

## DERİN JEOTERMAL SONDAJLARDA KUYU TASARIMI VE SONDAJ MAKİNELERİ İÇİN TAKIM DİZİSİ SEÇİMİ

Bülent TOKA\*

### GİRİŞ

Jeotermal sondaj tasarımı ülkeden ülkeye değişiklik gösterirken kuyu dizaynının belirlenmesinde rezervuar derinliği, üretim borusu çapı, rezervuar akışkan tipi ve özellikleri, jeolojik ve tektonik yapı büyük önem arz eder.

Jeotermal sondajlarda; jeotermal rezervuarın derinliği ve kuyu çapına uygun makine ve pompa seçiminin yanında makine ve pompanın kapasitesine uygun takım dizisinin seçimi de önem kazanır. Jeotermal sondajlarda makine ve pompa gücünün belirlenmesine yönelik çalışma 2. TMMOB Jeotermal Kongresi'nde Toka ve Özbayoğlu (2009) tarafından yayımlanmıştır.

Toka (2011), 2000 metrenin üstündeki sondajları derin sondaj olarak adlandırmış ve bu çalışmada sığ sondajlar için takım dizisi seçimi anlatılmıştır. Bu çalışmada da derin sondajlarda kuyu dizaynı ve sondaj makineleri için takım dizisinin seçiminin önemi üzerinde durulmuştur.

### DERİN SONDAJLAR İÇİN KORUMA BORULARININ DİZAYNI

Sondaj operasyonu ve yer altından akışkan üretimi sırasında rezervuar üzerin-

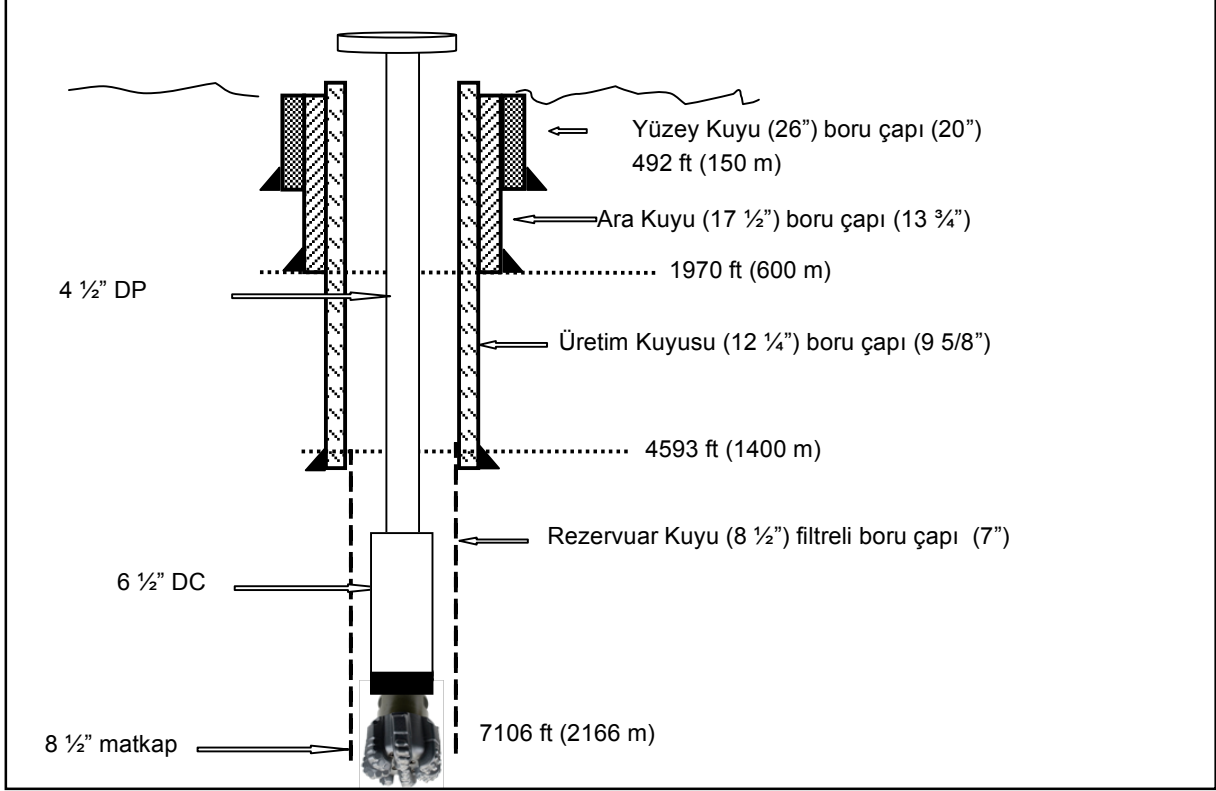
deki örtü tabakaları (zayıf, çatlaklı, gevşek ve şişen formasyonlar) kontrol altına alınmadığında kuyu problemlerine neden olur. Sondajın istenilen çapta ve derinlikte olması ve problemsiz akışkan üretimi için bu tür sorunlu formasyonların muhafaza boruları ile kontrol altına alınması gerekir. Kuyunun başlangıcında geniş çaplı muhafaza boruları kullanılırken kuyu derinleştikçe muhafaza borusunun çapları kademe kademe küçülür. Kapalı koruma boruları belirlenen derinliğe indirildikten sonra, borunun indirildiği derinlikten itibaren yüzeye kadar boru arkası çimentolanır.

Jeotermal kuyularda tercih edilen koruma borusu çapları, kuyu derinliğine ve akışkanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak ülkeden ülkeye değişiklik gösterir. Ülkemizde derin sondajlar için sıklıkla kullanılan kuyu dizaynı şekil 1'de gösterilmiştir.

### Kılavuz boru

Jeotermal kuyuların koruma borusu dizaynında, kuyu başlangıcında kullanılan en dıştaki ilk boru kılavuz (Conductor) boru olarak adlandırılır. Bu boru, yüzeyde sağlam olmayan jeolojik tabaka (formasyon) oluşumlarının (alüvyon, kumtaşı, çakıltaşı gibi) ilerleme sırasında kuyu içerisine akmasını, dökülmesini ve parça düşmesini önlemek amacıyla kullanılır. Kılavuz boru, üst tabanın altında biraz daha pekişmiş halde bulunan formasyonun (kil, marn, silt, şeyl gibi) içerisinde kalacak şekilde indirilir ve boru arkası tamamen çimentolanır.

\* Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Sondaj Dairesi, Ankara



Şekil 1- Derin jeotermal sondajlar için örnek kuyu dizaynı

Kılavuz borunun kullanılmasındaki en önemli nedenler; (i) sondajın ilerleme aşamalarında kullanılacak koruma borularının ve bu borudan sonraki kullanılacak boru üzerine yerleştirilen kuyubaşı ekipmanların (vana, preventer) desteklenmesine olanak sağlar, (ii) bu borudan sonra yapılan ilerleme sırasında ortaya çıkacak kuyu problemlerinin (takım dizisinin kopması gibi) daha kolay bir şekilde çözülmesine olanak sağlar, (iii) sondaj çamurunun içerdiği kimyasal maddelerin yüzey akiferlerine sızmasını ve dolayısıyla tatlı suyu kirletmesini önler ve bu yüzden bazı ülkelerde bu borunun kullanılması yasalarla zorunlu tutulur (iv) yüzeğe yakın kısımlarda gaz veya jeotermal akışkan varsa akış-

kanın kılavuz boru içerisinden akışı sağlar ve sondaj makinesinin zarar görmesini engeller (v) bu borudan sonra kullanılan boruların korozyonunu önler.

Kılavuz borunun teçhiz edilmesi ve boru arkasının çimentolanması sonrası, ilerleme sırasında akışkanın kontrolsüz gelişmesi durumunda kılavuz boru açık tutulur. Yani kuyu başında preventer ve vana varsa kuyuyu kontrol altına almak için bu vanalar kapatılmaz. Çünkü akışkanın akış gücünü karşılamak için kılavuz boru yeteri kadar derinliğe indirilmez. Vana ve preventerin kapatılması durumunda boru arkasında pekişme-

miş halde bulunan alüvyon, çakıltaşı gibi formasyonlar basınçlı akışkan tarafından yırtılır ve akışkanın boru arkasından geliş yapması sonucu sondaj makinesinin zarar görmesi kaçınılmaz olur. Kılavuz borular 500 ft (150 m) derinliğe kadar indirilir ve boru çapları ise derin sondajlarda 20 inç olur.

### Yüzey (Çapa) boru

Yüzey boru, alüvyonlarının altında bulunan kil, marn, silt, şeyl gibi formasyonları kontrol altına almak için kullanılır. Bu formasyonların altında bulunan daha sert formasyonlara (örneğin sağlam kireçtaşları) indirilerek boru arkası yüzeye kadar çimentolanır. Yüzey borusunun teçhiz edilmesinin ana amaçları; (i) ana vana ve kuyu kontrol preventeri (BOP) gibi kuyu başı ekipmanlarının montajını gerçekleştirir, (ii) pekişmemiş ve akışkan içeren formasyonların daha derinlerdeki akışkan ile irtibatını önler ve ilerleme sırasında bu formasyonların şişerek veya kuyu içerisine akarak ilerleme problemi yaratmasını önler (iii) kılavuz borunun amacına benzer bir şekilde bu borudan sonra kullanılan üretim borusunu korozyona karşı korur.

Yüzey boru ile bundan sonra kullanılacak üretim boru arasında bulunan kireçtaşı dolomit gibi formasyonlar basınçlı akışkan içerdiğinden mutlak suretle kuyu başı ekipmanları (vana ve BOP) bu boruya eklenir. Hidrotermal sondajlarda bu borudan sonra teknik nedenlerle ara bir boru kullanmak zorunda kalınması, üretim borusunun çapını düşüreceğinden bu borunun indirileceği derinlik önem taşır. Derin sondajlarda yüzey borunun indirildiği derinlik birkaç yüz metre-

den 3300 ft (1000 m) derinliğe kadar değişir ve yüzey boru olarak 13 ¾ inç çapında kapalı borular kullanılır.

### Ara boru

Ara boru yüzey borusu ile üretim borusu arasında kullanılır. Bu borunun kullanılmasının en önemli amacı, istenilen derinliğe ulaşmak için karşılaşılan sorunlu formasyonları kontrol altına almaktır. Yüzey borudan sonra ilerleme sırasında karşılaşılan çok yüksek formasyon basıncı, önlenemeyen sondaj çamuru kayıpları, şişen ve kuyu içerisine sürekli akan killer veya şeyller ve tuz zonları matkabin ilerlemesini olanaksız kılar. Bu durumda kaçınılmaz olarak ara boru kullanılması zorunlu olur.

Jeotermal sondajlarda ara boru pek kullanılmaz. Fakat kuyu problemleri nedeniyle kullanılmak zorunda kalırsa 9 5/8 inçlik boru ara boru olarak kullanılacağından üretim borusunun çapı 7 inç kadar düşer.

### Üretim borusu

Üretim borusu, rezervuarın (üretim zonu) üst kısmına indirilerek boru arkası çimentolanır. Genellikle rezervuar basıncına dayanacak şekilde dizayn edilirler.

Derin hidrotermal sistemlerde ülkemizde üretim borusu olarak genellikle 9 5/8 inç koruma boruları kullanılır.

### Astar boru (Liner)

Astar boru yüzeye kadar yükselmez, üretim borusunun içerisinde derin sondajlarda 20-30 metre yükselecek şekilde kuyu dibine bırakılır. Akışkan üretim zonu yıkıntı yapma özelliğine sahipse bu boru kullanılır. Şayet üretim zonu sağlam ise üretim zonuna

boru indirilmez ve kuyu çıplak olarak bırakılır. Astar boru olarak 6 5/8 inçlik filitreli borular kullanılır.

### DERİN JEOTERMAL SONDAJ MAKİNELERİ İÇİN TAKIM DİZİSİNİN SEÇİMİ

Derin sondaj makineleri için takım dizisi seçiminde kuyu çapı, motor gücü, kanca kapasitesi ve pompa gücü dikkate alınır. Bu nedenle seçilecek takım dizisinin, jeotermal sondajlara uygun olması için makinenin kule çekme kapasitesi ve motor gücü-drawworks gücü birbirine uyumlu olmalıdır.

Seçilecek takım dizisinin (DC, DP) dış çapının matkap çapına uygun olmasının yanında boru gövdesi gerilme mukavemet değerleri, takım ağırlığının 50.000 – 100.000 lb üstünde olması gerekir. Bu değerler çekme toleransı (MOP) olarak adlandırılır (Rabia, 1985). Takım dizisi içerisinde ilave 50.000 lb ekstra güç verecek jar yok ise bu değer 100.000 lb olarak alınır (Azar ve Samuel, 2007). Çünkü derin jeotermal kuyularda for-

masyondan veya sondaj çamurundan kaynaklanan problemlerden dolayı kuyularda takım sıkışma problemleri sıklıkla yaşanır. Takım dizisini kurtarmak için takım ağırlığının üzerinde bir yükü çekmek zorunda kalınabilir.

