

# 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 bitirilmesinin anlamı, kuyunun kazılması, borulanması ve kuyu bitirme testlerinin yapılması demektir.

## 1. GİRİŞ

Sondajcılığı diğer pek çok işlemde 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

Dört bin yıl kadar önce Çin’de içme suyu ve tuz amaçlı tuzlu su kuyuları deliniyordu. İlerleme, bir halatla askıya alınmış ve ucunda metal bir başlık olan, bambudan yapılmış boru dizisinin yukarı kaldırılıp aşağıya hızla bırakılmasıyla sağlanıyordu. Zaman zaman çalışanlar kuyuya birkaç kova su dökerek formasyonu yumuşatmaya çalışıyorlardı. Kırıntıları çıkartmak için aşağıya kova indiriliyordu. Böylece sondajlarda ilk sondaj sıvısı (çamur) kullanımı gündeme gelmiştir (Şekil 1) [13].



Şekil 1. Eski çin sondajı.



Şekil 2. Yakın çağda sondaj.

Çin’liler çamurun iki kullanım amacını biliyorlardı.

- Formasyonu yumuşatmak,
- Kırıntıların yukarı taşınmasına yardım etmek.

Sondajcılıkta 1845 yılına kadar çamur açısından bir ilerleme olmamıştır. Mekanik ekipmandaki hızlı ilerlemeye karşın sondaj sırasında yapılan, delinen kuyuya su dökmekten ibaretti (Şekil 2)[13].

Fransız mühendis Fauvelle 1833’te, standart darbeli yöntemle yapılan bir sondaj izlerken, kuyu basınçlı akifere girmiş ve kuyubaşından su fişkırmaya başlamıştır [13].

Bu arada formasyon parçacıkları da suyla beraber yüzeye taşınmaya başlamış ve Fauvelle, bu olayın kazı sırasında istenerek yaratılmasının sondaj işlemini kolaylaştıracağını düşünmüştür. 1845 yılında Fauvelle borular içinden su akıtarak başarılı bir sondaj yapmıştır. İzleyen yıllarda pompanın da devreye girmesiyle, uçları vidalı içi boş dövme borularla sondaj yapmak kolaylaşmıştır. İlk önceleri delmeye ara verilerek borular içinden su verilmiş, sonraları sondaj sırasında su devamlı olarak verilmiştir [13].

Bu arada; motor ve aktarmalardaki gelişmeler, rotary (dönen) sondaj yönteminin darbeli yöntemin yerini almasıyla sondajcılıkta hızlı bir ilerleme yaşanmıştır (1882). Bu dönemde, sondajda, akışkan olarak hala su kullanılmaktaydı. Petrolcüler delmede su kullanımına karşıydılar. Çünkü su, sondaj sırasında petrolün fişkirmesini önleyemiyor ve formasyona sızarak rezervuardan petrol alınmasını engelliyordu [13].

1880’lerde sondajcılar sondaj sıvısı olarak çamurun değerinin farkına vardılar. 1887’de M.T.Chapman “plastik bir malzemeye ve bol suyla” sondaj yapılırken kuyu duvarında geçirimsiz, ince bir yapının

oluşturduğunu söyledi. 1889'da ABD'de çamur patenti alınmış ve petrol bazlı çamurların kullanımından ilk defa söz edilmiştir. Bu, modern çamur mühendisliğinin başlangıcı olmuştur [13].

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 doğru çalışmalar devam etmektedir [13].

### 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 çalışılıyorsa 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

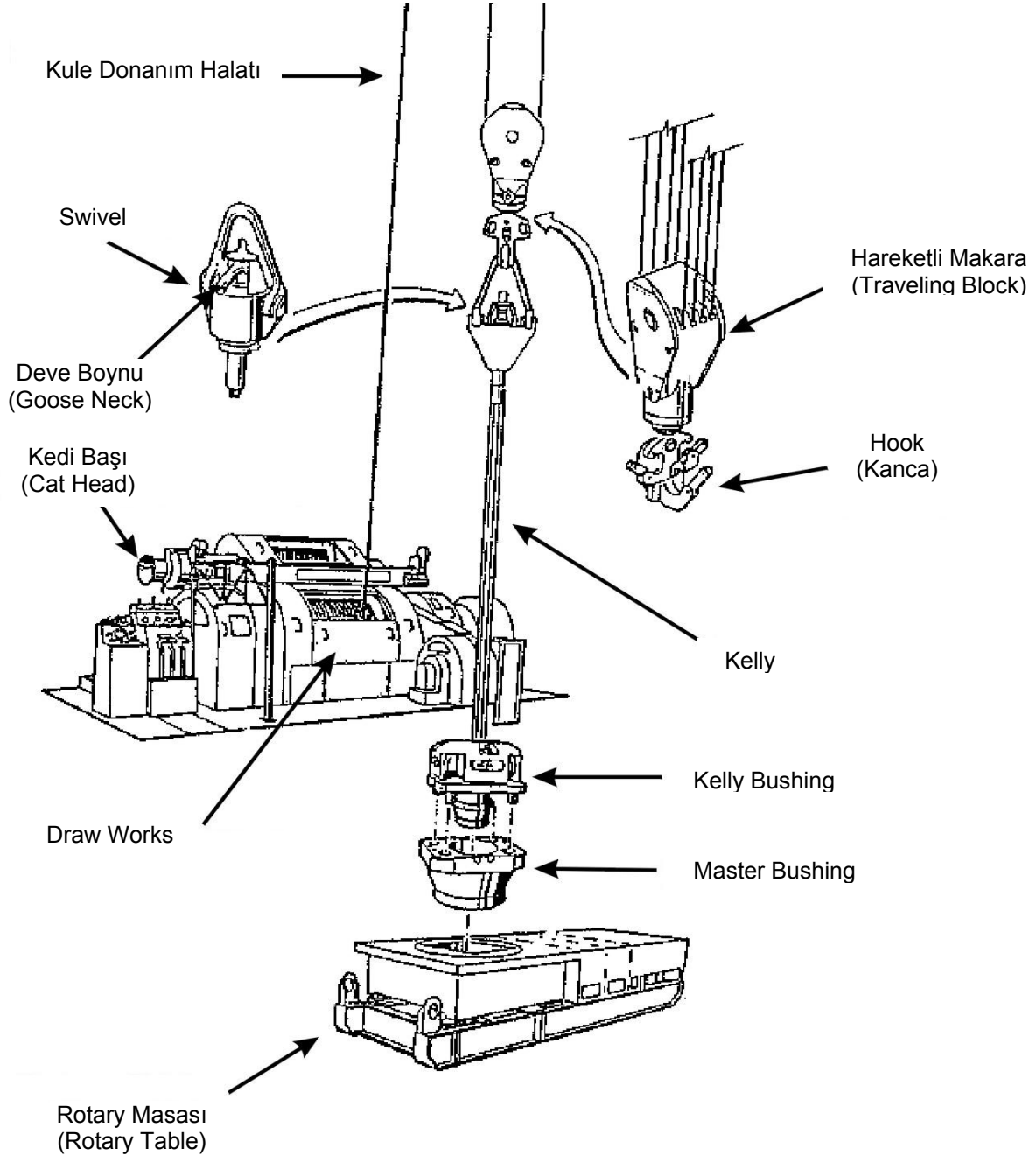
Sondaj lokasyonu hazırlanırken kuyu yerinde, kuyu başının içinde yer alacağı cellar çukuru denilen prizmatik bir boşluk oluşturulur. Bu boşluğun derinliği, kuyu başı ana vanasının alt flanşının yer yüzüne gelecek, ve genişliği içinde çalışmaya olanak verecek boyutlarda seçilmelidir.

**Şekil 3.** Derin sondaj makinesi.

Sondaj kulesi alışılmış (klasik) veya hareketli, bindirilmiş (mobil) olabilir. Klasik sondaj makinesinin kulesi demonte vaziyette 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 kedibaşları gibi ana parçalardan oluşur (Şekil 4).



Şekil 4. Rotary sondaj makinesinin ana parçaları.

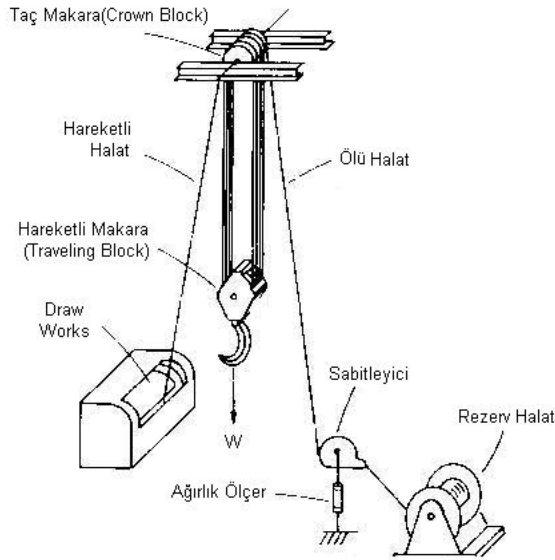
Tamburun çapı inilebilecek derinlikle doğru orantılıdır. Daha derinlere sondaj yapabilecek donanımlarda tambur çapı daha büyüktür. Bu büyüklük yaklaşık olarak, 1000-1500 m lik bir kapasite için 50 cm, 4000-6000 m lik kapasite için 80 cm dir. Tamburun çapı manevra sırasında üzerine sarılacak halatı alabilecek 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

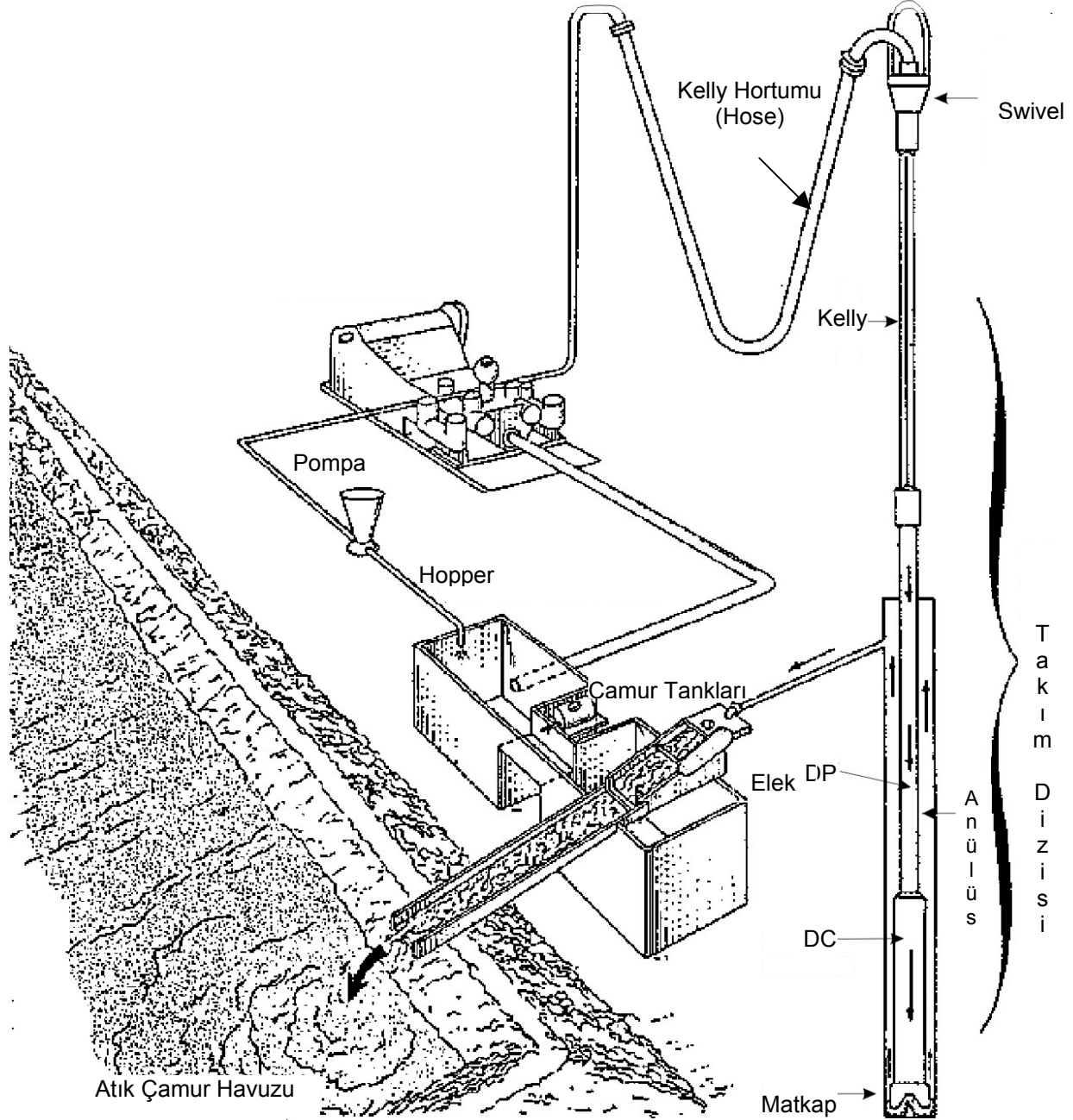
Tambur, halatı üzerine sarmak için döndüğünde hareketli makara dolayısıyla kanca ve ona takılı olan dizi yukarı çıkacaktır veya aşağıya doğru hareket edecektir.

Makaralar arasında sarılı olan çelik halat kule yapımıcısı tarafından belirlenen çap ve özellikte olmalıdır. Halatın, yükte çalışması nedeniyle zarar görebilir. Sirkülasyon 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.

Akışkanla sirkülasyonun birinci fonksiyonu, sondaj sırasında kırıntıları kuyudan uzaklaştırmaktır. Sirkülasyon 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.

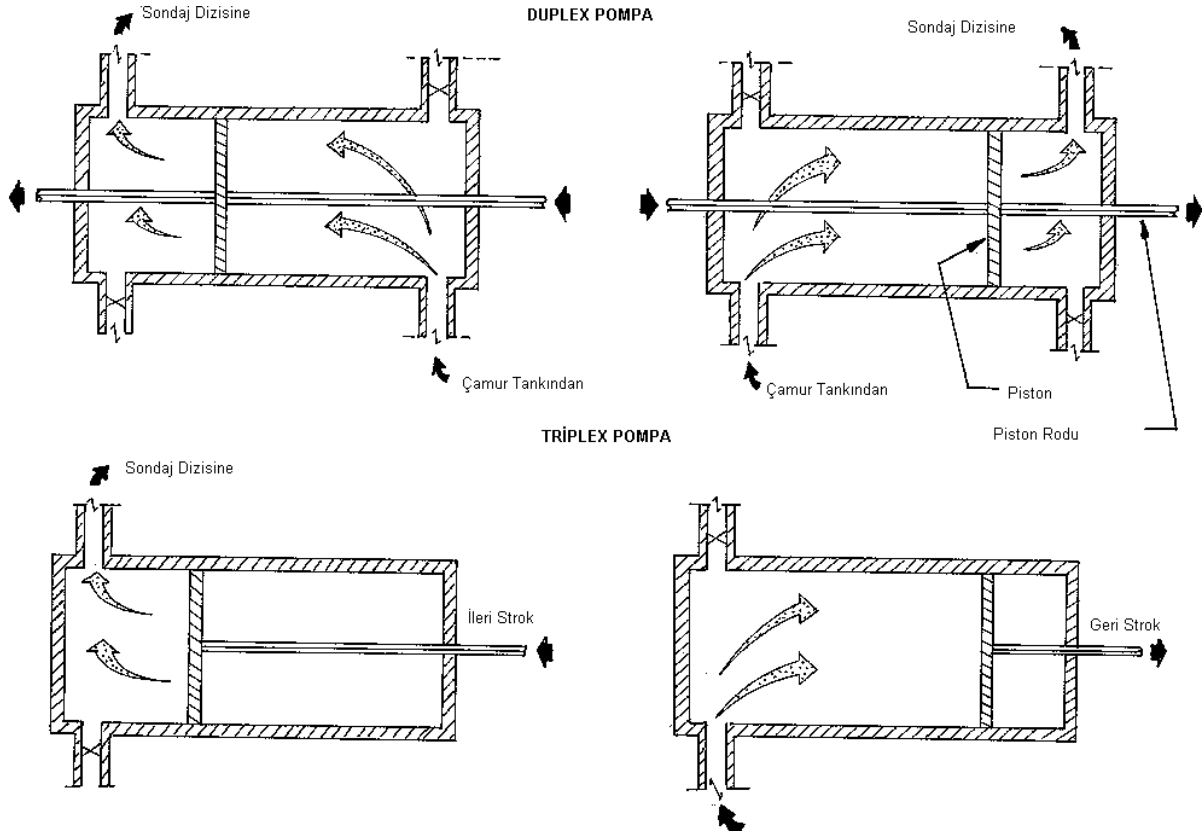
Sondaj çamuru; tanklardan pompaya ve buradan da yüksek basınçlı yüzey bağlantıları aracılığıyla sondaj dizisine ve matkaba, buradan da sondaj dizisiyle kazılan kuyu arasındaki boşluktan (anülüs) yüzeye gelir. Yüzeye gelen çamur bünyesindeki kırıntı v.b. maddeleri çeşitli ekipmanlar yardımıyla bırakarak 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 diziyeye 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 (inç)	Bağlantılı Ağırlık (Lb/ft)	Grade	İç Çap (inç)	Çökme Dayanımı (psi)	İç Yield Basıncı (psi)	Boru Gövdesi Yield Yüğü (lb)
2,375 (60,33 mm)  2 3/8	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
2,875 (73,03 mm)  2 7/8	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
	3,500 (88,90 mm)  3 1/2	13,30	D	2,764	10350	10120
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)  4	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

