

معیارهای قابلیت تحلیل شبکه‌های توزیع آب شهری

* امیر تائبی هرندی

چکیده

شبکه‌های توزیع آب تحت فشار از نظر هیدرولیکی، در صورتی قابل تحلیل هستند که مقادیر پارامترهای مجهول آنها را بتوان با کمک مقادیر پارامترهای معلوم بدست آورد. معمولاً در هر شبکه، دبی لوله‌ها مجهول هستند و دیگر پارامترها یعنی هد هیدرولیکی، جریان (صرف یا تغذیه) گره‌ها و ثابت مقاومت لوله‌ها برخی معلوم و بقیه مجهول هستند. برای آنکه تحلیل شبکه امکان پذیر باشد، تعداد پارامترهای مجهول و نحوه توزیع آنها در سراسر شبکه باید به گونه‌ای باشند که بتوان به تعداد کافی معادله مستقل برای آن شبکه تعریف نمود.

در این تحقیق، معیارهای پیشنهاد شده حاکم بر تعداد و توزیع پارامترهای مجهول شبکه‌های توزیع آب شهری مورد مطالعه قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تدوین و معرفی معیارهای جامع و کلی جهت ارزیابی قابلیت تحلیل شبکه‌های توزیع آب شهری از نتایج این تحقیق می‌باشد.

هد و جریان از گره‌ها و ثابت مقاومت لوله‌ها^۷ (R_x^7) مشخص شوند، دیگر پارامترهای مجهول از قبیل دبی لوله‌ها و قطر نامشخص لوله‌ها و ضریب هیزن - ویلیامز (یا فاکتور اصطکاک دارسی - ویسباخ) نامشخص لوله‌ها را می‌توان تعیین نمود. چنانچه پارامترهای مجهول در یک قسمت از شبکه و

مقدمه

پارامترهای مجهول در تحلیل شبکه‌های توزیع آب تحت فشار معمولاً دبی لوله‌ها (Q_x)، هد گره‌های صرف^۱ (H_j) و جریان ورودی به گره‌های چشممه^۲ (q_j) می‌باشند. گاهی در هنگام واسنجی^۳ یک شبکه موجود، ضریب هیزن - ویلیامز^۴ (C_{HWx}) یا ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ^۵ (f_x) تعدادی از لوله‌ها مجهول بوده و گاهی نیز هنگام طراحی یک شبکه جدید، برای تأمین یک الگوی جریان^۶ مطلوب، قطر تعدادی از لوله‌ها (D_x) مجهول می‌باشند. به طور کلی، چنانچه

* استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

1- Demand nodal heads

2- Source nodes

3- Calibration

4- Hazen - Williams coefficient

5- Darcy - Weisbach friction factor

7- Pipe resistance constant

پارامترهای معلوم در قسمت دیگر شبکه متصرف کری باشند، مقدار تمام پارامترهای مجھول را نمی توان تعیین نمود. بنابراین، برای آنکه تحلیل هر شبکه ممکن باشد، تعداد پارامترهای مجھول و نحوه توزیع آنها در سراسر شبکه باید به گونه ای باشد که بتوان تعداد معادلات مستقل کافی برای آن شبکه فرموله نمود. هدف از این تحقیق بررسی، مقایسه و شناسایی نقاط ضعف و قوت معیارهای پیشنهاد شده توسط دیگر محققان بوده و در نهایت جامعترین آنها مشخص و معرفی شده اند.

معیارهای پیشنهاد شده

شامیر و هووارد [۱] احتمالاً اوین محققانی بودند که روی مسئله حل پذیری شبکه های توزیع آب مطالعه نمودند. آنها در ابتداء معیارهایی وضع نمودند و سپس آنها را تکمیل کردند [۲ و ۳]. این معیارها که بدون اثبات محکم ریاضی و به طور تجربی از بررسی ترکیهای مختلف مجھولها به دست آمدند عبارتنداز:

۱- تعداد کل مجھولها (به جز دبی لوله ها) باید مساوی تعداد کل گره های شبکه باشد.

۲- حداقل یک گره باید دارای هد معلوم باشد.

۳- هر گره با مصرف مجھول باید به حداقل یک گره باشد.

