

پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس با پله مثبت

کاظم اسماعیلی
کارشناس ارشد

جلیل ابریشمی
دانشیار

دانشکده کشاورزی، دانشگاه مشهد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مشهد

چکیده

در تحقیق حاضر، پرش هیدرولیکی روی کف‌های با شیب معکوس و پله مثبت در انتها، مورد تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای این امر چهار شیب معکوس مختلف و دو نوع پله مثبت با ارتفاع متفاوت انتخاب و باتوجه به نتایج آزمایش‌ها نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افت انرژی نسبی نسبت به عدد فرود اولیه در حالات مختلف تعیین و با مقادیر مربوط در حالات شیب افقی و یا شیب معکوس بدون پله مقایسه گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به ازاء مقادیر ثابت عدد فرود اولیه نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ و یا به عبارتی عمق ثانویه به لحاظ وجود پله مثبت کاهش می‌یابد که با افزایش شیب معکوس از میزان اثر پله مثبت در کاهش d_2 کاسته می‌شود. ضمن کاهش طول پرش در اثر وجود پله و شیب معکوس، تأثیر ارتفاع پله در کاهش طول پرش با افزایش شیب معکوس کم‌رنگ‌تر می‌گردد. همچنین مشخص می‌گردد که راندمان افت انرژی تفاوت قابل توجهی نسبت به کف‌های افقی نمی‌نماید.

Hydraulic Jump in Adverse Channel Slopes with Positive Step

Jalil Abrishami
Assistant Professor

Kazem Esmaili
Lecturer of Irrigation

Civil Engineering Ferdowsi University

Ferdowsi University

Abstract

Hydraulic jump in adverse slope channels with a positive step is studied. Experiments are conducted with four different basin slopes with two different positive steps. Froude number versus the characteristics of jumps are presented and compared with those on horizontal and negative slopes without step. The results show that the existence of a positive step decreases the length of the jump and the ratio of $\frac{d_2}{d_1}$. The efficiency of such jumps was found to be nearly of the same order of magnitude as that of classical jump in a horizontal channel.

$$G = \frac{Fr_1}{\sqrt{\cos\theta + KL \sin\theta/(d_2 - d_1)}} \quad (2)$$

که $Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gd_1}}$ عدد فرود قبل از پرش، V_1 سرعت متوسط در جهت جریان و قبل از پرش، θ زاویه شیب کف، L طول پرش و K ضریب تصحیح به خاطر مستقیم فرض کردن نیمرخ پرش می باشد.

از طرفی Hager و Bretz (۲) با استفاده از اصل مقدار حرکت، روابطی برای پرش هیدرولیکی در کانال های افقی مستطیلی با پله های مثبت یا منفی به دست آورده، نشان دادند که اطلاعات و نتایج آزمایشگاهی نیز با معادلات مربوطه تطابق خوبی دارند و لذا برای هر مقدار Fr_1 ، d_1 ، S (ارتفاع پله) می توان عمق ثانویه d_2 را به دست آورد. همچنین A. A. Quraishi و M. Al-Brahim (۱) تحقیقاتی در این زمینه و بر روی شیب مثبت با پله مثبت و منفی انجام دادند که در جای خود می تواند مورد توجه قرار گیرد. بررسی منابع نشان می دهد که در مورد خصوصیات پرش هیدرولیکی روی شیب های معکوس با پله مثبت و منفی تاکنون هیچگونه تحقیق تئوری یا تجربی انجام نپذیرفته است. هدف اصلی در این تحقیق تجزیه و تحلیل خصوصیات پرش روی شیب های معکوس با پله مثبت است که به بخش های زیر تقسیم می شود:

الف - تعیین رابطه نسبت اعماق مزدوج در پرش های هیدرولیکی روی شیب معکوس با پله مثبت (عمود بر کف حوضچه).

ب - ساخت مدل و انجام آزمایش های مختلف

ج - مطالعه بعضی از خصوصیات مهم پرش در حوضچه های با مشخصات مذکور و مقایسه نتایج به دست آمده با یکدیگر و با شرایط بدون پله و در آخر تعیین میزان تأثیر وجود پله در خصوصیات پرش.

اضافه می نماید که طبق مطالعات و آزمایش های انجام شده توسط Hager و Bretz (۲) و Quraishi و Al-Brahim (۱) در کانال های افقی و شیبدار براساس مقدار عدد فرود و عمق پایاب، حالت پرش متفاوت بوده و می تواند از پرش نوع A (که در بالادست پله تمام می شود) تا پرش نوع B (که قبل از پله شروع و در پایین دست پله تمام می شود) مطابق شکل ۱ تغییر نماید، که در هر حالت می توان با فرض هیدرواستاتیک بودن توزیع فشار در روی پله در طرف دیگر پرش، رابطه اعماق اولیه و ثانویه را به دست آورد. در آزمایش های اخیر، تنها پرش نوع A مد نظر بوده است.

پدیده پرش هیدرولیکی یکی از مؤثرترین و مستداول ترین روش های از بین بردن انرژی در حوضچه های آرامش است که عموماً با کف افقی طراحی و ساخته می شوند. وجود برجستگی یا فرورفتگی ناگهانی از جمله ایجاد پله مثبت در انتهای حوضچه می تواند تأثیر قابل ملاحظه ای در طول پرش و همچنین تثبیت و کنترل آن داشته باشد. اگرچه تاکنون تحقیقات بسیار ارزشمندی روی پرش در کف های افقی با پله مثبت و منفی صورت پذیرفته و همچنین مطالعات قابل ملاحظه ای بر روی این پدیده در کانال های با شیب مثبت و دارای برجستگی و فرورفتگی ناگهانی در انتها انجام گرفته، اما مطالعات در مورد خصوصیات و مشخصات جهش آبی در حوضچه های با شیب معکوس بسیار محدود بوده است. شاید Rouse (۴) اولین کسی بود که آزمایش هایی در این مورد انجام داد. او نتیجه گرفت که پرش پایدار تنها در روی شیب های معکوس نزدیک صفر امکان پذیر است. Stevens (۵) با تحلیل تئوری، نظریه Rouse (۴) را رد کرده، ایجاد پرش پایدار روی تمام شیب ها را امکان پذیر دانست. M. H. Abdul Khadar و S. Rajagopal (۳) با انجام آزمایش هایی با تأیید ضمنی نظریه Stevens به نکات مهمی در این زمینه دست یافتند که کاهش طول پرش و همچنین نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه در روی این نوع شیب ها در مقایسه با کف های افقی از جمله این نتایج بود. به منظور بررسی نظریه های Rouse و Stevens و همچنین مطالعه روی نتایج Khadar (۳)، در سال ۱۳۶۹ تحقیقاتی توسط ابریشمی و صانعی (۶) انجام پذیرفت که ضمن تأیید پاره ای از نتایج ارائه شده توسط Khadar (۳)، نکات جدیدی در این زمینه روشن گردید. در این تحقیقات با استفاده از اصل مومنتم و برای یک پرش ایجاد شده در حوضچه با کف مستطیلی و شیب معکوس ولی بدون پله، نسبت اعماق مزدوج به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8G^2} - 1) \quad (1)$$

که از نظر تئوری برای هر شیبی کاربرد داشته و در آن d_1 و d_2 اعماق مزدوج به ترتیب قبل و بعد از پرش و در جهت عمود بر کف کانال می باشند. تابع G در معادله فوق عبارت است از:

همچنین طول پرش را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. در ضمن معین می شود که افزایش شیب معکوس از میزان تأثیر پله مثبت در کاهش d_2 کاسته و نیز نقش افزایش ارتفاع پله را کمرنگ تر می نماید.

۲- تحلیل پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس با پله مثبت

۱-۲- نسبت اعماق مزدوج $(\frac{d_2}{d_1})$

در حوضچه های با شیب منفی، وجود مؤلفه وزن در محدوده پرش که همواره عکس حرکت جریان عمل می کند، از اهمیت خاصی برخوردار است. با کاربرد اصل مومنتم در حدفاصل مقاطع ۱ و ۲ پرش روی شیب های منفی و با پله مثبت (شکل ۲) و با فرض مستطیلی بودن کانال و صرفنظر کردن از اصطکاک خواهیم داشت:

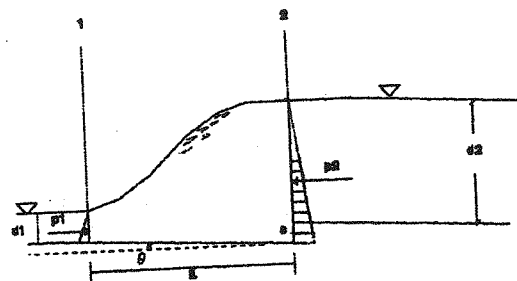
$$\frac{\gamma q}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = P_1 - P_2 - W \sin \theta \quad (2)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \gamma d_1^2 \cos \theta \quad (3)$$

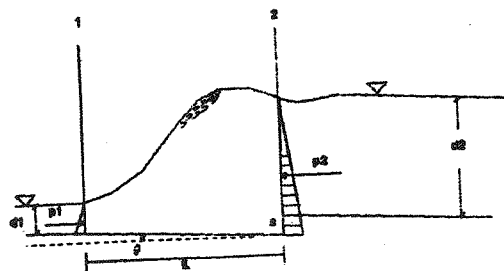
$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma (d_3 + s)^2 \cos \theta \quad (5)$$

$$q = V_1 d_1 = V_3 d_3 \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{2} K L \gamma (d_1 + d_3 + s) \quad (7)$$



