

### بررسی عددی اثر میزان پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت قطعات پیش ساخته بتنی پوشش تونل‌های انتقال آب بر میزان افت انرژی جریان

#### مقاله پژوهشی

مصطفی نبی‌پور<sup>۱</sup>؛ سهیل رضاپور<sup>۲</sup>؛ سیدحسین مهاجری<sup>۳\*</sup>؛ اشکان نوری<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته دکتری؛ گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، mnabipour61@gmail.com

۲- دانشجوی دوره دکتری؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، mnabipour61@gmail.com

۳- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، hossein.mohajeri@khu.ac.ir

۴- دانش‌آموخته دوره کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، noury.ashkan@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵

شماره صفحات: ۱۴۱ تا ۱۵۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2023.12378.1463

واژگان کلیدی	چکیده
تونل انتقال آب مدل‌سازی عددی پله شدگی و انحراف هندسی قطعات پیش‌ساخته بتنی افت هد هیدرولیکی	سازه‌های تونل انتقال آب به دو گروه سیستم‌های تحت فشار و سطح آزاد طراحی می‌شوند؛ که غالباً توسط قطعات پیش‌ساخته بتنی نگهداری می‌شوند. در این سازه‌ها به دلایلی همچون؛ تراوش آب زیرزمینی، عدم تزریق مناسب و غیره موجب بروز پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت در تونل خواهد شد. در این مطالعه به واسطه مدل‌سازی سه‌بعدی و دوفازی جریان در تونل انتقال آب، چرخش و فروافتادگی قطعات پوشش بتنی پیش ساخته بر افت هد هیدرولیکی و میدان جریان ناشی از پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت بررسی شده‌است. نتایج حاصل از این پژوهش در خصوص فروافتادگی و عرض پله شدگی بیان کننده این موضوع است که خطوط جریان بدون انحراف در اثر عامل فرورفتگی در مسیر مستقیم حرکت می‌کنند و جریان در ناحیه فروافتادگی به صورت چرخشی و با سرعت پایین می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به اینکه عرض‌های ۰/۸۵، ۱/۷، ۲/۵۵ متر، به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد عرض کامل تونل می‌باشند و افت‌های مشاهداتی رخ داده نیز در حدود ۲۸، ۴۷ و ۷۵ درصد افت ناشی از پله با عرض کامل است، در نتیجه می‌توان بیان کرد که نسبت افت ناشی از پله با عرض ناقص، به افت ناشی از پله با عرض کامل برابر نسبت عرض‌ها است.

فشار یا آزاد داشته باشیم (Falvey, 1980)، جریان دو فازی تشکیل می‌شود که گاهی موجب بروز مشکلاتی حین بهره‌برداری می‌شود. برای برقراری جریان آزاد در تونل‌ها باید پرشدگی تونل کمتر از ۸۲ درصد باشد و جهت اطمینان این مقدار باید برابر ۷۵ درصد (Chanson, 1993, 2013) در نظر گرفته‌شود.

در ساخت تونل‌های مکانیزه که غالباً توسط قطعات

#### ۱- پیش‌گفتار

تونل انتقال آب یکی از رایج‌ترین سازه‌های انتقال آب بین دو نقطه است که معمولاً به صورت سیستم‌های تحت فشار یا با سطح آزاد طراحی می‌گردند. هر یک از این دو سیستم دارای ویژگی‌های خاص خود هستند که مستلزم ملاحظات ویژه در طراحی است. در صورتی که جریان انتقالی بین حالت تحت

\* تهران؛ خیابان شهید مفتاح؛ نرسیده به انقلاب شماره ۴۳؛ دانشگاه خوارزمی؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ کد پستی: ۱۵۷۱۹-۱۴۹۱۱؛ شماره‌ی تلفن:

1997). در پژوهش دیگری، جریان در یک تنگ شدگی ناگهانی در لوله‌های تحت فشار به صورت آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی دوبعدی مقایسه شده است ( Ando & Shakouchi., 2004). در ارتباط با پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت در تونل انتقال آب، می‌توان به تحقیق نجفی و نبی‌پور اشاره نمود؛ در این پژوهش، محققین با مدل‌سازی ۲ بعدی و یک بعدی جریان در یک تونل انتقال آب به بررسی اثر شکل پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت، زاویه و افت هد ناشی از آن پرداختند. با وجود مفید بودن اطلاعات گزارش شده در این مطالعه، به جهت مدل‌سازی ۲ بعدی جریان بسیاری از جنبه‌های جریان در تونل انتقال آب مورد بررسی قرار نگرفت (Najafi & Nabipour, 2012).