۴- در هر زیرشبکه شامل یک لوله با مقاومت مجھول و دو گره انتها یک آن، نباید بیش از یک مجھول دیگر (به جز دبی لوله ها) وجود داشته باشد. یعنی آن مجھول اضافی باید هد یا جریان یکی از دو گره انتها یک آن لوله باشد.

۵- در هر گره، حداقل یکی از موارد: (الف) مصرف گره، (ب) هد همان گره یا یکی از گره های مجاور آن یا (ج) مقاومت یکی از لوله های متصل به گره باید باشد.

۶- در هر گره یا یکی از گره های مجاور آن یا (ج) گوفمن و رُده [۴] با استفاده از نظریه گراف^۱ معیارهایی جهت حل پذیری شبکه های توزیع دارای لوله های با مشخصات مولدهای هد^۲ را به لوله های اطلاق نمودند که هر شبکه قادر مجھول دارند. در بسط این معیارها فرض شده که هر شبکه قادر مولدهای هد، فقط یک حل منحصر به فرد دارد. بنابراین

شبکه ای که در غیاب مولدهای هد قابل حل باشد، با وجود مولدهای هدی که معیارهای زیر را ارضاء کنند نیز قابل حل خواهد بود. معیارهای گوفمن و رُده کلی نیستند، زیرا در باره تعداد و توزیع گره های با هد و جریان مجھول هیچ گونه بحثی به عمل نیاورده اند. این معیارها عبارتنداز:

۱- گره های با هد معلوم باید یک عدد بیشتر از مولدهای هد باشند.

۲- برای هر شبکه خاص G، زیر شبکه G باید به گونه ای یافت شود که:

الف - تمام مولدهای هد و گره های با هد معلوم متعلق به G باشند.

ب - G غیر حلقوی (شاخه ای) باشد.

ج - مسیری از G که دو گره با هد معلوم را بهم وصل کند، حاوی حداقل یک مولد هد باشد.

باوی [۵ و ۶] معیارهای زیر را پیشنهاد نمود:

۱- معیار تعداد مجھولها - در هر شبکه تعداد مجھولها (به جز دبی لوله ها) باید مساوی تعداد گره های آن باشد.

۲- معیار حداقلها - در هر شبکه باید حداقل هد یک گره معلوم و جریان یک گره مجھول باشد.

۳- معیار تخصیص - در هر گره، حداقل یکی از موارد: (الف) جریان گره، (ب) هد همان گره یا یکی از گره های مجاور آن یا (ج) مقاومت یکی از لوله های متصل به گره باید مجھول باشد. برای ارضاء این معیار، دو یا چند گره نباید مجھول یکسان داشته باشند. یعنی، هر گره از شبکه باید یک مجھول اختصاص یابد و هیچ مجھولی نباید به بیش از یک گره تخصیص داده شود.

۴- معیار مسیر - هر لوله با مقاومت مجھول باید در مسیر مستقلی واقع شود که دو گره با هد معلوم را بهم متصل شد، معیار تعداد مجھولها (معیار اول باوی) به خود ارضاء می شود. با این حال، ضرورت وجود معیار تعداد گره های شبکه می باشد.

تمام معیارهای پیشنهاد شده تجربی بوده و از بررسی

1- Graph theory 2- Head generators

معادلات پیوستگی جریان^۱ در گره ها به دست آمده اند و اثبات ریاضی محکمی پشتونه آنها نیست. معادلات پیوستگی جریان در گره ها بر حسب هد گره ها، موسوم به معادلات H، به صورت زیر می باشد [۷،۸]:

$$(1) \quad J = q + \frac{H_1 - H_2}{R_x^{1/n}}$$

که در آن H_i و q به ترتیب هد گره های بالادست و پایین دست لوله R_x ثابت مقاومت لوله q دبی مصرف یا تغذیه در گره J تعداد کل گره های شبکه و n توان در فرمول افت هد^۲ لوله است. در فرمول افت هد هیزن - ویلیامز مساوی ۱/۸۵۲ و در فرمولهای دارسی - ویسباخ و مانینگ^۳ مساوی ۲ است.

