



درس مهندسی و مدیریت آب شهری
شبکه‌های توزیع آب

جلسه پنجم: تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار

Head Driven Simulation Method

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
مدرس: دکتر محمد شاه‌سوندی

ضرورت تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار

■ شبیه‌سازی مبتنی بر تقاضا (Demand Driven Simulation Method) DDSM

مقدار برداشت از گره‌ها ثابت و برابر تقاضای گرهی است که بدون توجه به فشار گره‌ها تامین می‌شود. این روش تنها در شرایط عادی که حداقل فشار استاندارد برای تامین تقاضای آب وجود دارد، معتبر است.

■ شبیه‌سازی مبتنی بر فشار (Head Driven Simulation Model) HDSM یا (Pressure Dependent Analysis) PDA

رابطه بین دبی خروجی گره و فشار صراحتاً در نظر گرفته می‌شود. کاربرد این نوع تحلیل شبیه‌سازی سیستم در شرایط بهره‌برداری و شرایط بحرانی مانند شکست هیدرولیکی و مکانیکی سیستم و یا تقاضای بیش از حد است.

رابطه دبی-فشار گره‌ای

- حداقل فشار مطلق گرهی H_j^{min} : حداقل هدی است که به ازای مقادیر کمتر از آن هیچ جریانی از گره قابل برداشت نیست.
- حداقل هد مطلوب گرهی H_j^{des} : حداقل هدی است که برای مقادیر کمتر از آن، بخشی از نیاز گرهی قابل تامین بوده و در هدهای بیشتر از آن تمام نیازهای گرهی قابل تامین است.

روابط بدون حد بالا برای میزان برداشت

$$Q_j^{avl} = S_j (H_j - H_j^{min})^{\frac{1}{n_j}}$$

S_j : مقدار ثابت وابسته به مشخصات گره خروجی

n_j : توان رابطه (بین 1.5 تا 2)

- این روابط برای حالاتی که خروجی آنها کاملاً کنترل نشده‌اند مناسبتر هستند (سیستم‌های آبیاری؛ آتش‌نشانی، نشت و غیره). لذا این روابط برای شبکه‌های توزیع آب نمی‌توانند بیانگر شرایط واقعی سیستم جز برای توصیف مقادیر مصرف کنترل نشده باشند.

رابطه دبی-فشار گره‌ای

روابط با حد بالا برای میزان خروجی

▪ رابطه Wagner et al. (1988)

$$\begin{cases} Q_j^{avl} = Q_j^{req} & ; \text{if } H_j > H_j^{des} \\ Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left(\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right)^{\frac{1}{n_j}} & ; \text{if } H_j^{min} < H_j \\ Q_j^{avl} = 0 & ; \text{if } H_j \leq H_j^{min} \end{cases}$$

Q_j^{avl} : دبی در دسترس

H_j^{des} : حداقل هد مطلوب گرهی

Q_j^{req} : دبی مورد نیاز گرهی

H_j^{min} : حداقل تراز محل خروجی جریان از گره

▪ در شرایط عدم وجود اطلاعات میدانی در رابطه با H_j^{min} ، برابر با تراز ارتفاعی زمین در نظر گرفته می‌شود.

▪ حداقل هد استاندارد H_j^{des} ، که برای مقادیر کمتر از آن تقاضای گرهی بطور کامل تامین نمی‌شود می‌تواند حدود ۱۴ تا ۱۵ متر در نظر گرفته شود.

▪ رابطه فوق، ارتباط دبی و فشار را تا آستانه H_j^{des} بررسی کرده و برای فشارهای بیشتر از آن رابطه‌ای ارائه نکرده است.

رابطه دبی-فشار گره‌ای

روابط با حد بالا برای میزان خروجی

■ حداقل فشار استاندارد در محل انشعاب بر اساس تعداد طبقات ساختمان متغیر است. با توجه به نشریه ۳-۱۱۷ بازنگری اول، این مقدار را می‌توان در محدوده 14 تا 26 m در نظر گرفت.

