محاسبه افت فشار در لوله‌ها براساس فورمولهای نوین

نوشتهٔ
دکتر فیروز تربیت
استاد دانشکدهٔ فنی

مقدمه

بمنظور هم‌آهنگ‌ساختن تعلیمات عملی و نظری دانشکده فنی با آخرین تحول و ترقی علم و فن جدید و همچنین جهت بالا بردن سطح دانستنیهای دانشجویان دائماً در برنامه‌های تحصیلی تجدید نظر بعمل آمده و برای هم‌گام کردن آنها با برنامه‌های سایر دانشگاه‌های مترقی جهان همواره از اصل‌های نوین پیروی میگردد.

درسال تحصیلی جاری ضمن تغییرهای عمده در برنامه درس هیدرلیک دانشکده فنی محاسبه افت فشار در لوله‌ها براساس فرمول‌های نوین مورد بررسی قرار میگیرد.

پایه فورمولهای محاسباتی جدید براساس خاصیت وقضیه قشرحدی[۱] بنا نهاده شده است پایه‌های قضیه قشر حدی در قرن حاضر توسط دانشمندی بنام پراندتل[۲] تشریح گردیده و سپس در سیر تکاملی آن شاگردان مکتب او ازقبیل نیکورادزه[۳] ازنقطه تجربی وفن کارمان[۴] ازنقطه نظر علمی نقش بسیار عمده را برعهده داشته‌اند.

امروزه قسمت‌های بخصوصی ازقضیه‌های قشر حدی بصورت جزء لاینفک درس هیدرلیک دربرنامه مورد تدریس قرارمیگیرند.

فورمولهای چزی[۵] و مانینگ[۶] وغیره که درکشورهای مختلف برای تسهیل محاسبه با استفاده ازآن فورمولها جدول ها و نموگرام‌هائی تنظیم شده است امروزه تقریباً در حال متروك شدن می‌باشند کنگره بین‌المللی سوم‌آب درلندن بمنظور متحد الشکل‌نمودن محاسبه‌ها درکلیه کشورهای‌دنیا براساس‌فورمولهای نوین یک رشته اصل‌های کلی را مورد تائید قرارداده است.

مجمع‌متخصصان‌ومهندسان آب و گاز آلمان[۷] براساس همین‌اصل‌ها دیاگرام‌هائی‌بنام«دیاگرامهای افت فشار درلوله‌ها» تنظیم نموده‌اند که یک نسخه ازآن نشریه در دسترس نویسنده مقاله میباشد درنشریه

---

۱) Grenzschicht-Theorie ۲) Prandtl ۳) Nikuradsé
٤) Von Karman ٥) Chezy ٦) Manning
۷) Deutscher Verein von Gas und Wasserfachmännern

مزبور قید شده است که بعلت پایه های محکم فورمولهای نوین یقیناً درمدت ۱۰ سال آتیه دیاگرامهائی که براساس رویه جدید تنظیم شده است رفته رفته در عمل مورد استفاده بیشتری پیدا خواهد کرد بدون آنکه هیچگونه تزلزلی دراساس آن رخ دهد.

بنابراین میتوان ادعا نمود که کوششهای چهل ساله اخیر دررشته هیدرلیک «حرکت آب درلوله ها به نتیجه ثمربخشی رسیده است.

از فرصت مناسبی که نشر مجدد مجله دانشکده فنی در اختیار نویسنده گذارده است استفاده کرده ودیاگرامهای افت فشار مجمع متخصصان ومهندسان آب وگاز آلمان وطریقه استفاده ازآن با ذکر مثالی چند برای استفاده علاقمندان دراین مقاله منتشرمینماید.

پایه های علمی و تجربی که منتهی به پیدایش فورمولهای نوین افت فشار درلوله ها شده است هم اکنون درچهار چوب یک برنامه منطبق بااحتیاجات فنی مهندسان در درس هیدرلیک دانشکده فنی گنجانیده شده است معذلک نظر باینکه مطلب نی حد ذاته بسیار پیچیده ومشکل بوده وبعضی مرحله های آن هنوزدرحال تکامل میباشد شرح وبسط کافی دراین مختصر مقدور نیست وچون کتابهای متعددی دراین موضوع ها تدوین شده وانتشاریافته است. علاقمندان به تعمق وتحقیق درقضیه های قشرحدی را به مطالعه آن کتابهای اختصاصی منجمله کتاب معروف قضیه قشرحدی[۸] تألیف پروفسورشلیختینگ[۹] راهنمائی میکنیم ودراینجا بعنوان مقدمه فقط چند سطری به ذکر فورمولهای اصلی اختصاص میدهیم.

برای تعیین افت فشار در اثر اصطکاک مایع با جدار لوله فورمول دارسی - وایسباخ[۱۰] بصورت $\Delta z_e = f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}$ بکار برده میشود، ولی ضریب اصطکاك بدون بعد f بکمک قضیه های قشرحدی مورد بررسی قرار میگیرد. درفرمول فوق Δz_e افت فشار درطول لوله، l طول لوله، d قطرلوله، V سرعت حرکت مایع، و g شتاب جاذبه زمین میباشد ضریب اصطکاك بدون بعد f تابع عدد رینولدز R_e و خشونت نسبی $\frac{k}{d}$ جدار لوله میباشد (k طولی است که معرف زبری جدار لوله میباشد).

بین جریان مغشوش آب در لوله های صاف و صیقلی وجریان مغشوش آن درلوله های با جدار زبر حد ناصلی ازنظر زبری طبیعی جدار وجوددارد که درآن ضریب اصطکاك f نه تنها تابع عدد رینولدز وزبری نسبی جدار میباشد بلکه بستگی به عامل های دیگری ازقبیل شکل ونوع هندسی ناهمواریها وطرز توزیع آنها نیزدارد که مجموعاً زبری خاص وطبیعی جدار لوله را بوجود میآورند.

دراینجا لازمست که ذکر شود که نیکورادزه جهت ارزیابی تأثیر زبری نسبی درتجربه های خود از چسبانیدن ماسه های یکنواخت بفاصله های منظم درجدار لوله استفاده کرده ویک زبری مصنوعی ایجاد نموده است که با واقعیت فرق محسوس دارد ولی بهرصورت برای نوعهای مختلف جریان درلوله ها اندازه f توسط فورمولهای مختلفی بطریق زیر بیان میگردد:

---

۱) Grenzschicht-Theorie

۹) Professor Schlichting

۱۰) Darcy-Weisbach

برای جریای آرام : $f = \frac{64}{R_e}$

برای جریان مغشوش : سه حالت بایستی تشخیص داد:

حالت اول : لوله با جدار صیقلی :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{R_e \sqrt{f}}{2{,}51}$$

حالت دوم : لوله با جدار زبر طبیعی که حد فاصل بین دوحالت‌نهائی‌صیقلی کامل وزبری‌مصنوعی جدار است

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k/d}{3{,}71} + \frac{2{,}51}{R_e \sqrt{f}} \right)$$

حالت سوم : لوله با جدار زبر مصنوعی:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3{,}71}{k/d}$$

فورمولهای حالت اول و سوم به فورمولهای پراندتل موسوم بوده و محصول تجربه‌های نیکورادزه وتحقیق های علمی فن کاران میباشند.

