)												
	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2	2 1/4	2 1/2	2 3/4	3	3 1/4	3 1/2	3 3/4	4
2 7/8	19	18	16										
3	21	20	18										
3 1/8	22	22	20										
3 1/4	26	24	22										
3 1/2	30	29	27										
3 3/4	35	33	32										
4	40	39	37	35	32	29							
4 1/8	43	41	39	37	35	32							
4 1/4	46	44	42	40	38	35							
4 1/2	51	50	48	46	43	41							
4 3/4			54	52	50	47	44						
5			61	59	56	53	50						
5 1/4			68	65	63	60	57						
5 1/2			75	73	70	67	64	60					
5 3/4			82	80	78	75	72	67	64	60			
6			90	88	85	83	79	75	72	68			
6 1/4			98	96	94	91	88	83	80	76	72		
6 1/2			107	105	102	99	96	91	89	85	80		
6 3/4			116	114	111	108	105	100	98	93	89		
7			125	123	120	117	114	110	107	103	98	93	84
7 1/4			134	132	130	127	124	119	116	112	108	103	93
7 1/2			144	142	139	137	133	129	126	122	117	113	102
7 3/4			154	152	150	147	144	139	136	132	128	123	112
8			165	163	160	157	154	150	147	143	138	133	122
8 1/4			176	174	171	168	165	160	158	154	149	144	133
5 1/2			187	185	182	179	176	172	169	165	160	155	150
9			210	208	206	203	200	195	192	188	184	179	174
9 1/2			234	232	230	227	224	220	216	212	209	206	198
9 3/4			248	245	243	240	237	232	229	225	221	216	211
10			261	259	257	254	251	246	243	239	235	230	225
11			317	315	313	310	307	302	299	295	291	286	281
12			379	377	374	371	368	364	361	357	352	347	342

Sondaj işlemine geçilince, matkabin üzerine belli bir ağırlık verilmesi gerekecektir. Verilen bu ağırlık nedeniyle sondaj dizisinde **nötr nokta (neutral point)** denilen bir zon oluşur. Bu zonu altındaki takım dizisinde bükülme oluşabilir. DC lerin et kalınlığı fazla olduğundan, bu noktanın DC ler üzerinde bulunması, DP lerin üzerine taşınmaması gerekir (Şekil 9). Eğer sondaj sırasında nötr nokta DP lerin üzerinde olursa, DP ler yorulmadan dolayı erkenden kopabilir ve bükülen DP ler nedeniyle kuyu zarar görebilir. Özet olarak; sondajda matkabin üzerine verilecek ağırlık, DC lerin çamur içindeki ağırlığını geçmemelidir. Pratikte sondajda, DC lerin çamur içindeki toplam ağırlığının 0.75 i matkap üzerine verilir.



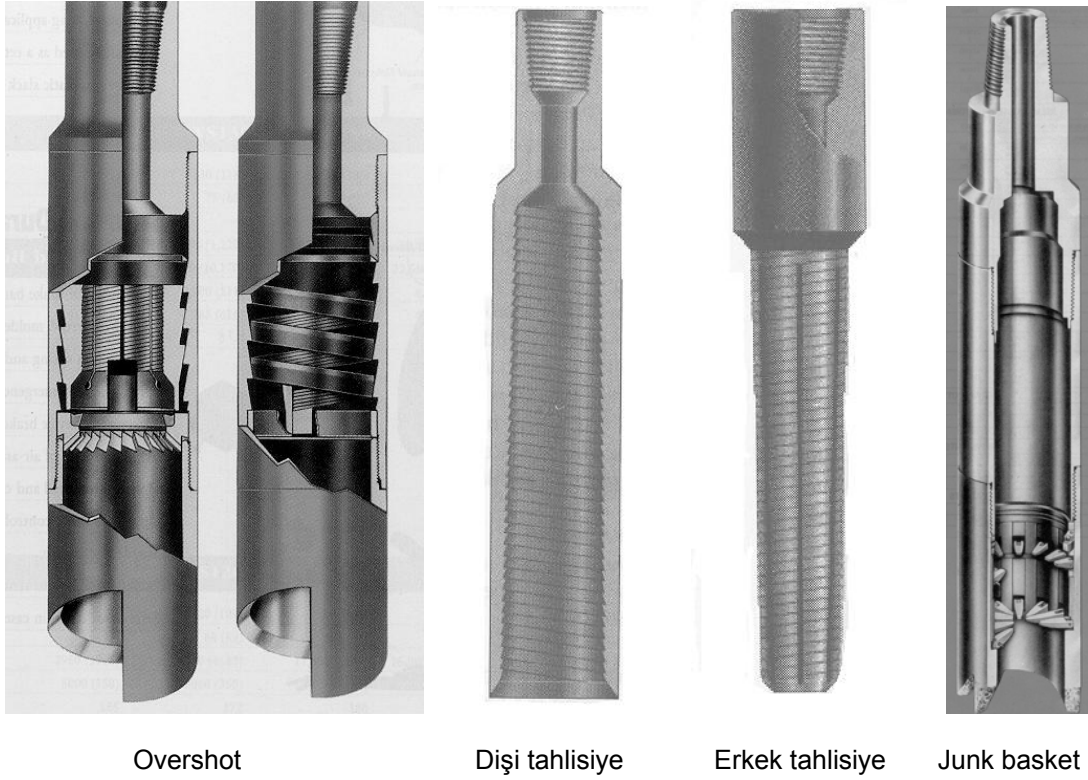
Şekil 9. Sondaj dizisinde nötr nokta

Şekil 10. Stabilizer ve reamer

DC lerin arasına ve matkabin üzerine stabilizerler ve reamerlar (Şekil 10) konularak kuyunun daha sapmasız ve istenen çapta delinmesi sağlanır.

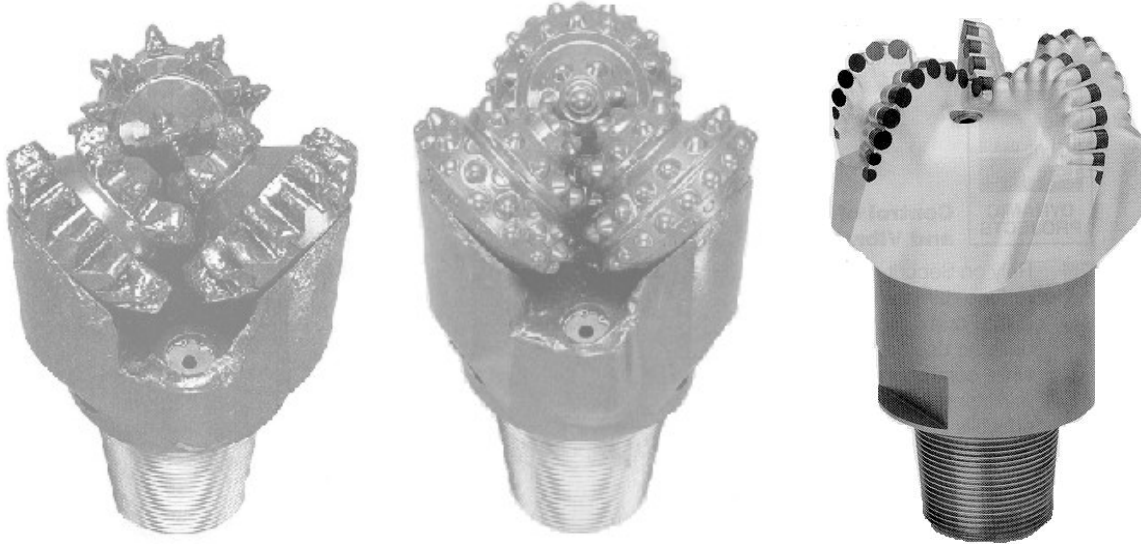
Tahliyeler: Sondaj işlemi sırasında takımın kopmasıyla veya sıkışmasıyla sondaj dizisinin tümü veya bir kısmı kuyuda kalabilir. Bunun sonucunda eldeki sondaj ekipmanları yok olacağı veya zarar görebileceği gibi kazılan kuyu da kaybedilebilir. Ayrıca kuyuda takım yokken kuyuya malzeme düşebilir. Bu gibi durumlarda çeşitli özel ekipman ve yöntemlerle kuyudaki takım ve parçalar kurtarılır. Bu işleme **tahliye (fishing)** denilir. Tahliye işlemleri uzmanlık, soğukkanlılık isteyen operasyonlardır. Şekil 11 de pek çok çeşidi bulunan tahliye ekipmanlarından bazıları görülmektedir.

Erkek ve dişi tahliyeler kuyuda kalan boru malzemelere içten ve dıştan diş açarlar ve aşağıdaki takım çekilerek kurtarılmaya çalışılır. Over shot ile kuyudaki takım dışarıdan tutulup istenildiğinde çözülebilir. Junk basketle kuyuda kalan matkap parçaları vb. malzeme çıkartılır.



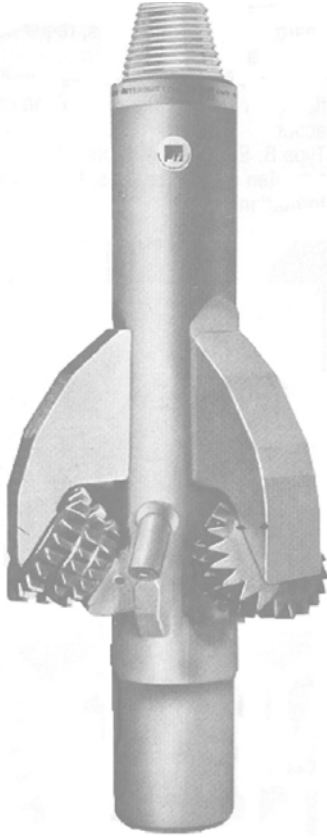
Şekil 11. Bazı tahlisiye çeşitleri

Matkaplar: Sondaj Dizisinin ucunda yer alırlar. Takım dizisiyle birlikte dönerek veya darbeli dönerek formasyonu kırıp parçalayarak ilerlemeyi sağlarlar. Pek çok tipte matkap vardır (Şekil 12).



Şekil 12. Bazı Matkap Çeşitleri

Özellikle kuyunun üst kesimlerinde, büyük çapta kuyu açılması gereken bölgelerde istenen çapta kuyu matkapla delinmez. Önce pilot çaptaki kuyu matkapla delinir (örneğin 12 1/4"), sonra kuyu istenen çapa hole opener ile genişletilir (örneğin 17 1/2"). Şekil 13 de bir hole opener görülmektedir.



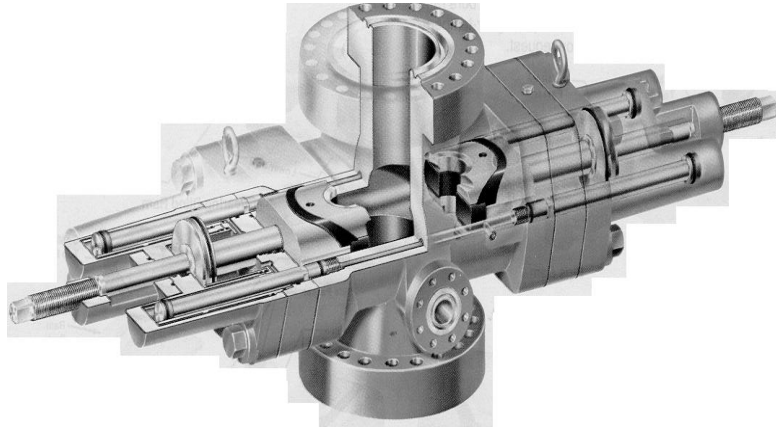
Şekil 13. Hole opener

ram preventer üst üste kullanılmalıdır. Kuyuda boru olmadığı zaman, kuyunun kapatılabilmesi için kör ramli preventer kullanılır. Özel durumlarda, kuyuda sondaj dizisi varken, boruları keserek kuyuyu kapatabilen tipte ramlere sahip preventerler de vardır. Ram preventerler 2000, 5000, 10000 ve 15000 psig çalışma basıncında kullanılabilir özellikte olabilirler.

Kuyu kontrol sistemi: Kuyu kontrol sistemiyle formasyon akışkanlarının kuyudan kontrolsüz olarak akmasını engeller. Sondaj akışkanı, özgül ağırlığına ve kuyunun derinliğine bağlı olarak hidrostatik basınç uygular. Sondaj sırasında matkap, çamurun o derinlikte uyguladığı hidrostatik basıncı aşan basınçta formasyon akışkanı içeren bir rezervuara girince, formasyondan kuyuya doğru giriş başlar ve kuyu başından da sirkülasyon akışkanı gelmeye başlar. Eğer bu geliş uygun prosedürle önlenmezse, formasyon akışkanı kuyubaşından kontrolsüzce gelmeye başlar. Buna blowout diyoruz. Bu, sondaj sırasında karşılaşılabilecek en kötü durumdur. Blowoutlar can, ekipman, kuyu ve rezervuardaki akışkanın kaybına neden olurlar. Bundan dolayı kuyu kontrol sistemi kulelerin en önemli sistemlerinden birisidir.

Kuyudan gelen akışkanı engellemek için blowout preventer (BOP) denilen özel ekipmanlar kullanılır. BOP ler bütün sondaj koşullarında kuyudan gelebilecek akışı durdurabilecek kapasitede olmalıdır. Sondaj dizisi kuyudayken, kuyudan gelişi durdurarak diziyi hareket ettirebilmeyi de sağlayabilmelidir. Ek olarak BOP ler, kuyu anülüsü basınç altındayken sirkülasyona izin verebilmelidir. Bu durumlar genellikle çeşitli ram (dilli) preventerler ve bir adet annular preventer topluluğuyla sağlanır.

Şekil 14 de bir ram preventer görülmektedir. Ram preventerler karşılıklı olarak, birbirlerine doğru hareket ederek kapanan iki adet dilden oluşur. Pipe ramlerin her biri ortalarında yarım daire şeklinde bir boşluğa sahip olduklarından, kapatıldıklarında, uygun çaptaki boruyu sıkıştırarak kuyu anülüsünü kapatırlar. Sondaj dizisinde birden fazla çapta boru varsa, bunların sayısı kadar değişik boru tipi



Şekil 14. Ram tipi preventer.

Annular preventerler, halka biçiminde sentetik lastik kullanılarak anülüsteki akış yolunu kaparlar. Pek çok annular preventerler, eğer istenirse tam açık kuyuyu da kapatabilir. Annular preventerlerin 2000, 5000 ve 10000 psig çalışma basıncında çalışan tipleri vardır.

Dizi kuyudayken BOP'lerin kullanılmasıyla yalnız anülüsteki geliş önlenir. Dizinin içinden geliş kelly cock ve iç blowout preventerler yardımıyla önlenir.

4. SONDAJ AKIŞKANLARI

4.1. Sondaj Akışkanlarının Görevleri

- Matkabı ve Sondaj Dizisini Yağlamak ve Soğutmak: Kazı sırasında matkap ve sondaj dizisinin sürtünme ve çarpmasından dolayı ısı enerjisi oluşur. Bu ısının bir kısmı formasyon tarafından alınır. Gerisi çelik, elmas, tungsten karbit vb. malzemelerden oluşan sondaj ekipmanının zarar görmesini önlemek amacıyla çamur tarafından alınır.

Sondaj akışkanları, yatakları kapalı olan tipler dışındaki konlu döner matkapların yataklarını da yağlar. Günümüzde sondaj çamurlarında özellikle yönlü sondajlardaki sürtünmeden dolayı oluşan zararları en aza indirmek amacıyla yağlayıcı katkı malzemeleri katılmaktadır.

- Kuyu Tabanını kazı Sırasında Temiz Tutmak: Matkap tarafından formasyondan kopartılan kırıntılar en kısa zamanda kesici uçlardan uzaklaştırılmalıdır. Aksi halde kırıntılar bir daha ezilerek tane boyutları daha da küçülür. Bu olay, çamur özelliklerinin bozulması ve kazı enerjisinin gereksiz yere harcanmasıyla ilerleme hızının düşmesi ve matkabın erken yıpranmasına neden olur. Bunun için matkaptaki çamur çıkış nozulları daraltılır ve sağlanan yüksek çamur hızıyla matkabın kesici yüzeylerinin devamlı temiz kalması sağlanır.
- Kuyudan Çıkan Kırıntıları Yukarı Taşımak, Yukarıda Bu Kırıntıları Bünyesinden Bırakmak ve Sirkülasyon Kesildiğinde Bunları Kuyuda Askıda Tutmak: Matkabın kestiği ve kuyu duvarlarından dökülen kırıntılar sirkülasyonla devamlı dışarı atılmalıdır. Bu olaya etki eden değişkenler; kırıntı yoğunluğu, kırıntı şekli ve büyüklüğü, sirkülasyon akışkanının yoğunluk, viskozite ve anülüs hızı. Herhangi bir nedenle sirkülasyon kesilirse kırıntıların aşağıya çökmemesi, askıda kalması istenir. Bunu akışkanın jel yapısı sağlar.
- Permeabl Formasyonların Duvarında Geçirimsiz Bir Zon Oluşturmak: Permeabl formasyonlar (gözenekli bir yapıya sahip kum, çakıl vb.) kazılırken, boşlukların boyutu çamuru oluşturan parçacıklardan çok büyük değilse, çamurun sıvı fazı basınçla formasyona süzülürken katı fazı kuyu duvarında birikerek zaman geçtikçe geçirimsizliği artan bir kek oluşturur. Eğer bu kek çok kalın olursa takım dizisinin yukarı çekilmesini zorlaştırabilir ve takımın kuyu çeperine yapışarak, takımın sıkışmasına neden olabilir.
- Formasyon basınçlarına Karşı Gelmek: Kayaçlarda bulunan boşlukları dolduran akışkanların basıncıdır. Rezervuar basıncı olarak da adlandırılır. Bazı rezervuarlarda basınç anormal yüksek, bazılarında ise anormal düşük olur. Normal basınç gradyeni deniz altındaki formasyonlarda 0.435 psi/ft, karada 0.433 psi/ft'dir. Eğer bu formasyonlar, o derinlikteki basınçları karşılayacak çamur ağırlığından daha hafif bir çamurla kazılacak olursa, formasyondaki akışkan kuyuya dolar. En iyi olasılıkla çamur kirlenir, en kötü olasılıkla formasyon akışkanı yeryüzeyinden fışkırır veya başka bir formasyona dolar. Eğer çamur ağırlığı gerekenden daha çoksa çamur kaçağı olur, rezervuar kirlenir.
- Formasyonun Çökmesini, Yıkılmasını Önlemek: Formasyondaki yıkılmalara birkaç olay neden olabilir. Tabakalar arasının ıslanması, mekanik düşme, çok dik açılı tabakalı formasyonlar, vb. Bunun için sondaj çamuru; formasyonu yerinde tutmak için yeterli hidrostatik basınç, tabakaların aralarının suyla ıslanmasını önlemek, yetersiz formasyonları bağlamak işlevlerine sahip olmalıdır.
- Boru Giderlerini Azaltmak: Yıkıntı, yüksek veya düşük rezervuar basıncı gibi nedenlerle boru inilmesi gereken zonlar iyi bir çamur dizaynı ve dikkatli bir kazıyla daha ekonomik olarak geçilebilir.

Sondaj akışkanları bu görevleri yaparken;

- Formasyondan bilgi alma işlemlerine zarar vermemeli,
- Formasyona nüfuz ederek, formasyondan alınabilecek akışkanın alınmasına zarar vermemeli,
- Sondaj dizisi ve kuyudaki boru vb. ekipmanlara korozyon zararı vermemeli [12] [13].

Şekil 15'de gösterilen çok geniş çeşitlilikteki sondaj akışkanı tiplerinden hangisinin sondajda kullanılacağını aşağıdaki etmenler belirler.

- Delinecek olan formasyonun tipi,
- Delinecek formasyonun sıcaklık, sertlik, permeabilite ve içerdiği akışkanın basıncı,
- Kullanılacak, formasyonu yorumlama teknikleri,
- Kullanılabilir su kalitesi,
- Çevresel ve ekonomik yaklaşımlar.



Şekil 15. Sondaj akışkanlarının sınıflandırılması [4]

Jeotermal sondajlarda yaygın olarak su bazlı çamurlar kullanılır. Su bazlı çamurlardan da en çok kullanılan tipler şişebilen kil ve su karışımlarıdır

4.2. Killer

Sondaj sıvıları genelde çeşitli tipte kil içerirler. Bunlardan bazıları isteyerek çamur yapmak amacıyla kullanılırken diğerleri delme sırasında çamura karışırlar ve bu durumda hem çamur bozulur hem de kuyu stabilitesi zarar görebilir.

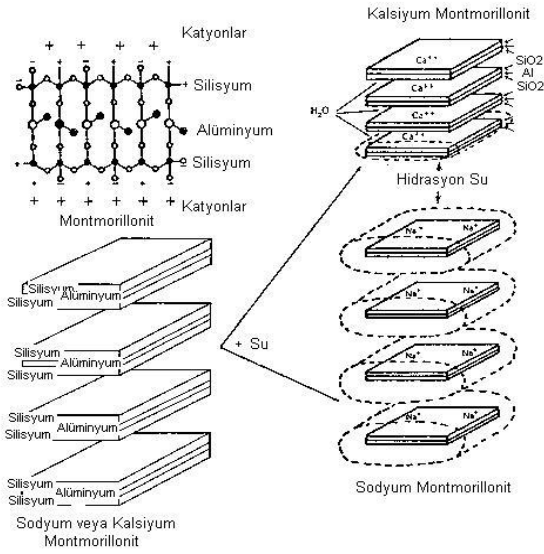
Killeri üç grupta inceleyebiliriz;

- Şişmeyen, iğne şekilli **attapuljit** kili,
- Plaka şekilli şişmeyen veya çok az şişen **illit, klorit, kaolinit** killeri,
- Şişebilen killeri.
 - **Smektitler: Montmorillonit, sponit, hektorit, beidellit,**
 - **Vermikülit.**

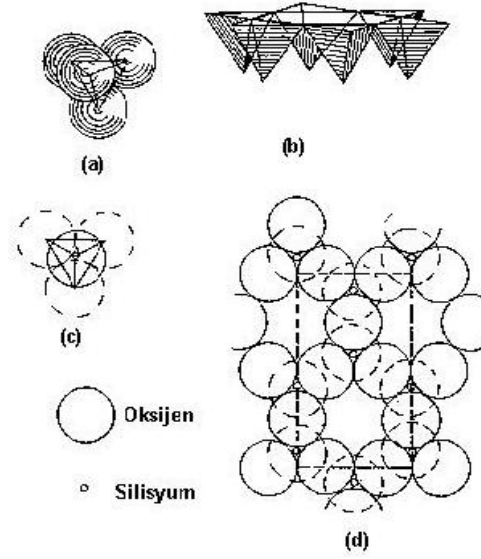
Şişebilen killer büyük hacimde, özellikle temiz suyu bünyelerine alabilirler ve hidrasyon işlemi boyunca tekrar tekrar parçalanırlar. Şişmeyen killer bünyelerine çok az su alırlar. Her üç grupta adı geçen killer sondaj çamurlarında kullanılır [13].

4.2.1. Killerin Yapısı

Kaolen dışındaki kil mineralleri üç düzeyli tabakalardan oluşur. Bu sandviç benzeri üçlü yapının (Şekil 16) dışındaki tabakalar tetrahedral, aralarındaki tabaka oktahedraldir. Bu parçacıklardan bir cm lik bir uzunluğa 14-15 milyon tane dizilebilir. Şekil 17 de şematik olarak bir kil minerali görülüyor. Şişebilen killerin iki yanındaki tetrahedral yapılar ortadaki yapıdan daha önemlidir. Şekilde, tetrahedral yapı, içinde oluşan ve (b), (d) bölümlerinde gösterilen boşluk ve koridorlara bakılınca bu önem anlaşılır. Bu boşluk hacimleri kil yapısındaki en önemli özelliklerdendir.

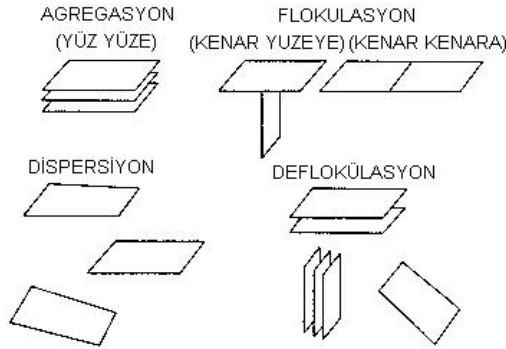


Şekil 16. Montmorillonitin sudaki davranışı [14]



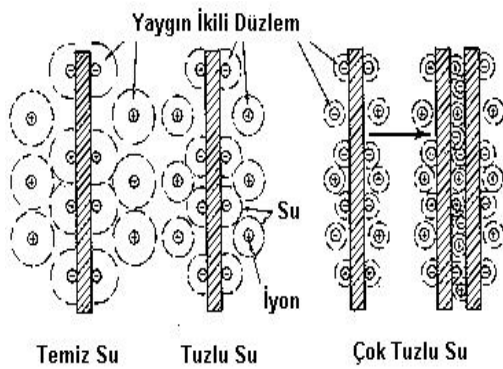
Şekil 17. Tetrahedral tabakanın yapısı [13]

Kaolen dışındaki şişebilen ve şişmeyen killer üçlü tabakalı yapıdadırlar fakat kimyasal yapıları farklıdır. Şişebilen Killerin Sudaki Davranışları: Sulu ortamda kil partikülleri arasında Şekil 18 deki gibi kuvvetler vardır. Eğer kil parçacıkları kenar-yüzey şeklinde birleşmişlerse buna **flokülasyon** (topaklanma), yüzey-yüzey şeklinde birleşmişlerse **agregasyon** (toplanma) denir [13].

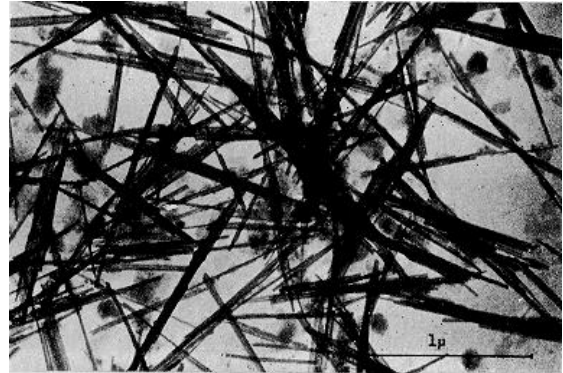


Şekil 18. Kil partiküllerinin sudaki ilişkileri

sıkıştıktır ve parçacık temiz su da içerdiğinden daha az su kapsar. Çok tuzlu suda ikili düzlem daha da sıkışır, agregasyon oluşur ve birim hacimdeki parçacık sayısı düşer (Şekil 19) [13].



Şekil 19. Kilin çeşitli sulardaki davranışı [13]



Şekil 20. Elektron mikroskopta attapuljit [4]

Ayrıca kilin bünyesindeki katyon sudaki başka bir katyonla yer değiştirebilir. Bir katyonun kil yüzeyinde diğeriyle neden değiştiği konusu daha tam anlaşılmış değildir. Genel olarak bazı iyonların yer değiştirebilirlik sırası $Li < Na < NH_4 < K < Mg < Rb < Ca < Co < Al$ şeklindedir. Listeden görülebileceği gibi Li kilin üzerinden en kolay ayrılabilen, Al ise değişim için en çok direnen katyondur.

Sondaj sanayiinde genel olarak, şişebilen killerden smektit grubu kil minerallerinden **montmorillonit** kullanılır. Sondaj sektöründeki adı **bentonit** tir. Na ve Ca montmorillonit çeşitleri vardır. Na montmorillonit daha çok verimlidir [13].

Attapuljit: Attapuljit kili (Şekil 20) zincir yapılı hidromagnezyum alümina silikattır. Attapuljit iğne yapısındadır ve suda şişmez. Parçacıkları montmorillonit parçacıkları kadar küçüktür. Viskozite yapması bu parçacıkların birbirlerine dolaşarak fırça yapısında kümeler yapmasıyla olur. Tamamen disperse (**dispersiyon** = yayılma, dağılma) olduğundan tuzlu sularda da tatlı sularda olduğu gibi viskozite oluşturur. Bu özelliği ile diğer killerden ayrılır. Bentonit çamuru belli bir sıcaklığın üzerinde stabilitesini koruyamaz, bozulur. Bundan dolayı yüksek sıcaklıktaki jeotermal sahalarda, çamur yapımında attapuljit kilini kullanmak daha ekonomiktir.

Killerin Verimi: Killer doğada sınırsız kalitede bulunurlar. Onun için birim kil başına en yüksek viskoziteyi veren kil verimi kavramı ortaya atılmıştır. Kil verimi, 2000 libre (907.2 kg) kilin 15 cp lik görünür viskozite yaptığı çamurun varil (159 lt) cinsinden hacmidir (TS 977).

4.3. Sondaj Akışkanlarının Temel Özellikleri

Sondaj çamurlarının temel özellikleri üç tanedir. Reoloji sondaj hidroliği konusunda incelenmiştir.

- Ağırlık,
- Filtrasyon
- Reoloji (akış özellikleri),

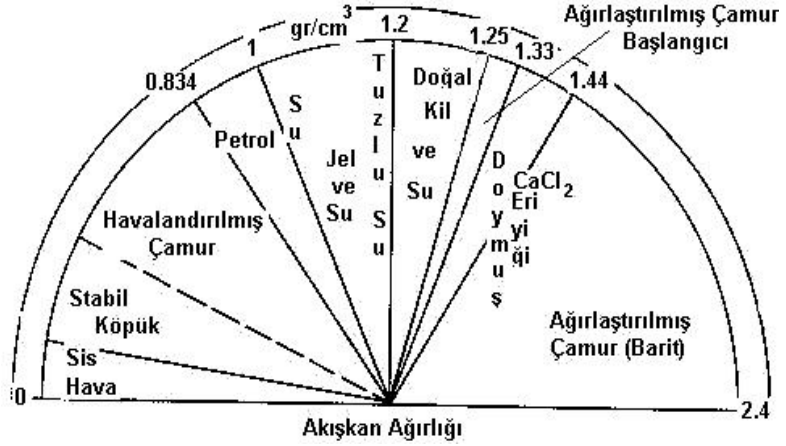
4.3.1. Ağırlık

Sondaj akışkanlarının en temel özelliğidir. Çamur ağırlığı çamurun birim ağırlığıdır ve çamur yoğunluğu olarak da adlandırılır. gr/cm^3 , lb/gal , lb/ft^3 veya basınç gradyeni olarak ifade edilir. Blow-out'ların engellenmesi ve kuyu stabilitesinin sağlanması birincil olarak bu özellik ile ilgilidir. Sondaj sırasında çamurun ağırlığı çok büyük önem taşır. Gereksiz yere arttırılan çamur ağırlığı ilerleme hızını düşürür, sirkülasyon için daha fazla pompa basıncı gerekir, sonuçta sondaj işlemi daha pahalıya mal olur. Çamurun ağırlığını kazılan formasyon belirler. Gerekenden yüksek çamur ağırlığı formasyonun yırtılmasına ve sirkülasyon kaybına, gerekenden az çamur ağırlığıysa yıkıntıya ve formasyon akışkanının kuyuya girmesine neden olur. Sondaj yapılan formasyonlarda kullanılacak çamur ağırlığı genel olarak rezervuar ve üst tabaka ağırlığının oluşturduğu basınç gradyeni (psi/ft) tarafından belirlenir. Dünya üzerinde ortalama basınç gradyenleri; karada, jeolojik olarak az tektonizmaya uğramış sahalarda 1psi/ft, dir. Tektonik olarak aktif, "sedimanter (çökel) havzalarda, çok faylı sahalarda bu değer derinlikle değişir, ortalama olarak 0.8 psi/ft değeri alınabilir. Bu değerler sahadan sahaya ve derinliğe bağlı olarak değişir. Şekil 21'de çeşitli sondaj akışkanlarının özgül ağırlıklarının karşılaştırılması toplu halde görülebilir.

Çamur ağırlığının ölçülmesi: Sondaj çamurlarının ağırlığını ölçmek için kullanılan çamur terazisi şekil 22' de görülmektedir. Bu aletle çamur ağırlığı dört birimle ölçülebilir. Bu birimler ve aletin ölçme aralıkları aşağıdadır.

- 310-1250 psi/100 ft
- 45-180 lb/ft^3
- 6-24 lb/gal
- 0.72-2.88 gr/cm^3

Aletin her kullanımdan sonra iyice temizlenerek sık sık suyla ayarının yapılması gerekir. Alette, temiz su 21 °C sıcaklıkta 1 gr/cm³, 8.33 lb/gal veya 62.3 lb/ft³ dür. Ayarının yapılması için, hazneye temiz su doldurularak aşağıda anlatıldığı gibi ölçümü yapılır ve eğer alet tam yatay olmuyorsa, terazi kolunun sonunda ve vidayla kapatılmış delikteki saçma miktarı azaltılıp çoğaltılarak düzeltilir.



Şekil 21. Çeşitli sondaj akışkanlarının ağırlıkları [13]

Ölçüm:

- Haznenin kapağı kaldırılarak ağırlığı ölçülecek sıvı doldurulur. Eğer haznedeki sıvı kabarcıklıysa (çimento sıvısı gibi çok viskoz sıvılarda), bu kabarcıklar yok olana kadar hazneye fiskeler vurulur.
- Kapak yerine sıkıca oturtulur.
- Aletin dışına bulaşmış sıvı temizlenir (kapağın deliği parmakla kapatılıp alet suya batırılarak temizlenebilir.
- Alet dayanak noktasına oturtulur.
- Cetvel üzerindeki sürgü, alet yatay konuma gelene kadar kaydırılır (yataylık kabarcıklı düzeçten kontrol edilir).
- Cetvel üzerinden, sürgünün hemen yanından okuma yapılır.



Şekil 22. Çamur terazisi

Sondaj akışkanlarının ağırlıklarını değiştirmek için çeşitli katkı maddeleri kullanılır. Bunlar: çamuru hafifletmek için; su, farklı ağırlıktaki çamur, çamuru ağırlaştırmak için yüksek özgül ağırlıklı katı, ince öğütülmüş maddeler, örneğin barit, galen, hematit, kireçtaşı vb.

Barit: Geçmişte çamuru ağırlaştırmak için barit, stronsiyum sülfat, demir oksit, amorf silisyum, doğal kil kullanılıyordu. Fakat düşük fiyat, yüksek özgül ağırlık, temizlik, inertlik gibi özelliklerinden dolayı barit dışındaki ağırlaştırıcılar gündemden çıkmıştır. Barit (BaSO₄) formüllü bir mineraldir ve yoğunluğu 4.25 gr/cm³ dür. Baritle bentonit çamurunun vardırılabileceği en yüksek çamur ağırlığı yaklaşık 2.60 gr/cm³ dür.

Galen: Kurşun sülfat (PbSO₄) formüllü, yoğunluğu 6.5-6.7 gr/cm³ olan bir mineraldir. Genelde baritin yetersiz olduğu durumlarda, kuyuyu öldürme gibi acil durumlarda kullanılır.

Kalsiyum Karbonat: Kireçtaşı, mermer gibi CaCO₃ kökenli kayaların öğütülmüş biçimidir. Çamur tarafından zarar görmesi olası üretim zonları kazılırken, gerekiyorsa çamuru ağırlaştırmada kullanılır. Çünkü CaCO₃ asitle kolayca çözülebilir, kuyunun bitiminde üretim zonlarının asitle yıkanmasıyla olumsuzluk ortadan kaldırılır. CaCO₃ in yoğunluğu 2.7 gr/cm³ tür ve çamuru 1.44 gr/cm³ e kadar ağırlaştırabilir.

Çamurun Yoğunluğunu Arttırma ve Düşürme:

$$V_1(m^3) \times W_1(\text{gr/cm}^3) + V_2(m^3) \times W_2(\text{gr/cm}^3) = V_i(m^3) \times W_i(\text{gr/cm}^3) \quad \text{Burada;}$$

- W_1 = Elimizdeki çamurun yoğunluğu,
 W_2 = Çamurun yoğunluğunu değiştirmek için kullanılacak maddenin yoğunluğu,
 W_i = İstenen sonuç çamur yoğunluğu,
 V_1 = Elimizdeki çamurun hacmi,
 V_2 = Çamurun yoğunluğunu değiştirmek için kullanılacak maddenin hacmi,
 V_i = İstenen sonuç çamur hacmi, $V_1 + V_2$,

$$V_1W_1 + V_2W_2 = (V_1 + V_2) W_i$$

$$V_1W_1 - V_1W_i = V_2 W_i - V_2 W_2$$

$$V_2 = \frac{V_1(W_i - W_1)}{W_2 - W_i}$$

X (ton) = Çamuru ağırlaştırmak veya hafifletmek için gereken katkı maddesi miktarı.

$$X = \frac{W_2 [V_1(W_i - W_1)]}{W_2 - W_i}$$

4.3.2. Filtrasyon

Sondaj çamurunun filtrasyon ve duvar yapım özellikleri sondaj ve kuyu tamamlama operasyonları için çok önemlidir. Sondaj çamuru; kumtaşı ve karbonatlar gibi belli bir permeabiliteye sahip formasyonlarla temas ettiğinde, eğer bu formasyonlar bir akışkan içeriyorsa ve çamur basıncı o noktadaki rezervuar basıncından daha yüksekse formasyona girmeye başlar. Formasyon çatlak ve gözenek boyutları, çamuru oluşturan kil partiküllerinin boyutlarından çok büyük değilse, çamuru oluşturan kil partikülleri kuyunun iç yüzeyine formasyon boyunca sıvanarak serbest suyunu (partiküller arasındaki su) formasyona verir. Bu işlem, kuyu iç yüzeyindeki tabakanın belli tabakaya varmasına kadar devam eder. Çamurun filtrasyon özelliğinden dolayı olan bu olay belli bir noktaya kadar yararlıdır. Çamurun duvarı sıvama yeteneği (bunun sonucunda oluşan yapıya çamur keki denir) istenilenden fazla olursa sondaj ve sondaj sonrası amaçlanan akışkan üretimine zarar verebilir.

Çamurun filtrasyon özelliğini (su kaybı ve kek yapısını) test etmek için standartlaştırılmış laboratuvar ekipmanları vardır. Bunlara filter press denir ve iki tiptir. Standart filter press (Şekil 23) ve yüksek sıcaklık ve yüksek basınç filter press, bu alet derin veya sıcak kuyulardaki, gerçeğe yakın ortamda test yapma gereksinmesinden doğmuştur. 150 °C' ye kadar sıcaklıkta ve 70 kg/cm², ye kadar basınç altında su kaybını ölçer.

Standart Filter Press: 100 ± 5 psi (6.89 ± 0.3 kg/cm²) basınç, 30 dakikalık zaman ve oda sıcaklığında çamurun su kaybını ölçmeye yarar. Bu su kaybı değerine API standart su kaybı da denir. Basınç kaynağı olarak kompresör hattından yararlanılabileceği gibi, pompa, basınçlı gaz tüpü kaynaklarından da yararlanılır. Basınç iletici olarak hava, su, karbondioksit ve azot kullanılır.

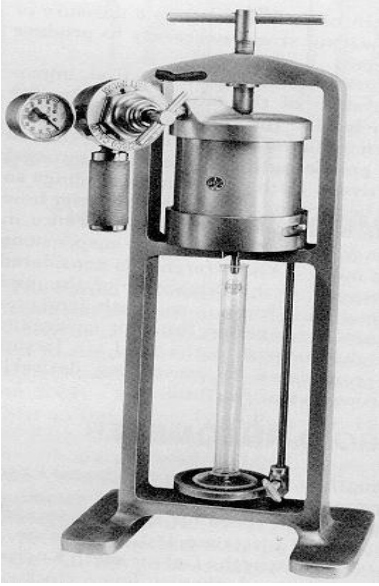
Ölçüm:

- Filter press'in parçaları hazırlanır. Bunlar; kap tabanı, lastik conta, elek, bir tabaka filtre kağıdı, lastik conta ve kaptır. Kap, kap tabanına sıkıca yerleştirilir.
- Kap, üzerinden 1/4" (≈6.5 mm) boşluk kalana kadar çamurla doldurulur ve taşıyıcı iskelet üzerine yerleştirilir.
- Kabin üzeri lastik conta ve kap üst parçasıyla kapatılarak "T" vida sıkılır.
- İskeletin altına dereceli bir cam tüp konur.
- Sisteme üstten bağlanmış olan hortumla 100 psi basınç verilir ve zaman tutulur.

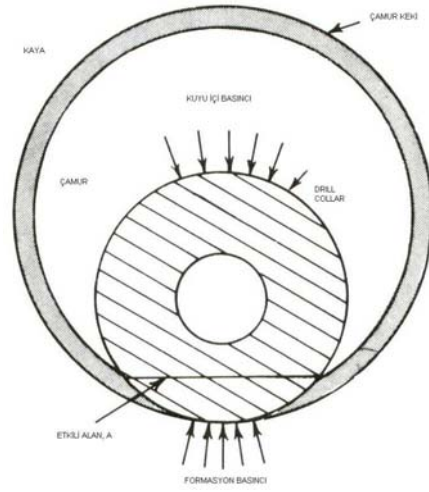
- 30 dakika sonra basınç verilmesi durdurularak kabın altındaki dereceli tüpte biriken filtre sıvısı değeri kayıt altına alınır.
- Kap tekrar sökülerek filtre kağıt, üzerindeki çamur kekiyle birlikte çıkartılır ve kalınlığı mm olarak kayıt altına alınır.
- Kekin yapısı, sertliği, esnekliği vb. de kaydedilmelidir.

Çamurun filtrasyon kaybı zamanla, basınçla ve sıcaklığın yükselmesiyle artar. Çamurun filtrasyon özelliğini değiştirmek için çamura çeşitli katkı maddeleri katılır.

