

## تدوین ضوابط طراحی برای کاربرد موازی مدول‌های تیغه‌ای

محمد مهرزاد<sup>1</sup>، صلاح کوچکزاده<sup>2\*</sup>، محمد بی‌جن‌خان<sup>3</sup>

1- دانشجوی تحصیلات تکمیلی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

2- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

3- دانشجوی تحصیلات تکمیلی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

\* کرج، صندوق پستی 31587-4111

skzadeh@ut.ac.ir

**چکیده** - مدول تیغه‌ای برای عبور دادن بده نسبتاً ثابت در دامنه‌ای از تغییرات سطح آب کانال‌ها معرفی شده است. طراحی آن بر ضریب بده تیغه‌ها و ارتفاع آبی - که کنترل جریان از تیغه‌ای به تیغه دیگر منتقل می‌شود - استوار است. این سازه، که می‌تواند نقش مؤثری در تحویل حجمی مناسب در شبکه‌های توزیع آب داشته باشد، معمولاً باید به صورت واحدهای موازی (مزدوج) نصب شود، اما تحقیقات و ضوابط طراحی که تاکنون منتشر شده است، برای یک مدول منفرد بوده است. در این پژوهش ابتدا ضریب بده هر تیغه با در نظر گرفتن اثر حضور تیغه‌های دیگر در جریان تعیین شد و ارتفاع‌های انتقال کنترل، که در طراحی‌های قبلی صرفاً بر اساس روابط نظری فرض می‌شد، با توجه به عملکرد واقعی تدقیق شد. سپس روش طراحی جدید برای مدول تیغه‌ای موازی معرفی شد. روش طراحی پیشنهادی، انحراف بده عبوری از بده طراحی در دامنه گسترده‌ای از تغییرات عمق آب را از حدود متوسط 8% برای روش‌های قبلی به تقریباً  $\pm 1\%$  کاهش داده است. علاوه بر بهبود چشمگیر عملکرد، استقرار موازی مدول‌های تیغه‌ای، طراحی آن را برای افزایش دامنه بده عبوری میسر می‌کند. این امر می‌تواند کاربری سازه در سطوح مختلف شبکه‌های فرعی را گسترش دهد.

**کلیدواژگان:** آبیگرها، اندازه‌گیری جریان، سازه‌های تحویل حجمی، سازه‌های هیدرولیکی، شبکه‌های آبیاری.

### 1- مقدمه

شده است و از این رو سازه‌هایی که طراحی و احداث آن متکی به اطلاعات و دانش بومی است و می‌تواند اثر مهمی بر بهبود توزیع حجمی آب داشته باشد، نیازمند توجه ویژه‌ای است

از میان سازه‌های آبیگر، مدول<sup>1</sup>ها به دلیل تحویل مقدار نسبتاً ثابت بده برای تغییرات رقوم سطح آب کانال تغذیه

با توجه به سهم غالب مصرف آب در بخش کشاورزی و بازده محدود کاربری آن، هر اقدام سخت افزاری و نرم افزاری که بتواند نقشی در ساماندهی مصرف آب داشته باشد، اثر قابل توجهی در جلوگیری از تشدید بحران آب و استفاده مطلوب از منابع خواهد داشت. در این راستا امروزه توجه جدی‌تری نسبت به احداث شبکه‌های فرعی

سازه، دو شمای طراحی پیشنهاد کردند که از شمای اول ابعادی مشابه با روش (Anwar (1999) به دست می‌آید، اما شمای دوم ابعادی متفاوت از روش‌های دیگر ارائه کرد. گلزار (1392)، شاخص جدیدی به نام شاخص ارزیابی تحویل مدول<sup>5</sup> برای بررسی عملکرد سازه ارائه کرد و با کاربرد آن برای داده‌های کیانمهر (1391) و داده‌های بی‌جن‌خان (1388) به این نتیجه رسید که شمای دوم (Bijankhan and Kouchakzadeh (2012) بهترین عملکرد را بین طراحی‌های موجود، ارائه کرده است. اخیراً (Vatankhah (2014) روشی برای طراحی ارائه کرده و پیشنهاد کرد با برقراری روابط حاکم بر عملکرد سازه و حل دستگاه معادلات غیرخطی حاصل، ابعاد سازه تعیین شود.

باید توجه کرد که تمام روش‌هایی که تاکنون پیشنهاد شده است، برای مدول‌های منفرد ارائه شده است، در حالی که در عمل این مدول‌ها باید به صورت موازی (جفت کنار هم) ساخته و نصب شوند تا کاربری آنها در دامنه بده‌های قابل توزیع در شبکه‌های فرعی میسر شود. در این پژوهش معیار طراحی جدیدی برای مدول تیغه‌ای یک پارچه که به صورت موازی نصب می‌شود، ارائه شده است. روش جدید کمترین انحراف از بده‌های طراحی بین تمام روش‌های منتشر شده تاکنون را دارد.

## 2- اصول کلی حاکم بر طراحی مدول‌ها

شالوده تمام روش‌های طراحی مدول تیغه‌ای بر رابطه (1) که رابطه بده-اشل دریچه کشویی است، استوار است (Rajaratnam and Subramanya, 1976).

$$q = C_d a \sqrt{2gH} \quad (1)$$

که در آن،  $q$  بده واحد عرض،  $C_d$  ضریب بده جریان،  $a$  بازشدگی دریچه،  $g$  شتاب ثقل و  $H$  ارتفاع آب بالادست دریچه‌ی کشویی است.

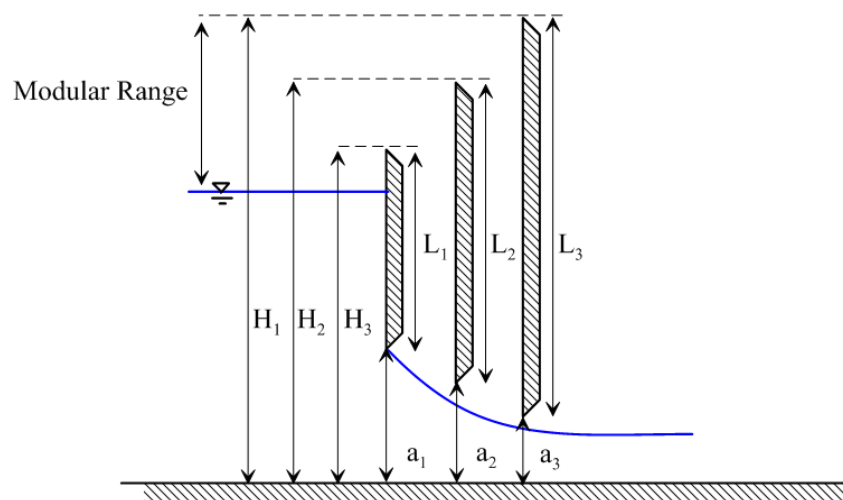
کننده که به دامنه مدولار<sup>1</sup> معروف است، مورد توجه طراحان قرار گرفته‌اند. از این نوع سازه، مدول نیرپیک<sup>2</sup> و آبگیرهای روزنه‌ای با هد ثابت<sup>3</sup> بیشترین استفاده در شبکه‌های آبیاری کشور را دارند، اما به دلیل فقدان اطلاعات کافی برای ساخت مدول نیرپیک و مشکلات بهره‌برداری از مدول روزنه با بار آبی ثابت، معضلات ناشی از نصب این دو سازه در شبکه‌های آبیاری کشور زیاد است. از این رو بهتر است از سازه‌ای استفاده شود که ضوابط مشخصی برای طراحی آن موجود و جزئیات ساخت آن معلوم باشد.

سازه مدول تیغه‌ای برای اولین بار توسط Mishra et al. (1990) معرفی شد. این سازه از سه دریچه ثابت تشکیل شده است که ارتفاع آنها در جهت جریان افزایش و بازشدگی‌شان کاهش پیدا می‌کند (شکل 1).