فورمول حالت دوم یک فورمول نیمه تجربی میباشد که توسط کلبروك ـ وایت[11] پیشنهاد شده است وساختمان این فورمول طوریست که به‌نحوی فورمولهای حالت اول وسوم درآن با یکدیگر تلفیق داده شده است واساس محاسبهٔ دیاگرامهای افت فشار را تشکیل میدهد.

در دیاگرامی که مقدار $\frac{1}{\sqrt{f}}$ را با عدد رینولدز R_e مربوط میکند منحنی نمایش جریان آرام بوسیله یک خط مایل بمعادله $\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{R_e \sqrt{f}}{64}$ نشان داده شده است.

حالتهای جدار کاملاً صیقلی بوسیله منحنی $\frac{1}{\sqrt{f_o}} = 2 \log \frac{R_e \sqrt{f_o}}{2{,}51}$ نمایش داده شده است واین منحنی ازنقطه های انتهائی ۱ — ($R_e = 2320$ و $f_o = 0{,}473$) و ۲ — ($R_e = 10^8$ و $f_o = 0{,}0006$) عبورنموده وضریب اصطکاك f_o را برای جدار کاملا صیقلی، (که حداقل ضریب اصطکاك ممکن میباشد) مشخص میکند و بطوریکه از فورمول فوق دیده میشود ضریب اصطکاك فقط بعد در ینولدز بستگی داشته و تابع زبری جدار نمی‌باشد.

فورمول حالت سوم بعکس آنچه فوقاً گفته شد نشان میدهد که دراین حالت ضریب اصطکاك فقط تابع زبری نسبی $\frac{k}{d}$ بوده وبستگی به‌عدد رینولدز ندارد وبدین علت منحنی‌های نمایش مربوطه بصورت

---

11) Colebrook-White

یکدسته خط‌های افقی میباشند که در آنها بعلت ثابت بودن $\frac{k}{d}$ فورمول افت فشار دارسی‌وایسباخ درلوله بقطر وطول معین بصورت‌حاصلضرب یک ضریب ثابت درمجذورسرعت درمیآید یعنی $\Delta z_e = V^2 \times$ ضریب‌ثابت و پرواضح است که تنها مجهول مسئله اندازهٔ k خواهد بود که با معین شدن آن ضریب اصطکاك f معلوم شده واندازه افت فشاربدست میآید.

همچنین در دیاگرام مزبورمنحنی مشخصه دیگری بچشم میخورد که‌معادلهٔ آن‌توسط کلبروك بصورت $\left(R_e \cdot \sqrt{f}\right)\left(\frac{k}{d}\right) = ۲۰۰$ پیشنهاد شده است منحنی مزبور حد فاصل بین دو منطقه می‌باشد که دریکی ازآنها ضریب‌اصطکاك فقط تابع زبری نسبی جداراست ودردیگری ضریب‌اصطکاك با زبری‌نسبی‌جدار و عدد رینولدز تواماً بستگی داشته وهمبستگی مزبور توسط فورمول نیمه تجربی کلبروك- وایت بیان گردیده است.

درشبکه های لوله‌کشی با توجه به‌اندازه‌های متعارفی سرعت وقطرلوله هائی که بکار برده میشوند حالت جریان با فرمولی که توسط کلبروك - وایت بیان شده مطابقت نموده وضریب اصطکاك تواماً تابع‌عدد رینولدز وزبری جدار میباشد یعنی $f = F\left(R_e \text{ و } \frac{k}{d}\right)$ وبنابراین فورمول کلبروك - وایت برای منطقه که در دیاگرام نشان داده شده ودومنحنی محدود کننده بیان شده درفوق قابل استعمال میباشد.

درخاتمه بایستی اذعان نمود که علیرغم آنچه که در بالا بطور مشروح بیان گردید هنوز نمیتوان مسئله افت فشاردرلوله‌هارا خاتمه یافته تلقی نمود زیرا فورمول جامعی که‌محتوی کلیه پارامترهای مختلف ازجمله شکل ونوع هندسی ناهمواریها فاصله‌وطرز توزیع برجستگی‌ها وفرورفتگی‌ها وهمچنین ضخامت‌صفحه قشرحدی باشد تاکنون پیدا نشده است.

طریقه استفاده از دیاگرامهای افت فشار درلوله‌ها:

واحد مقدار هائی که برای محاسبه های هیدرلیکی در دیاگرامهای مزبور منظور گردیده‌اند بقرار ذیل میباشند.

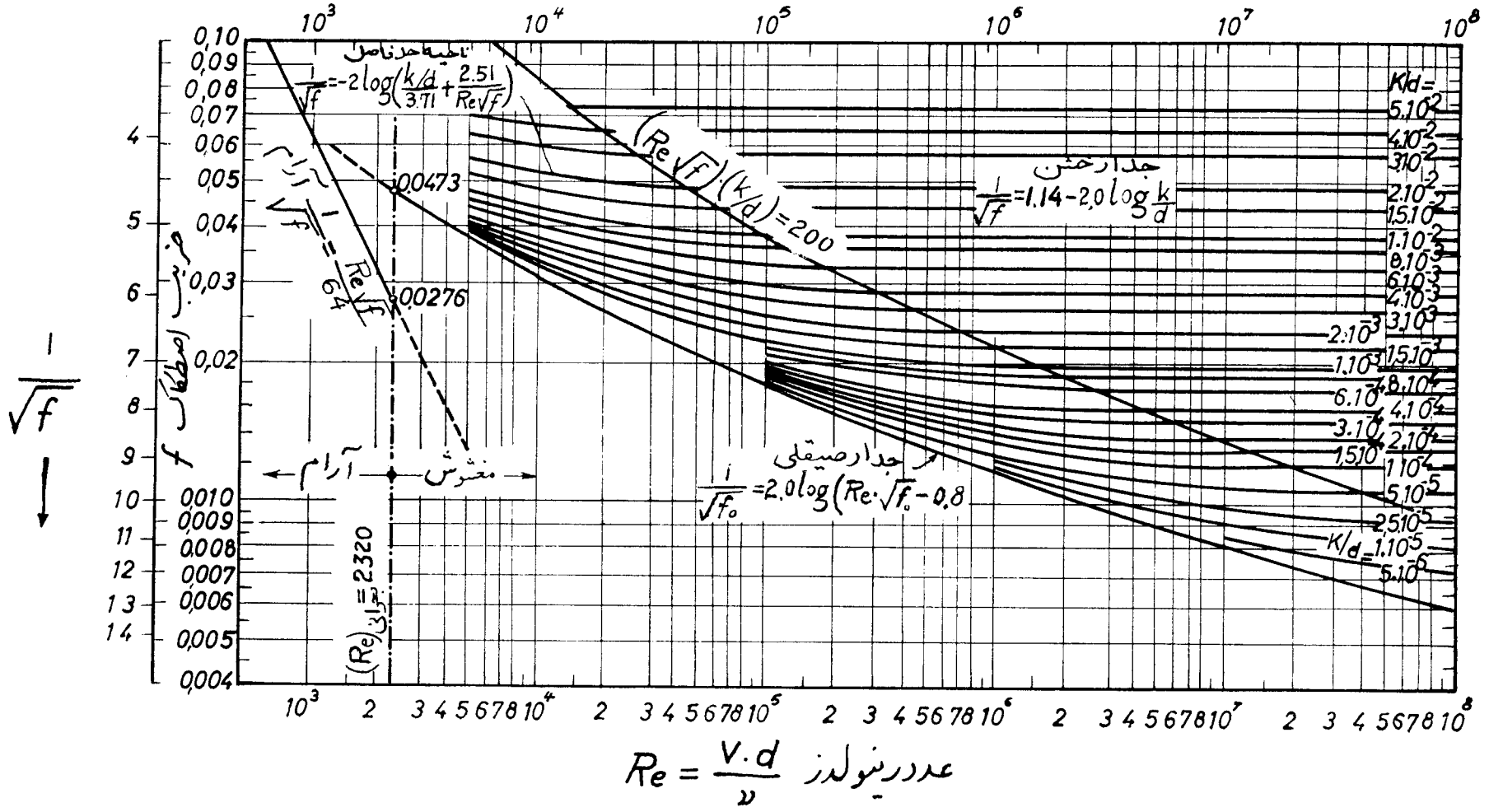
۱- Q شدت جریان‌آب (آبده) برحسب لیتردرثانیه