Bu temel özelliklerinin yanında sondaj çamurlarının kontrol altında tutulması gereken PH, kum oranı vb. değişkenler de vardır. Çamurun ağırlık, filtrasyon ve akış değerlerine etki eden bu değişkenleri kontrol altında tutmak için pek çok katkı maddeleri vardır. Çamura katkı maddelerini katarken, bir özelliğini iyileştirirken diğer özelliklerini bozmamaya dikkat etmek gerekir.



Şekil 23. Filter press



Şekil 24. Basınç farklılığından dolayı sıkışma

Basınç Farklılığından Dolayı Sıkışma (Differential Sticking)

Hidrostatik basınç nedeniyle takımın çamur kekine yapışarak takım sıkışmasına neden olması özellikle kuyu derinleştikçe karşılaşılabilen bir durumdur. Bu durum Şekil 24 'de görülebilir. Burada mekanizma kuyudan yetersiz kırıntı temizliği veya kuyu yıkılması nedeniyle takım sıkışmasından farklıdır.

Sıkışık boru için çeşitli petrol + çamur formülasyonları dizayn edilir. Bu teknik, borunun sıkışık olduğu bölgeye petrol veya petrol bazlı çamur yerleştirilerek boruya çekme, basma ve tork uygulanmasıyla borunun kurtarılmaya çalışılmasından oluşur. Bazı durumlarda hidrolik izolasyon ve sıkışık borunun karşısındaki basıncı azaltmak için packer (şişerek kuyuyu iki bölgeye ayıran ve üstüne aldığı çamur hidrostatik basınç nedeniyle altındaki çamur hidrostatik basıncın düşmesine yarayan ekipman) kullanılır.

Basınç farklılığından dolayı sıkışmış borunun kurtulması için gereken kuvvet

$$F_{st} = \Delta p \times A \times f \quad F_{st} = \text{Kurtarma kuvveti}$$

Δp = Permeabl formasyon ve kuyu arasındaki basınç farkı

A = Çamur kekindeki etkili dokunma alanı

f = Boru ve çamur keki arasındaki sürtünme katsayısı

“A” etkili dokunma alanı, DC’lerin çamur kekine batmış bölümündeki giriş uzunluğunun, DC karşısındaki düşük basınçlı permeabl formasyonun “ h_f ” kalınlığıyla çarpılmasıyla bulunur.

$$A = 2h_f \sqrt{\left(\frac{d_2}{2} - h_{mc}\right)^2 - \left(\frac{d_2}{2} - h_{mc} \frac{d_2 - h_{mc}}{d_2 - d_1}\right)^2}$$

$$h_{mc} \leq \frac{d_1}{2} \leq \frac{d_2 - h_{mc}}{2}$$

h_{mc} = Çamur keki kalınlığı, d_1 = DC dış çapı, d_2 = Kuyu çapı

Yukarıdaki eşitliğe göre, sıkıştırma kuvvetinin artması eğilimini gösteren etmenler aşağıdadır.

- Gereksiz yüksek çamur yoğunluğundan dolayı yüksek çamur hidrostatik basıncı,
- Permeabl zonlarda düşük formasyon basıncı,
- Kalın, permeabl formasyonlar daha büyük etkin alan demektir,
- Kalın çamur keki büyük etkin alana neden olur,
- Geniş boru çapı “ “ “ “ “ ”,
- Yüksek sürtünme katsayısına sahip çamur.

Buna göre; düşük yoğunluklu, düşük su kaybı olan, ince ve kaygan çamur kekine sahip çamur, basınç farklılığından dolayı sıkışmayı engellemek için daha iyidir. Boru kesiti de önemli bir etmenddir. Sıkışma eğilimini azaltmak için çeşitli DC konfigürasyonları geliştirilmiştir. Bunlar spiral DC, kare DC, external upset DC, ortaları ve başları şişirilmiş DC lerdir (Şekil 8). Bu dizaynların amacı etkin dokunma alanını azaltmaktır. Sıkışık bölgeyi petrol çamuru veya petrol bazlı özel yağlayıcılarla doldurmak çamur kekini kırar .

4.3.3. Hidrojen İyonu Konsantrasyonu (P_H)

Tam nötr çözeltilerin P_H sı 7, asit taraf 7’ den az, baz taraf 7’ den çok değere sahiptir. Skala 1-14 arasındadır. Çamurun P_H değeri; kilin daha iyi şişmesi, metal malzemelerin kimyasal korozyonu ve bazı kimyasal çamur katkı maddelerinin reaksiyona girmesiyle direk olarak ilgilidir. P_H ölçümü iki yöntemle yapılır.

Özel Kağıt Şerit Kullanarak P_H Ölçümü: Genellikle arazide bu yöntem kullanılır. Eğer çamur 10 000 ppm’ den yüksek Cl içeriyorsa bu yöntem sağlıklı sonuç vermez., elektrometrik ölçüm yapılmalıdır. Makara direk güneş ışığından korunmalı ve temiz, kuru bir yerde saklanmalıdır.

Ölçüm:

Makaradan 2-3 cm kadar kağıt kopartılarak yavaşça çamur üzerine konur. Kağıt filtre suyunu emerek rengi değişene kadar (birkaç saniyeden birkaç dakikaya kadar) beklenir. Sonra, kağıt alınarak makaranın üzerinde bulunan renklerle karşılaştırılır ve benzer renge ait P_H değeri kaydedilir.

P_H Metre İle P_H Ölçümü: Bu yöntem çok daha sağlıklıdır. Bunun için cam elektrotlu test aletleri kullanılır. Bu ölçümün ilkesi, çözeltiye daldırılan cam elektrotla çözelti arasında oluşan - Hidrojen iyonları tarafından oluşturulan - elektrik potansiyelinin ölçülmesidir. Oluşan potansiyel farkı vakum tüp sistemiyle yükseltılarak P_H direk kadrandan okunur.

4.3.4. Kum Oranı

Sondaj çamurunun periyodik olarak kum oranının ölçülmesi gerekir. Çünkü, kazılan formasyondan çamura karışan kum, sirkülasyonun kesilmesiyle kuyu tabanına çökerek kuyuda bulunan takımın sıkışmasına neden olabilir. Kuyu çeperinde bulunan kek tabakasının kalınlaşmasına neden olarak sondaj ekipmanı ve boruların kuyuya inip çıkmasına zorluk çıkarabilir, pompa ve diğer ekipmanlarda mekanik aşınmaya neden olur. Ayrıca, çamur ağırlaşaacağı için ilerleme hızı düşer ve çamurun akış

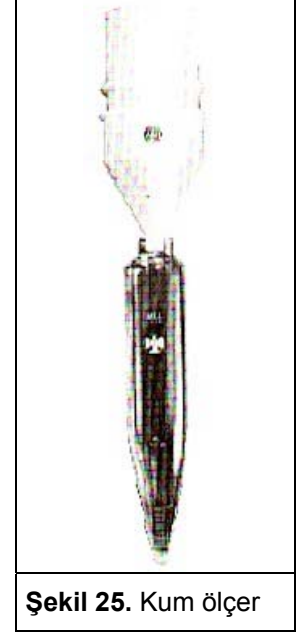
(reolojik) özellikleri değişir. Sondaj çamuru içindeki ideal kum oranı % 0 dır. Bu oran jeotermal ve petrol sondajlarında max. % 1, su sondajlarında max. % 3 dür.

Çamurdaki kum ve katı madde oranını azaltmak için sarsıntılı elek, kum ayırıcı (desander), silt ayırıcı (desilter) ve daha küçük malzemeleri ayırmak için santrifüj kullanılır. Eleklerle 140 μ , kum ayırıcıyla 60 μ , silt ayırıcıyla 25 μ , santrifüjle 3 μ boyutuna kadar partiküller çamurdan ayrılabilir (çimento tozu ve barit 3-75 μ , şişmiş kil partikülü 3 μ 'dan küçüktür).

Çamurdaki kum oranını ölçmekte kullanılan ekipman (Şekil 25) 200 mesh'lik 2 1/5" çapında elek, eleğe uygun bir huni ve cam ölçme tüpünden oluşur.

Ölçüm:

- "Mud to Here" yazısıyla gösterilen çizgiye kadar cam tüpe çamur konulur, sonra "Water to Here" yazısıyla gösterilen çizgiye kadar üzerine su konulur ve tüpün ağzı parmakla kapatılarak hızla çalkalanır.
- Karışım eleğe dökülür. Ardından tüpe tekrar su doldurularak içinde hiç parçacık kalmayana kadar eleğe dökülür, elek altından temiz su gelene kadar elek üzerindeki karışım yıkanır. Burada amaç elek üzerindeki katıları çamurdan arındırmaktır.
- Eleğin üzerindeki kumlu kısım huniye bakacak biçimde huni eleğe takılır. Sonra huninin alt ucu tüpe sokulur ve eleğin üstünden su akıtılarak, kumun suyla birlikte ölçme tüpünde birikmesi sağlanır.
- Bir süre kumun çökmesi için tüp dik konumda bekletilir ve tüpün üzerinde % 20 ye kadar gösterilen çizgilerden, % olarak kum oranı okunur.



Şekil 25. Kum ölçer

Sondaj çamuru ve çamur filtrasyon sıvısına daha pek çok fiziksel ve kimyasal test uygulanır, bunlardan başlıcaları: Çamurda petrol, su, katı ve kil içeriğini bulmaya yarayan "retort analizi", killerin katyon değiştirme kapasitesini bulmaya yarayan "metilen mavisi testi", "rezistivite testi", "emülsiyon testi", "korozyon testi"; su ve filtre sıvısı testleri; "klor içeriği testi", "petrol bazlı çamurlar için alkalinite testi", "kireç içeriği testi", "kalsiyum testi", "demir sülfat testi", "sodyum kromat testi".

5. SONDAJ HİDROLİĞİ

Sondaj hidroliği sondaj çamurunun viskozite, debi ve sirkülasyon basınçlarının bütünüdür. Akış özelliklerinden bir tanesi ideal olunca diğerleri üzerinde bozucu etki oluşturabilir. Bu özelliklerin bütünlük göstermesi gerekmektedir.

Bizim inceleyeceğimiz konular temel rotary sondaj hidroliği ilkeleridir. Bunlar;

- a) Sondaj çamurunun reolojisi,
- b) Reolojik modeller,
- c) Kaldırma kapasitesi,
- d) Kritik hız,
- e) Laminar ve turbulent akıştaki basınç kayıpları,
- f) Eşdeğer sirkülasyon yoğunluğu,
- g) Surge ve swab basınçları,
- h) Matkap hidrolik optimizasyonudur [12] [13].

Kuyuda, herhangi bir derinlikteki sondaj akışkanından dolayı oluşan basıncı statik koşullarda hesaplamak çok kolaydır. Akışkanın sıkıştırılabilirliğini göz ardı ederek ve akışkanın özgül ağırlığının derinliğe göre değişmemesi durumunda

$$P = \rho \times D/10 + P_0$$

$$P = \text{Basınç (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\rho = \text{Özgöl ağırlık (gr/cm}^3\text{)}$$

$$D = \text{Uzunluk (m)}$$

$$P_0 = \text{Atmosfer basıncı (kg/cm}^2\text{)}$$

dir.

$$P = 0.052 \rho + P_0$$

$$P = \text{Basınç (lb/in}^2 = \text{psi)}$$

$$\rho = \text{Özgöl ağırlık (lb/gal)}$$

$$D = \text{Uzunluk (ft)}$$

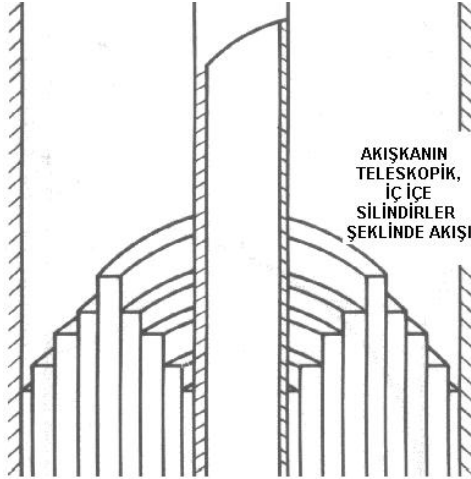
$$P_0 = \text{Atmosfer basıncı (psi)}$$

Şekil 26 da şematik olarak bir sondaj kesiti görülmektedir. Sondaj çamurunun özgül ağırlığı kesitte görülen permeabl zonların içerdiği akışkanların o noktadaki basınçlarını karşılayacak değerde olmalıdır.

5.1. TEMEL REOLOJİK KAVRAMLAR

Viskozite: Akışkanların akmaya karşı iç direncidir. Örneğin bal sudan daha viskozdur. Viskozite, akışkanın makaslama gerilmesi – makaslama hızı arasındaki ilişki olarak tanımlanır. Makaslama gerilmesi ve makaslama hızı bağıntısı maddenin deformasyonunu anlatan özet fiziksel bilgiyi verir. **Reoloji,** bu bağıntıları inceleyen bilim dalıdır [12].

Boru içindeki bir akışkanın akış sırasındaki davranışını inceleyelim. Eğer akışkanın hızı yeteri kadar yüksek değilse, akışkanın tek tek parçacıkları akış yönünde düz ve birbirlerine paralel olarak hareket ederler. Bu tip akış laminar akış olarak adlandırılır. Boru duvarına yakın parçacıklar daha uzaktakilere oranla daha yavaş hareket ederler. Kuyu içindeki akışı düşünecek olursak, akışkanın çok ince iç içe silindirik düzlemlerden oluştuğu varsayılır (Şekil 27). Bu düzlemler yani laminalar **laminar akıma** ismini verir [14].



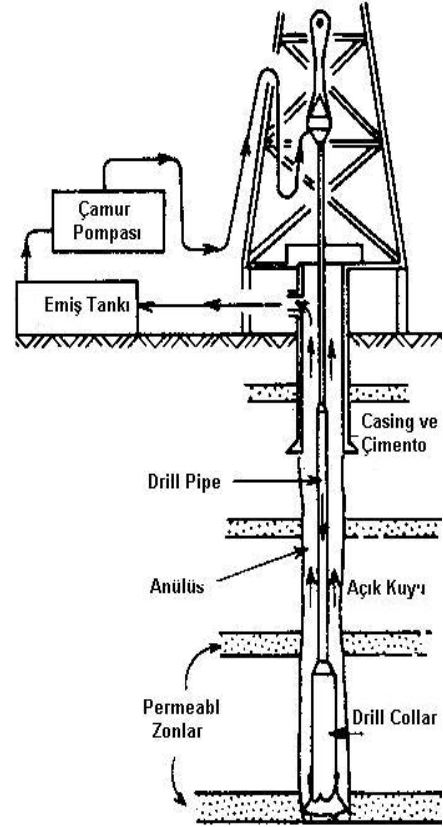
Şekil 27. Anülüsteki akış

Tek tek düzlemleri oluşturan akışkan parçacıkları eşit hızda, farklı düzlemler (laminalar) farklı hızda hareket ederler. Örneğin, boru çeperinin hemen yanındaki düzlemi oluşturan akışkan parçacıkları hiç hareket etmez, hızı sıfırdır. Boru merkezine doğru iç içe düzlemlerin hızları artarak sıralanır. Bu akışkan düzlemlerinin birbirleri üzerinde kaydıklarını düşünebiliriz. Bir düzlemin yanındaki düzleme göre göreceli (rölatif) hızına **makaslama hızı (shear rate)** denir. Farklı düzlemler farklı hızlarda hareket ederlerken birbirleri arasındaki sürtünmeden dolayı bir direnç oluşur. Komşu iki düzlem arasında farklı hızlardan dolayı oluşan bu direnç **makaslama gerilmesi (shear stress)** olarak adlandırılır [12].

Akışkanlar yüksek hızlarda laminar akıştan parçacıklarının şansa bağlı hareket ettikleri **turbulent akım** durumuna geçerler [12].

Makaslama hızı, makaslama gerilmesi, laminar ve turbulent akım kavramları bütün akışkanların akışına uygulanır.

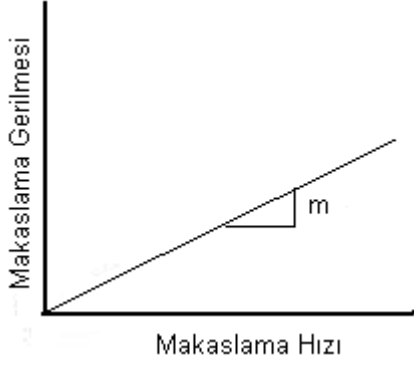
Sondaj sırasında sirkülasyon sisteminde (borular, matkap nozulları ve anülüsteki) hidrolik kesite bağlı olarak, makaslama hızı ve makaslama gerilmesi değişir. Pompa basıncı, sistemdeki bütün makaslama gerilmesi değerlerinin toplamıdır.



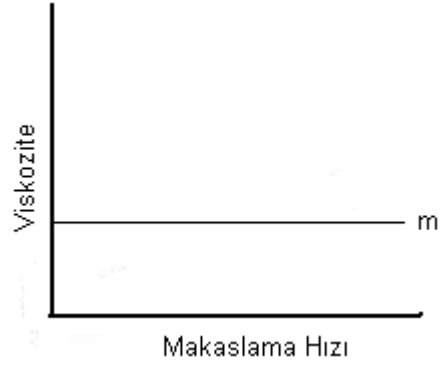
Şekil 26. Şematik sondaj kesiti

5.2. NEWTONIAN AKIŞKANLAR

Bazı akışkanlarda makaslama gerilmesi direk makaslama hızıyla orantılıdır. Bu tip akışkanlara Newtonian akışkanlar denir. Su, gliserin gibi akışkanlar Newtonian'dır. Matematiksel olarak bir Newtonian akışkan; Makaslama Gerilmesi = $m \times$ Makaslama Hızı eşitliğiyle ifade edilir. Burada "m" sabittir. (Şekil 28) [12].



Şekil 28. Newtonian Akışkanlarda MG – MH ilişkisi



Şekil 29. Newtonian Akışkanlarda MH – Viskozite ilişkisi

Makaslama gerilmesinin makaslama hızına oranı "m" dir ve burada viskoziteyi temsil eder. Newtonian akışkanlarda viskozite sabittir. Şekil 29' da görülebileceği gibi makaslama hızı viskozite ilişkisi değişmez, yatayıdır [4] [12].

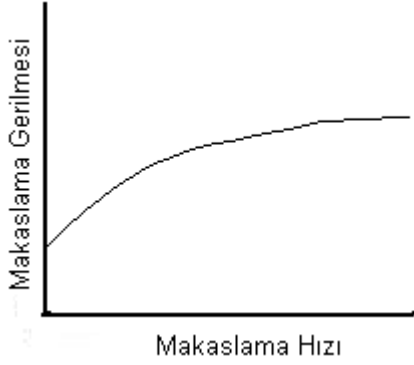
5.3. NON-NEWTONIAN AKIŞKANLAR

Newtonian akışkanlar üzerinde çok çalışılmıştır. Bu tip akışkanların basit doğaları eşitlikler yoluyla basitçe çözülmüşlerdir. Fakat sondaj çamurları Newtonian değildir. Bunlar karmaşık akışkanlardır ve makaslama hızı-makaslama gerilmesi oranları çok farklılıklar gösterir. Non-Newtonian akışkanların makaslama hızı-makaslama gerilmesi bağıntısını gösteren diyagramlara **reogram** denir. Şekil 30 da tipik bir sondaj çamuru reogramı görülmektedir. Bu reogramda bir Newtonian akışkanınıninkinden farklı iki şey göze çarpmaktadır. Birinci olarak, iki değişken arasındaki ilişki doğru yerine eğridir. İkinci olarak, akışkan akışa geçmeden yenilmesi gereken bir başlangıç gerilmesine sahiptir yani eğri orijinden başlamamaktadır [4] [12].

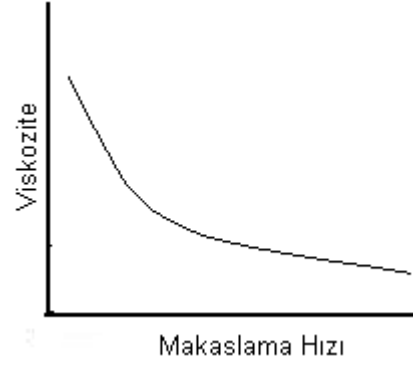
Non-Newtonian akışkanlar, pseudoplastic ve dilatant sıvılar olarak ikiye ayrılırlar. Akışkan; görünür viskozitesi makaslama hızının yükselmesiyle düşüyorsa **pseudoplastic**, görünür viskozitesi artan makaslama hızıyla artıyorsa **dilatant** adını alır. Sondaj sıvıları ve çimento karışımları genellikle pseudoplastic davranış gösterirler [4]

Eğer non Newtonian sıvı görünür viskozitesi makaslama gerilmesinin yeni sabit bir değere yükselmesiyle zamanla düşüyorsa **thixotropic**, görünür viskozitesi makaslama hızının yeni sabit bir değere yükselmesiyle zamanla yükseliyorsa **rheopectic** tir. Sondaj sıvıları ve çimento karışımları genel olarak thixotropictir [4].

Viskozite makaslama gerilmesinin makaslama hızına oranıydı. Bir Newtonian akışkan makaslama hızından bağımsız bir viskoziteye sahiptir. Örneğin saf su 20.2 °C (68.4 °F) de 1 centipoise (0.001 pascal saniye) viskoziteye sahiptir. Şekil 30 da reogramı verilen akışkan sabit viskoziteye sahip değildir. Onun viskozitesi verilen hızdaki makaslama hızına bağlıdır. Şekil 31 de bu akışkanın viskozite-makaslama hızı bağıntısı görülmektedir. Görüleceği gibi bu tip akışkanların viskoziteleri makaslama hızıyla değişir. Herhangi bir makaslama hızı değerinde akışkanın gösterdiği viskozite değerine **görünür viskozite (apparent viscosity)** denir [4] [12].



Şekil 30. Non Newtonian Akışkanlarda MG – MH ilişkisi



Şekil 31. Non Newtonian Akışkanlarda MH - Viskozite ilişkisi

Marsh Hunisi (Marsh Funnel)

Marsh hunisi (Şekil 32), sahada çamurun viskozite özellikleri hakkında kısa yoldan bilgi edinilmesini sağlayan basit bir ekipmandır. Sondaj çamuru tanktan marsh hunisinin kabıyla alınarak, huninin alt ucu kapatılarak elek düzeyine kadar doldurulur. Sonra, huninin alt ucu kapta olacak şekilde açılır ve aynı anda kronometreye basılır. Çamur kaptaki 1 Quartlık (1 Q=946 ml) hacim çizgisine ulaşınca kronometre durdurulur. Bulunan değer çamurun sn olarak viskozite değeridir. Bu değer çamur hakkında yalnızca bir fikir edinilmesini sağlar. Formüllerde girdi olarak kullanılamaz. Saf suyun 21.1 °C (70 °F) sıcaklıktaki huni viskozitesi 26 ± 0.5 sn dir [13].

Dönen Viskozimetre (Rotational Viscometer) ve Reometre; bir laboratuvar aletidir ve elektrikle çalışır. Reometre, viskozimetrenin sahada pratik kullanılabilir tipidir ve elle çalıştırılır (Şekil 33). Viskozimetre istediğimiz devirlerde veya genellikle 3, 6, 100, 200, 300, 600 devirlerde, reometre 300, 600 ve 600 ün üzerindeki devirlerde çalışır. Aletin tahrikle dönen hareketli parçası rotor dur. Rotorun içinde serbest olan fakat bir etki sonucu dönebilen parçanın arasındaki (anülüsündeki) boşlukta bulunan akışkanda, rotorun dönmesiyle dış gömlek tarafından bir makaslama gerilmesi yaratılır. Bu anülüsteki akışkanın aynı merkezli olarak çok ince silindirik düzlemler halinde düzenlendiğini düşünebiliriz. Rotorun dönen dış gömleğiyle, serbest içteki parçanın arasındaki akışkanın düzlemlerinin en dışındaki rotor gömleğine yakın bir hızda döner. İçeriye doğru, yani serbest parçaya doğru düzlemler dıştakilere oranla daha yavaş döner ve en içteki akışkan düzlemi rotorun içindeki serbest parçaya bir tork uygular. Makaslama hızı rotor gömleğinin dönüş hızıysa, sıvı düzlemlerinin birbirleri üzerinde kayarak rotorun içindeki serbest parçaya uyguladıkları tork sonucu bu parçanın dönme hızı da makaslama gerilmesi olarak açıklanır [13].



Şekil 31. Marsh Hunisi



Şekil 32. Reometre

Reometreyle ölçüm;

- Çamur ölçüm kabına konur ve kap, reometrenin altına hiza çizgileri göz önüne alınarak yerleştirilir. Rotor, üzerindeki çizgiye kadar aletin üzerinden bastırılarak çamura batırılır ve bu durumda teleskopik ayaklar üzerindeki vidadan sabitlenir.
- Aletin devrini ayarlayan kol rotora 600 den fazla devir sayısı sağlayacak en alt konuma getirilir ve çamur 15 sn karıştırılır.
- Sonra kol 600 devir konumuna getirilerek aletin üstünde okunan değer sabitleşinceye kadar rotor döndürülür. Bu değer 600 devir okumasıdır. Sonra devir kolu hemen 300 devir konumuna getirilir ve aynı işlem tekrarlanarak değer kaydedilir [13].

Jel Kuvvetlerinin Bulunması; çamurda iki jel okuması yapılır. Birincisi, karıştırmanın bitmesinden hemen sonra (**10 sn jel okuması**), ikincisi karıştırma bittikten 10 dakika sonra (**10 dak jel okuması**). Gerçek akışkanlarda (su vb.) bu değerlerin ikisi de sıfırdır.

- Ölçüm kabına çamur konularak reometre ölçüme hazır hale getirilir,
- Yüksek devirde çamur 15 sn karıştırılır,
- 10 sn ve 10 dak beklemeden sonra devir kolu üzerindeki tırtıllı vida saat akrebi yönünde yavaş ve aynı hızda çevrilir. Bu arada göstergedeki değer artar ve sabit bir değerde durur. Okunanlar 10 sn veya 10 dakika jel değerleridir. Birimi 100 lb/ft² dir [13].

Alet herhangi bir devir sayısında (makaslama hızında) makaslama gerilmesini lb/ft² olarak verir. Bu değerlerden aşağıdaki gibi o hızdaki görünür viskozite hesaplanır.

$$M=300 F/R$$

$$R=\text{Reometrenin rotari devir sayısı, dev/dak,}$$

$$F=\text{Dönüş hızı "R" deki okuma, lb/ft}^2,$$

$$M=\text{"R" makaslama hızındaki görünür viskozite,cps [13].}$$

Reolojiyi Etkileyen Etmenler [13]:

Sahada, çamurun kuyudaki koşullarında reolojik özelliklerini ölçmeye yarayan pratik bir ekipman yoktur. Fakat bilgi olarak sıcaklık, basınç ve zamanın reoloji üzerindeki etkilerini görelim.

Sıcaklık: Akışkanların reolojisi sıcaklıkla değişir. Genel olarak sıcaklığın artmasıyla viskozite düşer. Fakat yüksek sıcaklıklarda, örneğin kalsiyum çamurlarında jelleşme ve 149 °C civarında da çimentolaşma başlar.

Basınç: Su bazlı çamurlar üzerinde basıncın az etkisi vardır. Fakat petrol bazlı çamurlar üzerindeki etkisi çoktur.

Zaman: Sondaj çamurunun reolojisi zamana da bağlıdır.

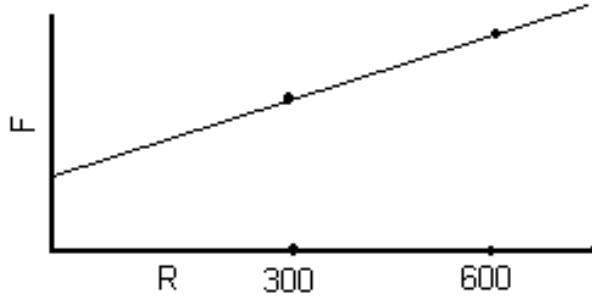
5.4. REOLOJİK MODELLER [4] [12] [13] [14]

Newtonian akışkanlarda makaslama gerilmesi-makaslama hızı ilişkisi basit bir matematiksel eşitliktir. Buna karşın non Newtonian akışkanların reolojisini tam olarak anlatan bir matematiksel eşitlik yoktur. Bu konuda çeşitli modeller önerilmiştir. Bunlara **reolojik modeller** denir. Bunlar **Bingham Plastik Model** ve **Power Law Model** dir. Gerçeğe daha yakın sonuçlar veren ve bu temel modellerden türetilmiş modeller de vardır.

Bingham Plastik ve Power Law reolojik modeller, sondaj sıvıları ve çimento karışımlarının pseudoplastik davranışına yaklaşım için kullanılırlar. Günümüzde sondaj ve çimento sıvılarının thixotropik davranışları matematiksel olarak modellenememiştir [4].

5.4.1. BINGHAM PLASTİK MODEL

Sahada en çok kullanılan ve non Newtonian akışkanları açıklayan en basit modeldir. Bu model, sahada ölçüm yapılan iki devirli reometrenin verilerini temel alır. Bu modelde reometrenin 300 ve 600 devir sonuçları kartezyen koordinatlarda işaretlendiğinde bir doğru verir (Şekil 33). Bu doğru apsisi bir noktada keser ve bir eğimi vardır.



Şekil 33. Bingham Plastik Model

Bingham Plastik Model'in iki parametresi Plastik Viskozite (PV) ve Yield Point (YP) dir. Bunlar reometrenin 600 (F_{600}) ve 300 (F_{300}) devirlerdeki okumalardan kolayca hesaplanır.

$$PV = F_{600} - F_{300}$$

$$YP = F_{300} - PV$$

Burada; PV'nin birimi centipoise (gr/cm.sn) ve YP'nin birimi lb/100ft² dir.

Şekil 31 de görülen doğru $F = YP + (PV/300)R$ şeklinde ifade edilir. Bu eşitlik Bingham Plastik Model'in eşitliğidir. Burada 300 ve 600 devir değerlerini yatay eksen olarak düşünersek, PV eğim ve YP'de doğrunun dikey eksenini kestiği

nokta olur.

Plastik Viskozite ; tarif olarak, yield point'e ulaşıldıktan sonra kayma hızında birim artma meydana getiren kayma gerilmesidir. Plastik viskozite, akmaya karşı direncin mekanik sürtünmeden dolayı oluşan bileşenidir. Bu sürtünme,

- Çamur içindeki katı maddeler arasında,
- Katı maddelerle çevrelerini saran sıvı arasında,
- Sıvının kendi içindeki kayma nedenleriyle oluşmaktadır.

Çamurla ilgilenenlerin baş ilgi alanı çamurdaki katı fazdır. Plastik viskozitenin artması genel olarak çamurdaki katı hacminin artması, katı parçacıklarının boyutlarının küçülmesi, şeklinin değişmesi veya bunların kombinasyonlarının olduğu anlamına gelir. Bazı katılar çamura istenerek katılır. Bentonit, barit vb. Bir de çamura istenmeden katılan katılar vardır. Sondaj sırasındaki formasyon kırıntıları gibi. Bu kırıntılar çamurdan hemen uzaklaştırılmazlarsa zamanla, matkap tarafından tekrar tekrar parçalanarak viskozitenin artmasına neden olurlar.

Yield Point ; akmaya karşı direncin parçacıklar arası çekme kuvvetinden dolayı oluşan bileşenidir. Bu çekme kuvveti akışkan içindeki askıdaki katıların yüzeylerindeki elektrik yüklerinden dolayı oluşur.

Bu gücün yüksekliği,

- Katıların tipi ve bununla bağlı olarak yüzey yüklerine,
- Katı miktarına,
- Çamurun sıvı fazının içerdiği tuzun iyon konsantrasyonuna bağlıdır.

Jel Kuvvetleri ; çamurun jel özelliği Bingham Plastik Model'in bir parçası değildir. Fakat çamurun PV ve YP gibi benzer özelliği olduğundan hareketle jel kuvvetlerinden burada söz edilecektir.

Bir çamurun jel kuvveti, çamur hareketsiz haldeyken çekici güçlere bağlıdır. YP çamur hareketliken çekici güçlerin oluşturduğu kuvvet, jel kuvveti de çamur hareketsizken aynı güçlerin oluşturduğu kuvvettir. YP düştüğünde jel kuvveti de düşer.

Jel dayanımı okumaları reometreyle 10 sn ve 10 dak okumaları olarak iki şekilde yapılır. Bunlar arasında büyük fark varsa buna **artan jel (progressive gels)** denir. Eğer her iki jel kuvvetleri arasında çok az fark var ve ikisi de yüksekse buna **ani jel (flash gels)** denir. Çamurdaki fazla jel kuvvetleri olumsuz sonuçlar doğurur .

5.4.2. POWER LAW MODEL(n ve K)

PV ve YP nin çamuru açıklamadaki dikkate değer başarılarına rağmen Bingham Plastik Model'in bazı eksiklikleri vardır. Bu modelde çamura düşük makaslama hızı kazandırıldığında bulunan makaslama gerilmesi gerçekteki değeri çok aşar. Bu özellikle düşük katı oranlı, disperse olmayan çamurlar için geçerlidir.

Tablo 4. Tipik bir çamurun görünür viskozitesi

R (dev/dak)	F (lb/100ft ²)	m cps
3	6	600
6	8	400
100	21	63
200	28	42
300	33	33
600	44	22

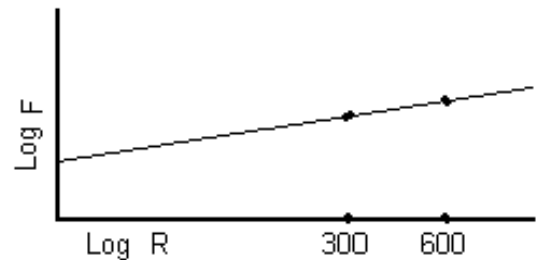
Power Law Model'i anlamak için Tablo 4 de verilen örneğe bakalım. Makaslama hızı ve makaslama gerilmesi değerleri koordinat sistemine yerleştirilip birleştirilince ortaya bir eğri çıkar. Eğer bu veriler log-log kağıda işaretlenirse 600 ve 300 devirlerdeki noktaların birleştirilmesiyle uzatılan doğru diğer verileri de kapsayacak biçimde uzar.

Logaritmik kağıttaki bu doğruya **güç eğrisi (power curve)** denir ve bunun matematiksel ifadesi $F = K.R^n$ dir. Bu reolojik model Power Law olarak isimlendirilir, parametreleri **n** ve **K** dir. n parametresi **akış davranış indeksi** (flow behavior index) dir. Newtonian akışkanlarda n=1 dir. Sondaj çamurları için n<1 dir. n değerinin düşük olması çamurun daha çok non Newtonian olduğu anlamına gelir. K, **kıvam faktörü** (consistency factor) dür. PV'ye benzer şekilde , K değerinin

artışı çamurdaki katı konsantrasyonunun artmasına veya çamurdaki parçacıkların boyutlarının küçülmesine işaretler. K' nın birimi lb/100 ft²-devir n dir. n değeri boyutsuzdur. Log-log kağıdında Power Law reogramı bir doğrudur. Bu doğrunun eğim n'dir ve R=1'de log F eksenini kestiği nokta K'dir. Kartezyen koordinat sisteminde ise reogram bir doğru değildir. Şekil 34 ve 35 de n=0.5 ve K=2 olan bir çamurun reogramları görülmektedir.



Şekil 34. Kartezyen koordinatlarda Power Law



Şekil 35. Log – log kağıdında Power Law

Newtonian akışkanlar sabit viskoziteye sahiptir. Non Newtonian akışkanlarda viskozite hıza bağlıdır. Yani, düşük makaslama hızlarında sondaj çamurunun viskozitesi yüksek makaslama hızlarındaki viskozitesinden yüksektir. Bu özellik **kayma incelmesi, viskozite düşmesi (shear thinning)** olarak adlandırılır. Kayma incelmesinin değerini n parametresinin değeri verir. n' in düşmesi kayma incelmesinin yükselmesi demektir. Eğer "n" değeri 0.45 den azsa sıvı çok non Newtonian'dır.

Kuyuda, anülüste sondaj sıvısının hızı düşük, viskozitesi yüksektir. Matkapta, makaslama hızı yüksek viskozite düşüktür. Bu istenen bir durumdur. Anülüsteki yüksek viskozite kuyu temizliğini sağlar, matkaptaki düşük viskozite ilerleme hızını artırır. YP, PV sabit tutularak yükseltirse veya PV, YP düşürülmeden düşürülürse çamurun "n" değeri düşer. Yani kayma incelmesi artar.

5.5. KUYUDA SİRKÜLASYON BAŞLANGICI

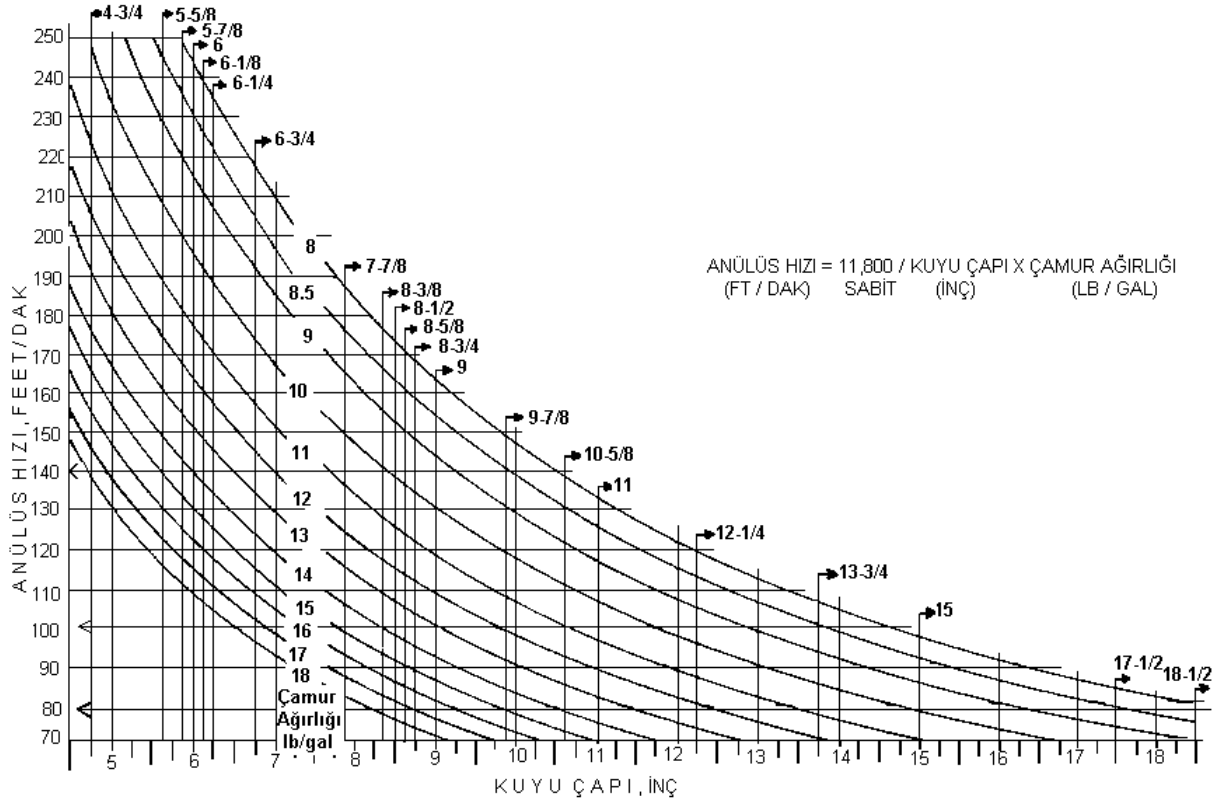
Sondaj akışkanları sirkülasyon başlangıcında genellikle thixotropic özellik gösterirler. Kuyuda sirkülasyonu başlatmak için gereken basınç genelde, sirkülasyonu belli bir değerde tutmak için harcanan basınçtan çoktur [4] [12].

Sondaj akışkanı çok jelli ve anülüsün kesiti çok küçükse sirkülasyonu başlatmak için büyük basınç gerekebilir. Bazı durumlarda sirkülasyonu başlatmak için gereken bu basınç formasyonun **çatlama basıncını** (leak pressure) aşabilir. Bu gibi durumlarla karşılaşmamak için, sirkülasyona başlama basıncını düşürmek amacıyla, pompa harekete geçirilmeden önce sondaj dizisi döndürülmeli ve pompaya çok yavaş yol verilmelidir.

5.6. KALDIRMA KAPASİTESİ (KUYU TEMİZLİĞİ)

Sondaj sırasında matkap tarafından kopartılan kırıntılar genelde çamurdan daha ağırdır. Kırıntılar anülüste çamur akışıyla kaldırılırken aynı zamanda yerçekiminin etkisiyle düşme eğilimindedirler. Kırıntıların akışkan içindeki düşme hızına **kayma hızı (slip velocity)** denir. Bu hız temel olarak çamurun yoğunluğu ve viskozitesine, kırıntının boyutu, şekli ve yoğunluğuna bağlıdır. **Kırıntı yükselme hızı (cuttings rising velocity)** kırıntıların anülüsteki gerçek hareket hızı, **kaldırma kapasitesi (lifting capacity)** çamurun kuyuyu temizleme yeteneğinin göreceli ifadesidir [13].

İstenen kaldırma kapasitesi için anülüs hızı veya pompa debisi bir kılavuздur. Dünyanın çeşitli bölgelerinde yapılan sondajlardaki ortalama anülüs hızları, tipik DP kullanımıyla 12 ¼" çapa kadar kuyularda 120-80 ft/dak (0.6-0.4 m/sn) ve 12 ¼" – 26" kuyularda 80-50 ft/dak (0.4-0.25 m/sn) kadardır. Şekil 36 deki nomogram kullanılarak, farklı kuyu çaplarında gereken anülüs hızı pratik olarak saptanabilir.