بحث و مقایسه

معیار اول باوی همانند معیار اول شامیر و هووارد است و این معیار تضمین کننده وجود تعداد معادلات مستقل مساوی با تعداد مجھول های شبکه می باشد. معیار دوم باوی که شبیه و کاملتر از معیار دوم شامیر و هووارد است، تضمین کننده حضور گره ای به عنوان گره مرجع^۴ برای تعیین مقدار هد دیگر گره ها نسبت به آن و نیز تضمین کننده حضور گره ای با جریان مجھول برای برقراری تراز جریان در کل گره های شبکه می باشد. به علاوه، دلیل دیگری که حضور گره های با جریان مجھول را ضروری می نماید آن است که علی رغم برقراری تراز جریان در کل گره های شبکه، یکی از معادلات پیوستگی جریان مستقل نیست و تعداد معادلات مستقل موجود، یکی کمتر از تعداد گره های شبکه می باشد.

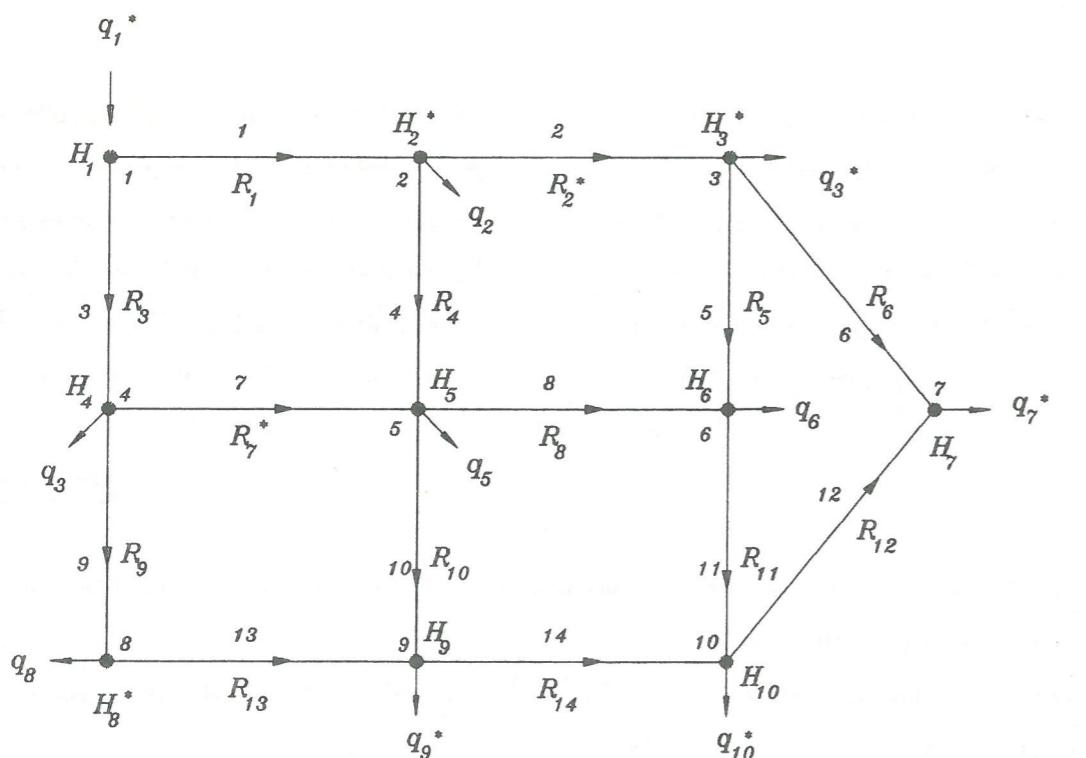
معیارهای سوم و چهارم باوی توأم تضمین کننده نحوه درست توزیع پارامترهای مجھول در سراسر شبکه می باشند. قابل تذکر آنکه وقتی معیار تخصیص (معیار ۳ باوی) ارضاء شد، معیار تعداد مجھولها (معیار اول باوی) به خود ارضاء می شود. با این حال، ضرورت وجود معیار تعداد

مجھولها همچنان به قوت خود باقی است. بررسی شرایط ارضای معیارهای ۱ و ۲ باوی در هر شکه کار آسانی است. برای بررسی شرایط ارضای معیار^۳ باوی، باید جریان مجھول گره را فقط به گره مربوطه، مقاومت مجھول لوله را فقط به یکی از دو گره انتهایی آن، هد مجھول گره را فقط به گره مربوطه یا یکی از گره های متصل به آن اختصاص داد. بنابراین، هنگام کنترل برقراری معیار تخصیص برای حل پذیری شبکه، در ابتداء جریان مجھول گره ها باید به گره های مربوطه اختصاص داده شوند و سپس مقاومت مجھول لوله ها و جریان مجھول گره ها به دیگر گره ها تخصیص بابند.