۲- d قطرلوله برحسب میلیمتر

۳- V سرعت آب برحسب متردرثانیه

٤- $J = \frac{\Delta z_e}{l}$ افت فشار بمتر آب دریک کیلومتر طول لوله

عدد رینولدز R_e برحسب تعریف $\frac{Vd}{\nu}$ است که درآن ν ضریب اصطکاك حرکتی‌آب میباشد که در ده درجه سانتیگراد برابراست با $۱٫۳۱ \times ۱۰^{-۶}$ $\frac{\text{متر مربع}}{\text{ثانیه}}$ بنابراین برای لوله بقطر ۵۰۰ میلیمتر وسرعت آب $V = ۱ \frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}}$ عدد رینولدز مساوی با $R_e = \frac{Vd}{\nu} = ۳۸۲۰۰۰$ میباشد. در دیاگرامهای تعیین‌افت فشار


ناحیه حد فاصل
$\frac{1}{\sqrt{f}}=-2\log\left(\frac{k/d}{3.71}+\frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right)$
$(Re\sqrt{f})(k/d)=200$
جدار خشن
$\frac{1}{\sqrt{f}}=1.14-2.0\log\frac{k}{d}$
$\frac{1}{\sqrt{f}}=\frac{Re\sqrt{f}}{64}$
0.0473
0.00276
آرام
مغشوش
$(Re)_{بحرانی}=2320$
جدار صیقلی
$\frac{1}{\sqrt{f_o}}=2.0\log(Re\cdot\sqrt{f_o}-0.8$
$K/d=$
5.10^{-2}
4.10^{-2}
3.10^{-2}
2.10^{-2}
$1.5.10^{-2}$
1.10^{-2}
8.10^{-3}
6.10^{-3}
4.10^{-3}
3.10^{-3}
2.10^{-3}
$1.5.10^{-3}$
1.10^{-3}
8.10^{-4}
6.10^{-4}
4.10^{-4}
3.10^{-4}
2.10^{-4}
$1.5.10^{-4}$
1.10^{-4}
5.10^{-5}
$2.5.10^{-5}$
1.10^{-5}
5.10^{-6}
ضریب اصطکاک f
$\frac{1}{\sqrt{f}}$
10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8
$Re=\frac{V.d}{\nu}$ عدد رینولدز

منحنی‌های نمالش نقطه هائی که عدد رینولدز R_e در آنها ثابت میباشند با خط چین نشان داده شده است دیاگرامهای مزبور برای لوله های تجارتی که در بازار عرضه شده و زبری آنها بین میلیمتر ۰٫۱ = k ومیلیمتر ۰٫۴ = k میباشند قابل استفاده هستند.

اندازه‌های زبری k در گزارش کنگره بین المللی سوم مهندسان آب درلندن برطبق لیست ذیل پیشنهاد شده است:

لوله چدنی بدون عایق	میلیمتر ۰٫۲۵ = k	لوله با عایق سیمانی سانتریفوژه نوع I	صیقلی
لوله چدنی با عایق	» ۰٫۱۲۵ = k	لوله با عایق سیمانی سانتریفوژه نوع II	۰٫۴ = k
لوله چدنی سانتریفوژه عایق شده	» ۰٫۰۵ = k	لوله باعایق قیری سانتریفوژه‌نوع I	صیقلی
لوله سفید فولادی (گالوانیزه)	» ۰٫۱۲۵ = k	لوله‌باعایق‌قیری‌سانتریفوژنوع II میلیمتر ۰٫۱۲۵	k =
لوله فولادی آهنگری	» ۰٫۰۵ = k	لوله پلاستیک	صیقلی
لوله فولادی با عایق	» ۰٫۰۵ = k	لوله‌با بتن پیش فشرده(نوع فرسینه[1])	۰٫۰۴ = k
لوله فولادی بدون عایق	» ۰٫۰۵ = k	لوله‌با بتن پیش‌فشرده(نوع بنا[2] وسکمان[3])	۰٫۲۵ = k
لوله آسبست سیمان بدون عایق	» ۰٫۰۲۵ = k	لوله‌ای که‌بعداً با سیمان‌عایق‌شده میلیمتر	۰٫۵ = k
لوله آسبست سیمان با عایق	صیقلی		

از مطالعهٔ گزارش کنگرهٔ مزبور چنین معلوم میشود که اندازهٔ k برحسب نوع مصالح و طرز تهیهٔ لوله وعلی‌الخصوص عایق سازی آن برای لوله های آهنی وچدنی موجود در بازار امروزه بین میلیمتر ۰٫۰۴ = k و میلیمتر ۰٫۱۲۵ = k تغییر مینماید. برای لوله هائی که با مصالح دیگر تهیه میشوند حدود تغییرات زبری مزبور بیشتر میباشد مثلاً برای لوله هائی که با مصالح مصنوعی مانند پلاستیک تهیه میشوند اندازه k درحدود صفر بوده و برای لوله های بتنی و لوله هائی که با سیمان بعداً عایق شده‌اند مقدار k حتی میتواند تا ۰٫۵ میلیمتر نیز برسد.

کنکره بین المللی سوم پیشنهاد نموده است که برای محاسبهٔ شاه لوله اصلی با لوله های چدنی وفولادی وسیمان آزبستی مقدار میلیمتر ۰٫۱ = k درنظرگرفته شود وبا توجه باینکه در لوله های فرعی بعلت وجود قطعات اتصالی نظیر زانوئی، انشعاب و غیره افت فشار نسبت به‌شاه لوله اصلی درحدود بیست درصد بیشترمیباشد میلیمتر ۰٫۴ = k انتخاب گردد.