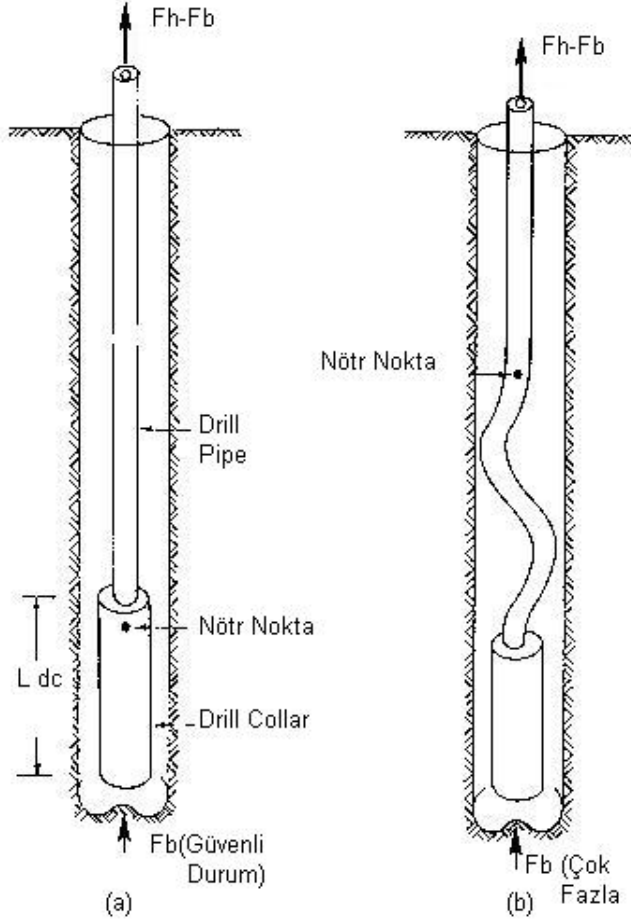


4,500 (114,30 mm)	16,60	D	3,826	7620,00	7210	242410
	20,00	D	3,640	9510,00	9200	302400
	13,75	E	3,958	7200,00	7900	270040
	16,60	E	3,826	10390,00	9830	330560
	20,00	E	3,640	12960	12540	412360
	16,60	X	3,826	12750	12450	418700
	20,00	X	3,640	16420	15890	522320
	13,75	G	3,958	8920	11070	378000
	16,60	G	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
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	

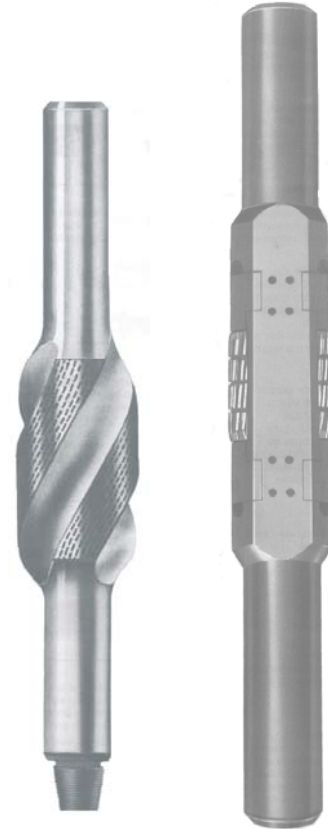
Sınıf	Uzunluk (ft)
1	18-22
2	27-30
3	38-45 Genellikle sınıf 2 DP' ler kullanılır.

DP ler birbirleriyle tool joint ismi verilen bağlantılarla bağlanırlar. Tool jointin dişi ucu box, erkek ucu pin olarak adlandırılır.

Sondaj dizisinin alt bölümü DC lerden oluşur. 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. Sondaj işlemine geçilince, matkabın 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 8). 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 matkabın üzerine verilecek ağırlık, DC lerin çamur içindeki ağırlığını geçmemelidir. Pratikte sondajda, DC lerin çamur içindeki toplam ağırlığının 0.75 i matkap üzerine verilir.



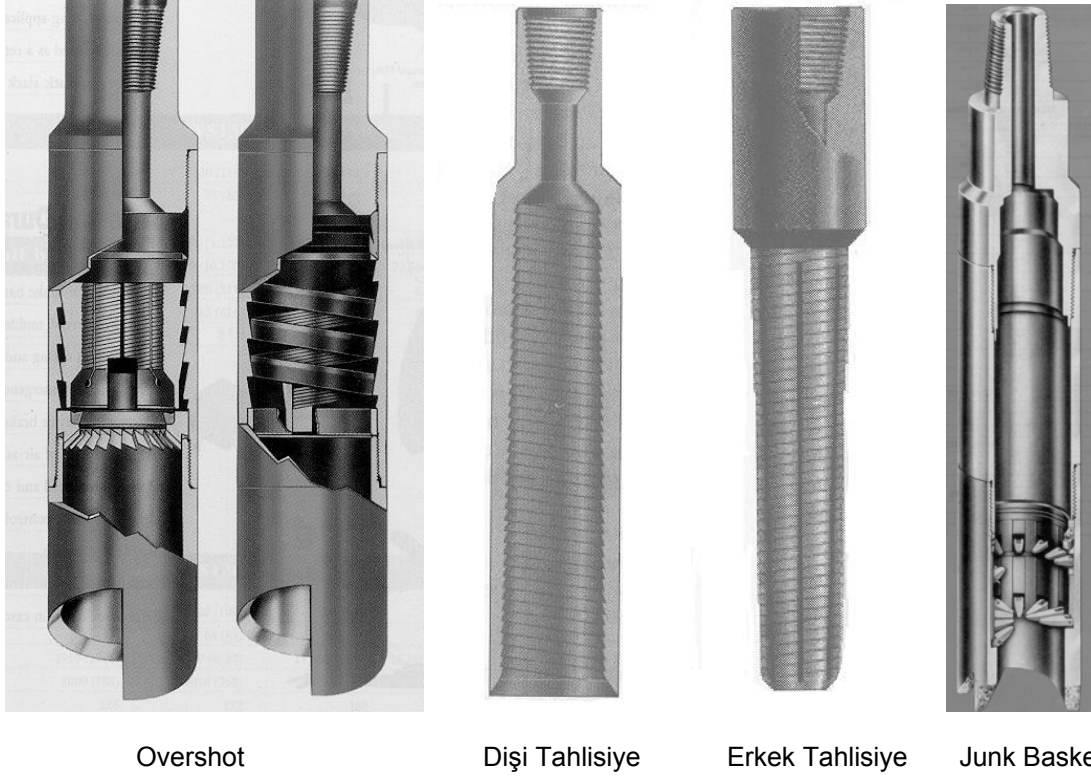
Şekil 8. Sondaj dizisinde nötr nokta



Şekil 9. Stabilizer ve reamer

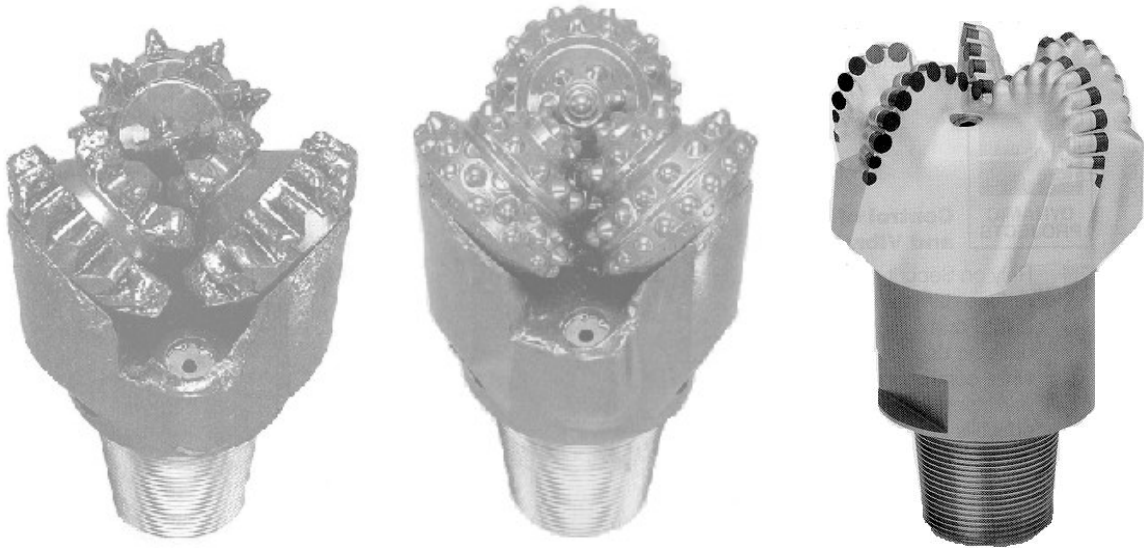
DC lerin arasına ve matkabın üzerine stabilizerler ve reamerlar (Şekil 9) konularak kuyunun daha sapmasız ve istenen çapta delinmesi sağlanır.

Tahlisyeler: Sondaj işlemi sırasında takımın kopmasıyla veya sıkışmasıyla sondaj dizisinin tümü veya bir kısmı kuyuda kalabilir. Ayrıca kuyuda takım yokken kuyuya malzeme düşebilir. Bu gibi durumlarda çeşitli özel ekipman ve yöntemlerle kuyudaki takım ve parçalar kurtarılır. Bu işleme **tahlisiye (fishing)** denilir. Şekil 10 da çeşitli tipte tahlisyeler görülmektedir.



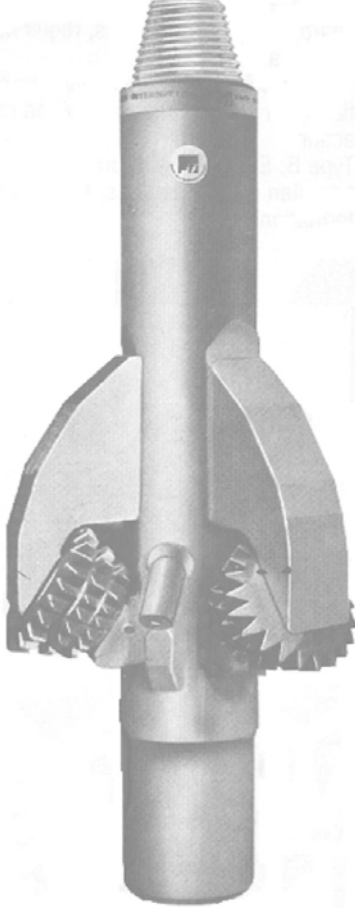
**Şekil 10.** Bazı tahlisiye çeşitleri

Matkaplar: Sondaj Dizisinin ucunda yer alırlar. Takım dizisiyle birlikte dönerek veya darbeli dönerek formasyonu kırıp parçalayarak ilerlemeyi sağlarlar. Pek çok tipte matkap vardır (Şekil 11).



**Şekil 11.** 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 ¼"), sonra kuyu istenen çapa hole opener ile genişletilir (örneğin 17 ½"). Şekil 12 de bir hole opener görülmektedir.

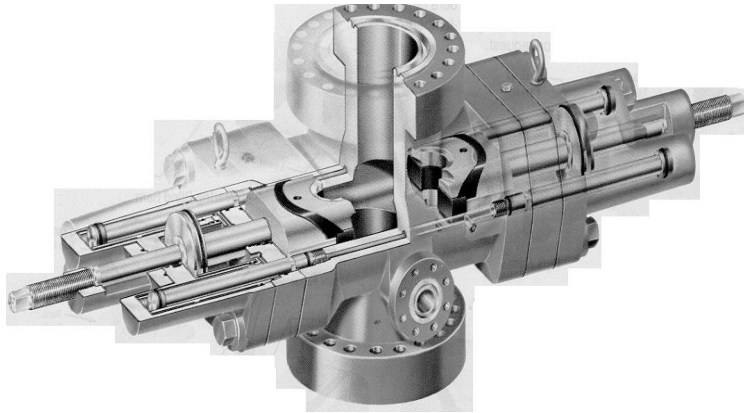


Şekil 12. Hole opener

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 13 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 ram preventer üst üste kullanılmalıdır.



Şekil 13. Ram tipi preventer.

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 özellikle olabilirler.

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

Sondaj akışkanlarının görevlerini başlıklar halinde sıralayalım;

- Matkabı ve sondaj dizisini yağlamak ve soğutmak,
- Kuyu tabanını kazı sırasında temiz tutmak,
- Kuyudan çıkan kırıntıları yukarı taşımak, yukarıda bu kırıntıları bünyesinden bırakmak ve sirkülasyon kesildiğinde bunları kuyuda askıda tutmak,
- Permeabl formasyonların duvarlarında geçirimsiz bir zarf oluşturmak,
- Formasyonun çökmesini ve yıkılmasını önlemek, boru giderlerini azaltmak,
- Sondaj dizisini askıda tutarak ağırlığını azaltmak,

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 14'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 14. Sondaj akışkanlarının sınıflandırması [4]

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

##### 4.1. 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.

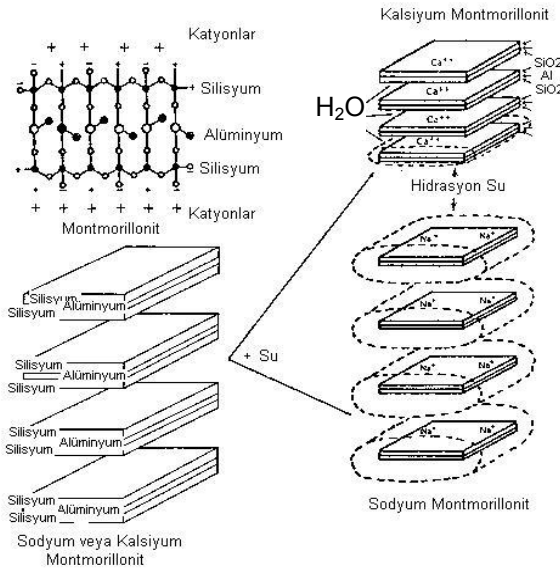
Killeri üç grupta inceleyebiliriz;

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

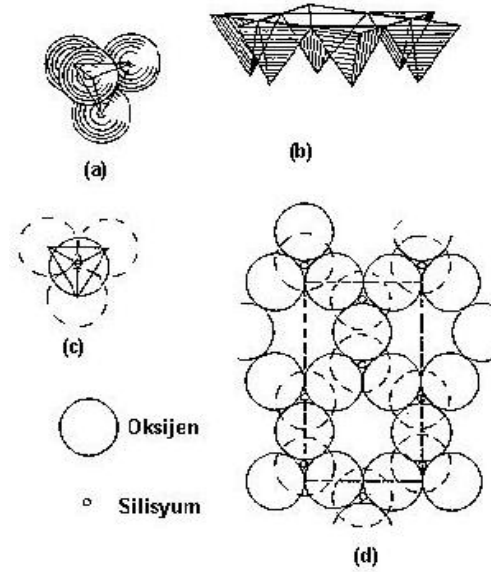
Şişebilen killer büyük hacimde, özellikle temiz suyu bünyelerine alabilirler ve hidrasyon işlemi boyunca tekrar tekrar parçalanırlar. Şişmeyen killer bünyelerine çok az su alırlar. Her üç grupta adı geçen killer sondaj çamurlarında kullanılır [13].

#### 4.1.1. Killerin Yapısı

Kaolen dışındaki kil mineralleri üç düzeyli tabakalardan oluşur. Bu sandviç benzeri üçlü yapının (Şekil 15) dışındaki tabakalar tetrahedral, aralarındaki tabaka oktahedraldir. Bu parçacıklardan bir cm lik bir uzunluğa 14-15 milyon tane dizilebilir. Şekil 16 da şematik olarak bir kil minerali görülmüyor. 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.



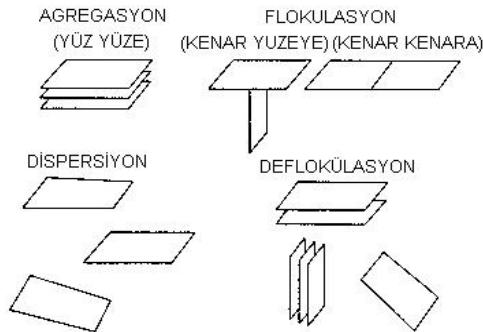
Şekil 15. Montmorillonitin sudaki davranışı [14]



Şekil 16. Tetrahedral tabakanın yapısı [13]

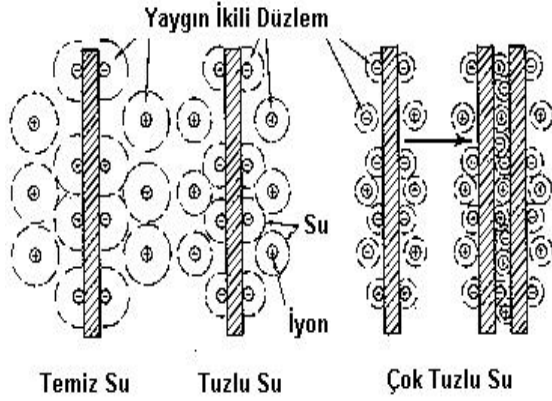
Kaolen dışındaki şişebilen ve şişmeyen killer üçlü tabakalı yapıdadırlar fakat kimyasal yapıları farklıdır.

Şişebilen Killerin Sudaki Davranışları: Sulu ortamda kil partikülleri arasında Şekil 17 deki gibi kuvvetler vardır. Eğer kil parçacıkları kenar-yüzey şeklinde birleşmişlerse buna **flokülasyon** (topaklanma), yüzey-yüzey şeklinde birleşmişlerse **agregasyon** (toplanma) denir [13].