■ حداقل هد استاندارد را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$H_j^{des} = H_j^{min} + R_j (Q_j^{req})^{n_j}$$

R_j : ضریب تجربی مقاومت در گره j

$$n_j = 2$$

$9 < Q_j < 20 \frac{lit}{min}$ (در شرایط جریان حداکثر روزانه)

$$\left(\frac{s^2}{m^5}\right) 21000 < R_j < 100000$$

رابطه فشار گره‌ای - دبی خروجی

روابط با حد بالا برای میزان خروجی

■ رابطه Wu et al. (2009)

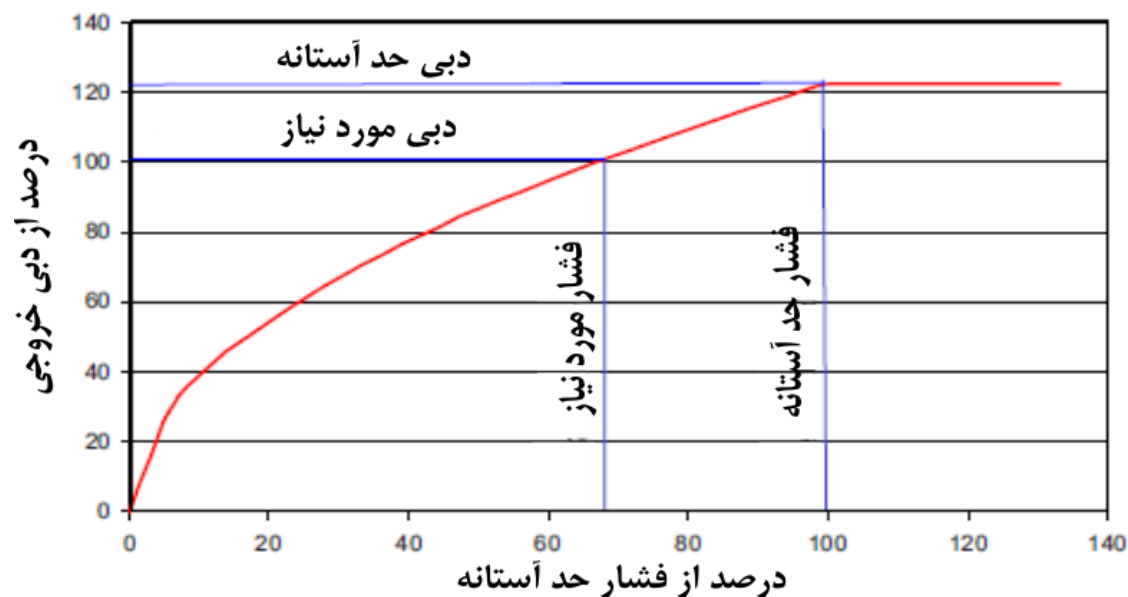
P^t : فشار حد یا آستانه

P^{req} : حداقل فشار مورد نیاز گرهی

Q_j^{req} : دبی مورد نیاز گرهی

Q_j^{avl} : دبی در دسترس گرهی

$$\begin{cases} Q_j^{avl} = 0 & \text{if } P_j \leq 0 \\ Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left(\frac{P_j}{P^{req}} \right)^{\frac{1}{n}} & \text{if } 0 < P_j < P^{req} \\ Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left(\frac{P^t}{P^{req}} \right)^{\frac{1}{n}} & \text{if } P_j > P^t \end{cases}$$



رابطه فشار گره‌ای - دبی خروجی

روابط با حد بالا برای میزان خروجی

- هنگامی که فشار به حد آستانه رسید، دبی خروجی از گره دیگر افزایش نیافته و ثابت باقی می‌ماند. این حد آستانه برای اکثر مصارف وجود دارد.
- اما در مواردی مانند نشت، هیچ حد آستانه‌ای وجود نداشته و همواره با افزایش فشار دبی خروجی نیز افزایش می‌یابد.
- در رابطه Wu et al. (2009) تمامی دبی خروجی از گره وابسته به فشار جریان‌های خروجی در نظر گرفته شده است و هیچ تفکیکی بین قسمت حجمی و قسمت وابسته به فشار جریان خروجی انجام نشده است.