(Mishra et al. (1990) انحراف از بده طراحی را برای این سازه در دامنه تغییر عمق 10 تا 15 سانتی‌متر،  $\pm 5\%$  گزارش کردند. (Maheswara et al. (1996) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییر ابعاد و استغراق پایین دست بر عملکرد این سازه پرداختند. (Anwar (1999) با بکارگیری ضریب بده دریچه کشویی<sup>4</sup> معمولی که توسط Swamee (1992) ارائه شده است، روش طراحی پیشنهاد نمود که از دیدگاه نظری عملکرد این سازه را باید بهبود می‌داد، اما بی‌جن‌خان و همکاران (1388) نشان دادند انحراف بده روش طراحی (Mishra et al. (1990) بیش از مقدار گزارش شده می‌باشد و روش (Anwar (1999) نه تنها بهبودی در عملکرد ایجاد نکرد، بلکه در دامنه مدولار مورد مطالعه، انحراف بده تحویلی از بده طراحی بیش از روش قبلی بود.

(Bijankhan and Kouchakzadeh (2012) با توجه به مفهوم حساسیت هیدرولیکی و به منظور بهبود عملکرد

1. Modular Range
2. Neyrpic Module
3. Constant Head Orifice (C.H.O)
4. Sluice-gate



شکل 1 شمایی از یک مدول تیغه‌ای منفرد

برای پیش‌بینی عملکرد مدول طراحی شده به روش Mishra et al. (1990) بهتر است از رابطه ضریب بده ارائه شده توسط Mishra, (1989) استفاده کرد.

$$C_d = 0.489 \left( \frac{a}{H} \right)^{-0.075} \quad (6)$$

Mishra (1989) همچنین رابطه ضریب بده برای حالت ریزشی از تک دریچه،  $C_{dw}$ ، را بررسی و رابطه (7) را برای تعیین آن پیشنهاد کرد.

$$C_{dw} = 0.892 \left( \frac{H_w}{L} \right)^{0.2022} \quad (7)$$

که در آن  $H_w$  ارتفاع ریزش و  $L$  ارتفاع تیغه می‌باشد. لازم به ذکر است که هر دو رابطه (6) و (7) برای تک تیغه به‌دست آمده و از تأثیر دیگر تیغه‌ها بر ضریب بده صرف‌نظر شده است.

Anwar (1999) برای به‌دست آوردن ابعاد مدول تیغه‌ای از رابطه (1) و ضریب بده Swamee (1992) که از داده‌های Henry (1950) به‌دست آمده است، استفاده کرد.

$$C_d = 0.611 \left( \frac{H - a}{H + 15a} \right)^{0.072} \quad (8)$$

در شکل 2 بده محاسباتی بدست آمده از رابطه (1) بر اساس روش‌های مختلف طراحی در مقابل بده به‌دست آمده از آزمون کیانمهر، (1391) برای بده طراحی 2 لیتر بر ثانیه ترسیم شده است.

برای ضریب بده،  $C_d$ ، روابط متعددی پیشنهاد شده است (برای مثال، Rajaratnam and Subramanya, 1967; Swamee, 1992; Mishra et al., 1989; Alhamid, 1998).

Mishra et al. (1990) در روش طراحی خود دامنه مدولار را برای بده‌های مختلف طراحی از مقدار کمینه  $H_1 = 15 \text{ cm}$  تا مقدار بیشینه  $H_3 = 25 \text{ cm}$  در نظر گرفتند و برای به‌دست آوردن ارتفاع تیغه دوم از کف رابطه زیر را پیشنهاد کردند.

$$H_2 = \sqrt{H_1 H_3} \quad (2)$$

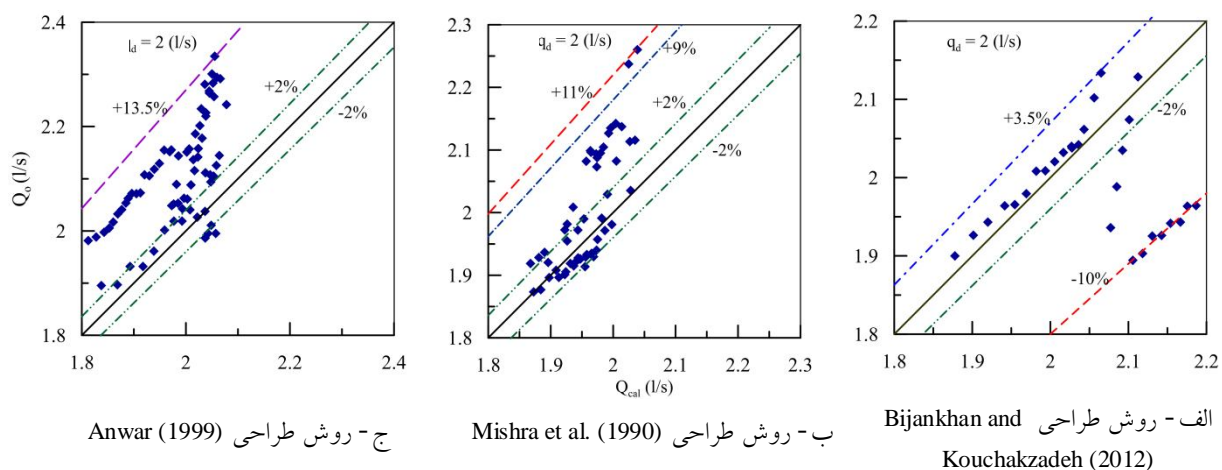
که مقدار آن برابر  $H_2 = 0.194 \text{ m}$  به دست می‌آید. حال با توجه به معلوم شدن مقادیر  $H$  برای به‌دست آوردن میزان بازشدگی مربوط به تیغه‌های اول، دوم و سوم، یعنی،  $a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  به ترتیب از روابط (3)، (4) و (5) استفاده کرد (Mishra et al., 1990).

$$\frac{a_1}{H_1} = 1.5419 \left( \frac{q}{H_1 \sqrt{gH_1}} \right)^{1.108} \quad (3)$$

$$\frac{a_2}{H_2} = 1.5489 \left( \frac{q}{H_2 \sqrt{gH_2}} \right)^{1.104} \quad (4)$$

$$\frac{a_3}{H_3} = 1.5577 \left( \frac{q}{H_3 \sqrt{gH_3}} \right)^{1.1096} \quad (5)$$

در روابط فوق  $q$  بده در واحد عرض است.



شکل 2 مقایسه بین بده محاسباتی و بده مشاهداتی

تیغه منفرد اتفاق می‌افتد، متفاوت است. در نتیجه به‌دست آوردن ضریب بده برای هر تیغه با در نظر گرفتن تأثیر متقابل تیغه‌های قبلی (بالادستی) ضروری است.

- در تمامی روش‌ها فرض شده است که با رسیدن عمق آب به لبه هر تیغه، کنترل جریان به تیغه بعدی منتقل می‌شود. اما Mishra et al. (2013) و Kouchakzadeh and golzar (2014) نشان داده‌اند که کنترل به دریاچه پایین‌دست در عمقی بیشتر از آنچه که تاکنون فرض شده، منتقل خواهد شد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- ضرایب بده تیغه‌ها

برای تدقیق نحوه به‌کارگیری ضرایب بده، ابتدا داده‌های بده-اشل برداشت شده مدول تیغه‌ای توسط بی‌جن‌خان (1388) و کیانمهر (1391) که برای بده‌های مختلف طراحی (2، 4، 5 و 7 لیتر بر ثانیه) آزمون شده بود، مورد تجزیه و تحلیل مجدد قرار گرفت. داده‌های به کار گرفته شده به منظور بدست آوردن ضرایب بده هر تیغه برای دامنه گسترده‌ای از بازشدگی تیغه‌ها یعنی از 2 تا 8 سانتی‌متر برداشت شده بود. داده‌های موجود بر اساس مراحل کارکرد مدول تیغه‌ای که در Mishra et al. (2013) و Kouchakzadeh and Golzar (2014) تبیین شده است،

بدیهی است که برای بدست آوردن بده محاسباتی از ضریب بده پیشنهاد شده در همان روش طراحی استفاده شده است.