کنگره مزبور ضمناً تائید نموده است که نظر به‌عدم اطلاع ازچگونگی تأثیرزنگ زدگی درون‌لوله وبعلت نامعلوم بودن‌تغییر ضریب زبری بامدت بهره‌برداری، درمحاسبهٔ افت بارلوله هارا نوفرض کنند براساس پیشنهادات کنگره بین‌المللی سوم، مجمع متخصصان ومهندسان آب وگاز آلمان دیاگرامهائی را تنظیم نموده است که دراینجا برای استفاده درمحاسبه ارائه میکردد.

۱) Freyssinet ۲) Bonna ۳) Socoman

دیاگرام I براساس زبری میلیمتر $k=0.1$ برای محاسبه شاه لوله اصلی

دیاگرام II براساس زبری میلیمتر $k=0.4$ برای محاسبه لوله‌های فرعی

نظر باینکه آبده‌هائی تا $Q=2000$ $\frac{\text{لیتر}}{\text{ثانیه}}$ ولوله‌هائی تا قطرمیلیمتر $d=600$ متعارفی بوده ودر عمل غالباً بدانها برخورد میشود لذا یک دیاگرام III علیحده برای محاسبهٔ آنها تهیه گردیده است لوله‌های صیقلی که ازماده‌های مصنوعی مانند پلاستیک وغیره تهیه میشوند بادیاگرام I قابل محاسبه میباشند. درمورد آبهای تصفیه نشده و علی‌الخصوص برای آبهائی که باعث زنگ زدگی لوله و رسوب نمک‌ها در درون آن میگردند توصیه میشود که بمقادیر افت فشارمحاسبه شده درحدود ۲۰ الی ۳۰ درصد اضافه شود.

در دیاگرامهای مزبور Q برحسب لیتر در ثانیه روی خط قائم از سمت پائین ببالا ، افت فشار J برحسب‌مترآب درکیلومتر روی‌خط افقی ازسمت چپ‌براست وبرای‌اجتناب ازتراکم عدد هاعده‌ای‌ازمقدارهای عددی در روی خط افقی تحتانی وتعداد دیگری در روی خط افقی فوقانی درج گردیده‌اند.

منحنی نمایش نقطه‌های هم سرعت ازقسمت فوقانی سمت چپ دیاگرام شروع و به‌قسمت تحتانی سمت راست ادامه پیدا می‌نمایند ومنحنی نمایش نقطه‌هائی که قطر لوله درآنها ثابت است ازقسمت فوقانی سمت راست شروع وبه‌قسمت تحتانی سمت چپ امتداد پیدا می‌نمایند.

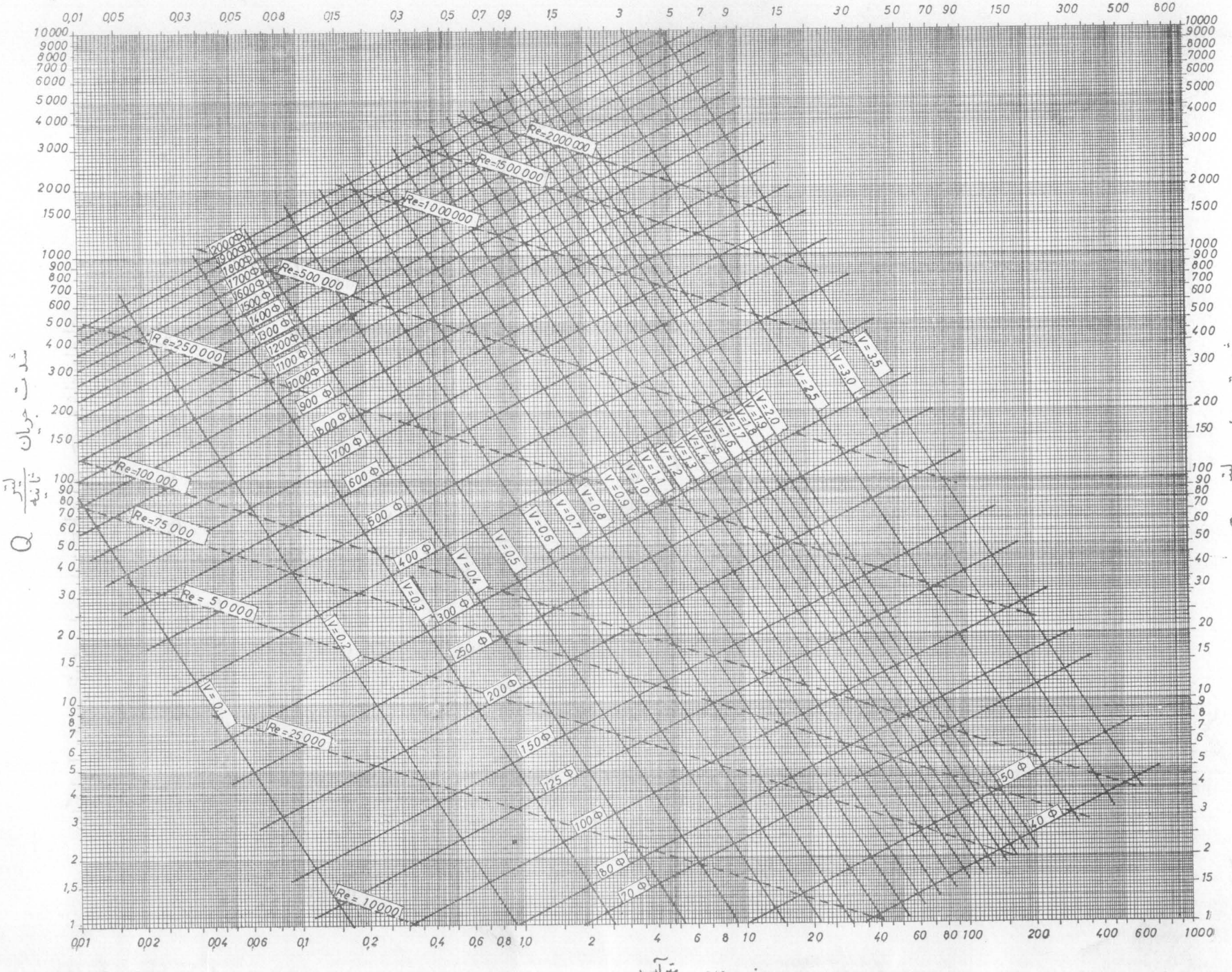
درموقع استفاده ازدیاگرامها برای تعیین قطر لوله مورد لزوم برای‌آبده معین وافت فشارمعین محل تلاقی این دو مختصات عموماً روی منحنی قطرهای متداول تجارتی قرار نمیگیرد . در این موردها همیشه بزرگترین قطر مجاور نقطه تلاقی بعنوان قطر لوله انتخابی اختیار میشود تا هیچوقت آبده لوله ازمقدار مورد احتیاج کمترنباشد.