Genellikle üretim zonlarının sondajı 8 ½” matkap ile tamamlanan kuyularda matkap üzerine takım dizisi olarak 6 ¼ inç veya 6 ½ inç DC (ağırlık borusu) ve 4 ½ inç DP (tij)ler bağlanır.

Çizelge 1, 2 ve 3’ te sondajlarda kullanılan API standartlarına uygun yeni ve kullanılmış DP’lerin ve DC’lerin özellikleri verilmiştir. DP’ler sondaj çalışmalarında çizelge-lerde verilen teorik gerilme akma mukavemeti (tensile yield-strength) değerlerine göre dizayn edilmezler. Tijlerde kalıcı uzamayı engellemek veya plastik deformasyonu önlemek için bu değer %90’ı alınır ve teorik gerilme değeri  $P_a = P_t * 0.90$  formülüyle hesaplanır (API RP 07G).

Çizelge 1- Yeni DP (API RP 07G, 1998) Özellikleri

Dış çap	İç çap	Ağırlık lb/ft	Min. akma direncinde gerilim verileri, lb			
			E75	X95	G105	S135
4	3,476	11,85	230 755	292 290	323 057	415 360
4	3,340	14,00	285 359	361 454	399 502	513 646
4 1/2	3,958	13,75	270 034	342 043	378 047	486 061
4 1/2	3,826	16,60	330 558	418 707	462 781	595 004
4 1/2	3,640	20,00	412 358	522 320	577 301	742 244
5	4,408	16,25	328 073	415 559	459 302	590 531

Çizelge 2- Kullanılmış DP (API RP 07G, 1998) Özellikleri

Dış çap	İç çap	Ağırlık lb/ft	Min. akma direncinde gerilim verileri, lb			
			E75	X95	G105	S135
4	3,476	11,85	182 016	230 554	254 823	327 630
4	3,340	14,00	224 182	283 963	313 854	403 527
4 1/2	3,958	13,75	213 258	270 127	298 561	383 864
4 1/2	3,826	16,60	260 165	329 542	364 231	468 297
4 1/2	3,640	20,00	329 916	409 026	452 082	581 248
5	4,408	16,25	259 155	328 263	362 817	466 479

Çizelge 3- Kullanılmış DC Ağırlıkları (API RP 07G, 1998)

DC dış çapı, OD, inç	DC ağırlıkları (lb/ft)								
	DC iç çapı, ID, inç								
	1 ½	1 ¾	2	2 ¼	2 ½	2 13/16	3	3 ¼	3 ½
6	90	88	85	83	79	75	72	68	
6 ¼	98	96	94	91	88	83	80	76	72
6 ½	107	105	102	99	96	91	89	85	80
6 ¾	116	114	111	108	105	100	98	93	89

### Derin Sondaj Makinelerinin Draw-works ve Motor Gücüne Göre DP Seçimi

Derin sondaj makineleri için takım dizisi seçerken güverte motorun gücüne göre taşıyabileceği takım dizisinin yükü göz önüne alınır. Öncelikle sondaj motorunun draw-works'a iletebileceği güç hesaplandıktan sonra draw-works'un çekebileceği maksimum takım dizisinin yükü hesaplanır. Bu takım dizisi yükünün ne kadarının matkaba verilmesi gereken yük olduğu hesaplanarak bu

yük için gerekli DC miktarı belirlenir. Buna göre de draw-works'un çekebildiği yükten toplam DC ağırlığı çıkarılarak kuyu çapına en uygun DP'ler belirlenir.

Çizelge 4'te bir sondaj makinesinin teknik özellikleri verilmiştir ve buna göre makinenin orijinal kanca kapasitesi 300.000 lb iken draw-works gücü 600 HP ve draw-works hareket veren motorun gücü 630 HP'dir.

Çizelge 4- Sondaj Makinesinin Teknik Özellikleri

Normal kanca çekme kapasitesi	300 000 lb (136 ton)
Draw-work gücü	600 HP
Motor gücü	630 HP
Halat sayısı	8
Halat çapı	1 1/8"

### Takım dizisi ağırlığının, matkap üzerine verilecek azami yükün, DC ve DP uzunluğunun hesabı

Motor gücüne uygun kancaya gelen takım dizisi yükünün, matkap üzerine verilecek yükün, DC ve DP uzunluğunun hesabı aşağıdaki formüllere göre belirlenir. Ayrıca motorun harcadığı güce göre yakıt sarfiyatı 6. formülden bulunur.

Draw-works gücü	$HP_{dw} = HP_m * E_m$	1
Draw-works gücüne göre kanca çekme yükü	$HL = \frac{HP_{dw} * EF * 33000}{V_{fi}}$ , $EF = \frac{K * (1 - K^N)}{N * (1 - K)}$	2
Matkaba verilen toplam yük	$WOB (lb) = D_m(inç) * P (lb/inç)$	3
DC uzunluğu	$L_{dc} = \frac{WOB}{NP * BF * W_{dc}}$ $BF = 1 - \frac{\rho_{çamur}}{\rho_{çelik}}$	4
DP uzunluğu	$L_{dp} = \frac{HL - (L_{dc} * W_{dc})}{W_{dp}}$	5
Yakıt harcama hızı lb/saat	$Q_f = \frac{2545 * HP_m}{H}$	6

HP <sub>dw</sub>	Draw-works gücü	HP <sub>m</sub>	Motor Gücü	BF	Yüzdürme katsayısı	ρ <sub>çamur</sub>	Çamurun yoğunluğu
E <sub>m</sub>	Mekanik verim	EF	Halat verim faktörü	çelik	Çeliğin yoğunluğu, 65,5 lb/gal	W <sub>dc</sub>	DC'nin birim ağırlığı (lb/ft)
V <sub>fi</sub>	Takım çekme hızı (ft/dk)	K	Sabit sayı, 0,9615	L <sub>dp</sub>	DP uzunluğu (ft)	HL	Maksimum kanca yükü (lb)
N	Hareketli makara halat sarım sayısı	WOB	Matkaba verilen toplam yük, lb	W <sub>dp</sub>	DP'nin birim ağırlığı (lb/ft)	Q <sub>f</sub>	Yakıt harcama hızı, (lb/saat)
D <sub>m</sub>	Matkap çapı, inç	P	Birim matkap çapı üzerine verilmemesi gereken yük miktarı	H	Yakıt ısı değeri, dizel yakıt için 19.000 BTU/lb		
L <sub>cd</sub>	DC uzunluğu (ft)	NP	Nötr nokta (güvenlik faktörü)				

**ÖRNEK 1:** Çizelge 4' te teknik özellikleri verilen sondaj makinesi ile şekil 1'de verilen kuyu dizaynına göre sondaj yapılacaktır. 8 1/2" matkaba göre çizelge 1-2-3' te teknik özellikleri verilen DP'lerle yapılabilecek maksimum kuyu derinlikleri belirleyiniz? Ayrıca DP tiplerine göre yakıt sarfiyatlarını karşılaştırınız?