کیانمهر (1391) برای به‌دست آوردن ضریب بده مناسب برای مدول تیغه‌ای آزمایش‌های گسترده‌ای انجام داد. ایشان از یک تک دریاچه با ابعاد مشابه با مدول تیغه‌ای با دامنه گسترده‌ای از بازشدگی (2 تا 7 سانتی‌متر) استفاده کرد تا نتایجی متناسب با ابعاد مدول تیغه‌ای به‌دست آید. در نهایت با استفاده از شکل معادله (1992) Swamee و با تصحیح ضرایب آن با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، رابطه (9) را برای ضریب بده مدول تیغه‌ای پیشنهاد کرد.

$$C_d = 0.646 \left( \frac{H-a}{H+15a} \right)^{0.0595} \quad (9)$$

با توجه به شکل 2 بین بده اندازه‌گیری شده مدول‌ها و مقادیر مورد انتظار نظری تمامی روش‌های طراحی که تا کنون مورد آزمایش قرار گرفته، اختلاف قابل توجهی مشاهده می‌شود، که می‌توان آن را به دلایل زیر منسوب کرد:

- ضرایب بده به‌کار رفته در روش‌های مختلف طراحی مدول تیغه‌ای مربوط به آزمون تک دریاچه می‌باشد، در حالی که ضریب بده تیغه دوم و سوم مدول، به دلیل پیچیدگی هیدرودینامیک جریان با آنچه که برای

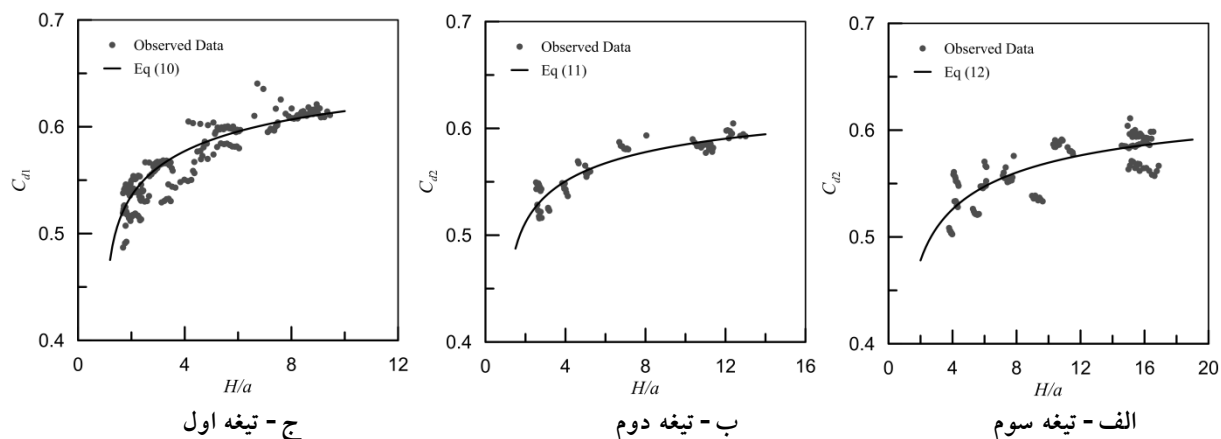
$$C_{d3} = 0.6286 \left( \frac{H_3 - a_3}{H_3 + 15a_3} \right)^{0.09661} \quad (12)$$

تغییرات ضریب بده در مقابل  $H/a$  برای روابط (10) تا (12)، Mishra (1989)، Swamee (1992) و رابطه کیانمهر (1391) در شکل 4 ترسیم شد. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که ضرایب بده تیغه‌ها وقتی باهم کار می‌کنند، با زمانی که تیغه به صورت منفرد عمل می‌کند، متفاوت است. رابطه Mishra (1989) تقریباً نشان دهنده مقدار متوسط و نزدیک به ضریب بده تیغه دوم است.

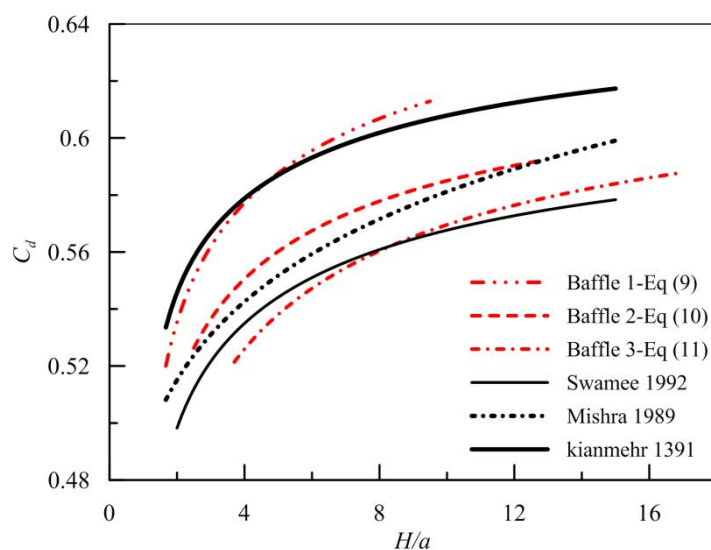
جداسازی و برای هر تیغه به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا شکل کلی رابطه پیشنهادی (1992) Swamee بر اساس داده‌های یاد شده برای تیغه‌های اول، دوم و سوم به کار رفت که به ترتیب به روابط (10) تا (12) منجر شد. در شکل 3 داده‌های به کار رفته و روابط استخراج شده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی ترسیم شده است.

$$C_{d1} = 0.6644 \left( \frac{H_1 - a_1}{H_1 + 15a_1} \right)^{0.07622} \quad (10)$$

$$C_{d2} = 0.6307 \left( \frac{H_2 - a_2}{H_2 + 15a_2} \right)^{0.07368} \quad (11)$$



شکل 3 ضرایب بده استخراج شده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی



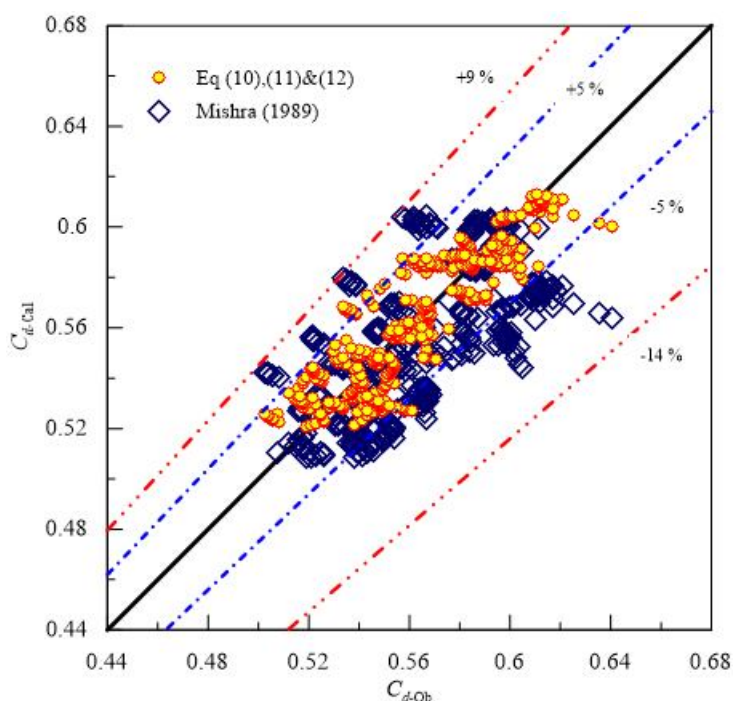
شکل 4 مقایسه ضرایب بده پیشنهادی برای مدول تیغه‌ای با روابط سایر محققان

شکل 6 خطای استفاده از رابطه (1992) Swamee برای هر سه تیغه در مقایسه با روابط پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که استفاده از رابطه ضریب (1989) Mishra برای هر سه تیغه خطایی معادل با  $+9\%$  و  $-12\%$  (شکل 5) و کاربرد رابطه (1992) Swamee برای هر سه تیغه خطایی معادل  $+5\%$  و  $-12\%$  (شکل 6) دارد. در حالی که روابط پیشنهادی (10) تا (12) این تحقیق دامنه خطا را به  $\pm 5\%$  کاهش می‌دهد. این نتیجه بر ضرورت کاربرد رابطه اختصاصی هر تیغه تأکید دارد.