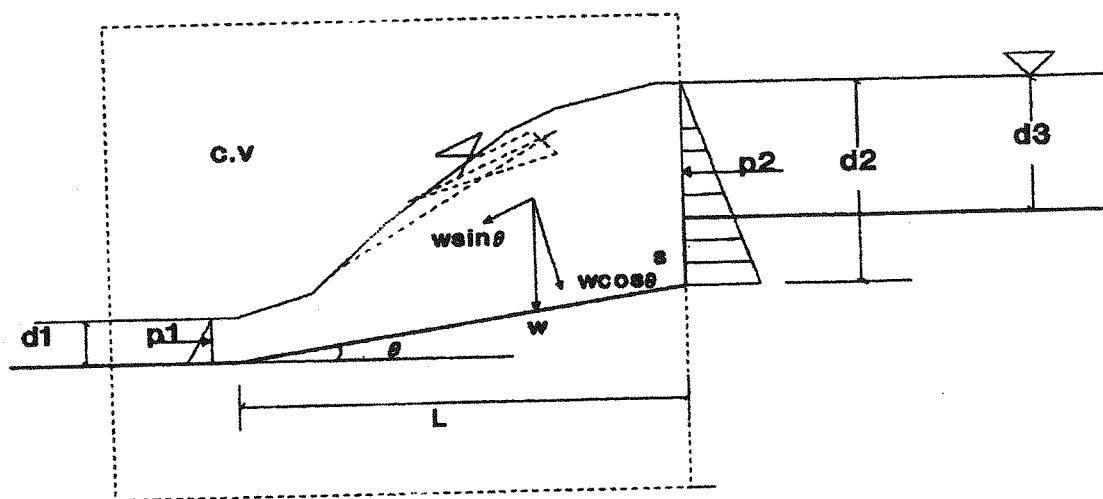
الف) پرش نوع A.



ب) پرش نوع B.

شکل (۱) انواع پرش روی کف های شیبدار با پله مثبت. الف) پرش نوع A.

آزمایش ها روی چهار نوع شیب معکوس ۰/۰۰۵، ۰/۰۲۰، ۰/۰۱۳، ۰/۰۱۰ ارتفاع ۲۵ و ۵۰ میلیمتر انجام پذیرفته نتایج به دست آمده ضمن تعیین میزان تأثیر توام شیب معکوس و پله مثبت در شرایط مشخص نشان می دهد که پله مثبت ضمن تأثیر بر کنترل و پایداری پرش، نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ و



شکل (۲) پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس با پله مثبت

در روابط فوق:

γ وزن مخصوص، q دبی در واحد عرض مقطع، g شتاب ثقل، V سرعت متوسط، P کل نیروی ناشی از فشار هیدرواستاتیکی در مقطع، W وزن آب محصور بین دو مقطع، K ضریب تصحیح به خاطر مستقیم فرض نمودن نیمرخ پرش و s ارتفاع پله می باشد. با جایگذاری روابط ۴ تا ۷ در معادله ۳ و با فرض $d_2 = (s + d_3)$ ، $\beta_1 = \beta_2 = 1$ روی پله.

$$\frac{\gamma q^2}{8} \left(\frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_1} \right) = \frac{\gamma}{2} [d_1^2 \cos\theta - (d_3 + s)^2 \cos\theta - KL (d_1 + d_3 + s) \sin\theta] \quad (۸)$$

که پس از خلاصه نمودن رابطه فوق خواهیم داشت:

$$F_{r1}^2 \frac{(d_1 - d_3)}{d_2} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(d_3 + s)}{d_1} \right] \left[\cos\theta + \frac{KL \sin\theta}{d_3 + s - d_1} \right] \quad (۹)$$

$$\left(\frac{F_{r1}^2}{\cos\theta + KL \sin\theta / (d_3 + s - d_1)} \right) = \frac{[1 - ((d_3 + s)/d_1)]^2}{2 (d_1 - d_3)/d_3} \quad (۱۰)$$

با معرفی $D = \frac{d_3}{d_1}$ و $S = \frac{s}{d_1}$ و اعمال این دو مقدار در معادله فوق:

$$\left(\frac{F_{r1}^2}{\cos\theta + KL \sin\theta / (d_3 + s - d_1)} \right) = \frac{D [1 - (D + S)]^2}{2 (1 - D)} \quad (۱۱)$$

که از آن:

$$G_{A+}^2 = \frac{F_{r1}^2}{\cos\theta + KL \sin\theta / (d_3 + s - d_1)} \quad (۱۲)$$

و یا:

$$G_{A+}^2 = \frac{D [1 - (D + S)]^2}{2 (1 - D)} \quad (۱۳)$$

در معادلات ۱۲ و ۱۳، G به عنوان عدد فرود اصلاح شده در کانال های شیبدار با پله تعریف می شود.

زیر نویس A و علامت $+$ ، به ترتیب نشان دهنده پرش نوع A و پله مثبت می باشند. بدیهی است، تعیین مقدار K و حل معادله ۱۱، وجود نتایج آزمایشگاهی و پیگیری تجربی کار را ایجاب می نماید که خارج از موضوع این تحقیق است.

۲-۲. نسبت افت انرژی یا راندمان پرش $\left(\frac{\Delta E}{E_1}\right)$

یکی از مسائل مهمی که در حین پرش هیدرولیکی اتفاق می افتد و در هر انرژی گیرنده به عنوان یکی از خصوصیات بااهمیت آن تلقی می شود، عبارت است از اتلاف انرژی که با استفاده از تئوری و باتوجه به شکل ۲، مقدار آن به صورت زیر تعیین می گردد:

$$E_1 = d_1 \cos\theta + \frac{V_1^2}{2g} \quad (۱۴)$$

$$E_2 = (d_3 + s) \cos\theta + \frac{V_2^2}{2g} + L \sin\theta \quad (۱۵)$$

که در آن d_1 و d_2 به صورت عمود بر کف اندازه گیری می شوند. در نتیجه، نسبت افت انرژی به انرژی اولیه (راندمان پرش) عبارت خواهد شد از:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} = 1 - \frac{(d_3 + s) / d_1 + V_2^2 / 2gd_1 \cos\theta + L \sin\theta / d_1}{1 + V_1^2 / 2gd_1 \cos\theta} \quad (۱۶)$$

۲-۳. طول پرش

تاکنون روابط ریاضی و تحلیلی جهت تعیین طول پرش ارائه نگردیده، برای این منظور به نتایج تجربی هرچند ناکافی بسنده شده است. بخصوص در مورد طول پرش روی شیب های معکوس تحقیقات محدودی صورت پذیرفته و در مورد حالتی که در انتهای حوضچه با شیب معکوس پله مثبت یا منفی وجود داشته باشد، مطالعاتی مشاهده نگردیده است. در تحقیقات حاضر، سعی گردیده تا طول پرش که فاصله بین پاشنه پرش تا محلی که نیمرخ سطح آب به حداکثر خود می رسد، در نظر گرفته شده، در حالات مختلف اندازه گیری و نتایج مربوطه با نتایج مشابه در حالات کف افقی و یا کف با شیب معکوس ولی بدون پله مقایسه گردد.

۳- مدل آزمایشگاهی

به منظور دستیابی به نتایج مطلوب، آزمایش ها در

یک کانال افقی مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴ متر انجام گرفت. به منظور آرام ساختن آب پیش از ورود به کانال و نیز رسیدن به شرایط اولیه مطلوب از یک تانک که در ابتدای کانال و در راستای آن و به ارتفاع ۱/۱۵ متر ساخته و تکمیل شده بود، استفاده گردید. دیواره‌های شیشه‌ای کانال امکان رویت سطح جریان و چگونگی تغییرات آن را تحت شرایط مختلف نمایان می‌ساخت. در ابتدای کانال یک دریچه کشویی قرار داشت که به وسیله آن عمق جریان در بالادست پرش کنترل می‌گردید و در فاصله ۰/۲۰ متر پس از این دریچه، حوضچه آرامش با شیب کف معکوس، به طول‌های ۱م و ۲/۴م همراه با یک پله مثبت در انتها قرار می‌گرفت. در هر مورد کف کانال تا تراز بالای پله و به طول ۳/۵ متر پس از آن بالا آورده شد و در انتهای این قسمت از یک سرریز برای تنظیم عمق پایاب به گونه‌ای که پرش در روی کف شیبدار تشکیل شود، استفاده گردید. عمق جریان در ابتدا و انتهای پرش به وسیله لیمینیمتر و مقدار دبی به وسیله سرریز مستطیلی هم عرض کار گذاشته شده در انتهای کانال اندازه‌گیری می‌شد. اضافه می‌نماید که قبل از آماده‌سازی سیستم برای انجام آزمایشات روی کف با شیب معکوس و پله در انتها، آزمایش‌های مختلف پرش روی کف افقی انجام گردید و تطبیق بسیار خوب نتایج حاصله با معادله ارائه شده به وسیله Hager و همکاران (۲) که در آن اثر ابعاد مدل نیز در نظر گرفته شده است، حاکی از عملکرد کامل سیستم و آمادگی آن برای انجام آزمایش‌های بعدی بود. اضافه می‌نماید که بررسی انجام شده توسط ابریشمی و صانعی (۶) نشان می‌دهد که اثرات مقیاس در محدوده اعداد فرود آزمایشی و ابعاد کانال مورد استفاده محسوس نمی‌باشد.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

حدود ۲۰۰ آزمایش بر روی دو حوضچه با طول‌های ۱م و ۲/۴م و با چهار شیب معکوس ۰/۵، ۱/۰، ۱/۳ و ۲٪ که در انتهای آن پله مثبت با ارتفاع ۲۵mm و یا ۵۰mm قرار داشت انجام گرفت. در طول آزمایش‌ها، شدت جریان از ۵ L/s تا ۲۰ L/s و عدد فرود از حدود ۴ تا ۱۲ تغییر می‌نمود. در هر آزمایش مقادیر Q ، d_1 ، d_2 ، TW ، عمق پایاب، L طول پرش و L_d فاصله پاشنه پرش از دریچه بالا دست اندازه‌گیری و مقادیر $\frac{d_2}{d_1}$ ، F_{r1} ، $\frac{L}{d_1}$ ، $\frac{L}{d_2}$ و $\frac{\Delta E}{E_1}$ محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری مقادیر d_1 و d_2 در هر حالت

عمق جریان در چندین نقطه از عرض کانال و در محل مربوط اندازه‌گیری و متوسط آنها به عنوان مقدار d_1 یا d_2 انتخاب گردید.