Şekil 36. Normal aralıktaki kuyu çapı ve çamur ağırlıkları için optimum anülüs hızları

Başka bir yaklaşım da kaldırma kapasitesinin hesaplanmasıdır. Birinci adımda kayma hızı hesaplanır. Kırıntılar yüksek kayma hızlarına sahipse kuyuyu temizlemek zorlaşır. Kayma hızını düşürmenin en kolay yolu anülüsteki viskoziteyi arttırmaktır. Kırıntı yükselme hızı anülüs hızından kayma hızının çıkartılmasıyla bulunur. Anülüs hızının artması çamurun viskozitesinin azalmasına neden olur ve kayma hızı artar. Bu; anülüste çamur hızının artmasının, kuyu temizliğinde, viskozite düşmesinden daha çok etkisi olduğu anlamına gelir [12].

Yüksek anülüs hızlarının kuyu temizliğini arttırmalarına rağmen zararlı etkileri de vardır. Yüksek hızlarda çamur büyük basınç kayıplarına neden olur, bunun sonucunda sirkülasyon kaybı ve kuyuda yıkıntı ile karşılaşılabilir.

Doğal olarak, bulunan bu değerler saha gözlemleriyle denetlenmeli ve düzeltilmelidir. Kuyunun yıkılarak genişleyen bölgelerinde kaldırma kapasitesi daha düşüktür.

5.7. KRİTİK HIZ [4] [12]

Laminar ve turbulent akım arasındaki farkı anımsayalım. Laminar akımda akışkanın tek tek parçacıkları akış yönünde paralel hatlar şeklinde hareket ederler. Turbulent akımda bu parçacıklar genel akış yönünde sıçrayarak, devriler ve şansa bağlı yol alırlar. Anülüste normal olarak turbulent akım istenmez. Turbulent akım laminar akımdan daha aşındırıcıdır ve tehlikeli kuyu genişlemelerine neden olabilir. Anülüste turbulent akım oluşturmak için yüksek sirkülasyon basıncına gerek vardır. Bu durumda da matkaptaki yararlanılabilir basınç düşer, bu da ilerleme hızının düşmesidir. Ayrıca turbulent akım dolayısıyla kuyuda sirkülasyon kaybı olasılığı artar ve turbulans sonucu kuyu duvarlarındaki çamur keki sıyrılarak filtrasyonun artmasına neden olur. Tüm bunlardan dolayı genellikle anülüste turbulent akımlardan sakınmak gerekir.

Laminar ve turbulent akım arasındaki temel fark hızın fonksiyonudur. Eğer anülüs kesiti yeterince küçükse akım laminar olacaktır. Yüksek hızlarda akım turbulent olur.

Kritik hız bir çizgidir. Eğer akış hızı kritik hızdan düşükse laminar, yüksekse "laminar değildir". Buradaki laminar değil terimi turbulent demek değildir. Çünkü çamur laminar akımdan turbulent akıma geçerken bir **geçiş zonu**'ndan geçer. Kritik hız akışkanın yalnız yoğunluğu ve reolojik özelliklerine bağlı değildir. Söz konusu kesitin hidrolik çapına da bağlıdır. Anülüsteki en dar kesitler (DC'lerin karşısı) çamurun kayma incilmesi özelliğinden dolayı en yüksek kritik hıza sahiptir. Bununla beraber, anülüs hızı bu bölgede yüksek olduğundan çamurun DC'lar çevresindeki akışı turbulendir. Çamur sondaj dizisi içinden aşağıya doğru akarken göreceli küçük çaplar ve yüksek hız nedeniyle daima turbulent akımda akar.

Kritik hızın hesaplanmasında geleneksel olarak **Reynolds Sayısı** temel alınır. Boyutsuz bir parametre olan bu sayı;

- Çamurun yoğunluğunu,
- Kesitin hidrolik çapını,
- Ortalama çamur hızını,
- Çamurun viskozitesini kapsar.

$$N_{Re} = \frac{928\rho vd}{\mu}$$

ρ = Akışkan yoğunluğu, lb/gal,

v = Akış hızı, ft/sn,

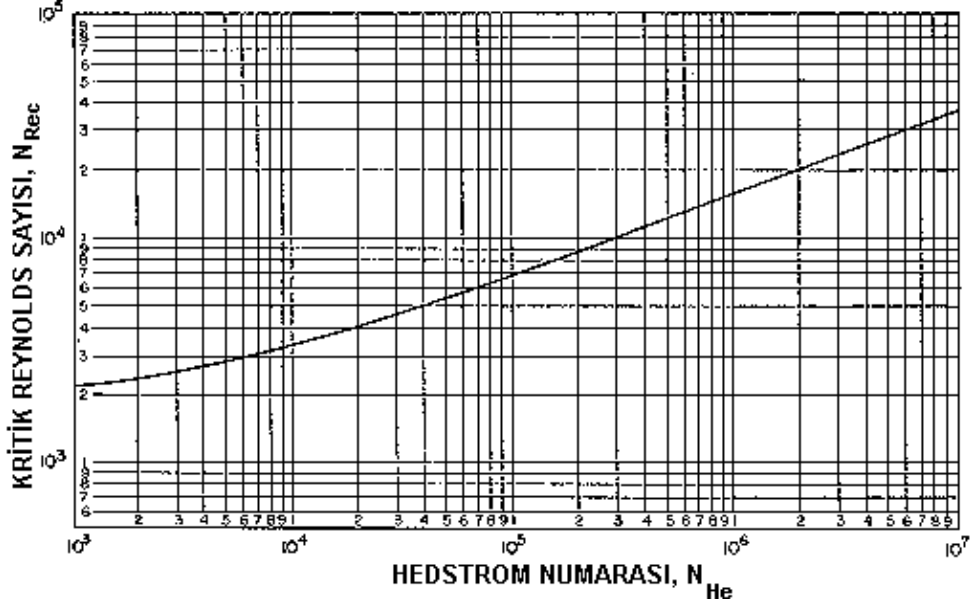
d = Boru çapı, inç,

μ = Akışkan viskozitesi, cp.

Newtonin akışkanlarda Reynolds Sayısı 2100'den azsa laminar, çaksa turbulent akım olur. 2100 değeri Newtonian akışkanlar için **Kritik Reynolds Sayısıdır**. Gerçi anülüsteki hız kritik hızın altında

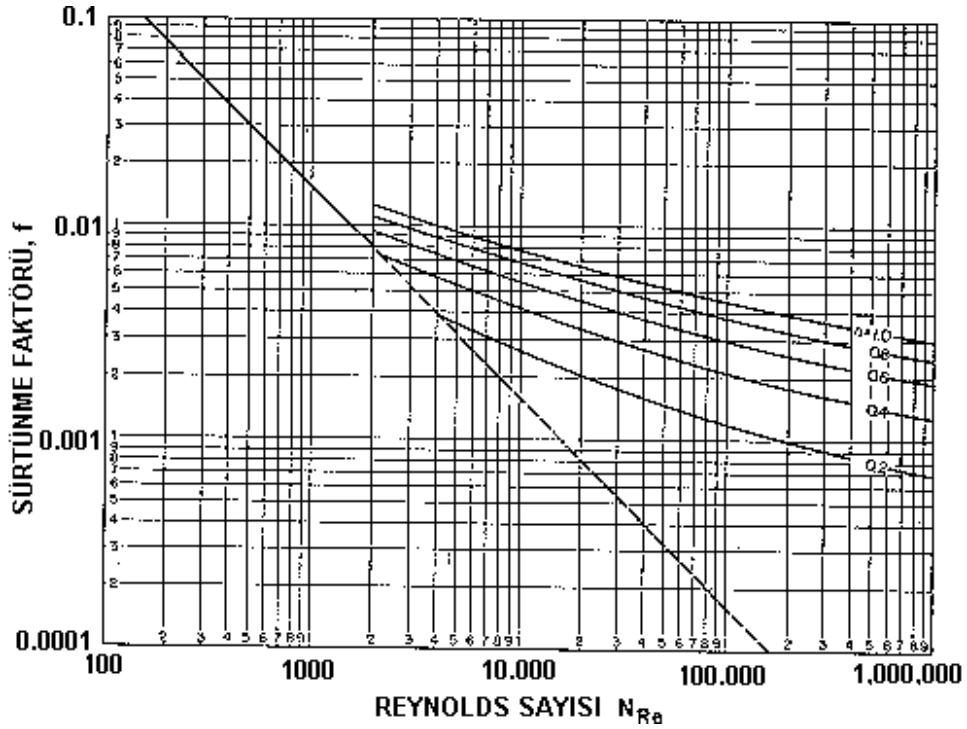
Önerilen bir başka yöntemde de **Hedstrom Numarası** kullanılır. Bu yöntemde aşağıdaki formül önerilmiştir ve buradan bulunan N_{He} değerinden Şekil 38 yardımıyla kritik Reynolds Sayısı bulunur.

$$N_{He} = 37,100 \rho \tau_{yx} d^2 / \mu_p^2$$



Şekil 38. Bingham Plastik Akışkanlar için kritik Reynolds Sayıları.

Power Law model için kritik Reynolds Sayısı akış davranış indeksinin (n) fonksiyonudur. Kritik Reynolds Sayısı için, verilen bir " n " değerine karşılık gelen " f " değeri Şekil 39 dan bulunur ve bulunan değer 2100 sayısıyla karşılaştırılır.



Şekil 39. Power Law Model için Sürtünme Faktörleri

Power Law modelde kritik Reynolds Sayısını formülle bulmak için, önce istenen kesitteki görünür viskozite bulunur.

$$\mu_a = \frac{K(d_2 - d_1)^{1-n}}{144\bar{v}^{(1-n)}} \left(\frac{2 + 1/n}{0.0208} \right)^n$$

Sonra bulunan değer aşağıdaki formülde yerine konur.

$$N_{Re} = \frac{109,000\rho(\bar{v})^{2-n}}{K} \left[\frac{0.0208(d_2 - d_1)}{2 + 1/n} \right]^n$$

Ve sonuç 2100 sayısı ile karşılaştırılır.

5.8. LAMİNAR AKIM BASINÇ DÜŞÜMÜ [4] [13]

Kuyuda; anülüste, kuyu tabanına ve kuyu başına basınç ölçerler koyduğumuzu düşünelim. Kuyu tabanındaki ölçüm değerini kuyu başındaki değerden çıkartalım. Statik konumda kuyu tabanındaki ölçüm değeri çamur sütununun kuyu tabanına yapmış olduğu hidrostatik basıncı verir. Sirkülasyon sırasında ölçülen aynı noktadaki basınç değeri hidrostatik basınçtan daha yüksektir. Bu fazla değere **basınç kaybı veya basınç düşümü** denir. Bu değer çamuru anülüste hareket ettirmek için gereken basınçtır. Eğer anülüsteki akış tipi laminarsa buna **laminar basınç kaybı** denir.

Hidrostatik basınç hidrolik çapın fonksiyonu değildir fakat basınç kaybı hidrolik çapın fonksiyonudur. Çamuru dar bir kesitte akıtmak için gereken basınç, daha geniş bir kesitte akıtmak için gereken basınçtan daha çoktur. Bu nedenle basınç kaybı her kesit için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Kesitsel basınç kaybı, aynı kesitte çamuru kuyu tabanından sirküle ettirirken oluşan basınç kaybıdır.

5.9. TURBULENT AKIM BASINÇ DÜŞÜMÜ [4]

Söz konusu kesitteki çamurun hızı kritik hızın üstündeyse akış turbulent olacaktır. Basınç kaybının hesaplanması da turbulent akış göz önüne alınarak yapılır. Basınç kayıp formülleri Tablo 5 ve Tablo 6 da verilmiştir.

5.10. EŞDEĞER SİRKÜLASYON YOĞUNLUĞU (EQUIVALENT CIRCULATING DENSITY) [4] [12]

Normal sirkülasyon sırasında pompadan hemen sonra borudan okuduğumuz basınç değeri, pompanın sirkülasyon sisteminde çamuru dolaştırarak tekrar yukarı getirmesi sürecinde harcanan basıncı gösterir. Çamura sirkülasyon için uygulanan ve toplamı kule manometresinde okunan değer in çoğunu yüzey bağlantılarındaki, sondaj dizisi içindeki ve matkaptaki basınç kaybı oluşturur. Geriye kalan az miktardaki basınç değeri de çamuru anülüste yüzeye ulaştırırken tüketilen basınçtır. Anülüsteki hareketli çamurun basınç kaybı yüzeyde sıfır olacak biçimde azalır.

Sistemin herhangi bir noktasındaki sirkülasyon basıncı, çamuru o noktadan yüzeye kadar hareket ettirmeye yetecek toplam basınçtır. Anülüste; sirkülasyon sırasında herhangi bir noktaya, bu basınç ve çamurun hidrostatik basıncı toplam olarak etkir. Kuyu çeperine herhangi bir derinlikte sirkülasyon sıvısı tarafından uygulanan toplam basınç eşdeğeri çamur yoğunluğu olarak ifade edilince daha anlamlı olur. Bu eşdeğer çamur yoğunluğu, kuyuda, o derinlikteki **Eşdeğer Sirkülasyon Yoğunluğudur**.

ESY = $(P_h + \Sigma P_a) / 0.052 \times Z$ burada;

ESY = Verilen noktadaki eşdeğer sirkülasyon yoğunluğu, lb/gal,

P_h = " " hidrostatik basınç, psi,

ΣP_a = " " noktanın yukarıdaki kesitlerdeki basınç düşümlerinin toplamı, psi,

Z = " " gerçek dikey derinliği, ft dir.

Tablo 5. Non Newtonian Akışkanlarda basınç kaybı eşitlikleri FfhhhFormülleriEşitlikleri

	<u>Bingham Plastik Model</u>	<u>Power Law Model</u>
Ortalama Hız \bar{v}	$\bar{v} = \frac{q}{2.448d^2}$	$\bar{v} = \frac{q}{2.448d^2}$
	$\bar{v} = \frac{q}{2.448(d_2^2 - d_1^2)}$	$\bar{v} = \frac{q}{2.448(d_2^2 - d_1^2)}$
Akış Davranış Parametreleri	$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$	$n = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$
Turbulans Kriteri	$\tau_v = \theta_{300} - \mu_p$	$K = \frac{510\theta_{300}}{511^n}$
	<u>Boru</u> $N_{He} = \frac{37,100 \rho \tau_y d^2}{\mu_p^2}$	$N_{Re}, \text{Şekil 37 den}$
	$N_{Re}, \text{Şekil 36 dan}$	$N_{Re} = \frac{89,100 \rho (\bar{v})^{2-n} \left[\frac{0.0416d}{3+1/n} \right]^n}{K}$
	$N_{Re} = \frac{928 \rho \bar{v} d}{\mu_p}$	
	$N_{He} = \frac{24700 \rho \tau_y (d_2 - d_1)^2}{\mu_p^2}$	$N_{Re}, \text{Şekil 37 den}$
	$N_{Re} = \frac{757 \rho \bar{v} (d_2 - d_1)}{\mu_p}$	$N_{Re} = \frac{109,000 \rho (\bar{v})^{2-n} \left[\frac{0.0208(d_2 - d_1)}{2+1/n} \right]^n}{K}$
Laminar Akım Basınç Kayıpları	<u>Boru</u> $\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu_p \bar{v}}{1,500d^2} + \frac{\tau_y}{225d}$	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{K \bar{v} \left(\frac{3+1/n}{0.0416} \right)^n}{144,000d^{1+n}}$
	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu_p \bar{v}}{1,000(d_2 - d_1)^2} + \frac{\tau_y}{200(d_2 - d_1)}$	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{K \bar{v} \left(\frac{2+1/n}{0.0208} \right)^n}{144,000(d_2 - d_1)^{1+n}}$
Turbulent Akım Basınç Kayıpları	<u>Boru</u> $\frac{dp_f}{dL} = \frac{f \rho \bar{v}^2}{25.8d}$	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f \rho \bar{v}^2}{25.8d}$
	veya $\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75} \bar{v}^{1.75} \mu_p^{0.25}}{1,800d^{1.25}}$	
	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f \rho \bar{v}^2}{21.1(d_2 - d_1)}$	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f \rho \bar{v}^2}{21.1(d_2 - d_1)}$
	veya $\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75} \bar{v}^{1.75} \mu_p^{0.25}}{1,396(d_2 - d_1)^{1.25}}$	

Tablo 6. Newtonian Akışkanlarda basınç kaybı eşitlikleri

Ortalama Hız \bar{v}	<u>Boru</u>	$\bar{v} = \frac{q}{2.448d^2}$
		$\bar{v} = \frac{q}{2.448(d_2^2 - d_1^2)}$
Akış Davranış Parametreleri		$\mu = \theta_{300}$
Turbulans Kriteri	<u>Boru</u>	$N_{Rec} = 2,100$
		$N_{Re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu}$
		$N_{Rec} = 2,100$
		$N_{Re} = \frac{757\rho\bar{v}(d_2 - d_1)}{\mu}$
Laminar Akım Basınç Kayıpları	<u>Boru</u>	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu \bar{v}}{1,500d^2}$
		$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu \bar{v}}{1,000(d_2 - d_1)^2}$
Turbulent Akım Basınç Kayıpları	<u>Boru</u>	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f\rho\bar{v}^2}{25.8d}$
	veya	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75}\bar{v}^{1.75}\mu_p^{0.25}}{1,800d^{1.25}}$
		$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f\rho\bar{v}^2}{21.1(d_2 - d_1)}$
	veya	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75}\bar{v}^{1.75}\mu^{0.25}}{1,396(d_2 - d_1)^{1.25}}$

5.11. SURGE VE SWAB BASINÇLARI [4] [12]

Sondaj dizisi veya boru kuyuya indirilip çıkartılırken kuyu çeperlerine hidrostatik basınçtan daha farklı basınçlar etki eder. Dizi kuyuya indirilirken karşılaşılan ek basınçlara **surge basınçları** denir. Eğer surge basınçları yeteri kadar yüksek olursa formasyon yırtılması nedeniyle sirkülasyon kaybı olur. Yani kuyudaki zayıf zonlar göz önüne alınırsa surge basınçları özel önem kazanır.

Borular kuyudan aşağıya doğru inerken borunun hacmi nedeniyle yer değiştiren çamur yukarı doğru hareket eder. Anülüste yukarı doğru hareket eden çamur- sirkülasyon sırasında çamurun neden olduğu ek basıncı anımsayalım- bir basınç oluşturur. Surge basınçları bu yoldan hesaplanır. Yani surge basınçlarını hesaplamada ESY hesaplama yöntemi uygulanır.

Boru hareketinden dolayı oluşan çamur hızı şu şekilde hesaplanır.

$$V = \{0.45 + (D_p^2) / (D_n^2 - D_p^2)\} 8100 / t \text{ burada,}$$

D_p = Boru çapı, inç,
 D_n = Kuyu çapı veya boru iç çapı, inç,
 t = İniş veya çıkış hızı, S/90 ft dir.

Boru yukarı doğru çekilirken kuyuda düşük basınçlar oluşur, buna **swab basınçları** denir. Swab basınçları için bulunan değer hidrostatik basınçtan çıkartılır, surge basınçlarında eklenir.

5.12. MATKAP HİDROLİK OPTİMİZASYONU [4] [12]

Sondaj verimi üzerinde en çok etkisi olan parametrelerden sondaj hidrolöji, pek çok değişkenin fonksiyonudur. Bir sondaj kulesi temel olarak; sondaj sıvısına hareket veren pompa(lar), sondaj akışkanını kuyu tabanına iletilmek üzere taşıyan yüzey hattı (stand pipe, deveboynu, swivel, kelly hose, kelly), drill pipe'lar, drill collarlar , matkap gibi ekipmanlara sahiptir.Sondaj takım dizisini katederek matkaptan çıkan çamur, anülüsten yükselerek tekrar tanka (veya havuza) ulaşır.Çamur bu yolları kat ederken karşılaştığı basınç kaybını pompanın pistonu aracılığıyla sağlanan basınç gücü ile aşar. Basınç, birim alana uygulanan yüküdür.

Akmaya karşı sürtünme direnci ve sirkülasyon sisteminde akışkanı ittiren basınç gereğinin ana bileşenleri şunlardır.

- Debi: Birim zamanda pompalanan akışkandır, m³/sn veya GPM (gallon per minute) olarak ölçülür.
- Akış Alanı: Akışkanın aktığı alan, m² veya inç².
- Sistem Uzunluğu: Akışkanın pompalandığı uzunluk, m veya feet.
- Akışkan Özellikleri: Akışkanın birim hacim ağırlığı, kg/m³ veya ppg (paund per gallon), viskozitesi, veya cps.

Sirkülasyon sisteminde daha yüksek debi	Sirkülasyon için daha yüksek basınç	
" " " küçük alan	" " " "	
" " " uzun boy	" " " "	
" " " ağır çamur	" " " "	
" " " viskoz çamur	" " " "	demektir.

5.13. JET MATKAP NOZUL BOYUTU SEÇİMİ

Jet matkap nozul boyutu seçimi, sürtünme basınç kaybı uygulamalarından biridir. Uygun nozul seçimiyle ilerleme hızı daha çok artar. Matkap dişlerinin ucundan, en kısa zamanda uzaklaştırılan kırıntının tekrar dişlerle teması ve bu biçimde enerjinin boş yere harcanması önlenir. Yumuşak formasyonlarda jet halindeki akışkan formasyonda ilerlemeye de yardım eder.

5.14. HİDROLİK PROGRAMLAR [4] [12]

Sondaj mühendisi, sondajın belli metreleri arasında kazı çapına, derinliğe ve kullanılan takım dizisine bağlı olarak oynayabileceği pompa debisi (pompa strok sayısı), matkap nozul çapları gibi değişkenler için bir strateji saptama ve bunu uygulamak durumundadır. Bu stratejiyi ekonomi belirler.

Hidrolik programın yapılma aşamaları şu biçimdedir.

- Kazılacak formasyonun derinlik aralığında kullanılacak çamur özellikleri belirlenir,
- Bu aralıkta kullanılacak matkap çapı ve sondaj dizisi belirlenir,
- Kuyuda, anülüste kırıntıları yukarı çıkartmak için gereken anülüs hızı belirlenir,
- Bu anülüs hızını elde etmek için gereken pompa debisi bulunur,
- Bu debiye karşılık gelen basınç kayıpları, akışkanın aktığı her çap ve bunların uzunluğu için bulunur (Bunun için önce akış tipinin saptanması gerekir),
- Anülüsteki basınç kayıpları bulunur, bu yapılırken ESY göz önüne alınır,
- Bütün bu basınç kayıpları toplamı, pompanın seçtiğimiz gömlek çapına karşılık gelen max. kullanılabilir çalışma basıncı değerinden çıkartılarak bulunan değer matkapta kullanılmak üzere nozul seçimine temel olur.

Matkapta kullanılacak maksimum hidrolik güç ve matkap nozullarındaki jet vuruşunun maksimum olması durumuna göre iki yaklaşımdan birisi seçilerek aşağıda anlatıldığı gibi matkap nozulları seçilir.

Matkap hidrolik optimizasyonunun bu iki yaklaşımı için geometrik yol kullanılır. Bunun için pompanın debi-basınç grafiği log-log kağıda çizilerek doğrunun eğimi "m" bulunur ("m" nin gerçek değeri sahada, pompanın değişik değerlerine karşılık gelen basınçların kayıt edilmesiyle bulunur). Sonra;

$$\text{Matkaptaki maksimum hidrolik güç için} \rightarrow (\Delta P)_H = (1/1 + m)P_{\max} \quad [1]$$

$$\text{Maksimum jet vuruş gücü için} \rightarrow (\Delta P)_J = (2 + 2/m)P_{\max} \quad [1]$$

Eşitliklerinden her iki yaklaşım için matkapta harcanacak basınç kayıpları bulunur ve log-log kağıttaki debi basınç grafiğinde bu değerler yardımıyla optimum debi (Q_{opt}) lar bulunur.

Hangi yaklaşımı uygulayacaksa onun basınç düşümü optimum kabul edilerek (ΔP_{opt}) matkapta harcanacak optimum güç ve aşağıdaki formüller yardımıyla diğer parametreler bulunur. Birinci yaklaşım için, toplam kullanılabilir basıncın matkapta 0.65 i kullanılır.

$$HHP_{\max} = \frac{(\Delta P_{opt})Q_{opt}}{1,714} \quad \text{Optimum hidrolik güç, hp,}$$

$$JF_{opt} = 0.01823C_d Q_{opt} \sqrt{\rho(\Delta P_{opt})} \quad \text{Optimum jet vuruş gücü, lbf,}$$

$$C_d = \text{Katsayı}(0.95)$$

$$(A_t)_{opt} = \sqrt{\frac{8,311 \times 10^{-5} \rho Q_{opt}^2}{C_d^2 (\Delta P_{opt})}} \quad \text{Optimum toplam nozul alanı, inç}^2,$$

$$D = 64 \sqrt{\frac{(A_t)_{opt}}{3\pi}} \quad \text{Bir nozulun 1/32 inç olarak optimum alanıdır.}$$

6. KORUMA BORULARI (CASINGS)[2][6] [7][8][9][11]

Jeotermal sondajlar sırasında ve sondaj bitiminde kuyuya çeşitli çap ve uzunlukta çelik borular indirilir. Koruma borusu olarak isimlendirilen borular pratikte İngilizceden gelen haliyle “casing” olarak anılırlar. Kuyuya indirilen boruların genel olarak fonksiyonları şunlardır :

- Kuyuda meydana gelebilecek göçmeleri engellemek,
- Yüzeğe yakın tatlı su akiferlerini tecrit ederek kirlenmelerini önlemek,
- Farklı rezervuar zonlarının istenileninden üretim yapılmasını sağlamak (istenmeyen rezervuarı tecrit etmek),
- Jeotermal akışkanın kuyudan akışını sağlamak,
- Basınç kontrolünü sağlamak,
- Kuyubaşı emniyet ekipmanlarının ve üretim donanımlarının tesbitini (montajını) sağlamak,

Gradyen kuyuları haricindeki jeotermal kuyulara (derin arama kuyuları, üretim ve reenjeksiyon) birden fazla koruma borusu indirilir. Koruma boruları (casings) için tüm teknik özellikler API (American Petroleum Institute) tarafından standardize edilmişlerdir. Koruma borularının çoğu API standartlarına uygun olarak imal ediliyorsa da, API standartları dışında üretilen koruma boruları da mevcuttur. API standartlarındaki borular Tablo 7’de, özellikleri Tablo 8’de görülebilir.

Tablo 7. API Standardında koruma boruları

Kalite (Grade)	Minimum Akma Mukavemeti (psi)	Minimum Çekme Mukavemeti (psi)
H-40	40.000	60.000
J-55	55.000	70.000 – 95.000
K-55	55.000	70.000 – 95.000
C-75	75.000	95.000
N-80	80.000	100.000
L-80	80.000	100.000
C-95	95.000	105.000
P-110	110.000	125.000

6.1. Jeotermal Kuyularda Kullanılan Casingler

Jeotermal kuyularda kullanılan koruma boruları kuyu derinliği, delinen formasyonların yapısı, üretilecek akışkanın sıcaklığı, basıncı, debisi, kimyasal özellikleri gözönüne alınarak kuyu tabanından yukarı doğru tasarlanır. Yüzeğden itibaren kuyulara indirilen belli başlı casing tipleri şunlardır.

- Kondüktör koruma boruları (Conductor casing)
- Yüzeğ koruma boruları (Surface casing)
- Ara koruma boruları (Intermediate casing)
- Üretim koruma boruları (Production casing)
- Liner

Kondüktör koruma borusu, yüzeğde bulunan gevşek toprak, kum vb. tabakaların kuyuya dökülmesini, çamurla taşınıp yeraltında boşluklar oluşmasını önlemek, sirkülasyon sıvısının flow-line hattı vasıtasıyla eleklerle taşınmasını sağlamak amacıyla indirilir. Kuyuda kendinden sonra indirilen boru dizilerinin yükünün bir kısmını üzerine alır. Bu nedenle yüzeğ kadar çimentolanır.

Yüzeğ koruma borusu, yeryüzüne yakın gevşek tabakaları tutmak ve yeraltı suyunun kirlenmesini önlemek amacıyla indirilir. Derinlikleri birkaç yüz metreyi geçmez. Yüzeğ koruma boruları kuyuya indirildikten sonra üzerine emniyet vanaları bağlanır. Yüzeğ koruma borusu kendinden sonra indirilecek boruların yükünün bir kısmını taşıyacağından yüzeğ kadar çimentolanır.

Tablo 8. API casingler

Casing Özellikleri				Manşonlu Ağırlık		Manşon Dış Çapı		Casing İç Çapı		MATKAP ÇAPI		ÇAPSAL AÇIKLIK		
Casing Dış Çapı O.D.		Manşonlu Ağırlık		Manşon Dış Çapı		Casing İç Çapı		MATKAP ÇAPI		ÇAPSAL AÇIKLIK		Metric		
Inch	mm	Lbs/Ft	kg/m	Inch	mm	Inch	mm	Inch	mm	Binler ayıracı	1/64 e en yakın	Mm	En Yakın mm	
4 ^{1/2}	114,3	9,50	14,14	5,00	127,00	4,090	103,89	3 ^{7/8}	98,43	0,215	7/32	5,46	5	
4 ^{1/2}	114,3	10,50	15,63	5,00	127,00	4,052	102,92	3 ^{7/8}	98,43	0,177	11/64	4,50	4	
4 ^{1/2}	114,3	11,60	17,26	5,00	127,00	4,000	101,60	3 ^{7/8}	98,43	0,125	1/8	3,18	3	
4 ^{1/2}	114,3	13,50	20,09	5,00	127,00	3,920	99,57	3 ^{3/4}	95,25	0,170	11/64	4,32	4	
5	127,0	13,00	19,35	5,563	141,30	4,494	114,15	4 ^{1/4}	107,95	0,244	1/4	6,20	6	
5	127,0	15,00	22,32	5,563	141,30	4,408	111,96	4 ^{1/4}	107,95	0,158	5/32	4,01	4	
5	127,0	18,00	26,79	5,563	141,30	4,276	108,61	4 ^{1/8}	104,78	0,151	5/32	3,84	4	
5 ^{1/2}	139,7	14,00	20,83	6,050	153,67	5,012	127,30	4 ^{3/4}	120,65	0,262	17/64	6,65	7	
5 ^{1/2}	139,7	15,50	23,07	6,050	153,67	4,950	125,73	4 ^{3/4}	120,65	0,200	13/64	5,08	5	
5 ^{1/2}	139,7	17,00	25,30	6,050	153,67	4,892	124,26	4 ^{3/4}	120,65	0,142	9/64	3,61	4	
5 ^{1/2}	139,7	20,00	29,76	6,050	153,67	4,778	121,36	4 ^{5/8}	117,48	0,153	5/32	3,89	4	
5 ^{1/2}	139,7	23,00	34,23	6,050	153,67	4,670	118,62	4 ^{1/2}	114,30	0,170	11/64	4,32	4	
6 ^{5/8}	168,3	20,00	29,76	7,390	187,71	6,049	153,64	5 ^{7/8}	149,23	0,174	11/64	4,42	4	
6 ^{5/8}	168,3	24,00	35,72	7,390	187,71	5,921	150,39	4 ^{3/4}	120,65	1,171	1 ^{11/64}	29,74	30	
6 ^{5/8}	168,3	28,00	41,67	7,390	187,71	5,791	147,09	4 ^{3/4}	120,65	1,041	1 ^{3/64}	26,44	26	
6 ^{5/8}	168,3	32,00	47,62	7,390	187,71	5,675	144,15	4 ^{3/4}	120,65	0,925	59/64	23,50	23	
7	177,8	17,00	25,30	7,656	194,46	6,538	166,07	6 ^{1/4}	158,75	0,288	9/32	7,32	7	
7	177,8	20,00	29,76	7,656	194,46	6,456	163,98	6 ^{1/4}	158,75	0,206	13/64	5,23	5	
7	177,8	23,00	34,23	7,656	194,46	6,366	161,70	6 ^{1/4}	158,75	0,116	7/64	2,95	3	
7	177,8	26,00	38,69	7,656	194,46	6,276	159,41	6 ^{1/8}	155,58	0,151	5/32	3,84	4	
7	177,8	29,00	43,16	7,656	194,46	6,184	157,07	6	152,40	0,184	3/16	4,67	5	
7	177,8	32,00	47,62	7,656	194,46	6,094	154,79	6	152,40	0,094	3/32	2,39	2	
7	177,8	35,00	52,09	7,656	194,46	6,004	152,50	5 ^{7/8}	149,23	0,129	1/8	3,28	3	
7	177,8	38,00	56,55	7,656	194,46	5,920	150,37	5 ^{7/8}	149,23	0,045	3/64	1,14	1	
7 ^{5/8}	193,7	24,00	35,72	8,500	215,90	7,025	178,44	6 ^{3/4}	171,45	0,275	9/32	6,99	7	
7 ^{5/8}	193,7	26,40	39,29	8,500	215,90	6,969	176,21	6 ^{3/4}	171,45	3,219	7/32	81,76	82	
7 ^{5/8}	193,7	29,70	44,20	8,500	215,90	6,875	174,63	6 ^{3/4}	171,45	0,125	1/8	3,18	3	
7 ^{5/8}	193,7	33,70	50,15	8,500	215,90	6,765	171,83	6 ^{5/8}	168,28	0,140	9/64	3,56	4	
7 ^{5/8}	193,7	39,00	58,04	8,500	215,90	6,625	168,28	6 ^{1/4}	158,75	0,375	3/8	9,53	10	

Tablo 8. API casingler, devam

Casing Dış Çapı O.D.		Casing Özellikleri				Mankap Çapı		ÇAPSAL AÇIKLIK			
		Manşonlu Ağırlık	Manşon Dış Çapı	Casing İç Çapı	Metric En Yakın						
Inch	mm	Lbs/Ft	kg/m	Inch	mm	Inch	mm	Binler ayırıcı	Inch 1/64 e en yakın	Mm	
8 ^{5/8}	219,1	24,00	35,72	9,625	244,48	8,097	205,66	0,222	7/32	5,64	6
8 ^{5/8}	219,1	28,00	41,67	9,625	244,48	8,017	203,63	0,142	9/64	3,61	4
8 ^{5/8}	219,1	32,00	47,62	9,625	244,48	7,921	201,19	0,046	8/64	1,17	1
8 ^{5/8}	219,1	36,00	53,57	9,625	244,48	7,825	198,76	1,075	1 ^{5/64}	27,31	27
8 ^{5/8}	219,1	40,00	59,53	9,625	244,48	7,725	196,22	0,975	31/32	24,77	25
8 ^{5/8}	219,1	44,00	65,48	9,625	244,48	7,625	193,68	0,875	7/8	22,23	22
8 ^{5/8}	219,1	49,00	72,92	9,625	244,48	7,511	190,78	0,761	49/64	19,33	19
9 ^{5/8}	244,5	32,30	48,07	10,625	269,88	9,001	228,63	0,251	1/4	6,38	6
9 ^{5/8}	244,5	36,00	53,57	10,625	269,88	8,921	226,59	0,171	11/64	4,34	4
9 ^{5/8}	244,5	40,00	59,53	10,625	269,88	8,835	224,41	0,210	13/64	5,33	5
9 ^{5/8}	244,5	43,50	64,74	10,625	269,88	8,755	222,38	0,130	1/8	3,30	3
9 ^{5/8}	244,5	47,00	69,94	10,625	269,88	8,681	220,50	0,181	3/16	4,60	5
9 ^{5/8}	244,5	53,50	79,62	10,625	269,88	8,535	216,79	0,160	5/32	4,06	4
10 ^{3/4}	273,1	32,75	48,74	11,750	298,45	10,192	258,88	0,317	5/16	8,05	8
10 ^{3/4}	273,1	40,50	60,27	11,750	298,45	10,050	255,27	0,175	11/64	4,45	4
10 ^{3/4}	273,1	45,50	67,71	11,750	298,45	9,950	252,73	0,075	5/64	1,90	2
10 ^{3/4}	273,1	51,00	75,90	11,750	298,45	9,850	250,19	0,225	7/32	5,71	6
10 ^{3/4}	273,1	55,50	82,59	11,750	298,45	9,760	247,90	0,135	9/64	3,43	3
11 ^{3/4}	298,5	42,00	62,50	12,750	323,85	11,084	281,53	0,084	5/64	2,13	2
11 ^{3/4}	298,5	47,00	69,94	12,750	323,85	11,000	279,40	0,375	3/8	9,53	10
11 ^{3/4}	298,5	54,00	80,36	12,750	323,85	10,880	276,35	0,255	1/4	6,48	6
11 ^{3/4}	298,5	60,00	89,29	12,750	323,85	10,772	273,61	0,147	9/64	3,73	4
13 ^{3/8}	339,7	48,00	71,43	14,375	365,13	12,715	322,96	0,465	15/32	11,81	12
13 ^{3/8}	339,7	54,50	81,11	14,375	365,13	12,615	320,42	0,365	23/64	9,27	9
13 ^{3/8}	339,7	61,00	90,78	14,375	365,13	12,515	317,88	0,265	17/64	6,73	7
13 ^{3/8}	339,7	68,00	101,20	14,375	365,13	12,415	315,34	0,165	11/64	4,19	4
13 ^{3/8}	339,7	72,00	107,15	14,375	365,13	12,347	313,61	0,347	11/32	8,81	9
16	406,4	65,00	96,73	17,000	431,80	15,250	387,35	0,250	1/4	6,35	6
16	406,4	75,00	111,61	17,000	431,80	15,125	384,18	0,375	3/8	9,53	10
16	406,4	84,00	125,01	17,000	431,80	15,010	381,25	0,260	17/64	6,60	7
20	508,0	94,00	139,89	21,000	533,40	19,124	485,75	1,624	1 ^{5/8}	41,25	41
20	508,0	106,50	158,49	21,000	533,40	19,000	482,60	1,500	1 ^{1/2}	38,10	38

Ara koruma borusu, sondajın emniyetli devamını olanaksız kılacak şartlar oluşması durumunda kuyuya indirilir. Öte yandan bazı jeotermal sahalarda rezervuardan daha bol akışkan elde etmek gibi

nedenlerle, ara koruma borusu dizisi rezervuarın hemen üstüne gelecek şekilde indirilerek çimentolanır. Bu durumda üretim koruma borusu olarak görev yapar.

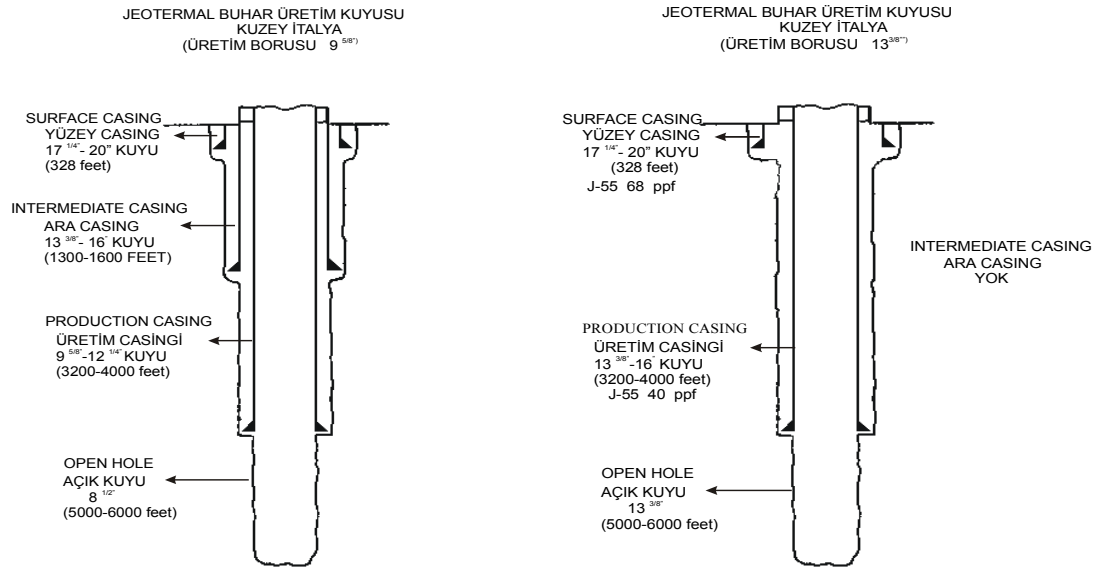
Üretim koruma borusu, rezervuardaki akışkanın üretiminin yapılacağı dizidir. Bu nedenle mümkün olduğu kadar rezervuar seviyesine yakın bir yere indirilerek yüzeye kadar çimentolanır. Tüm koruma borularının dizilerinin uygun tipte seçilip yüzeye kadar istenen kalitede çimentolanmaları önemli iken rezervuar akışkanının içinden akacağı ve en çok etkileyeceği boru dizisi olan üretim koruma borusunun seçimi, kuyuya indirilmesi ve çok düzgün çimentolanması bir kat daha önemlidir.

Liner'lar, rezervuar içine indirilen kısa dizilerdir. Üretim anında rezervuarda göçme tehlikesi varsa veya rezervuar kayaç ince malzeme içeriyorsa üretim koruma borusu içinden kuyuya liner adı verilen delikli borular indirilir. Bu dizi yüzeye kadar uzanmayıp üretim koruma borusu içinde asılır veya üst uçları üretim koruma borusu içinde kalacak şekilde kuyu tabanına oturtulurlar.

Yukarıda da belirtildiği gibi jeotermal sahanın özel şartlarına bağlı olarak söz konusu boru dizilerinden kuyu programında öngörülenlerin hepsi kuyuya indirilir veya kuyu şartları elverişli ise gerekli görülenlerle teçhiz edilir.

Bir jeotermal kuyunun, uygun kalite koruma borusu ile teçhizi ve çimentolanması kuyu ömrü ile doğru orantılıdır.