Bu kuyuda dış çapı (OD) 6 1/2"- iç çapı (ID) 2 13/16" ve birim ağırlığı 91 lb/ft olan DC kullanıldığı ve çamurun yoğunluğunun 10 lb/gal (1,20 gr/cm<sup>3</sup>) olduğunu varsayalım.

**ÇÖZÜM 1:** Sondaj makinesi motorunun drawworks'a iletebileceği güç eşitlik 1'den hesaplanır.

$$HP_{dw} = 630 * 0,85 = 535,5 \text{ HP}$$

Draw-works'a (gücü; 600 HP) iletilen bu güç ile eşitlik 2'den draw-workün taşıyacağı güç 148696 lb bulunur.

$$HL = \frac{535,5 * 0,84 * 33000}{100} = 148 \ 696 \text{ lb}$$

$$(EF = \frac{0,9615 * (1 - 0,9615^8)}{4 * (1 - 0,9615)} = 0,84)$$

(Bu hesaplamada takım çekme hızı (Vf)100 ft/dak olarak alınmıştır. Takım çekme hızı düşürüldüğünde (>100 ft/dak) draw-works'un taşıyacağı kanca yükü artmaktadır. Örneğin takım çekme hızı 80 ft/dak olduğunda 185.550 lb yük taşımaktadır).

Matkap üzerine verilmesi gereken maksimum yükün 5.000 lb/inç olduğunu farz edersek 8 1/2 inç matkap üzerine verilmesi gereken toplam yük 3. eşitlikten;

$$WOB = 8 \ 1/2 \text{ inç} * 5.000 \text{ lb/inç}$$

$$WOB = 42. \ 500 \text{ lb}$$

olarak bulunur.

Bu durumda 6 1/2 inç DC için gerekli olan DC uzunluğu 2. eşitlikten

$$L_{dc} = \frac{42.500}{0.85 * 0.847 * 91} = 648 \text{ ft} \approx 660 \text{ ft}$$

olarak hesaplanır.

(Burada NP= Nötr nokta (güvenlik faktörü). Matkap üzerindeki DC'lerin ağırlıklarının maksimum % kaçının matkap üzerine verileceğini gösterir. Örneğin 0.85 değeri, nötr noktanın matkaptan itibaren DC uzunluğunun (ağırlığının) %85'ine eşit gelir. Bu hesaplamada nötr nokta 0.85 olarak alınmıştır.

BF= Yüzdürme katsayısı ise

$$BF = 1 - \frac{\rho_{\text{çamur}}}{\rho_{\text{çelik}}} = 1 - \frac{10}{65,5} = 0.847$$

Kancanın taşıyacağı yüke (148.696 lb) ve matkap üzerine verilmesi gereken maksimum yüke göre DP uzunluğu 5. eşitlikten;

$$DP \text{ uzunluğu (ft)} = \frac{148.696 - 60.060}{13,75 \text{ (lb/ft)}} = 6 \ 446 \text{ ft}$$

olarak hesaplanır.

Yukarıdaki hesaplama dış çapı (OD) 4 1/2 inç- iç çapı (ID) 3,958 inç- ve birim ağırlığı 13,75 lb/ft (Çizelge 1) olan DP ye göre yapılmıştır. Aynı yöntem diğer kuyu dizaynına uygun DP'ler için de yapılmış ve bu DP'lerin yapılabilecekleri maksimum derinlikler çizelge 5' te verilmiştir.

**Çizelge 5- Sondaj makinesinin motor gücüne ve matkap üzerine verilen maksimum yüke göre farklı DP'lerin yapabilecekleri maksimum derinlikler.**

DP tipi	Birim Ağır. lb/ft	DC Uzun. (ft)	DP Uzun. (ft)	T. Derinlik (ft)
4"-3,476"	11,85	660	7 479	8 139 (2 485m)
4"-3,340"	14,00	660	6 331	6 991 (2 135m)
4 ½"-3,958"	13,75	660	6 446	7 106 (2 166m)
4 ½"-3,826"	16,60	660	5 339	5 999 (1 832m)
4 ½"-3,640"	20,00	660	4 431	5 091 (1 555m)
5"-4,408"	16,25	660	5 454	6 114 (1 867m)

Çizelge 5' ten görüleceği üzere 4 ½ inç çapında ve 3,958 inç iç çapında 13,74 lb/ft özelliğindeki DP'lerle 7106 ft (2166 m) sondaj yapabilirken aynı dış çapa ve farklı birim ağırlığa (20,20 lb/ft) sahip DP ile ancak sırasıyla 5999 ft (1832 m) ve 5091 ft (1555 m) sondaj yapılabilir. Burada 4 inç dış çapında, 3,476 inç iç çapında ve 11,85 lb/ft birim ağırlığındaki tij ile daha derin 8139 ft (2483 m) sondaj yapılabildiği görülmektedir. Fakat bu DP'lerin jeotermal sondajlarda kullanılabilmesine karar vermek için boru gövdesi akma mukavemetlerini incelemek (Çizelge 1 ve 2) ve hidrolik güç yönünden de diğer DP'lerle karşılaştırmak gereklidir.