نتایج حاصله نشان می‌دهد که ضمن حساسیت شدید پرش به میزان شیب معکوس و نیز عدد فرود اولیه که می‌تواند آن را مستغرق و یا از حوضچه خارج نماید، وجود پله مثبت می‌تواند نقش عمده‌ای در کنترل و تثبیت موقعیت پرش ایجاد کرده از طول پرش به میزان قابل ملاحظه‌ای بکاهد.

۴-۱- نسبت اعماق مزدوج $\frac{d_2}{d_1}$ - پله با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر

نتایج به دست آمده برای نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ در مقابل F_{r1} از آزمایش‌های روی پله ۲۵ میلی‌متری و برای چهار شیب در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور تحلیل بیشتر نتایج و تعیین میزان تأثیر این نوع پله، همزمان نتایج ابریشمی و صانعی (۶) و یا Khadar (۳) برای شیب معکوس بدون پله و نیز منحنی Blanger برای کف افقی بدون مانع آورده شده است. در تمامی اشکال So نشان‌دهنده شیب کف، P علامت پله مثبت، عدد سمت راست معرف نسبت شیب معکوس و عدد سمت چپ نشان‌دهنده ارتفاع پله می‌باشد. از مجموعه نتایج به دست آمده روند مناسب تأثیر پله مثبت با تغییر شیب مشاهده شده، فاصله اندک منحنی مربوط به حالت بدون پله تا منحنی Blanger و فاصله قابل ملاحظه نتایج اخیر با وجود پله مثبت نسبت به آن، حاکی از نقش مؤثر پله در کاهش $\frac{d_2}{d_1}$ است. به عبارت دیگر برای یک دبی مشخص Q ، F_{r1} ثابت و d_1 مشخص، ضمن آن که شیب معکوس می‌تواند باعث کاهش مقدار d_2 گردد، وجود پله توأم با شیب معکوس، میزان این کاهش را بیشتر نموده، می‌توان حوضچه آرامش اقتصادی‌تری را طراحی نمود. از طرفی، در هر شیب مشخص، تقریباً تمام نقاط حاصل از آزمایش‌ها، زیر منحنی مربوط به همان شیب ولی بدون پله قرار دارند که تأکیدی است بر صحت فرضیه فوق و تأییدی است بر صحت نتایج. اگرچه در شکل (۴) نتایج آزمایشگاهی مربوط به شیب ۰/۲۰ - در بالای منحنی ارائه شده به وسیله Khadar (۳) قرار گرفته‌اند، اما این اختلاف می‌تواند به علت عدم دقت کافی در منحنی Khadar که منتج از تعداد محدود نقاط حاصل از آزمایش است، باشد و به همین دلیل منحنی مذکور از نقطه $F_{r1}=1$ و $\frac{d_2}{d_1}=1$ نگذشته که در صورت تصحیح، اغلب نتایج

تحقیق حاضر در زیر آن قرار می‌گیرد.

همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش شیب منفی دو منحنی مربوط به حالت با پله و بدون پله به یکدیگر نزدیک شده و این نشان می‌دهد که در صورت ثابت بودن ارتفاع پله، تأثیر پله مثبت در شیب‌های معکوس کمتر محسوس‌تر و ملموس‌تر است و با افزایش تدریجی شیب منفی، به تدریج شیب در مقایسه با پله غلبه بیشتری بر شرایط جریان داشته، اثر خود را نمایان‌تر می‌سازد.

۴-۱-۲- پله با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر

نتایج حاصل از تحقیقات حاضر برای پله مثبت با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و در شرایط مشابه پله ۲۵ میلی‌متری در شکل آورده شده که در این نمودارها و به منظور مقایسه، منحنی مربوط به شیب صفر و نیز نتایج تحقیقات ابریشمی و صانعی (۶) و یا Khadar (۳) در هر شیب و منحنی مربوط به پله ۲۵ میلی‌متر رسم گردیده است.

اگر چه در این حالت پراکنش نقاط نسبت به حالت پله ۲۵ میلی‌متر بیشتر است، که شاید ناشی از تأثیر شدید پله با ارتفاع بیشتر بر جریان باشد، وجود بیشتر نقاط در زیر منحنی مربوط به پله ۲۵ میلی‌متری، نشان‌دهنده صحت نتایج و کاهش نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ با افزایش ارتفاع پله است. این تفاوت به خصوص در شیب‌های $0/05$ و $0/10$ محسوس‌تر است. ولی با افزایش شیب معکوس، به تدریج فاصله دو منحنی مربوط به پله‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌متری نزدیک‌تر شده و همانگونه که قبلاً اشاره شد دلیل آن کاهش تأثیر ارتفاع پله نسبت به تأثیر شیب منفی و یا بالعکس است.

همچنین ملاحظه می‌شود که پراکندگی نقاط به دست آمده از آزمایش‌ها با افزایش شیب بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده حساسیت زیادتر پرش در این شرایط نسبت به عوامل مؤثر بر آن به منظور کنترل موقعیت آن در روی حوضچه آرامش و ایجاد پرش آزاد می‌باشد. به عبارت دیگر حجم زیاد آب در این حالت روی حوضچه نیاز به عدد فرود اولیه نسبتاً بالایی دارد تا توان غلبه بر مؤلفه نیروی وزن $w \sin \theta$ و نیروی اخذ شده توسط پله را داشته باشد و از استغراق پرش جلوگیری نماید. از طرفی با افزایش عدد فرود و یا کاهش عمق پایاب، پرش به سمت پایین دست حرکت می‌کند، که به محض حرکت به طرف پایین دست و شروع خروج از روی شیب

معکوس، به تدریج از مقدار $w \sin \theta$ کاسته شده و همین امر موجب سرعت گرفتن جریان به سمت پایین دست می‌شود که خود عامل مهمی در عدم تثبیت پرش هیدرولیکی می‌گردد.

۴-۲- طول پرش (L)

۴-۲-۱- پله با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر

برای نشان دادن طول پرش و به دلیل وابستگی d_2 به عوامل مختلف در مقایسه با d_1 (مرجع‌های ۳ و ۶) در درجه اول از نسبت $\frac{L}{d_1}$ در برابر F_{r1} استفاده می‌شود. مقادیر مربوط برای پله با ارتفاع ۲۵ میلی‌متری در شیب‌های مختلف مورد نظر محاسبه و در شکل ۵ به همراه منحنی انتخابی آورده شده‌اند. از مقایسه نتایج حاصله با نتایج مربوط به حالت بدون پله در شیب صفر و دیگر شیب‌های معکوس که در هر شکل اضافه گردیده‌اند، ملاحظه می‌شود که تمامی نقاط به دست آمده برای چهار شیب منتخب در زیر نمودارهای مربوط به حالت بدون پله قرار گرفته‌اند. نتایج، ضمن نشان دادن نقش مؤثر پله بر کاهش طول پرش و میزان این تأثیر در شیب‌های معین، اهمیت وجود پله مثبت در حوضچه‌های آرامش از نظر اقتصادی را نمایان می‌سازد. بخصوص آنکه نسبت این کاهش در شیب‌های منفی بیشتر محسوس‌تر است تا جایی که در شیب $0/02$ تا حدود ۳۰٪ کاهش طول در مقایسه با حالت بدون پله وجود دارد. این امر نشان‌دهنده آن است که در حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس تندتر، شرایط جریان آمادگی بیشتری برای تأثیرپذیری از پله‌های مثبت در جهت کاهش طول پرش دارد.

اضافه می‌نماید که چنانچه مقادیر $\frac{L}{d_2}$ در مقابل F_{r1} تعیین و محاسبه گردند (شکل ۶-۱) عملاً ارتباط معین و مشخصی بین آنها، بخصوص در مقایسه بین شیب‌های مختلف مشاهده نمی‌گردد، اما در عین پراکندگی نقاط و با تقریبی می‌توان برای تمام مقادیر F_{r1} ، نسبت $\frac{L}{d_2}$ را حدوداً معادل $4/5$ در نظر گرفت که برای اعداد فرود بیش از حدود ۹، از دقت بسیار خوبی برخوردار است.

۴-۲-۲- پله با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر

نتایج حاصله برای این نوع پله در شکل ۷ نشان داده شده و همانگونه که مشاهده می‌شود، برخلاف نتایج مربوط به نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ در این حالت نقاط از پراکنش

۵- نتیجه گیری

مجموعه تحقیقات ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد که:

۱- پله‌های مثبت در ایجاد پایداری پرش در روی کف‌های با شیب معکوس و کنترل سهل‌تر آن می‌تواند نقش مهمی داشته باشد.