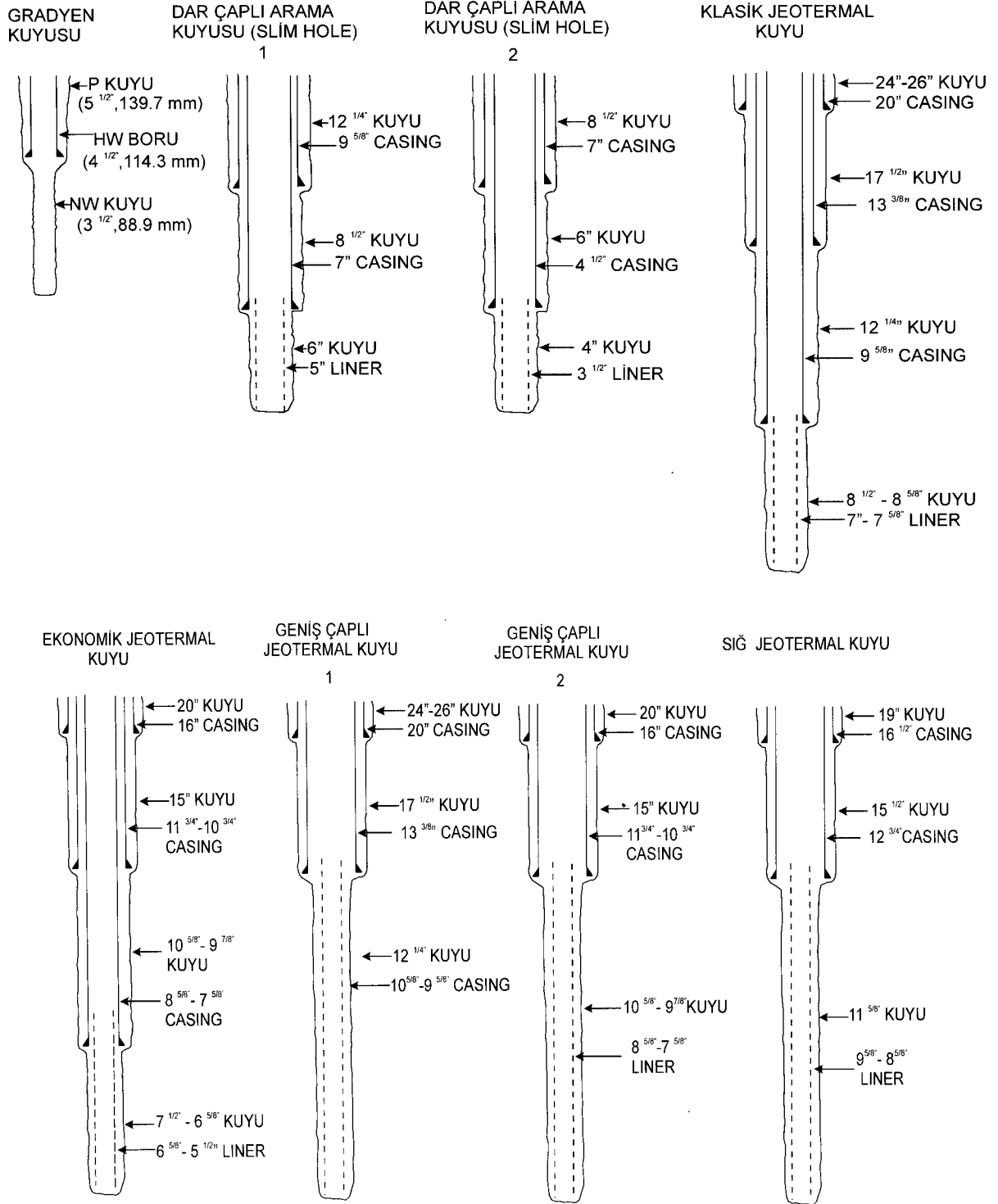
Türkiye'de ve dünyada bazı jeotermal sahalarda uygulanan kuyu teçhiz dizaynları ile İzmir Valiliği adına hazırlanan jeotermal enerji yönetmeliğinde öngörülen kuyu koruma borusu dizaynları Şekil 40 ve 41'de verilmiştir.



Şekil 40. İtalya-Larderello jeotermal sahasındaki kuyu dizaynları

Koruma boruları şu yapısal özellikleriyle tanımlanırlar :

- Malzeme Kalitesi (grade)
- Uzunluk
- Dış Çap
- Et kalınlığı
- Ağırlık
- Dış tipleri ve Bağlantı türleri



Şekil 41. İzmir Valiliği Jeotermal Enerji Yönetmeliği'nde öngörülen kuyu ve casing dizaynları

6.1.1. Malzeme Kalitesi (Grade)

Koruma boruları çelikten imal edilmiş olup, yapıldıkları çeliğin kalitesine göre standardize edilmişlerdir. Malzeme cinsi itibarıyla minimum akma mukavemetleri (minimum yield strength) ile tanımlanırlar.

Boru malzeme cinsinin gösterimi, bir harf ile iki veya üç haneli numaradan oluşur (N-80, J-55,...gibi) Genel olarak harfler alfabetik olarak sona gidildikçe, borunun akma mukavemetinin arttığını belirtir. Örneğin N-80 yada N kalite boru, H-40 borudan daha yüksek akma mukavemetine sahiptir. Harfin yanında bulunan sayı ise minimum akma mukavemetinin psi cinsinden binde bir ile gösterimidir. Örneğin; N-80, minimum 80.000 psi akma mukavemetini ifade eder. Ortalama akma mukavemeti genellikle minimum değerden 10.000 psi fazladır (N-80 casingler için 90.000 psi).

Ortalama akma mukavemetleri eksenel olmayan yüklerin (biaxial loading) değerlendirilmesinde kullanılırken, minimum değer ise patlama (burst) ve çökme (collapse) mukavemetlerinin hesaplamasında göz önüne alınır.

Farklı kalitedeki koruma boruları kolay ayırt edilmeleri için değişik renkte boyanırlar. Boyama, manşon üzerine veya manşondan belli mesafeye bant şeklinde çizilerek yapılır. H-40 boyasız veya bir siyah, J-55 bir yeşil, K-55 iki yeşil, N-80 bir kırmızı, P-110 bir beyaz, C-75 bir mavi, C-95 bir kahverengi, L-80 kırmızı-kahverengi ve V-150 eflatun (mor) bant ile gösterilir. Tablo 8'de API Standartlarındaki casing özellikleri görülebilir.

C kalite borular, H₂S'e dayanıklı olmaları nedeniyle özellikle doğalgaz sondajlarında kullanılır.

6.1.2. Uzunluk (Length)

Değişik uzunluklarda imal edilen koruma boruları üç gruba ayrılır :

- I. Grup 4,88 - 7,62 m (16-25 ft)
- II. Grup 7,62 - 10,36 m (25-34 ft)
- III. Grup 10,36 – 14,63 m (34-48 ft)

6.1.3. Dış Çap (OD, Outside Diameter)

Koruma borularının dış çapları diğer özellikleri gibi standardize edilmişlerdir (API Std.5A, 5AC, ve 5AX). Dış çapları 4 ½" ile 20" arasında değişen 14 farklı tipte üretilmektedirler. Ancak isteğe bağlı olarak standart dışı borularda yapılmaktadır.

6.1.4. Ağırlık (Weight)

Koruma borularının ağırlığı, birim uzunluklarının ağırlığı ile belirtilir (lb/ft veya kg/m). Her iki uçlarına dış açılmış ve bir uçlarına manşon bağlanmıştır (extreme line casingler hariç). Koruma borularının ağırlığı üç şekilde belirtilir :

- I. Nominal ağırlık (nominal weight)
- II. Dolu uçlu ağırlık (plain end weight)
- III. Dişli ve Manşonlu ağırlık (threated and coupled weight)

6.1.4.1. Nominal Ağırlık (Nominal Weight)

Nominal ağırlık, esas olarak sipariş esnasında koruma borusunun tanımlanması amacıyla kullanılmakta olup kesin ağırlık değildir. İki ucuna dış açılmış ve bir tarafına manşon bağlanmış 20 feet uzunluğundaki borunun bir foot'unun teorik ağırlığıdır.

Nominal ağırlık W_n , aşağıdaki formüle göre hesaplanır :

$$W_n = 10,68(D-t)t + 0,0722 D^2 \text{ lb/ft, burada}$$

D : Dış çap (in) , t: Et kalınlığı (in)

6.1.4.2. Dolu Uçlu Ağırlık (Plain End Weight)

Koruma borusunun dişsiz ve manşonsuz ağırlığıdır. Dolu uçlu ağırlık API Standards, Bulletin 5C3'den alınan aşağıdaki formüle göre hesaplanır :

$$W_{pew} = 10,68(D-t)t \text{ lb/ft veya}$$

$$W_{pew} = 0,02466(D-t)t \text{ kg/m, burada}$$

W_{pew} : Dolu uçlu ağırlık (lb/ft veya kg/m), D : dış çap (in), t : et kalınlığı (in)

6.1.4.3. Dişli ve Manşonlu Ağırlık (Threated and Coupled Weight)

Koruma borusunun ucundaki değişikliklere bağlı olarak değişen ağırlıktır. Diş açılması vb.gibi işlemlerle boru ucunda meydana gelen ağırlık değişimlerinin dolu uçlu ağırlığa eklenmesiyle bulunur :

$$W = \frac{(20 - \frac{N_L + 2J}{24}) W_{pe} + \text{manşon ağırlığı} - \text{diş açma sırasında azalan ağırlık}}{20}$$

W : Diş açılmış ve manşon bağlanmış ağırlık (lb/ft)

N_L : Manşon uzunluğu (in)

J : Sıkma pozisyonunda borunun sonundan manşonun merkezine olan uzaklık (in)

W_{pe} :Dolu uçlu ağırlık

6.1.5. Et Kalınlığı (Wall Thickness)

Et kalınlığı, borunun dış ve iç çapı arasındaki farkla belirlenir.Et kalınlığı koruma borularının yük taşıma kapasiteleri açısından önemlidir. Boru uzunluğu boyunca et kalınlığının üniform olması arzu edilir ancak bunu pratikte gerçekleştirmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle standartlara göre et kalınlığının % 12.5 toleransı vardır. Yani boru uzunluğu boyunca herhangi bir bölümde et kalınlığı %12.5 dan az olmamalıdır.Koruma borusunun dış çapı ve et kalınlığı iç çapını belirler. İç çapın düzgün olması, daha sonra içinden geçecek matkap ve borular yönünden önemlidir. Bu nedenle çimentolama öncesi borular kuyuya inmeden içlerinden geçirilen "masterlarla" iç çap yönünden kontrol edilir. Master, borunun bir ucundan girdiğinde öbür ucundan takılmadan geçmelidir. Masterların çapı kataloglarda "Drift Diameter" olarak geçer.

6.1.6. Diş ve Bağlantı Tipleri

Casinglerin birbirlerine bağlanmaları için uç kısımlarına diş açılır. Dişler tip ve sızdırmazlıklarına göre şu gruplara ayrılır (Şekil 42):

a) Sıkılan Yüzeyleri Sızdırmaz Dişler (Tapered Seal Threads)

- API Yuvarlak dişli
- Butress Dişli

b) Metal-Metal Sızdırmaz Yüzeyli (Metal-to-Metal Seal Threads)

- Extreme Line Dişli

6.1.6.1. API Yuvarlak Dişli Borular (API Round Thread)

İmalatı ve kullanımı kolay olması nedeniyle sık kullanılan diş tipidir.Dişlerin ve girintilerin uçları yuvarlatılmış olup diş yan yüzeyleri 30° eğimlidir. Diş sayısı genellikle 8 diş/in dir.Yani 1 inch uzunlukta 8 diş vardır (Bunların seyrekte olsa 10 diş/in olanları da vardır).Boru üzerine diş açılırken et kalınlığı azaldığından diş kesitlerinin taşıyabileceği yük azalmaktadır.8 dişli borularda dişler derindir.

Dişlerin taşıyabileceği yük kapasitesini arttırmak için (diş açılmamış bölümün kapasitesine çıkarmak üzere) boruların uçları kalınlaştırılır (External Upset).

Yuvarlak dişli borular, diş açılmış bölümün uzunluğuna göre iki tiptir :

- Kısa Dişli ve Manşonlu (Short Thread and Couplings) (STC)
- Uzun Dişli ve Manşonlu (Long Thread and Couplings) (LTC)

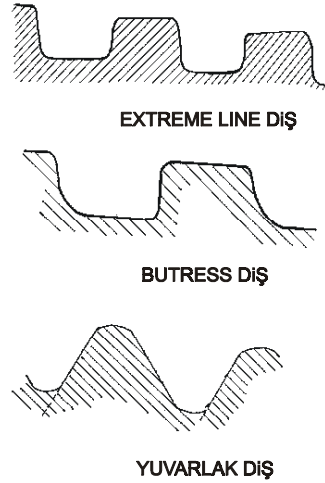
Uzun dişli boruların yük taşıma kapasiteleri kısıtlara göre daha fazladır.

6.1.6.2. Buttress Dişli Borular

Buttress tip borular derin kuyularda, ağır borulardan oluşan dizilerin yuvarlak dişlerle taşınmaması durumunda kullanılır. Bunların taşıyıcı yüzeyleri yataydır ve manşonun dış yüzeyi boru dış yüzeyine yatay olarak oturur. Yüzeylerde kayma sözkonusu olmayacağından taşınabilecek yük fazladır. Jeotermal sondajlarda sık kullanılan buttress dişlerin yapımı zordur ve diğer diş tiplerine göre bu borular daha pahalıdır.

6.1.6.3. Extreme Line Dişler

Metal-metal sızdırmaz yüzeyli dişlerden olan extreme line borularda sızdırmazlık, boru yüzeylerinin birbiri üzerine oturması ile sağlanır. Bu borularda manşon yoktur ve iki boru birbirine uçlarındaki dişlerle bağlanırlar. Borulardan birinin ucunda içe çıkıntılı bir yüzey vardır ve bu çıkıntı dişler bağlandığında diğer borunun yüzeyi üzerine çepeçevre oturarak sızdırmazlığı sağlar. Boru kullanılırken bu çıkıntının hasar görmemesine dikkat edilmelidir.



Şekil 42. API diş tipleri

6.2. Boruların Bağlanması

Borular bağlanırken belli bir momentle sıkılırlar. Sıkma işlemi dişlerin yuvalarına girmelerini ve diş tepelerinin yağ dolu girintilerin yüzeyine oturtulmasını sağlar. Her boru için belirli bir sıkma momenti uygulanır (bu değerler kataloglarda verilir). Sıkma işlemi diş kesitlerinde bir ön gerilme oluşturur. Aşırı sıkımlar fazla gerilmelere ve hasara neden olurlar. Boruların gereğinden düşük torkla sıkılmaları ise başta çözülme olmak üzere bir çok olumsuzluğa neden olabilir.

Daha öncede belirtildiği gibi borular (extreme line olanlar hariç) manşonlarla bağlanırlar. Manşonlar her borunun bir ucuna sıkıca bağlanmıştır. Bağlama işleminde, alttaki borunun manşonlu ucuna üsttekinin manşonsuz ucu bağlanır.

Dizinin uzunluğu, kendisini oluşturan boruların toplam uzunluğundan azdır. Çünkü boruların uzunluğu manşonlu uzunluklardır ve iki boru birbirine bağlandığında ölçülen toplam uzunluk bir borunun diğeri içine giren kısmı kadar azdır ve bu değer manşonlu uzunluğun yarısı kadardır. Ancak borular

bağlandığında, uçları manşon ortasına kadar gelmez ve yüzeyleri çakışmaz. Boru ucunun manşon ortasına uzaklığı (J), manşon boyu (L_c) ile gösterildiğinde bir borunun diğeri içine giren kısmının uzunluğu (L_j), $L_j = 0.5 L_c - J$ olur. Buna “bağlama kaybı” denir ve her bağlantı için boya azalmayı gösterir. L derinliğindeki bir kuyuya indirilecek dizinin uzunluğu ve kullanılacak boru sayısı buna dayanılarak hesaplanabilir. Hesap yapabilmek için kullanılacak boruların boyları seçilmelidir. L_c , L_j ve J değerleri boru kataloglarında verilir. Pratikte, imalatçı firmalar tarafından boruların son dış ucunda borunun sıkılması gereken seviyeye, bir küçük üçgen işareti konur. Boruların, bu işarete gelinceye kadar sıkılması önerilir.

6.3. Koruma Borularına Etki Eden Yük ve Kuvvetler

Koruma boruları kuyuya indirildiğinde değişik yük ve kuvvetlerin etkisi altında kalırlar. Bunlar :

- Dış Basınç (External Pressure, Collapse Pressure)
- İç Basınç (Internal Pressure, Burst Pressure)
- Eksenel Yük (Axial Loading)
- Yüzdürme Kuvveti (Buoyancy Factor)
- Bükülme Kuvveti (Bending Force)

6.3.1. Dış Basınç (External Pressure)

Koruma borusuna dıştan gelen ve içe doğru göçmeye zorlayan basınçtır. Boru dizisi kuyuya indirilirken veya indirildikten sonra anülüste (sondaj takım dizisi veya boru dizisi ile kuyu deliği arasındaki boşluk) bulunan çamurun hidrostatik basıncı, dış basınç olarak etkir. Ayrıca, yeraltındaki yüksek basınçlı formasyonlar ile plastik tabakaların deformasyonu ve şişen killi tabakalar boruyu göçmeye zorlayan diğer kuvvetlerdir. Çamur sütununun hidrostatik basıncı derinlikle artar, bu nedenle göçme basıncı (Collapse) kuyu tabanında maksimum, kuyubaşında ise sıfırdır. Buradan hareketle :

Dış Basınç $C = \text{çamur yoğunluğu} \cdot \text{derinlik} \cdot \text{gravitasyon hızı}$

$$= \rho_m \cdot g \cdot h \quad C_{\text{psi}} = 0.052 \cdot \rho \cdot h \quad (\rho : \text{çamur yoğunluğu ppg, } h : \text{derinlik feet})$$

olarak hesaplanabilir. Aynı formül, metrik sistemde :

$$C_{\text{bar}} = 0.0981 \cdot \rho \cdot h \quad ((\rho : \text{çamur yoğunluğu kg/l, } h : \text{derinlik m}) \text{ olur.}$$

Boru dizaynında, kuyu tabanındaki göçme basıncının (C_{psi} veya C_{bar}) koruma borusunun göçme dayanımını aşmayacağından emin olunmalıdır. Koruma borularının dayanabilecekleri göçme basıncı malzemenin mukavemeti ile borunun geometrisine bağlıdır. Boru geometrisi, dış çapın et kalınlığına oranı ile gösterilir (D/t). Malzeme basınç altında gerilir ve belirli bir yere kadar elastik olarak uzar. Akma sınır değerine ulaşıldığında ise plastik deformasyon başlar.

6.3.1.1. Elastik Göçme (Elastic Collapse)

Elastik göçme basıncı aşağıdaki formüle göre hesaplanır :

$$P_c = \frac{2E}{1-\nu^2} \times \frac{1}{\frac{D}{t} \left(\frac{D}{t} - 1 \right)^2} \quad \text{Burada,}$$

E : Çeliğin Young Modulu, ν : Poisson Oranı, t : Koruma Borusunun Et Kalınlığı, D : Koruma borusunun dış çapı

Imperial birim sisteminde $E = 30 \times 10^6$ psi ve $\nu = 0.3$ dür. Formül basitleştirildiğinde,

$$P_c = \frac{46.95 \times 10^6}{\frac{D}{t} \left(\frac{D}{t} - 1 \right)^2} \text{ psi olur. Metrik birimde ise yukarıda formül } P_c = \frac{2.198 \times 10^6}{\frac{D}{t} \left(\frac{D}{t} - 1 \right)^2} \text{ bar olur.}$$

Yukarıda verilen eşitlikler tablo 9' da verilen D/t oranlarına uygulanabilir.

Tablo 9. Elastik çökme için D/t oranı

Kalite (Grade)	D/t oranı
H-40	42.70 ve daha büyük
J-55	37.20 ve daha büyük
K-55	37.20 ve daha büyük
C-75	32.05 ve daha büyük
N-80	31.05 ve daha büyük
L-80	31.05 ve daha büyük
C-95	29.18 ve daha büyük
P-110	26.20 ve daha büyük

6.3.1.2. Plastik Göçme (Plastic Collapse)

Plastik bölgede, minimum göçme basıncı aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir :

$$P_p = Y \left(\frac{A}{D/t} - B \right) - C$$

A, B, C koruma borusunun yapımında kullanılan çeliğin kalitesine bağlıdır. Y ise akma mukavemetidir. Yukarıdaki formül Tablo 9' da verilen D/t oranlarına uygulanabilir. Öncelikle D/t oranı saptanmalıdır. Eğer bulunan değer Tablo 10' da verilen değerlerin sınırları içine düşüyorsa A, B, C doğrudan tablodan okunabilir.

Tablo 10. Plastik göçme için formül faktörleri ve D/t oranları

Kalite (Grade)	FORMUL FAKTÖRÜ			D/t oranı
	A	B	C	
H-40	2.950	0.0463	755	16.44-26.62
J-55	2.990	0.0541	1205	14.80-24.99
K-55	2.990	0.0541	1205	14.80-24.99
C-75	3.060	0.0642	1805	13.67-23.09
N-80	3.070	0.0667	1955	13.38-22.46
L-80	3.070	0.0667	1955	13.38-22.46
C-95	3.125	0.0745	2405	12.83-21.21
P-110	3.180	0.0820	2855	12.42-20.29

6.3.1.3. Ara Geçiş Göçme Basıncı (Transition Collapse Pressure)

Elastik ve plastik bölgeler arasındaki ara geçiş zonunda çeliğin göçme davranışı aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir :

$$P_t = Y \left(\frac{F}{D/t} - G \right) \text{ psi, Burada F ve G sabit olup hesaplanmaları aşağıdaki gibidir :}$$

$$F = \frac{46.95 \times 10^6 \left(\frac{3B/A}{2+B/A} \right)^3}{Y \left[\frac{3B/A}{2+(B/A)} \right] \left[1 - \frac{3B/A}{2+B/A} \right]^2} \text{ ve } G = \frac{FB}{A} \text{ dir.}$$

F ve G değerleriyle birlikte D/ t değer aralığı (Tablo 11) yukarıdaki formüle uygulanabilir.

Tablo 11. Geçiş (ara) göçme basıncı için formül faktörleri ve D/ t oranları

Kalite (Grade)	FORMUL FAKTÖRÜ		D/t oranı
	F	G	
H-40	2.047	0.0312	26.62-42.70
J-55	1.990	0.0360	24.99-37.20
K-55	1.990	0.0360	24.99-37.20
C-75	1.985	0.0417	23.09-32.05
N-80	1.998	0.0434	22.46-31.05
L-80	1.998	0.0434	22.46-31.05
C-95	2.047	0.0490	21.21-28.25
P-110	2.075	0.0535	20.29-26.20

6.3.2. İç Basınç (Internal Pressure)

Koruma borusu kuyuya set edildikten sonra, akışkanın casing içine girdiği andaki basıncı boruya etkileyen "İç Basınç" tır. Bu basınç, casingi dışa doğru patlamaya zorlar. Bu yüzden bu basınca "Patlama Basıncı" (Burst Pressure) denir. Jeotermal sahalarda, özellikle yüksek gaz basıncı içeren kuyularda, üretim yapan kuyu kapatıldığı zaman, kuyubaşında biriken gazın yarattığı basınç patlatma basıncına verilebilecek en iyi örneklerden biridir. Öte yandan çimentolama operasyonlarında, çimentonun çamur veya su ile ötelenmesi sırasında da kuyu başında patlama basıncına yakın basınçlar oluşabilir. Bu örneklerden de anlaşılacağı üzere patlama basıncı kuyu başında maksimum, kuyu dibinde ise minimumdur.

Casingler için minimum patlama basıncı Barlow formülü ile hesaplanır.

$$P = 0.875 \left(\frac{2Yt}{D} \right) \text{ Burada, t:Casing et kalınlığı, D:Casing dış çapı ve Y:Minimum akma mukavemetidir.}$$

0.875 katsayısı, boru et kalınlığının toleransı ile ilgilidir. Daha önce de belirtildiği gibi % 12.5 olan bu değer nominal et kalınlığından çıkartılarak, diğer bir deyişle, et kalınlığının en az olduğu yere göre hesap edilebilir. Manşon bağlantılarında iç basınç değeri, dolu uçlu borulardaki gibidir. Ancak bağlantılarda sızdırma olmaması için basınç üst sınırı daha düşük değerlerde tutulur ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır :

$$P = Y_m \left(\frac{D_m - d_1}{D_m} \right) \text{ Burada, } Y_m \text{:Manşonun minimum akma mukavemeti, } D_m \text{:Manşonun nominal dış}$$

çapı, d_1 :Sıkılmış boruda manşonun boru ucuna gelen yerdeki dişinin iç çapını gösterir.

Buttress dişli borular için :

$$d_1 = E_7 - (L_7 + I)T + 0.62$$

E_7 : Yanal yüzey çapı, mm (API Std 5B)

L_7 : Tam dişin uzunluğu, mm (API Std 5B)

T : Koniklik 0.0625 mm/mm. Değerlerini göstermektedir.

6.3.3. Eksenel Yük (Axial Load)

Koruma boruları askıya alındıklarında, kendi ağırlıklarının çekme etkisi altındadırlar. Bu kuvvet, boru ve bağlantı elemanlarını kopmaya zorlar. Boruların kopma mukavemetleri şu bağıntı ile saptanır :

$$P_y = 0.7854 (D^2 - d^2) Y_p \text{ Burada } 0.7854 (D^2 - d^2) \text{ yükü taşıyan kesitin alanıdır.}$$

P_y : Boru gövdesinin kopma mukavemeti
 D : Dış çap
 d : İç çap
 Y_p : Borunun minimum akma mukavemetini göstermektedir.

Buttress dişli boruların bağlantı mukavemeti : $P_j = 0.95 \cdot A_p \cdot U_p \cdot [1.008 - 0.0396(1.083 - Y_p/U_p)D]$

Manşon dişli mukavemeti : $P_j = 0.95 \cdot A_c \cdot U_c$

Burada A_p : Borunun yük taşıyıcı kesit alanını, A_c =Manşonun yük taşıyıcı kesit alanını, U_c : Manşonun minimum kopma mukavemetini göstermektedir. Standart borular için minimum kopma mukavemetleri Tablo 12' de verilmiştir.

Tablo 12. API koruma borusu kopma mukavemetleri

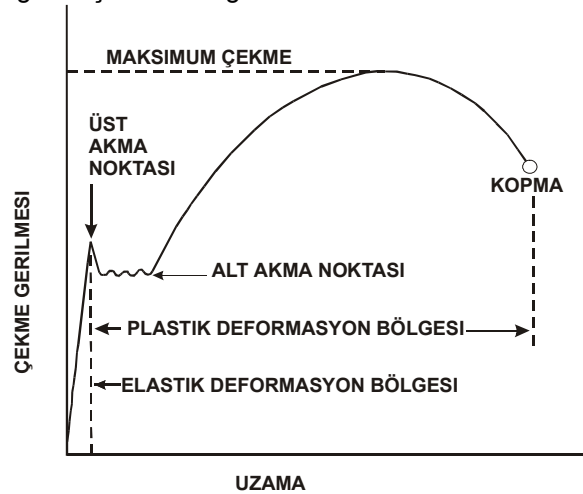
Kalite (Grade)	Akma Mukavemeti				Çekme Mukavemeti		Uzama ⁽¹⁾
	Min.		Max.		psi	Kg/cm ²	
	Psi	Kg/cm ²	psi	Kg/cm ²			%
H-40	40000	2812	-	-	60000	4218	27
J-55	55000	3867	80000	5624	75000	5273	22,5
K-55	55000	3867	80000	5624	95000	6679	18
C-75	75000	5273	90000	6327	95000	6679	18
N-80	80000	5624	110000	7733	100000	7030	17
L-80	80000	5624	95000	6679	95000	6679	-
C-95	95000	6679	110000	7733	105000	7382	16,5
P-110	1100000	77330	140000	9842	125000	8788	14

⁽¹⁾ Uzama 50.8 mm cinsinden % olarak verilir.

Çekme yükü boruların minimum göçme basıncı dayanımlarını azaltır ve eksenel yük altındaki boruda göçme basıncı şu bağıntı ile hesaplanır :

$$P_1 = \left[\sqrt{1 - 0.75(S/Y_p)^2} - 0.5(S/Y) \right] \times P_2$$

Çeliğin gerilme-uzama diyagramı şekil 43'de görülmektedir



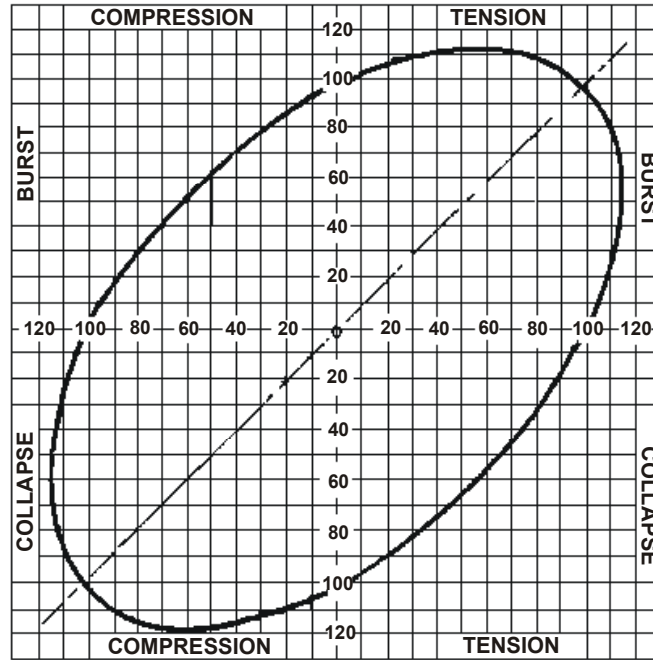
Şekil 43. Çelik malzeme gerilme-uzama diyagramı

Burada ;

- P1 : Eksenel çekme gerilmesi altında minimum göçme basıncını
 P2 : Eksenel çekme gerilmesiz minimum göçme basıncını
 S : Eksenel çekme gerilmesini
 Yp : Borunun minimum akma mukavemetini belirtir.

Bu bağıntı bir elipsi gösterir. Eksenel gerilme altında göçme basıncındaki değişim bir "Gerilme Elipsi" ile de gösterilmektedir. İki eksenli akma gerilmesi elipsi diye adlandırılan elips, apsiste eksenel gerilme (malzemenin minimum akma gerilmesinin %' si cinsinden), ordinatta mukavemet (nominal mukavemetin %'si cinsinden) olmak üzere bir koordinat sisteminde çizilir. Çekme yanında sıkışma bölgesini de içeren elipste, göçme ve patlama basınçlarının eksenel gerilmeye bağlı olarak değişimi grafik olarak saptanır (Şekil 44).

Elipsten alınan ve çekmenin göçme mukavemetine etkisini gösteren bazı değerler Tablo 13' de verilmektedir. Tabloda RY değerleri, boru kesitine etkiyen çekme gerilmesinin (S), minimum akma mukavemetine (Y_m) oranını % cinsinden ikinci kolonlarda gösterilmektedir. Örneğin bir kesitteki çekme gerilmesi minimum akma mukavemetinin % 10'u kadar ise ($RY=0.10$ ise) borunun dayanabileceği göçme basıncı tam değerinin % 94.5'i olacaktır. Eksenel gerilme % 50' ye çıktığında ($RY=0.50$) bu değer % 65'e düşecektir.



Şekil 44. Casing yük mukavemet elipsi

6.3.4. Yüzdürme Kuvveti (Buoyancy Factor)

Arşimet ilkesine göre tamamen sıvıya batırılmış bir cisim, yer değiştirdiği sıvının ağırlığına eşit bir kuvvetin etkisi altındadır. Bu kuvvete kaldırma kuvveti denir.

Koruma borusu dizaynında kaldırma kuvvetinin dizi üzerindeki etkisi mutlaka göz önünde tutulmalıdır. Kaldırma kuvvetinin öncelikle ağırlık azaltıcı rolü vardır ve bu da ağırlıktan dolayı oluşan çekme yükünü hafifletir.

Koruma borusunun veya sondaj takım dizisinin yoğunluğuna ρ_s , içine daldırılan sıvının (çamur) yoğunluğuna da ρ_m dersek ;

Kaldırma kuvveti = $\left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right)$ formülü ile bulunur. Kaldırma kuvveti birimsiz olup her zaman 1 den

küçüktür. Öte yandan kaldırma kuvveti sıvıya batmış cismi her noktada etkiler. Dolayısıyla kuyudaki koruma borusu dizisi boyunca aynıdır.

Tablo 13. Çekmenin göçme mukavemetine etkisi

Çekme Etkisi RY=S/Y _m	Göçme Basıncı Tam Değerin % si	Çekme Etkisi RY=S/Y _m	Göçme Basıncı Tam Değerin % si	Çekme Etkisi RY=S/Y _m	Göçme Basıncı Tam Değerin % si
005	99.8	220	87.1	435	70.8
010	99.5	225	86.8	440	70.3
015	99.3	230	86.7	445	69.9
020	99.0	235	86.3	450	69.5
025	98.7	240	85.6	455	69.1
030	98.4	245	85.3	460	68.8
035	98.2	250	85.0	465	68.2
040	97.9	255	84.7	470	67.8
045	97.6	260	84.3	475	67.3
050	97.3	265	83.9	480	66.9
055	97.0	270	83.6	485	66.4
060	96.8	275	83.2	490	65.9
065	96.5	280	82.8	495	65.5
070	96.2	285	82.5	500	65.0
075	95.9	290	82.1	505	64.5
080	95.6	295	81.7	510	64.1
085	95.3	300	81.3	515	63.6
090	95.1	305	81.0	520	63.1
095	94.8	310	80.6	525	62.6
100	94.5	315	80.3	530	62.1
105	94.2	320	79.9	535	61.7
110	93.9	325	79.6	540	61.2
115	93.6	330	79.2	545	60.7
120	93.3	335	78.8	550	60.2
125	93.0	340	78.4	555	59.7
130	92.7	345	78.0	560	59.2
135	92.4	350	77.7	565	58.7
140	92.1	355	77.3	570	58.1
145	91.8	360	76.9	575	57.6
150	91.5	365	76.5	580	57.1
155	91.2	370	76.1	585	56.6
160	90.9	375	75.8	590	56.1
165	90.6	380	75.4	595	55.5
170	90.3	385	75.0	600	55.0
175	89.9	390	74.6	605	54.5
180	89.6	395	74.2	610	54.0
185	89.3	400	73.7	615	53.5
190	89.0	405	73.3	620	52.9
195	88.7	410	72.9	625	52.4
200	88.4	415	72.5	630	51.9
205	88.1	420	72.0	635	51.4
210	87.7	425	71.6	640	50.9
215	87.4	430	71.2	645	50.3

6.4. Koruma Borusu Tasarımı (Casing Design)[6][7][8][9]

Kuyuya indirilen koruma borularına, kuyunun değişik derinliklerinde çok değişik kuvvetler etki eder. Bu nedenle anılan yük ve kuvvetlerin kesin değerlerinin saptanması çok zordur. Derinde göçme basıncı, yüzeye yakın yerlerde eksenel yük ve patlama basınçları gibi bir çok değişik kuvvet koruma borusuna etki eder. Ayrıca zaman içinde (bu yükler ve bazı kimyasal etkiler nedeniyle) koruma borusu yapısında meydana gelebilecek değişiklikler, koruma borusunun davranışını (mukavemetini) etkiler.

Yukarıda bahsedilen yük değişkenlikleri, boru tasarımı yapılırken riskleri minimuma indirmek üzere bir emniyet payı dahilinde hesaplanır ki buna "tasarım katsayısı" veya "emniyet katsayısı" denir. Bu katsayılar, boruların yapısal özelliklerine değil sahada söz konusu olabilecek önceden kestirilemeyen koşullara bağlıdır.

Hangi koşullarda, hangi katsayıların kullanılacağı API tarafından belirlenmiş olmakla beraber sondaj mühendisleri kendi özgün koşullarına göre emniyet katsayılarını kullanabilirler.

Göçme hesabı yapılırken katsayı olarak 0.85 – 1.125 arasındaki değerler kullanılır. Eksenel yük hesabında kullanılan emniyet katsayısı genellikle 1.6 – 2.0 arasında değişir. Burada, bağlantılardaki ve borulardaki katsayıları ayırmak gerekir. Bağlantı katsayıları, borulardakinden daha büyük seçilir. Örneğin boru için 1.60 – 1.80 kullanılırken, bağlantı için 1.80 – 2.00 kullanılır. Eksenel yükün göçme üzerine etkisi borunun çimentolanmış kısmında dikkate alınmaz

İç basınç katsayıları 1.0 – 1.1 arasında değişir. Normal basınçlı sahalarda iç basınç hesabı yapılmaz. Gaz basınçları, çatlatma basınçları veya yüksek pompa basınçları söz konusu ise bu hesaplama yapılır.

6.4.1. Kuyuda Koruma Borusu Dizisine Gelen Yükler

Göçme Basıncı : Koruma borusu tasarımında ilk ele alınan büyüklüktür. Anülüste bulunan çamurun hidrostatik basıncıdır ve derinlikle artar. Dış basınç daha önceden belirtildiği gibi kuyu başında minimum kuyu dibinde maksimumdur. Hesaplama yapılırken boru içinin boş olduğu kabul edilir. Koruma borusu seçiminde aynı göçme basıncına dayanacak değişik kalite ve et kalınlığındaki borulardan en ucuz olanı seçilir. Et kalınlığı fazla olan boruların iç çapı dardır ve ağırlıkları fazla olduğu için eksenel yükü artırırlar.

Kuyu tabanından yüzeye doğru geldikçe dış basınç azalacağından yüzeye yakın bölümlerde daha ince borular kullanılabilir. Ancak bu belirli bir noktaya kadardır. Bu bölgedeki boruların eksenel yüke ve iç basınca da dayanıklı olması gerekir.

İç Basınç : Boru içindeki akışkanların basıncıdır. Akışkanlar, formasyondan kuyuya giren veya boru içinden basılan akışkanlardır. Borunun dışındaki sıvının hidrostatik basıncı iç basıncı kısmen dengeler. Boruyu patlamaya zorlayan net iç basınç, bu basınçların farkıdır. İç basınç, dış basıncın tersine kuyu başında maksimum, kuyu dibinde minimumdur.

Eksenel Yük : Dizinin kendi ağırlığından dolayı oluşan yüküdür. Her boru ve bağlantı kendi altındaki dizinin ağırlığını taşır. Dolayısıyla bu yükü taşıyabilecek kapasitede olmalıdır. Eksenel yük, kuyu başı koruma borusu bağlantısında en büyük, tabanda ise en küçüktür. Eksenel yük hesaplamaları en üstteki boru ve bağlantıya göre yapılır. Göçme ve iç basınç hesabı yapılmış her bölümde üst bağlantıların eksenel yüke dayanıp dayanmayacağı ayrıca hesaplanır.

Yüzdürme Kuvveti : Kuyudaki sıvının diziyeye uygulayacağı kaldırma kuvvetidir. Bu kuvvet dizinin ağırlığını belirli miktarda hafifletir.

Buraya kadar bahsedilen tüm yük ve kuvvetler, boru dizisine ayrı ayrı etki etmez, yani aynı anda etkilerler. Öte yandan kuyuda var olan sapma, yüksek sıcaklık ve gaz içeriği koruma borusu dizisini yukarıda incelediğimiz kuvvetlerle birlikte etkiler.

6.5. Boru İndirme Öncesi Hazırlıklar

Kuyunun hangi çapta açılmaya başlanarak, ilk koruma borusu dizisi çapının ne olacağını belirleyen etmen, kuyuya inilecek son boru dizisi çapıdır.

Delik çapı arttıkça kazılacak hacim dolayısıyla maliyet artar. Derin kuyularda, indirilecek dizi ağırlığı fazla olacağından yük taşıma kapasitesi büyük kuleler gerekir. Öte yandan açılacak kuyudan öngörülen çapta dizi ile üretim yapıldığında ekonomikliğin de göz önünde bulundurulması gerekir (rezervuar şartları dikkate alınarak). Elde bulunan boruların çapları ile sahada yapılan genel uygulamalar (önceki deneyimler) çap seçimini etkileyen etmenlerdir.

Kuyunun hangi çaptaki matkaplarla delineceği, hangi boru dizisinin indirileceği, üretim dizisi çapının seçilmesine bağlıdır. Üretim dizisinin çapı belirlendikten sonra ara diziler, yüzey koruma dizisi ve kullanılacak matkapların çapları belirlenir. Belirlenen koruma borusu dış çapı için matkap çapının ne olacağı saptanırken boruların manşon dış çapları da dikkate alınmalıdır. Hangi koruma borularının, hangi çaptaki deliğe indirilebileceği ve daha sonra bu boruların içinden hangi çapta matkapla delme işlemine devam edileceği tablolarda verilmiştir (Tablo 8).