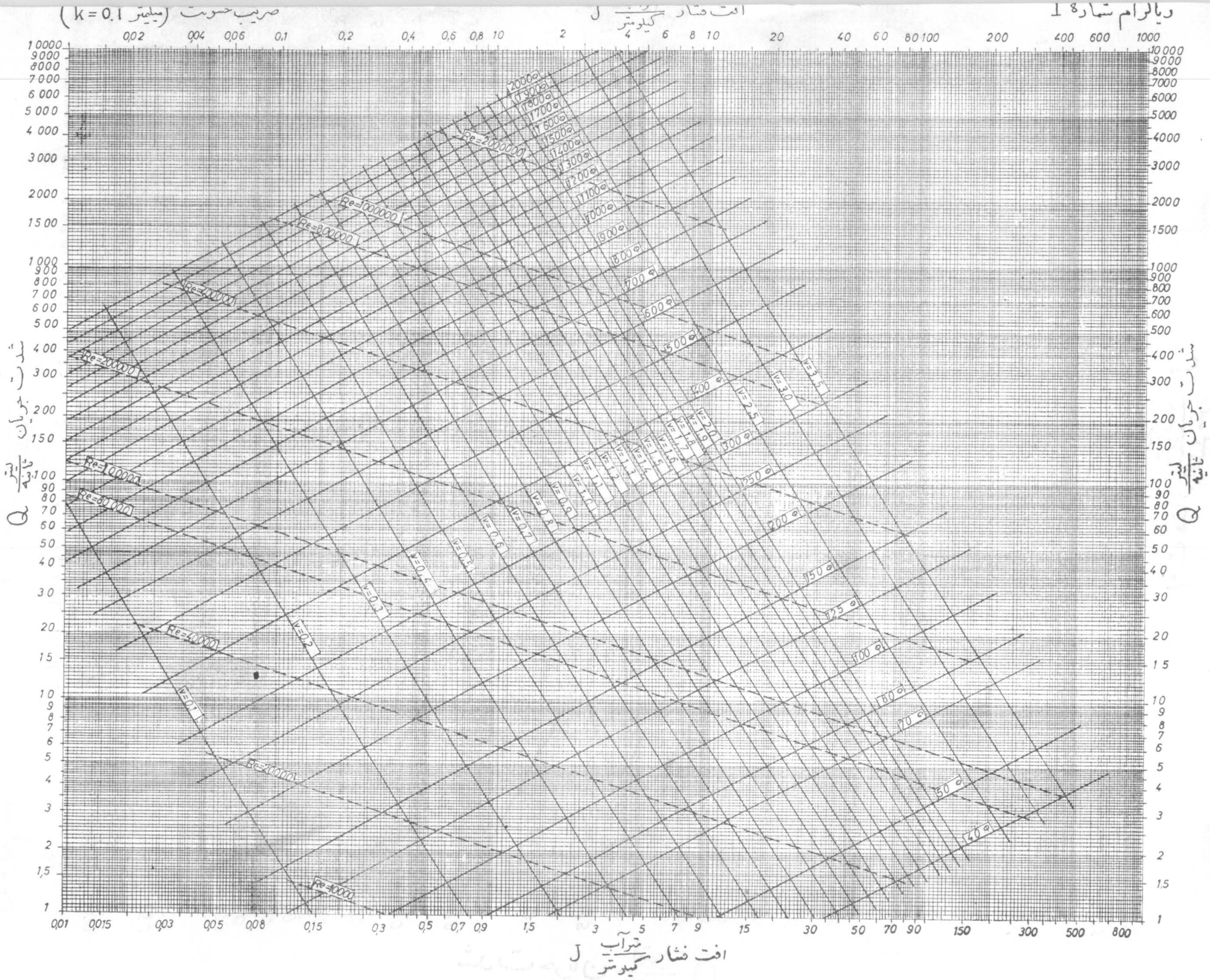
دیاگرام شماره II

افت فشار J $\frac{\text{متر آب}}{\text{کیلومتر}}$

ضریب خشونت (میلیمتر $k = 0.4$)

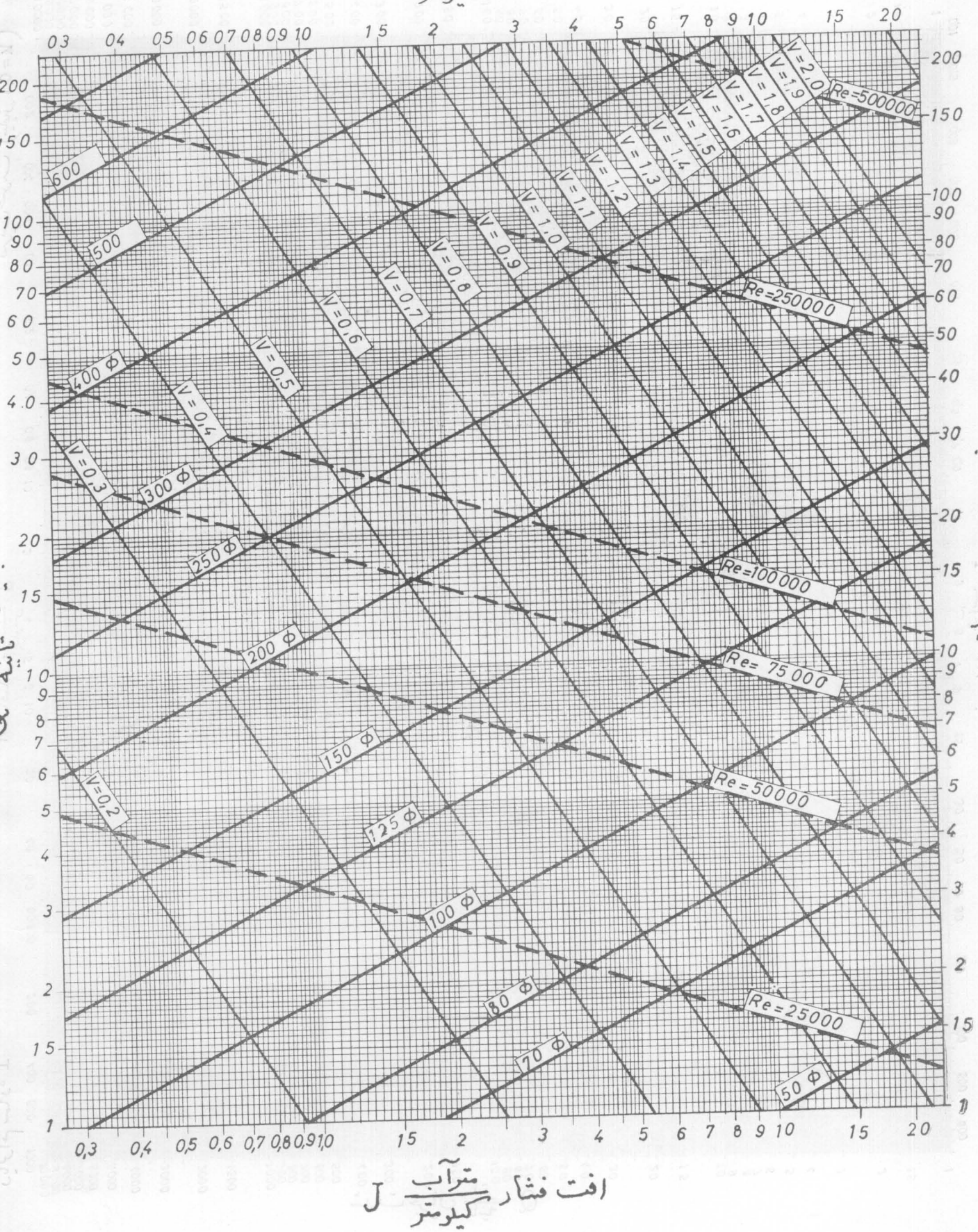
شدت جریان Q $\frac{\text{لیتر}}{\text{ثانیه}}$