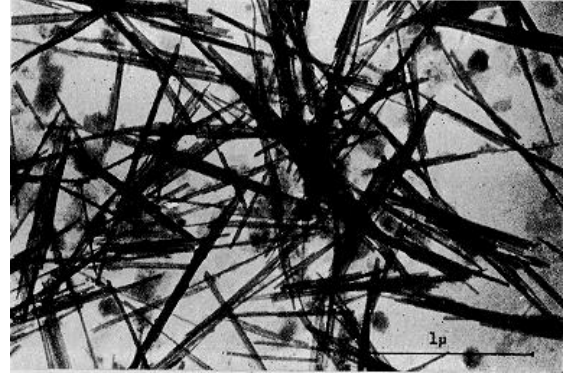


Şekil 17. Kil Partiküllerinin Sudaki İlişkileri

Şimdi bir kil parçacığını suya attığımızı düşünelim. Bu durumda pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) kil yüzeyinden ayrılır. Parçacık negatif baskın elektrik yüklü, su molekülleri de pozitif baskın elektrik yüklü olduğundan katyon ve kil yüzeyi su moleküllerini çeker. Su moleküllerinin negatif ucu katyona doğru, pozitif ucu da kil tabakasına doğru yönelerek yerleşir. Suyu karışan katyonlar yük farklılığından dolayı kil yüzeyini çekmeye devam ederler. Sonuçta bir su tabakası kil yüzeyinin çevresinde, ikinci bir su tabakası kil yüzeyinden belli bir uzaklıkta katyonlar tarafından tutularak yerleşir. Bu iki su tabakasına yaygın ikili düzlem denir. Az tuzlu suda bu tabakalar sıkışık 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 18) [13].



Şekil 18. Kilin çeşitli sulardaki davranışı [13]



Şekil 19. 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. Listedeki 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 19) 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).

#### 4.2. Sondaj Akışkanlarının Temel Özellikleri

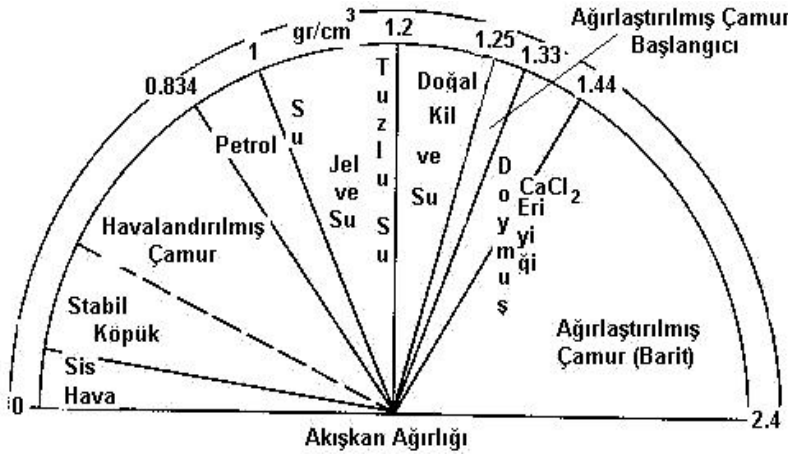
Sondaj çamurlarının temel özellikleri üç tanedir. Reoloji sondaj hidroliği konusunda incelenmiştir.

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

##### 4.2.1. Ağırlık

Sondaj akışkanlarının en temel özelliğidir. Blow-outların engellenmesi ve kuyu stabilitesinin sağlanması birincil olarak bu özellik ile ilgilidir.

Şekil 20 de çeşitli sondaj akışkanlarının özgül ağırlıklarının karşılaştırılması toplu halde görülebilir.



Şekil 20. Çeşitli sondaj akışkanlarının ağırlıkları [13]



Şekil 21. Çamur terazisi

Sondaj yapılacak formasyonlarda kullanılacak akışkan 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 uğrayan sahalarda 1 psi/ft (0,2262 bar/m) dir. Tektonik olarak aktif, sedimanter (çökel) havzalarda, çok faylı sahalarda bu değer derinlikle değişir, ortalama olarak 0,8 psi/ft değeri alınabilir. Yine bu değerler sahadan sahaya ve derinliğe bağlı olarak değişir.

Sondaj çamurlarının ağırlığını ölçmek için kullanılan çamur terazisi Şekil 21 de görülmektedir.

Sondaj çamurlarının ağırlıklarını değiştirmek için çeşitli katkı maddeleri kullanılır.

#### 4.2.2. Filtrasyon



Şekil 22. Filter press

Sondaj çamurunun filtrasyon ve duvar yapım özellikleri sondaj ve kuyu tamamlama operasyonları için çok önemlidir. Sondaj çamuru; kumtaşı ve karbonatlar gibi permeabiliteye sahip formasyonlarla temas ettiğinde, eğer bu formasyonlar bir akışkan içeriyorsa ve çamur basıncı o noktada 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 bir kalınlığa varmasına kadar devam eder. Çamurun filtrasyon özelliğinden dolayı olan bu olay belli bir noktaya kadar yararımızdır. Çamurun duvarı sıvama yeteneği (bunun sonucunda oluşan yapıya çamur keki-mud cake-denir) istenilenden fazla olursa sondaj ve sondaj sonrası hedeflenen akışkan üretimine zarar verir.

Çamurun filtrasyon özelliğini ölçmek için standartlaştırılmış laboratuvar ekipmanları vardır. Filter press denilen bu düzenek Şekil 22 de görülmektedir. Alınan çamur numunesi üzerine 100 psi basınç 30 dakika uygulanır. Çamur bu basınç sonucunda düzeneğin altına yerleştirilen metal elek ve filtre kağıdı altına filtrasyon sıvısı bırakır. Bu arada filtre kağıdı üzerinde çamur keki oluşur. 30 dakika sonucunda çamur keki kalınlığı ve filtrasyon sıvısının ölçümü alınır. Testi kuyudaki şartlara yaklaştırmak için, bu testi yüksek basınç ve sıcaklıkta yapabilen ekipmanlar da vardır.

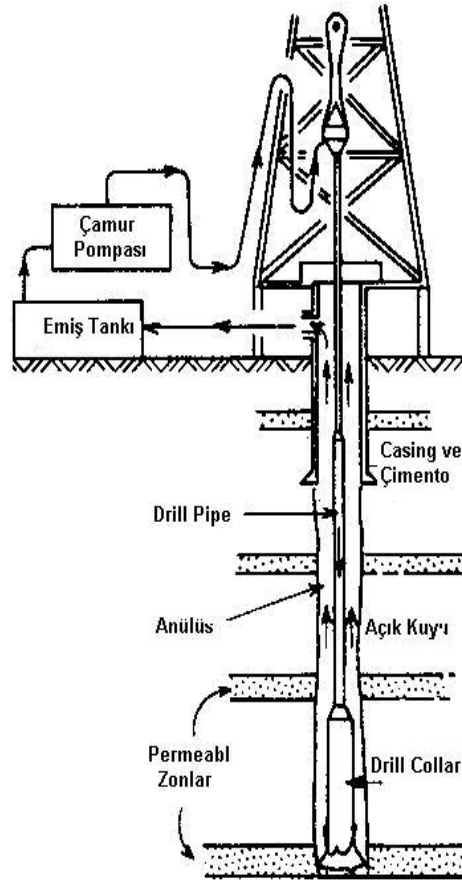


Çamurun filtrasyon kaybı zamanla, basınçla ve sıcaklığın yükselmesiyle artar. Çamurun filtrasyon özelliğini değiştirmek için çamura çeşitli katkı maddeleri katılır.

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.

## 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;

- Sondaj çamurunun reolojisi,
- Reolojik modeller,
- Kaldırma kapasitesi,
- Kritik hız,
- Laminar ve turbulent akıştaki basınç kayıpları,
- Eşdeğer sirkülasyon yoğunluğu,
- Surge ve swab basınçları,
- Matkap hidrolik optimizasyonudur [12] [13].

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

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

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

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

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

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

dir.

$$P = 0.052 \cdot \rho + P_0$$

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

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

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

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

Şekil 23 de şematik olarak bir sondaj kesiti görülmektedir. Sondaj çamurunun özgül ağırlığı kesitte görülen permeabl zonların içerdiği akışkanların o noktadaki basınçlarını karşılayacak değerde olmalıdır.

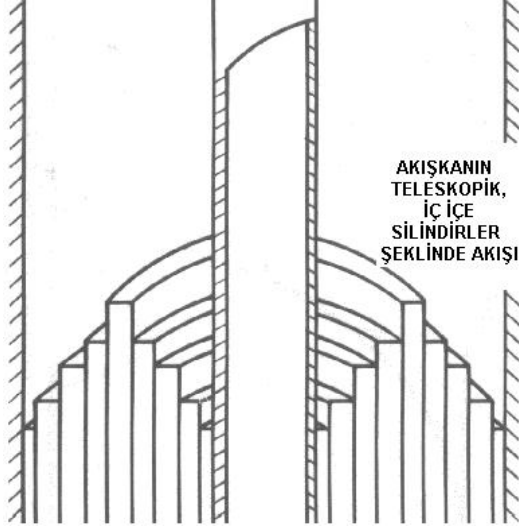
Şekil 23. Şematik Sondaj Kesiti

### 5.1. Temel Reolojik 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. Şekil 24 de kuyu içindeki akışı düşünecek olursak, akışkanın çok ince iç içe silindirik düzlemlerden oluştuğu varsayılır. Bu düzlemler yani laminalar **laminar akıma** ismini verir [14].



Şekil 24. 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].

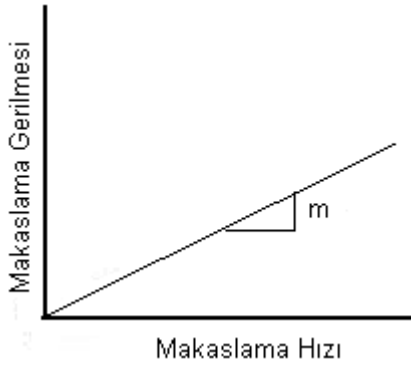
Akışkanlar yüksek hızlarda laminar akıştan parçacıklarının şansa bağlı hareket ettikleri **turbulent akım** durumuna geçerler [12].

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

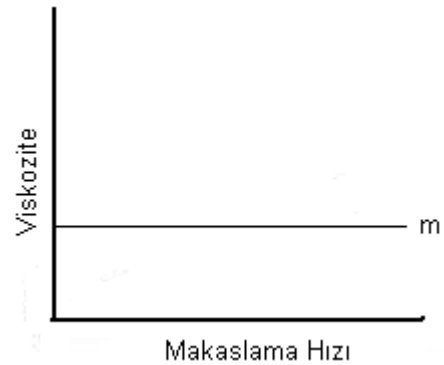
Sondaj sırasında sirkülasyon sisteminde (borular, matkap nozulları ve anülüsteki) hidrolik kesite bağlı olarak, makaslama hızı ve makaslama gerilmesi değişir. Pompa basıncı, sistemdeki bütün makaslama gerilmesi değerlerinin toplamıdır.

## 5.2. Newtonian Akışkanlar

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. (Bakınız Şekil 25) [12].



Şekil 25 . Newtonian Akışkanlarda MG – MH ilişkisi



Şekil 26. Newtonian Akışkanlarda MH – Viskozite ilişkisi

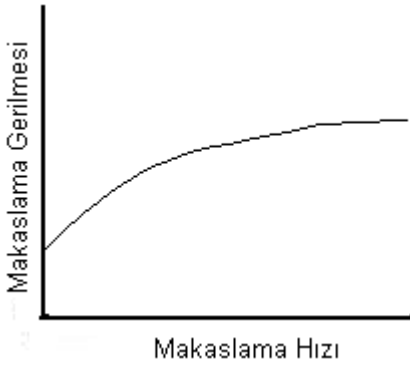
Makaslama gerilmesinin makaslama hızına oranı “m” dir ve burada viskoziteyi temsil eder. Newtonian akışkanlarda viskozite sabittir. Şekil 26’da görülebileceği gibi makaslama hızı viskozite ilişkisi değişmez, yataydır[4] [12].

### 5.3. Non-Newtonian Akışkanlar

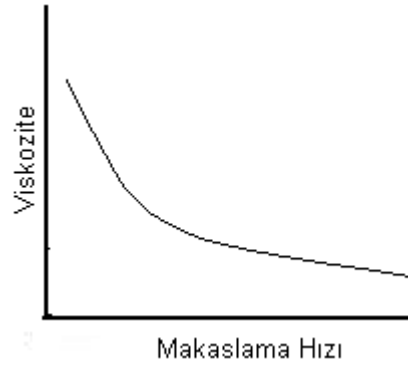
Newtonian akışkanlar üzerinde çok çalışılmıştır. Bu tip akışkanların basit doğaları eşitlikler yoluyla basitçe çözülmüşlerdir. Fakat sondaj çamurları Newtonian değildir. Bunlar karmaşık akışkanlardır ve makaslama hızı-makaslama gerilmesi oranları çok farklılıklar gösterir. Non-Newtonian akışkanların makaslama hızı-makaslama gerilmesi bağıntısını gösteren diyagramlara **reogram** denir. Şekil 27 de tipik bir sondaj çamuru reogramı görülmektedir. Bu reogramda bir Newtonian akışkanıninkinden 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].



**Şekil 27.** Non Newtonian akışkanlarda MG – MH ilişkisi



**Şekil 28.** Non Newtonian akışkanlarda MH - viskozite ilişkisi

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 27de reogramı verilen akışkan sabit viskoziteye sahip değildir. Onun viskozitesi verilen hızdaki makaslama hızına bağlıdır. Şekil 28 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].

Marsh Hunisi (Marsh Funnel)

Marsh hunisi (Şekil 29), 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 kaptaki şekilde açılır ve aynı anda kronometreye basılır. Çamur kaptaki 1 Quartlık (1 Q=946 ml) hacim çizgisine ulaştınca

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  $26 \pm 0.5$  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 30).

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 29. Marsh hunisi



Şekil 30. 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  $100 \text{ lb/ft}^2$  dir [13].

Alet herhangi bir devir sayısında (makaslama hızında) makaslama gerilmesini  $\text{lb/ft}^2$  olarak verir. Bu değerlerden aşağıdaki gibi o hızdaki görünür viskozite hesaplanır.

$$M=300 F/R$$

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

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

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

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  $149^\circ\text{C}$  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.

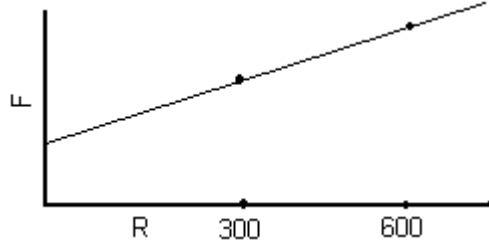
#### 5.4. Reolojik Modeller [4] [12] [13] [14]

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 Plastik 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 31). Bu doğru apsisi bir noktada keser ve bir eğimi vardır.



Şekil 31. 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/100ft<sup>2</sup> 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 düşünürsek, 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 hareketliyken 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.

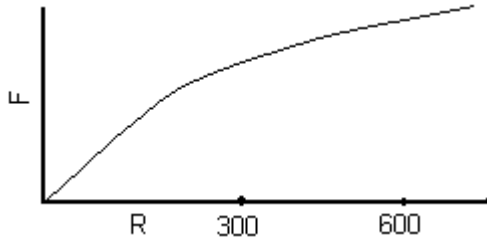
**Tablo 2.** Tipik bir çamurun görünür viskozitesi

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

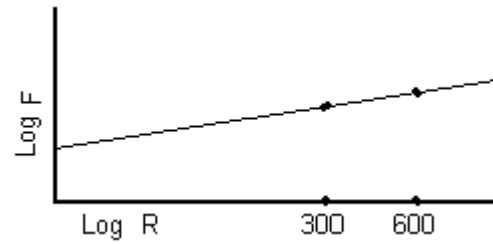
Power Law Model'i anlamak için Tablo 2 de verilen örneğe bakalım. Makaslama hızı ve makaslama gerilmesi değerleri koordinat sistemine yerleştirilip birleştirilince ortaya bir eğri çıkar. Eğer bu veriler log-log kağıda işaretlenirse 600 ve 300 devirlerdeki noktaların birleştirilmesiyle uzatılan doğru 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 ft<sup>2</sup>-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'dır. Kartezyen koordinat sisteminde ise reogram bir doğru değildir. Şekil 32 ve 33 de  $n=0.5$  ve  $K=2$  olan bir çamurun reogramları görülmektedir.



**Şekil 32.** Kartezyen koordinatlarda power law



**Şekil 33.** 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 incelmесinin değerini n parametresinin değeri verir. n' in düşmesi kayma incelmесinin yükselmesi demektir. Eğer "n" değeri 0.45 den azsa sıvı çok non Newtonian'dır.