رابطه فشار گره‌ای - دبی خروجی

روابط با حد بالا برای میزان خروجی

■ رابطه Tabesh et al. (2014)

$$Q_j^{avl} = 0 \quad ; \text{if } H_j < H_j^{min}$$

$$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left[\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad ; \text{if } H_j^{min} < H_j < H_j^{des}$$

$$Q_j^{avl} = Q_a + Q_b \left[\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad ; \text{if } H_j^{des} < H_j < H_j^{max}$$

$$Q_j^{avl} = Q_a + Q_b \left[\frac{H_j^{max} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad ; \text{if } H_j > H_j^{max}$$

$$H_j^{max} = 2H_j^{des} ; Q_a = a\%Q_j^{req} ; Q_b = b\%Q_j^{req} ; a\% + b\% = 100\%$$

■ H_j^{max} را باید برابر با فشار ترکیدگی لوله در نظر گرفت؛ اما چون این فشار تابع جنس لوله‌هاست، بعنوان یک تخمین

برابر $2H_j^{des}$ در نظر گرفته می‌شود. a و b را نیز می‌توان 50% در نظر گرفت.

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ در تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، معادلات دبی-هد در معادلات پایه جریان ماندگار اعمال می‌شود. معمولاً روش‌های نیوتن-رافسن و گرادیان برای این منظور مناسب‌ترند.

■ معادلات اصلی روش نیوتن-رافسن

■ قانون پیوستگی برای هر گره j :

$$\left[\sum_{ij \in IJ_j} Q_{ij} \right] - \left[\sum_{rj \in IJ_j} Q_{ij} \right] = Q_j ; \quad \forall j = 1, \dots, N_j$$

IJ_j : نماینده تمام لوله‌های متصل به گره j

NJ : تعداد گره‌ها در کل شبکه، Q_j : میزان برداشت از گره j

با استفاده از رابطه هیزن-ویلیامز ($n=1.852$):

$$F_j = \left[\sum_{ij \in IJ_j} \left(\frac{H_i - H_j}{R_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]_{in} - \left[\sum_{ij \in IJ_j} \left(\frac{H_i - H_j}{R_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]_{out} - Q_j^{avl} = 0$$

سایر اجزاء شبکه (مثل شیر، پمپ و مخزن) به طریق مشابه در معادلات در نظر گرفته می‌شوند.

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ وارد کردن وابستگی فشار و دبی خروجی از گره‌ها در معادلات حاکم

$$F_j = \sum_{i=1}^{NJ_j} \left[\frac{|H_i - H_j|}{R_{ij}} \right]^{0.54} \text{sgn}(H_i - H_j) - Q_j^{req} \left[\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right]^{0.5} = 0$$

$$H_j^{min} < H_j < H_j^{des}$$

NJ_j : نشان دهنده تعداد گره‌های با اتصال مستقیم به گره j و $\text{sgn}(H_i - H_j)$ علامت جریان در لوله ij است.

اگر $H_j < H_j^{min}$ باشد، عبارت دوم صفر خواهد شد و اگر $H_j^{des} < H_j$ باشد، برابر Q_j^{req} خواهد بود.

■ رابطه فوق به روش تکراری حل خواهد شد:

$$J^m \Delta H^m = -F(H^m)$$

$$H^{m+1} = H^m - \Delta H^m$$

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ اجزای ماتریس ژاکوبین برای هر معادله گره‌ای بصورت زیر هستند:

$$\frac{\partial F_j}{\partial H_i} = \frac{0.54}{R_{ij}} \left[\frac{|H_i - H_j|}{R_{ij}} \right]^{-0.46} = \frac{\partial F_i}{\partial H_j} ; \quad \forall j, \forall i: i \neq j$$

$$\frac{\partial F_j}{\partial H_j} = -\frac{0.54}{R_{ij}} \sum_{i \in I_j} \left[\frac{|H_i - H_j|}{R_{ij}} \right]^{-0.46} - \frac{0.5 Q_j^{req}}{(H_j^{des} - H_j^{min})} \left[\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right]^{-0.5}$$