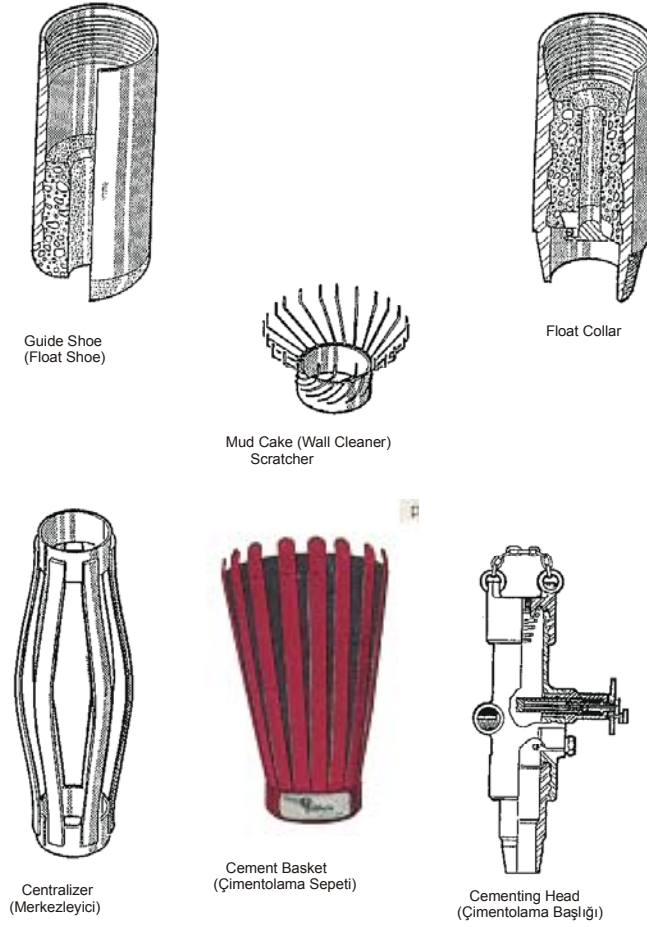
Koruma borularının yapısal kontrolleri (yarık, çatlak) hassas olarak bir takım sonik ve elektromanyetik yöntemlerle yapılırken arazide diziye bağlanmadan önce gözle de kontrol edilmeleri gerekir. Bu kontrolde, darbe görenek göçmüş, derin çizik oluşmuş, çatlamış yerler bulunan borular, ilk etapta ayrılır. Aynı kontrol, boruların dış muhafazaları çıkarılarak dişler üzerinde de yapılır. İkinci aşamada, çimentolama sonrası boruların içinden çalışacak matkap çapında master geçirilerek çap kontrolü yapılır. Bu aşamada da masterin içinde takıldığı veya hiç geçemediği borular ayrılır.

Koruma boruları araziye geldiğinde, dış kısımlarında koruyucu başlıklar vardır. Boru inişi öncesi bu başlıklar sökülerek dış kontrolünün yanı sıra dişlerin temizliği yapılarak, varsa çapaklardan arındırılır. Temizlenen dişler tekrar yağlanarak koruyucu kapaklar yerine takılır.

Koruma boruları kuyuya indirilmek üzere kuleye alındığında koruyucu başlıklar çıkarılıp, boruların bir birine bağlanması gereklidir. Aksi halde borunun kuleye verilmesi anında dişlerde meydana gelebilecek bir hasarın giderilmesi zaman kaybına neden olur. Kuyunun derinliği, kuyuya indirilecek boruların sayısını belirler. Derinlik, delme işleminin yapıldığı sondaj takım dizisinin uzunluğu kadardır. Dizinin kaç borudan oluşacağı, boylarının tek tek ölçülmesiyle ortaya çıkacaktır. Çünkü, koruma boruları, sıcak çekme işlemiyle yapıldıklarından boyları farklıdır. Arazide boru uzunluğu, şerit metrelerle yapılır. Okuma, manşonun üst ucu ile öbür uçtaki dişli kısmın ilk dişinin başladığı yer arasındaki uzaklık olarak yapılır ve bir kaydedilir. Ayrıca uzunluğu borunun üzerine boya ile yazılır.

Karışıklık olmaması için kuyuya inilecek borular, bu kayıt sırasına göre sehpa üzerine dizilir. Ölçme işlemi yerde yapıldıktan sonra borular kuyuya indirilirken de yapılabilir. Böylece ilk ölçünün doğrulaması yapılmış olur. Kuyuya borular indirilirken operasyon sırasında kullanılan bir takım ekipmanlar vardır ki bunlara "koruma boruları aksesuarları" denir.

Bunlar, kılavuz uç (float shoe, guide shoe), yüzer yaka (float collar), alt ve üst tapalar, merkezleme yayları (centralizer), sıva kazıyıcı (scratcher, wall cleaner), çimentolama sepeti (cement basket), kademeli çimentolama yapılacaksa kademeli çimentolama aleti (DV tool, stage cementer) ve bu alete ait tapalar ile kuyuya çimento şerbetini basacak olan ve en üst boruya bağlanan çimentolama başlığı (cement head) dir. Koruma boruları aksesuarlarından bazıları Şekil 45' de görülmektedir.

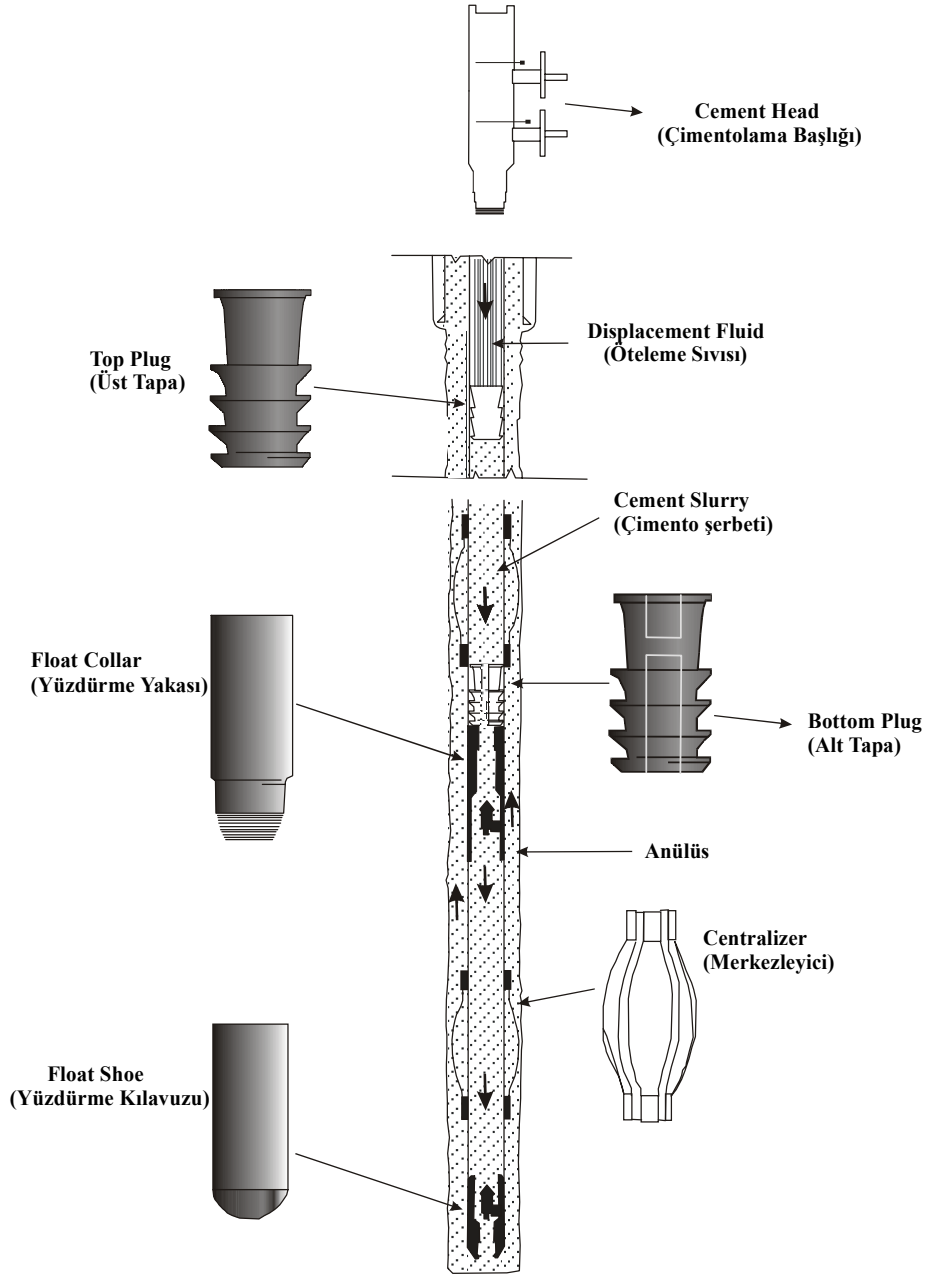


Şekil 45. Koruma borusu aksesuarları

Float shoe (guide shoe), en alttaki borunun ucuna takılan ve borunun kuyu içinde takılmadan inmesini sağlayan parçadır. Kılavuz uç olarak ta isimlendirilen bu ekipmanın float shoe cinsinin içinde, geri basıncı üzerinde tutan bilye veya check-valf vardır. Bilye, çimento basılırken, çimentonun boru ve kendi içinden geçmesine müsaade eder, ancak, anülüse çıkan şerbetin geri boru içine dolmasına izin vermez. Dolayısıyla, anülüsteki çimento sütununun yarattığı hidrostatik basıncın en çok etkilediği bölümde yer alır.

Float collar; yüzdürme yakası olarak da isimlendirilen bu ekipmanın yapısı float shoe'nunkine benzer. İçinde bulunan bilye ile geri basıncı üzerinde tutup çimento şerbetinin tekrar boru içine akmasına engel olur. Yüzdürme yakası, alt tapanın üzerine oturmasını sağlar. Genel olarak alttan ikinci ile üçüncü borunun arasına bağlanır ve tapaların oturması ile çimento şerbetinin belli bir kısmının boru içinde kalmasını sağlar. Böylece çimento şerbetinin arkasından, şerbeti ötelemek için basılan öteleme sıvısının yanlışlıkla (fazla basılarak) boru ucundan çıkmasını engeller.

Alt ve üst tapalar, çimentolama operasyonunda çimento ve öteleme sıvısının birbirine karışmamasını, çimentolama operasyonu sırasında boru içinde çimentonun istenen düzeye kadar ötelenmesini sağlar. Kauçuk, alüminyum döküm veya plastikten yapılan alt ve üst tapalar çimentolamadan sonra sondaj devam edeceği zaman matkap tarafından kolayca parçalanırlar. Kenarları dizi içinde çamuru veya çimentoyu sıyıracak biçimde yukarı doğru kalkıktır ve üzerlerine gelen basınçla açılarak boru cidarına kuvvetle bastırılırlar. Alt tapanın ortası deliktir ve deliğin üzeri belirli bir basınçta yırtılabilen diyaframla kapatılmıştır. Şekil 46' da bu parçalar görülebilir.



Şekil 46. Kuyu İçi koruma borusu aksesuarları

Üst tapanı ötelemek için pompalanan su veya çamur, basıncı yükseltir. Basınç belirli bir değere (Ör: 40-50 kg/cm²) eriştiğinde, alt tapanın diyaframı yırtılır ve çimento açılan bu delikten, yüzdürme (float collar) ve kılavuz başlıklarından (float shoe) kuyu tabanına geçerek, anülüste yükselmeye başlar. Bu işlem dizideki çimento bitinceye yani üst tapa, alt tapa üstüne oturuncaya kadar sürer. Üst tapanın alt tapa üzerine oturduğu, pompa basınç manometresinde basıncın ani artması ile anlaşılır. İki tapa kullanılarak yapılan bu çimentolama tekniğine "Perkins Çimentolama Yöntemi" veya anülüsün bir seferde çimento ile doldurulmasından dolayı "tek kademeli çimentolama" denir.

Jeotermal kuyularda zaman zaman görülen bir diğer uygulama, ağaç tapa kullanımıdır. Ancak ağaç tapalar ile boru cidarındaki çamur tam olarak sıyrılamamaktadır. Çift tapa kullanılmadan yapılan çimentolamada, 5-6 m uzunluktaki bir kısımda çamurla çimento karışarak çimento kirliliği oluşacaktır.

Centralizer (merkezleyici) ise, boruların kuyu deliği içinde ortalanmış halde durmasını, böylece şerbetin borunun her yerinde eşit kalınlıkta yerleşmesini sağlar. Gerek kuyunun yapısındaki eğrilikler, gerekse dizinin kendisinde oluşacak bükülmeler nedeniyle, bazı noktalarda, dizi, kuyu cidarına dayanacaktır. Dizi delik yüzeyine dayandığında, dayanmanın olduğu bölgedeki formasyon geçirimli ve düşük basınçlı bir formasyon ise boru, üzerine etki eden çamurun hidrostatik basıncı ile yüzeye bastırılır ve bastırma kuvveti geçirimli formasyondaki basınçla, delikteki hidrostatik basınç arasındaki fark arttıkça artar. Sondaj sırasında da takım dizisinde meydana gelebilen bu tip sıkışmaya “Basınç farkıyla sıkışma” (Differential Sticking) denir.

Koruma borusu dizisine kaç adet merkezleyici takılacağını belirleyen en önemli faktör, kuyu delinirken meydana gelen sapma derecesidir (Şekil 47). Esas olan, kuyudaki sapma açısının mümkün olduğu kadar düşük olmasını sağlamaktır. Şekil 48’de görülebileceği gibi iyi merkezlenmemiş boru dizisinde çimentolama işlemi başarısız olur. Bunun için, matkaba verilen ağırlık, dizinin dönme hızı ve stabilizasyon ekipmanlarının dizaynı sondaj şartlarının gerektirdiği gibi olmalıdır.

Öte yandan, sondaj sırasında kuyuda düşeyden ayrılma olup olmadığını tespit için mutlaka belli sıklıkta eğim ölçüsü alınarak, eğimin kontrol altında olup olmadığı denetlenmelidir. Eğimin normal sınırlar dışına taşması durumunda, sondaj dizisindeki stabilizasyonda değişiklikler yapılarak, eğim açısı düzeltilir. Centralizer yaylarının, ağırlığı onlarca tonu bulan boru dizisinin yaslanması ile düzleşmeyecek (deforme olmayacak) biçimde dayanıklı susta veya yaylardan yapılması gereklidir. Boru üzerinde centralizerin istenen seviyede durmasını sağlamak için, centralizerin alt ve üstünde yer alan sabitleyiciler (stop ring) konur.

Boru üzerindeki diğer bir ekipman, boru inişi sırasında, kuyu cidarında bulunan çamur kekinin sıyırılmasını temin etmek amacıyla takılan kek kazıyıcı (scratcher, wall cleaner) olmaktadır. Çimentolamanın esas amacı, formasyon ile casingi birbirine geçirimsiz bir şekilde bağlamak olduğundan, arada herhangi bir malzeme olmamalıdır.

Derin kuyu çimentolamalarında kullanılan ekipmanlardan (cement basket) çimentolama sırasında çimento şerbetinin kaçabileceği zayıf zonların üzerine gelecek seviyede koruma borusunun üstüne konur. Bu ekipman, üstünde bulunan çimento sütununun basıncını taşıdığından alt tarafında bulunan zayıf zonun yırtılmasını önler.

Derin kuyularda kullanılan diğer bir çimentolama uygulaması, kademeli çimentolamadır. Bu işlemde amaç, derinlikten dolayı çimento hidrostatik basıncının kuyu dibinde yaratacağı aşırı basıncın önlenmesi, uzun süren çimento basımı sırasında, çimentonun yüksek sıcaklık dolayısıyla erken prizlenmesinin önlenmesidir. Kademeli çimentolama ekipmanının, kendine özgü tapaları ve kademe açıcısı vardır.

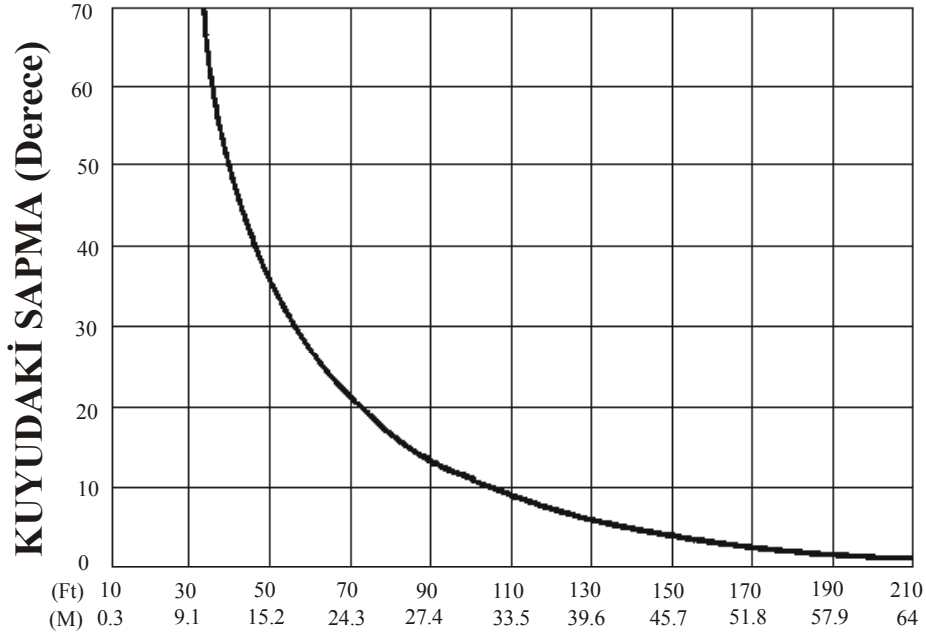
Çimentolama başlığı ise, içinde alt ve üst tapaları barındıran, içinden çimento ile öteleme sıvısının basıldığı ekipmandır. En üstte bulunan koruma borusuna bağlanır.

Yaklaşık 10 yıl kadar önce, çimento karışımları bir jet hopper sisteminden geçirilerek hazırlanıyordu. Bu düzenekte kuru çimento, hopper içine üstten dökülürken, alttan basınçlı su verilerek oluşturulan karışım, karışım tankına, buradan da çimentolama aracı aracılığı ile kuyuya basılıyordu. Bu tip çimentolamanın sakıncalı yönü, tüm çimento karışımının homojen olarak hazırlanamaması ve kuyuya zaman zaman sulu, zaman zaman yoğun çimentonun basılması olmuştur. Öte yandan toz çimento yetiştirilemeyip kuyuya sadece suyun basıldığı zamanlar olmakta, bu su zonu iki casing arasına yerleştiğinde, üretim sırasında yüksek sıcaklıktan dolayı genleşerek, içteki koruma borusunun göçmesine (collapse) neden olmaktadır (water trap).

Ancak günümüzde çimento karışımları fabrikalarda homojen olarak hazırlanmakta olup, içine konulacak katkı maddeleri yine fabrikada bu karışıma verilmektedir. Dolayısıyla kuyu boyunca, çimento şerbeti eşit yoğunlukta yerleşmektedir.

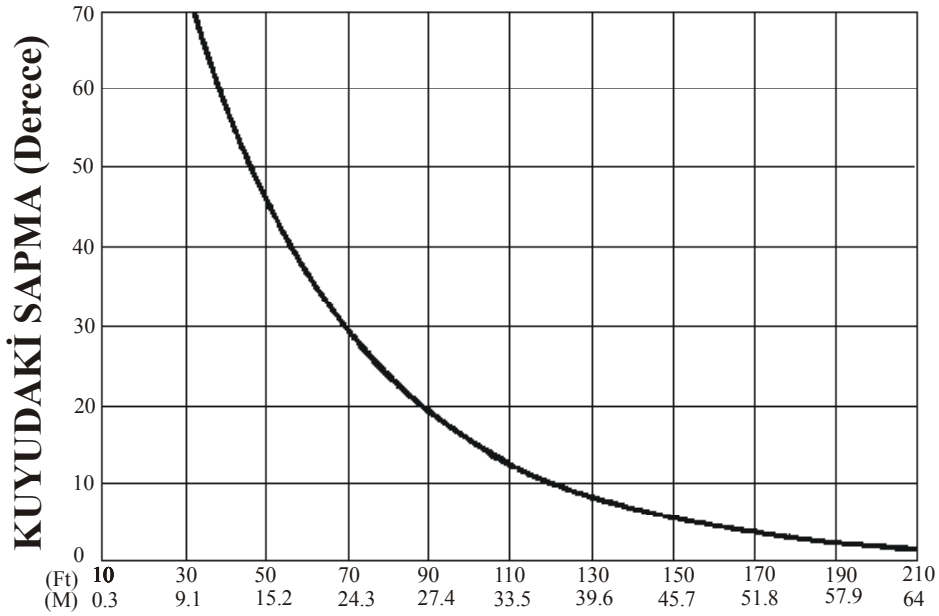
Çimentolama araçları, genellikle yüksek basınçta çalışabilen triplex pompa, su tankı, jet karıştırıcı gibi donanımlara sahiptir.

13^{3/8"} Centralizer - 17^{1/2"} Kuyu



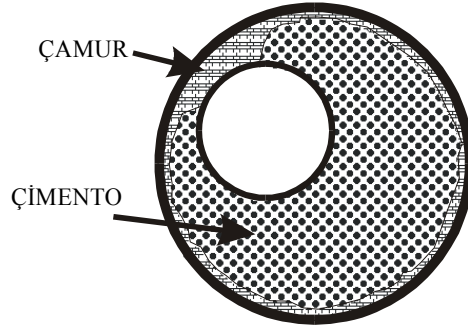
MAKSİMUM CENTRALİZER ARALIĞI

9^{5/8"} Centralizer - 12^{1/4"} Kuyu

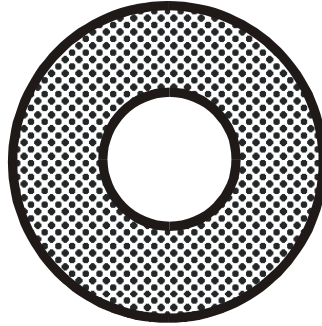


MAKSİMUM CENTRALİZER ARALIĞI

Şekil 47. Kuyu içi centralizer aralığı



BORU ORTALANMAMIŞ



BORU ORTALANMIŞ

Şekil 48. Casingin ortalanmasının çimentolamaya etkisi

6.6. Casinglerin Kuyuya İndirilmesi

Casingler, kuyuya indirilmeden önce, kuyu içi şartlarının elverişli hale getirilmesi gereklidir. Özellikle rezervuar üst seviyesine indirilecek üretim casinglerinde, ortamdaki sıcaklık oldukça yüksek olabileceğinden çamurun viskozite, ağırlık, su kaybı gibi özellikleri mutlaka iyileştirilmeli (çamur ıslahı), kuyu derinlik, eğim ve çap yönüyle mutlaka kontrol edilmelidir.

Kule önündeki sehpa da sıralı ve üzerlerinde uzunlukları yazan borulardan, kuyuya ilk inilecek olana casing shoe bağlanarak, çimento kesimi sırasında çözülmemesi için boruya kaynatılır. İlk boru ile birlikte shoe'ya yakın bir mesafeye (2-4m) bir adet centralizer takılır ve sabitlenir. Daha sonra borular üzerine takılacak aksesuarları ile birlikte inilmeye başlanır. Hemen belirtmek gerekir ki, casing shoe'nun takıldığı borudan bir boru sonrasında (alttan ikinci ve üçüncü boru arasına) float collar takılması genel uygulamadır. Ayrıca float collar ve onun altında bulunan boruların içinde çimento bulunacağından, prizlenmiş çimentoyu keserken, boruların çözülmemesi için alttan ilk 4 veya 5 borunun kaynatılması yararlı bir işlemdir.

Boru indirilirken gerek casing shoe'nun ve gerekse float colların içindeki check valf yatakları kapanacağından boru dizisi, kuyu içindeki çamuru sıkıştırıp, formasyona ek basınç yapacaktır. Bu nedenle, boruların iniş hızının 5-6 m/dak.yı aşmaması gerekir. Aksi taktirde, eğer var ise, zayıf bazı zonlar yırtılarak çamur kaçaqları oluşacaktır. İniş hızının fazla, boru ile anülüs açıklığının az ve çamur viskozitesi ile yoğunluğunun fazla olması halinde oluşacak basınç, formasyonları yırtabilir. Öte yandan, boru üzerinde centralizer ve stracher gibi malzemeler takılı olduğunda, boru iniş hızı yukarıda yazılı hızdan daha yavaş olmalıdır.

Boru inişi sırasında, boru üzerine takılacak centralizer ve scratcher gibi malzemeler, boru kulede iken takılırlar. Boruların kulede ilk sıkılması işleminde, kendir özlü halat kullanılır. Halat ile yeterli sıkma yapıldıktan sonra tong anahtarları ile istenen torka kadar sıkma işlemi devam ettirilir.

Kuyuya boru inilirken, yukarıda da belirtildiği gibi check valf yatakları kapanacağından, boru içi boş kalır. Gerek borunun yüzmesini engellemek ve gerekse doğacak dış basınçlara karşı, borunun dayanımını korumak üzere boruların içine, çamur hattından çekilen bir hortumla, 2-3 boruda bir çamur doldurulur.

Kuyuya boru inildikçe, kuyu deliğinde çamurun boru dış çapıyla belirlenen hacmi kadar kısmı, dışarı (çamur tanklarına) akar. Bu çamur miktarı dikkatle izlenerek kuyuda her hangi bir kaçak olup olmadığı tespit edilir.

1000 metre ve altına boru inilecekse (ki genellikle üretim casingi) boru inişi sırasında yaklaşık 500 metrelerde, en son inilen boruya çimentolama başlığı bağlanarak, kuyu çamur sirkülasyonuna alınır. Burada amaç, kuyudan takım çekilip boru inişine kadar geçen sürede hareketsiz kalan çamurda oluşan jel kuvvetini kırmak ve ıslah edilmiş çamurun dengesinin bozulmamasını sağlamaktır.

Boru dizisi tabana indirildikten sonra (çimentolanacak casing kuyu tabanına oturtulmaz) çimentolama başlığı son boruya bağlanarak, kuyu sirkülasyona alınır. Bu sirkülasyonda, centralizer stracher gibi malzemelerin kuyu cidarından sıyırıldığı çamur kekleri uzaklaştırılır. Bu sirkülasyon sırasında, boru hatlarının sızdırmazlığı, çok dikkatli bir şekilde kontrol edilir.

Yine bu sirkülasyon sırasında, kuyuda dolaşan çamurun tam olarak yüzeye gelip gelmediği (kuyuda kaçak olup olmadığı) ve sirkülasyon basınçları mutlaka izlenmelidir.

Kuyu çapının tam, eğim açısının çok düşük sınırlarda kaldığı kuyularda, kuyuya indirilen boru dizisi, aşağı yukarı hareket ettirilip, rahatça döndürülür. Sirkülasyon bittikten sonra çimentolama başlığı açılarak içine alt ve üst tapalar yerleştirilir ve başlık tekrar kapatılarak kuyuya çimento şerbeti basma işlemine geçilir.

7. ÇİMENTO VE ÇİMENTOLAMA [6][7][8][9][10]

Çimentolar kil ve kalkerin kalsinasyonundan elde edilir. Yapısında 4 kristalin faz vardır. Bunlar :

Trikalsiyum Silikat (C₃S)
Dikalsiyum Silikat (C₂S)
Trikalsiyum Alüminat (C₃A)
Tetrakalsiyum Alüminaferrit (C₄AF)

Tablo 14. API çimento çeşitleri

Çimento Cinsi	Bileşimi (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
A	53	24	8	8
B	47	32	3	12
C	58	16	8	8
D-E	26	54	2	12
G	52	32	3	12
H	52	32	3	12

API standartlarına göre sülfata çok dayanıklı çimentolarda Tetrakalsiyum Alüminaferrit ile Tri-kalsiyum Alüminatın toplamı % 24 den az olmalıdır (Tablo 14).

Sondajcılıkta en çok kullanılan çimento türü "Portlant Çimento" dur. İnecek derinliğe ve kuyuda karşılaşılabilecek koşullara uygun değişik türleri vardır (Tablo 15). Bu türler A, B, C, D, E, G, H gibi harflerle sembolize edilirler.

Bu çimento çeşitlerinin, hangi derinlik ve sıcaklık sınırlarında kullanılacağı, API tarafından standardize edilmiştir. Günümüzde jeotermal sahalarda en sık kullanılan çimento çeşidi "G" sınıf çimentolardır. Jeotermal kuyularda, G sınıf çimentoyu kullanırken içine gerekli katkı maddeleri de konur.

Tablo 15. API çimentoların kullanıldığı derinlik ve sıcaklık aralıkları

API Çimento Cinsi	Derinlik (m)	Sıcaklık (°C)
A	0-1800	27-77
B	0-1800	27-77
C	0-1800	27-77
3	1800-3050	27-127
D		
E	3050-4200	27-143
G	0-2440	27-93
H	0-2440	27-93

Sondaj tekniğinde çimento karışımı dendiğinde "toz çimento+su" karışımı anlaşılır ve bu karışıma "Çimento Şerbeti" denir (cement slurry). Dolayısıyla içine kum, çakıl vb katılmaz.

Kuyuya basılacak karışımlara, çimentonun türüne göre değişik miktarlarda su katılır. Katılacak suyun miktarı, karışımın hacmini, yoğunluğunu viskozitesini, pompalanabilme süresini (kuyu içi sıcaklığı da etkendir) ve çimento prizinin mukavemetini etkiler. API standartlarına göre, A, B sınıfı çimentolarda kullanılacak su, çimento ağırlığının % 46'sı, C sınıfında % 56'sı, D, E sınıflarında % 40'dır. Çimentoya yoğunluk düşürücü olarak bentonit katılıyorsa, ilave edilen bentonitin her % değeri için, yaklaşık % 4 ek su katılır. Su miktarı fazla olan çimento şerbetinin, yoğunluğu ve maliyeti düşük olur. Ancak yüksek sıcaklık ve basınç (jeotermal kuyular) taşıyan zonlardan üretim yapılacaksa bu bölümlerin çimentosunun 1,8 gr/cm³'ün altına düşmemesi gerekir.

Çimento karışımında kullanılacak suyun kalitesi önemlidir. Suyun içinde bulunan inorganik maddeler prizlenmeyi hızlandırıcı, organik maddeler (çamur katkı maddeleri) ise geciktirici etkide bulunur. Karbonatlı ve bikarbonatlı suların prizlenme süresini ne şekilde etkilediği tam olarak bilinmediğinden, mümkün olduğu kadar bu tip suları kullanmaktan kaçınmalıdır.

Çimentolama öncesi, çimento özelliklerinin amaca uygun değiştirilmesi için bazı katkı maddeleri katılır. Bunlar :

I. Hızlandırıcılar : Kuyuya çimento basıldıktan sonra, mümkün olduğu kadar hızlı prizlenme sağlamak üzere kullanılan katkı maddeleridir. En sık kullanılan hızlandırıcı maddeler, Kalsiyum klorür ve Sodyum klorürdür. Kalsiyum klorür, karışıma % 2 oranında katılır. % 3 ün üzerinde katıldığında hızlandırma özelliğinde fazla bir değişiklik olmaz.

Sodyum klorür, % 2-2,5 gibi düşük miktarlarda hızlandırıcı, daha yüksek konsantrasyonlarda ise geciktirici olmaktadır. Özellikle tapan çimentolama gibi kısa pompalama zamanı ve çabuk prizlenme istendiği zaman uygulanır.

II. Geciktiriciler : Derin ve sıcaklık değerinin yüksek olduğu kuyularda çimento karışımının tam olarak pompalanabilmesi için prizlenmenin geciktirilmesi gerekir. Bu amaçla değişik firmalar tarafından geliştirilen mamuller vardır. HR-4, HR-7, HR-12 gibi ticari isimler altında satılan, kalsiyum klorür ve organik asit bazlı (tartarik asit), değişik sıcaklık kademelerinde kullanılan geciktiriciler vardır. Geciktiriciler, kuyu içi sıcaklık ve basınç şartlarına göre, %0,2 - %0,4 oranında kullanılır.

III. Su Kaybı Azaltıcılar ve Viskozite Düşürücüler : Çimentolama sırasında, gözenekli ve geçirgen formasyonlara, çimentodaki suyun bir kısmı süzülerek girer Suyunu kaybeden çimento, bu bölgede çabuk donarak bir köprü oluşturur. Çimento sütununun hidrostatik basıncı, bu seviyeden aşağıyı etkileyemediğinden, bu seviyenin altında bulunan yüksek sıcaklık ve basınçlı formasyonların kontrolü güçleşir. Su kaybını azaltmak için geliştirilmiş maddeler CFR-2, Diacel vb. gibi ticari isimlerle satılırlar. Su kaybı azaltıcılar % 0,3-0,7 gibi düşük oranlarda kullanılırlar.

Çimento şerbetinin görünür viskozitesinin düşmesiyle sürtünme kayıpları azalır. Akış yani pompalanabilme artar. Dolayısıyla, basınç artışından doğacak kaçak oluşma tehlikesi ortadan kalkar. Türbülanslı akışla çamur pastasının çimento tarafından ötelenmesi kolaylaşır.

IV. Hafifleticiler : Basınca dayanıksız zayıf formasyonların bulunduğu bölgelerde, özgül ağırlığı normal karışımlardan daha düşük karışımlar elde etmek için kullanılırlar. Uygulamada kullanılan hafifleticiler şunlardır : Bentonit, perlit, pozzolanlar, diatomik toprak, gilsonit, sodyum silikat.

V. Ağırlaştırıcılar : Çimento şerbetinin ağırlığının çamur ağırlığına eşitlenmesi veya yüksek basınçlı formasyonların tutulması gibi amaçlarla kullanılan katkı maddeleridir. En sık kullanılanlar barit, hematit, ilmenit gibi özgül ağırlığı yüksek maddelerdir. (Barit yoğunluğu : 4,25 gr/cm³, hematit yoğunluğu : 5,02 gr/cm³, ilmenit yoğunluğu :4,6 gr/cm³).

VI. Kaçak Önleyiciler : Çimento şerbetinin çatlaklı ve gözenekli formasyonlara kaçmasını önlemek amacıyla kullanılan katkı maddeleridir. Çamur kaçağını önlemede kullanılanlara benzerler. Belli başlı kaçak önleyiciler ceviz kabuğu ve gilsonittir.

İyi bir çimentolama, çimentonun casinge ve formasyona iyice yapışması ile sağlanır. Yapışmanın olmadığı bölgelerde, formasyonlar arasında akışkan dolaşımı olur veya boru sağlam olarak tesbit edilemez. Yüksek basınçlı zonlardaki jeotermal akışkan, çimento sütunu ile formasyon arasındaki açıklıklardan, yukarı veya aşağı doğru hareket eder.

Çimentonun boruya ve kuyu cidarına yapışması, bu yüzeylerin durumuna bağlıdır. Yüzeyler temiz ise iyi bir yapışma sağlanır. Sondaj sırasında formasyon yüzeyinde oluşan çamur pastası (çamur keki) çimentonun formasyonla temasını önleyen ve yapışmasını engelleyen en önemli unsurdur. Çimentolama yapmadan önce, çamur pastasının uzaklaştırılması önemlidir. Çimento basılırken türbülanslı akış sağlayarak ve koruma borularının üzerine bağlanan stracher'larla çamur pastasının uzaklaştırılmasına çalışılır. Jeotermal kuyularda, çimento öncesi basılan 3-4 m³ soğuk su, basınç farkından dolayı kazıma görevi gördüğünden ayrıca kuyu içinde soğutma işlevini yerini getirdiğinden sıkça kullanılan bir uygulamadır.

Çamur keki yanı sıra, çimentolama operasyonunda "çamur kanalı" oluşumu diğer bir olumsuzluktur. Çamur kanalı, çimentonun anülüste yükselişi sırasında oluşur. Anülüste yükselen çimentonun ötelediği çamurun akış özellikleri arasındaki fark nedeniyle, çimento ile formasyon arasında kalın bir çamur tabakası kalır ki buna "çamur kanalı" denir. Çamur kanalının oluşması, borunun kuyu deliği içinde duruşuna bağlıdır. Boru, deliğin içinde ortalanmış olarak duruyorsa, çimento anülüs kesiti boyunca homojen bir debi ile akar. Ancak boru bir tarafa yakın duruyorsa, kesitin fazla olduğu yerden akan miktar fazla, dolayısıyla akış türbülanslı olacaktır. Diğer bölgede akış laminardır. Boru delik yüzeyine yapışmış duruyorsa akış yoktur ve boru ile formasyon arasındaki çamur, çimento tarafından ötelenemez.

Kuyuda bulunan çamurun viskozitesi de çimento tarafından ötelenmesi yönüyle önemlidir. Yapılan deneyler, ince çamurların laminer akış hızlarında dahi kolayca ötelenebildiklerini, buna karşılık kalın çamurların süper türbülanslı akış hızlarında dahi güç ötelendiklerini göstermiştir.

Boru dizisinin döndürülmesinin veya aşağı yukarı hareket ettirilmesinin ve diziye bağlanan kazıyıcıların, kalın çamurların ötelenmesinde önemli etkileri vardır. Çimento, çamur temas süresi kalın çamurların ötelenmesinde diğer bir önemli unsurdur. Türbülanslı akış halinde çimentonun, çamurun bir

noktasına 10 dakikadan az olmamak üzere etkimesiyle, ötelenme sağlanabilmektedir. Yukarıda anlatılanlar çerçevesinde iyi bir çimentolamanın yapılmasını sağlayan unsurlar şöyle sıralanabilir :

- Çamurun plastik viskozite ve akma sınırının düşürülmesi,
- Boruların kuyu içinde ortalanması,
- Dizinin döndürülmesi ve aşağı-yukarı hareket ettirilmesi,
- Diziye kazıyıcıların bağlanması,
- Türbülanslı akış sağlanması,
- Çimento ile çamur temas süresinin yeterli olması,

Bu sayılanların ne ölçüde gerçekleştirildiklerinin bilinmesi, çimentolama başarısız olduğunda, başarısızlığın nedenlerini bilmemize olanak sağlar.

7.1. Jeotermal Kuyularda Çimentolama

Jeotermal kuyularda, sondaj sırasında çeşitli amaçlara yönelik olarak değişik tipte çimentolamalar yapılır. Casing çimentolamaları haricinde yapılan çimento basma işi, genel olarak, sondaj için sıkıntı yaratan zonların kapatılmasını sağlamak üzere uygulanan tapa çimentolamadır (squeeze cementing). Bu seviyeler, çeşitli kaçak formasyonları ile yıkıntı yapan formasyonlardır. Yeterli hacimde hazırlanan çimento şerbeti, sondaj takım dizisi içinden basınçlı olarak anılan bu formasyonlara basılır.

Normal sondaj şartlarında, rezervuara yaklaştıkça, sıcaklık değerlerinde artış görülür (çamurun kuyudan çıkış sıcaklığı). Bu durum çamur ve çimento için kritik olmaya başlar. Sıcaklık karışımın reolojik özelliklerini, ötelenmesini, pompalama zamanını ve çimentonun mukavemetini etkiler. Çimentolama öncesi, sondaj sırasındaki çamur çıkış sıcaklığı çok dikkatli takip edilerek kuyu dibi şartlarına göre, çamur katkı maddelerinin planlaması yapılır. Sıcaklığın 110°C nin üzerinde olduğu yerlerde, çimento mukavemetini korumak amacıyla % 30-40 arasında Silis unu (silica flour), % 0,2-0,4 oranında geciktirici katılmalıdır. (Kuru çimento yoğunluğu : 3,14 gr/cm³, silis unu yoğunluğu : 2,85 gr/cm³)

Yüksek sıcaklık (110°C ve üstünde) şartlarında, çimento mukavemetinin azalmasının yanı sıra geçirgenlikte artmaya başlar. Yüksek sıcaklıkta, çimento yapısında, dikalsiyum silikat-alfa-hidrat ve kalsiyum hidroksit oluşur. Bunlar mukavemeti azaltırlar. Çimentoya silis unu katıldığında, silisin bir kısmı kalsiyum hidroksitle reaksiyona girer ve dikalsiyum silikat-alfa-hidrat oluşur, Diğer bir kısmı ise alfa hidratlarla reaksiyona girer ve tobermorite denilen silikatlar oluşur. Tobermoritler çimentonun mukavemetini artırır, geçirgenliğini azaltırlar. Silika ununun optimum kullanılma sıcaklığı 110-200 °C dir.

Geciktiricinin az ya da çok kullanılmasının pratikte görülen bir takım sakıncaları vardır. Az kullanılması halinde, çimento şerbeti kuyu dibine ulaştığında yüksek sıcaklıkla karşılaşarak aniden prizlenmeye başlamakta ve anülüs tam doldurulmadan pompalama yapılamaz hale gelmektedir. Geciktiricinin yeterinden çok kullanılması halinde ise prizlenme günlerce sürmekte, eğer casing seviyesi altında çok yüksek gaz basıncı içeren formasyon var ise bu gaz, çimento içinde yükselerek yüzeye kadar oluşan ve ileride tehlikeli olabilecek mikro anülüs oluşturmaktadır.