Kuyuda, anülüste sondaj sıvısının hızı düşük, viskozitesi yüksektir. Matkaptaki 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 Sirkülasyon Başlangıcı

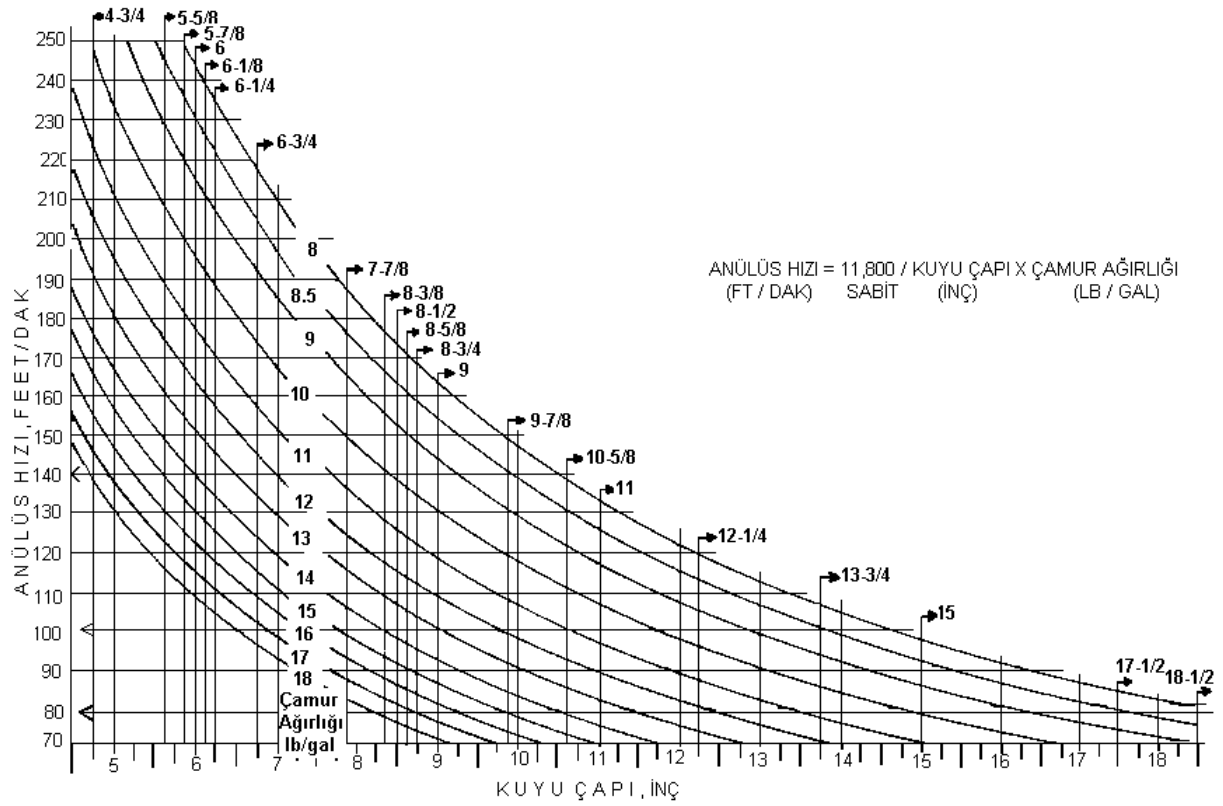
Sondaj akışkanları sirkülasyon başlangıcında genellikle thixotropic özellik gösterirler. Kuyuda sirkülasyonu başlatmak için gereken basınç genelde, sirkülasyonu belli bir değerde tutmak için harcanan basınçtan çoktur [4] [12].

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. Kaldırma Kapasitesi (Kuyu Temizliği)

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 34 deki nomogram kullanılarak, farklı kuyu çaplarında gereken anülüs hızı pratik olarak saptanabilir.



Şekil 34. 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. Kritik Hız [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, devrilerek 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 incelmeye özelliğinden dolayı en yüksek kritik hıza sahiptir. Bununla beraber, anülüs hızı bu bölgede yüksek olduğundan çamurun DC'lar çevresindeki akışı turbulanttır. 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.

$$N_{Re} = \frac{928 \rho v d}{\mu}$$

$\rho$  = Akışkan yoğunluğu, lb/gal,

$v$  = Akış hızı, ft/sn,

$d$  = Boru çapı, inç,

$\mu$  = Akışkan viskozitesi, cp.

Newtonin akışkanlarda Reynolds Sayısı 2100'den azsa laminar, çoksa turbulent akım olur. 2100 değeri Newtonian akışkanlar için **Kritik Reynolds Sayısıdır**. Gerçi anülüsteki hız kritik hızın altında bile olsa turbulent akım oluşabilir. Kuyuda laminar akım bekleniyor olsada kuyu dibi sıcaklığı, basınç, özellikle yönlü kuyulardaki eksantriklik ve kuyu pürüzlülüğü nedeniyle karşılaşılan akım turbulent olabilir.

Newtonian Akışkanlarda; akış tipinin turbulent olduğu bulunduktan sonra sürtünme faktörü, f (friction factor) olarak isimlendirilen boyutsuz bir sayı kullanılır.

$$f = F_k / AE_k$$

$F_k$  = Akışkanın hareketi dolayısıyla akışın olduğu yerin çeperine etki eden güç,

$A$  = Akışın olduğu yerin alanı,

$E_k$  = Akışkanın birim hacminin kinetik enerjisidir.

Fanning sürtünme faktörü denilen bu değer, turbulente akımda **Stanton Diyagramı** yardımıyla ve Reynolds Sayısı aracılığıyla bulunur. Sondaj boruları için gerçek boru pürüzlülüğü 0.000013 alınmalıdır. (Bakınız Şekil 35).

Bingham Plastik modelde turbulente akıma birincil olarak yoğunluk ve PV etki eder. Akışkanın YP si turbulente akıma geçildikten sonra çok önemli bir rol oynamaz. Non Newtonian akışkanlarda turbulente akımın başladığı hızın bulunması Newtonian akışkanlara oranla daha zordur.

Genellikle kullanılan bir yöntem: İstenilen kesitteki çamurun görünür viskozitesine karşılık gelen Reynolds Sayısı bulunur.

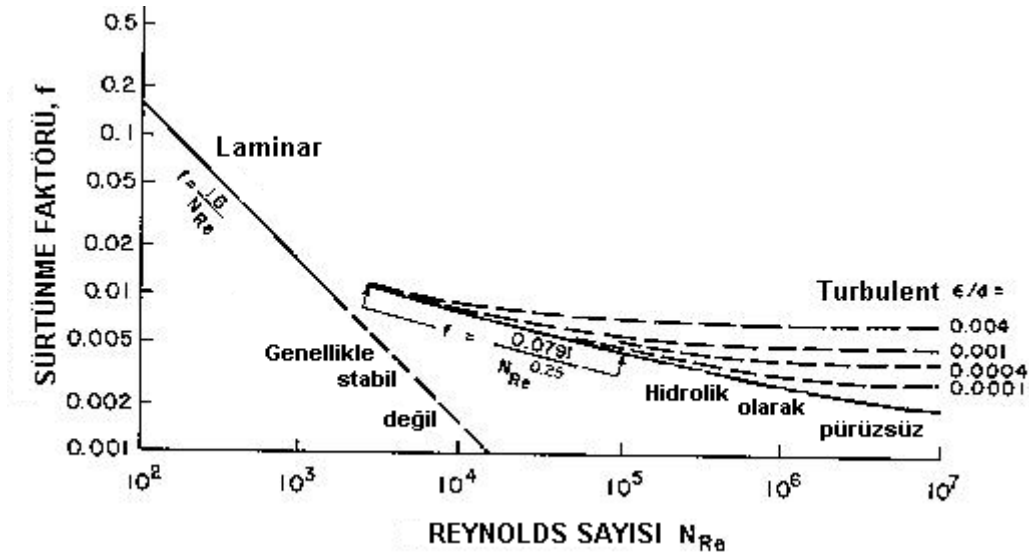
$$\mu_a = \mu_p + \frac{\mu_p + 5\tau_y(d_2 - d_1)}{v} \quad (\text{anülüs için}), \quad \mu_a = \mu_p + \frac{6.66\tau_y d}{v} \quad (\text{boru için})$$

buradan bulunan değer

$$N_{Re} = 928 \rho v d_e / \mu \quad \text{formülünde yerine konularak Reynolds Sayısı bulunur.}$$

Burada  $d_e = 0.816(d_2 - d_1)$  dir.

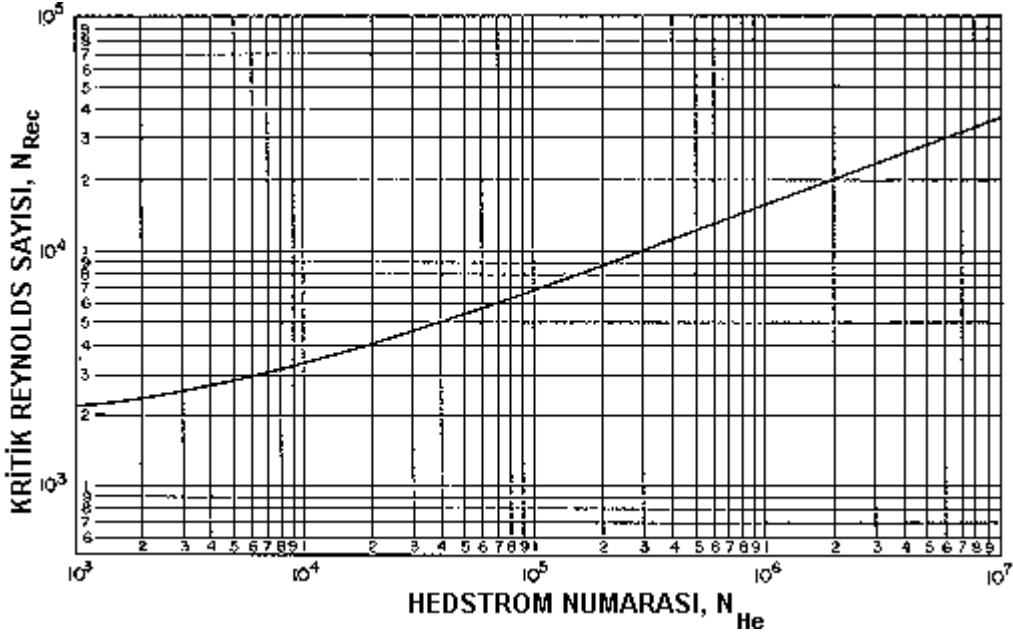
Yine 2100 sayısı temel alınarak, bu sayının üstü turbulente altı laminar akımı işaret eder.



**Şekil 35.** Stanton Diyagramı, silindirik boruda turbulente akım için sürtünme faktörünü gösterir.

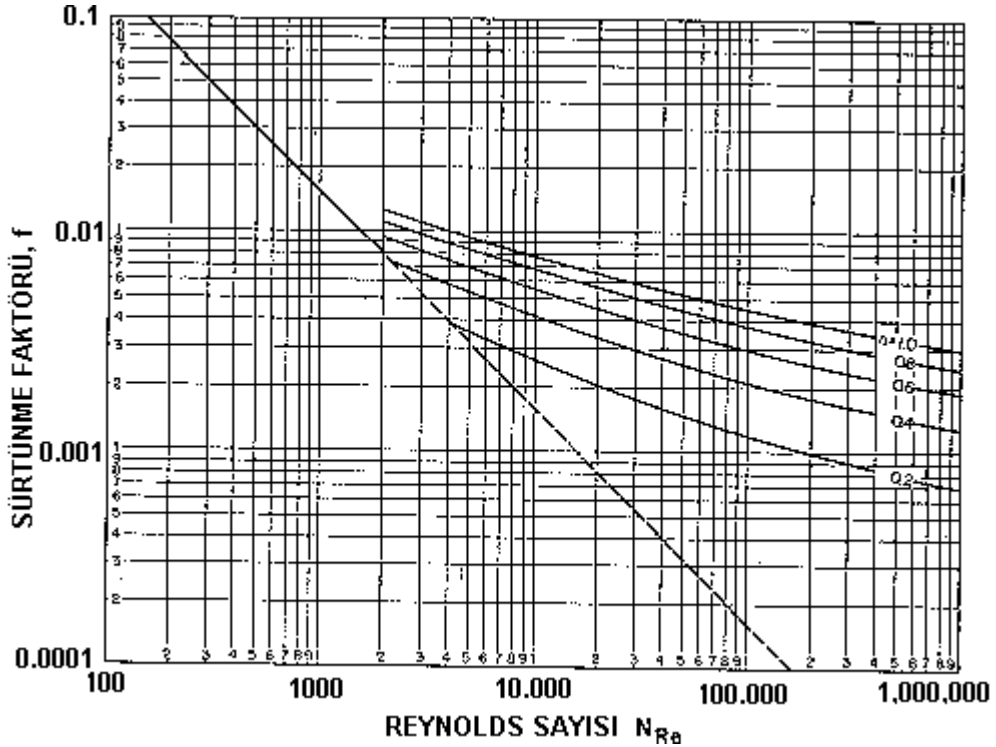
Önerilen bir başka yöntemde de **Hedstorm Numarası** kullanılır. Bu yöntemde aşağıdaki formül önerilmiştir ve buradan bulunan  $N_{He}$  değerinden Şekil 36 yardımıyla kritik Reynolds Sayısı bulunur.

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



Şekil 36. 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 37den bulunur ve bulunan değer 2100 sayısı ile karşılaştırılır.



Şekil 37. 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. Laminar Akım Basınç 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 Akım Basınç 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 3 ve Tablo 4 de verilmiştir.

### 5.10. Eşdeğer Sirkülasyon 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,

$\Sigma P_a$  = " " noktanın yukarısındaki kesitlerdeki basınç düşümlerinin toplamı, psi,

Z = " " gerçek dikey derinliği, ft dir.

**Tablo 3.** Non Newtonian Akışkanlarda Basınç Kaybı Eşitlikleri

	<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	$= \theta_{600} - \theta_{300}$	$n = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}$	
Turbulans Kriteri	$\tau_v = \theta_{300} - \mu_p$	$K = \frac{510\theta_{300}}{511^n}$	
	<u>Boru</u>		
	$N_{He} = \frac{37,100\rho\tau_y d^2}{\mu_p^2}$	$N_{Re}, \text{Şekil 37 den}$	
	$N_{Re}, \text{Şekil 36 dan}$	$N_{Re} = \frac{89,100\rho(\bar{v})^{2-n}}{K} \left[ \frac{0.0416d}{3+1/n} \right]^n$	
	$N_{Re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu_p}$		
	$N_{He} = \frac{24700\rho\tau_y(d_2 - d_1)^2}{\mu_p^2}$	$N_{Re}, \text{Şekil 37 den}$	
	$N_{Re} = \frac{757\rho\bar{v}(d_2 - d_1)}{\mu_p}$	$N_{Re} = \frac{109,000\rho(\bar{v})^{2-n}}{K} \left[ \frac{0.0208(d_2 - d_1)}{2+1/n} \right]^n$	
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
	$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\rho^{0.75}\bar{v}^{1.75}\mu^{0.25}}{1,396(d_2 - d_1)^{1.25}}$		

**Tablo 4.** 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 Basınçları [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.

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

$D_p$  = Boru çapı, inç,

$D_h$  = 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 Hidrolik Optimizasyonu [4] [12]

Sondaj verimi üzerinde en çok etkisi olan parametrelerden sondaj hidroliği, pek çok değişkenin fonksiyonudur. Bir sondaj kulesi temel olarak; sondaj sıvısına hareket veren pompa(lar), sondaj akışkanını kuyu tabanına iletmek 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,  $m^3/sn$  veya GPM (gallon per minute) olarak ölçülür.
- Akış Alanı: Akışkanın aktığı alan,  $m^2$  veya inç<sup>2</sup>.
- Sistem Uzunluğu: Akışkanın pompalandığı uzunluk, m veya feet.
- Akışkan Özellikleri: Akışkanın birim hacim ağırlığı,  $kg/m^3$  veya ppg (paund per gallon), viskozitesi, veya cps.

Sirkülasyon sisteminde daha yüksek debi

“ “ “ küçük alan  
 “ “ “ uzun boy  
 “ “ “ ağır çamur  
 “ “ “ viskoz çamur

Sirkülasyon için daha yüksek basınç

“ “ “ “  
 “ “ “ “  
 “ “ “ “  
 “ “ “ “

demektir.

### 5.13. Jet Matkap Nozul Boyutu Seçimi

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. Hidrolik 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 yapıma 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 ( $Q_{\text{opt}}$ ) lar bulunur.

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

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

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

$$C_d = \text{Katsayı}(0.95)$$



$$(A_t)_{opt} = \sqrt{\frac{8,311 \times 10^{-5} \rho Q_{opt}^2}{C_d^2 (\Delta P_{opt})}}$$

Optimum toplam nozul alanı, inç<sup>2</sup>,

$$D = 64 \sqrt{\frac{(A_t)_{opt}}{3\pi}}$$

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 haricinde 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 5.** API standardı casingler

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 casingler kuyu derinliği, delinen formasyonların yapısı, üretilen akışkanın sıcaklığı, basıncı, debisi, kimyasal özellikleri gözönüne alınarak kuyu dibinden yukarı doğru tasarlanır. Yüzeğden itibaren kuyulara indirilen belli başlı casing tipleri şunlardır.

- Kondüktör casing (Conductor casing)
- Yüzeğe Boru (Surface casing)
- Ara Casing (Intermediate casing)
- Üretim casingi (Production casing)
- Liner

Kondüktör casing, yüzeyde 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 yüzeye kadar çimentolanır.

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

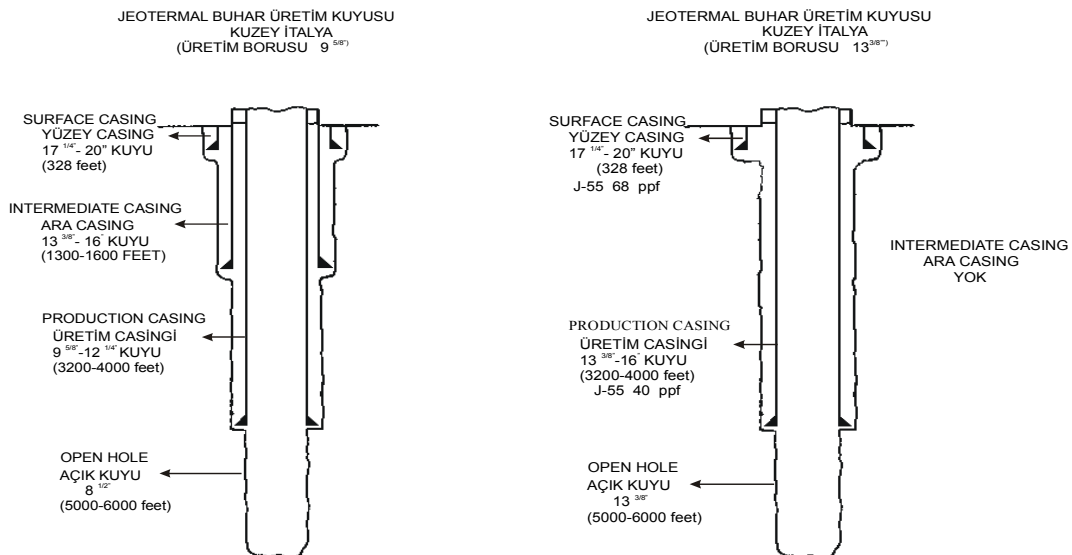
Ara casing, sondajın emniyetli devamını olanaksız kılacak şartlar oluşması durumunda kuyuya indirilir. Öte yandan bazı jeotermal sahalarda rezervuardan daha bol akışkan elde etmek gibi nedenlerle, ara casing dizisi rezervuarın hemen üstüne gelecek şekilde indirilerek çimentolanır. Bu durumda üretim casingi olarak görev yapar.