معیار تخصیص، معیار کامل و کافی برای شبکه هایی است که فاقد لوله هایی با مقاومت مجھول باشند. برای شبکه های دارای لوله با مقاومت مجھول، معیار مسیر (معیار ۴ باوی) به عنوان تکمیل کننده معیار تخصیص، ضرورت پیدا می کند. برای ارضای معیار مسیر، تعداد گره های با هد معلوم باید حداقل یکی بیشتر از تعداد لوله های با مقاومت مجھول باشند. در ضمن همان طور که بیان شد، مسیرها باید مستقل باشند و هر مسیر نباید بیش از یک لوله با مقاومت مجھول را در برگیرد. به طور مثال، در شبکه شکل ۱ که حروف ستاره دار *_۱, *_۲, *_۳, *_۴, *_۵, *_۶, *_۷, *_۸, *_۹, *_{۱۰} معرف پارامترهای مجھول آن هستند، هر سه معیار اول باوی ارضاء می شوند. لیکن مشاهده می شود که از مسیر متصل کننده دو گره ۲ و ۵ با هدهای معلوم، نمی توان مقادیر منحصر به فردی برای R_۲, R_۵, H_۳, H_۶, H_۹ و R_{۱۰} بدست آورد. اگر در این مسیر فقط یکی از دو پارامتر R_۲ یا R_۵ وجود می داشت یا یکی از دو مجھول H_۳ یا H_۶ معلوم می بود، شبکه حل منحصر به فرد پیدا می کرد.

1- Flow continuity equations
2- Head loss

3- Manning
4- Reference node



شکل ۳- شبکه مثال نمایشی

می شود. با تعیین مقدار R_7^* از معادله H در گرده ۵ مقدار H_7^* و سپس مقادیر q_1^* , q_2^* و q_3^* از معادلات پیوستگی به ترتیب در گرههای ۱، ۲ و ۳ به دست می آیند.

قابل توجه آن که در این شبکه، گرده ۷ با جریان مجھول q_7^* به دو گرده ۳ و ۱۰ با جریانهای مجھول q_9^* و q_{10}^* متصل است. بنابراین معیار ۳ شامیر و هووارد ارضاء نمی شود. به علاوه در زیر شبکه حاوی لوله ۲ با مقاومت مجھول R_2^* و دو گرده انتهایی ۲ و ۳ آن، مقادیر H_2^* , H_3^* و q_3^* مجھول هستند و بنابراین معیار ۴ شامیر و هووارد نیز نقص شده است. ملاحظه شد که با وجود ارضاء نشدن معیار ۳ و ۴ شامیر و هووارد، شبکه همچنان قابل حل است و این بدان معنی است که دو معیار ۳ و ۴ شامیر و هووارد نادرست و غیر ضروری هستند.