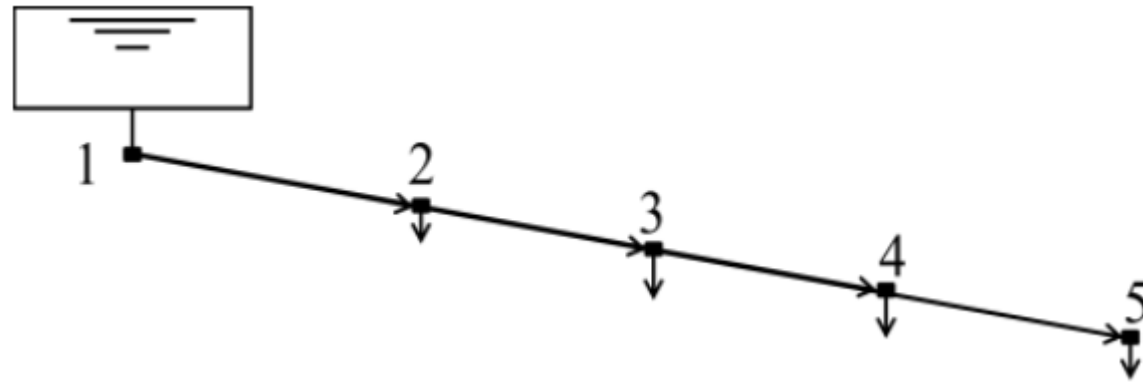
■ تغییرات جزئی در معادلات اصلی روش گرادیان نیز در رویکرد HDSM ایجاد می‌شود.

■ روش HDSM از دو جنبه زمان اجرا و تعداد تکرار افزایش جزئی نسبت به روش DDSM دارد. لذا این روش

می‌تواند بعنوان یک ابزار مناسب در مدیریت بهره‌برداری از شبکه و ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده شود.

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

- مثال ۱: در شبکه سریالی زیر طول و ضریب هیزن ویلیامز برای تمامی لوله‌ها بترتیب برابر 1000 m و 130 است. قطر لوله‌های ۱ تا ۴ بترتیب برابر با 300، 350، 400 و 300 mm است. ضریب مقاومت گره (R_j) و توان جریان موجود (n_j) بترتیب برابر $360 \text{ s}^2/\text{m}^5$ و 2 است.



شبکه را به دو روش DDSM و HDSM تحلیل کنید و نتایج را مقایسه کنید.

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ حل:

جدول - مشخصات گره‌ها و نتایج آنالیز شبکه مثال

نتایج				اطلاعات ورودی			گره
HDSM		DDSM					
Q_j^{avl} (m ³ /min)	H_j (m)	Q_j^{avl} (m ³ /min)	H_j (m)	Q_j^{req} (m ³ /min)	H_j^{des} (m)	H_j^{min} (m)	
۸/۳۸۱	۱۰۰/۰۰۰	۱۱/۰۰۰	۱۰۰/۰۰۰	۱۱/۰	**۱۰۰/۰	-	*۱
-۲/۰۰۰	۹۷/۰۵۳	-۲/۰۰۰	۹۵/۱۳۱	-۲/۰	۹۰/۴	۹۰/۰	۲
-۲/۰۰۰	۹۳/۶۴۷	-۲/۰۰۰	۸۸/۶۹۸	-۲/۰	۸۸/۴	۸۸/۰	۳
-۰/۳۸۱	۹۰/۰۱۵	-۳/۰۰۰	۸۰/۱۳۹	-۳/۰	۹۰/۹	۹۰/۰	۴
-۴/۰۰۰	۸۶/۹۸۲	-۴/۰۰۰	۷۷/۱۰۳	-۴/۰	۸۶/۶	۸۵/۰	۵

* مخزن و ** هد موجود در مخزن

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ حل:

جدول - مقادیر خروجی گره‌ها به ازای مقادیر مختلف هد مخزن در مثال

کل آب ورودی به شبکه (m ³ /min)	مقدار دبی خروجی (m ³ /min) در گره:				هد مخزن (m)
	۵	۴	۳	۲	
۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰	۸۵/۰۰
۲/۴۲۴	-۲/۴۲۴	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰	۸۸/۸۷
۴/۳۵۰	-۲/۵۶۰	-۰/۰۰۰	-۱/۷۹۰	-۰/۰۰۰	۹۰/۸۸
۶/۲۱۴	-۲/۵۹۲	-۰/۰۰۰	-۲/۰۰۰	-۱/۶۲۱	۹۱/۹۶
۶/۶۴۵	-۲/۶۴۵	۰/۰۰۰	-۲/۰۰۰	-۲/۰۰۰	۹۲/۳۳
۸/۰۰۰	-۴/۰۰۰	-۰/۰۰۰	-۲/۰۰۰	-۲/۰۰۰	۹۸/۵۰
۸/۰۰۰	-۴/۰۰۰	-۰/۰۰۰	-۲/۰۰۰	-۲/۰۰۰	۹۸/۸۴
۱۱/۰۰۰	-۴/۰۰۰	-۳/۰۰۰	-۲/۰۰۰	-۲/۰۰۰	۱۱۰/۸۹

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ مثال ۲: شبکه چهار حلقه‌ای زیر را به روش DDSM و HDSM تحلیل کنید.