دیاگرام شماره ۱
ضریب خشونت (میلیمتر) (k = 0.1)
افت فشار کیلومتر
شدت جریان Q لیتر ثانیه
افت فشار کیلومتر شراب
Re=2000000
Re=1000000
Re=800000
Re=600000
Re=400000
Re=200000
Re=100000
Re=80000
Re=60000
Re=40000
v=0.1
v=0.2
v=0.3
v=0.4
v=0.5
v=0.6
v=0.7
v=0.8
v=0.9
v=1.0
v=1.1
v=1.2
v=1.3
v=1.4
v=1.5
v=1.6
v=1.7
v=1.8
v=1.9
v=2.0
v=2.5
v=3.0
v=3.5
1900 d
1800 d
1700 d
1600 d
1500 d
1400 d
1300 d
1200 d
1100 d
1000 d
900 d
800 d
700 d
600 d
500 d
400 d
300 d
250 d
200 d
175 d
150 d
125 d
100 d
80 d
70 d
60 d
50 d
40 d

۹۳

دیاگرام شماره III



مسئله ۱ـ از یک لوله جریانی برابر ثانیه/لیتر $Q=۱۰۰$ عبور مینماید هرگاه اندازه افت فشار کیلومتر/متر $J=۲$ باشد مطلوبست تعیین قطر لوله.

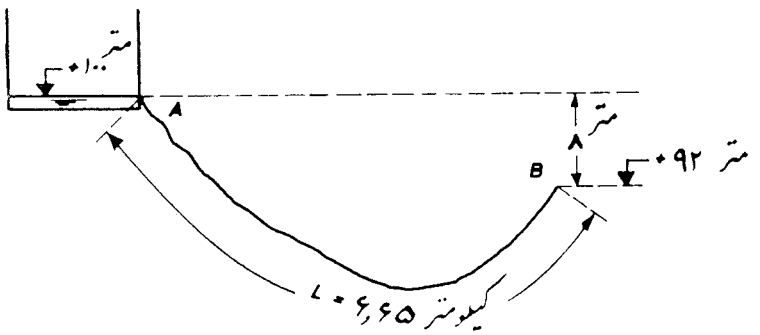
حل: حالت اول ـ لوله مزبور بعنوان انشعاب اصلی تلقی میشود در اینصورت دیاگرام I (میلیمتر $k=۰٫۱$) مورد استفاده قرار میگیرد. نقطه تلاقی خط قائم ازمحل کیلومتر/متر ۲ وخط افقی ازمحل ثانیه/لیر $Q=۱۰۰$ بین نمودار لوله های میلیمتر $\Phi=۳۰۰$ و میلیمتر $\Phi=۴۰۰$ قرار دارد و البته بیشتر نزدیک $\Phi=۴۰۰$ است بنابراین لوله بقطر ۴۰۰ میلیمتر را انتخاب مینمایند.

ازلوله مزبور بازاء همان افت فشار کیلومتر/متر ۲ جریان آبی معادل ثانیه/لیتر $Q=۱۱۷$ عبور مینماید که قدری بیشتر از میزان مورد نظر میباشد ضمناً سرعت آب درلوله برابر ثانیه/متر ۹۶٫ خواهد بود با انتخاب قطر ۳۰۰ میلیمتر حداکثر میتوان ثانیه/لیتر $Q=۵۵$ ازلوله عبورداد.

حالت دوم ـ لوله مزبور بعنوان انشعاب فرعی در نظرگرفته میشود در اینصورت دیاگرام II (میلیمتر $k=۰٫۴$) مورد استفاده قرارمیگیرد مجدداً ازهمان لوله بقطر ۴۰۰ میلیمترجریان ثانیه/متر $Q=۱۱۰$ با سرعت ثانیه/متر $V=۰٫۸۵$ را با همان شرایط میتوان عبور داد.

مسئله ۲ـ ازیک برج آب A که پائین ترین سطح آب درآن درارتفاع متر ۱۰۰+ قرار داردبتوسط لوله بطول کیلومتر $L=۶٫۶۵$ جریانی برابر ثانیه/لیتر $Q=۱۵$ به نقطه B که سطح آزاد آب درآن درارتفاع ۹۲+ قرار دارد رسانیده میشود مطلوبست تعیین قطرلوله وسرعت آب.

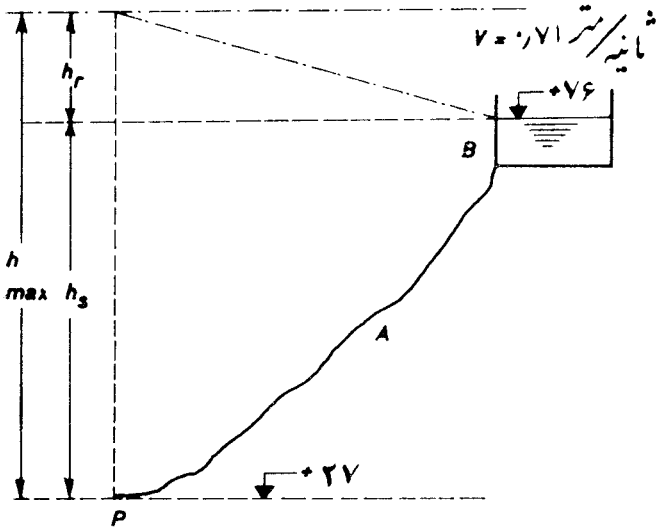
حل: اختلاف ارتفاع متر $۸=۹۲-۱۰۰$ نظیر انرژی میباشد که درطول ۶٫۶۵ کیلومتر در تمام لوله توسط اصطکاک از بین میرود بنابراین کیلومتر/متر $J=\frac{۸}{۶۶۵۰}=۱٫۲$ بنابراین با استفاده ازدیاگرام I (یعنی میلیمتر $k=۰٫۱$) برای ثانیه/لیتر $Q=۱۵$ نزدیکترین قطر میلیمتر $\Phi=۲۰۰$ میباشد که بازاء آن



کیلومتر/متر $J=۱٫۳۶$ خواهد شد در اینصورت متر $h=L.J=۶٫۶۵\times۱٫۳۶=۹٫۰۵$ طبق دیاگرام I برای کیلومتر/متر $J=۱٫۲$ وقطرمیلیمتر $\Phi=۲۰۰$ فقط ثانیه/لیتر $Q=۱۴$ میتوان ازلوله مزبورعبورداد بنابراین بایستی مشخص نمود که مقدارمزبور کافیست ویا اینکه ارتفاع نقطه B را میتوان به متر $۱۰۰-۹٫۰۵=۹۰٫۹۵$

تقلیل داد درغیراین دوصورت بایستی لولهٔ بقطر ۲۵۰ میلیمتر انتخاب نمودوبااین لوله برای کیلومتر/متر۱ر۲=J از لوله مزبور جریانی برابر ثانیه/لیتر ۲۵ر۰=Q را با سرعت ثانیه/متر ۰ر۵۴=V میتوان عبور داد.