۲- در مقادیر ثابت F_{r1} ، نسبت $\frac{d_2}{d_1}$ و در نهایت مقدار عمق ثانویه پرش در اثر قرار گرفتن پله مثبت در مسیر پرش روی شیب معکوس، کاهش یافته و با افزایش ارتفاع پله، این کاهش بیشتر می‌گردد. مقادیر کاهش در شیب‌های مختلف آزمایش شده و برای دو نوع پله مثبت با ارتفاع ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر ارائه گردیده‌اند. نقش پله مثبت در این حالت مشابه نقش شیب معکوس می‌باشد.

۳- با افزایش شیب معکوس از میزان تأثیر پله مثبت در کاهش مقدار d_2 کاسته می‌گردد.

۴- ضمن تعیین میزان تأثیر پله‌های مثبت با ارتفاع ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر در کاهش طول پرش و در چهار شیب معکوس ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۳ و ۰/۲۰ و نشان دادن نقش مؤثر این نوع پله‌ها توأم با شیب معکوس کف در کاهش طول پرش و در نهایت طول حوضچه آرامش مربوطه، مشخص گردید که درصد کاهش طول پرش در شیب‌های منفی تندتر، محسوس‌تر است. این درصد برای شیب ۰/۲۰، برای پله با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر تا حدود ۳۰ درصد و برای پله با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تا حدود ۴۵ درصد نسبت به حالت شیب معکوس بدون پله می‌رسد.

۵- اگرچه افزایش ارتفاع پله باعث کاهش بیشتر طول پرش می‌گردد، اما میزان این تأثیر با افزایش شیب معکوس کم‌رنگ‌تر می‌گردد.

۶- پله‌های مثبت در افزایش راندمان افت انرژی می‌توانند تا حدودی مؤثر باشند که میزان این تأثیر در شرایط تحقیقات حاضر حدود ۱۰ درصد می‌باشد. در هر حال همانطور که در حالت بدون پله، تغییر از صفر به منفی و افزایش آن در حد شیب‌های انتخابی، اختلاف محسوسی در نسبت افت انرژی، ایجاد نمی‌نماید، تغییر ارتفاع پله نیز اختلاف قابل ملاحظه‌ای را در این امر بوجود نمی‌آورد. در حالت کلی می‌توان گفت که حساسیت نسبت‌های $\frac{\Delta E}{E_1}$ و یا نسبت به تغییر شیب منفی و یا تغییر ارتفاع پله در محدوده‌های آزمایش شده، بسیار کم می‌باشد.

کمتری حتی در مقایسه با پله ۲۵ میلی‌متری برخوردارند که دلیل آن می‌تواند انقباض و پایداری بیشتر پرش در اثر افزایش ارتفاع پله باشد.

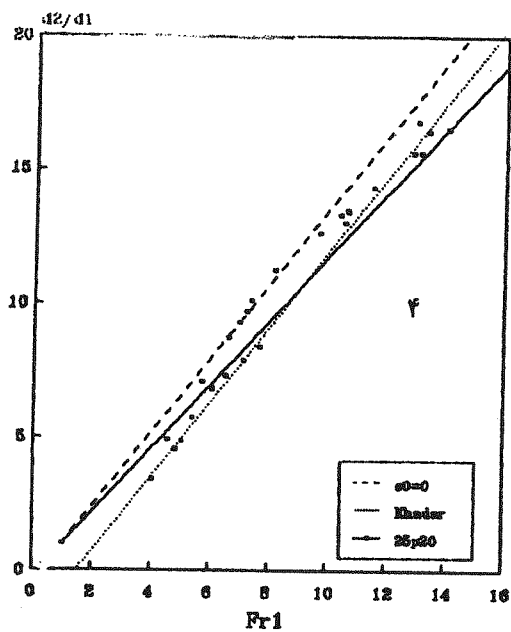
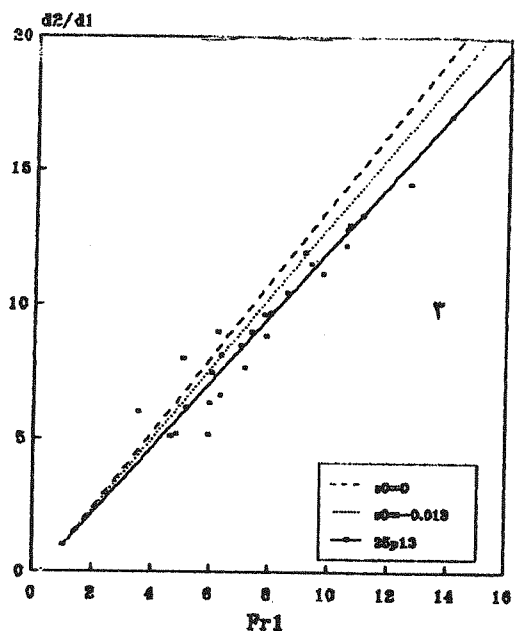
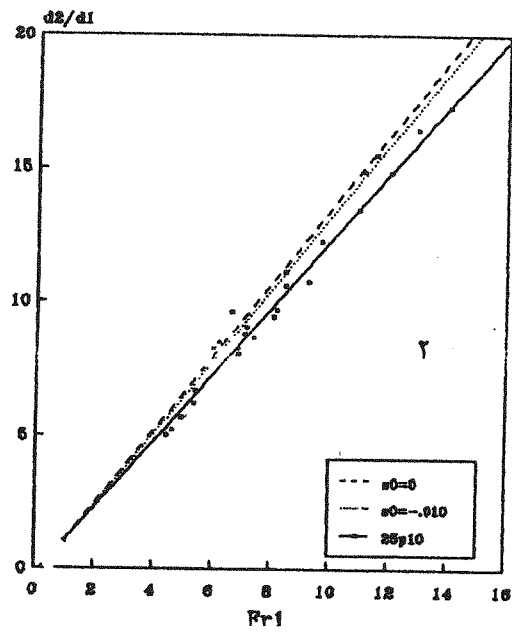
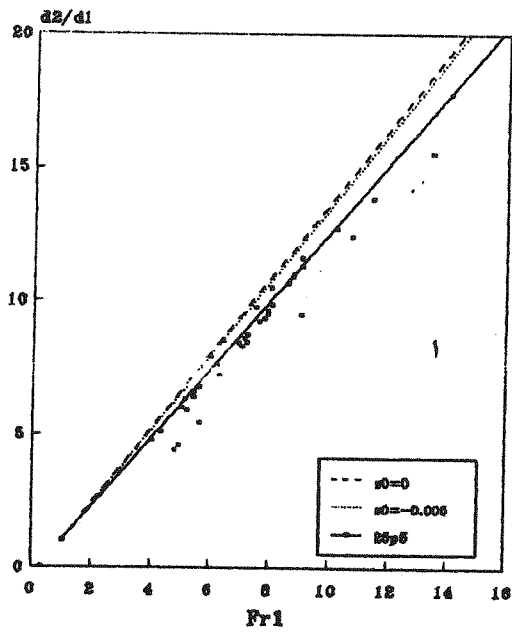
ملاحظه می‌شود که در این حالت نیز با افزایش شیب، درصد کاهش طول پرش نسبت به حالت بدون پله افزایش می‌یابد و به حدود ۴۵٪ در شیب ۰/۲- می‌رسد. اما به تدریج که شیب معکوس افزایش می‌یابد، منحنی مربوط به پله ۵۰ میلی‌متری به منحنی مربوط به پله ۲۵ میلی‌متری با همان شیب نزدیکتر می‌شود که حاکی است از اینکه در شیب‌های منفی تندتر بیشترین اثر در کاهش طول را ایجاد حایل جهت جذب نیروی مخصوص دارد و از آن به بعد اگرچه افزایش ارتفاع پله باعث کاهش نسبی طول پرش می‌گردد، اما این تأثیر با افزایش شیب معکوس کم‌رنگ‌تر می‌گردد.

در این حالت نیز مقادیر $\frac{L}{d_2}$ در برابر F_{r1} (شکل ۶-۲) روند معینی را نشان نداده اما در مجموع برای یک F_{r1} معین و ثابت، مقدار کمتری را برای $\frac{L}{d_2}$ در مقایسه با پله ۲۵ میلی‌متری ارائه می‌نماید. می‌توان مقدار تقریبی $\frac{L}{d_2}$ را برای تمامی اعداد فرود حدود ۴/۲۵ در نظر گرفت.