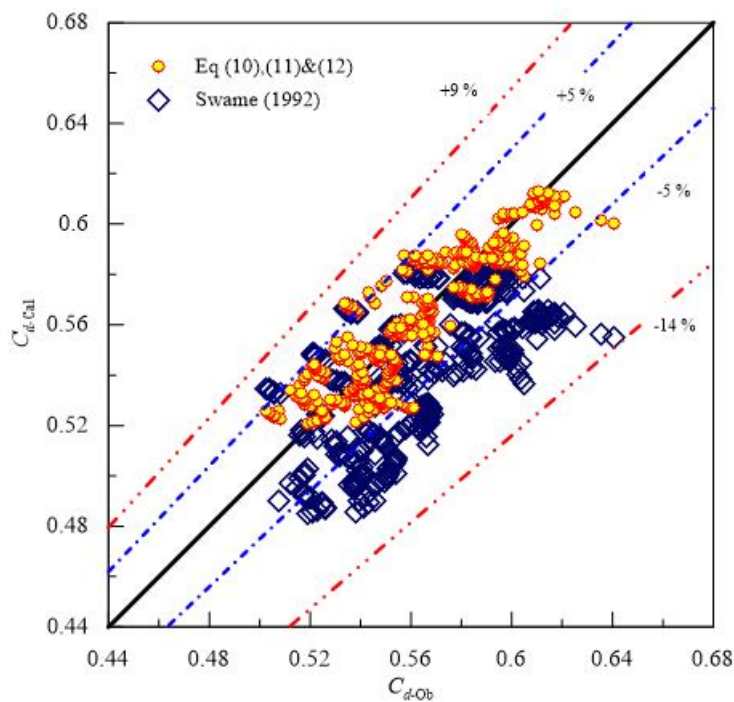
### 2-3- تعیین بیشینه ارتفاع جریان ریزشی - زیرگذر یا انتقال کنترل جریان به تیغه بعدی

معضل دیگری که در روش‌های طراحی قبلی این سازه نهفته است، این فرض است که با رسیدن عمق آب به لبه هر تیغه، کنترل جریان به تیغه بعدی منتقل می‌شود. مراحل کارکرد مدول در شکل 7 ترسیم شده است.

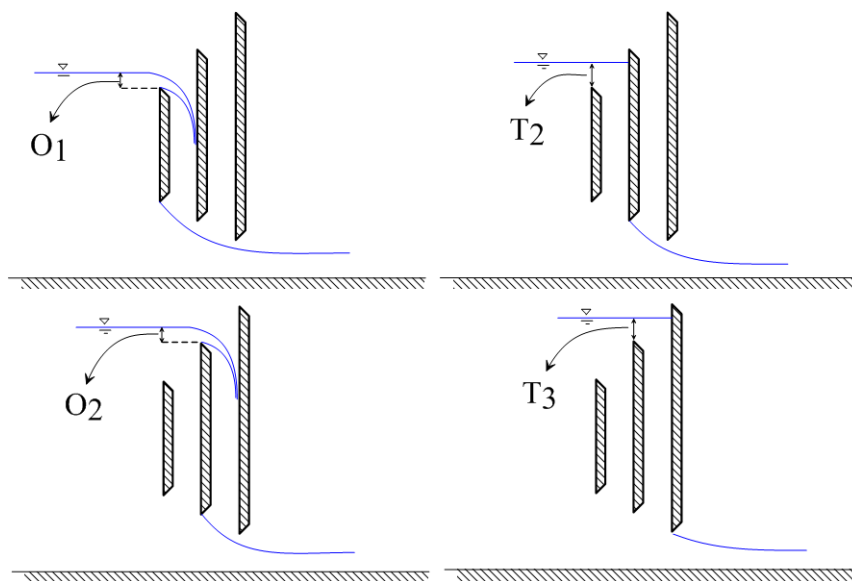
اما کاربرد چنین متوسطی در طراحی، باعث محاسبه بازشدگی بیشتر برای تیغه اول و محاسبه بازشدگی کمتر برای تیغه سوم، می‌شود که در عمل منجر به عبور بده بیشتر از تیغه اول و بده کمتر از تیغه سوم است. در حالی که ضریب بده (1992) Swamee که در روش طراحی (1999) Anwar مورد استفاده قرار گرفته، تقریباً مانند ضریب بده تیغه سوم کمترین مقدار است. استفاده از چنین ضریب بده‌ای به ابعاد باز شدگی تیغه‌های بزرگتر از میزان لازم منجر می‌شود و در نتیجه بده بیشتری از بده طراحی را از خود عبور می‌دهد، نتیجه‌ای که توسط آزمایش‌های بی‌جن‌خان (1388) تأیید شده است. رابطه پیشنهادی کیانمهر (1391) تطابق خوبی با رابطه مربوط به تیغه اول دارد، اما برای دیگر تیغه‌ها مناسب نیست؛ از این رو بهتر است از روابط (10) تا (12) برای هر تیغه استفاده شود. میزان خطای استفاده از رابطه (1989) Mishra برای هر سه تیغه در مقایسه با استفاده از روابط جداگانه (10) تا (12) محاسبه و در شکل 5 رسم شده است. همچنین



شکل 5 ضریب بده محاسبه شده در مقابل ضریب بده مشاهده شده، روش (1989) Mishra و معادلات پیشنهادی



شکل 6 ضریب بده محاسبه شده در مقابل ضریب بده مشاهده شده، روش Swamee (1999) و معادلات پیشنهادی



شکل 7 شمایی از جریان ریزشی ( $O_2$  و  $O_1$ ) و انتقال ( $T_3$  و  $T_2$ )

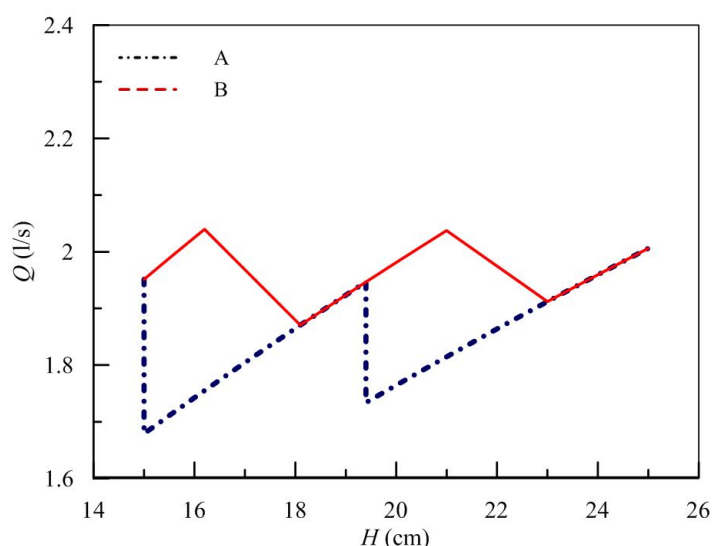
ارتفاع مشخص کنترل به تیغه دوم (یا سوم) منتقل می شود (Mishra et al., 2013; Kouchakzadeh and  $T_3$  یا  $T_2$ ) و (Golzar, 2014). کاوش داده‌های بی‌جن‌خان (1388) و کیانمهر (1391) برای مدول 2، 4، 5 و 7 لیتر بر ثانیه نشان

این شکل نشان می‌دهد که جریان پس از رسیدن به لبه تیغه اول (یا تیغه دوم) تا یک ارتفاع مشخص به صورت جریان ریزشی به کار خود ادامه می‌دهد ( $O_2$  یا  $O_1$ ) و همچنان بده عبوری را افزایش می‌دهد. پس از آن در یک

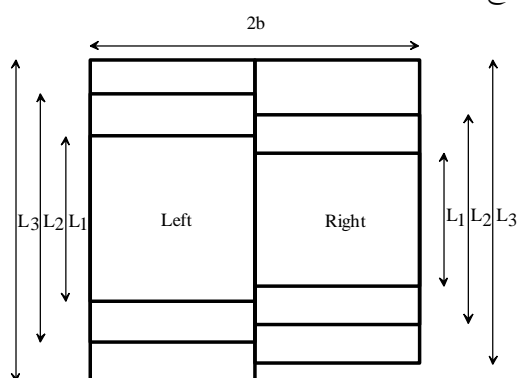
بعدی خود با رسیدن عمق آب به لبه هر تیغه، انحراف منفی از بده طراحی بیشتر از آنچه که در عمل اتفاق می‌افتد، پیش‌بینی می‌شود.