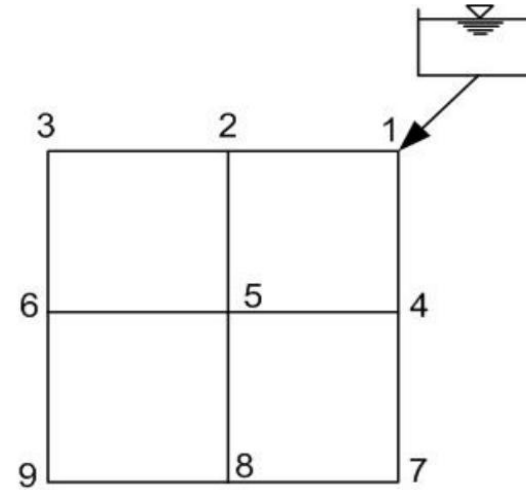
$$l = 1000m$$

$$C = 130$$

$$H_r = 100 m$$

$$Demand_{1-8} = 0.0208 m^3/s$$

$$Demand_9 = 0.0625 m^3/s$$



جدول - اطلاعات قطر لوله‌ها

لوله	۴-۱ و ۲-۱	۷-۴ و ۳-۲	۵-۴ و ۵-۲	۸-۷ و ۶-۳	۸-۵ و ۶-۵	۹-۸ و ۹-۶
قطر (mm)	۲۵۰	۱۷۵	۱۴۵	۱۱۵	۱۰۰	۱۰۰

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ حل:

جدول - نتایج تحلیل DDSM و HDSM برای شبکه مثال

نتایج				اطلاعات ورودی			گره
HDSM		DDSM					
Q_j^{avl} (m ³ /s)	H_j (m)	Q_j^{avl} (m ³ /s)	H_j (m)	Q_j^{req} (m ³ /s)	H_j^{des} (m)	H_j^{min} (m)	
۰/۱۷۲۰	۱۰۰/۰۰۰	۰/۲۰۸۱	۱۰۰/۰۰۰	۰/۲۰۸۱	**۱۰۰/۰	–	*۱
–۰/۰۲۰۸	۸۸/۲۱۱	–۰/۰۲۰۸	۸۳/۱۷۴	–۰/۰۲۰۸	۳۰	۰	۴ و ۲
–۰/۰۲۰۸	۷۱/۳۸۲	–۰/۰۲۰۸	۵۷/۱۰۶	–۰/۰۲۰۸	۳۰	۰	۷ و ۳
–۰/۰۲۰۸	۷۲/۰۰۷	–۰/۰۲۰۸	۵۶/۷۸۳	–۰/۰۲۰۸	۳۰	۰	۵
–۰/۰۲۰۸	۳۶/۷۳۰	–۰/۰۲۰۸	–۲۰/۳۳۸	–۰/۰۲۰۸	۳۰	۰	۸ و ۶
–۰/۰۲۶۲	۵/۲۸۲	–۰/۰۶۲۵	–۱۷۷/۶۳۳	–۰/۰۶۲۵	۳۰	۰	۹

* مخزن و ** هد موجود در مخزن

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ حل:

جدول - نتایج تفکیکی روش HDSM با فرمول اصلاح شده دبی - فشار

گره	Q_a (m ³ /s)	Q_b (m ³ /s)	Q_j^{ext} (m ³ /s)
۱ (مخزن)	۰/۰۷۲۸	۰/۱۱۹۵	-
۲ و ۴	-۰/۰۱۰۴	-۰/۰۱۴۷	-۰/۰۰۴۳
۳ و ۷	-۰/۰۱۰۴	-۰/۰۱۴۷	-۰/۰۰۴۳
۵	-۰/۰۱۰۴	-۰/۰۱۴۷	-۰/۰۰۴۳
۶ و ۸	-۰/۰۱۰۴	-۰/۰۱۰۸	-۰/۰۰۴
۹	-	-۰/۰۲۴۴	۰
اضافه برداشت آب			-۰/۰۲۲۳

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ مثال ۳: در مثال قبل فرض کنید که نیازهای گرهی در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز متفاوت است (جدول ضرایب الگوی

مصرف زیر را در نظر بگیرید). شبکه را مجدداً به روش DDSM و HDSM تحلیل کنید.