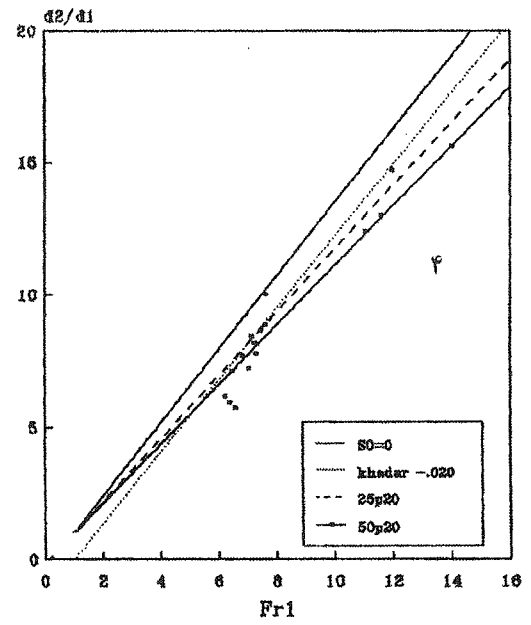
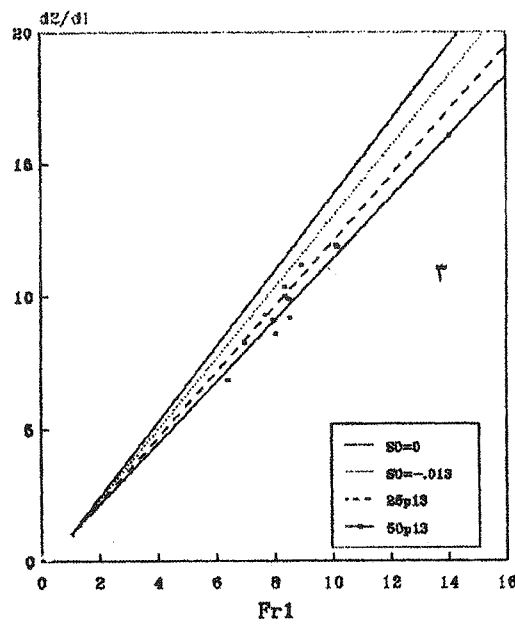
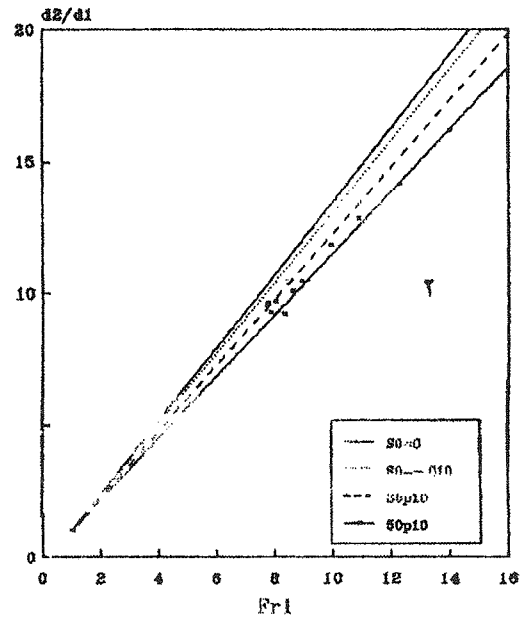
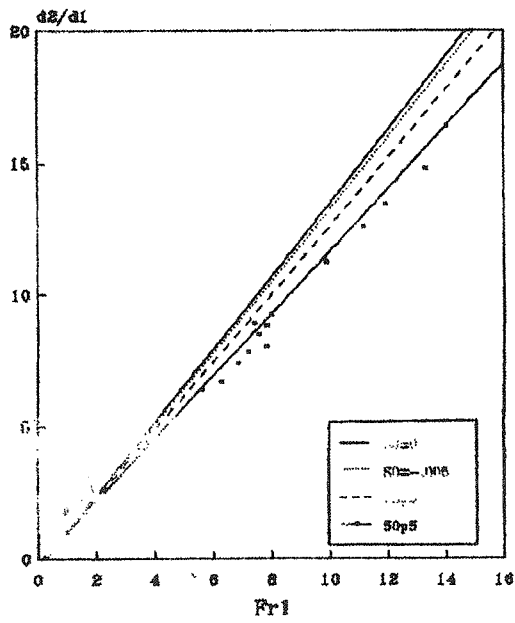
۴-۳- افت انرژی

به منظور نشان دادن میزان افت انرژی از رسم منحنی‌های $\frac{\Delta E}{E_1}$ و یا $\frac{E_2}{E_1}$ در برابر F_{r1} استفاده می‌شود که نتایج مربوط برای دو نوع پله ۲۵ و ۵۰ میلی‌متری در شکل ۸ همراه با منحنی مربوط به شیب صفر ارائه گردیده‌اند. تحقیقات ابریشمی و صناعی (۶) نشان می‌دهد که اختلاف محسوسی میان نتایج شیب صفر و شیب‌های معکوس منتخب وجود ندارد، اما وجود اغلب نقاط به دست آمده از تحقیقات حاضر در بالای منحنی شیب صفر ثابت می‌کند که در صورت وجود پله مثبت در انتهای حوضچه با شیب معکوس، مقدار نسبت افت انرژی، افزایش یافته، میزان این اختلاف برای هر دو نوع پله ۲۵ و ۵۰ میلی‌متری تقریباً یکسان است و منحنی‌های مربوط با تقریب کافی دارای همان روند منحنی شیب صفر می‌باشند.

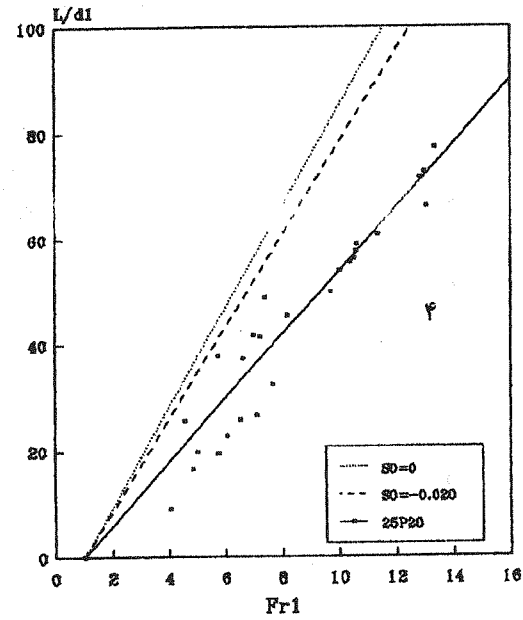
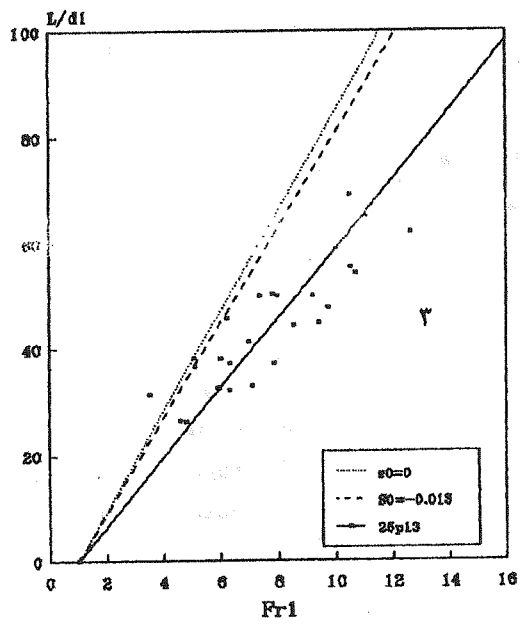
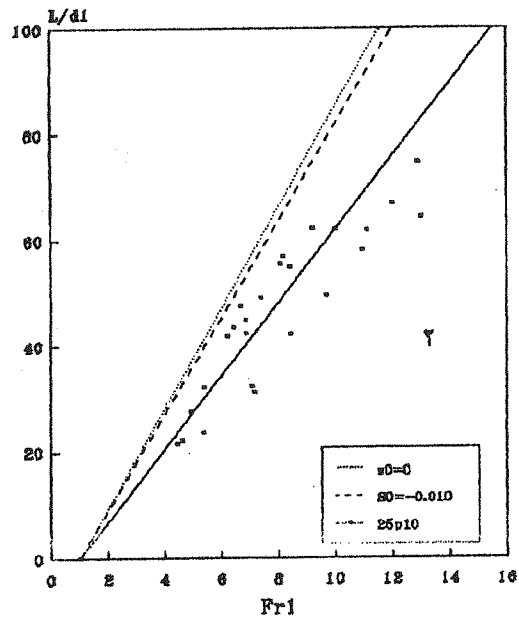
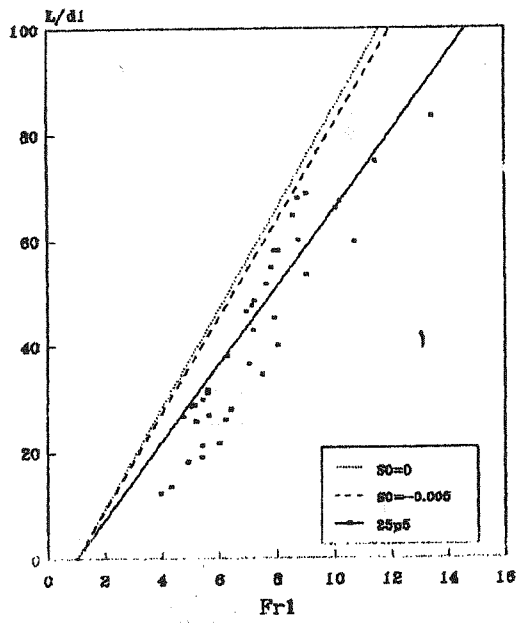
از بررسی نمودارهای فوق مشاهده می‌شود همانطور که در حالت بدون پله تغییر شیب از صفر به منفی و افزایش آن در حد شیب‌های انتخابی اختلاف محسوسی در نسبت افت انرژی ایجاد نمی‌نماید، تغییر ارتفاع پله نیز باعث ایجاد اختلاف قابل ملاحظه‌ای در این امر نشده و در کل حساسیت کم مقادیر $\frac{\Delta E}{E_1}$ و یا $\frac{E_2}{E_1}$ به اینگونه تغییرات مشخص می‌گردد.