منحنی بده-اشل مدول تیغه‌ای دو لیتری Mishra et al. (1990) برای شرایط انتقال کنترل در لبه هر تیغه (منحنی A) و ارتفاع اصلاح شده انتقال کنترل (منحنی B) در شکل 8 ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که نتایج دو دیدگاه از نظر بده تحویلی در دامنه مدولار، بسیار متفاوت است.

داد که مقادیر  $O_1$ ،  $O_2$ ،  $T_2$  و  $T_3$  به ترتیب اطراف مقادیر  $1/2$ ،  $1/6$ ،  $3/1$  و  $3/6$  سانتی‌متر رخ می‌دهد که به روشنی نشان دهنده نادرستی فرض انتقال کنترل در ارتفاع لبه هر تیغه می‌باشد. زیرا وقتی که جریان به لبه هر تیغه می‌رسد پس از افزایش عمق جریان تا حدود  $1/2$  سانتی‌متر برای تیغه اول و تا حدود  $1/6$  سانتی‌متر برای تیغه دوم به صورت ریزشی-زیرگذر به کار خود ادامه می‌دهد. در نتیجه جریان از مدول، به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از آنچه روش‌های مختلف پیش‌بینی می‌کند، عبور خواهد کرد. همچنین با فرض انتقال کنترل جریان به تیغه



شکل 8 منحنی بده-اشل مدول 2 لیتر بر ثانیه (Mishra et al., 1999) تولید شده به کمک روابط (1) و (6) برای شرایط انتقال کنترل (A) در لبه هر تیغه و (B) ارتفاع اصلاح شده انتقال



شکل 9 نمایی از قرارگیری تیغه‌ها به صورت موازی

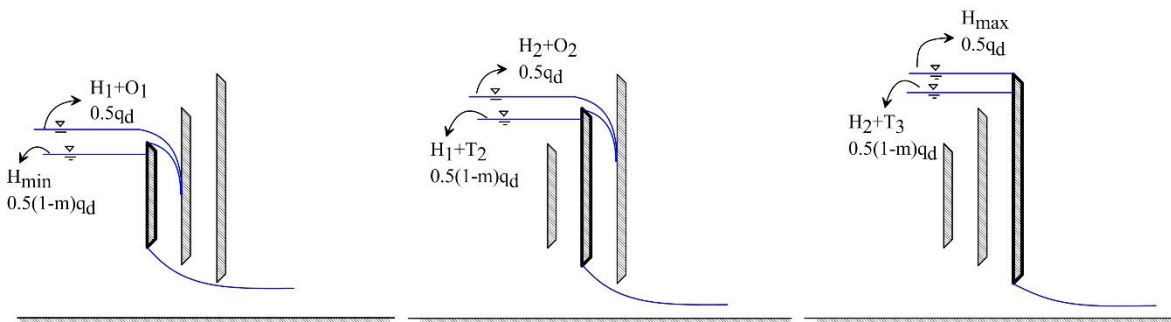
#### 4- روش طراحی جدید

در این روش مطابق شکل 9 مدولی ارائه می‌شود که عرض آن  $2b$  سانتی‌متر است و از دو نیمه چپ و راست تشکیل شده است. مشخصات نیمه چپ مدول طوری در نظر گرفته می‌شود که از یک شمای کم‌تحویل، که مشخصات آن در شکل 10 ارائه شده است، تبعیت نماید. در حالی که نیمه راست آن بر اساس شمای دیگری، یعنی بیش‌تحویل طراحی می‌شود (شکل 11).

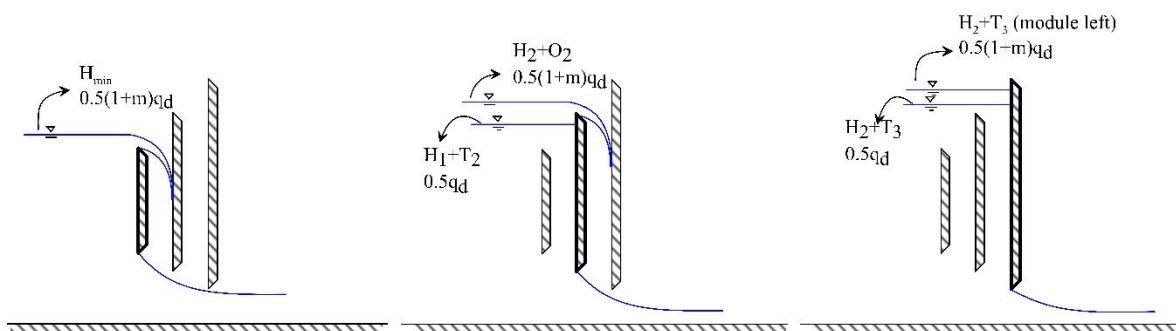


ازای همان عمق بدهای کمتر از بده طراحی از خود عبور دهد. در نتیجه عملکرد این دو تیغه موازی مکمل یکدیگر است و بدهای که در کل تحویل می‌دهند به بده طراحی بسیار نزدیکتر از بده تحویلی سایر روش‌های طراحی پیشین می‌باشد.

به عبارت دیگر، دو مدول تیغه‌ای کنار هم قرار داده شده‌اند، به بطوری که هر کدام از آنها نیمی از بده طراحی را از خود عبور دهد و طوری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند که به ازای هر عمقی از جریان، اگر یکی از نیمه‌ها بدهای بیشتر از بده طراحی تحویل دهد، دیگری به



شکل 10 بده عبوری در ارتفاع‌های مختلف شمای نیمه چپ مدول (کم تحویل)



شکل 11 بده عبوری در ارتفاع‌های مختلف شمای نیمه راست مدول (بیش تحویل)

کدام باید برای 3/5 لیتر بر ثانیه طراحی شوند.  
 - مراحل کار کرد مدول شامل چهار مرحله می‌باشد:  
 1- افزایش عمق تا لبه هر تیغه؛ 2- وقوع جریان به صورت ریزشی و زیرگذر؛ 3- کاهش بده جریان و افزایش عمق تا انتقال کنترل به تیغه بعدی و 4- انتقال کنترل به تیغه بعد. بده مرحله 1 و 2 از روابط (1) و (10) تا (12) به دست می‌آید. بده مرحله 3، شامل قسمت کاهشی منحنی بده-اشل مدول تیغه‌ای است که از درون‌یابی خطی بین نقطه انتهایی بده مرحله 2، و نقطه ابتدایی بده مرحله 4، به دست می‌آید.

مراحل کارکرد مدول تیغه‌ای پیشنهادی در شکل 12 ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که کارایی مناسب این روش بر اساس کارکرد متقارن حول بده طراحی نیمه‌های چپ و راست به دست می‌آید، از این رو است که قادر به تحویل بده بسیار نزدیک به بده طراحی است.  
 نکاتی که در روش طراحی پیشنهادی منظور شده تا مدول عملکرد مناسبی از خود نشان دهد به قرا زیر است:  
 - شمای چپ و راست برای یک بده مساوی طراحی می‌شوند تا عملکرد آنها مکمل یکدیگر باشند. یعنی برای یک مدول 7 لیتر بر ثانیه شمای چپ و راست هر

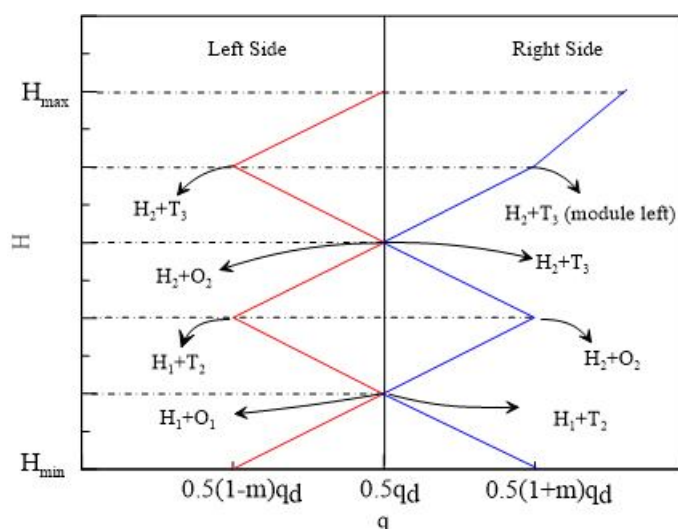
(Anwar, 1990)، کاربرد حساسیت معادل (Bijankhan and Kouchakzadeh, 2012) و حل معادلات غیرخطی حاکم (Vatankhah, 2014) استفاده شده است. هر سه روش برای شرایط حاکم یکسان، جواب‌های عملاً یکسانی می‌دهند، اما در این مقاله روش اخیر که ساده‌تر و قطعی‌تر است به‌کار رفته است. یعنی دستگاه معادلات برای شمای تعریف شده در این تحقیق برای مدول نیمه چپ (کم‌تحویل) (دستگاه معادلات 13) برقرار و از حل آن ابعاد مورد نظر به‌دست آمد.