نتیجه گیری

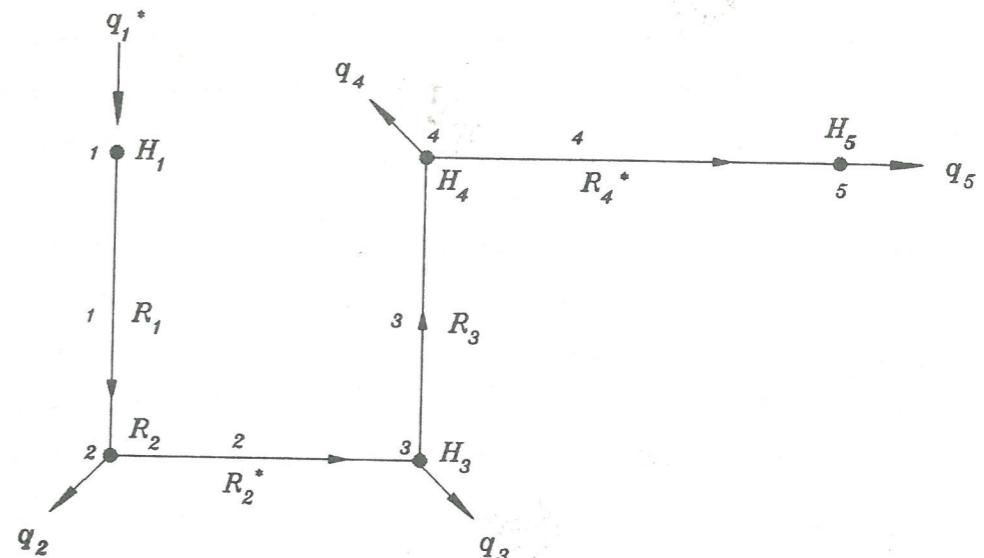
نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- معیارهای گوفمن و رُدّه کلی و جامع نیستند و برای همه حالات شبکه های توزیع آب عمومیت ندارد.
- معیارهای ۳ و ۴ شامیر و هووارد نادرست و غیر ضروری هستند و معیار ۵ آن نیز ناقص است.

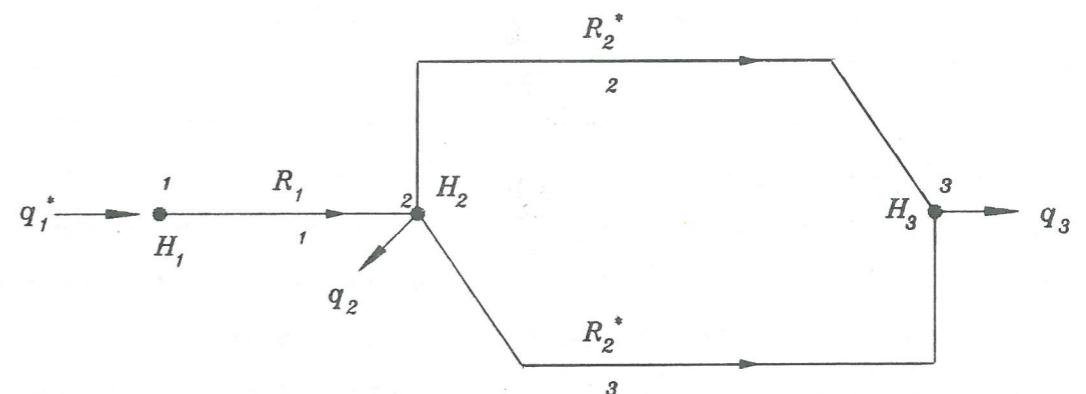
شبکه، معیار تخصیص به طور منحصر به فرد ارضاء می شود، در صورتی که ممکن است در بعضی از شبکه های این معیار به چندین گرده های ۱، ۲ و ۳ به دست می آید.

لوله ۷ با مقاومت مجھول R_7^* روی مسیری واقع است که گرده های با هد معلوم ۴ و ۵ را به هم متصل می کند. لوله ۲ با مقاومت مجھول R_2^* روی مسیری واقع است که گرده های ۱، ۲، ۳ و ۶ را به هم متصل می کند. برای لوله ۲، مسیر بدیل مسیری است که گرده های ۵، ۲، ۳ و ۶ را به هم وصل می کند. به علاوه این دو مسیر مستقل تواناً شکل شاخه ای دارند و هیچ حلقه ای را تشکیل نمی دهند. بنابراین، معیار مسیر (معیار ۴ باوی) نیز ارضاء گردید.

چون تمام معیارهای پیشنهادی باوی ارضاء شدند، شبکه باید حل منحصر به فرد داشته باشد. صحبت این مطلب را می توان با نوشتن معادلات H برای تمام گرده ها بررسی نمود. مقادیر H_8^* , H_8^* , H_{10}^* و q_{10}^* به طور مستقیم و به ترتیب از معادلات H برای گرده های ۶، ۸ و ۱۰ به دست می آیند. با استفاده از مقدار به دست آمده H_8^* ، مقدار q_7^* از معادله H در گرده ۷ به دست می آید. به طور مشابه، با مقدار به دست آمده H_8^* ، مقدار R_7^* از معادله H در گرده ۴ و مقدار q_9^* از معادله H در گرده ۹ تعیین