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

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

Yukarıda da belirtildiği gibi jeotermal sahanın kendi özel şartlarına bağlı olarak bahsedilen boru dizilerinin ya hepsi kuyuya indirilir veya kuyu şartları elverişli ise bir kısmı atlanır.

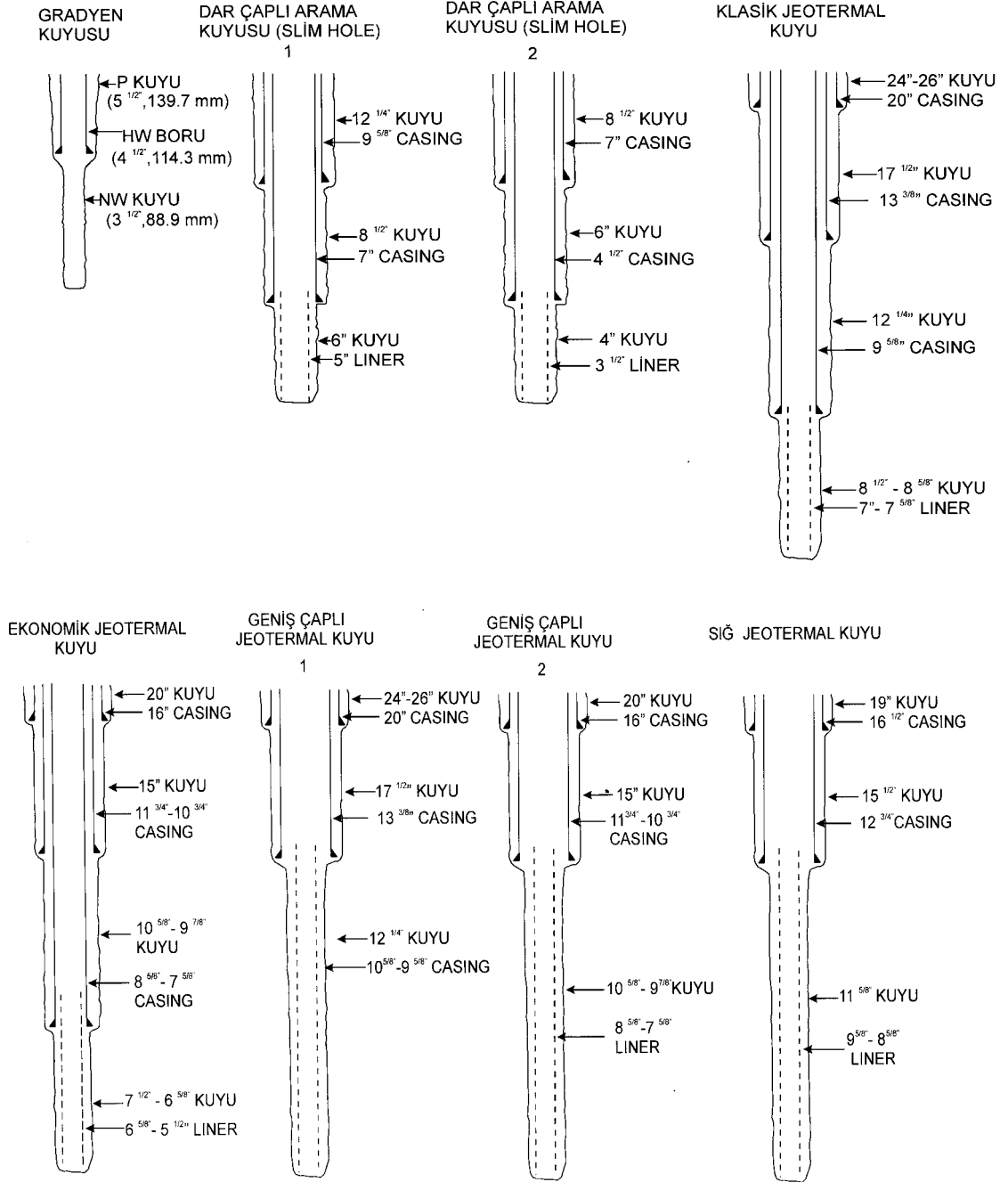
Türkiye'de ve dünyada bazı jeotermal sahalarda uygulanan dizaynlar ile İzmir Valiliği adına hazırlanan jeotermal enerji yönetmeliğinde öngörülen kuyu, casing dizaynları Şekil 38, 39'da verilmiştir.



Şekil 38. İtalya-Larderello jeotermal sahasındaki kuyu dizaynları

Koruma boruları şu yapısal özellikleriyle tanımlanırlar :

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



Şekil 39. İzmir Valiliği Enerji Yönetmeliği'nde öngörülen kuyu ve casing dizaynları

### 6.1.1. Malzeme Kalitesi (Grade)

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

Malzeme cinsinin gösterimi, bir harf ile iki yada üç haneli numaradan ibarettir (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 aksel olmayan yüklerin (Biaxial loading) değerlendirilmesinde kullanılırken minimum değer ise patlama (Burst) ve çökme (Collapse) mukavemetlerinin hesaplamasında göz önüne alınır.

Casingler, kolay ayırt edilmeleri için farklı kalitede borular üzerine değişik renkte band şeklinde boyanırlar. Boyama manşon üzerine veya manşondan belli mesafeye fırça ile band şeklinde çizilerek yapılır. H-40 ya boyasız veya bir siyah band, J-55 bir yeşil band, K-55 iki yeşil band, N-80 bir kırmızı band, P-110 bir beyaz band, C-75 bir mavi band, C-95 bir kahverengi band, L-80 kırmızı-kahverengi band ve V-150 eflatun (mor) band ile gösterilir.

C kalite borular, H<sub>2</sub>S'e dayanıklı olmaları nedeniyle özellikle doğalgaz sondajlarında kullanılır.

### 6.1.2. Uzunluk (Length)

Değişik uzunluklarda imal edilen casingler 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)

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

### 6.1.4. Ağırlık (Weight)

Casinglerin 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). Casinglerin 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)

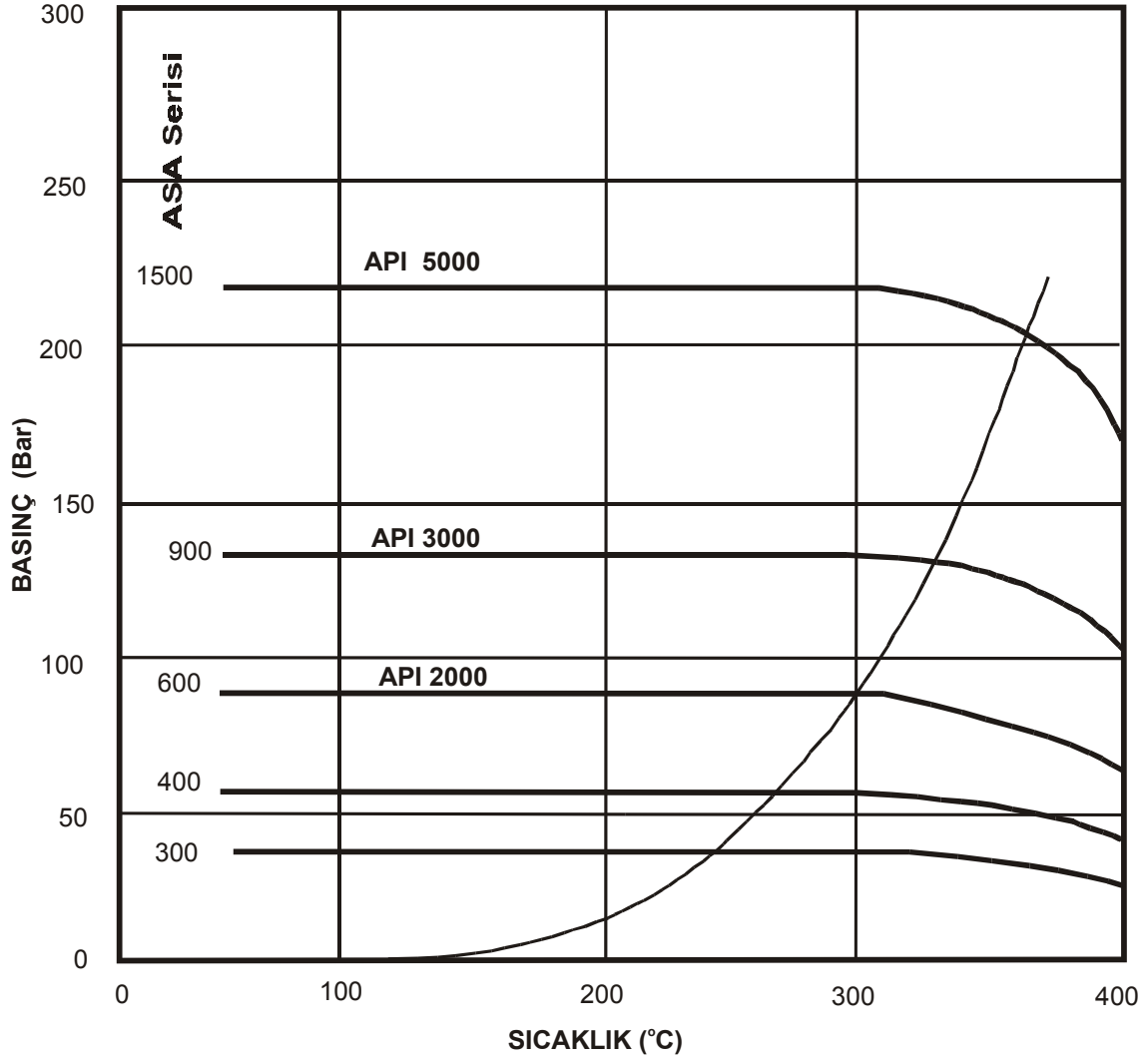
Nominal ağırlık, esas olarak sipariş esnasında casingin tanımlanması amacıyla kullanılmakta olup kesin ağırlık değildir. İki ucuna dış açılmış ve bir tarafına manşon bağlanmış 20 feet uzunluğundaki borunun bir foot'unun teorik ağırlığıdır.

Tablo 6. API Casingler

Casing Özellikleri				Casing İç Çapı				MATKAP ÇAPI		ÇAPSAL AÇIKLIK			
Casing Dış Çapı O.D.		Manşonlu Ağırlık		Manşon Dış Çapı		Casing İç Çapı		MATKAP ÇAPI		Inches		Metric	
Inch	mm	Lbs/Ft	kg/m	Inch	mm	Inch	mm	Inch	mm	Binler ayıracı	1/64 e yakın	Mm	En Yakın mm
4 <sup>1/2</sup>	114,3	9,50	14,14	5,00	127,00	4,090	103,89	3 <sup>7/8</sup>	98,43	0,215	7/32	5,46	5
4 <sup>1/2</sup>	114,3	10,50	15,63	5,00	127,00	4,052	102,92	3 <sup>7/8</sup>	98,43	0,177	11/64	4,50	4
4 <sup>1/2</sup>	114,3	11,60	17,26	5,00	127,00	4,000	101,60	3 <sup>7/8</sup>	98,43	0,125	1/8	3,18	3
4 <sup>1/2</sup>	114,3	13,50	20,09	5,00	127,00	3,920	99,57	3 <sup>3/4</sup>	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 <sup>1/4</sup>	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 <sup>1/4</sup>	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 <sup>1/8</sup>	104,78	0,151	5/32	3,84	4
5 <sup>1/2</sup>	139,7	14,00	20,83	6,050	153,67	5,012	127,30	4 <sup>3/4</sup>	120,65	0,262	17/64	6,65	7
5 <sup>1/2</sup>	139,7	15,50	23,07	6,050	153,67	4,950	125,73	4 <sup>3/4</sup>	120,65	0,200	13/64	5,08	5
5 <sup>1/2</sup>	139,7	17,00	25,30	6,050	153,67	4,892	124,26	4 <sup>3/4</sup>	120,65	0,142	9/64	3,61	4
5 <sup>1/2</sup>	139,7	20,00	29,76	6,050	153,67	4,778	121,36	4 <sup>5/8</sup>	117,48	0,153	5/32	3,89	4
5 <sup>1/2</sup>	139,7	23,00	34,23	6,050	153,67	4,670	118,62	4 <sup>1/2</sup>	114,30	0,170	11/64	4,32	4
6 <sup>5/8</sup>	168,3	20,00	29,76	7,390	187,71	6,049	153,64	5 <sup>7/8</sup>	149,23	0,174	11/64	4,42	4
6 <sup>5/8</sup>	168,3	24,00	35,72	7,390	187,71	5,921	150,39	4 <sup>3/4</sup>	120,65	1,171	1 <sup>11/64</sup>	29,74	30
6 <sup>5/8</sup>	168,3	28,00	41,67	7,390	187,71	5,791	147,09	4 <sup>3/4</sup>	120,65	1,041	1 <sup>3/64</sup>	26,44	26
6 <sup>5/8</sup>	168,3	32,00	47,62	7,390	187,71	5,675	144,15	4 <sup>3/4</sup>	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 <sup>1/4</sup>	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 <sup>1/4</sup>	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 <sup>1/4</sup>	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 <sup>1/8</sup>	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 <sup>7/8</sup>	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 <sup>7/8</sup>	149,23	0,045	3/64	1,14	1
7 <sup>5/8</sup>	193,7	24,00	35,72	8,500	215,90	7,025	178,44	6 <sup>3/4</sup>	171,45	0,275	9/32	6,99	7
7 <sup>5/8</sup>	193,7	26,40	39,29	8,500	215,90	9,969	253,21	6 <sup>3/4</sup>	171,45	3,219	7/32	81,76	82
7 <sup>5/8</sup>	193,7	29,70	44,20	8,500	215,90	6,875	174,63	6 <sup>3/4</sup>	171,45	0,125	1/8	3,18	3
7 <sup>5/8</sup>	193,7	33,70	50,15	8,500	215,90	6,765	171,83	6 <sup>5/8</sup>	168,28	0,140	9/64	3,56	4
7 <sup>5/8</sup>	193,7	39,00	58,04	8,500	215,90	6,625	168,28	6 <sup>1/4</sup>	158,75	0,375	3/8	9,53	10

Tablo 6. API Casingler(Devam)

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



**Şekil 40.** API Basınç-Sıcaklık sınıflandırması

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)

Casingin 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)

Casingin 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. Casinglerin yük taşıma kapasiteleri yönüyle 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.

Casingin 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 "mastarlarla" iç çap yönünden kontrol edilir. Mastar, borunun bir ucundan girdiğinde öbür ucundan takılmadan geçmelidir. Mastarların çapı kataloglarda "Drift Diameter" olarak geçer.

### 6.1.6. Diş ve Bağlantı Tipleri

Casinglerin birbirilerine bağlanmaları için uç kısımlarına diş açılır. Dişler tip ve sızdırmazlıklarına göre şu gruplara ayrılır :

a) Sıkılan Yüzeyleri Sızdırmaz Dişler (Tapered Seal Threads)

-API Yuvarlak dişli

-Butress Dişli

b) Metal-Metal Sızdırmaz Yüzeyle (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 için) boruların uçları kalınlaştırılır (External Upset).

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

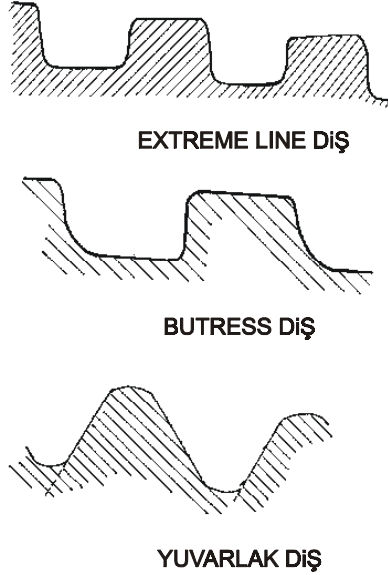
- - Kısa Dişli ve Manşonlu (Short Thread and Couplings) (STC)
- Uzun Dişli ve Manşonlu (Long Thread and Couplings) (LTC)

Uzun Dişli boruların yük taşıma kapasiteleri kısıtlara göre 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 en sık kullanılan Buttress dişlerin yapımı zordur ve diğer diş tiplerine göre bu borular daha pahalıdır.



Şekil 41. API diş tipleri

### 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.

## 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.

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 boydaki 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 diş ucunda borunun sıkılması gereken seviyeye, bir küçük üçgen işareti konur. Boruların, bu işarete gelinceye kadar sıkılması önerilir.