Örnekteki sondaj makinesinin motor gücüne göre çekebileceği takım dizisinin ağırlığı eşitlik 2'den 148.696 lb olarak hesaplanmıştır. Fakat jeotermal kuyularda sıklıkla takım sıkışması ile karşılaşıldığından takımı kurtarmak için takım dizisinin ağırlığına ilaveten 100 000 lb (takım dizisi içerisinde jar kullanılmaması durumunda) daha fazla yük ile çekilmesi gerekir. Buna göre boru gövdesi akma mukavemetinin en az 248.696 lb olmalıdır. Her kuyu için yeni tij kullanılmayacağından çizelge 2' ye göre kullanılmış DP'le-

rin minimum akma direncindeki gerilme direncine (tensile strenght) göre uygun kalitede DP'ler seçilmelidir. çizelge 2'de verilen DP'lerin teorik gerilme mukavemeti değerlerinin 0,90 ile çarpılarak hesaplanması gerektiği unutulmamalıdır. Bunun nedeni tijlerde kalıcı uzamayı engellemek veya plastik deformasyonu önlemektir. 7106 ft sondaj yapmak istediğimizde seçilen 4 ½ inç OD ve 3,958" ID ye sahip DP'lerin  $P_a = P_t * 0.90$  göre hesaplanmış değerleri çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 6- Tijlerde kalıcı uzamayı engellemek için %90 oranındaki gerilme verileri.**

DP özellikleri	DP kalitesi	Min. akma mukavemetinde gerilim verileri, lb
4 ½" OD 3,958" ID 13,75 lb/ft	E75	213258*0,90=191 942
	X95	270127*0,90=243 114
	G105	298461*0,90=268 704
	S135	383864*0,90=345 477

Buna değerlendirmelere göre 4 ½ inç OD ve 3,958 inç ID ye sahip DP'ler için en az G105 veya S135 kalitesinin uygun olduğu görülmektedir.



Yukarıdaki örnekten faydalanarak 7106 ft sondaj yapmak için değişik çap ve ağırlıktaki DP'leri kullandığımızda takım ağırlığının ne kadar olacağını ve bu ağırlığı taşı-

mak için ne kadar bir motor gücü gerektiği ve gücü sağlamak için ne kadar yakıt tüketimi olacağı hesaplanmış ve sonuçları çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7- Takım dizisi uzunluğu sabit tutulduğunda (7106 ft (660 ft DC+6446 ft DP)) farklı DP tiplerine göre sondaj için gerekli motor gücü ve yakıt tüketiminin hesabı.**

DP tipi	Birim Ağırlık, lb/ft	Takım ağırlığı lb	Motor gücü HP	Yakıt Tüketimi lt/saat	Yakıt tüketimindeki % değişim
4"-3,476"	11,85	136 448	578,1	42,3	91,7
4"-3,340"	14,00	150 308	636,8	46,6	101,0
<b>4 ½"-3,958"</b>	<b>13,75</b>	<b>148 696</b>	<b>630,0</b>	<b>46,1</b>	<b>100,0</b>
4 ½"-3,826"	16,60	167 068	707,8	51,8	112,3
4 ½"-3,640"	20,00	188 985	800,7	58,6	127,0
5"-4,408"	16,25	164 812	698,3	51,1	110,8

Eşitlik 1 ve 2'den değişik özellikteki DP'lerin takım ağırlığına göre draw-works ve motor gücü hesaplandıktan sonra 6. eşitlikten yakıt tüketimi hesaplanır.

$$Qf = \frac{2545 * 630}{19000} = 84,3 \frac{\text{lb}}{\text{saat}} = 46,1 \frac{\text{lt}}{\text{saat}}$$

4 ½ inç OD ve 13,75 lb/ft birim ağırlığa sahip DP ile yapılan aynı derinlikteki sondajı diğer aynı çaptaki DP tiplerine göre değerlendirdiğimizde makinenin motor gücünün yetersiz olduğu görülür. Şayet aynı derinliğin diğer DP'lerle de yapılabilineceğini varsayarsak (takım çekme hızının düşürülerek veya daha güçlü motor kullanarak) ve örnek 1'de seçtiğimiz DP nin (4 ½ inç OD ve 13,75 lb/ft) yakıt tüketimini 100 olarak kabul edersek, aynı dış çapa sahip (4 ½ inç) diğer DP'lerle sondaj yapılması durumunda harcanan yakıt tüketiminin %27'ye kadar arttığı görülür. Bu yüzden ağır DP kullanmak hem makinenin delme kapasitesini düşürürken hem de yakıt

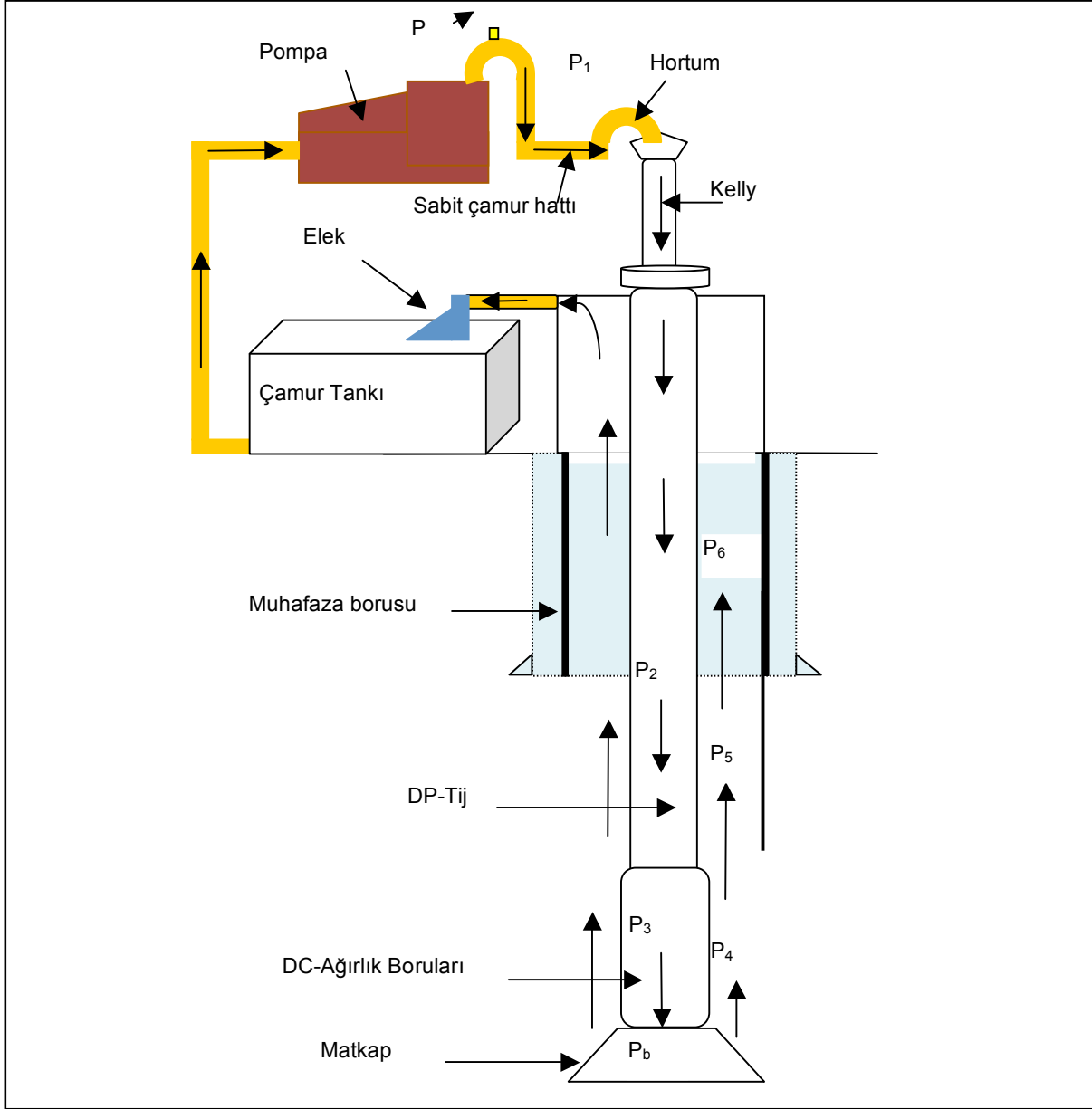
sarfıyatını artırarak sondaj maliyetini olumsuz olarak etkiler. Gereğinden fazla ağır tij kullanmanın bu dezavantajının yanında unutulmamalıdır ki; makara, halat sisteminde ve drawworks fren sisteminde aşırı ısınma, güç ünitelerinde ve döner masa aktarma organlarında da sık sık arıza problemlerine de neden olur.