شکل ۱- شبکه غیر حلقوی برای بررسی معیار مسیر



شکل ۲- شبکه حلقوی برای بررسی معیار مسیر

شبکه حلقوی شکل ۲، شرط ضرورت عدم تشکیل حلقه توسط مسیرهای مستقل را در معیار مسیر نشان می دهد. در شبکه شکل ۲، با وجود اینکه برای هر لوله با مقاومت مجھول یک مسیر مستقل وجود دارد، لیکن برای شبکه حل منحصر به فردی وجود ندارد، زیرا دو مسیر یک حلقه را تشکیل می دهند. به بیان دیگر، در هر دو مسیر از ده معلوم H_2^* و H_3^* برای تعیین مقدار R_2^* و q_2^* استفاده شده است.

مثال نمایشی
حل پذیری شبکه شکل ۳ که پارامترهای q_1^* , q_2^* , R_7^* , H_7^* تعیین

شامیر و هووارد را بطرف نموده است.
 ۴- پیشنهاد می‌شود که جهت بررسی حل پذیری شبکه‌های توزیع آب از چهار معیار باوی شامل: (۱) معیار تعداد مجهول، (۲) معیار حداقل‌ها، (۳) معیار تخصیص و (۴) معیار مسیر استفاده شود. این معیارها از درجه اطمینان بیشتری نسبت به دیگر معیارها برخوردار هستند.

۳- معیارهای باوی کلی و جامعتر از دیگر معیارها به نظر می‌رسند و ظاهراً قادر به پیش‌بینی حل پذیری شبکه‌های توزیع آب در کلیه شرایط می‌باشند. معیار اول باوی همانند معیار اول شامیر و هووارد است. معیار ۲ باوی شبیه و جامعتر از معیار ۵ شامیر و هووارد است. معیار ۳ باوی نیز شبیه و جامعتر از معیار ۵ شامیر و هووارد بوده و معیار ۴ باوی عملاً نقص و کمبود معیار ۵

منابع و مراجع:

- 1- Shamir, U., and Howard, C.D.D., (1968). " *Water Distribution Systems Analysis* ", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 94 (Hy1) : 219 - 234.
- 2- Shamir, U., and Howard, C.D.D., (1970). Closure to " *Water Distribution Systems Analysis* ", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 96 (Hy2) : 577 - 578.
- 3- Shamir, U., and Howard, C.D.D., (1977). " *Engineering Analysis of Water-Distribution Systems* ", Journal of American Water Works Association, 69 (9) : 510 - 514.
- 4- Gofman, E., and Rodeh, M., (1981). " *Loop Equations with Unknown Pipe Characteristics* ", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107 (Hy9) : 1047 - 1060.
- 5- Bhave, P.R., (1990). " *Rules for Solvability of Pipe Networks* ", Journal of Indian Water Works Association, 22 (1) : 7 - 10
- 6- Bhave, P.R., (1991). " *Analysis of Flow in Water Distribution Networks* ", Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, Pennsylvania, U.S.A.
- 7- Jeppson, R.W., (1977). " *Analysis of Flow in Pipe Networks* ", Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan, U.S.A.

جوابهای زیر مربوط به سوالات صفحه ۴۹ می‌باشد.

ج ۱- یک واحد پیش‌ساخته‌هواده‌ی ممتد ممکن است دو یا سه قسمت داشته باشد. هدف از هر قسمت عبارت است از:

۱- هواده‌ی: هواده‌ی و اختلاط فاضلاب مورد نظر: بهت تصفیه بالجن فعال.

۲- زلال‌سازی و ته‌نشینی: به منظور جداسازی لجن فعال از فاضلاب تصفیه شده، پساب حاصل از تصفیه از تصفیه خانه خارج شده و لجن ته‌نشین شده مجدد آید استخır هواده‌ی برای تصفیه فاضلاب و روودی برگشت داده می‌شود.

۳- هضم هوای (در صورت نیاز): برای تصفیه لجن فعال.

ج ۲- مشخصات معمول تصفیه باهواده‌ی عبارت است از: زمان ماند طولانی جامدات، غلظت بالای جامدات، مایع مخلوط و نسبت پایین غذابه میکروارگانیسم.