مسئله ۳ـ انشعاب فرعی: برای رسانیدن آب به یک منبعی B که برروی برجی قرار گرفته وسطح آزاد آب درمنبع درارتفاع متر ۷۶+ قرار دارد درنقطه P در ارتفاع متر۲۷+ تلمبه کار گذاشته شده وآب ازنقطه P واقع برروی محور تلمبه توسط لوله A بطول ۶ کیلومتر به‌منبع مزبور انتقال پیدا نموده وسپس لوله مزبور بعنوان انشعاب فرعی برای تأمین آب مشروب یک محله مورد استفاده قرار میگیرد هرگاه سرعت آب درلوله درحدود ثانیه/متر۸ر۰=V انتخاب شود مطلوبست تعیین قطرلوله واندازه فشار درمحل محورتلمبه.



حل: ازدیاگرام II (میلیمتر۴ر۰=k) برای ثانیه/لیتر۵۰=Q وثانیه/متر۶۱ر۰=V لوله بقطر ۳۰۰ میلیمتر افقی برابر: کیلومتر/متر۹۵ر۱=J را نشان میدهدارتفاع تلف شده درنتیجه اصطکاک متر ۷ر۱۱=۶×۱ر۹۵=$L_x^{\S}J=h_f$ است و نظر باینکه اختلاف ارتفاع وضعی سطح آب نسبت بمحور تلمبه برابراست با: متر ۴۹=۲۷−۷۶=h_s بنابراین

$h_{max}=h_f+h_s=۱۱ر۷+۴۰=۶۰ر۷$

و فشار برروی محور تلمبه ۶۰ر۷ متر و یا ۶ اتمسفر میباشد.

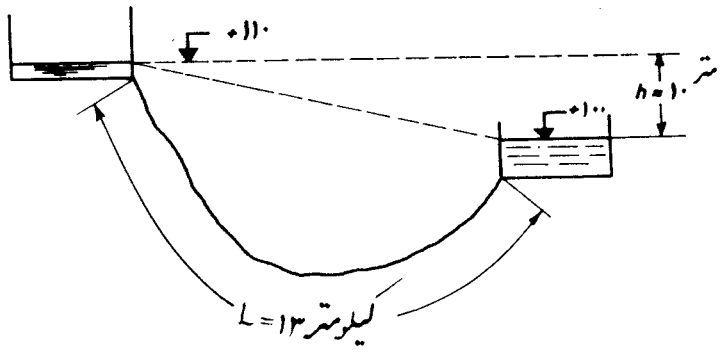
مسئله ۴ـ ازلوله بقطر میلیمتر ۵۰۰=Φ وبطول ۳۵ کیلومتر جریان ثانیه/لیتر۲۲۵=Q عبور نموده و افت فشار برای این جریان در تمام طول مزبور برابر است با متر۱۲۶=h_r. نظر باینکه مدت بیست سال ازلوله مزبور بهره‌برداری شده تعیین کنید قدرت آبرسانی لوله مزبور چند درصد قدرت اولیه آن میباشد.

جواب: افت فشار دریک کیلومتر عبارتست ازکیلومتر/متر ۳ر۶=$\frac{۱۲۶}{۳۵}=\frac{h}{L}=J$ دیاگرام I (میلیمتر ۱ر۰=k) نشان میدهدکه برای J=۳ر۶ وقطر میلیمتر ۵۰۰=Φ ثانیه/لیتر ۲۹۰=Q میباشد وچون درحال حاضر ثانیه/لیتر ۲۲۵=Q میباشد میتوان گفت بعد ازبیست سال بهره برداری قدرت آبرسانی لوله مزبور٪۷۸=۱۰۰×$\frac{۲۲۵}{۲۹۰}$ قدرت اولیه آن میباشد.

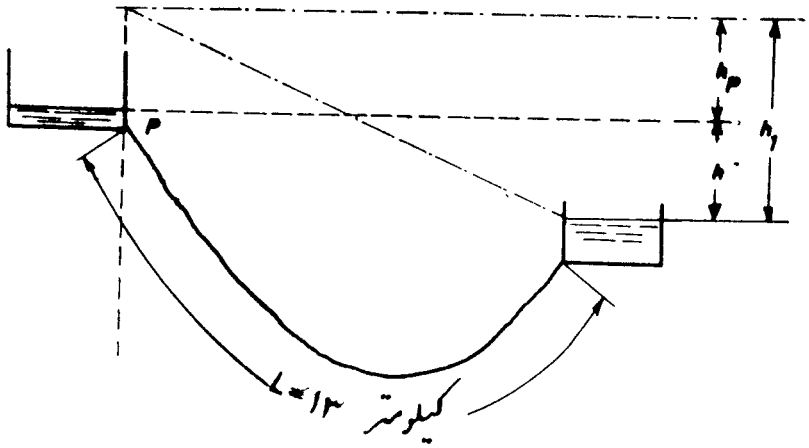
مسئله ۵ـ یک انشعاب اصلی بقطر ۲۵۰ میلیمتر وبطول ۱۳ کیلومتر دو مخزن را که اختلاف سطح

ثابت آب بین آنها ۰٫۱ متراست بهم مرتبط میسازد مطلوبست تعیین راه حلی بطوریکه بتوان اندازه آبده لوله را باندازه ثلث مقدار آن اضافه نمود.

حل : کیلومتر/متر ۰٫۷۷ $= \frac{10}{13} = \frac{h}{L} = J$ طبق دیاگرام I (میلیمتر ۰٫۱ $= k$) برای لوله بقطر ۲۵۰ میلیمتر وافت فشار کیلومتر/متر ۷۶ر. ثانیه/لیتر ۲۰ $= Q$ و ثانیه/متر ۰٫۴۲ $= V$ خواهد بود. هرگاه بنا باشد که شدت جریان مزبور باندازه $\frac{1}{3}$ زیاد شود ثانیه/لیتر ۳۰ـ۲۷ $= 20 \times 1{,}33 = Q$ راه حل‌های مختلفی وجود دارند که ذیلاً مورد بررسی قرارمیگیرند.