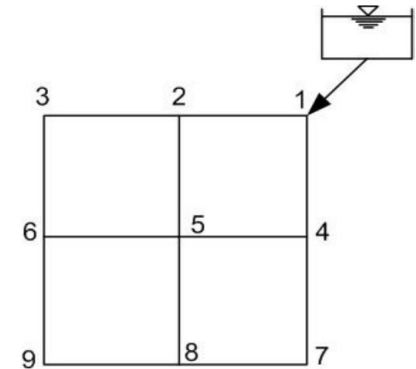
$$l = 1000m$$

$$C = 130$$

$$H_r = 100 m ; P^{des} = 30m$$

$$Demand_{1-8} = 0.0208 m^3/s$$

$$Demand_9 = 0.0625 m^3/s$$



جدول - اطلاعات قطر لوله‌ها

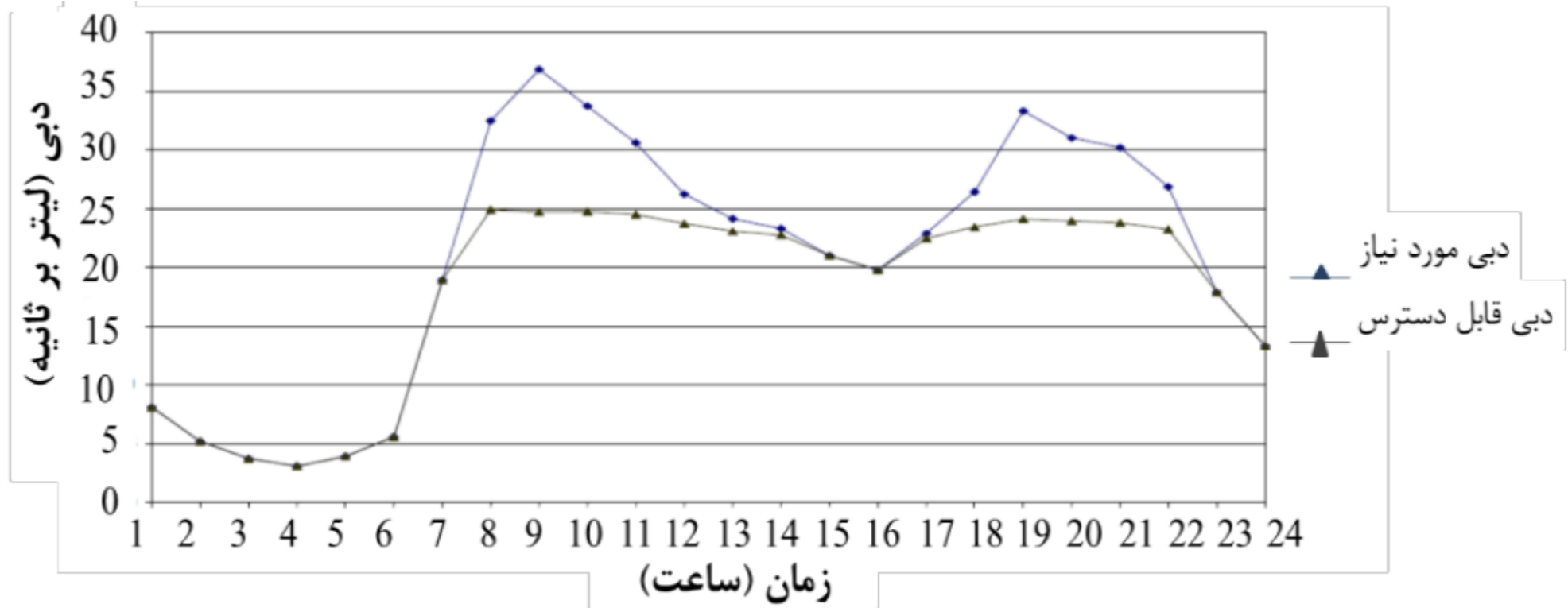
لوله	۴-۱ و ۲-۱	۷-۴ و ۳-۲	۵-۴ و ۵-۲	۸-۷ و ۶-۳	۸-۵ و ۶-۵	۹-۸ و ۹-۶
قطر (mm)	۲۵۰	۱۷۵	۱۴۵	۱۱۵	۱۰۰	۱۰۰