### Sondaj Makinesinin Pompa Gücüne Göre DP Seçimi

Sondaj operasyonlarının güvenli, verimli, ekonomik olarak tamamlanmasında sondaj hidroliği önemli rol oynamaktadır. Sondaj operasyonlarında ortaya çıkan bazı problemler, sondaj hidroliğini dikkate alınmadan yapılan çalışmalardan kaynaklanmaktadır. Örneğin yetersiz hidrolik güç ile yapılan sondajlarda karşılaşılan en önemli problem; matkabın kesmiş olduğu kırıntıların yüzeye taşınmaması ve tabanda biriken kırıntıların takım sıkışmalarına neden olması ve ayrıca ilerleme hızında görülen düşüşlerdir.

Şekil 2, sondaj çamur ve hidrolik sistemini göstermektedir. Yüzeş ekipmanlarındaki basınç kaybı ( $P_1$ ), DP ve DC içindeki basınç kayıpları ( $P_2$  ve  $P_3$ ), kuyu ve DC arası ( $P_4$ )

ve kuyu DP arası ( $P_5$ ), muhafaza borusu ve DP arası ( $P_6$ ) ve matkaptaki basınç kaybı ( $P_b$ ) olarak gösterilmiştir.



Şekil 2- Sondaj ve çamur hidrolik sistemi.

Sondaj çamurunun (akışkanının) bingham plastik modele göre davranış gösterdiğini kabul edersek minimum anülüs hızı, debi, basınç kayıpları, pompa ve motor gücünün hesaplanması için gerekli formüller aşağıda verilmiştir.

$V > V_c$  ise sıvı akışı türbilans'tır. Bu durumda kullanılacak basınç kaybı formülü :

A- Kuyu temizliği için minimum anülüs hızı :

$V(\text{ft/sn}) = \frac{11800}{\rho * D_h * 60}$	7
---	---

B- Minimum anülüs hızı için gerekli debi :

$Q(\text{gal/dak}) = 2,448 * (D_h^2 - OD^2) * V$	8
--	---

C- Yüzey donanımlarındaki basınç kaybı :

$P(\text{psi}) = E * \rho^{0,8} * Q^{1,8} * PV^{0,2}$	9
---	---

D- Boru içi akış

Boru içinde ortalama akış hızı (V) ve kritik hızı (Vc) veren eşitlikler :

$V(\text{ft/dak}) = \frac{24,5 * Q}{ID^2}$	10
--	----

$V_c(\text{ft/dak}) = \frac{97 * PV + 97 * \sqrt{PV^2 + 8,2 * ID^2 * \rho * YP}}{\rho * ID}$	11
--	----

$V < V_c$  ise sıvı akışı laminer'dir. Bu durumda kullanılacak basınç kaybı formülü :

$P(\text{psi}) = \frac{PV * L * V}{90\ 000 * D^2} + \frac{YP * L}{225 * ID}$	12
--	----

E-Anülüs akışı :

$P(\text{psi}) = \frac{8,9 * 10^{-5} * \rho^{0,8} * Q^{1,8} * PV^{0,2} * L}{ID^{4,8}}$	13
--	----

Anülüste ortalama akış hızı (V) ve kritik hızı (Vc) veren eşitlikler :

$V(\text{ft/dak}) = \frac{24,5 * Q}{(D_h^2 - OD^2)}$	14
--	----

$V_c(\text{ft/dak}) = \frac{97 * PV + 97 * \sqrt{PV^2 + 6,2 * (D_h - OD)^2 * \rho * YP}}{\rho * (D_h - OD)}$	15
--	----

$V < V_c$  ise sıvı akışı laminer'dir. Bu durumda kullanılacak basınç kaybı formülü :

$P(\text{psi}) = \frac{PV * L * V}{60\ 000 * (D_h - OD)^2} + \frac{YP * L}{200 * (D_h - OD)}$	16
---	----

$V > V_c$  ise sıvı akışı türbilans'tır. Bu durumda kullanılacak basınç kaybı formülü :

$P(\text{psi}) = \frac{8,91 * 10^{-5} * \rho^{0,8} * Q^{1,8} * PV^{0,2} * L}{(D_h - OD)^3 * (D_h - OD)^{1,8}}$	17
--	----

F-Dizi içinde ve anülüsteki toplam basınç kaybı :

$P_d = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6$	18
---	----

G- Matkapta oluşan basınç kayıpları :

Matkaptaki basınç kayıpları genelde dizi içindeki ve anülüsteki toplam kayıpların iki katı olması tavsiye edilir.