شکل ۱- نمونه‌های پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت در تونل انتقال آب گلاب در مجاورت سد تنظیمی زاینده رود

در این مطالعه، به بررسی برخی از اثرات پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت بر جریان و نیز افت هد در داخل تونل انتقال آب پرداخته می‌شود. به بیان دقیق‌تر، در این پژوهش حاضر سعی بر این است تا با مدل‌سازی سه‌بعدی و دوفازی جریان در تونل انتقال آب، چرخش و فروافتادگی قطعات پوشش بتنی پیش ساخته بر افت هد هیدرولیکی و میدان جریان ناشی از پله شدگی و انحراف هندسی بررسی گردد. براین اساس، مدل‌سازی عددی مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلونت (Fluent) و به صورت سه بعدی انجام پذیرفته است. علاوه بر این گسسته سازی معادلات بر اساس روش آپویند درجه یک

بتنی پیش‌ساخته نگهداری می‌شوند، عواملی چون تراوش آب زیرزمینی، عدم تزریق مناسب پشت سگمنت‌ها، مچاله‌شوندگی (Squeezing) و خطای اپراتور دستگاه حفار باعث نصب نامناسب قطعات پیش‌ساخته بتنی موجب بروز پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب ( Georg & Davorin, 2004) سگمنت در تونل خواهد شد. چنین عواملی می‌تواند موجب افت موضعی در تونل انتقال آب شود که با توجه به طول و تعداد دفعات تکرار چنین افتی می‌تواند بر شرایط و معیارهای طراحی تاثیر بگذارد. از جمله مسائلی که می‌تواند باعث تغییر مقطع در تونل‌ها و چنین افتی گردد، رخ دادن پله شدگی و انحراف هندسی در قطعات پیش‌ساخته بتنی پوشش تونل است. در حقیقت، وقوع پله شدگی و انحراف هندسی در تونل‌های انتقال آب با ایجاد انحراف در خطوط جریان و در نتیجه تغییر تراز آب، باعث وقوع افت در تونل شده و کاهش آبگذری و افزایش تراز آب را به همراه دارد (Najafi & Nabipour, 2012).

مشابه این مشکل در بسیاری از تونل‌های احداثی در کشور و خارج کشور مشاهده شده است. به عنوان نمونه در شکل ۱، نمونه‌ای از رواداری رخ داده در تونل انحراف آب گلاب در مجاورت سد تنظیمی زاینده رود در استان اصفهان که در بخش‌هایی از قطعات پیش‌ساخته بتنی پوشش ۱۹ رینگ واقع در محدوده کیلومتر ۷۹۶۲-۷۹۱۴ است، نمایش داده شده است. مشابه چنین مواردی در این پروژه در فواصل مختلف روی داده است. ارتفاع چنین در نقاط مختلف متفاوت بوده و در برخی نقاط به ۱۸ سانتی‌متر نیز رسیده است که چنین ارتفاع‌هایی می‌تواند بر افت هد هیدرولیکی در طول رودخانه اثر بگذارد.

با توجه به اهمیت پله شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت در تونل انتقال آب، این موضوع مورد توجه محققین مختلفی قرار گرفته است. در این ارتباط، اثر عدد فرود، ارتفاع کف و شکل کف بر جریان گذرنده از موانع؛ توسط محققین (Biswas, et al., 2004) مختلف بررسی شده است. سپس در پژوهش دیگری شرایط جریان در پله‌شدگی به روش عددی و به صورت دوبعدی بررسی شد (Khazhoyan & Khakimzyanov, 2006). همچنین در مطالعه دیگری، محققین اثر پله بر میدان جریان را در یک کانال با مقطع مصنوعی بررسی نمودند ( Wen, et al., )