Çimentolama öncesi, kuyuya basılacak çimento ve katkı maddeleri miktarının hesaplanması gerekir. Bunlardan önce, kuyu içinde çimento şerbeti ile doldurulacak hacimler ve üst tapanın, alt tapa üzerine oturmasını sağlayacak öteleme sıvısının miktarlarının da, yine hacim hesaplarından giderek, bulunması gerekir. Jeotermal sahalarda çimento şerbetinin yeterli dayanımda olması için 1,80 gr/cm³ yoğunlukta olması gereklidir. (suyun yoğunluğu : 1 gr/cm³)

Çimento şerbetinin (karışımdaki) malzeme miktarı hesabı :

$$\text{Karışım yoğunluğu} = \frac{\text{Kuru çimento kütlesi} + \text{Karışım suyu kütlesi}}{\text{Çimento hacmi} + \text{Su hacmi}}$$

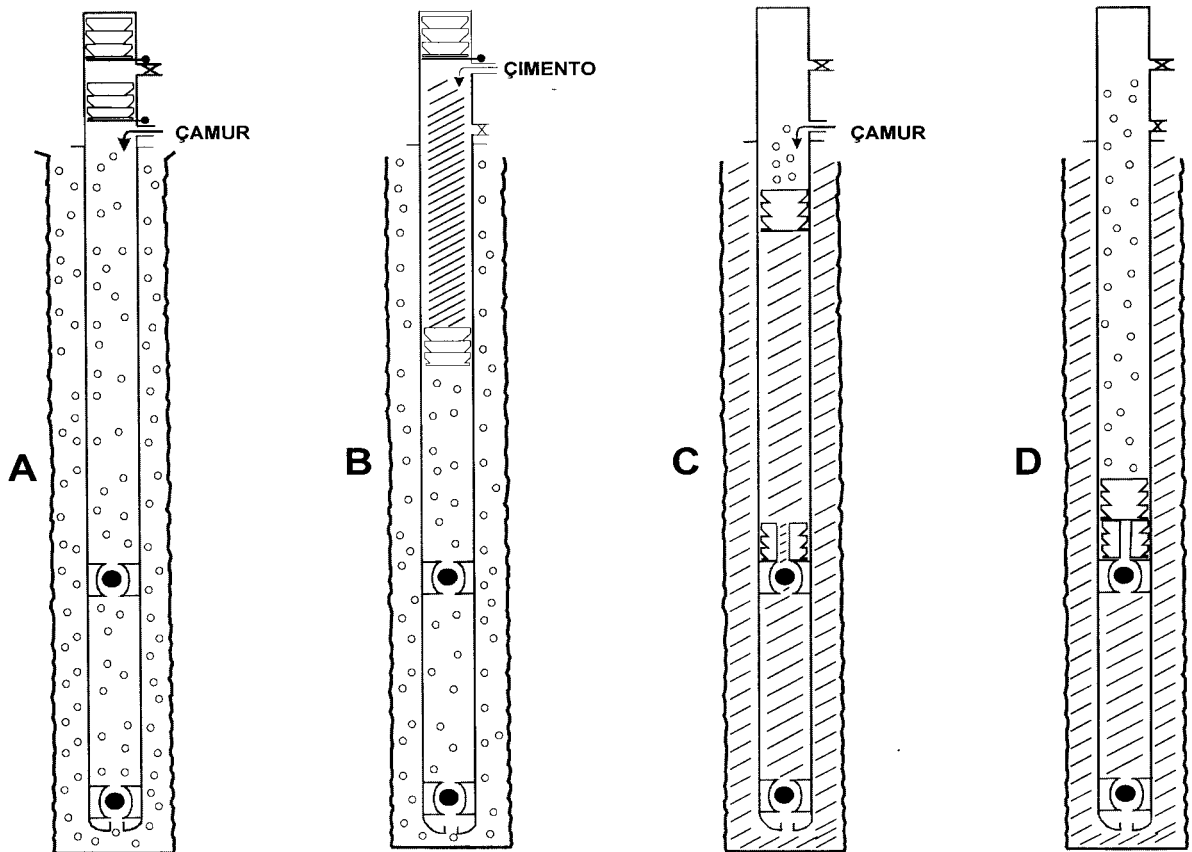
Klasik çimentolamada "Perkins Metodu" (tek kademeli çimento), operasyon kademeleri Şekil 49'da gösterilmiştir.

Birinci aşamada (A), casingler tabana indikten sonra, kuyu, çimentolama başlığı vasıtası ile sirkülasyona bağlanır. Burada amaç, kuyu dibinin soğutulması, kuyu cidarından sıyrılan keklerin dışarı atılması ve çamurun ıslah edilmesidir.

(B) de alt tapa sürgüsü çekilerek, alt tapa, çimentolama başlığından boru içine düşürülür ve kuyuya çimento şerbeti basılmaya başlanır. Çimento şerbeti basılmaya devam edildikçe, alt tapa, float collar'a doğru sürülmeye başlar.

(C) de, çimento basılması bitmiş, üst tapa serbest bırakılarak boru içindeki çimentoyu ötelemek üzere öteleme sıvısı (çamur veya su) basılmaya başlanmıştır.

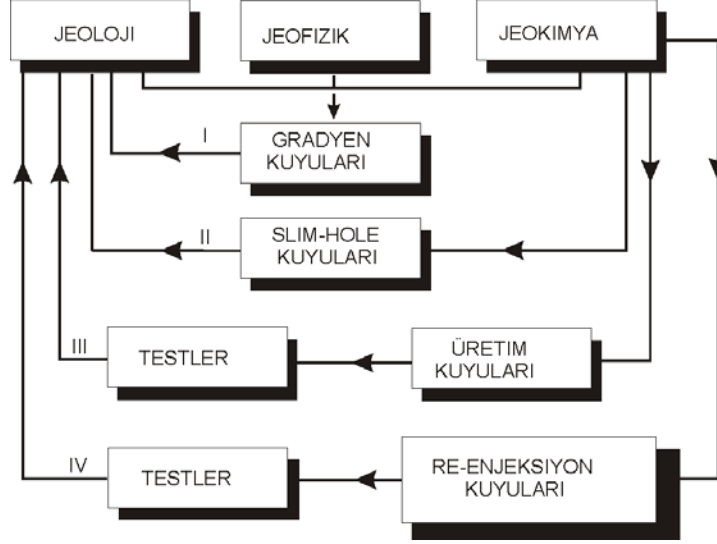
(D) de, öteleme sıvısı basımı sırasında, float collar üzerine oturan alt tapanın, diyaframı basma basıncı ile patlatılmış ve çimento şerbeti, boruların içinden geçerek kuyu ve boru arasındaki boşluktan (anülüs) yükselmeye başlamıştır. Üst tapa, alt tapanın üstüne oturunca, pompa basma basıncı yükseldiği için pompa durdurulmuş ve çimentolama başlığı üzerindeki vana kapatılmıştır. Operasyon sırasında, üst tapanın gerçekten oturup oturmadığını anlamak üzere pompaya bir-iki kere hafif yol verilir. Eğer basınç yükselmesi tekrar görülüyorsa, tapaların oturduğundan emin olunur.



Şekil 49. Klasik çimentolama operasyonu

8. JEOTERMAL PROJELERDE ÜRETİM VE RE-ENJEKSİYON KUYULARI [7][8]

Jeotermal arama ve işletme projeleri sırasında, bir kaç aşamada değişik tipte kuyular açılır. Bu çalışma sırasında en dikkat çekici husus, her çalışma devresinden sonra önceden edinilmiş bilgilerin yeniden değerlendirilmesi ve bir sonraki aşamaya, elde edilmiş bu yeni veriler ışığında geçilmesidir (Şekil 50).



Şekil 50. Jeotermal proje disiplinleri

Projelerde ilk adım, jeolojik çalışmalardır. Jeotermal sahalarda, jeolojiye en büyük yardımcı unsurlar, arazide var olan doğal buhar çıkışları, fümerol, gayser ve hidrotermal alterasyonlardır. Jeolojik etütlere yardımcı bilim dalları ise jeofizik ve jeokimyadır.

Tüm bu çalışmaların birlikte değerlendirilmesi sonucu, yeraltı sıcaklık gradyenini tespit etmeye yönelik, sığ derinlikte ve dar çaplı gradyen kuyuları açılır. Bu kuyulardan alınan sıcaklık ölçümüne göre yeraltı sıcaklık gradyeni ($^{\circ}\text{C}/10\text{ m}$) ve sıcaklık dağılım haritaları çıkarılarak, sahada olası jeotermal kaynağın saptanmasına yönelik derin ve dar çaplı (slim-hole) kuyular açılır.

Slim-hole kuyularında yapılacak testler ile sahada rezervuar özelliklerinin tespitine yönelik çok önemli bulgulara ulaşılır. Bu kuyulardan sıcaklık, basınç, debi, jeokimyasal yapı ve uygulanacak rezervuar testleri (build-up, draw-down, tracer testleri, izotop analizleri) ile saha ve rezervuar hakkında çok önemli bilgiler elde edilir. Slim-hole kuyuları sonrası mevcut jeoloji, jeofizik ve jeokimyasal verilere, test sonuçlarının da eklenmesiyle, üretim kuyu yerleri ve sayısı kararlaştırılır. Rezervuar koşulları daha net bilinebildiğinden, kuyu kazı ve teçhiz planlamaları daha emniyetli ve doğru yapılacaktır. Sahada kazılan kuyuların testleri, rezervuar ve akışkan parametrelerini daha çok belirginleştirecektir. Slim-hole ve üretim kuyularından sonra yapılan testlere ek olarak yapılan girişim (interference) testleri ile (elde edilen diğer verilerde dikkate alınarak) ek üretim kuyu yerleri (make-up wells) ile re-enjeksiyon kuyu yerleri saptanır.

Re-enjeksiyon çeşitli nedenler dolayısıyla yapılır. Bunlar:

- Yüzeydeki atık suyun çevre kirliliğine sebep olmaması,
- Rezervuar basıncının desteklenmesi,
- Rezervuar kayaktan ısı süpürmek (daha fazla ısı çekmek),
- Rezervuardan yapılan üretimle yeryüzüne kadar ulaşan oturma (subsidence) olayını önlemek.

Jeotermal sahalarda re-enjeksiyon kuyu yerlerinin saptanması, üretim kuyu yerlerinin saptanmasından çok daha zordur. Bu kuyu yerlerinin saptanması için sözü edilen test ve gözlem çalışmalarının detaylı olarak yapılması ve iyi yorumlanarak sistemin 3 boyutlu modeline ulaşılması gereklidir. Re-enjeksiyon operasyonunda meydana gelen olumsuzluklar şöyle sıralanabilir :

- a) Uygun enjeksiyon yerinin bulunamaması,
- b) Enjekte edilen suyun çok hızlı olarak üretim zonuna ulaşması ve üretim zonunu soğutması,
- c) Aşırı pompalama (enjeksiyon) basıncı,
- d) Yeraltı tatlı su akiferlerinin kirlenmesi,
- e) Buhar kuyularında üretimin kesilmesi,
- f) Enjekte edilen akışkanın kısa devre yaparak yüzeye ulaşması,
- g) Üretilen akışkanın kimyasının ters etkilenmesi.

Üretim kuyularının teçhizi, rezervuardan üretilecek akışkanın sıcaklık, basınç, debi gibi özellikleri dikkate alınarak yapıldığı gibi, re-enjeksiyon kuyularının teçhizi de rezervuar derinliği, rezervuara basılacak akışkanın debisi, sıcaklığı ve basıncı gibi etmenler göz önüne alınarak yapılır.

Re-enjeksiyon kuyu yeri seçimini etkileyen en önemli etmenlerden biri de basılan akışkanın üretim zonuna ulaşma zamanıdır. Üretim sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta basılan akışkan çok kısa sürede üretim kuyularının bulunduğu bölgeye ulaşırsa, rezervuarın soğutulması nedeniyle sistemde sıcaklık ve basınç, dolayısıyla güç düşümüne sebep olacaktır. Bu olumsuz durum bazı jeotermal sahalarda gözlenmektedir.

9. JEOTERMAL ENERJİ SİSTEMLERİ VE TESTLER

Jeotermal sistemler beslenme ve üretim (explotation) çevrimi içinde dönen dinamik sistemler olduğundan, sahada potansiyel belirleme çalışmalarına yönelik olarak her kuyu bitiminde bir dizi test yapılır.

Konuyu biraz daha açacak olursak; jeotermal enerjinin üretim-zaman ilişkisi olması gerektiğinden farklı bir görünüm sergiliyorsa, uzun dönemde öyle bir değere ulaşılır ki saptanan bu değer dengenin sağlandığı, rezervuardan düzenli olarak üretim yapılabilirdiği değerdir.

Sürdürülebilirlik kavramı, jeotermal enerjinin, rezervuardan düzenli olarak maksimum süre üretilmesidir.

İzleme programı çerçevesinde sahada genel olarak uygulanan testler;

- Sıcaklık ölçümleri,
- Basınç ölçümleri,
- Üretim testleri,
- Kimyasal analizler,
- Gaz ölçümleri,
- İzleyici testleri olarak sıralanabilir.

Bunlardan başka üretim-kabuklaşma ilişkisi, kuyular arası etkileşimi görmek üzere girişim (interference) gibi çalışmalar da aynı program içinde yapılır. Yapılan tüm bu testlerin sonucunda bir rezervuar modeli oluşturulur ve bu model aracılığıyla rezervuarın gelecekteki davranışı kestirilmeye çalışılır. İyi bir rezervuar modeli oluşturabilmek için tüm kuyuların bir program dahilinde testlere tabi tutulması gerekir.

Jeotermal rezervuarın üretime tepkisini görmek ve buna bağlı olarak işletme stratejileri geliştirmek üzere yapılan bu testlere saha izleme (monitoring) denir.

Eğer jeotermal projelerde bu tür çalışmalar yapılmazsa kurulan güç üniteleri veya ısı merkezleri ya sürdürülebilir kapasitenin üstünde ya da altında, rasgele seçilmiş olacak, her iki durumda da mühendislik ve ekonomi açısından hata yapılmış olacaktır.

Bugün ülkemizde, sahaların çoğunda bu testler bazen hiç yapılmamakta bazen de eksik uygulanmaktadır. Bunun sonucu olarak işletmelerde büyük sorunlar yaşanmaktadır. Bu testler aşağıda sıralananlara uygun yapılmalıdır:

- Doğru yöntem uygulanmalıdır,
- Test cihazları doğru çalışmalıdır (kalibrasyonlarının doğru yapılması),
- Ölçüm sonuçları doğru elde edilmelidir.

9.1. KUYU TAMAMLAMA TESTLERİ (WELL COMPLETION TESTS) [15][16][17]

Jeotermal bir kuyudan ilk veriler sondaj sırasında alınmaya başlanır. Çamur giriş ve çıkış sıcaklıkları rezervuar sıcaklığı hakkında ilk bilgiyi verirken, meydana gelen çamur kaçakları ve kaçak miktarı üretim zonu hakkında bilgilenmemizi sağlar. Sondajın kazılması sırasında alınan karot örnekleri ise rezervuar kayacın geçirgenlik (permeabilite) ve boşlukluluk (porozite) değerlerini verir.

Sondaj sırasında ve bitiminde, kuyuda konveksiyon ısı akışı başlamadan önce kuyu boyunca sıcaklık ölçüleri alınır. Sondaj bitiminde kuyu üretime geçirilir. Yüksek sıcaklık ve basınç içeren kuyularda, kuyunun üretime geçirilmesi için kuyu içi hidrostatik basıncın su gibi hafif bir akışkana düşürülmesi yeterli olacaktır. Bazı durumlarda kompresörle kuyuya hava basılarak kuyu içindeki sondaj sıvısı atılır ve rezervuar akışkanının kuyu içine hareketi sağlanır. Bu üretimde esas amaç kuyunun temizlenmesi ve ilk üretim değerlerinin görülmesidir.

İki fazlı olan, yüksek basınç ve debi ile üretim yapan kuyularda kuyu, uç kısmında bir manometre olan dikey veya yatay bir boru ile üretime açılır (Şekil 51). Kuyu üretime açılırken ve kapatılırken vana tur sayısı ile birlikte kuyu başı basıncı ve manometrede okunan uç basınç kaydedilir. Hesaplanması Russell James (Yeni Zellanda) tarafından geliştirilen bu üretim metodu uç basınç yöntemi olarak anılır (lip pressure method)(Şekil 51, Şekil 52). Akışkanın içerdiği yoğunlaşmayan gazlar nedeniyle bu yöntemde hata payı %4-8 arasındadır.

Bu yöntemde üretim hesabı :

$$\text{SI biriminde} \quad \text{Mass} = \frac{224000 * P_c^{0,96} * d_c^2}{h_o^{1,102}}$$

Burada;

Toplam Kütle (Mass) = lb/hours

Uç basınç (P_c) = psia

Uç boru iç çapı (d_c) = inch

Akış entalpisi (h_o) = BTU/lb olmaktadır.

Uç basınç yöntemiyle üretim formülü metrik sistem için de uyarlanmış olup değişkenlerin formül ve birimleri :

$$\text{Mass} = \frac{5199650 * P_c^{0,96} * d_c^2}{h_o^{1,102}}$$

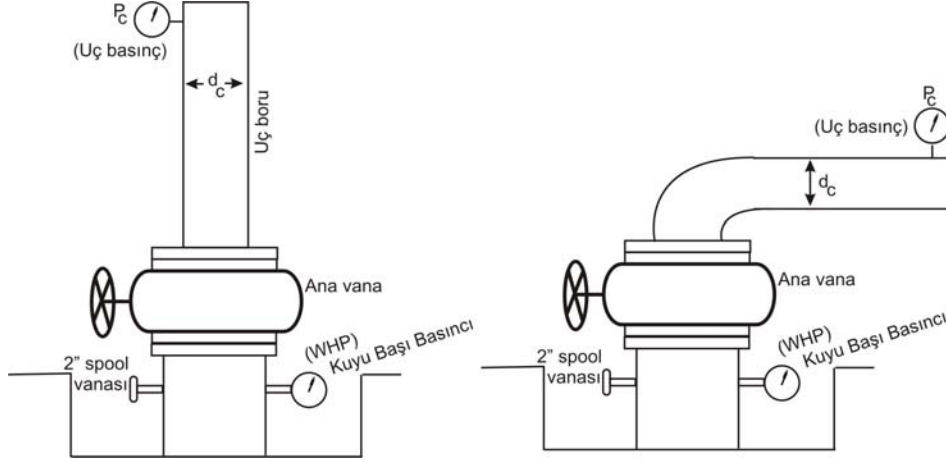
Toplam Kütle (Mass) = ton/saat

Uç basınç (P_c) = bara

Uç boru iç çapı (d_c) = metre

Akış entalpisi (h_o) = KJ/kg olmaktadır.

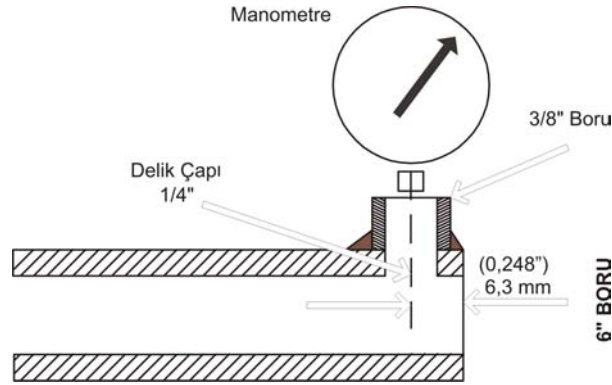
Entalpi değeri kuyudan daha sonra alınan rezervuar zonu sıcaklık değerine göre buhar tablosundan bulunur. Yani rezervuar seviyesindeki sıcaklık değerinin kuyubaşına aynen geldiği kabul edilmektedir. Dolayısıyla kaba bir hesaplama yöntemidir.



Şekil 51. Dikey üretimde kuyu başı

Birkaç saat ile birkaçgün süren bu üretimle kuyu başı basınç-debi grafiği çizilecek olursa rezervuar permeabilitesi hakkında bilgi veren değişik kuyular için değişik tipte eğriler elde edildiği görülecektir. Öte yandan bu test sonucu elde edilen üretim değerlerini kesinlikle kuyunun kalıcı sabit değerleri olarak düşünmemelidir. Daha önce de bahsedildiği üzere uzun süreli üretimde sıcaklık basınç düşümü, kabuklaşma gibi bir takım nedenlerle çeşitli dönemler gözlenecektir. Uzun dönem üretim testleri sırasında bu test ara ara tekrarlanarak kuyudaki değişimler gözlenir.

Kuyu, yapılan bu ilk üretimden sonra kapatılarak kuyu içi sıcaklık ve basıncın stabil hale gelmesi beklenir. Stabiliteye ulaşıldıktan sonra ilk statik sıcaklık ve basınç ölçüsü alınır.



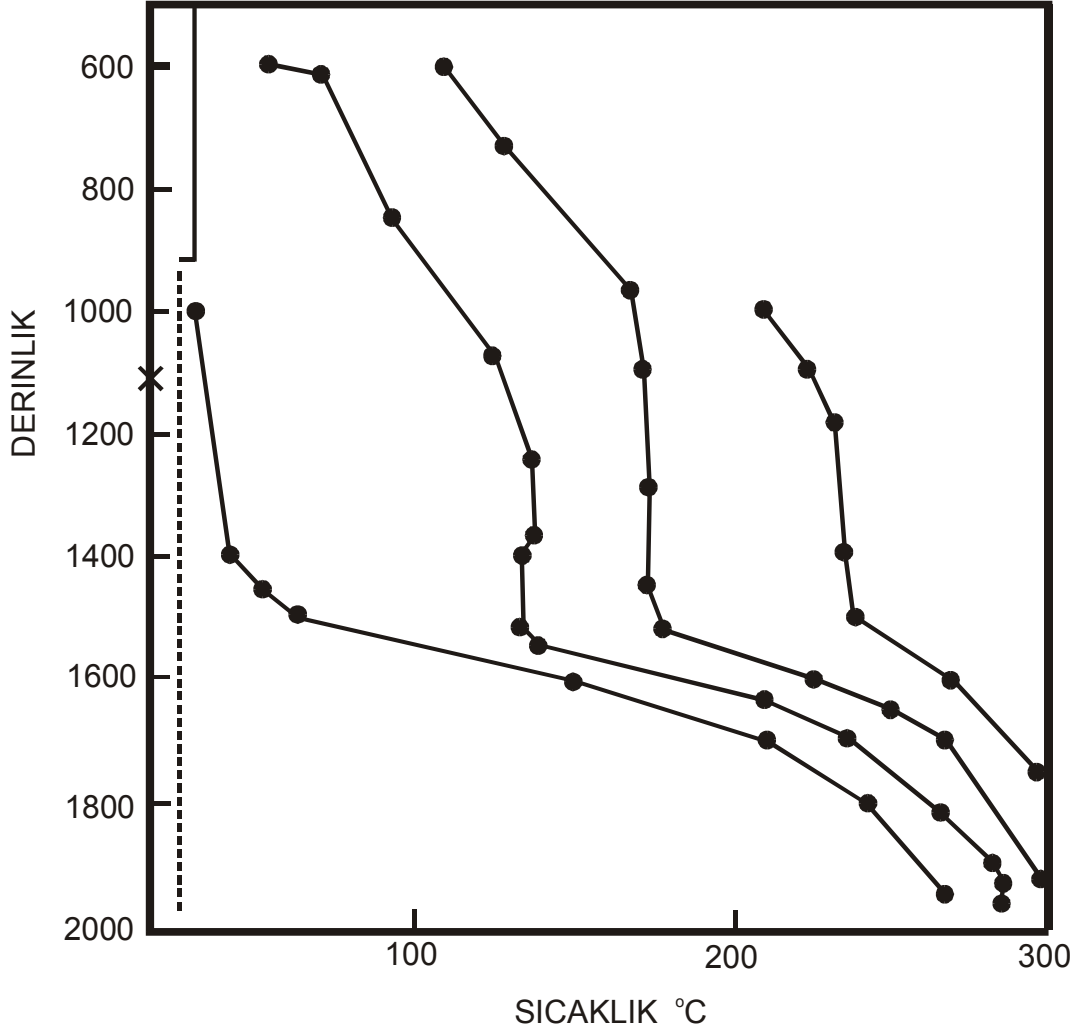
Şekil 52. Uç boru yapısı

Statik (kuyu kapalı halde iken) ölçülerin bitiminde kuyudaki beslenme zon ve/veya zonlarının saptanmasına yönelik olarak su kaybı (water loss) testine geçilir. Sondaj sırasında meydana gelen çamur kaçağı ve/veya kaçaklarını baz alarak kaçak zonlarının belirlenmesi güç ve yanıltıcı olabilmektedir. Çünkü çamur kaçağının tek noktadan mı yoksa matkabın ilerlediği zon boyunca mı olduğu zaman tam olarak kestirilememektedir.

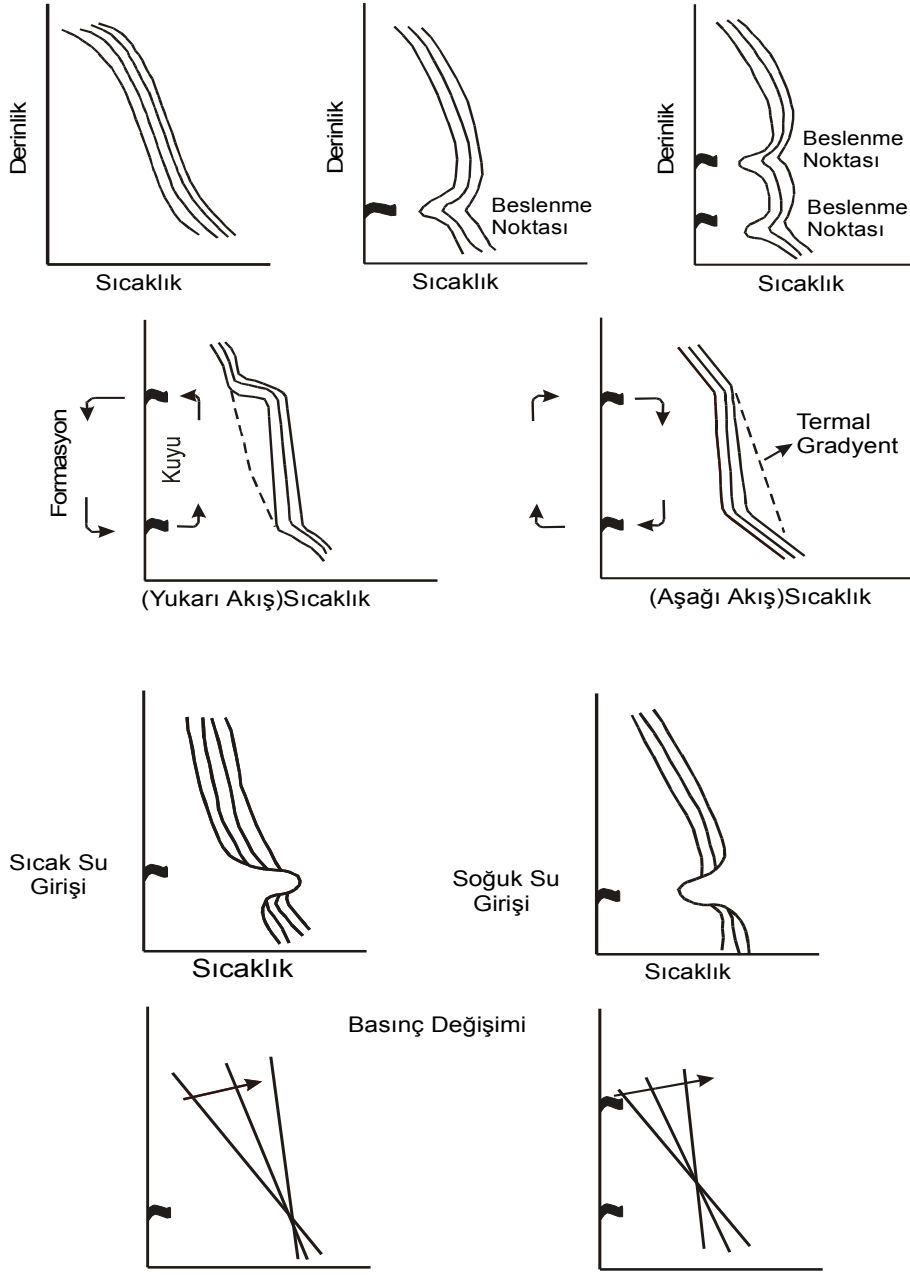
Bu testte kuyuya önce kuyu hacminin yaklaşık 1.5 katı kadar su basılarak kuyu iyice soğutulur. Daha sonra kuyuya değişik debilerde (örneğin: 10,15,25 lt/sn) su basılırken kuyu boyunca sıcaklık ölçüleri

alınır. Su basma sırasında geçirgen zonlardan rezervuara soğuk su girişi olacağından bu zonlar soğuyacak, geçirgen olmayan zonlarda ise soğuma görülmeyecektir.

Su basma kesildiğinde geçirgen zon veya zonlardan tekrar kuyu içine ısı akışı başlayacağından, kuyuda ısınma (warm up) oluşur ve bu seviyelerde ısınma daha fazla ve daha hızlı olacaktır. Su kaybı testi ile tespit edilen beslenme zonu seviyesi ileri aşamada yapılacak rezervuar testleri için ölçü alınacak yer olacaktır. Şekil 53'de gösterilen örnekte kuyu içinde beslenme zonunun 1100-1500 metreler arasında olduğu kolayca görülmektedir. Şekil 54'de bu teste çeşitli örnekler verilmektedir



Şekil 53. Su kaybı testi



Şekil 54. Su kaybı testinde, ısınma sırasında oluşan eğrilerden permeable zonların saptanması

9.2. TEK DEBİLİ ENJEKSİYON TESTİ

Su kaybı testi ile belirlenen üretim zonu seviyesine basınç elementi indirildikten (kuyu başı vanası kapalı iken) kuyuya sabit debide su basılır (Örneğin: 20 lt/san). Bu işlem esnasında rezervuar basıncında yükselme oluşur. Geçirgenliğin düşük olduğu rezervuarlarda kısa sürede yüksek basınç değerlerine ulaşılırken, geçirgenliğin yüksek olduğu sahalarda basınç yükselimi küçük değerlerde kalır hatta hiç gözlenmeyebilir. Bu testin re-enjeksiyon amaçlı kullanılacak kuyularda mutlaka yapılması gerekir. Bu test yardımıyla geçirgenlik-kalınlık (permeability-thickness) değeri tespit edilir. Bu değer birimi Darcy-metre veya Darcy-foot'tir. Çok küçük değerler söz konusu olduğunda Darcy'nin binde biri olan milidarcy 'de kullanılır. (1 Darcy= 10^{-12} m²)

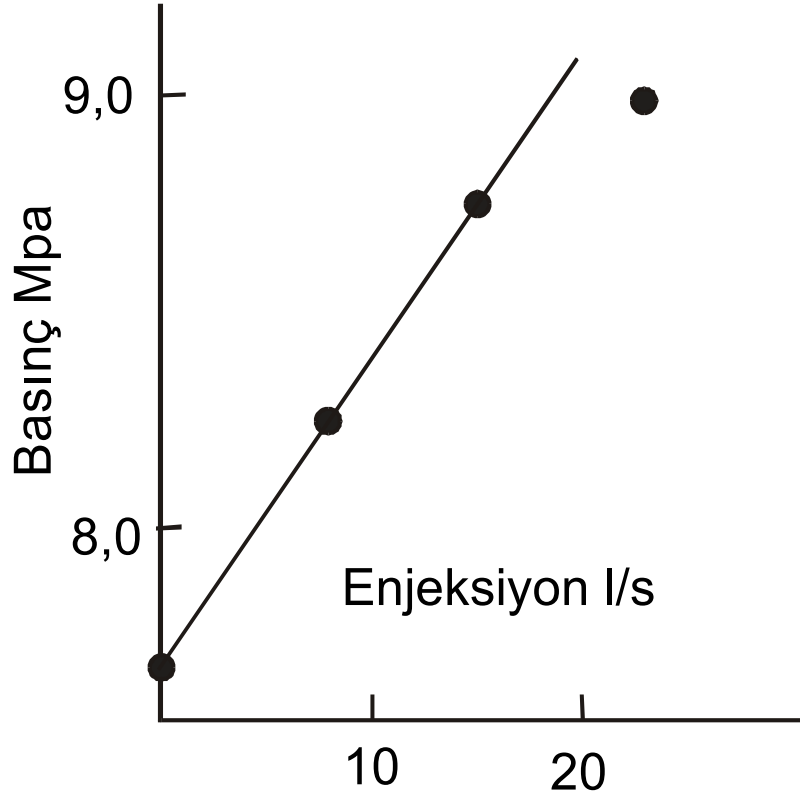
9.3. ÇOK DEBİLİ ENJEKSİYON TESTİ

Tek debili enjeksiyon testinin ardından yapılan çok debili enjeksiyon testinde kuyuya değişik debilerde (Örneğin: 10,20,30 lt/sn) soğuk su basılarak rezervuarın bünyesine su alma kapasitesi tespit edilir (Şekil 55). Bu test sonucu rezervuar geçirgenliğine ait ilk bakir değerler elde edilir. Üretim aşamasında zaman zaman tekrar edilen bu testle üretimin rezervuar geçirgenliğini ne derece etkilediği gözlenir.

Çok debili enjeksiyon testi ile elde edilen değere enjektivite endeksi (injectivity index) denir. Enjektivite endeksi:

$$EE = \frac{Q}{P_i - P_{wf}}$$

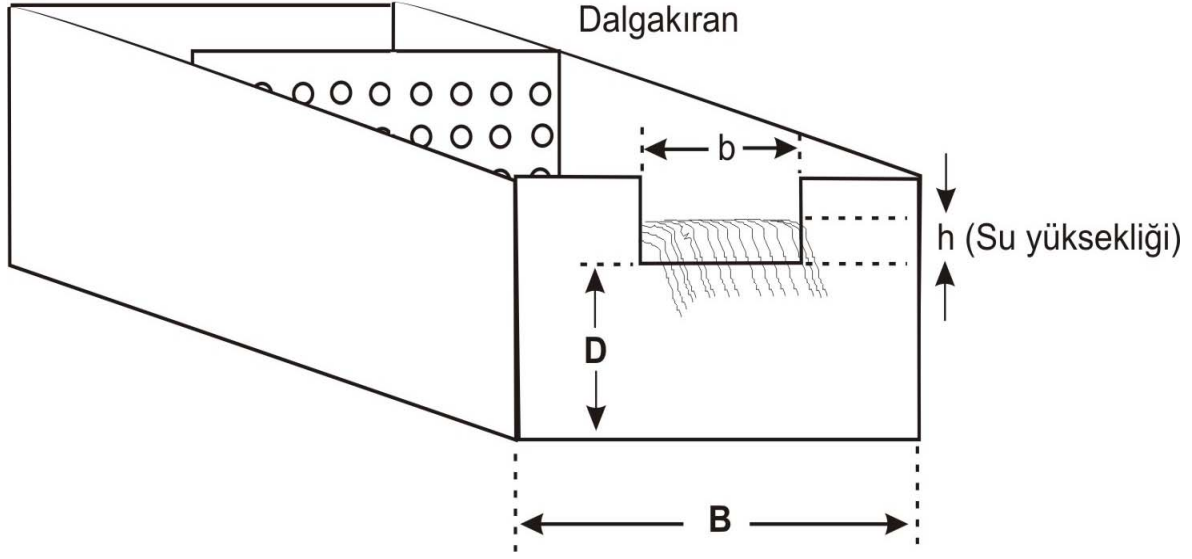
formülüyle hesaplanır. Formülde EE: Enjektivite endeksi (lt/sn/kg/cm², lt/sn/bar,...), Q: Kuyuya basılan akışkanın debisi (lt/sn), P_i: Enjeksiyon basıncı (Kg/cm², Bar,...), P_{wf}: Rezervuar derinliğinde beslenme noktası basıncı (Kg/cm², Bar,...) dir.



Şekil 55. Çok debili enjeksiyon testi

9.4. SILENCER-SAVAK YÖNTEMİYLE ÜRETİM TESTİ

İki fazlı üretim yapan kuyularda uygulanan ve hata payı % 2-4 gibi oldukça düşük olan üretim testidir. Kuyudan gelen akışkan silencer'da yoğunluk farkından dolayı iki faza ayrılır. Sıvı faz savakta ölçülür, buharlaşma oranına göre silencerden çıkan buhar miktarı hesaplanarak kuyunun toplam üretimi belirlenir (Şekil 56, Şekil 57).



Şekil 56. Savak yapısı

Savak akış sabiti :

$$k = 107,1 + \frac{0,177}{h} + 14,2 \frac{h}{D} + 27,5 \sqrt{\frac{(B-b) \cdot h}{DB}} + 2,04 \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (\text{Birimsiz})$$

Hacimsel debi :

$$\Phi = k \cdot b \cdot h^{1,5} \text{ m}^3/\text{dak}$$

Bulunan sonuç 60'a bölünerek birim m³/saate çevrilir.

$$W = \Phi \cdot v_{\text{spec}} \cdot 3600 \text{ kg/san (Savak su debisi)}$$

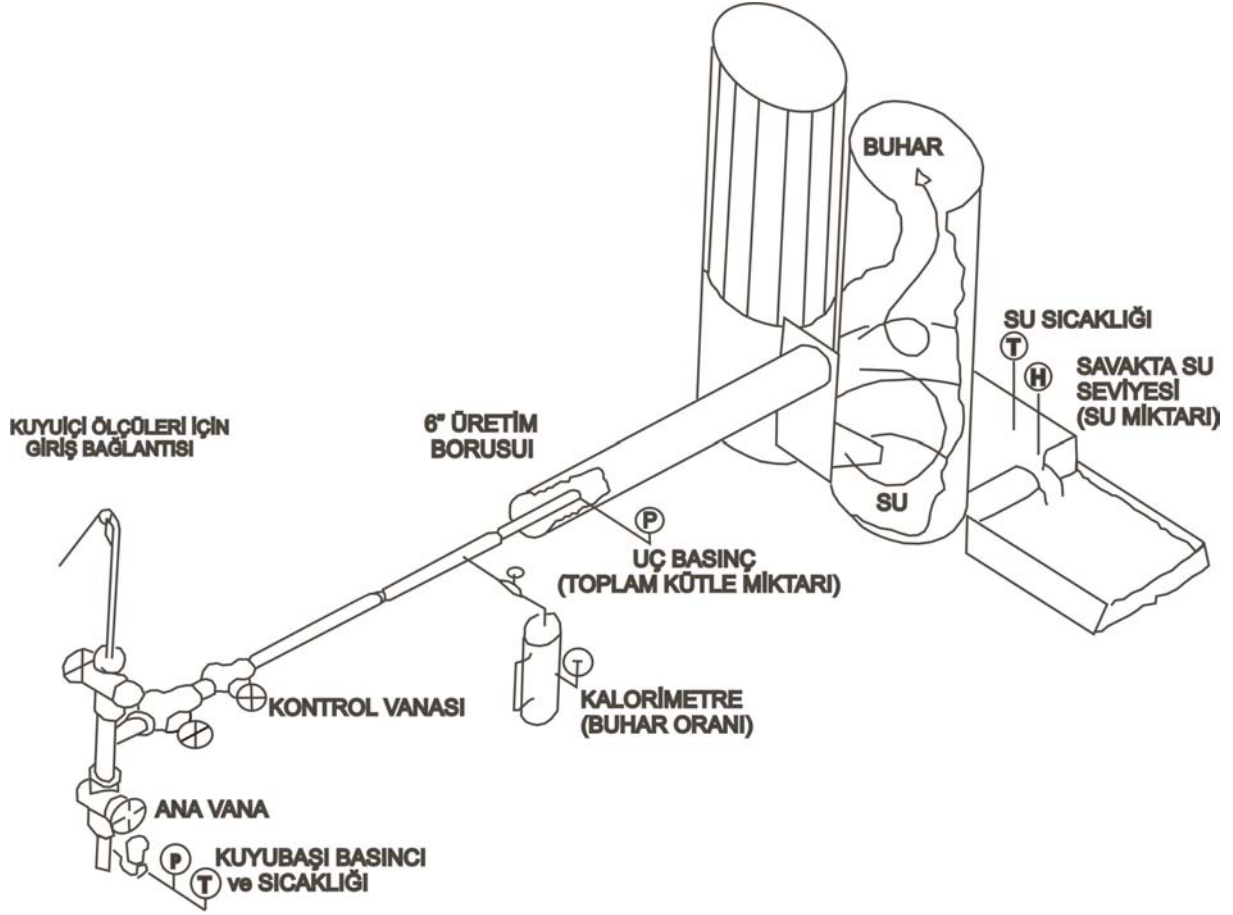
$$\frac{W}{P_c^{0,96} \cdot d_c^2} = 7,69 \cdot \frac{2676}{h_0^{1,102}} \quad h_0 \text{ (Akış Entalpisi) değeri iterasyon yolu ile bulunur.}$$

$$M = \frac{2258 \cdot W}{2676 \cdot h_0} \text{ kg/san (Toplam kütle)}$$

$$S = M - W \text{ kg/sn (Buhar miktarı)}$$

$$X = \frac{S}{M} \text{ \% buhar oranı (birimsiz). Buhar oranı ayrıca } X = \frac{h_0 - h_f}{h_{fg}} \text{ formülünden de hesaplanabilir.}$$

Formülde seperasyon şartlarındaki termodinamik değerler alınmaktadır. Burada jeotermal akışkanın atmosfere boşaldığı kabul edilmekte olduğundan 100 °C'de suyun entalpisi $h_f=418$ KJ/kg, buharın entalpisi $h_g=2676$ KJ/kg, karışım entalpisi olarak $h_{fg}=2258$ KJ/kg değerleri alınmıştır.



Şekil 57. Silencer-savak yapısı

10. JEOTERMAL ÜRETİM VE RE-ENJEKSİYON SONDAJLARI ÜZERİNE

- Jeotermal sondajlar, diğer araştırma disiplinlerinin (jeoloji, jeofizik, jeokimya....vb) olmazsa olmaz son adımıdır,
- Jeotermal sondajlar, başta jeoloji olmak üzere diğer araştırma yöntemlerine göre bilinmeyenleri (muhtemel veya mümkün olasılıkları) netleştiren bölümdür.
- Jeotermal üretim ve re-enjeksiyon sondajları, arama ve araştırma disiplinlerinin en pahalısıdır,
- Diğer jeotermal araştırma yöntemlerinde çevre kirliliğine neden olunmazken, sondajlar sırasında dikkatli olunmazsa gerek yerüstü, gerekse yeraltında büyük kirliliklere neden olunabilir.
- Özellikle yer altı tatlı su kaynaklarının kirlenmesi, büyük çevresel kirliliklere sebep olabilir,
- Jeotermal üretim ve re-enjeksiyon sondajları sırasında yapılacak hata ve yanlışlıkların çoğunun geri dönüşü yani telafisi mümkün değildir veya çok pahalıdır.
- Sondajlarda, özellikle rezervuar seviyesindeki operasyonlar yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle büyük riskler taşıdığından, sondaj makinesi ve ekipmanlarının jeotermal sondajın tüm şartlarını karşılayabilecek özellikte olması büyük önem taşır. Başta mühendis düzeyindeki personel olmak üzere, sondör ve işçilerin de jeotermal sondaj konusunda bilgili ve deneyimli olması gereklidir.
- Jeotermal sondajların sonunda, mutlaka kuyu tamamlama testleri yapılmalıdır. Çünkü kuyu üretime alındıktan sonra bu bakir değerlerin elde edilmesi mümkün değildir.