- برای طراحی ابتدا شمای کم‌تحویل (چپ) طراحی شده، سپس با توجه به آن، شمای بیش‌تحویل (راست) برای جبران کاهش بده، طراحی می‌شود (شکل 12). در این تحقیق ضریب بده و ارتفاع واگذاری کنترل به تیغه بعدی تدقیق شده و نتایج آن در ارائه طراحی نو برای احداث و کاربرد مدول‌ها به صورت موازی، به‌کار رفته است.

### 5- محاسبه ابعاد مدول تیغه‌ای پیشنهادی

برای تعیین ابعاد مدول تاکنون از روش‌های بهینه‌سازی

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \rightarrow 0.5(1-m_L)q_d = 0.6644 \left( \frac{H_{\min} - a_{1-L}}{H_{\min} + 15a_{1-L}} \right)^{0.07622} ba_{1-L} \sqrt{2gH_{\min}} \\ (2) \rightarrow 0.5q_d = 0.6644 \left( \frac{(H_{1-L} + O_1) - a_{1-L}}{(H_{1-L} + O_1) + 15a_{1-L}} \right)^{0.07622} ba_{1-L} \sqrt{2g(H_{1-L} + O_1)} \\ (3) \rightarrow 0.5(1-m_L)q_d = 0.6307 \left( \frac{(H_{1-L} + T_2) - a_{2-L}}{(H_{1-L} + T_2) + 15a_{2-L}} \right)^{0.07368} ba_{2-L} \sqrt{2g(H_{1-L} + T_2)} \\ (4) \rightarrow 0.5q_d = 0.6307 \left( \frac{(H_{2-L} + O_2) - a_{2-L}}{(H_{2-L} + O_2) + 15a_{2-L}} \right)^{0.07368} ba_{2-L} \sqrt{2g(H_{2-L} + O_2)} \\ (5) \rightarrow 0.5(1-m_L)q_d = 0.6286 \left( \frac{(H_{2-L} + T_3) - a_{3-L}}{(H_{2-L} + T_3) + 15a_{3-L}} \right)^{0.09661} ba_{3-L} \sqrt{2g(H_{2-L} + T_3)} \\ (6) \rightarrow 0.5q_d = 0.6286 \left( \frac{H_{\max} - a_{3-L}}{H_{\max} + 15a_{3-L}} \right)^{0.09661} ba_{3-L} \sqrt{2gH_{\max}} \end{array} \right. \quad (13)$$



شکل 12 نمودار شماتیک نحوه عملکرد نیمه راست و نیمه چپ مدول تیغه‌ای پیشنهادی

$$H_{1-R} = H_{1-L} + O_1 - T_2 \quad (15)$$

که در آن،  $H_{1-R}$  ارتفاع تیغه اول تا کف مربوط به نیمه راست و  $H_{1-L}$  ارتفاع تیغه اول تا کف مربوط به نیمه چپ می‌باشد. بر اساس طراحی یاد شده، ابعاد مدول برای تحویل بده‌های طراحی 4 تا 14 لیتر بر ثانیه محاسبه و در جدول 1 آمده است.

### 6- مقایسه بین طراحی‌های مختلف

در روش طراحی پیشنهاد شده با توجه به قرارگیری مناسب بین نیمه چپ و نیمه راست و در نظر گرفتن موقعیت‌های صحیح انتقال کنترل جریان به تیغه بعدی و همچنین استفاده از ضریب بده مجزا برای هر تیغه به جای یک رابطه کلی، عملکرد این سازه به شکل قابل توجهی بهبود یافته است.

کارکرد روش طراحی (Mishra et al. (1990) و روش پیشنهادی در این پژوهش برای مدول 7 لیتر بر ثانیه در شکل 13 ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که در محدوده وسیعی از دامنه کارکرد مدول تیغه‌ای، روش پیشنهادی بده جریان را بدون انحراف از بده طراحی، از خود عبور می‌دهد؛ اما اگر ابعاد برای سهولت ساخت گرد شود، انحراف از بده طراحی تا  $\pm 1\%$  خواهد رسید.

در روابط فوق  $m_L$  انحراف از بده طراحی،  $q_d$  بده طراحی،  $H_{min-L}$  کمینه ارتفاع آب که برابر با 15 سانتی‌متر می‌باشد،  $H_{1-L}$  ارتفاع آب از کف تا لبه تیغه اول،  $H_{2-L}$  ارتفاع آب از کف تا لبه تیغه دوم،  $H_{max}$  بیشینه ارتفاع آب که برابر با 25 سانتی‌متر می‌باشد،  $a_{1-L}$  بازشدگی تیغه اول،  $a_{2-L}$  بازشدگی تیغه دوم،  $a_{3-L}$  بازشدگی تیغه سوم،  $b$  عرض نیمه چپ مدول که برابر با 10 سانتی‌متر می‌باشد،  $O_1$  ارتفاع ریزش از تیغه اول،  $O_2$  ارتفاع ریزش از تیغه دوم،  $T_2$  ارتفاع آبی که در آن کنترل جریان به تیغه دوم منتقل می‌شود و  $T_3$  ارتفاع آبی که در آن کنترل جریان به تیغه سوم منتقل می‌شود، می‌باشند، که قبلاً مقادیر آنها ارائه شده است. حل دستگاه معادلات (13)، شش مجهول  $H_{1-L}$ ،  $H_{2-L}$ ،  $a_{1-L}$ ،  $a_{2-L}$ ،  $a_{3-L}$  و  $m_L$  را تعیین می‌کند.

پس از به دست آمدن ابعاد نیمه چپ، ابعاد نیمه راست به کمک دستگاه معادلات (14) تعیین می‌شود.

متغیرهای دستگاه معادلات نیمه سمت راست مانند نیمه چپ می‌باشد و  $H_{2-L}$  مربوط به ارتفاع لبه تیغه دوم تا کف نیمه سمت چپ است. از حل دستگاه معادلات (14)، پنج مجهول،  $H_{2-R}$ ،  $a_{1-R}$ ،  $a_{2-R}$ ،  $a_{3-R}$  و  $m_R$  به دست می‌آیند. همچنین  $H_{1-R}$  از رابطه (15) با توجه به ابعاد به دست آمده نیمه چپ محاسبه می‌شود تا روند کار دو نیمه یکدیگر را جبران کنند.