$P_b = P_d * 2$	19
-----------------	----

H- Toplam basınç kaybı :

$P_t = P_d * P_b$	20
-------------------	----

İ- Pompa gücü ve motor gücü :

Pompa hidrolik gücü	$H_{hp} = \frac{Q \text{ (gal/dak)} * P_t \text{ (psi)}}{1713.6}$	21
Pompa mekanik gücü	$M_{hp} = \frac{H_{hp}}{\text{Mekanik verim}}$	22
Pompa motor gücü	$H_{Pm} = \frac{M_{hp}}{\text{Mekanik verim}}$	23

$D_n$ = Kuyu çapı, inç

$\rho$ = Çamur ağırlığı lb/gal

Q= Debi gal/dak

E= Yüzey ekipman özelliklerine göre belirlenen sabit değer

PV= Plastik vizkosite (cP)

YP= Akma mukavemeti (lb/100 ft<sup>2</sup>)

OD= Boru dış çapı (inç),

ID= Boru iç çap (inç),

L= Uzunluk (ft),

V= Hız (ft/sn) veya (ft/dak).

Hidrolik güçten en iyi şekilde faydalanmak için kullanılacak DP'lerin seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde Bingham plastik modelle uygun çamur sistemi için sondaj makinesinin pompasına en uygun olan DP seçiminin üzerinde durulmuştur.

**ÖRNEK 2:** Çizelge 8'e verilen triplex çamur pompasına sahip derin sondaj makinesi ile şekil 1'de verilen kuyu dizaynında sondaj yaptığımızda değişik DP tiplerine göre

re pompanın mekanik gücü ve pompaya hareket veren motorun gücündeki değişimleri inceleyiniz? Çamur özellikleri; çamur yoğunluğu:10 gal/dak; plastik viskozite (PV):15 cp; yield point: 15 lb/100 ft<sup>2</sup>. Pompanın mekanik verimi ise %90 ve volumetrik verimi %100'dür.

Muhafaza borusu dış çapı 9 5/8 inç ve iç çapı 8,835 inç, indirildiği derinlik ise 4592,6 ft (1400 m)'dir,

Not: Örnek 1'de seçilen DP ve DC teknik verilerine göre sondaj yapılacaktır. 4 1/2 inç DP uzunluğu 6446 ft – 6 1/2" DC uzunluğu 660 ft.

**Çizelge 8- Triplex çamur pompası performans verileri.**

Gömlek Çapı	Debi (GPM)	Debi (l/dak)	Mak. Basınç (psi)	Pompa giriş gücü (HP)	Strok Sayısı
7"	629	2 383	1 958	800	140
6 1/2"	542	2 055	2 262		
6"	462	1 751	2 654		
5 1/2"	388	1 471	3 161		
5"	321	1 213	3 828		
4 1/2"	260	985	4 728		
4	205	778	5 000		

**ÇÖZÜM 2:** Minimum gerekli anülüs hızına göre yapılan hesaplamalar aşağıdadır.

A- Kuyu temizliği için minimum anülüs hızı :

$V \text{ (ft/sn)} = \frac{11800}{10 * 8,5 * 60} = 2,31$	7
--	---

B- Minimum anülüs hızı için gerekli debi :

$Q(\text{gal/dak}) = 2,448 * (8,5^2 - 4,5^2) * 2,31 = 294,5$	8
--	---

C- Yüzey donanımlarındaki basınç kaybı :

$P_1(\text{psi}) = 0,000042 * 10^{0,8} * 294,5^{1,8} * 15^{0,2} = 12,7$	9
---	---

Not: Yüzey donanımının 4. tip olduğu farz edilirse (Rabia, 1995)  $E=4,2*10^{-5}$

D- Boru içi akış

DP Boru içi ortalama akış hızı (V) ve kritik hızı (Vc) :

$V(\text{ft/dak}) = \frac{24,5 * 294,5}{3,958^2} = 460,6$	10
---	----

$V_c \left( \frac{\text{ft}}{\text{dak}} \right) = \frac{97 * 15 + 97 * \sqrt{15^2 + 8,2 * 3,958^2 * 10 * 15}}{10 * 3,958} = 378,9$	11
---	----

$V > V_c$  olduğu için sıvı akışı türbilans'tır. Bu durumda DP için basınç kaybı :

$P_2(\text{psi}) = \frac{8,9 * 10^{-5} * 10^{0,8} * 294,5^{1,8} * 15^{0,2} * 6446}{3,958^{4,8}} = 234,9$	13
--	----

DC Boru içi ortalama akış hızı (V) ve kritik hızı (Vc) :

$V(\text{ft/dak}) = \frac{24,5 * 294,5}{2,8125^2} = 912,2$	10
--	----

$V_c \left( \frac{\text{ft}}{\text{dak}} \right) = \frac{97 * 15 + 97 * \sqrt{15^2 + 8,2 * 2,8125^2 * 10 * 15}}{10 * 2,8125} = 392,8$	11
---	----

$V > V_c$  olduğu için sıvı akışı türbülans'tır. Bu durumda DC için basınç kaybı :

$P_3(\text{psi}) = \frac{8,9 * 10^{-5} * 10^{0,8} * 294,5^{1,8} * 15^{0,2} * 660}{2,8125^{4,8}} = 124$	13
--	----

E- Anülüs akışı

DP-Kuyu arası ortalama akış hızı (V) ve kritik hızı (Vc) :

$V(\text{ft/dak}) = \frac{24,5 * 294,5}{(8,5^2 - 4,5^2)} = 138,8$	14
---	----

$V_c(\text{ft/dak}) = \frac{97 * 15 + 97 * \sqrt{15^2 + 6,2 * (8,5 - 4,5)^2 * 10 * 15}}{10 * (8,5 - 4,5)} = 334,4$	15
--	----

$V < V_c$  olduğu için sıvı akışı laminer'dir. Bu durumda DP-Kuyu arası basınç kaybı

$P_4(\text{psi}) = \frac{15 * (6446 - 4592,6) * 138,8}{60\,000 * (8,5 - 4,5)^2} + \frac{15 * (6446 - 4592,6)}{200 * (8,5 - 4,5)} = 38,8$	16
--	----

DP-Boru arası ortalama akış hızı (V) ve kritik hızı (Vc) :

$V(\text{ft/dak}) = \frac{24,5 * 294,5}{(8,835^2 - 4,5^2)} = 124,8$	14
---	----

$V_c(\text{ft/dak}) = \frac{97 * 15 + 97 * \sqrt{15^2 + 6,2 * (8,5 - 4,5)^2 * 10 * 15}}{10 * (8,835 - 4,5)} = 331,3$	15
--	----