EK-1 Buhar Tabloları

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f		h _{fg}		h _g		V _f		V _g					
Kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
0,06	0,06	0,8	35,6	148,9	35,52	64,0	2417,4	576,81	1039,3	2566,3	612,33	1103,3	0,0010063	0,01612	24,525	392,89	
0,06	0,06	0,9	36,1	151,2	36,08	65,0	2416,2	576,53	1038,8	2567,4	612,61	1103,8	0,0010063	0,01612	23,830	381,75	
0,06	0,06	0,9	36,7	153,5	36,63	66,0	2414,9	576,20	1038,2	2568,4	612,83	1104,2	0,0010063	0,01612	23,156	370,96	
0,06	0,06	0,9	37,2	155,8	37,19	67,0	2413,5	575,87	1037,6	2569,3	613,05	1104,6	0,0010070	0,01613	22,505	360,52	
0,07	0,07	0,9	37,8	158,2	37,74	68,0	2412,3	575,59	1037,1	2570,5	613,33	1105,1	0,0010070	0,01613	21,874	350,42	
0,07	0,07	1,0	38,3	160,5	38,30	69,0	2410,9	575,26	1036,5	2571,4	613,55	1105,5	0,0010070	0,01613	21,264	340,64	
0,07	0,07	1,0	38,9	162,8	38,85	70,0	2409,5	574,92	1035,9	2572,3	613,77	1105,9	0,0010076	0,01614	20,673	331,17	
0,07	0,07	1,0	39,4	165,1	39,41	71,0	2408,3	574,65	1035,4	2573,3	614,00	1106,3	0,0010076	0,01614	20,101	322,01	
0,08	0,07	1,1	40,0	167,5	39,96	72,0	2406,9	574,31	1034,8	2574,4	614,27	1106,8	0,0010076	0,01614	19,546	313,13	
0,08	0,08	1,1	40,6	169,8	40,52	73,0	2405,5	573,98	1034,2	2575,3	614,50	1107,2	0,0010082	0,01615	19,010	304,53	
0,08	0,08	1,1	41,1	172,1	41,07	74,0	2404,2	573,65	1033,6	2576,3	614,72	1107,6	0,0010082	0,01615	18,490	296,21	
0,08	0,08	1,2	41,7	174,5	41,63	75,0	2403,0	573,37	1033,1	2577,4	615,00	1108,1	0,0010082	0,01615	17,987	288,14	
0,08	0,08	1,2	42,2	176,8	42,18	76,0	2401,6	573,04	1032,5	2578,4	615,22	1108,5	0,0010088	0,01616	17,498	280,32	
0,09	0,09	1,2	42,8	179,1	42,74	77,0	2400,2	572,70	1031,9	2579,3	615,44	1108,9	0,0010088	0,01616	17,026	272,75	
0,09	0,09	1,3	43,3	181,4	43,29	78,0	2399,0	572,43	1031,4	2580,2	615,66	1109,3	0,0010095	0,01617	16,568	265,41	
0,09	0,09	1,3	43,9	183,8	43,85	79,0	2397,6	572,09	1030,8	2581,4	615,94	1109,8	0,0010095	0,01617	16,124	258,30	
0,09	0,09	1,4	44,4	186,1	44,40	80,0	2396,2	571,76	1030,2	2582,3	616,16	1110,2	0,0010095	0,01617	15,694	251,41	
0,10	0,10	1,4	45,0	188,4	44,96	81,0	2394,8	571,43	1029,6	2583,3	616,38	1110,6	0,0010101	0,01618	15,277	244,73	
0,10	0,10	1,4	45,6	190,7	45,51	82,0	2393,7	571,15	1029,1	2584,2	616,61	1111,0	0,0010101	0,01618	14,872	238,25	
0,10	0,10	1,5	46,1	193,1	46,07	83,0	2392,3	570,82	1028,5	2585,3	616,88	1111,5	0,0010101	0,01618	14,480	231,97	
0,11	0,10	1,5	46,7	195,4	46,62	84,0	2390,9	570,48	1027,9	2586,3	617,10	1111,9	0,0010107	0,01619	14,099	225,87	
0,11	0,11	1,6	47,2	197,7	47,18	85,0	2389,5	570,15	1027,3	2587,2	617,33	1112,3	0,0010107	0,01619	13,731	219,97	
0,11	0,11	1,6	47,8	200,0	47,73	86,0	2388,3	569,87	1026,8	2588,1	617,55	1112,7	0,0010113	0,01620	13,373	214,24	
0,12	0,11	1,6	48,3	202,4	48,29	87,0	2386,9	569,54	1026,2	2589,3	617,83	1113,2	0,0010113	0,01620	13,026	208,68	
0,12	0,12	1,7	48,9	204,7	48,84	88,0	2385,5	569,21	1025,6	2590,2	618,05	1113,6	0,0010113	0,01620	12,689	203,28	
0,12	0,12	1,7	49,4	207,0	49,40	89,0	2384,2	568,88	1025,0	2591,2	618,27	1114,0	0,0010120	0,01621	12,363	198,05	
0,13	0,12	1,8	50,0	209,3	49,95	90,0	2383,0	568,60	1024,5	2592,1	618,49	1114,4	0,0010120	0,01621	12,046	192,97	
0,13	0,13	1,8	50,6	211,7	50,51	91,0	2381,6	568,26	1023,9	2593,3	618,77	1114,9	0,0010126	0,01622	11,738	188,04	

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi												Özgül Hacim			
P		C		h _f			h _g			h _g			V _f			V _g			
Kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb			
0,13	0,13	1,9	51,1	214,0	51,06	92,0	2380,2	567,93	1023,3	2594,2	618,99	1115,3	0,0010126	0,01622	11,440	183,26			
0,14	0,13	1,9	51,7	216,3	51,62	93,0	2378,8	567,60	1022,7	2595,1	619,21	1115,7	0,0010132	0,01623	11,150	178,62			
0,14	0,14	2,0	52,2	218,6	52,17	94,0	2377,6	567,32	1022,2	2596,0	619,44	1116,1	0,0010132	0,01623	10,868	174,11			
0,14	0,14	2,1	52,8	221,0	52,73	95,0	2376,2	566,99	1021,6	2597,0	619,66	1116,5	0,0010132	0,01623	10,595	169,73			
0,15	0,15	2,1	53,3	223,3	53,28	96,0	2374,8	566,66	1021,0	2598,1	619,94	1117,0	0,0010138	0,01624	10,330	165,48			
0,15	0,15	2,2	53,9	225,6	53,84	97,0	2373,5	566,32	1020,4	2599,1	620,16	1117,4	0,0010138	0,01624	10,072	161,35			
0,16	0,15	2,2	54,4	227,9	54,39	98,0	2372,1	565,99	1019,8	2600,0	620,38	1117,8	0,0010145	0,01625	9,822	157,34			
0,16	0,16	2,3	55,0	230,3	54,95	99,0	2370,9	565,71	1019,3	2600,9	620,60	1118,2	0,0010145	0,01625	9,579	153,45			
0,16	0,16	2,3	55,6	232,6	55,50	100,0	2369,5	565,38	1018,7	2601,9	620,82	1118,6	0,0010151	0,01626	9,343	149,67			
0,17	0,17	2,4	56,1	234,9	56,06	101,0	2368,1	565,05	1018,1	2603,0	621,10	1119,1	0,0010151	0,01626	9,113	145,99			
0,17	0,17	2,5	56,7	237,3	56,61	102,0	2366,7	564,71	1017,5	2604,0	621,32	1119,5	0,0010151	0,01626	8,890	142,42			
0,18	0,17	2,5	57,2	239,6	57,17	103,0	2365,3	564,38	1016,9	2604,9	621,54	1119,9	0,0010157	0,01627	8,674	138,95			
0,18	0,18	2,6	57,8	241,9	57,72	104,0	2364,1	564,10	1016,4	2605,8	621,77	1120,3	0,0010157	0,01627	8,463	135,58			
0,19	0,18	2,7	58,3	244,2	58,28	105,0	2362,8	563,77	1015,8	2606,7	621,99	1120,7	0,0010163	0,01628	8,259	132,30			
0,19	0,19	2,7	58,9	246,6	58,83	106,0	2361,4	563,44	1015,2	2607,7	622,21	1121,1	0,0010163	0,01628	8,059	129,11			
0,20	0,19	2,8	59,4	248,6	59,33	106,9	2360,0	563,10	1014,6	2608,8	622,49	1121,6	0,0010170	0,01629	7,867	126,02			
0,20	0,20	2,9	60,0	251,0	59,88	107,9	2358,6	562,77	1014,0	2609,8	622,71	1122,0	0,0010170	0,01629	7,678	123,00			
0,21	0,20	3,0	60,6	253,3	60,44	108,9	2357,2	562,44	1013,4	2610,7	622,93	1122,4	0,0010176	0,01630	7,496	120,08			
0,21	0,21	3,0	61,1	255,6	60,99	109,9	2356,0	562,16	1012,9	2611,6	623,15	1122,8	0,0010176	0,01630	7,318	117,23			
0,22	0,22	3,1	61,7	258,0	61,55	110,9	2354,6	561,83	1012,3	2612,6	623,38	1123,2	0,0010182	0,01631	7,145	114,46			
0,22	0,22	3,2	62,2	260,3	62,10	111,9	2353,2	561,49	1011,7	2613,5	623,60	1123,6	0,0010182	0,01631	6,977	111,77			
0,23	0,23	3,3	62,8	262,6	62,66	112,9	2351,8	561,16	1011,1	2614,4	623,82	1124,0	0,0010188	0,01632	6,813	109,14			
0,24	0,23	3,4	63,3	264,9	63,21	113,9	2350,4	560,83	1010,5	2615,6	624,10	1124,5	0,0010188	0,01632	6,654	106,60			
0,24	0,24	3,5	63,9	267,3	63,77	114,9	2349,0	560,49	1009,9	2616,5	624,32	1124,9	0,0010195	0,01633	6,499	104,12			
0,25	0,24	3,5	64,4	269,6	64,32	115,9	2347,6	560,16	1009,3	2617,4	624,54	1125,3	0,0010195	0,01633	6,348	101,70			
0,25	0,25	3,6	65,0	271,9	64,88	116,9	2346,2	559,83	1008,7	2618,4	624,76	1125,7	0,0010201	0,01634	6,202	99,354			
0,26	0,26	3,7	65,6	274,5	65,49	118,0	2345,1	559,55	1008,2	2619,3	624,99	1126,1	0,0010201	0,01634	6,059	97,068			
0,27	0,26	3,8	66,1	276,8	66,05	119,0	2343,7	559,22	1007,6	2620,2	625,21	1126,5	0,0010207	0,01635	5,920	94,844			

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _g					V _f		V _g	
Kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
0,27	0,27	3,9	66,7	279,1	66,60	120,0	2342,3	558,89	1007,0	2621,2	625,43	1126,9	0,0010207	0,01635	5,785	92,678	
0,28	0,28	4,0	67,2	281,4	67,16	121,0	2340,9	558,55	1006,4	2622,1	625,65	1127,3	0,0010213	0,01636	5,654	90,571	
0,29	0,28	4,1	67,8	283,8	67,71	122,0	2339,5	558,22	1005,8	2623,0	625,87	1127,7	0,0010213	0,01636	5,526	88,518	
0,30	0,29	4,2	68,3	286,1	68,27	123,0	2338,1	557,89	1005,2	2624,2	626,15	1128,2	0,0010219	0,01637	5,401	86,520	
0,30	0,30	4,3	68,9	288,4	68,82	124,0	2336,7	557,55	1004,6	2625,1	626,37	1128,6	0,0010219	0,01637	5,279	84,574	
0,31	0,30	4,4	69,4	290,8	69,38	125,0	2335,3	557,22	1004,0	2626,1	626,60	1129,0	0,0010226	0,01638	5,161	82,680	
0,32	0,31	4,5	70,0	293,1	69,93	126,0	2333,9	556,89	1003,4	2627,0	626,82	1129,4	0,0010226	0,01638	5,046	80,834	
0,33	0,32	4,6	70,6	295,4	70,49	127,0	2332,5	556,55	1002,8	2627,9	627,04	1129,8	0,0010232	0,01639	4,934	79,036	
0,33	0,33	4,7	71,1	297,7	71,04	128,0	2331,1	556,22	1002,2	2628,8	627,26	1130,2	0,0010238	0,01640	4,824	77,285	
0,34	0,33	4,9	71,7	300,1	71,60	129,0	2329,7	555,89	1001,6	2629,8	627,48	1130,6	0,0010238	0,01640	4,718	75,579	
0,35	0,34	5,0	72,2	302,4	72,15	130,0	2328,3	555,56	1001,0	2630,7	627,71	1131,0	0,0010244	0,01641	4,614	73,917	
0,36	0,35	5,1	72,8	304,7	72,71	131,0	2326,9	555,22	1000,4	2631,6	627,93	1131,4	0,0010244	0,01641	4,513	72,298	
0,37	0,36	5,2	73,3	307,0	73,26	132,0	2325,5	554,89	999,8	2632,6	628,15	1131,8	0,0010251	0,01642	4,415	70,720	
0,38	0,37	5,3	73,9	309,4	73,82	133,0	2324,1	554,56	999,2	2633,5	628,37	1132,2	0,0010251	0,01642	4,319	69,182	
0,38	0,38	5,5	74,4	311,7	74,37	134,0	2322,7	554,22	998,6	2634,4	628,59	1132,6	0,0010257	0,01643	4,225	67,683	
0,39	0,39	5,6	75,0	314,0	74,93	135,0	2321,3	553,89	998,0	2635,4	628,82	1133,0	0,0010257	0,01643	4,134	66,221	
0,40	0,39	5,7	75,6	316,3	75,48	136,0	2320,0	553,56	997,4	2636,3	629,04	1133,4	0,0010263	0,01644	4,045	64,797	
0,41	0,40	5,9	76,1	318,7	76,04	137,0	2318,6	553,22	996,8	2637,2	629,26	1133,8	0,0010269	0,01645	3,958	63,408	
0,42	0,41	6,0	76,7	321,0	76,59	138,0	2317,2	552,89	996,2	2638,1	629,48	1134,2	0,0010269	0,01645	3,874	62,054	
0,43	0,42	6,1	77,2	323,3	77,15	139,0	2315,8	552,56	995,6	2639,1	629,70	1134,6	0,0010276	0,01646	3,791	60,734	
0,44	0,43	6,3	77,8	325,6	77,70	140,0	2314,4	552,23	995,0	2640,0	629,93	1135,0	0,0010276	0,01646	3,711	59,447	
0,45	0,44	6,4	78,3	328,0	78,26	141,0	2313,0	551,89	994,4	2640,9	630,15	1135,4	0,0010282	0,01647	3,632	58,191	
0,46	0,45	6,6	78,9	330,3	78,81	142,0	2311,6	551,56	993,8	2641,9	630,37	1135,8	0,0010282	0,01647	3,556	56,967	
0,47	0,46	6,7	79,4	332,6	79,37	143,0	2310,2	551,23	993,2	2642,8	630,59	1136,2	0,0010288	0,01648	3,482	55,773	
0,48	0,47	6,9	80,0	334,9	79,92	144,0	2308,8	550,89	992,6	2643,7	630,81	1136,6	0,0010294	0,01649	3,409	54,607	
0,49	0,48	7,0	80,6	337,3	80,48	145,0	2307,4	550,56	992,0	2644,7	631,04	1137,0	0,0010294	0,01649	3,338	53,471	
0,51	0,50	7,2	81,1	339,6	81,03	146,0	2306,0	550,23	991,4	2645,6	631,26	1137,4	0,0010301	0,01650	3,269	52,362	
0,52	0,51	7,3	81,7	341,9	81,59	147,0	2304,6	549,89	990,8	2646,5	631,48	1137,8	0,0010301	0,01650	3,201	51,280	

Basmaç		Sıcaklık		Özgül Entalpi												Özgül Hacim			
P		C		h _f			h _g			h _g			V _f			V _g			
Kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb			
0.53	0.52	7.5	82.2	344.2	82.14	148.0	2303.2	549.56	990.2	2647.5	631.70	1138.2	0.0010307	0.01651	3.135	50.224			
0.54	0.53	7.7	82.8	346.6	82.70	149.0	2301.8	549.23	989.6	2648.4	631.92	1138.6	0.0010313	0.01652	3.071	49.193			
0.55	0.54	7.9	83.3	348.9	83.25	150.0	2300.4	548.90	989.0	2649.3	632.15	1139.0	0.0010319	0.01652	3.008	48.188			
0.56	0.55	8.0	83.9	351.2	83.81	151.0	2299.0	548.56	988.4	2650.2	632.37	1139.4	0.0010325	0.01653	2.947	47.206			
0.58	0.57	8.2	84.4	353.6	84.36	152.0	2297.6	548.23	987.8	2651.2	632.59	1139.8	0.0010331	0.01653	2.887	46.248			
0.59	0.58	8.4	85.0	355.9	84.92	153.0	2296.0	547.84	987.1	2652.1	632.81	1140.2	0.0010337	0.01654	2.829	45.312			
0.60	0.59	8.6	85.6	358.2	85.47	154.0	2294.6	547.51	986.5	2652.8	632.98	1140.5	0.0010343	0.01655	2.772	44.399			
0.62	0.60	8.8	86.1	360.5	86.03	155.0	2293.2	547.17	985.9	2653.7	633.20	1140.9	0.0010349	0.01655	2.716	43.508			
0.63	0.62	8.9	86.7	362.9	86.58	156.0	2291.8	546.84	985.3	2654.7	633.42	1141.3	0.0010355	0.01656	2.662	42.637			
0.64	0.63	9.1	87.2	365.2	87.14	157.0	2290.4	546.51	984.7	2655.6	633.64	1141.7	0.0010361	0.01657	2.608	41.787			
0.66	0.64	9.3	87.8	367.5	87.69	158.0	2289.0	546.18	984.1	2656.5	633.87	1142.1	0.0010367	0.01657	2.557	40.956			
0.67	0.66	9.5	88.3	369.8	88.25	159.0	2286.7	545.62	983.1	2657.5	634.09	1142.5	0.0010373	0.01658	2.506	40.145			
0.69	0.67	9.7	88.9	372.2	88.80	160.0	2284.6	545.45	982.8	2658.4	634.31	1142.9	0.0010379	0.01658	2.457	39.353			
0.70	0.69	10.0	89.4	374.7	89.41	161.1	2284.6	545.12	982.2	2659.3	634.53	1143.3	0.0010385	0.01659	2.408	38.580			
0.71	0.70	10.2	90.0	377.0	89.97	162.1	2283.2	544.79	981.6	2660.2	634.75	1143.7	0.0010391	0.01660	2.361	37.824			
0.73	0.72	10.4	90.6	379.4	90.52	163.1	2281.8	544.46	981.0	2660.9	634.92	1144.0	0.0010397	0.01660	2.315	37.085			
0.75	0.73	10.6	91.1	381.7	91.08	164.1	2280.4	544.12	980.4	2661.9	635.14	1144.4	0.0010403	0.01661	2.270	36.364			
0.76	0.75	10.8	91.7	384.0	91.63	165.1	2278.8	543.73	979.7	2662.8	635.36	1144.8	0.0010409	0.01662	2.226	35.659			
0.78	0.76	11.1	92.2	386.3	92.19	166.1	2277.4	543.40	979.1	2663.7	635.59	1145.2	0.0010415	0.01662	2.183	34.970			
0.79	0.78	11.3	92.8	388.7	92.74	167.1	2276.0	543.07	978.5	2664.7	635.81	1145.6	0.0010421	0.01663	2.141	34.296			
0.81	0.79	11.5	93.3	391.0	93.30	168.1	2274.6	542.73	977.9	2665.6	636.03	1146.0	0.0010427	0.01664	2.100	33.638			
0.83	0.81	11.8	93.9	393.3	93.85	169.1	2273.0	542.35	977.2	2666.3	636.20	1146.3	0.0010433	0.01664	2.060	32.995			
0.84	0.83	12.0	94.4	395.7	94.41	170.1	2271.6	542.01	976.6	2667.2	636.42	1146.7	0.0010439	0.01665	2.020	32.367			
0.86	0.85	12.3	95.0	398.0	94.96	171.1	2270.2	541.68	976.0	2668.2	636.64	1147.1	0.0010445	0.01666	1.982	31.752			
0.88	0.86	12.5	95.6	400.3	95.52	172.1	2268.8	541.35	975.4	2669.1	636.86	1147.5	0.0010451	0.01666	1.945	31.151			
0.90	0.88	12.8	96.1	402.6	96.07	173.1	2267.2	540.96	974.7	2670.0	637.08	1147.9	0.0010457	0.01667	1.908	30.564			
0.92	0.90	13.0	96.7	405.0	96.63	174.1	2265.8	540.63	974.1	2670.7	637.25	1148.2	0.0010463	0.01668	1.872	29.989			
0.93	0.92	13.3	97.2	407.3	97.18	175.1	2264.4	540.29	973.5	2671.6	637.47	1148.6	0.0010469	0.01668	1.837	29.427			

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _g					V _f		V _g	
kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
0,95	0,94	13,6	97,8	409,6	97,74	176,1	2262,7	539,90	972,8	2672,6	637,70	1149,0	0,0010419	0,01669	1,803	28,878	
0,97	0,95	13,8	98,3	411,9	98,29	177,1	2261,3	539,57	972,2	2673,5	637,92	1149,4	0,0010425	0,01670	1,769	28,341	
0,99	0,97	14,1	98,9	414,5	98,90	178,2	2259,9	539,24	971,6	2674,2	638,08	1149,7	0,0010425	0,01670	1,736	27,816	
1,01	0,99	14,4	99,4	416,8	99,46	179,2	2258,3	538,85	970,9	2675,1	638,31	1150,1	0,0010432	0,01671	1,704	27,302	
1,03	1,01	14,7	100,0	419,1	100,01	180,2	2256,9	538,52	970,3	2676,1	638,53	1150,5	0,0010438	0,01672	1,673	26,799	
1,05	1,03	15,0	100,6	421,5	100,57	181,2	2255,5	538,18	969,7	2676,8	638,69	1150,8	0,0010444	0,01673	1,642	26,307	
1,07	1,05	15,3	101,1	423,8	101,12	182,2	2253,9	537,80	969,0	2677,7	638,92	1151,2	0,0010444	0,01673	1,612	25,826	
1,10	1,08	15,6	101,7	426,1	101,68	183,2	2252,5	537,46	968,4	2678,6	639,14	1151,6	0,0010450	0,01674	1,583	25,355	
1,12	1,10	15,9	102,2	428,4	102,23	184,2	2251,1	537,13	967,8	2679,6	639,36	1152,0	0,0010457	0,01675	1,554	24,895	
1,14	1,12	16,2	102,8	430,8	102,79	185,2	2249,5	536,74	967,1	2680,2	639,53	1152,3	0,0010457	0,01675	1,526	24,444	
1,16	1,14	16,5	103,3	433,1	103,34	186,2	2248,1	536,41	966,5	2681,2	639,75	1152,7	0,0010463	0,01676	1,498	24,003	
1,19	1,16	16,9	103,9	435,4	103,90	187,2	2246,5	536,02	965,8	2682,1	639,97	1153,1	0,0010469	0,01677	1,471	23,571	
1,21	1,19	17,2	104,4	437,8	104,45	188,2	2245,1	535,69	965,2	2682,8	640,14	1153,4	0,0010475	0,01678	1,445	23,149	
1,23	1,21	17,5	105,0	440,1	105,01	189,2	2243,7	535,35	964,6	2683,7	640,36	1153,8	0,0010475	0,01678	1,419	22,735	
1,26	1,23	17,9	105,6	442,4	105,56	190,2	2242,0	534,96	963,9	2684,7	640,58	1154,2	0,0010482	0,01679	1,394	22,330	
1,28	1,26	18,2	106,1	445,0	106,17	191,3	2240,6	534,63	963,3	2685,4	640,75	1154,5	0,0010488	0,01680	1,369	21,934	
1,30	1,28	18,6	106,7	447,3	106,73	192,3	2239,0	534,24	962,6	2686,3	640,97	1154,9	0,0010488	0,01680	1,345	21,546	
1,33	1,30	18,9	107,2	449,6	107,28	193,3	2237,6	533,91	962,0	2687,2	641,19	1155,3	0,0010494	0,01681	1,321	21,166	
1,35	1,33	19,3	107,8	451,9	107,84	194,3	2236,0	533,52	961,3	2687,9	641,36	1155,6	0,0010500	0,01682	1,298	20,794	
1,38	1,35	19,6	108,3	454,3	108,39	195,3	2234,6	533,19	960,7	2688,9	641,58	1156,0	0,0010507	0,01683	1,275	20,430	
1,41	1,38	20,0	108,9	456,6	108,95	196,3	2233,0	532,80	960,0	2689,6	641,75	1156,3	0,0010507	0,01683	1,253	20,073	
1,43	1,41	20,4	109,4	458,9	109,50	197,3	2231,6	532,47	959,4	2690,5	641,97	1156,7	0,0010513	0,01684	1,231	19,724	
1,46	1,43	20,8	110,0	461,2	110,06	198,3	2229,9	532,08	958,7	2691,4	642,19	1157,1	0,0010519	0,01685	1,210	19,382	
1,49	1,46	21,2	110,6	463,6	110,61	199,3	2228,5	531,75	958,1	2692,1	642,36	1157,4	0,0010525	0,01686	1,189	19,047	
1,52	1,49	21,6	111,1	466,1	111,22	200,4	2226,9	531,36	957,4	2693,0	642,58	1157,8	0,0010525	0,01686	1,168	18,719	
1,54	1,52	22,0	111,7	468,5	111,78	201,4	2225,5	531,02	956,8	2693,7	642,75	1158,1	0,0010532	0,01687	1,148	18,397	
1,57	1,54	22,4	112,2	470,8	112,33	202,4	2223,9	530,64	956,1	2694,7	642,97	1158,5	0,0010538	0,01688	1,129	18,082	
1,60	1,57	22,8	112,8	473,1	112,89	203,4	2222,3	530,25	955,4	2695,4	643,13	1158,8	0,0010544	0,01689	1,110	17,774	

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _{fg}					V _f		V _g	
kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
1,63	1,60	23,2	113,3	475,4	113,44	204,4	2220,9	529,91	954,8	2696,3	643,36	1159,2	0,0010544	0,01689	1,091	17,471	
1,66	1,63	23,6	113,9	477,8	114,00	205,4	2219,2	529,53	954,1	2697,0	643,52	1159,5	0,0010550	0,01690	1,072	17,175	
1,69	1,66	24,1	114,4	480,1	114,55	206,4	2217,8	529,19	953,5	2697,9	643,74	1159,9	0,0010557	0,01691	1,054	16,885	
1,72	1,69	24,5	115,0	482,4	115,11	207,4	2216,2	528,80	952,8	2698,6	643,91	1160,2	0,0010563	0,01692	1,036	16,601	
1,76	1,72	25,0	115,6	484,7	115,66	208,4	2214,6	528,42	952,1	2699,6	644,13	1160,6	0,0010569	0,01693	1,019	16,322	
1,79	1,75	25,4	116,1	487,3	116,27	209,5	2213,2	528,08	951,5	2700,3	644,30	1160,9	0,0010569	0,01693	1,002	16,049	
1,82	1,79	25,9	116,7	489,6	116,83	210,5	2211,6	527,69	950,8	2701,2	644,52	1161,3	0,0010575	0,01694	0,985	15,781	
1,85	1,82	26,4	117,2	491,9	117,38	211,5	2209,9	527,31	950,1	2701,9	644,69	1161,6	0,0010582	0,01695	0,969	15,518	
1,89	1,85	26,8	117,8	494,3	117,94	212,5	2208,5	526,97	949,5	2702,8	644,91	1162,0	0,0010588	0,01696	0,953	15,261	
1,92	1,88	27,3	118,3	496,6	118,49	213,5	2206,9	526,58	948,8	2703,5	645,08	1162,3	0,0010594	0,01697	0,937	15,009	
1,95	1,92	27,8	118,9	498,9	119,05	214,5	2205,3	526,20	948,1	2704,4	645,30	1162,7	0,0010594	0,01697	0,921	14,762	
1,99	1,95	28,3	119,4	501,3	119,60	215,5	2203,9	525,86	947,5	2705,1	645,47	1163,0	0,0010600	0,01698	0,906	14,519	
2,02	1,99	28,8	120,0	503,8	120,21	216,6	2202,3	525,47	946,8	2706,1	645,69	1163,4	0,0010607	0,01699	0,892	14,282	
2,06	2,02	29,3	120,6	506,1	120,77	217,6	2200,6	525,09	946,1	2706,8	645,85	1163,7	0,0010613	0,01700	0,877	14,049	
2,10	2,06	29,8	121,1	508,5	121,32	218,6	2199,0	524,70	945,4	2707,5	646,02	1164,0	0,0010619	0,01701	0,863	13,820	
2,13	2,09	30,3	121,7	510,8	121,88	219,6	2197,6	524,36	944,8	2708,4	646,24	1164,4	0,0010625	0,01701	0,849	13,596	
2,17	2,13	30,9	122,2	513,1	122,43	220,6	2196,0	523,98	944,1	2709,1	646,41	1164,7	0,0010632	0,01702	0,835	13,376	
2,21	2,17	31,4	122,8	515,4	122,99	221,6	2194,3	523,59	943,4	2710,0	646,63	1165,1	0,0010638	0,01703	0,822	13,161	
2,25	2,20	32,0	123,3	518,0	123,60	222,7	2192,7	523,20	942,7	2710,7	646,80	1165,4	0,0010644	0,01704	0,808	12,949	
2,29	2,24	32,5	123,9	520,3	124,15	223,7	2191,3	522,87	942,1	2711,4	646,96	1165,7	0,0010650	0,01705	0,795	12,742	
2,33	2,28	33,1	124,4	522,7	124,71	224,7	2189,7	522,48	941,4	2712,3	647,19	1166,1	0,0010656	0,01706	0,783	12,538	
2,37	2,32	33,7	125,0	525,0	125,26	225,7	2188,1	522,09	940,7	2713,0	647,35	1166,4	0,0010662	0,01706	0,770	12,339	
2,41	2,36	34,2	125,6	527,3	125,82	226,7	2186,4	521,70	940,0	2713,7	647,52	1166,7	0,0010668	0,01707	0,758	12,143	
2,45	2,40	34,8	126,1	529,6	126,37	227,7	2184,8	521,31	939,3	2714,7	647,74	1167,1	0,0010673	0,01708	0,746	11,951	
2,49	2,44	35,4	126,7	532,2	126,98	228,8	2183,2	520,92	938,6	2715,4	647,91	1167,4	0,0010679	0,01709	0,734	11,762	
2,53	2,48	36,0	127,2	534,5	127,54	229,8	2181,6	520,53	937,9	2716,1	648,07	1167,7	0,0010685	0,01710	0,723	11,578	
2,58	2,53	36,6	127,8	536,8	128,09	230,8	2180,2	520,20	937,3	2716,8	648,24	1168,0	0,0010691	0,01711	0,711	11,396	
2,62	2,57	37,3	128,3	539,2	128,65	231,8	2178,5	519,81	936,6	2717,7	648,46	1168,4	0,0010697	0,01711	0,700	11,218	

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _g					V _f		V _g	
kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
2,66	2,61	37,9	128,9	541,5	129,20	232,8	2176,9	519,42	935,9	2718,4	648,63	1168,7	0,0010688	0,01712	0,689	11,043	
2,71	2,66	38,5	129,4	543,8	129,76	233,8	2175,3	519,04	935,2	2719,1	648,80	1169,0	0,0010694	0,01713	0,679	10,872	
2,75	2,70	39,2	130,0	546,4	130,37	234,9	2173,6	518,65	934,5	2719,8	648,96	1169,3	0,0010700	0,01714	0,668	10,703	
2,80	2,75	39,8	130,6	548,7	130,92	235,9	2172,0	518,26	933,8	2720,7	649,18	1169,7	0,0010706	0,01715	0,658	10,538	
2,85	2,79	40,5	131,1	551,0	131,48	236,9	2170,4	517,87	933,1	2721,4	649,35	1170,0	0,0010713	0,01716	0,648	10,376	
2,89	2,84	41,2	131,7	553,4	132,03	237,9	2168,8	517,48	932,4	2722,1	649,52	1170,3	0,0010719	0,01717	0,638	10,217	
2,94	2,89	41,9	132,2	555,7	132,59	238,9	2167,1	517,09	931,7	2722,8	649,68	1170,6	0,0010725	0,01717	0,628	10,060	
2,99	2,93	42,5	132,8	558,2	133,20	240,0	2165,5	516,71	931,0	2723,7	649,91	1171,0	0,0010731	0,01718	0,618	9,9069	
3,04	2,98	43,2	133,3	560,6	133,76	241,0	2163,9	516,32	930,3	2724,4	650,07	1171,3	0,0010737	0,01719	0,609	9,7562	
3,09	3,03	44,0	133,9	562,9	134,31	242,0	2162,2	515,93	929,6	2725,1	650,24	1171,6	0,0010743	0,01720	0,600	9,6083	
3,14	3,08	44,7	134,4	565,2	134,87	243,0	2160,6	515,54	928,9	2725,8	650,40	1171,9	0,0010749	0,01721	0,591	9,4631	
3,19	3,13	45,4	135,0	567,8	135,48	244,1	2159,0	515,15	928,2	2726,5	650,57	1172,2	0,0010755	0,01722	0,582	9,3204	
3,24	3,18	46,1	135,6	570,1	136,03	245,1	2157,4	514,76	927,5	2727,2	650,74	1172,5	0,0010761	0,01723	0,573	9,1803	
3,30	3,23	46,9	136,1	572,4	136,59	246,1	2155,5	514,32	926,7	2727,9	650,90	1172,8	0,0010767	0,01724	0,564	9,0428	
3,35	3,29	47,7	136,7	574,8	137,14	247,1	2153,9	513,93	926,0	2728,9	651,13	1173,2	0,0010773	0,01725	0,556	8,9077	
3,40	3,34	48,4	137,2	577,1	137,70	248,1	2152,2	513,54	925,3	2729,6	651,29	1173,5	0,0010779	0,01726	0,548	8,7750	
3,46	3,39	49,2	137,8	579,6	138,31	249,2	2150,6	513,15	924,6	2730,3	651,46	1173,8	0,0010785	0,01726	0,540	8,6447	
3,51	3,45	50,0	138,3	582,0	138,86	250,2	2149,0	512,76	923,9	2731,0	651,63	1174,1	0,0010791	0,01727	0,532	8,5166	
3,57	3,50	50,8	138,9	584,3	139,42	251,2	2147,4	512,38	923,2	2731,7	651,79	1174,4	0,0010797	0,01728	0,524	8,3909	
3,63	3,56	51,6	139,4	586,6	139,97	252,2	2145,7	511,99	922,5	2732,4	651,96	1174,7	0,0010803	0,01729	0,516	8,2673	
3,68	3,61	52,4	140,0	589,2	140,58	253,3	2143,9	511,54	921,7	2733,1	652,13	1175,0	0,0010809	0,01730	0,508	8,1460	
3,74	3,67	53,2	140,6	591,5	141,14	254,3	2142,2	511,16	921,0	2733,7	652,29	1175,3	0,0010815	0,01731	0,501	8,0267	
3,80	3,73	54,1	141,1	593,8	141,69	255,3	2140,6	510,77	920,3	2734,4	652,46	1175,6	0,0010821	0,01732	0,494	7,9096	
3,86	3,79	54,9	141,7	596,2	142,25	256,3	2139,0	510,38	919,6	2735,1	652,62	1175,9	0,0010827	0,01733	0,487	7,7944	
3,92	3,85	55,8	142,2	598,7	142,86	257,4	2137,1	509,93	918,8	2735,8	652,79	1176,2	0,0010833	0,01734	0,479	7,6813	
3,98	3,91	56,7	142,8	601,0	143,41	258,4	2135,5	509,55	918,1	2736,5	652,96	1176,5	0,0010839	0,01735	0,473	7,5702	
4,05	3,97	57,5	143,3	603,4	143,97	259,4	2133,9	509,16	917,4	2737,2	653,12	1176,8	0,0010845	0,01736	0,466	7,4609	
4,11	4,03	58,4	143,9	605,9	144,58	260,5	2132,2	508,77	916,7	2737,9	653,29	1177,1	0,0010851	0,01737	0,459	7,3536	

Basmaç		Sıcaklık		Özgül Entalpi												Özgül Hacim			
P		C		h _f			h _{fg}			h _g			V _f		V _g				
Kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb			
4,17	4,09	59,3	144,4	608,2	145,13	261,5	2130,4	508,32	915,9	2738,6	653,46	1177,4	0,0010850	0,01738	0,452	7,2481			
4,24	4,16	60,3	145,0	610,6	145,69	262,5	2128,8	507,94	915,2	2739,3	653,62	1177,7	0,0010856	0,01739	0,446	7,1444			
4,30	4,22	61,2	145,6	612,9	146,24	263,5	2127,1	507,55	914,5	2740,0	653,79	1178,0	0,0010856	0,01739	0,440	7,0425			
4,37	4,29	62,1	146,1	615,5	146,85	264,6	2125,3	507,10	913,7	2740,7	653,96	1178,3	0,0010862	0,01740	0,433	6,9423			
4,43	4,35	63,1	146,7	617,8	147,41	265,6	2123,6	506,72	913,0	2741,4	654,12	1178,6	0,0010869	0,01741	0,427	6,8438			
4,50	4,42	64,0	147,2	620,1	147,96	266,6	2121,8	506,27	912,2	2742,1	654,29	1178,9	0,0010875	0,01742	0,421	6,7470			
4,57	4,48	65,0	147,8	622,7	148,57	267,7	2120,1	505,88	911,5	2742,8	654,46	1179,2	0,0010881	0,01743	0,415	6,6518			
4,64	4,55	66,0	148,3	625,0	149,13	268,7	2118,5	505,49	910,8	2743,3	654,57	1179,4	0,0010887	0,01744	0,409	6,5583			
4,71	4,62	67,0	148,9	627,3	149,68	269,7	2116,7	505,05	910,0	2744,0	654,73	1179,7	0,0010894	0,01745	0,404	6,4663			
4,85	4,76	69,0	150,0	632,2	150,85	271,8	2113,2	504,22	908,5	2745,4	655,07	1180,3	0,0010906	0,01747	0,392	6,2869			
5,00	4,90	71,1	151,1	636,9	151,96	273,8	2109,7	503,39	907,0	2746,8	655,40	1180,9	0,0010919	0,01749	0,382	6,1134			
5,15	5,05	73,2	152,2	641,7	153,12	275,9	2106,2	502,55	905,5	2747,9	655,68	1181,4	0,0010931	0,01751	0,371	5,9456			
5,30	5,20	75,4	153,3	646,6	154,29	278,0	2102,7	501,72	904,0	2749,3	656,01	1182,0	0,0010944	0,01753	0,361	5,7834			
5,46	5,36	77,7	154,4	651,3	155,40	280,0	2099,2	500,89	902,5	2750,5	656,29	1182,5	0,0010956	0,01755	0,351	5,6264			
5,62	5,51	79,9	155,6	656,2	156,57	282,1	2095,7	500,06	901,0	2751,9	656,62	1183,1	0,0010969	0,01757	0,342	5,4745			
5,78	5,68	82,3	156,7	661,0	157,73	284,2	2092,0	499,17	899,4	2753,1	656,90	1183,6	0,0010981	0,01759	0,333	5,3275			
5,95	5,84	84,7	157,8	665,9	158,90	286,3	2088,5	498,33	897,9	2754,2	657,18	1184,1	0,0010994	0,01761	0,324	5,1852			
6,13	6,01	87,1	158,9	670,6	160,01	288,3	2084,8	497,45	896,3	2755,6	657,51	1184,7	0,0011012	0,01764	0,315	5,0474			
6,30	6,18	89,6	160,0	675,5	161,17	290,4	2081,3	496,61	894,8	2756,8	657,79	1185,2	0,0011025	0,01766	0,307	4,9140			
6,48	6,36	92,2	161,1	680,4	162,34	292,5	2077,6	495,73	893,2	2757,9	658,06	1185,7	0,0011037	0,01768	0,299	4,7848			
6,67	6,54	94,8	162,2	685,2	163,50	294,6	2073,9	494,84	891,6	2759,1	658,34	1186,2	0,0011050	0,01770	0,291	4,6596			
6,85	6,72	97,5	163,3	689,9	164,61	296,6	2070,4	494,01	890,1	2760,3	658,62	1186,7	0,0011062	0,01772	0,283	4,5384			
7,05	6,91	100,2	164,4	694,8	165,78	298,7	2066,7	493,12	888,5	2761,4	658,90	1187,2	0,0011075	0,01774	0,276	4,4209			
7,24	7,11	103,0	165,6	699,7	166,94	300,8	2062,9	492,23	886,9	2762,6	659,17	1187,7	0,0011087	0,01776	0,269	4,3071			
7,45	7,30	105,9	166,7	704,5	168,11	302,9	2059,2	491,34	885,3	2763,8	659,45	1188,2	0,0011106	0,01779	0,262	4,1967			
7,65	7,51	108,8	167,8	709,4	169,28	305,0	2055,5	490,45	883,7	2764,9	659,73	1188,7	0,0011118	0,01781	0,255	4,0897			
7,86	7,71	111,8	168,9	714,3	170,44	307,1	2051,8	489,57	882,1	2766,1	660,01	1189,2	0,0011131	0,01783	0,249	3,9860			
8,08	7,92	114,9	170,0	719,2	171,61	309,2	2048,0	488,68	880,5	2767,0	660,23	1189,6	0,0011143	0,01785	0,243	3,8854			