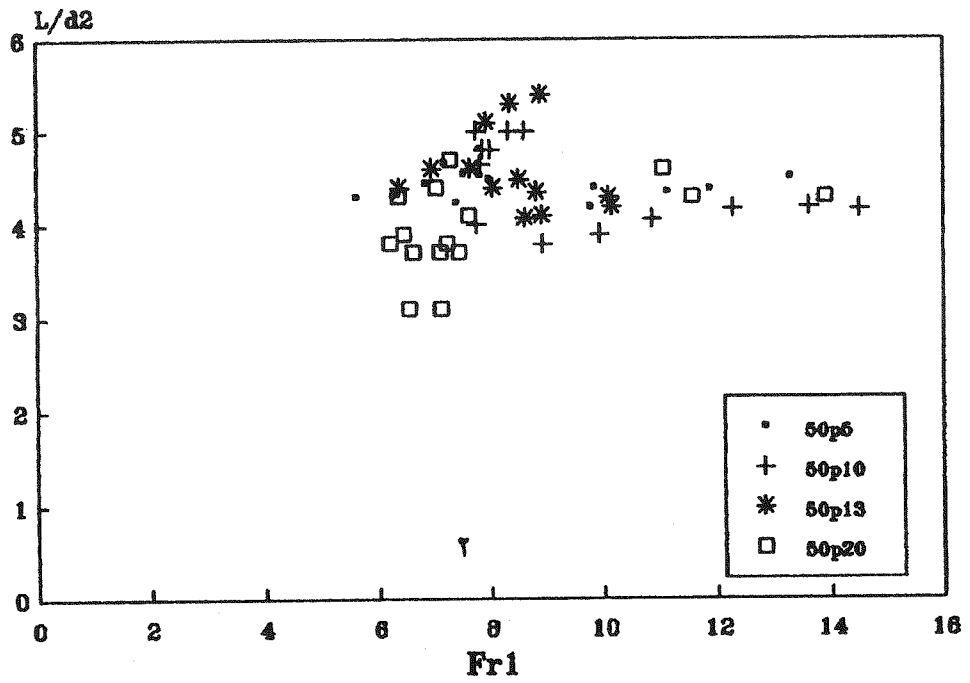
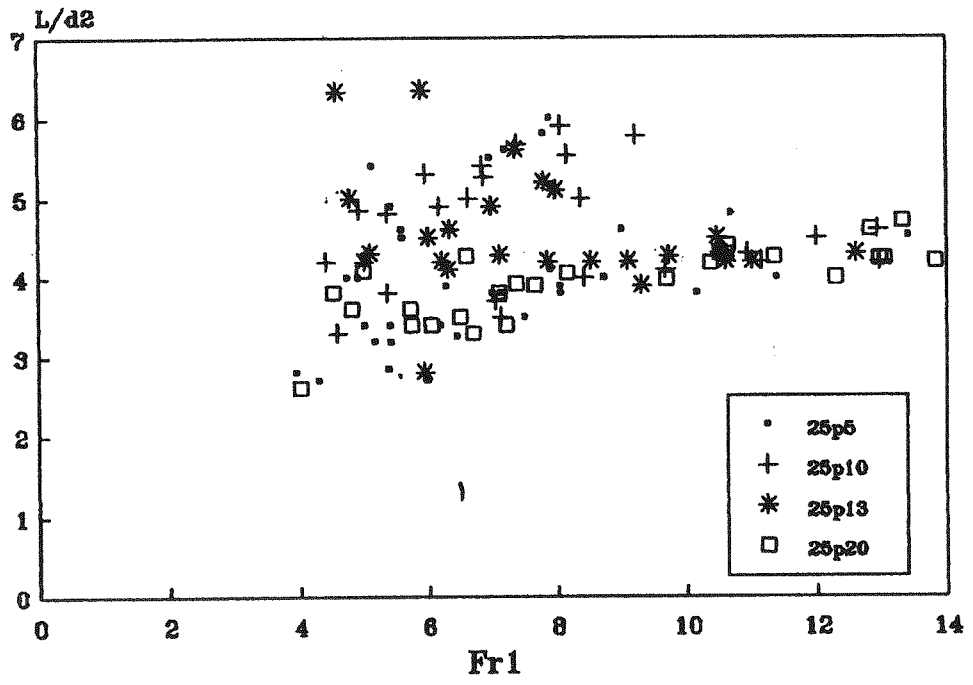
شکل (۳) مقادیر $\frac{d_2}{d_1}$ نسبت به Fr_1 برای پله با ارتفاع ۲۵ میلیمتر در شیب معکوس ۱/۵٪ (۱) ۲/۱٪ (۲) ۳/۱٪ (۳) ۴/۲٪ (۴)



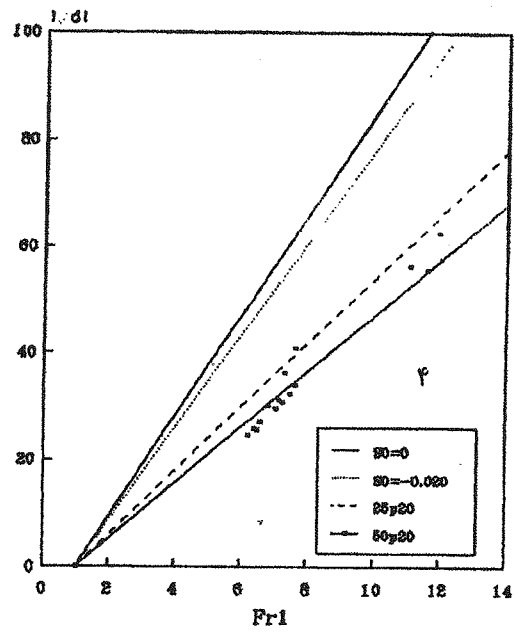
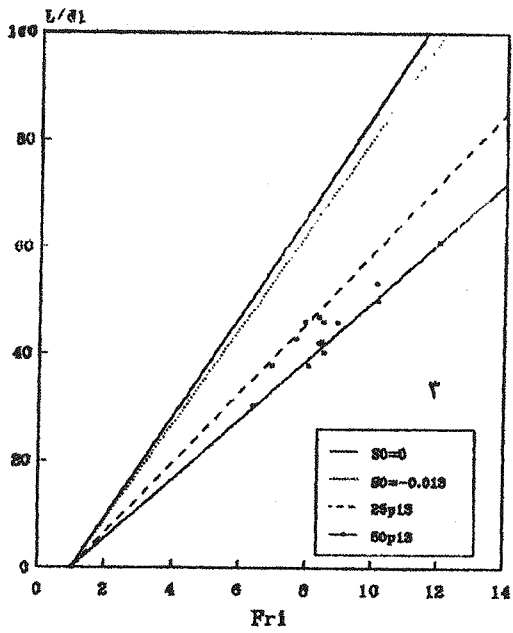
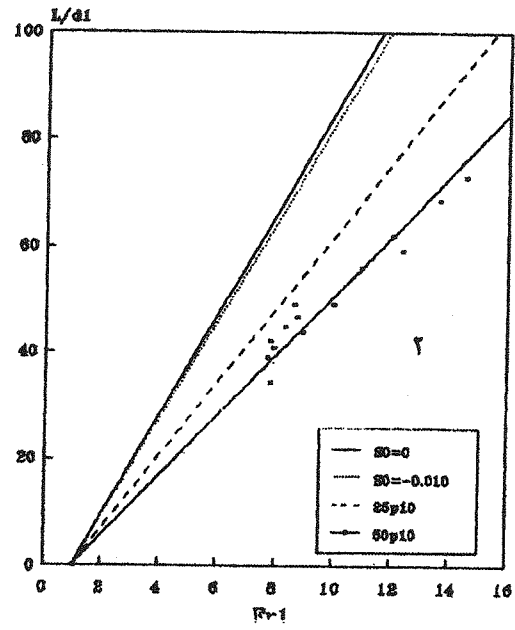
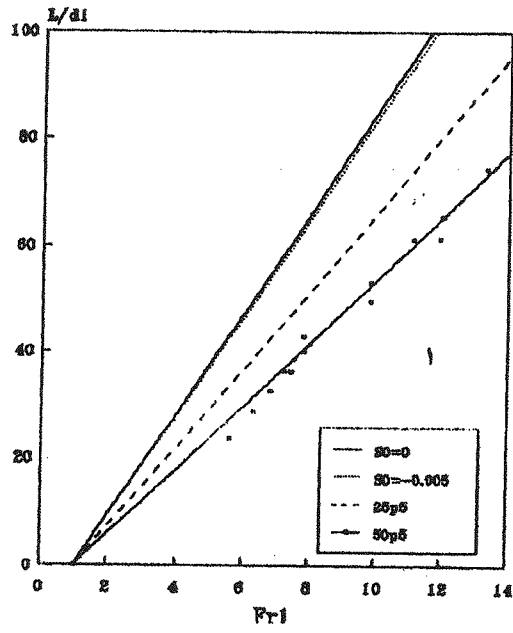
شکل (۴) مقادیر $\frac{d_2}{d_1}$ نسبت به Fr_1 برای پله با ارتفاع ۵۰ میلیمتر در شیب معکوس ۱/۵ (۰٪) ۱/۳ (۳٪) ۲/۳ (۲٪)