راه حل ۱ـ بلافاصله درمحل اتصال مخزن فوقانی به لوله تلمبه تعبیه میشود مانند شکل پائین طبق دیاگرام I برای‌ثانیه/لیتر ۳۰ $= Q$ وقطرلوله ۲۵۰ میلیمترافت فشاردر واحد طول کیلومتر/متر ۱٫۶ $= J_1$



وثانیه/متر ۰٫۶۴ $= V$ است بنابراین اندازه کلیه فشاری که بایستی تأمین شود عبارت خواهد بود از:

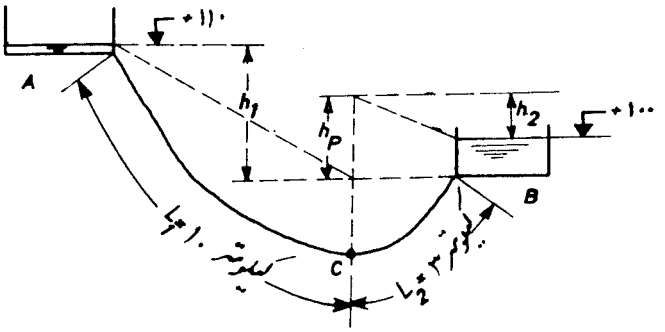
$$h_1 = L J_1 = 13 \times 1{,}6 = 20{,}8 \text{ متر}$$

فشاری که بایستی توسط تلمبه تأمین شود (ارتفاع نظیر فشار) عبارتست از:

$$h_P = h_1 - h = 20{,}8 - 10 = 10{,}8 \text{ متر}$$

راه حل ۲ـ دریک نقطه C روی شاه لوله که فواصل آن از مخازن A وB بترتیب ۳٫۱ کیلومتر میباشند تلمبه را کار میگذارند در اینصورت برای طول کیلومتر ۱۰ $= L_1$ افت‌فشار درنتیجه اصطکاك برابر

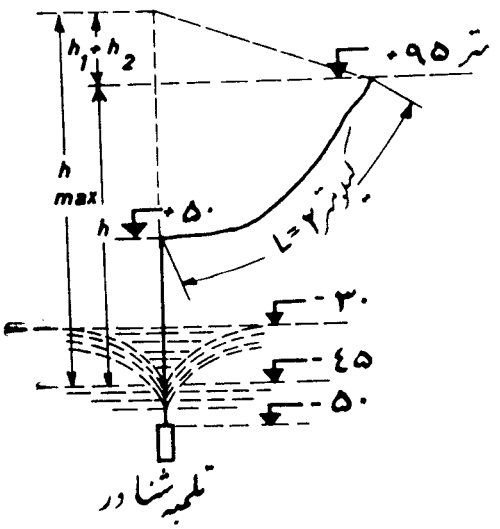
است بامتر ۱۶ = ۱٫۶ × ۱۰ = $h_1 = L_1 J_1$ برای طول کیلومتر ۳ = L_2 افت فشار درنتیجه اصطکاك برابراست با متر ۴٫۸ = ۱٫۶ × ۳ = $h_2 = L_2 J_1$ افت فشار درنتیجه اصطکاك برای تمام طول لوله عبارتست از:
متر ۲۰٫۸ = ۴٫۸ + ۱۶ = $h_1 + h_2$ نظر باینکه اختلاف سطح بین سطح آزاد آب در دو مخزن فقط ۱۰ متر میباشد دراینصورت تلمبه که درنقطه C کارگذاشته میشود بایستی فشاری برابر:
۱۰٫۸ = ۱۰ − ۲۰٫۸ = $h_P = h_1 + h_2 - h$ را تأمین نماید.



مسئله ٦ـ درسطح زمینی که ارتفاع وضع هندسی آن ۵۰+ متر میباشد چاه عمیقی حفر گردیده است سطح آب زیرزمینی دراین نقطه درارتفاع ۳۰− متر (بفاصله ۸۰ متر ازسطح زمین) قرار دارد.

ازمحل چاه مزبور لوله بقطر ۲۵۰ میلیمتر وبطول دو کیلومتر آب را بمحل مصرفی درنقطه بارتفاع ۹۵+ متر میرساند. در نتیجه آبگیری سطح آب زیر زمینی در محل چاه ۱۵ متر پائین آمده و در ارتفاع ۴۵− متر قرار میگیرد. تلمبه شناور چاه عمیق ۵ متر پائین‌تر یعنی درارتفاع ۵۰− متر قرارگرفته و بتوسط لوله بقطر ۱۵۰ میلیمتر آب را تا سطح زمین میرساند. مطلوبست تعیین حداکثرارتفاع نظیر انرژی که توسط تلمبه شناور بایستی تأمین شود تا یک کیلوگرم آب از درون چاه بمحل مصرفی رسانده شود.

حل: ارتفاع نظیرانرژی مزبور تشکیل میشود ازیک ارتفاع استاتیکی h که عبارتست‌ازاختلاف ارتفاع بین محل استفاده و پائین ترین نقطه سطح آب زیر زمینی درموقع بهره‌برداری ازتلمبه:



۱۴۰ = (۴۵−) − ۹۵+ = h و همچنین ارتفاع h_1 نظیر افت فشار درلوله واقعه درون چاه بقطر ۱۵۰ میلیمتر(افت فشار از تلمبه تا سطح زمین) بعلاوه ارتفاع h_2 نظیر افت فشاردرلوله‌آبرسانی بمقطع ۲۵۰ میلیمتر ازسطح زمین درمحل چاه تا نقطهٔ که آب بمصرف میرسد بنابراین:
$h_{max} = h + h_1 + h_2$. طول لوله ۱۵۰ میلیمتری درون چاه‌عبارتست‌ازمتر ۱۰۰ = (۵۰−) − ۵۰ یعنی ۱٫۰ کیلومتر

از دیاگرام II (میلیمتر ٤ر٠=k) برای لوله بقطر ۱۰ میلیمتر و آبده ثانیه/لیتر ۳۰=Q اندازه سرعت برابر است با ثانیه/متر ۱ر۷=V و اندازه افت فشار برابر است با متر ۲ر۵=۲۵×۰ر۱=$h_1=L_1J_1$ از همان دیاگرام برای لوله بقطر ۲۵ میلیمتر اندازه سرعت ثانیه/متر ٦۱ر٠=V و اندازه افت فشار ثانیه/متر ۳ر۷=۲×۱ر۸۵=$h_2=L_2J_2$ خواهد بود حداکثر ارتفاع نظیر انرژی عبارت خواهد بود از متر ۲ر۱٤٦=۳ر۷+۲ر۵+۱٤۰=$h_{max}=h+h_1+h_2$ دراینجا افت فشار در نتیجه اصطکاك در لوله‌ها محاسبه شده و لازمست افت‌فشار در نتیجه تغییر ناگهانی مقطع در محل اتصالی‌ها وغیره را نیز منظور نموده وبدان اضافه نمایند.