### 6.3. Casinglere Etki Eden Yük ve Kuvvetler

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

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

#### 6.3.1. Dış Basınç (Collapse Pressure)

Casinge 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 (Collapse)  $C = \text{çamur yoğunluğu} \cdot \text{derinlik} \cdot \text{gravitasyon hızı}$

$$= \rho_m \cdot g \cdot h$$

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

olarak hesaplanabilir.Aynı formül, metrik sistemde :

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

Boru dizaynında kuyu tabanındaki göçme basıncının ( $C_{psi}$  veya  $C_{bar}$ ) kesinlikle casingin göçme dayanımını aşmayacağından emin olunmalıdır.Casinglerin 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,  $\nu$  : Poisson Oranı,  $t$  : Casing Et Kalınlığı,  $D$  : Casing dış Çapı

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

$$P_c = \frac{46.95 \times 10^6}{\frac{D}{t} \left( \frac{D}{t} - 1 \right)^2} \text{ psi.dir}$$

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 7' de verilen D/t oranlarına uygulanabilir.

**Tablo 7.** 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 casingin yapımında kullanılan çeliğin kalitesine bağlıdır. Y ise akma mukavemetidir. Yukarıdaki formül Tablo 7 de verilen D/t oranlarına uygulanabilir. Öncelikle D/t oranı saptanmalıdır. Eğer bulunan değer Tablo 8 de verilen değerlerin sınırları içine düşüyorsa A, B, C direkt olarak tablodan okunabilir.

**Tablo 8.** 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 10.6 no lu formüle uygulanabilir.

**Tablo 9.** 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 Basıncı (Burst or Internal Yield Pressure)

Casing kuyuya set edildikten sonra, akışkanın casing içine girdiği andaki basıncı boruya etkileyen "İç Basıncı" 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 basıncı oluşur. Bu örneklerden de anlaşılacağı üzere, patlama basıncı, kuyubaşında maksimum, kuyu dibinde ise minimumdur.

Casingler için minimum patlatma basıncı Barlow formülü ile hesaplanır.

$$P = 0.875 \left( \frac{2Yt}{D} \right)$$

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 çıkarılarak, 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 daha düşük değerlerde tutulur ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır :

$$P = Y_m \left( \frac{D_m - d_1}{D_m} \right)$$

Burada,  $Y_m$  :Manşonun minimum akma mukavemeti,  $D_m$  :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)

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

$$P_y = 0.7854 (D^2 - d^2) Y_p$$

Burada 0.7854 ( $D^2 - d^2$ ) yükü taşıyan kesitin alanıdır.

$Y_p$  : 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 dişi 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 10' da verilmiştir.

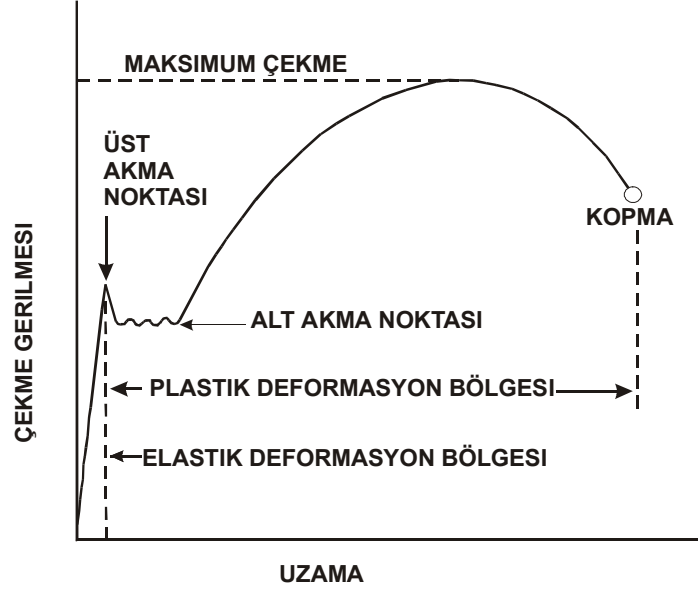
**Tablo 10.** API Casing kopma mukavemetleri

Kalite (Grade)	Akma Mukavemeti				Çekme Mukavemeti		Uzama <sup>(1)</sup>
	Min.		Max.		psi	Kg/cm <sup>2</sup>	
	psi	Kg/cm <sup>2</sup>	psi	Kg/cm <sup>2</sup>			%
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

<sup>(1)</sup> Uzama 50.8 mm cinsinden % olarak verilir.

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

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



Şekil 42. Çelik malzeme uzama diyagramı

Burada ;

P1 : Aksenal çekme gerilmesi altında minimum göçme basıncını

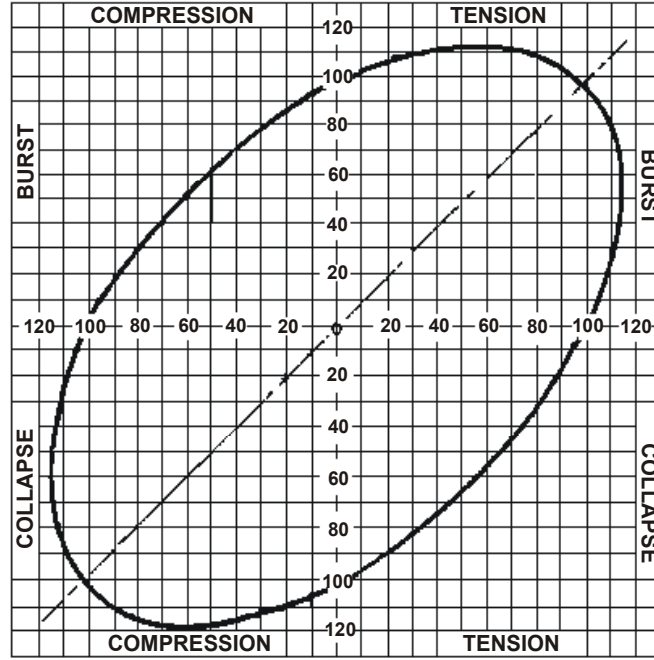
P2 : Aksenal çekme gerilmesiz minimum göçme basıncını

S : Aksenal çekme gerilmesini

Yp : Borunun minimum akma mukavemetini belirtir.

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

Elipsten alınan ve çekmenin göçme mukavemetine etkisini gösteren bazı değerler, Tablo.13'de verilmektedir. Tabloda RY değerleri, boru kesitine etkileyen çekme gerilmesinin (S), minimum akma mukavemetine (Y<sub>m</sub>) 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. Aksenal gerilme % 50' ye çıktığında (RY=0.50) bu değer % 65'e düşecektir.



Şekil 43. Casing yük mukavemet elipsi

#### 6.3.4. Yüzdürme Kuvveti (Buoyancy Factor)

Arşimet prensibine göre tümüyle bir sıvıya batırılmış bir cisim, yer değiştirdiği sıvının ağırlığına eşit bir kuvvetin etkisi altındadır ki bu kuvvete kaldırma kuvveti denir.

Casing dizaynı hesaplamalarında kaldırma kuvvetinin dizi üzerindeki etkisi mutlaka gözönünde tutulmalıdır. Kaldırma kuvvetinin öncelikle ağırlık azaltıcı rolü vardır ve bu da ağırlıktan dolayı oluşan çekme yükünü hafifletir.

Casingin veya sondaj takım dizisinin yoğunluğuna  $\rho_s$ , içine daldırılan sıvının (çamur) yoğunluğuna da  $\rho_m$  dersek ;

$$\text{Kaldırma kuvveti} = \left( 1 - \frac{\rho_m}{\rho_s} \right)$$

Formülü ile bulunur. Kaldırma kuvvetinin birimi olmayıp her zaman 1 den küçüktür. Öte yandan kaldırma kuvveti bütün sıvıya batmış cisim boyunca etkilidir. Dolayısıyla kuyudaki casingin tümü boyunca aynıdır.

**Tablo 11.** Göçmenin çekme 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]

Bir kuyuya indirilen casinglere, kuyunun değişik derinliklerinden çok değişik kuvvetler etki eder.Bu nedenle anılan yük ve kuvvetlerin kesin değerlerinin saptanması çok zordur.Derinde göçme basıncı, yüzeye yakın yerlerde aksel yük ve patlama basınçları gibi bir çok değişik kuvvet casinge etkir.Ayrıca zaman içinde (bu yükler ve bazı kimyasal etkiler nedeniyle) casing yapısında meydana gelebilecek değişiklikler, casingin 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 sözkonusu 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 ayırdetmek 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 sözkonusu ise bu hesaplama yapılır.6.4.1. Kuyuda Casing Dizisine Gelen Yükler

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

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

İç basınç : Boru içindeki akışkanların basıncıdır.Akışkanlar, ya formasyondan kuyuya giren ya da borulardan aşağı 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 kuyubaşında maksimum, kuyu dibinde minimumdur.

Eksenel yük : Dizinin kendi ağırlığından doğan yüküdür.Her boru ve bağlantı kendi altındaki dizinin ağırlığını taşır dolayısıyla bu yükü taşıyabilecek kapasitede olmalıdır.Eksenel yük, kuyubaşı casing bağlantısında en büyük, dibinde ise en küçüktür.Eksenel yük hesaplamaları en üstteki boru ve bağlantıya göre yapılır.Göçme ve iç basınç hesabı yapılmış her bölümde üst bağlantıların aksel 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 etkin kombine yükler halindedir.Öte yandan kuyuda var olan sapma, yüksek sıcaklık ve gaz içeriği casing dizisinin çeşitli yükler bakımından dayanımını etkileyen faktörlerdir.

## 6.5. Boru İndirme Öncesi Hazırlıklar

Kuyunun, hangi çapta açılmaya başlanarak, ilk casing dizisi çapının ne olacağını belirleyen faktör, kuyuya inilecek son dizinin çapının ne olacağıdır.

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 çaplı dizi ile üretim yapıldığında ekonomiklik faktörünün ne olacağı da gözönünde bulundurulması gereken durumdur (Rezervuar şartları dikkate alınarak). Eldeki mevcut boruların çapları ile sahada yapılan genel uygulamalar (eski deneyimler) çap seçimini etkileyen unsurlardır.

Kuyunun hangi çaplı matkaplarla delineceği ve bunlara hangi boru dizisinin indirileceği, üretim dizisi çapının seçilmesine bağlıdır. Üretim dizisinin çapı seçildikten 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 çaplı deliğe indirilebileceği ve daha sonra bu boruların içinden hangi çaplı matkapla delme işlemine devam edileceği tablolarda verilmiştir. (Bkz. Tablo.6)

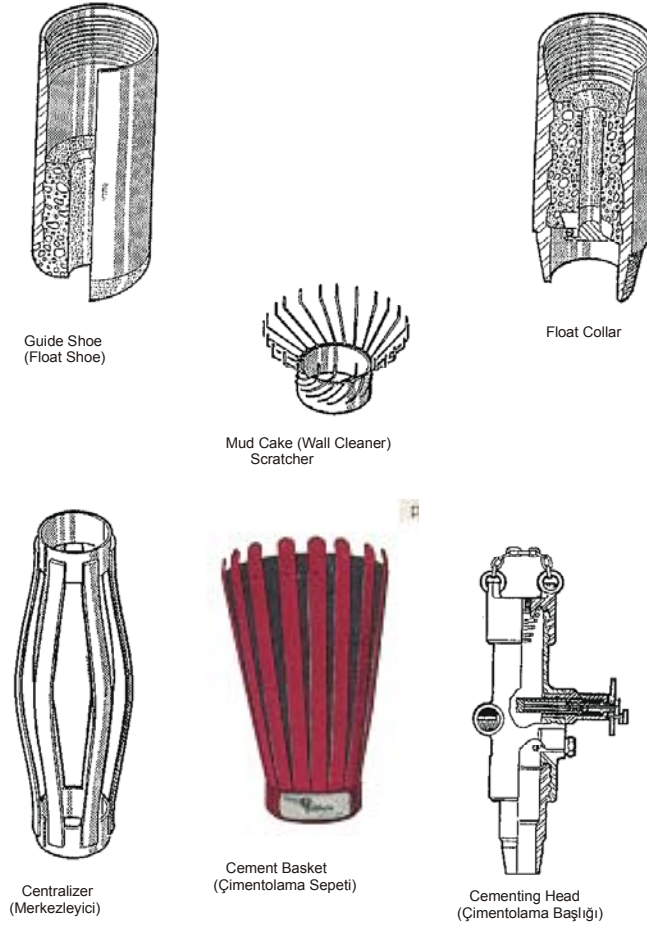
Casinglerin yapısal kontrolleri (yarık, çatlak) hassas olarak bir takım sonik ve elektromanyetik yöntemlerle yapılırken arazide diziye bağlanmadan önce gözle de kontrol edilirler. Bu kontrolde, darbe görerek göçmüş, derin çizik oluşmuş, çatlamış yerler bulunan borular, ilk etapta ayrılır. Aynı kontrol, 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 normal borulardan ayrılır.

Casingler 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.

Casingler kuyuya indirilmek üzere kuleye alındığında, koruyucu başlıklar çıkarılıp, boruların birbirine bağlanması gereklidir. Aksi halde borunun kuleye verilmesi anında dişlerde meydana gelebilecek bir hasarın kolay kolay telafisi mümkün değildir. Kuyunun derinliği, kuyuya indirilecek boruların sayısını belirler. Derinlik, delme işleminin yapıldığı sondaj takım dizisinin uzunluğu kadardır. Dizin kaç borudan oluşacağı, boylarının tek tek ölçülmesiyle ortaya çıkacaktır. Çünkü, casingler, sıcak çekme işlemiyle imal edildiklerinden boyları birbirilerinden 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 tabloya kaydedilir. Ayrıca, borunun üzerine ölçülen uzaklık, boya ile yazılır.

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

Bunların başlıcaları, float shoe (guide shoe) (klavuz uç), float collar (yüzer yaka), alt üst tapalar, centralizerler (merkezleyici), scratcher (wall cleaner) (sıva kazıyıcı), cementing basket (çimentolama sepeti), kademeli çimentolama yapılıcaksa 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.

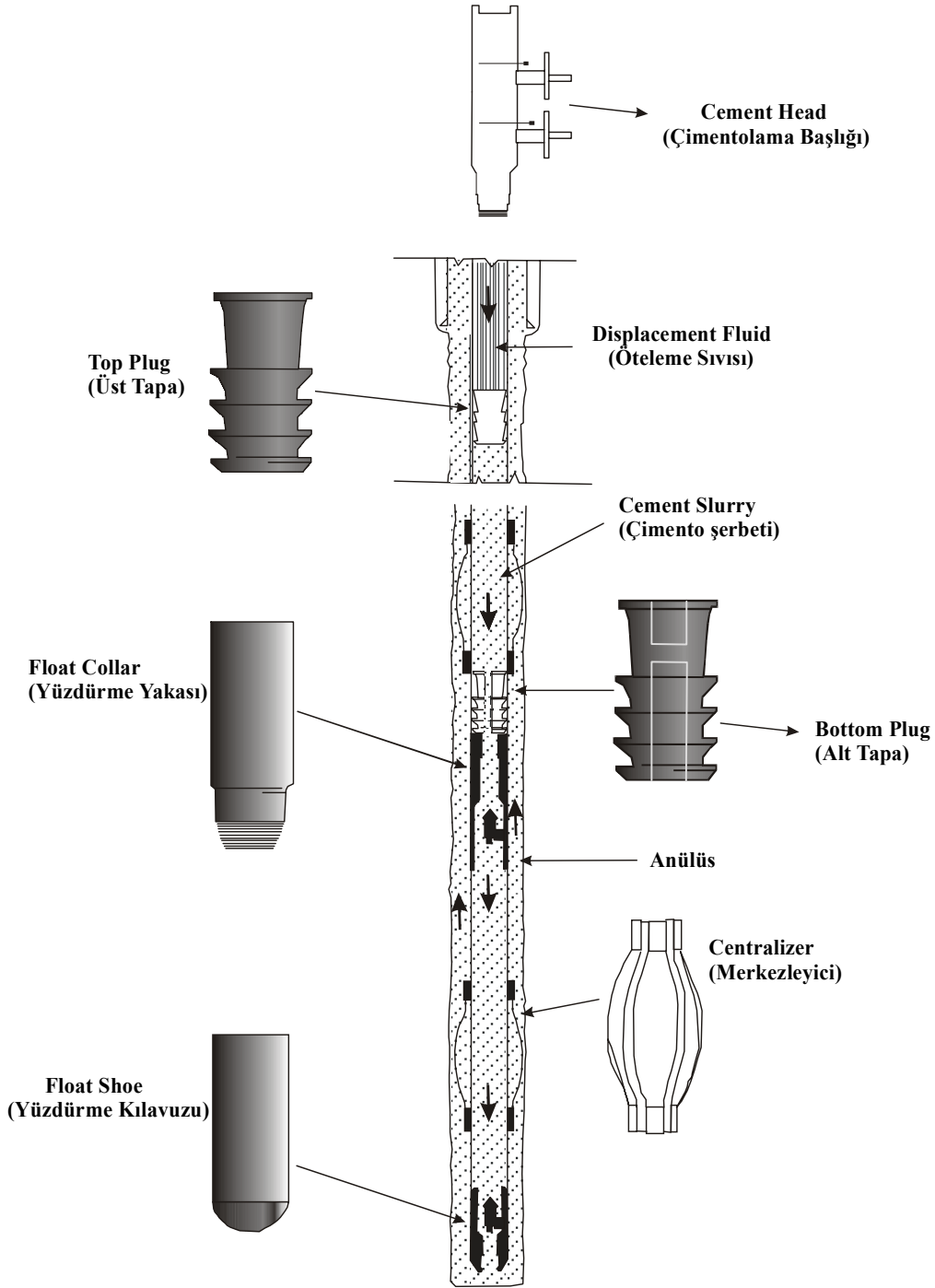


**Şekil 44.** Casing aksesuarları

Float shoe (guide shoe), en alttaki borunun ucuna takılan ve borunun kuyu içinde takılmadan inmesini sağlayan alettir. Klavuz uç olarakta isimlendirilen bu ekipmanın Float shoe cinsinin içinde, geri basıncı üzerinde tutan bilya veya check-valf vardır. Bilya, çimento basımı sırasında, çimentonun boru ve kendi içinden geçmesine müsaade eder, ancak, anülüse çıkan şerbetin, geri boru içine dolmasına müsaade etmez. 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 bilya 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 seviyeye kadar ötelenmesini sağlar. Kauçuk, alüminyum döküm veya plastikten yapılırlar. Çimentolamadan sonra sondaj devam edeceği zaman matkap tarafından kolayca parçalanırlar. Dizi içinde çamuru veya çimentoyu sıyracak yüzeyleri vardır. Yüzeyleri 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 45.** Kuyuyuçi Casing Aksesuarları

Üst tapanı ötelemek için pompalanan su veya çamur, basıncı yükseltir. Basıncı belirli bir değere (Örğ : 40-50 kg/cm<sup>2</sup>) eriştiğinde, alt tapanın diyaframı yırtılır ve çimento açılan bu delikten, yüzdürme (float collar) ve klavuz 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, yeryüzünde pompa basıncı manometresinde basıncın ani artması ile anlaşılır. İki tapa kullanılarak yapılan bu çimentolama tekniğine “ Perkins Çimentolama Yöntemi” veya anülüsun bir seferde çimento ile doldurulmasından dolayı “ Tek kademeli çimentolama” denir.