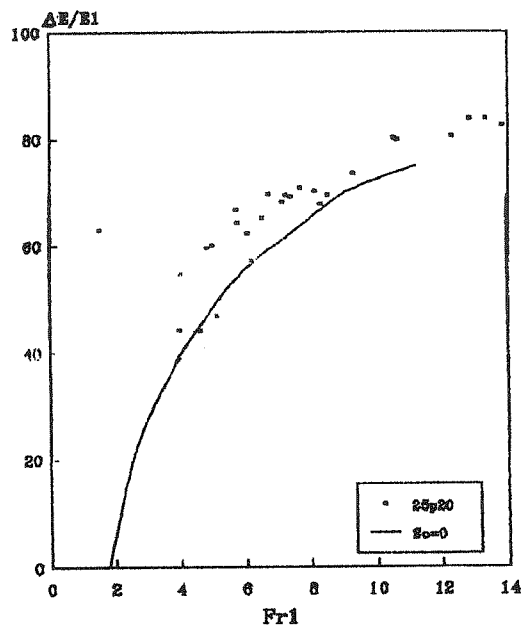
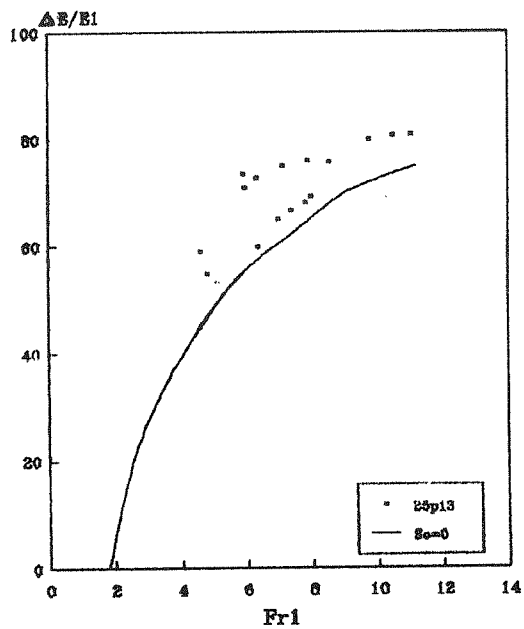
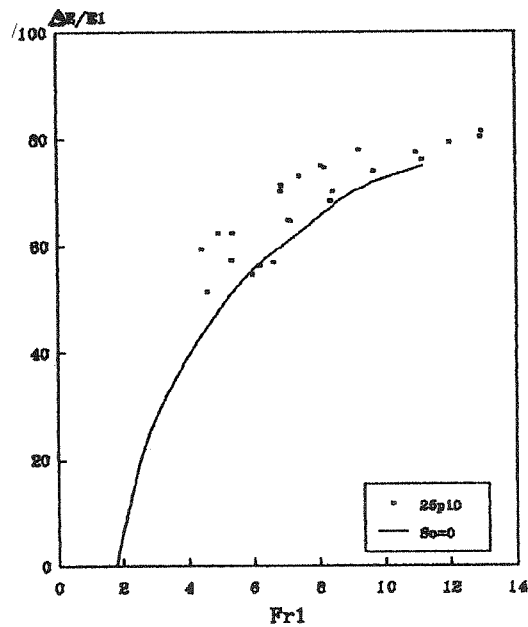
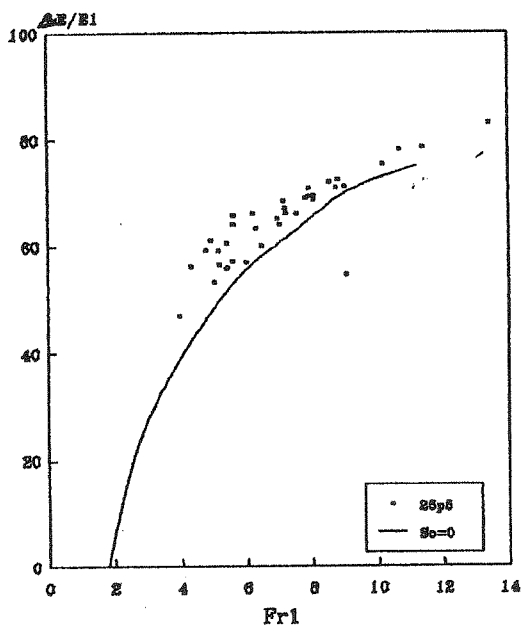
شکل (۵) مقادیر $\frac{L}{d_1}$ نسبت به Fr_1 برای پله با ارتفاع ۲۵ میلیمتر در شیب معکوس (۱) / ۵٪ ، (۲) / ۱٪ ، (۳) / ۱/۳٪ ، (۴) / ۲٪



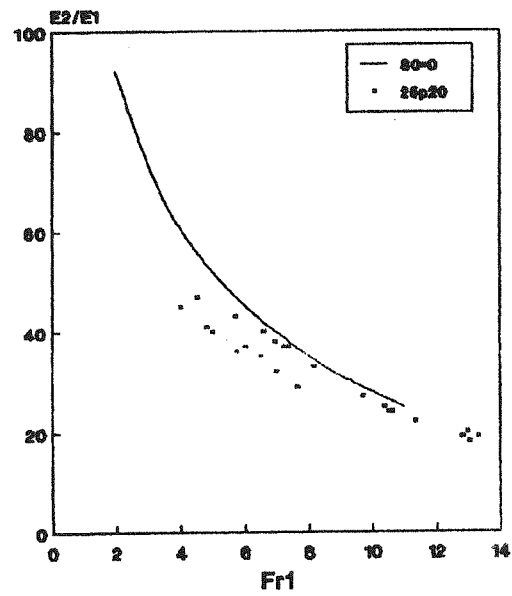
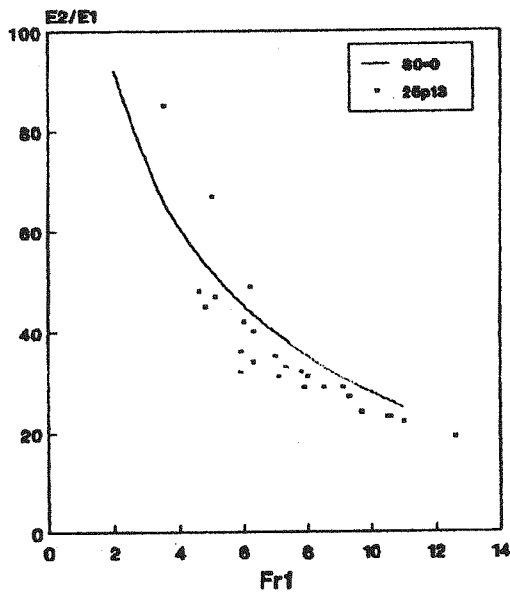
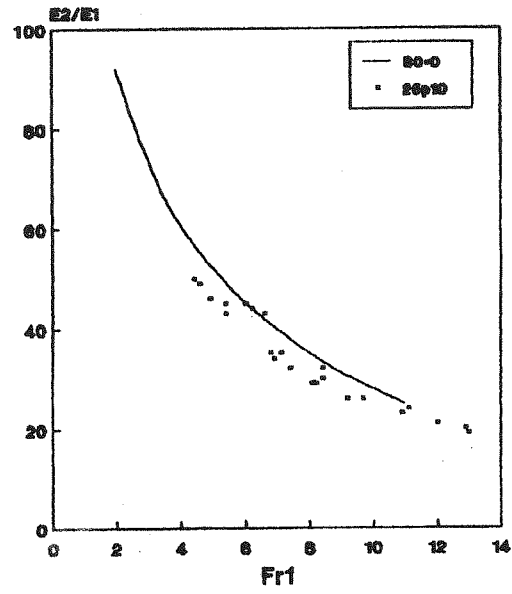
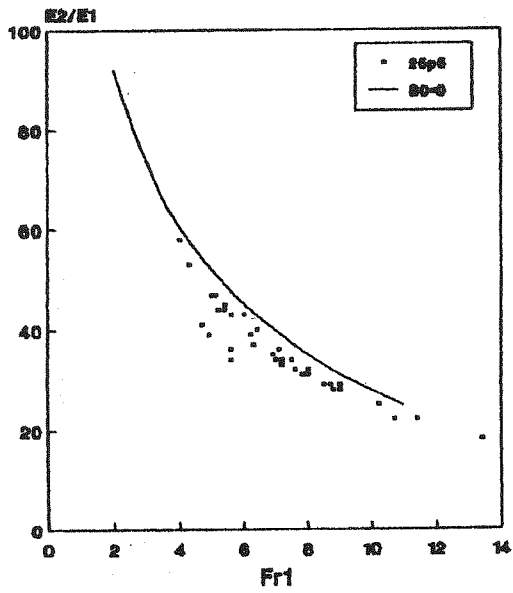
شکل (۶) مقادیر $\frac{L}{d_2}$ نسبت به Fr_1
 (۱) پله با ارتفاع ۲۵ میلیمتر (۲) پله با ارتفاع ۵۰ میلیمتر