$V < V_c$  olduğu için sıvı akışı laminer'dir. Bu durumda DP-boru arası basınç kaybı:

$P_5(\text{psi}) = \frac{15 * (4592,6) * 124,8}{60\,000 * (8,835 - 4,5)^2} + \frac{15 * (4592,6)}{200 * (8,835 - 4,5)} = 87,1$	16
--	----

DC-Kuyu arası ortalama akış hızı (V) ve kritik hızı (Vc) :

$V(\text{ft/dak}) = \frac{24,5 * 294,5}{(8,5^2 - 6,5^2)} = 240,5$	14
$V_c(\text{ft/dak}) = \frac{97 * 15 + 97 * \sqrt{15^2 + 6,2 * (8,5 - 4,5)^2} * 10 * 15}{10 * (8,5 - 4,5)} = 377,4$	15

V<Vc olduğu için sıvı akışı laminerdir. Bu durumda DC-Kuyu arası basınç kaybı :

$P_g(\text{psi}) = \frac{15 * 660 * 138,8}{60 * 000 * (8,5 - 4,5)^2} + \frac{15 * 660}{200 * (8,5 - 6,5)} = 34,7$	16
---	----

İ-Pompa güç ünitesinin ve yakıt tüketiminin hesabı:

Pompa hidrolik gücü	$Hhp (BG) = \frac{294,5 * 1596,6}{1713,6} = 275$	21
Pompa mekanik gücü	$Mhp (BG) = \frac{275}{0,9} = 305$	22
Pompa motor gücü	$HPm (BG) = \frac{305}{0,85} = 360$	23
Yakıt tüketimi	$Q_f = \frac{2545 * 360}{19000} = 48 \text{ lb/saat} = 26 \text{ lt/saat}$	6

Yukarıdaki çözümde 4 ½ inç dış çapındaki 3.998 inç iç çapındaki DP ye göre yapılan he-

F-Dizi içinde ve anülüsteki toplam basınç

$$P_t = 1064,4 + 532,2 = 1596,6$$

20

kayı :

$$P_d = 12,7 + 234,9 + 124 + 38,8 + 87,1 + 34,7 = 532,2$$

18

G-Matkapta oluşan basınç kayıpları :

$$P_b = 532,2 * 2 = 1064,4$$

19

H-Toplam basınç kaybı :

saplamalar diğer DP tiplerine göre yapılarak sonuçlar aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

4 ½ inç dış çapında DP kullandığımızda minimum anülüs hızı 2,31 ft/sn olur ve

	4"-3,476"	4"-3,340"	4 ½"-3,958"	4 ½"-3,826"	4 ½"-3,640"	5"-4,408"
Takım dizisi uzunluğu sabit, değişen basınç kaybı						
Debi	318,6	318,6	294,5	294,5	294,5	267,6
Dizi içinde ve anülüsteki top. basınç k.	809	915	532	573	648	411
Top. basınç kaybı (matkap dahil)	2427	2747	1596	1721	1945	1233
Pompa mekanik gücü	501	567	305	329	371	214
Motor gücü	590	668	359	387	437	252
Yakıt tüketimi lt/saat	43	49	26	28	32	18
Yakıt tüketimindeki % değişim	164	186	100	107	122	70

bunun için gerekli minimum debi ise 294,5 galon/dak olur. Bu hesaplamalarda matkap-taki basınç kaybının, tüm takım dizisi ve anülüsteki basınç kaybı toplamının 2 katı olduğu varsayıldı ve toplam basınç kaybı 1596 psi olarak bulundu. Çizelgeden görüleceği üzere 4 ½" DP'lerden daha düşük dış çapta sahip DP (4") kullandığımızda minimum temizlik için gerekli olan debi miktarı artar. 4" DP ler için en geniş iç çapa sahip olanlarda bile yakıt tüketimindeki artış %64 oranında olur. Aynı dış çapa sahip (4 ½ OD) ve değişik iç çapa sahip DP'ler değerlendirildiğinde aynı metrajdaki sondajı yapmak için daha güçlü bir motor gücüne ve dolayısıyla daha fazla yakıt tüketimine neden olur. Diğer bir deyişle 4 ½ inç dış çapa sahip DP ler için, azalan iç çap ile birlikte yakıt tüketimi de orantılı olarak artmaktadır. Sonuç olarak, bu makine ile derin sondaj yapılması arzulandığında 4 ½ inç dış çapında ve 13,75 lb/ft ağırlığında DP kullanmak daha verimli ve ekonomiktir.

### SONUÇLAR

Kuyu dizayn şekilleri jeotermal sistemin derinliğine ve akışkan üretim miktarına bağlı olarak en uygun genişlikte açılır. Fakat kuyudan üretilen akışkan miktarının, rezervuara beslenen akışkan ile rezervuardan üretilen akışkan dengesini bozmayacak şekilde yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

Bir sondaj makinesi için takım dizisi seçilirken makinenin gücü göz önüne alınarak ekonomik olarak en derin sondajı yapabilecek ve matkap çapına en uygun DP seçimi önemlidir. Örnekteki sondaj makinesinin motor gücüne (630 HP) göre en uygun DP seçiminin G105 veya S135 kalitesinde 4 ½" dış çapında 3,958 inç çapındaki 13,75 lb/ft ağırlığındaki DP'ler olduğu görülmektedir. Bunun dışında kullanılacak tijler için ekonomik yapılmasını engelleyebileceği gibi makinenin kapasitesinin düşmesine neden olur.

### DEĞİNİLEN BELGELER

API 7G (1998) Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits, Sixteenth Edition, August 1998.

Azar, J.J. ve Samuel G.R., 2007. Drill String Design, Drilling Engineering, p 323, Tulsa, Oklahoma, USA.

Rabia, H., 1995, Drill String Design, Oilwell Drilling Engineering Principles and Practice, s 37-43

Toka, B., 2011, Jeotermal Sondajlarda F-2500 Sondaj Makineleri için Kuyu Dizaynı ve Takım Dizisi Seçimi, Attila Yalçın Sondaj Çalıştayı, İstanbul. s.37-43.

\_\_\_\_\_ ve Özbayoğlu M.E., 2009, Jeotermal Sondajlarda Makina ve Pompa Seçimi, TMMOB jeotermal Kongresi, Ankara.