Jeotermal kuyularda zaman zaman görülen bir diğer uygulama, ağaç tapa kullanımınıdır. 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. Şekil 47’de, çamur kekinin yeterince sıyrılmamasından dolayı oluşan kirlenme görülmektedir.

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.

Casing dizisine kaç adet merkezleyici takılacağını belirleyen en önemli faktör, kuyu delinirken meydana gelen sapma derecesidir. Esas olan, kuyudaki sapma açısının mümkün olduğu kadar düşük olmasını sağlamaktır.

Bunun için, sondaj sırasında matkaba verilen ağırlık, dizinin dönme hızı ve stabilizasyon ekipmanlarının gerektiği gibi kullanılması gereklidir.

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) tipte dayanıklı susta veya yaylardan yapılması gereklidir. Boru üzerinde casingin istenen seviyede durmasını sağlamak üzere, yine boruların üzerine ve casingin alt ve üstünde yer alacak şekilde, casing sabitleyiciler (stop ring) konur.

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

Derin kuyu çimentolamalarında kullanılan ekipmanların bir tanesi de Cement basket (Çimentolama sepeti) olup; çimentolama sırasında çimento şerbetinin kaçabileceği zayıf zonların üzerine gelecek seviyeye, casingin üstüne konur. Cement basket, üstünde bulunan çimento sütununun hidrostatik basıncını taşıdığından, alt tarafından bulunan zayıf zonun, çimento sütununca yırtılmasını önler.

Derin kuyularda kullanılan bir diğer çimentolama uygulaması, kademeli çimentolamadır. Kademeli çimentolamada amaç, derinlikten dolayı çimento hidrostatik basıncının kuyu dibinde yaratacağı aşırı basıncın önlenmesi, çok uzun olan 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 casinge bağlanır.

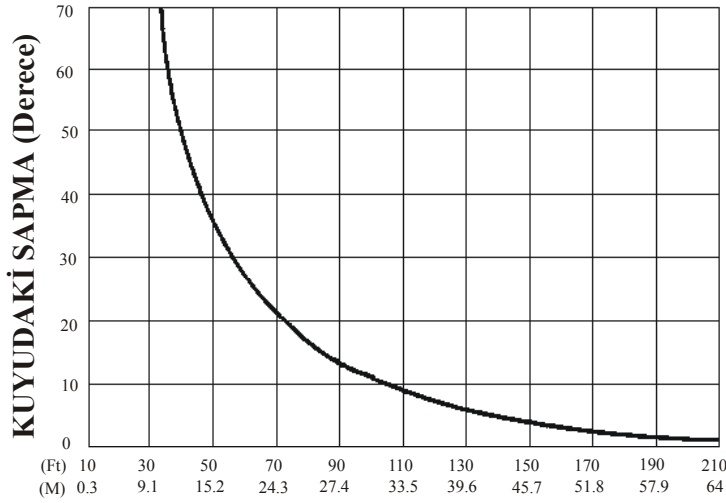
Yaklaşık 10 yıl kadar önce, çimento karışımları bir jet hopper sisteminden geçirilerek hazırlanıyordu bu düzende kuru çimento, hopper içine üstten dökülürken, alttan basınçlı su verilerek oluşturulan karışım, karışım tankına, buradanda çimentolama aracı vasıtası ile kuyuya basılıyordu. Bu tip çimentolamanın mahsurlu yönü, tüm çimento karışımının homojen olarak hazırlanamaması ve kuyuya zaman zaman çok sulu, zaman zaman çok yoğun çimentonun basılması olmuştur. Öte yandan toz çimento yetiştirilemeyip kuyuya sadece suyun basıldığı zamanlar olmakta, bu su zonu, iki casing

arasına yerleştğinde, üretim sırasında yüksek sıcaklıktan dolayı genişerek, içteki casingin 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.

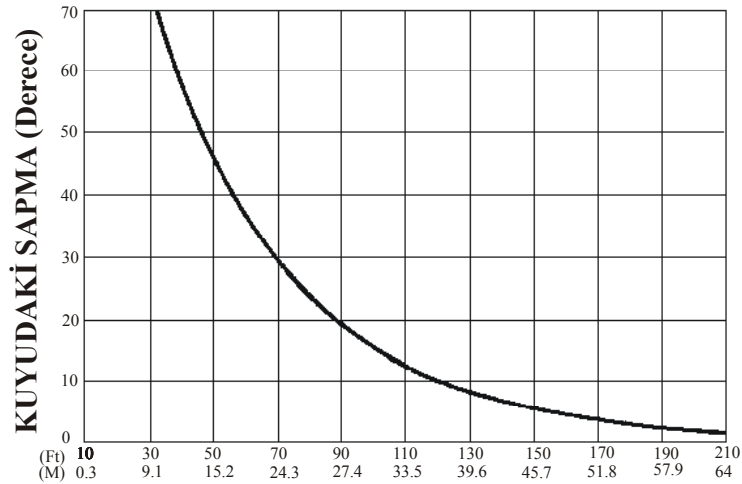
Çimentolama araçları, genellikle yüksek basınçta çalışabilen triplex pompa, su tankı, jet karıştırıcı gibi donanımlara sahiptir.

### 13 <sup>3/8</sup>" Centralizer - 17 <sup>1/2</sup>" Kuyu



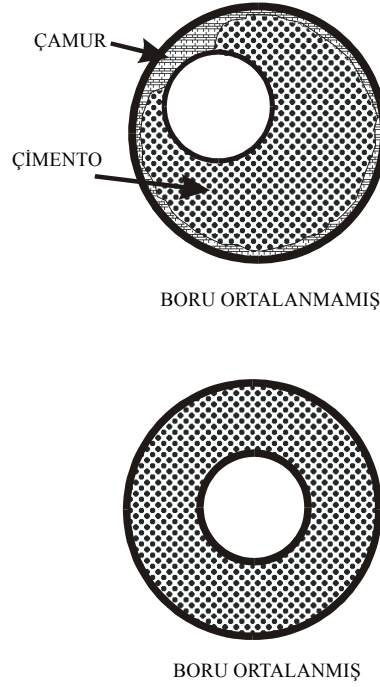
MAKSİMUM CENTRALİZER ARALIĞI

### 9 <sup>5/8</sup>" Centralizer - 12 <sup>1/4</sup>" Kuyu



MAKSİMUM CENTRALİZER ARALIĞI

Şekil 46. Kuyu içi centralizer aralığı



**Şekil 47.** 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 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 gerekirse, 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 takdirde, 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 süratten daha yavaş olmalıdır.

Boru inişi sırasında, boru üzerine takılacak centralizer ve stracher gibi malzemeler, boru kulede iken takılırlar. Boruların kulede ilk sıkılması işleminde, kendiri özlü halat kullanılır. Halat ile yeterli sıkma yapıldıktan sonra tong anahtarları ile istenen torg'a 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 sıyırdığı 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 ( $C_3S$ )  
 Dikalsiyum Silikat ( $C_2S$ )  
 Trikalsiyum Alüminat ( $C_3A$ )  
 Tetrakalsiyum Alüminaferrit ( $C_4AF$ )

**Tablo 12.** API çimento çeşitleri

Çimento Cinsi	Bileşimi (%)			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
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 Trikalsiyum Alüminatın toplamı % 24 den az olmalıdır. (Tablo 12)



Sondajcılıkta en çok kullanılan çimento türü "Portlant Çimento" dur.İnilecek derinliğe ve kuyuda karşılaşılabilecek koşullara uygun değişik türleri vardır.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 13.** 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
D	1800-3050	27-127
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 etken) 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/cm<sup>3</sup>"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 tapa 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/cm<sup>3</sup>, hematit yoğunluğu : 5,02 gr/cm<sup>3</sup>, ilmenit yoğunluğu :4,6 gr/cm<sup>3</sup> )

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 m<sup>3</sup> soğuk su, basınç farkından dolayı kazıma görevi gördüğünden ayrıca kuyu içinde soğutma işlevini yerini getirdiğinden sıkça kullanılan bir uygulamadır.

Çamur pastası yanısıra, 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 laminedir.Boru delik yüzeyine yapışmış duruyorsa akış yoktur ve boru ile formasyon arasındaki çamur, çimento tarafından ötelenemez.

Kuyuda bulunan çamurun vizkozitesi 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 vizkozite 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 ortaya çıkarmaya yarar.

### 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/cm<sup>3</sup>, silica unu yoğunluğu : 2,85 gr/cm<sup>3</sup>)

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

Geciktirici kullanımının az ya da çok kullanılmasının pratikte görülen bir takım mahsurları vardır.Az kullanılması halinde, çimento şerbeti kuyu dibine ulaştığında yüksek sıcaklıkla karşılaşarak aniden prizlenmeye başlamakta ve anülüs tam doldurulamadan 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/cm<sup>3</sup> yoğunlukta olması gereklidir. (suyun yoğunluğu : 1 gr/cm<sup>3</sup>)

Çimento şerbetinin (karışımdaki) malzeme miktarı hesabı :

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

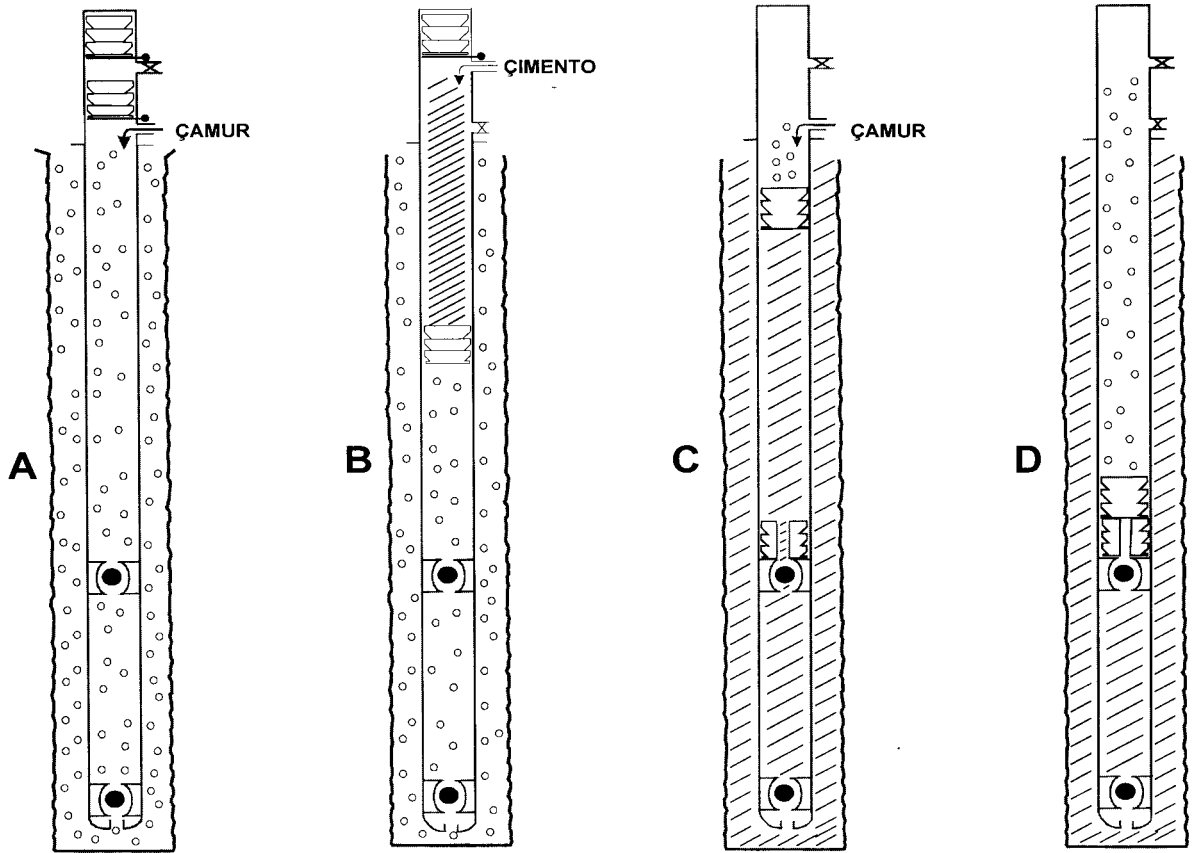
Klasik çimentolamada "Perkins metodu" (tek kademeli çimento), operasyon kademeleri Şekil 48'de gösterilmiştir.

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.

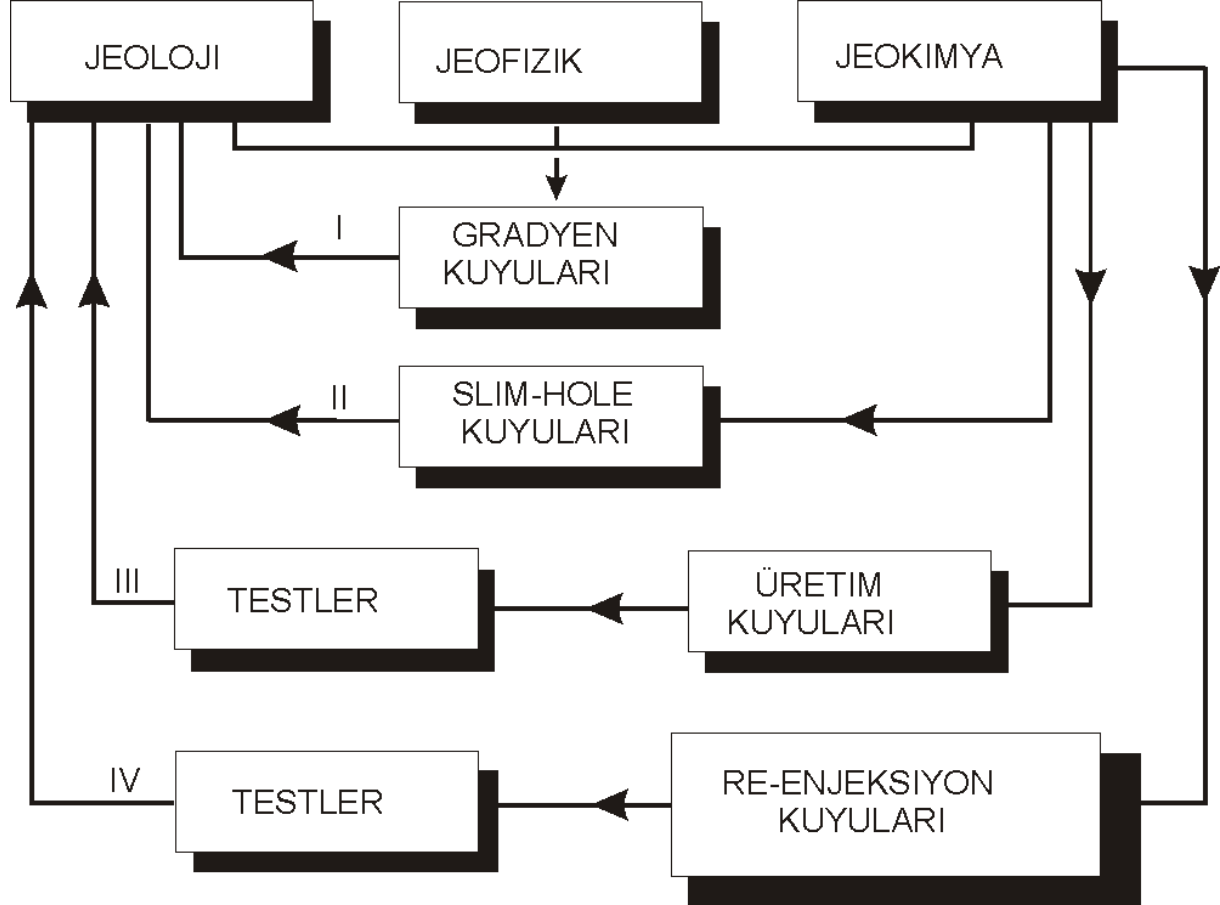
(D) de, öteleme sıvısı basımı sırasında, float collar üzerine oturan alt tapanın, diyaframı basma basıncı ile patlatılmış ve çimento şerbeti, boruların içinden geçerek kuyu ve boru arasındaki boşluktan (anülüs) yükselmeye başlamıştır. Üst tapa, alt tapanın üstüne oturunca, pompa basma basıncı yükseldiği 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 48. 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, elde edilen önceden edinilmiş bilgilerin yeniden değerlendirilmesi ve bir sonraki aşamaya, elde edilmiş bu yeni veriler ışığında geçilmesidir.