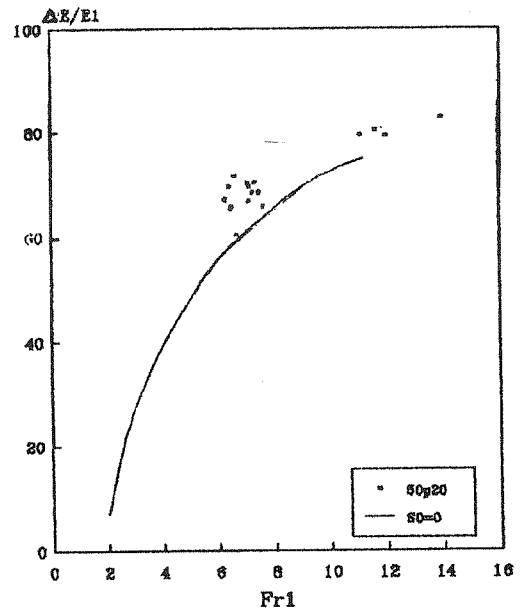
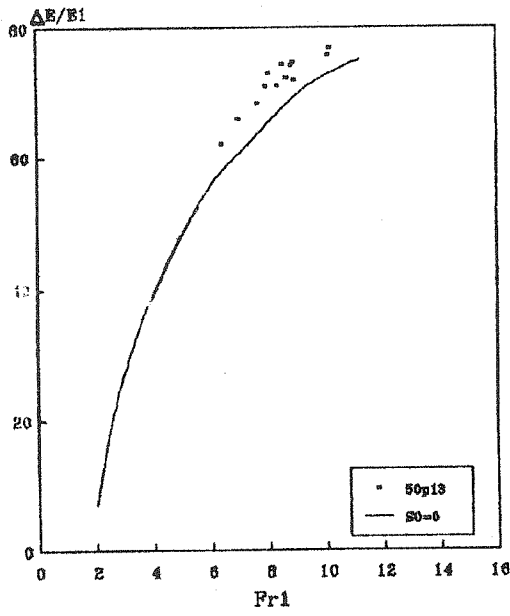
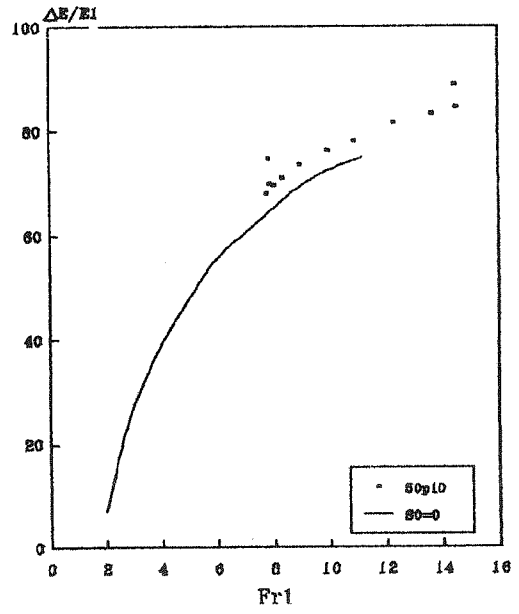
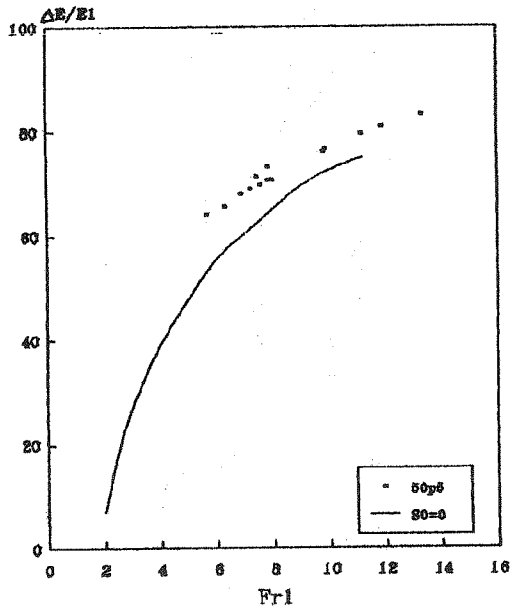
شکل (۷) مقادیر $\frac{L}{d_1}$ نسبت به Fri برای پله با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر در شیب معکوس ۱/۵ (۰٪) ۱/۳ (۳٪) ۲/۳ (۲٪)



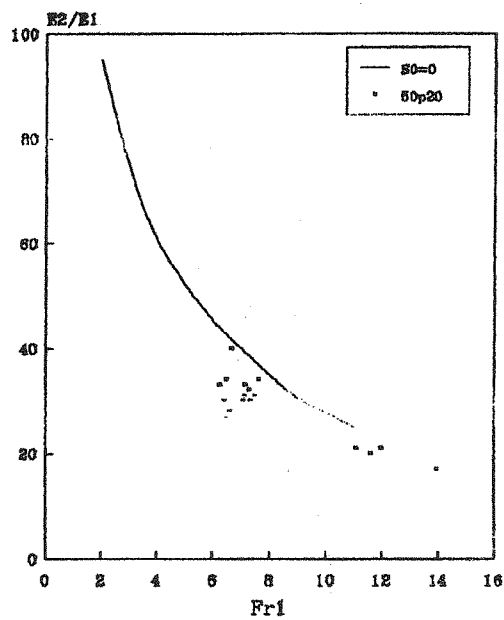
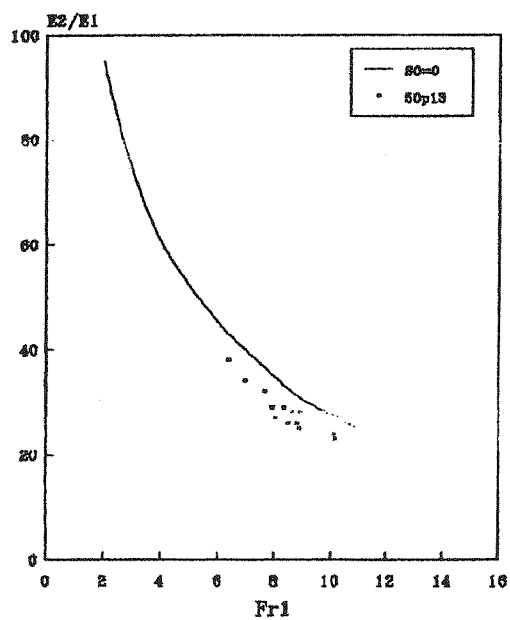
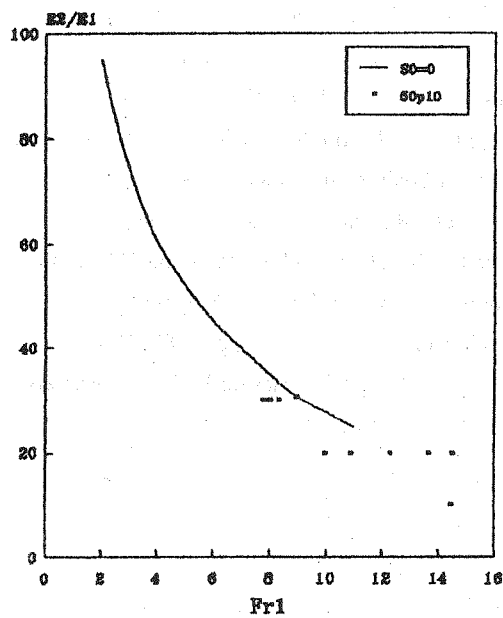
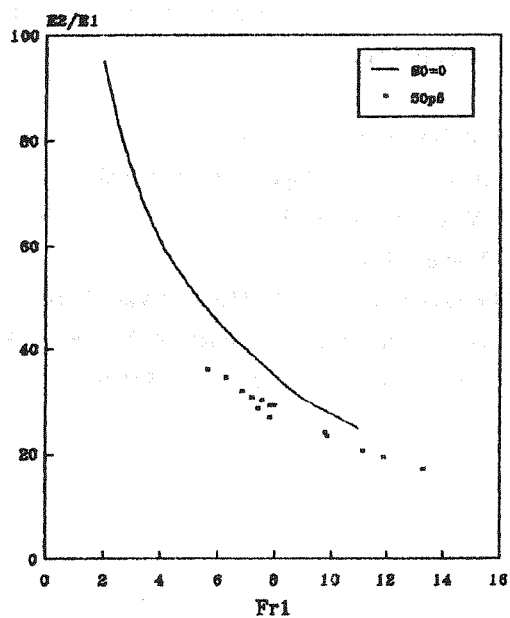
شکل (۸) مقادیر $\frac{\Delta E}{E_1}$ نسبت به Fr_1 در شیب‌های انتخابی و ارتفاع پله ۲۵ میلیمتر



شکل (۸) مقادیر $\frac{E_2}{E_1}$ نسبت به Fr_1 در شیب‌های انتخابی و ارتفاع پله ۲۵ میلیمتر



شکل (۸) مقادیر $\frac{\Delta E}{E_1}$ نسبت به Fr_1 در شیب‌های انتخابی و ارتفاع پله ۵۰ میلیمتر



شکل (۸) مقادیر $\frac{E_2}{E_1}$ نسبت به Fr_1 در شیب های انتخابی و ارتفاع پله ۵۰ میلیمتر

- [1] Quraishi, Ali A. and Abdullah M. Al Brahim, "Hydraulic Jump in Sloping Channel with Positive and Negative Step," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 30, 1992, No. 6.
- [2] Hager, W. H. and Nicola R. Bretz, "Hydraulic Jump at Positive and Negative Steps," *Journal of Hydraulic Research* vol. 24, 1986, No. 4.
- [3] Khadar, M. H. A. and S. Rajagopal, "Hydraulic Jump in Adverse Channel Slopes," *J. of Civil Engineers*, vol. 109, 1972, pp 1107-1120.
- [4] Rouse, H., "Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers", New York, Mc. Graw-Hill Book Co. 1938, p 301.
- [5] Stevens, J. C. Discussion of the paper by Kindsvater "Hydraulic Jump in Sloping Channel," *ASCE*, paper No. 2228. *Tans.*, vol. 109, 1944, pp 1107-1154.
- [6] Abrishami. J. and M. Saneie, "Hydraulic Jump in Adverse Basin Slopes," *International Journal of Water Resources Engineering*, vol. 2, No. 1, Winter 1994.
- [7] Kawagoshi and W. H. Hager, "Wave Type Flow at Abrupt Drops," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 28, 1990, No. 5, pp 591-608.