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \rightarrow 0.5(1+m_R)q_d = 0.6644 \left( \frac{H_{min} - a_{1-R}}{H_{min} + 15a_{1-R}} \right)^{0.07622} ba_{1-R} \sqrt{2gH_{min}} \\ (2) \rightarrow 0.5q_d = 0.6307 \left( \frac{(H_{1-R} + T_2) - a_{2-R}}{(H_{1-R} + T_2) + 15a_{2-R}} \right)^{0.07368} ba_{2-R} \sqrt{2g(H_{1-R} + T_2)} \\ (3) \rightarrow 0.5(1+m_R)q_d = 0.6307 \left( \frac{(H_{2-R} + O_2) - a_{2-R}}{(H_{2-R} + O_2) + 15a_{2-R}} \right)^{0.07368} ba_{2-R} \sqrt{2g(H_{2-R} + O_2)} \\ (4) \rightarrow 0.5q_d = 0.6286 \left( \frac{(H_{2-R} + T_3) - a_{3-R}}{(H_{2-R} + T_3) + 15a_{3-R}} \right)^{0.09661} ba_{3-R} \sqrt{2g(H_{2-R} + T_3)} \\ (5) \rightarrow 0.5(1+m_R)q_d = 0.6286 \left( \frac{(H_{2-L} + T_3) - a_{3-R}}{(H_{2-L} + T_3) + 15a_{3-R}} \right)^{0.09661} ba_{3-R} \sqrt{2g(H_{2-R} + T_3)} \end{array} \right. \quad (14)$$

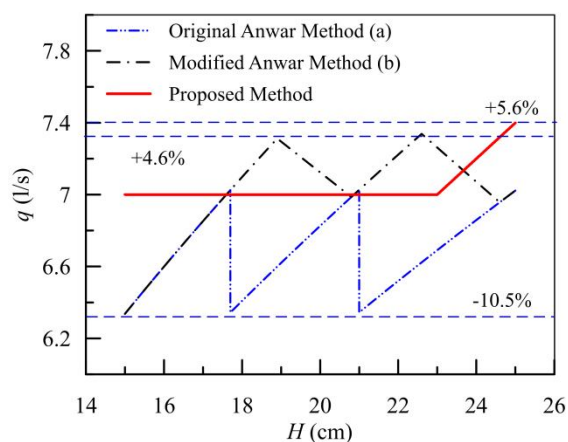
جدول 1 ابعاد مدول تیغه‌ای پیشنهادی با توجه به بده طراحی

بده (l/s)	$H_1$ (cm)	$H_2$ (cm)	$H_3$ (cm)	$a_1$ (cm)	$a_2$ (cm)	$a_3$ (cm)	$m$ (%)	
4	چپ	15/4	19/0	25	1/8	1/7	1/5	5/6
	راست	13/5	16/8	25	2/0	1/9	1/7	5/8
5	چپ	15/4	19/0	25	2/3	2/1	2/0	5/6
	راست	13/5	16/8	25	2/6	2/4	2/2	5/9
6	چپ	15/4	19/0	25	2/8	2/6	2/4	5/7
	راست	13/5	16/8	25	3/2	2/9	2/7	6/0
7	چپ	15/4	19/0	25	3/3	3/0	2/8	5/7
	راست	13/5	16/8	25	3/7	3/5	3/2	6/0
8	چپ	15/4	19/0	25	3/8	3/5	3/2	5/8
	راست	13/5	16/8	25	4/3	4/0	3/7	6/1
9	چپ	15/4	19/0	25	4/3	4/0	3/7	5/8
	راست	13/5	16/8	25	4/9	4/6	4/2	6/1
10	چپ	15/4	19/0	25	4/9	4/5	4/1	5/9
	راست	13/5	16/8	25	5/6	5/1	4/7	6/2
11	چپ	15/4	19/0	25	5/4	5/0	4/6	5/9
	راست	13/5	16/8	25	6/2	5/7	5/2	6/3
12	چپ	15/4	18/9	25	6/0	5/5	5/0	6/0
	راست	13/5	16/8	25	6/9	6/3	5/8	6/3
13	چپ	15/4	18/9	25	6/5	6/0	5/5	6/1
	راست	13/5	16/8	25	7/5	6/9	6/3	6/4
14	چپ		18/9	25	7/1	6/5	6/0	6/1
	راست		16/8	25	8/2	7/5	6/9	6/4

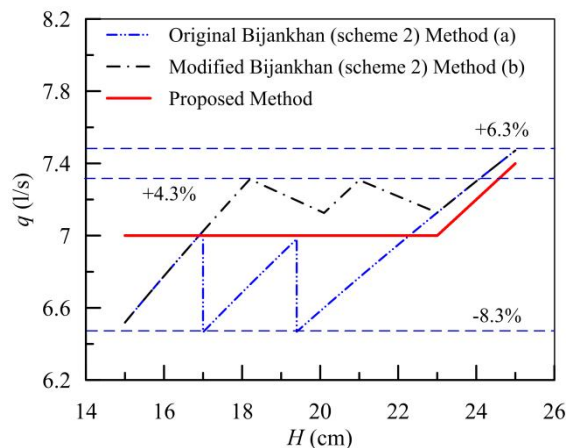
کارکرد روش طراحی (Anwar (1999) و روش پیشنهاد شده در این پژوهش که برای مقایسه نتایج در شرایط یکسان در هر دو ارتفاع انتقال کنترل واقعی به کار گرفته شده‌اند، در شکل 14 رسم شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که منحنی بده-اشل حاصل از روش طراحی (Anwar (1999) حتی بعد از تعدیل آن برای نقاط کنترل واقعی، برخلاف روش پیشنهادی که در قسمت اعظم دامنه بر بده طراحی منطبق است، اختلاف قابل توجهی با بده طراحی دارد.

شکل 13 همچنین نشان می‌دهد که فقط در دامنه بسیار محدودی در نزدیک بیشینه ارتفاع، انحراف از بده تا 5/6% خواهد شد. این در حالی است که در عملکرد مدول تیغه‌ای پیشنهادی (Mishra et al. (1990) در کل دامنه کارکرد مدول، انحراف از بده طراحی مشاهده می‌شود و تا مرز 8%+ پیش می‌رود (کیانمهر، 1391). (Anwar (1999) در روش پیشنهادی خود انحراف منفی از بده طراحی را نسبت به روش (Mishra et al. (1990) با توجه به دیدگاه نظری از 14%- به 10%- گزارش کرد.

نظر گرفته نشدن عمق صحیح انتقال، همان‌طور که در شکل 16 نشان داده شده است، پیش‌بینی می‌شود که در عمل بده عبوری بسیار بیش‌تحویل خواهد شد و تا مرز  $+9/5\%$  انحراف مثبت از بده طراحی دیده خواهد شد.



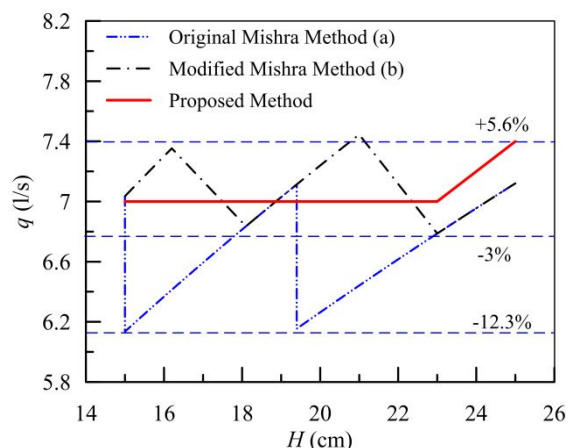
شکل 14 مقایسه بین روش پیشنهادی جدید و Anwar (1999) برای شرایط انتقال کنترل (a) در لبه‌ی هر تیغه و (b) ارتفاع اصلاح شده انتقال



شکل 15 مقایسه بین روش پیشنهادی جدید و شمای دوم (2012) Bijankhan and Kouchakzadeh برای شرایط انتقال کنترل (a) در لبه‌ی هر تیغه و (b) ارتفاع اصلاح شده انتقال

### 7- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای سازه مدول تیغه‌ای که می‌تواند در شبکه‌های فرعی کاربردی وسیع داشته باشد، یک روش



شکل 13 مقایسه بین روش پیشنهادی جدید و روش Mishra et al. (1990) برای شرایط انتقال کنترل (a) در لبه هر تیغه و (b) ارتفاع اصلاح شده انتقال

تاکنون بهترین عملکرد روش‌های طراحی، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی کیانمهر (1391)، مربوط به شمای دوم (2012) Bijankhan and Kouchakzadeh می‌باشد. مقایسه بین کارکرد این روش و روش ارائه شده در این پژوهش در شکل 15 ترسیم شده است، که انحراف از بده منفی و مثبت را در روش Bijankhan and Kouchakzadeh (2012) نشان می‌دهد. ایشان این انحراف را بدون در نظر گرفتن شرایط انتقال برای مدول 7 لیتر بر ثانیه  $-8/3\%$  گزارش دادند، در حالی که با در نظر گرفتن شرایط انتقال علاوه بر این انحراف منفی از بده طراحی، بیشینه انحراف مثبت از بده طراحی به مقدار  $6/3\%$  دیده می‌شود.