Şekil 49. Jeotermal proje disiplinleri

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

Tüm bu çalışmaların birlikte değerlendirilmesi sonucu, yeraltı sıcaklık gradyanını tespit etmeye yönelik, sığ derinlikte ve dar çaplı gradyen kuyuları açılır. Bu kuyulardan alınan sıcaklık ölçümüne göre yeraltı sıcaklık gradyanı ( $^{\circ}\text{C}/10\text{m}$ ) ve sıcaklık dağılım haritaları çıkarılarak, sahada muhtemel jeotermal kaynağın tespitine yönelik, derin ve dar çaplı (Slim-hole) kuyuları 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 hayati bilgilere ulaşılır. Slim-hole kuyuları sonrası mevcut jeoloji, jeofizik ve jeokimyasal verilere, test sonuçlarının ilavesiyle, üretim kuyu yerleri ve sayısı tespit edilir. Rezervuar koşulları daha net bilinebildiğinden, kuyu delme ve teçhiz planlamaları daha emniyetli ve doğru yapılacaktır.

Sahada açılmaya başlanan her üretim kuyusunun testleri, rezervuar ve akışkan parametrelerini daha çok belirginleştirecektir. Slim-hole ve üretim kuyularından sonra yapılan testlere, ek olarak yapılması gereken interference (girişim) testleri ile (diğer verilerde dikkate alınarak) diğer üretim ve re-enjeksiyon kuyu yerleri saptanır.

Jeotermal sistemler beslenme ve üretim (explotation) çevrimi içinde dönen dinamik sistemler olduğundan sahada potansiyel çalışmaları için sürdürülen test operasyonları, işletme aşamasında da devam eder. Yani işletme süresince, sistemde oluşan değişiklikler, yakinen takip edilerek rezervuar davranışları gözlenir ve gerekli önlemler alınır.

Slim-hole kuyularından başlayarak, üretim ve re-enjeksiyon kuyularının açılmasından sonra yapılacak testlerin, sahada ileri aşamalarda yapılacak test sonuçları ve planlamalar üzerinde çok büyük önemi vardır. Kuyu bitiminde, bakir rezervuar şartlarında yapılan testler, ileri aşamalarda yapılan test sonuçlarının yorumlanmasında baz oluşturacağından ve kuyu bitiminden hemen sonra yapılmazsa bir daha bu verilere ulaşılamayacağından, mutlaka tüm detayları ile yapılmalıdır.

Reenjeksiyon çeşitli nedenler dolayısıyla yapılır. Bunlar:

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

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

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

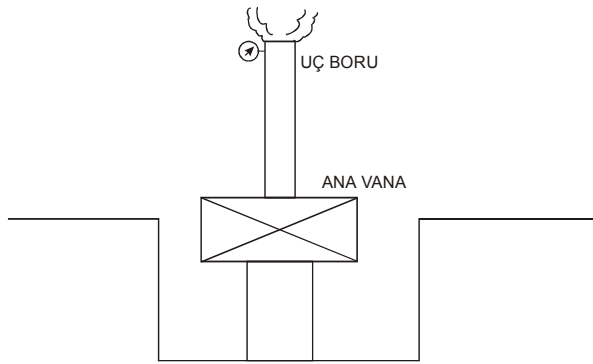
Üretim kuyularının teçhizi, rezervuardan üretilecek akışkanın sıcaklık, basınç, debi gibi özellikleri dikkate alınarak yapıldığı gibi, re-enjeksiyon kuyularının teçhizi de rezervuar derinliği, rezervuara basılacak akışkanın debisi, sıcaklığı ve basıncı gibi faktörler gözönüne alınarak yapılır.

Re-enjeksiyon kuyu yeri seçimini en önemli faktörlerden 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 durumun bazı jeotermal sahalarda görülen örnekleri vardır.

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

Üretim kuyuları bitirildikten sonra sıcaklık, basınç, kuyudaki ana üretim zonu veya zonlarının tespiti, permeabilite (geçirgenlik), porozite (gözeneklilik) gibi rezervuar kayacın özelliklerini belirlemeye yönelik bir dizi test işlemi yapılır.

Öncelikle sondaj tamamlandıktan sonra, kuyuda konveksiyon ısı akışı başlamadan önce yüzeyden tabana sıcaklık ölçüsü alınır. Ölçü bitiminde kuyu tahrik edilerek üretime geçirilir. Yüksek sıcaklık ve basınç içeren rezervuarlara rastlanan kuyularda, kuyunun üretime geçirilmesi için kuyu içindeki hidrostatik basıncın düşürülmesi yeterli olmaktadır. Aksi halde kompresör ile kuyuya hava basılarak kuyu içindeki hidrostatik basınç yaratan sondaj sıvısı tamamen atılır ve rezervuar akışkanının kuyu içine hareketi sağlanır. Bu üretimde esas amaç, kuyunun temizlenmesi ve ilk üretim değerlerinin görülmesidir. Üretime ait tüm değerler (Kuyubaşı basıncı, debi) mutlaka kaydedilmelidir. Sondaj makinası kuyubaşında iken yapılan bu üretim düzeneği basit olup, kuyubaşı vanasına bağlanan bir dik boru veya yatay boru vasıtasıyla yaptırılır. Hesaplanması James Russell (Yeni Zelanda) tarafından formüle edilen bu üretim metoduna uç basınç yöntemi olarak anılır (Lip Pressure Method). Bu metoda göre üretim hesabı:



Şekil 50. Uç basınç yöntemiyle üretim

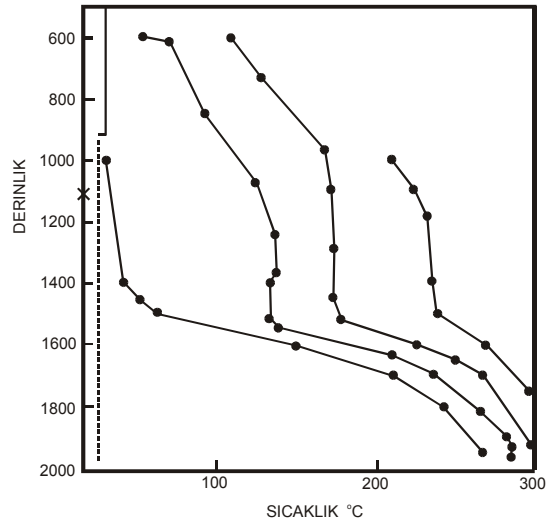
$$G = \frac{1765000 \times A \times P_c^{0.96}}{h^{1.102}}$$

Formülüne göre yapılır. Burada A : Uç boru iç alanı (m<sup>2</sup>), P<sub>c</sub> : Uç basıncı (bar.a), h : Akış entalpisi (Kj/kg) ve G : Toplam akışkan (Kg/san) dir. Entalpi değeri kuyudan daha sonra alınan sıcaklık değerine göre (rezervuar seviyesindeki değer) buhar tablosundan bulunur.

Ancak en fazla 1-2 gün süren bu üretim değerleri kesinlikle kuyunun kalıcı sabit değerleri olarak düşünülmemelidir. Çünkü uzun süreli üretimde rezervuarda basınç ve sıcaklık düşümü, kabuklaşma başlaması gibi birtakım nedenlerle çeşitli dönemler gözlenecektir.

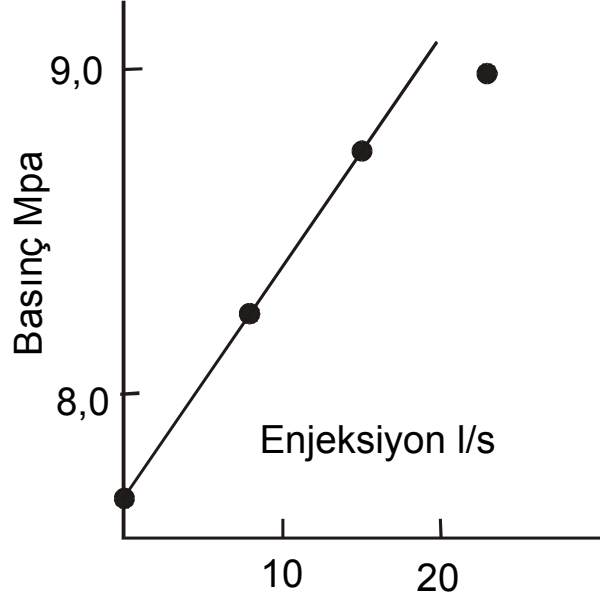
Kuyu, yapılan bu ilk üretimden sonra kapatılarak kuyu içi sıcaklık ve basıncın stabil hale gelmesi beklenir. Stabiliteye ulaşıldıktan sonra ilk statik sıcaklık ve basınç ölçüleri alınır (Kuyu kapalı iken).

Statik ölçülerin bitiminde kuyudaki beslenme zonlarını tespit etmeye yönelik olarak su kaybı (water loss) testi uygulanır. Sondaj sırasında meydana gelen çamur kaçağından hareketle bu zon veya zonların tespiti güç ve yanıltıcı olabilmektedir. Çünkü çamur kaçağının tek noktada mı yoksa matkabın ilerlediği zon boyunca mı olduğu zaman tam olarak kestirilememektedir. Bu testte, kuyuya soğuk su basılarak kuyu içi soğutulur, su basma kesildiğinde permeable (geçirgen) zon veya zonlardan tekrar kuyu içine sıcaklık akışı başlayacağından kuyuda ısınma (warm up) oluşur. Bu zonlar tespit edilerek daha sonraki aşamalarda yapılacak rezervuar testlerinde, bu seviyelerden ölçümler yapılır. Şekil 51'de gösterilen örnekte kuyu içinde beslenme zonunun 1100-1500 metreler arasında olduğu kolayca söylenebilir. Değişik kuyu içi şartlarında ısınma sırasında meydana gelen farklı tip



Şekil 51. Su kaybı testi

profiller ve bunlar vasıtasıyla permeabil (geçirgen) zonların teşhisi Şekil 53'de verilmiştir. Aynı şekilde sıcaklık profili yanısıra basınç profillerinde ısınma ile birlikte ne şekilde değiştiği görülmektedir. Permeabilite birimi **Darcy**'dir ( $1 \text{ darcy} = 10^{-12} \text{ m}^2$ ).



Şekil 52. Çok debili enjeksiyon testi

Su kaybı testinden sonra yapılan tek debili basit enjeksiyon testi yardımıyla permeabilite-kalınlık ( $kh$ , transmissivity) değeri tespit edilir. İletkenlik olarak Türkçeye çevirebileceğimiz bu değer birimi darcy-metre veya darcy-foot'tir. Çok küçük değerler söz konusu ise darcy'nin binde biri olan milidarcy birimi de kullanılır.

Enjeksiyon ardından yapılan enjektivite testlerinde (çok debili enjeksiyon testi), kuyuya değişik debilerde (Örg. 10,20,30,40 lt/sn) soğuk su basılarak permeable zonun suyu bünyesine alma kapasitesi tespit edilir. Bu test sonucu elde edilen değere "enjektivite endeksi" denir. Üretim aşamalarında zaman zaman tekrarlanan bu testle, rezervuar geçirgenliğinin üretime ne derece etkilendiği izlenir.

Enjektivite endeksi :

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

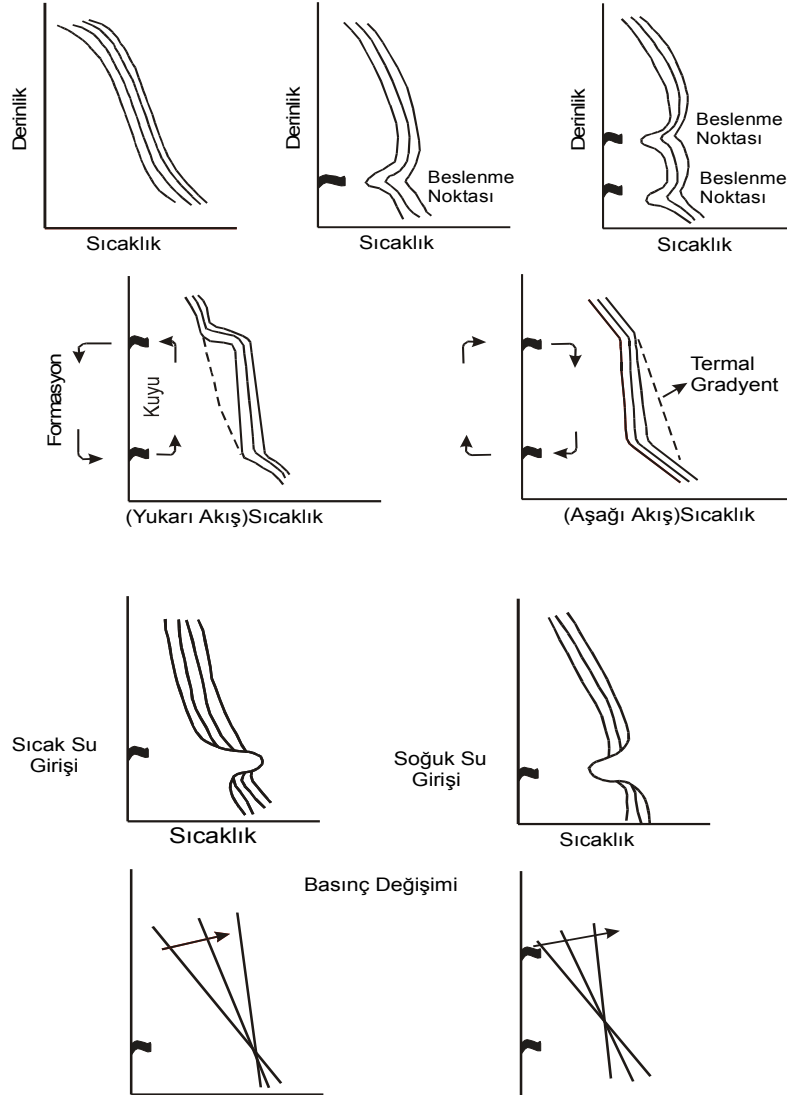
Formülüyle hesaplanır. Formülde  $I$  : Enjektivite endeksi ( $\text{lt/san/Kg/cm}^2$  veya  $\text{Kg/san/Mpa}$ ),  $Q$  : Kuyuya basılan akışkanın debisi ( $\text{lt/san.}$ ),  $P_i$  : rezervuar basıncı ( $\text{Kg/cm}^2$ ) ve  $P_{wf}$  : rezervuar derinliğinde beslenme noktası basıncı ( $\text{Kg/cm}^2$ ).

Jeotermal bir kuyuda elde edilen tüm bu değerler, rezervuar ve kuyuya ait ilk bakir değerler olduğundan, kuyu bitimi mutlaka elde edilmelidir. Çünkü üretimle beraber oluşan fiziksel ve kimyasal değişimler nedeniyle bu verilere tekrar ulaşmak mümkün değildir. Öte yandan üretimin ileri aşamalarında bu testler tekrar edildiğinde rezervuar ve kuyunun üretime ne şekilde tepki verdiğini yorumlamak çok rahat olacaktır.



## 10. JEOTERMAL ÜRETİM VE REENJEKSİYON SONDAJLARININ KRİTİKLERİ

- Jeotermal sondajlar, diğer araştırma disiplinlerinin (jeoloji, jeofizik, jeokimya....vb), olmazsa olmaz son adımıdır,
- Jeotermal sondajlar, başta jeoloji olmak üzere diğer araştırma metodlarına göre bilinmeyenleri (muhtemel veya mümkün olasılıkları) netleştiren bölümdür.
- Jeotermal üretim ve reenjeksiyon sondajları, arama ve araştırma disiplinlerinin en pahalısıdır,
- Diğer jeotermal araştırma metodlarında çevre kirliliğine sebep olunmazken, sondajlar sırasında dikkatli olunmazsa gerek yerüstü, gerekse yeraltında büyük kirliliklere sebep olunabilir.
- Özellikle yer altı tatlı su kaynaklarının kirletilmesi, büyük çevresel kirliliklere sebep olabilir,
- Jeotermal üretim ve reenjeksiyon sondajları sırasında yapılacak hata ve yanlışlıkların çoğunun geri dönüşü yani telafisi mümkün değildir.
- Sondajların, özellikle rezervuar seviyesindeki operasyonları, 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 tecrübeli olması gereklidir.
- Jeotermal sondajların sonunda, mutlaka kuyu tamamlama testleri yapılmalıdır. Çünkü kuyu üretime alındıktan sonra bu bakir değerlerin elde edilmesi mümkün değildir.



**Şekil 53.** Su kaybı testinde, ısınma sırasında meydana gelen profillerden permeable zonların teşhisi

## KAYNAKLAR

- [1] ADAMS,NEAL J.,"DrillingEngineering, 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",Mır 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-Aliağa jeotermal sahası sondaj çalışmaları, Manisa-Salihli-Kurşunlu sahası jeotermal sondaj çalışmaları, Aydın-Bozköy jeotermal sahası, Aydın-İmamköy jeotermal sahası sondajlarında kamp şefi olarak çalışmıştır1990-1992 yılları arasında MTA Ege Bölge Müdür Yardımcılığı görevini yürüttükten sonra halen, jeotermal sondaj ve testler konusunda çalışmalara devam etmektedir.

### 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 sondaj mühendisi ve kamp şefi olarak petrol ve jeotermal sondajlarında çalışmıştır. 1988 yılından itibaren DSİ 2 Bölge Müdürlüğü'nde (İzmir) Barajlar, sonra Yeraltısuları Şube Müdürlüklerinde çalışmıştır. Şu anda, aynı kuruluştaki Etüd ve Plan Şube Müdürlüğü'nde çalışmaktadır.