Basmaç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _g					V _f		V _g	
kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
8,29	8,14	118,0	171,1	724,1	172,77	311,3	2044,1	487,73	878,8	2768,2	660,51	1190,1	0,0011156	0,01787	0,236	3,7878	
8,52	8,36	121,2	172,2	729,0	173,94	313,4	2040,4	486,85	877,2	2769,1	660,73	1190,5	0,0011175	0,01790	0,231	3,6931	
8,75	8,58	124,4	173,3	733,9	175,10	315,5	2036,4	485,90	875,5	2770,3	661,01	1191,0	0,0011187	0,01792	0,225	3,6013	
8,98	8,81	127,8	174,4	738,7	176,27	317,6	2032,7	485,01	873,9	2771,2	661,23	1191,4	0,0011200	0,01794	0,219	3,5122	
9,22	9,04	131,1	175,6	743,6	177,43	319,7	2028,7	484,07	872,2	2772,4	661,50	1191,9	0,0011218	0,01797	0,214	3,4257	
9,46	9,28	134,6	176,7	748,5	178,60	321,8	2025,0	483,18	870,6	2773,3	661,73	1192,3	0,0011231	0,01799	0,209	3,3418	
9,71	9,53	138,1	177,8	753,4	179,76	323,9	2021,1	482,24	868,9	2774,2	661,95	1192,7	0,0011243	0,01801	0,204	3,2603	
9,97	9,78	141,8	178,9	758,3	180,93	326,0	2017,1	481,30	867,2	2775,4	662,23	1193,2	0,0011262	0,01804	0,199	3,1811	
10,22	10,03	145,4	180,0	763,2	182,10	328,1	2013,2	480,35	865,5	2776,3	662,45	1193,6	0,0011275	0,01806	0,194	3,1043	
10,49	10,29	149,2	181,1	768,0	183,26	330,2	2009,2	479,41	863,8	2777,2	662,67	1194,0	0,0011293	0,01809	0,189	3,0296	
10,76	10,55	153,0	182,2	772,9	184,43	332,3	2005,2	478,47	862,1	2778,2	662,89	1194,4	0,0011306	0,01811	0,185	2,9571	
11,03	10,82	156,9	183,3	777,8	185,59	334,4	2001,3	477,52	860,4	2779,1	663,11	1194,8	0,0011318	0,01813	0,180	2,8867	
11,31	11,10	160,9	184,4	782,7	186,76	336,5	1997,1	476,52	858,6	2780,0	663,34	1195,2	0,0011337	0,01816	0,176	2,8182	
11,60	11,38	165,0	185,6	787,8	187,98	338,7	1993,1	475,58	856,9	2781,0	663,56	1195,6	0,0011349	0,01818	0,172	2,7517	
11,89	11,66	169,1	186,7	792,7	189,14	340,8	1989,0	474,58	855,1	2781,7	663,72	1195,9	0,0011368	0,01821	0,168	2,6871	
12,19	11,96	173,4	187,8	797,6	190,31	342,9	1985,0	473,64	853,4	2782,6	663,95	1196,3	0,0011381	0,01823	0,164	2,6242	
12,49	12,25	177,7	188,9	802,5	191,48	345,0	1980,8	472,64	851,6	2783,5	664,17	1196,7	0,0011399	0,01826	0,160	2,5631	
12,80	12,56	182,1	190,0	807,6	192,70	347,2	1976,6	471,64	849,8	2784,2	664,34	1197,0	0,0011418	0,01829	0,156	2,5037	
13,11	12,86	186,5	191,1	812,5	193,86	349,3	1972,7	470,70	848,1	2785,2	664,56	1197,4	0,0011431	0,01831	0,153	2,4460	
13,43	13,18	191,1	192,2	817,4	195,03	351,4	1968,5	469,70	846,3	2785,9	664,72	1197,7	0,0011449	0,01834	0,149	2,3898	
13,76	13,50	195,8	193,3	822,5	196,25	353,6	1964,3	468,70	844,5	2786,5	664,89	1198,0	0,0011462	0,01836	0,146	2,3351	
14,09	13,83	200,5	194,4	827,4	197,41	355,7	1959,9	467,64	842,6	2787,5	665,11	1198,4	0,0011481	0,01839	0,142	2,2819	
14,43	14,16	205,3	195,6	832,5	198,63	357,9	1955,7	466,64	840,8	2788,2	665,28	1198,7	0,0011499	0,01842	0,139	2,2302	
14,78	14,50	210,2	196,7	837,4	199,80	360,0	1951,5	465,65	839,0	2788,9	665,45	1199,0	0,0011512	0,01844	0,136	2,1798	
15,13	14,85	215,2	197,8	842,5	201,02	362,2	1947,1	464,59	837,1	2789,6	665,61	1199,3	0,0011530	0,01847	0,133	2,1308	
15,49	15,20	220,3	198,9	847,4	202,19	364,3	1942,9	463,59	835,3	2790,3	665,78	1199,6	0,0011549	0,01850	0,130	2,0831	
15,86	15,56	225,5	200,0	852,5	203,41	366,5	1938,5	462,54	833,4	2791,0	665,94	1199,9	0,0011568	0,01853	0,127	2,0367	
16,23	15,92	230,8	201,1	857,4	204,57	368,6	1934,3	461,54	831,6	2791,7	666,11	1200,2	0,0011580	0,01855	0,124	1,9915	

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _g					V _f		V _g	
kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
16,61	16,29	236,2	202,2	862,5	205,79	370,8	1929,9	460,48	829,7	2792,1	666,22	1200,4	0,0011599	0,01858	0,122	1,9474	
16,99	16,67	241,7	203,3	867,4	206,96	372,9	1925,5	459,43	827,8	2792,8	666,39	1200,7	0,0011618	0,01861	0,119	1,9045	
17,38	17,06	247,3	204,4	872,5	208,18	375,1	1921,0	458,37	825,9	2793,5	666,56	1201,0	0,0011637	0,01864	0,116	1,8628	
17,78	17,45	253,0	205,6	877,6	209,40	377,3	1916,6	457,32	824,0	2794,0	666,67	1201,2	0,0011655	0,01867	0,114	1,8221	
18,19	17,85	258,8	206,7	882,5	210,57	379,4	1912,0	456,21	822,0	2794,7	666,83	1201,5	0,0011674	0,01870	0,111	1,7825	
18,60	18,25	264,6	207,8	887,6	211,79	381,6	1907,6	455,16	820,1	2795,2	666,94	1201,7	0,0011687	0,01872	0,109	1,7438	
19,03	18,67	270,6	208,9	892,7	213,01	383,8	1902,9	454,05	818,1	2795,6	667,05	1201,9	0,0011705	0,01875	0,107	1,7062	
19,45	19,09	276,7	210,0	897,8	214,23	386,0	1898,5	452,99	816,2	2796,1	667,17	1202,1	0,0011724	0,01878	0,104	1,6695	
19,89	19,51	282,9	211,1	902,7	215,40	388,1	1893,8	451,88	814,2	2796,8	667,33	1202,4	0,0011743	0,01881	0,102	1,6338	
20,33	19,95	289,2	212,2	907,8	216,62	390,3	1889,2	450,77	812,2	2797,2	667,44	1202,6	0,0011761	0,01884	0,100	1,5989	
20,78	20,39	295,7	213,3	913,0	217,84	392,5	1884,5	449,66	810,2	2797,7	667,55	1202,8	0,0011780	0,01887	0,098	1,5649	
21,24	20,84	302,2	214,4	918,1	219,06	394,7	1879,9	448,55	808,2	2797,9	667,61	1202,9	0,0011799	0,01890	0,096	1,5318	
21,71	21,30	308,8	215,6	923,2	220,28	396,9	1875,2	447,44	806,2	2798,4	667,72	1203,1	0,0011824	0,01894	0,094	1,4995	
22,18	21,76	315,6	216,7	928,3	221,50	399,1	1870,6	446,33	804,2	2798,9	667,83	1203,3	0,0011843	0,01897	0,092	1,4680	
22,67	22,24	322,4	217,8	933,4	222,72	401,3	1865,9	445,22	802,2	2799,1	667,89	1203,4	0,0011861	0,01900	0,090	1,4372	
23,16	22,72	329,4	218,9	938,5	223,94	403,5	1861,0	444,06	800,1	2799,6	668,00	1203,6	0,0011880	0,01903	0,088	1,4073	
23,66	23,21	336,5	220,0	943,7	225,16	405,7	1856,1	442,89	798,0	2799,8	668,05	1203,7	0,0011899	0,01906	0,086	1,3780	
24,16	23,71	343,7	221,1	948,8	226,38	407,9	1851,5	441,78	796,0	2800,3	668,16	1203,9	0,0011918	0,01909	0,084	1,3495	
24,68	24,21	351,0	222,2	953,9	227,61	410,1	1846,6	440,61	793,9	2800,5	668,22	1204,0	0,0011942	0,01913	0,082	1,3216	
25,20	24,73	358,5	223,3	959,2	228,88	412,4	1841,7	439,45	791,8	2800,7	668,28	1204,1	0,0011961	0,01916	0,081	1,2944	
25,73	25,25	366,1	224,4	964,4	230,10	414,6	1836,8	438,28	789,7	2801,0	668,33	1204,2	0,0011980	0,01919	0,079	1,2679	
26,28	25,78	373,8	225,6	969,5	231,32	416,8	1831,7	437,06	787,5	2801,2	668,39	1204,3	0,0012005	0,01923	0,078	1,2420	
26,83	26,32	381,6	226,7	974,6	232,55	419,0	1826,8	435,90	785,4	2801,4	668,44	1204,4	0,0012024	0,01926	0,076	1,2167	
27,38	26,87	389,5	227,8	979,9	233,82	421,3	1821,7	434,68	783,2	2801,7	668,50	1204,5	0,0012042	0,01929	0,074	1,1920	
27,95	27,42	397,6	228,9	985,1	235,04	423,5	1816,8	433,51	781,1	2801,9	668,55	1204,6	0,0012067	0,01933	0,073	1,1679	
28,53	27,99	405,8	230,0	990,2	236,26	425,7	1811,7	432,29	778,9	2801,9	668,55	1204,6	0,0012086	0,01936	0,071	1,1444	
29,11	28,56	414,1	231,1	995,5	237,54	428,0	1806,6	431,07	776,7	2802,1	668,61	1204,7	0,0012111	0,01940	0,070	1,1214	
29,71	29,15	422,6	232,2	1000,6	238,76	430,2	1801,5	429,85	774,5	2802,1	668,61	1204,7	0,0012130	0,01943	0,069	1,0989	

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _g					V _f		V _g	
Kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
30,31	29,74	431,2	233,3	1006,0	240,04	432,5	1796,4	428,63	772,3	2802,4	668,66	1204,8	0,0012155	0,01947	0,067	1,0770	
30,92	30,34	439,9	234,4	1011,1	241,26	434,7	1791,0	427,35	770,0	2802,4	668,66	1204,8	0,0012173	0,01950	0,066	1,0556	
31,55	30,95	448,8	235,6	1016,5	242,54	437,0	1785,9	426,13	767,8	2802,4	668,66	1204,8	0,0012198	0,01954	0,065	1,0346	
32,18	31,57	457,8	236,7	1021,8	243,81	439,3	1780,6	424,85	765,5	2802,4	668,66	1204,8	0,0012223	0,01958	0,063	1,0142	
32,82	32,20	466,9	237,8	1026,9	245,03	441,5	1775,2	423,58	763,2	2802,4	668,66	1204,8	0,0012242	0,01961	0,062	0,99417	
33,47	32,84	476,2	238,9	1032,3	246,31	443,8	1769,9	422,30	760,9	2802,4	668,66	1204,8	0,0012267	0,01965	0,061	0,97462	
34,14	33,49	485,6	240,0	1037,6	247,59	446,1	1764,5	421,02	758,6	2802,1	668,61	1204,7	0,0012292	0,01969	0,060	0,95552	
34,81	34,15	495,1	241,1	1043,0	248,86	448,4	1759,2	419,75	756,3	2802,1	668,61	1204,7	0,0012317	0,01973	0,058	0,93684	
35,49	34,82	504,8	242,2	1048,3	250,14	450,7	1753,8	418,47	754,0	2801,9	668,55	1204,6	0,0012336	0,01976	0,057	0,91858	
36,18	35,50	514,7	243,3	1053,4	251,36	452,9	1748,2	417,14	751,6	2801,9	668,55	1204,6	0,0012361	0,01980	0,056	0,90072	
36,89	36,19	524,7	244,4	1058,8	252,64	455,2	1742,9	415,86	749,3	2801,7	668,50	1204,5	0,0012386	0,01984	0,055	0,88326	
37,60	36,89	534,8	245,6	1064,1	253,91	457,5	1737,3	414,53	746,9	2801,4	668,44	1204,4	0,0012411	0,01988	0,054	0,86619	
38,32	37,60	545,1	246,7	1069,7	255,24	459,9	1731,7	413,20	744,5	2801,2	668,39	1204,3	0,0012436	0,01992	0,053	0,84949	
39,06	38,32	555,6	247,8	1075,1	256,52	462,2	1726,1	411,87	742,1	2801,0	668,33	1204,2	0,0012461	0,01996	0,052	0,83315	
39,80	39,05	566,2	248,9	1080,4	257,80	464,5	1720,3	410,48	739,6	2800,7	668,28	1204,1	0,0012486	0,02000	0,051	0,81717	
40,56	39,79	576,9	250,0	1085,8	259,07	466,8	1714,7	409,15	737,2	2800,5	668,22	1204,0	0,0012511	0,02004	0,050	0,80153	
41,32	40,54	587,8	251,1	1091,1	260,35	469,1	1708,9	407,76	734,7	2800,0	668,11	1203,8	0,0012542	0,02009	0,049	0,78623	
42,10	41,30	598,9	252,2	1096,7	261,68	471,5	1703,1	406,37	732,2	2799,8	668,05	1203,7	0,0012567	0,02013	0,048	0,77126	
42,89	42,08	610,1	253,3	1102,1	262,96	473,8	1697,3	404,98	729,7	2799,3	667,94	1203,5	0,0012592	0,02017	0,047	0,75661	
43,69	42,86	621,5	254,4	1107,4	264,24	476,1	1691,5	403,60	727,2	2798,9	667,83	1203,3	0,0012617	0,02021	0,046	0,74228	
44,50	43,66	633,0	255,6	1113,0	265,57	478,5	1685,7	402,21	724,7	2798,4	667,72	1203,1	0,0012648	0,02026	0,045	0,72824	
45,32	44,46	644,7	256,7	1118,3	266,84	480,8	1679,6	400,77	722,1	2797,9	667,61	1202,9	0,0012673	0,02030	0,045	0,71450	
46,16	45,28	656,6	257,8	1123,9	268,18	483,2	1673,6	399,32	719,5	2797,5	667,50	1202,7	0,0012698	0,02034	0,044	0,70105	
47,00	46,11	668,6	258,9	1129,5	269,51	485,6	1667,5	397,88	716,9	2797,0	667,39	1202,5	0,0012729	0,02039	0,043	0,68788	
47,86	46,96	680,8	260,0	1134,9	270,78	487,9	1661,5	396,44	714,3	2796,5	667,28	1202,3	0,0012754	0,02043	0,042	0,67498	
48,73	47,81	693,2	261,1	1140,4	272,12	490,3	1655,4	394,99	711,7	2795,9	667,11	1202,0	0,0012785	0,02048	0,041	0,66235	
49,61	48,67	705,7	262,2	1146,0	273,45	492,7	1649,1	393,50	709,0	2795,2	666,94	1201,7	0,0012816	0,02053	0,041	0,64998	
50,51	49,55	718,4	263,3	1151,6	274,78	495,1	1643,1	392,05	706,4	2794,5	666,78	1201,4	0,0012841	0,02057	0,040	0,63787	

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _r		h _g		h _g		V _f		V _g					
kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
51,41	50,44	731,3	264,4	1157,2	276,11	497,5	1636,8	390,55	703,7	2793,8	666,61	1201,1	0,0012873	0,02062	0,039	0,62600	
52,33	51,34	744,4	265,6	1162,8	277,44	499,9	1630,5	389,06	701,0	2793,1	666,44	1200,8	0,0012904	0,02067	0,038	0,61437	
53,26	52,25	757,6	266,7	1168,3	278,78	502,3	1624,0	387,50	698,2	2792,4	666,28	1200,5	0,0012935	0,02072	0,038	0,60298	
54,21	53,18	771,1	267,8	1173,9	280,11	504,7	1617,7	386,00	695,5	2791,7	666,11	1200,2	0,0012966	0,02077	0,037	0,59182	
55,16	54,12	784,7	268,9	1179,5	281,44	507,1	1611,2	384,45	692,7	2790,7	665,89	1199,8	0,0012991	0,02081	0,036	0,58088	
56,13	55,07	798,5	270,0	1185,3	282,83	509,6	1604,7	382,89	689,9	2789,8	665,67	1199,4	0,0013022	0,02086	0,036	0,57016	
57,11	56,03	812,4	271,1	1190,9	284,16	512,0	1598,2	381,34	687,1	2789,1	665,50	1199,1	0,0013060	0,02092	0,035	0,55966	
58,11	57,01	826,6	272,2	1196,5	285,49	514,4	1591,4	379,73	684,2	2788,2	665,28	1198,7	0,0013091	0,02097	0,034	0,54936	
59,12	58,00	840,9	273,3	1202,3	286,88	516,9	1584,9	378,18	681,4	2787,0	665,00	1198,2	0,0013122	0,02102	0,034	0,53926	
60,14	59,00	855,5	274,4	1207,9	288,21	519,3	1578,2	376,57	678,5	2786,1	664,78	1197,8	0,0013154	0,02107	0,033	0,52936	
61,17	60,02	870,2	275,6	1213,7	289,60	521,8	1571,2	374,90	675,5	2785,2	664,56	1197,4	0,0013185	0,02112	0,032	0,51966	
62,22	61,05	885,1	276,7	1219,5	290,99	524,3	1564,5	373,29	672,6	2784,0	664,28	1196,9	0,0013222	0,02118	0,032	0,51014	
63,28	62,09	900,2	277,8	1225,3	292,37	526,8	1557,5	371,63	669,6	2782,8	664,00	1196,4	0,0013253	0,02123	0,031	0,50081	
64,36	63,14	915,5	278,9	1230,9	293,71	529,2	1550,7	370,02	666,7	2781,7	663,72	1195,9	0,0013291	0,02129	0,031	0,49165	
65,45	64,21	931,0	280,0	1236,7	295,09	531,7	1543,5	368,30	663,6	2780,5	663,45	1195,4	0,0013322	0,02134	0,030	0,48267	
66,56	65,30	946,7	281,1	1242,5	296,48	534,2	1536,6	366,63	660,6	2779,3	663,17	1194,9	0,0013360	0,02140	0,030	0,47386	
67,67	66,39	962,6	282,2	1248,6	297,92	536,8	1529,3	364,91	657,5	2777,9	662,84	1194,3	0,0013397	0,02146	0,029	0,46522	
68,81	67,50	978,8	283,3	1254,4	299,31	539,3	1522,1	363,19	654,4	2776,5	662,50	1193,7	0,0013435	0,02152	0,029	0,45675	
69,95	68,63	995,1	284,4	1260,2	300,70	541,8	1514,9	361,47	651,3	2775,2	662,17	1193,1	0,0013472	0,02158	0,028	0,44843	
71,12	69,77	1011,6	285,6	1266,3	302,14	544,4	1507,7	359,75	648,2	2773,8	661,84	1192,5	0,0013503	0,02163	0,027	0,44026	
72,29	70,92	1028,3	286,7	1272,1	303,53	546,9	1500,3	357,98	645,0	2772,4	661,50	1191,9	0,0013547	0,02170	0,027	0,43225	
73,48	72,09	1045,3	287,8	1278,1	304,97	549,5	1492,8	356,20	641,8	2770,7	661,12	1191,2	0,0013584	0,02176	0,026	0,42439	
74,69	73,27	1062,4	288,9	1284,0	306,36	552,0	1485,2	354,37	638,5	2769,3	660,78	1190,6	0,0013622	0,02182	0,026	0,41667	
75,91	74,47	1079,8	290,0	1290,0	307,80	554,6	1477,7	352,59	635,3	2767,7	660,39	1189,9	0,0013659	0,02188	0,026	0,40909	
77,15	75,69	1097,4	291,1	1296,0	309,25	557,2	1470,0	350,76	632,0	2766,1	660,01	1189,2	0,0013703	0,02195	0,025	0,40165	
78,40	76,92	1115,2	292,2	1302,1	310,69	559,8	1462,4	348,93	628,7	2764,2	659,56	1188,4	0,0013740	0,02201	0,025	0,39434	
79,66	78,16	1133,2	293,3	1308,1	312,13	562,4	1454,4	347,04	625,3	2762,6	659,17	1187,7	0,0013784	0,02208	0,024	0,38717	
80,95	79,42	1151,5	294,4	1314,2	313,58	565,0	1446,5	345,15	621,9	2760,7	658,73	1186,9	0,0013822	0,02214	0,024	0,38012	

Basınç		Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C		h _f					h _g					V _f		V _g	
kg/cm ²	Bar	psi	°C	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	
82,24	80,69	1169,9	295,6	1320,2	315,02	567,6	1438,6	343,27	618,5	2758,9	658,29	1186,1	0,0013865	0,02221	0,023	0,37320	
83,56	81,98	1188,6	296,7	1326,5	316,52	570,3	1430,5	341,33	615,0	2757,0	657,84	1185,3	0,0013909	0,02228	0,023	0,36641	
84,89	83,29	1207,6	297,8	1332,6	317,96	572,9	1422,3	339,38	611,5	2754,9	657,34	1184,4	0,0013953	0,02235	0,022	0,35973	
86,24	84,61	1226,7	298,9	1338,8	319,46	575,6	1414,2	337,44	608,0	2753,1	656,90	1183,6	0,0013996	0,02242	0,022	0,35317	
87,60	85,94	1246,1	300,0	1345,1	320,96	578,3	1405,8	335,44	604,4	2751,0	656,40	1182,7	0,0014040	0,02249	0,022	0,34672	
88,99	87,30	1265,8	301,1	1351,4	322,46	581,0	1397,5	333,44	600,8	2748,9	655,90	1181,8	0,0014090	0,02257	0,021	0,34039	
90,38	88,67	1285,6	302,2	1357,7	323,95	583,7	1389,1	331,45	597,2	2746,5	655,34	1180,8	0,0014134	0,02264	0,021	0,33416	
91,79	90,05	1305,7	303,3	1364,0	325,45	586,4	1380,5	329,39	593,5	2744,2	654,79	1179,8	0,0014184	0,02272	0,020	0,32804	
93,22	91,46	1326,1	304,4	1370,2	326,95	589,1	1371,9	327,34	589,8	2741,9	654,23	1178,8	0,0014227	0,02279	0,020	0,32203	
94,67	92,88	1346,7	305,6	1376,5	328,45	591,8	1363,0	325,23	586,0	2739,6	653,68	1177,8	0,0014277	0,02287	0,020	0,31611	
96,14	94,32	1367,5	306,7	1383,0	330,00	594,6	1354,2	323,12	582,2	2737,2	653,12	1176,8	0,0014327	0,02295	0,019	0,31030	
97,62	95,77	1388,6	307,8	1389,3	331,50	597,3	1345,1	320,96	578,3	2734,7	652,51	1175,7	0,0014377	0,02303	0,019	0,30458	
99,12	97,24	1409,9	308,9	1395,8	333,06	600,1	1336,1	318,79	574,4	2732,1	651,90	1174,6	0,0014433	0,02312	0,019	0,29896	
100,63	98,73	1431,5	310,0	1402,3	334,61	602,9	1327,0	316,63	570,5	2729,3	651,24	1173,4	0,0014483	0,02320	0,018	0,29343	
102,17	100,23	1453,3	311,1	1408,9	336,16	605,7	1317,7	314,41	566,5	2726,5	650,57	1172,2	0,0014533	0,02328	0,018	0,28799	
103,72	101,76	1475,4	312,2	1415,6	337,77	608,6	1308,4	312,19	562,5	2723,7	649,91	1171,0	0,0014589	0,02337	0,018	0,28264	
105,30	103,30	1497,8	313,3	1422,1	339,33	611,4	1298,8	309,91	558,4	2721,0	649,24	1169,8	0,0014646	0,02346	0,017	0,27738	
106,88	104,86	1520,4	314,4	1428,9	340,94	614,3	1289,3	307,64	554,3	2717,9	648,52	1168,5	0,0014702	0,02355	0,017	0,27220	
108,49	106,44	1543,3	315,6	1435,4	342,49	617,1	1279,5	305,31	550,1	2714,9	647,80	1167,2	0,0014758	0,02364	0,017	0,26710	
110,12	108,03	1566,4	316,7	1442,1	344,10	620,0	1269,8	302,97	545,9	2711,9	647,07	1165,9	0,0014820	0,02374	0,016	0,26208	
111,76	109,65	1589,8	317,8	1448,9	345,71	622,9	1259,8	300,59	541,6	2708,6	646,30	1164,5	0,0014877	0,02383	0,016	0,25714	
113,43	111,28	1613,5	318,9	1455,8	347,37	625,9	1249,5	298,15	537,2	2705,4	645,52	1163,1	0,0014939	0,02393	0,016	0,25228	
115,12	112,94	1637,5	320,0	1462,6	348,98	628,8	1239,3	295,70	532,8	2701,9	644,69	1161,6	0,0015001	0,02403	0,015	0,24749	
116,82	114,61	1661,7	321,1	1469,6	350,65	631,8	1229,1	293,26	528,4	2698,4	643,86	1160,1	0,0015064	0,02413	0,015	0,24277	
118,54	116,30	1686,2	322,2	1476,5	352,31	634,8	1218,4	290,71	523,8	2694,9	643,02	1158,6	0,0015126	0,02423	0,015	0,23813	
120,28	118,01	1711,0	323,3	1483,5	353,98	637,8	1207,9	288,21	519,3	2691,2	642,14	1157,0	0,0015195	0,02434	0,015	0,23355	
122,05	119,74	1736,1	324,4	1490,5	355,64	640,8	1197,0	285,60	514,6	2687,5	641,25	1155,4	0,0015264	0,02445	0,014	0,22905	
123,83	121,49	1761,5	325,6	1497,5	357,31	643,8	1186,0	282,99	509,9	2683,5	640,30	1153,7	0,0015332	0,02456	0,014	0,22461	

Basınç			Sıcaklık						Özgül Entalpi						Özgül Hacim			
P			h _r			h _g			h _g			v _r			v _g			
Kg/cm ²	Bar	psi	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb			
			°C															
125,63	123,26	1787,1	326,7	1504,7	359,03	646,9	1174,9	280,33	505,1	2679,6	639,36	1152,0	0,0015401	0,02467	0,22023			
127,46	125,05	1813,1	327,8	1511,9	360,75	650,0	1163,7	277,67	500,3	2675,6	638,42	1150,3	0,0015476	0,02479	0,21592			
129,30	126,86	1839,3	328,9	1519,1	362,47	653,1	1152,1	274,89	495,3	2671,4	637,42	1148,5	0,0015545	0,02490	0,21167			
131,17	128,69	1865,9	330,0	1526,6	364,25	656,3	1140,4	272,12	490,3	2667,0	636,36	1146,6	0,0015626	0,02503	0,20747			
133,06	130,54	1892,7	331,1	1534,0	366,02	659,5	1128,6	269,29	485,2	2662,6	635,31	1144,7	0,0015701	0,02515	0,20334			
134,97	132,42	1919,9	332,2	1541,4	367,80	662,7	1116,7	266,46	480,1	2657,9	634,20	1142,7	0,0015782	0,02528	0,19926			
136,90	134,31	1947,3	333,3	1548,9	369,57	665,9	1104,4	263,51	474,8	2653,3	633,09	1140,7	0,0015863	0,02541	0,19524			
138,85	136,22	1975,1	334,4	1556,3	371,35	669,1	1092,1	260,57	469,5	2648,4	631,92	1138,6	0,0015944	0,02554	0,19128			
140,82	138,16	2003,2	335,6	1564,0	373,18	672,4	1079,3	257,52	464,0	2643,5	630,76	1136,5	0,0016032	0,02568	0,18737			
142,82	140,12	2031,6	336,7	1571,9	375,07	675,8	1066,5	254,47	458,5	2638,4	629,54	1134,3	0,0016119	0,02582	0,18351			
144,84	142,10	2060,3	337,8	1579,6	376,90	679,1	1053,4	251,36	452,9	2633,0	628,26	1132,0	0,0016213	0,02597	0,17970			
146,88	144,11	2089,4	338,9	1587,5	378,79	682,5	1040,2	248,20	447,2	2627,7	626,98	1129,7	0,0016306	0,02612	0,17594			
148,94	146,13	2118,7	340,0	1595,4	380,67	685,9	1026,7	244,98	441,4	2622,1	625,65	1127,3	0,0016400	0,02627	0,17223			
151,03	148,18	2148,4	341,1	1603,5	382,62	689,4	1012,7	241,65	435,4	2616,3	624,26	1124,8	0,0016500	0,02643	0,16857			
153,15	150,25	2178,5	342,2	1611,7	384,56	692,9	998,8	238,32	429,4	2610,5	622,88	1122,3	0,0016606	0,02660	0,16495			
155,29	152,35	2208,9	343,3	1619,8	386,50	696,4	984,6	234,93	423,3	2604,4	621,43	1119,7	0,0016712	0,02677	0,16139			
157,44	154,47	2239,6	344,4	1628,2	388,50	700,0	969,9	231,44	417,0	2598,4	619,99	1117,1	0,0016818	0,02694	0,15787			
159,63	156,61	2270,7	345,6	1636,8	390,55	703,7	955,1	227,88	410,6	2591,9	618,44	1114,3	0,0016930	0,02712	0,15439			
161,84	158,78	2302,1	346,7	1645,4	392,61	707,4	939,9	224,28	404,1	2585,3	616,88	1111,5	0,0017049	0,02731	0,15097			
164,07	160,97	2333,9	347,8	1654,0	394,66	711,1	924,6	220,61	397,5	2578,6	615,27	1108,6	0,0017174	0,02751	0,14758			
166,33	163,18	2366,0	348,9	1662,9	396,77	714,9	909,0	216,89	390,8	2571,9	613,66	1105,7	0,0017299	0,02771	0,14424			
168,61	165,42	2398,5	350,0	1671,9	398,93	718,8	893,0	213,06	383,9	2564,9	612,00	1102,7	0,0017436	0,02793	0,14095			
170,93	167,69	2431,4	351,1	1680,3	400,93	722,4	875,3	208,85	376,3	2555,6	609,78	1098,7	0,0017536	0,02809	0,13759			
173,26	169,98	2464,6	352,2	1690,1	403,26	726,6	856,7	204,41	368,3	2546,7	607,67	1094,9	0,0017667	0,02830	0,13419			
175,62	172,30	2498,2	353,3	1699,8	405,59	730,8	837,6	199,86	360,1	2537,4	605,45	1090,9	0,0017811	0,02853	0,13084			
178,01	174,65	2532,2	354,4	1709,6	407,93	735,0	818,1	195,19	351,7	2527,7	603,12	1086,7	0,0017967	0,02878	0,12754			
180,43	177,02	2566,6	355,6	1719,6	410,31	739,3	798,1	190,42	343,1	2517,7	600,73	1082,4	0,0018135	0,02905	0,12428			
182,88	179,42	2601,4	356,7	1729,8	412,75	743,7	777,6	185,54	334,3	2507,4	598,29	1078,0	0,0018310	0,02933	0,12105			

Basınç			Sıcaklık		Özgül Entalpi										Özgül Hacim			
P		C	h _r		h _g					h _g					v _r		v _g	
Kg/cm ²	Bar	psi	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	KJ/Kg	Kcal/Kg	BTU/lb	m ³ /kg	ft ³ /lb	m ³ /kg	ft ³ /lb
			°C															
183,95	180,47	2616,7	357,8	1740,1	415,20	748,1	756,9	180,60	325,4	2497,0	595,79	1073,5	0,0018504	0,02964	0,007	0,11784		
187,86	184,31	2672,3	358,9	1750,8	417,75	752,7	735,2	175,44	316,1	2486,0	593,18	1068,8	0,0018710	0,02997	0,007	0,11465		
190,39	186,79	2708,3	360,0	1761,7	420,36	757,4	713,2	170,16	306,6	2475,1	590,58	1064,1	0,0018934	0,03033	0,007	0,11147		
191,67	188,05	2726,5	360,6	1767,5	421,74	759,9	702,0	167,50	301,8	2469,3	589,19	1061,6	0,0019053	0,03052	0,007	0,10988		
192,96	189,31	2744,8	361,1	1773,1	423,08	762,3	690,4	164,72	296,8	2463,7	587,86	1059,2	0,0019172	0,03071	0,007	0,10828		
194,25	190,58	2763,2	361,7	1778,9	424,46	764,8	678,7	161,95	291,8	2457,9	586,47	1056,7	0,0019303	0,03092	0,007	0,10668		
195,55	191,85	2781,7	362,2	1785,0	425,91	767,4	666,9	159,12	286,7	2451,8	585,03	1054,1	0,0019434	0,03113	0,007	0,10508		
196,86	193,14	2800,3	362,8	1791,0	427,35	770,0	654,8	156,23	281,5	2445,8	583,58	1051,5	0,0019577	0,03136	0,006	0,10347		
198,18	194,43	2819,0	363,3	1797,3	428,85	772,7	642,2	153,24	276,1	2439,5	582,08	1048,8	0,0019721	0,03159	0,006	0,10185		
199,50	195,73	2837,9	363,9	1803,6	430,35	775,4	629,4	150,18	270,6	2433,2	580,59	1046,1	0,0019877	0,03184	0,006	0,10021		
200,83	197,03	2856,8	364,4	1810,1	431,90	778,2	616,4	147,08	265,0	2426,5	578,98	1043,2	0,0020033	0,03209	0,006	0,09857		
202,18	198,35	2875,9	365,0	1816,8	433,51	781,1	602,9	143,86	259,2	2419,7	577,37	1040,3	0,0020208	0,03237	0,006	0,09690		
203,53	199,68	2895,1	365,6	1823,8	435,18	784,1	588,9	140,53	253,2	2412,8	575,70	1037,3	0,0020383	0,03265	0,006	0,09521		
204,88	201,01	2914,4	366,1	1831,0	436,90	787,2	574,5	137,09	247,0	2405,5	573,98	1034,2	0,0020570	0,03295	0,006	0,09350		
206,25	202,34	2933,8	366,7	1838,5	438,67	790,4	559,4	133,48	240,5	2397,9	572,15	1030,9	0,0020770	0,03327	0,006	0,09175		
207,62	203,70	2953,4	367,2	1846,1	440,50	793,7	543,6	129,70	233,7	2390,0	570,26	1027,5	0,0020982	0,03361	0,006	0,08997		
209,00	205,05	2973,0	367,8	1854,3	442,45	797,2	527,1	125,76	226,6	2381,4	568,21	1023,8	0,0021213	0,03398	0,006	0,08815		
210,39	206,41	2992,8	368,3	1862,9	444,50	800,9	509,6	121,60	219,1	2372,3	566,04	1019,9	0,0021457	0,03437	0,005	0,08628		
211,80	207,79	3012,8	368,9	1871,7	446,61	804,7	491,0	117,16	211,1	2362,8	563,77	1015,8	0,0021719	0,03479	0,005	0,08435		
213,21	209,17	3032,8	369,4	1881,3	448,88	808,8	471,0	112,39	202,5	2352,3	561,27	1011,3	0,0022012	0,03526	0,005	0,08235		
214,63	210,57	3053,0	370,0	1891,7	451,38	813,3	449,4	107,23	193,2	2340,9	558,55	1006,4	0,0022331	0,03577	0,005	0,08026		
216,05	211,97	3073,3	370,6	1902,9	454,05	818,1	425,7	101,57	183,0	2328,3	555,56	1001,0	0,0022686	0,03634	0,005	0,07806		
217,49	213,38	3093,8	371,1	1915,2	456,99	823,4	399,1	95,24	171,6	2314,4	552,23	995,0	0,0023092	0,03699	0,005	0,07572		
218,94	214,80	3114,4	371,7	1929,0	460,26	829,3	369,1	88,08	158,7	2298,3	548,40	988,1	0,0023567	0,03775	0,005	0,07319		
220,40	216,23	3135,1	372,2	1945,0	464,09	836,2	334,2	79,75	143,7	2279,2	543,84	979,9	0,0024141	0,03867	0,004	0,07040		
221,87	217,67	3156,0	372,8	1964,5	468,75	844,6	291,2	69,49	125,2	2255,8	538,24	969,8	0,0024878	0,03985	0,004	0,06720		
223,34	219,12	3177,0	373,3	1990,4	474,91	855,7	234,5	55,94	100,8	2224,8	530,86	956,5	0,0025926	0,04153	0,004	0,06329		
224,83	220,58	3198,2	373,9	2033,6	485,24	874,3	140,5	33,52	60,4	2174,1	518,76	934,7	0,0027880	0,04466	0,004	0,05756		

KAYNAKLAR

- [1] ADAMS,NEAL J.,"Drilling Engineering, A Complete Well Planning Approach", Penwell Books,1985.
- [2] BAKER TRAINING CENTER,"Technical Information For The Oil & Gas Well Specialist", 1977.
- [3] BIZANTI M.S."Pressure Loss Simulator Improves Nozzle Selection", Petroleum Engineer Int., July 1990.
- [4] BOURGOYNE JR. A.T, MİLLHEIM KEİTH K., CHENEVERT MARTİN E., YOUNG JR. F.S.,"Applied Drilling Engineering", SPE, 1991, Richardson, TX.
- [5] DRILCO, Division of Smith International,Inc.,"Drilling Assembly Handbook",1982.
- [6] GÖKTEKİN, AYTİN, "Sondaj Tekniği",İTÜ Kütüphanesi,sayı:1266, 1977.
- [7] Jeotermal Enerji Eğitim Kurs Notları, JICA, Kyushu- Japonya, 1989.
- [8] Jeotermal Enerji Eğitim Kurs Notları, UNU, Reykjavik-İzlanda, 1984.
- [9] RABIA, H.,"Oilwell Drilling Engineering, Principles and Practice",University of Newcastle Upon Tyne,1985.
- [10] SEREDA,N.G.,SOLOVYOV E.M.,"Drilling of Oil And Gas Wells",Mir Publishers-Moskow,1977.
- [11] "Cementing Tables", Halliburton,1981.
- [12] "Hydraulics For Mud Technologists", Imco Services A Halliburton Company, 1981.
- [13] "Manual Of Drilling Fluids Technology", NL Baroid/NL Industries, Inc., 1979.
- [14] "Drilling Fluid Engineering Manual", Magcobar Division, 1977.
- [15] A.GRAND MALCOLM, G.DONALDSON IAN,F.BIXLEY PAUL, "Geothermal Reservoir Engineering", Academic Press,1982.
- [16] J.O'SULLIVAN MICHAEL,McKIBBIN ROBERT, "Geothermal Reservoir Engineering", A manual for geothermal reservoir engineering courses at the Geothermal Institute,University of Auckland,1989.
- [17] KJARAN, SNORRİ PALL, ELİASSON JONAS, "Geothermal Engineering Lecture Notes",1983.

ÖZGEÇMİŞLER

Süleyman ÖZÜDOĞRU

1956 yılı İzmir doğumludur.1979 yılında Ege Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümünü bitirmiş ve aynı yıl MTA Genel Müdürlüğü Sondaj Daire başkanlığında göreve başlamıştır. Çeşitli sondaj servislerinde görev yaptıktan sonra 1983 yılında Jeotermal Sondajlar bölümüne geçerek Germencik-Ömerbeyli jeotermal sahasında kamp mühendisi olarak göreve başlamıştır. Kamp mühendisi ve kamp şefi olarak sahada yapılan sondaj çalışmaları yanısıra rezervuar ve üretim testlerinde de çalışmalarına devam etmiştir. Germencik-Ömerbeyli sahasından sonra Aydın-Salavatlı jeotermal sahası sondaj ve test çalışmaları, Denizli-Kızıldere sahasında İtalyan'larla yürütülen interference testleri, İzmir-Balçova jeotermal sahası sondaj çalışmaları, İzmir-Aliğa jeotermal sahası sondaj çalışmaları, Manisa-Salihli-Kurşunlu sahası jeotermal sondaj çalışmaları, İzmir-Dikili jeotermal sahası test çalışmaları, Aydın-Bozköy jeotermal sahası, Aydın-İmamköy jeotermal sahası sondajlarında kamp şefi olarak çalışmıştır. 1990-1992 yılları arasında MTA Ege Bölge Müdür Yardımcılığı görevini yürüttükten sonra halen, jeotermal sondaj ve testler konusunda çalışmalara devam etmektedir. Dokuz Eylül Üniversitesi Torbalı Sondajcılık ve Mermercilik Meslek Yüksek Okulunda Sondaj dersleri vermektedir.

Emre BABÜR

1957 yılı Ankara doğumludur. 1980 yılında Ege Üniversitesi Makine Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 1981-1988 yılları arasında MTA Genel Müdürlüğü ve MTA Ege Bölge Müd. bünyesinde, Antalya; Kumluca petrol, İzmir; Seferihisar Karakoç, Cumalı ve Dikili, Aydın; Germencik, Ömerbeyli ve Salavatlı, Denizli; Kızıldere, Afyon; Ömer, Gecek ve Çay, Eskişehir; Merkez ve Sarıcakaya, Erzincan; Ekşisu jeotermal projelerinde sondaj mühendisi ve kamp şefi olarak çalışmıştır. 1988 yılından itibaren DSİ 2 Bölge Müdürlüğü'nde (İzmir) Barajlar, sonra Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltıları Şube Müdürlüklerinde çalışmıştır. Şu anda, aynı kuruluştaki Etüt ve Plan Şube Müdürlüğü'nde çalışmaktadır. Dokuz Eylül Üniversitesi Torbalı Sondajcılık ve Mermercilik Meslek Yüksek Okulunda ders vermektedir.