جدول - ضرایب مصرف ساعتی

T (hr)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
ضریب	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۹۱	۱/۵۶	۱/۷۷	۱/۶۲	۱/۴۷	۱/۲۶
T (hr)	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
ضریب	۱/۱۶	۱/۱۲	۱/۰۱	۰/۹۵	۱/۱	۱/۲۷	۱/۶	۱/۴۹	۱/۴۵	۱/۲۹	۰/۸۶	۰/۶۴

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

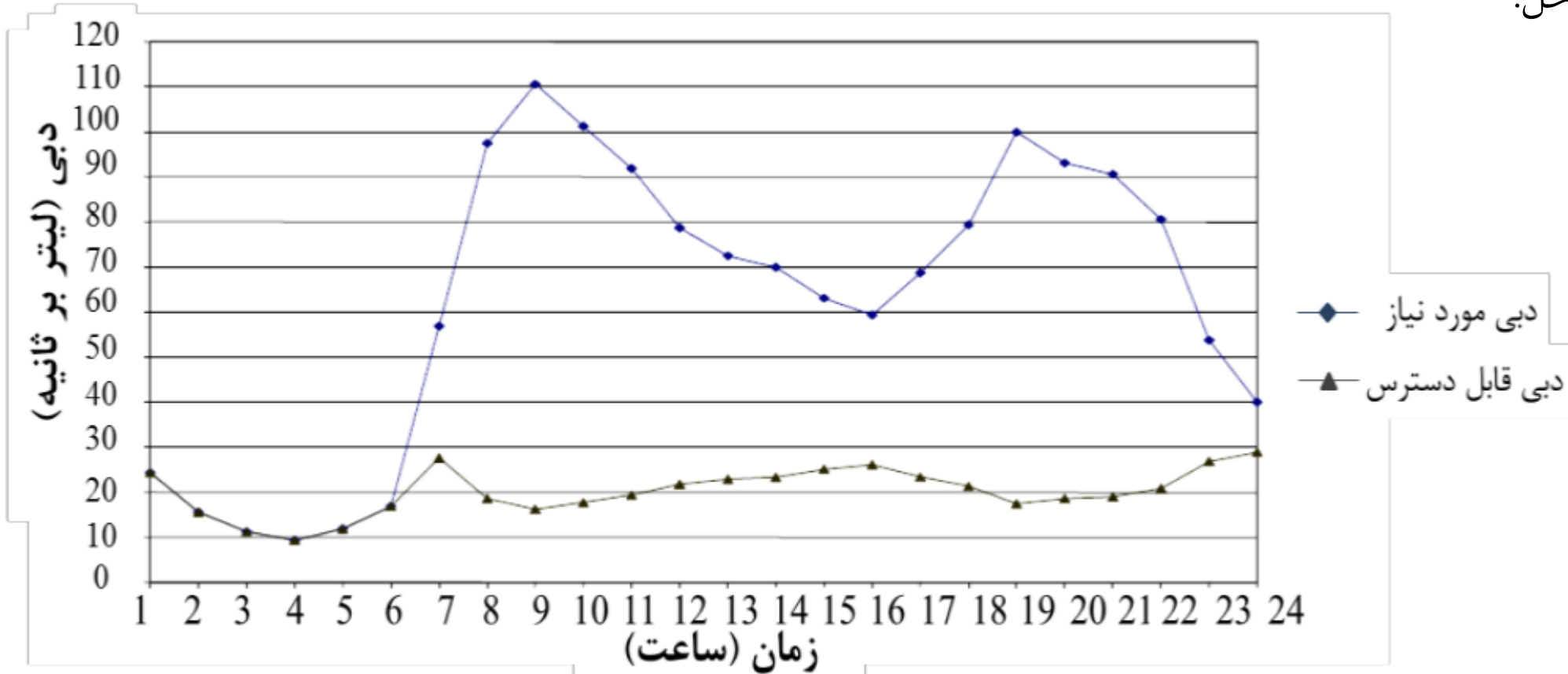
■ حل:



شکل - مقایسه دبی مورد نیاز (Q^{req}) و قابل دسترس (Q^{avl}) در گره‌های ۶ و ۸

تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)

■ حل:



شکل - مقایسه دبی مورد نیاز (Q^{req}) و قابل دسترس (Q^{avl}) در گره ۹