در شمای پیشنهادی (2014) Vatankhah هر تیغه کار خود را از  $-m\%$  بده طراحی شروع کرده و با رسیدن ارتفاع آب به لبه تیغه، که فرض شده انتقال کنترل در همین ارتفاع صورت می‌گیرد، میزان انحراف به  $+m\%$  می‌رسد. یعنی در این روش بر خلاف روش‌های دیگر از دیدگاه نظری در تیغه اول، دوم و سوم انحراف مثبت از بده طراحی وجود دارد. از آنجا که در این روش انحراف بده مثبت در طراحی آن وجود دارد، در عمل به دلیل در

علاوه بر کارکرد مناسب، مزیت این روش امکان کاربری آن برای تعیین ابعاد سازه برای دامنه مدولار مختلف غیر از دامنه به‌کار رفته در این تحقیق، و برای دبی‌های دیگر، می‌باشد.

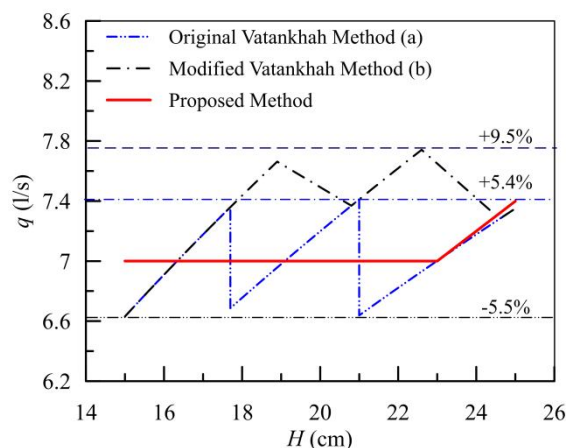
## 8- سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت دانشگاه تهران و قطب علمی ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی انجام شده که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

## 9- فهرست علائم

$a$	بازشدگی دریاچه کشویی
$a_1$	بازشدگی تیغه اول
$a_2$	بازشدگی تیغه دوم
$a_3$	بازشدگی تیغه سوم
$C_d$	ضریب بده دریاچه کشویی
$C_{d1}$	ضریب بده تیغه اول
$C_{d2}$	ضریب بده تیغه دوم
$C_{d3}$	ضریب بده تیغه سوم
$g$	شتاب ثقل
$H$	ارتفاع آب بالادست دریاچه کشویی
$H_1$	ارتفاع آب بالادست تیغه اول
$H_2$	ارتفاع آب بالادست تیغه دوم
$H_3$	ارتفاع آب بالادست تیغه سوم
$H_{max}$	بیشینه مقدار ارتفاع آب
$H_{min}$	کمینه مقدار ارتفاع آب
$L$	ارتفاع تیغه
$m$	انحراف از بده طراحی
$O_1$	ارتفاع عمق ریزش روی تیغه اول
$O_2$	ارتفاع عمق ریزش روی تیغه دوم
$q$	بده جریان
$q_d$	بده طراحی
$T_2$	ارتفاع انتقال کنترل جریان به تیغه دوم
$T_3$	ارتفاع انتقال کنترل جریان به تیغه سوم

طراحی جدید برای کاربرد واحدهای مدول به صورت موازی پیشنهاد شد.



شکل 16 مقایسه بین روش پیشنهادی جدید و شمای طراحی Vatankhah (2014) برای شرایط انتقال کنترل (a) در لبه هر تیغه و (b) ارتفاع اصلاح شده انتقال

روش پیشنهادی علاوه بر بهبود چشمگیر عملکرد سازه، امکان کاربری آن را برای تحویل دبی‌های بالاتر با نصب موازی واحدها میسر می‌کند. شیوه طراحی جدید با تدقیق رابطه ضریب بده برای هر تیغه که از عملکرد تیغه‌های بالادستی متأثر می‌شود و همچنین در نظر گرفتن عمق واقعی انتقال کنترل از یک تیغه به تیغه بعدی، توسعه یافت. روابط ارائه شده برای تخمین ضریب بده تیغه اول، دوم و سوم در این پژوهش، در دامنه خطای  $\pm 5\%$  مقدار ضریب بده را محاسبه می‌کند این در حالیست که مقدار بیشینه خطای ضریب بده بدست آمده از روابط پیشنهادی Mishra et al. (1989) و Swamee (1992) به ترتیب برابر با  $+9\%$  و  $-14\%$  است. در روش طراحی پیشنهادی در یک بازه گسترده از دامنه کارکرد مدول، انحراف بده تحویلی از بده طراحی حدود  $\pm 1\%$  است. همچنین با مقایسه نظری نتایج این روش با نتایج روش‌های طراحی Bijankhan and Anwar (1999), Mishra et al. (1990) Kouchakzadeh (2012) و Vatankhah (2014) بهبود عملکرد مدول و برتری روش پیشنهادی نشان داده شد.

## 10- منابع

- Bijankhan, M., & Kouchakzadeh, S. (2012). "Baffle modules: improved design based on the variable hydraulic sensitivity concept", *J. Irrigation and Drainage*, 61(2), pp. 260-269.
- Henry HR. (1950). Discussion on "Diffusion of submerged jets", by Albertson, M. L., Dai, Y. B., Jensen, R. A. and Rouse, H. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 115(1), pp. 687-694.
- Kouchakzadeh, S. and Golzar. M. (2014). "Discussion of discharge coefficient for baffle-slucice gates", by P. K. Mishra, Wernher Brevis, and Cornelia Lang, *J. Irrig. Drain Eng.* 140(4), pp. 336-340.
- Larsen, A. P. and Mishra, P. K. (1990). "Constant discharge device for field irrigation", *J. Hydr. Res. Delft, The Netherlands*. 28(4), pp. 481-489.
- Maheswara Babu, B. Mishra, P. K. and Satyanarayana, T. (1996). "Performance of baffle sluice module with change module dimensions", *J. Irrig. Drain. Eng.* 122(5), pp. 310-313.
- Mishra, P. K. Larsen, A. P. and Satyanarayana, T. (1990). "Development of low-discharge baffle sluice module", *J. Irrig. Drain. Eng.* 116(3), pp. 444-453.
- Mishra, P. K., Brevis, W. and Lang, C. (2013). "Discharge coefficients for baffle-slucice gates", *J. Irrig. Drain Eng.* 139(4), pp. 336-340.
- Rajaratnam, N and Subramanya, K. (1976). "Flow equation for sluice gate", *J. Irrig. Drain. Eng.* 93(3), pp. 167-187.
- Swamee, P. K. (1992). "Sluice gate discharge equations", *J. Irrig. Drain. Eng.* 118(1), pp. 56-60.
- Vatankhah, A. R. (2014). "Discussion of discharge coefficients for baffle-slucice gates", by PK Mishra, Wernher Brevis, and Cornelia Lang. *J. Irrig. Drain Eng.* 140(4), pp. 336-340.
- بی‌جن‌خان، م. (1388). بررسی هیدرولیکی مدول تیغه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
- بی‌جن‌خان، م. و کوچک‌زاده، ص. (1389). "طراحی مدول دو تیغه‌ای بر اساس مفهوم حساسیت هیدرولیکی سازه‌ها"، نشریه آب و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد. 5(24)، صص. 864-873.
- بی‌جن‌خان، م. کوچک‌زاده، ص و هورفر، ع. (1388). "بهبود مدول تیغه‌ای بر اساس مفهوم حساسیت هیدرولیکی سازه‌ها"، مجله آب تحقیقات آب و خاک ایران، دانشگاه تهران. 2(40)، صص. 198-191.
- کیانمهر، ح. (1391). بررسی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی مدول دو تیغه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
- گلزار، م. (1392). مدول تیغه‌ای کوچک مقیاس طرح تا کار برد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
- Alhamid, A. A. (1998). "Coefficients of discharge for free flow under sluice gate", *J. King Saud Uni.* 11(1), pp. 33-48.
- Anwar, A. A. (1999). "Baffle sluice module with improved performance", *J. Irrig. Drain. Eng.*, 125(2), pp. 91-95.