خطای نصب سگمنت و جریان‌های برگشتی و همچنین مغشوش بودن جریان، بسیار پیچیده است. مدل‌سازی عددی تونل در مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت (*Fluent*) و به صورت سه بعدی انجام شده است. گسسته سازی معادلات بر اساس روش آپویند درجه یک (*Volume of Fraction of Fraction*) انجام می‌شود. در مدل‌سازی جریان آشفته در مطالعه حاضر از به دلیل حساسیت مدل در ناحیه پله‌شدگی و همچنین در ناحیه سطح آزاد جریان، از مدل  $\kappa - \varepsilon RNG$  استفاده شده است (*Jiao, et al., 2007*). این مدل که شامل رویکرد جدیدی برای جریان‌های آشفته است؛ از معادله‌ای مبتنی بر میانگین مربع نوسان گردابه‌ای پدید می‌آید. همچنین به منظور شبیه‌سازی نوسانات سطح جریان آب در تونل از مدل دو فاز (*Volume of Fraction of Fraction*) بهره برده شد. شرایط مرزی نیز در مطالعه حاضر متشکل از دبی معلوم در مرز ورودی و در مرز خروجی ارتفاع معلوم مورد استفاده قرار گرفته است؛ علاوه بر این با توجه به پژوهش‌های پیشین (*Jiao, et al., 2007*) و (*Berntsen, et al., 2001*) دیواره‌ها نیز با شرط مرزی دیواره بدون حرکت و با زبری معادل ۰/۱۴ مدل شده‌اند.

## ۲-۲- مشخصات هندسی و مش‌بندی تونل

مش‌بندی تونل با استفاده از تجربه‌های قبلی و سعی و خطا انجام پذیرفته است. نمونه‌ای از مش‌بندی در ناحیه پله‌ای در شکل ۲، نمایش داده شده است. به علت حساسیت مدل در ناحیه پله‌داری و همچنین در ناحیه سطح آزاد جریان، از شبکه ریزتری برای این نواحی استفاده شده است. در این تحقیق از اطلاعات تونل انتقال آب گلاب برای مدل‌سازی استفاده گردید. مقطع تونل گلاب در شکل ۳، نشان داده شده است. مشخصات تونل نمایش داده شده در مطالعه حاضر عبارت از ارتفاع تونل ۳/۸ متر، ارتفاع آب ۲/۷۳ متر، شعاع هیدرولیکی ۱/۰۸ متر و دبی ۱۸/۶ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

در مدل‌سازی سه بعدی حاضر، علاوه بر در نظر گرفتن پله‌های کف، به صورت مجزا، پله‌شدگی در دیواره تونل نیز مورد بررسی قرار گرفت. پله‌شدگی در دیواره تنها در یکی از دیواره‌های جانبی تونل مدل‌سازی شده است. طول تونل ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده و پله‌شدگی در طول ۵۰ متری از ابتدای تونل قرار داده شده است. شش ارتفاع مختلف برای

(*First Order Upwind*) انجام شده است، همچنین مدل‌سازی جریان آشفته در مطالعه حاضر از مدل  $\kappa - \varepsilon RNG$  استفاده شده است (*Jiao, et al., 2007*). همچنین به منظور شبیه‌سازی نوسانات سطح جریان آب در تونل نیز از مدل دو فاز (*Volume of Fraction*) بهره‌برده شده است، در ادامه هرکدام از اصطلاحات مطروحه به تفصیل در بخش روش انجام تحقیق توضیح داده شده است.

## ۲- روش و ابزار تحقیق

### ۲-۱- معادلات حاکم

مطالعه حاضر به بررسی و شبیه‌سازی عددی افت ناشی از پله‌شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت قطعات پیش‌ساخته بتن پرداخته است. برای شبیه‌سازی، جریان، معادلات اساسی حاکم بر میدان جریان، شامل معادلات بقای جرم و ممنتوم، باید به صورت عددی حل شوند. در این مطالعه شکل متوسط زمانی ناویر - استوکس (*Reynolds averaged Navier-Stokes*) یا به طور خلاصه (*RANS*) که به صورت روابط زیر می‌باشند، مورد استفاده قرار گرفتند (*Vierendeels & Degroote, 2009; Wendt, 2004*)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ji} - \rho \overline{u_j u_i}) + S_M \quad (2)$$

لازم به ذکر است که در رابطه (۱) چگالی سیال و  $U_i$  بردار سرعت در راستای  $i$  می‌باشد. از طرفی در رابطه (۲) فشار استاتیکی،  $U$  بردار سرعت و  $S_M$  نیروهای خارجی را نشان می‌دهند. همچنین برای ترم تنش رینولدز فرضیه بوزینگ (*Boussinesq hypothesis*) در نظر گرفته شده است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$-\rho \overline{u_j u_i} = \mu_t \left( U_{ij} + U_{ji} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k + \mu_t U_{kk}) \right) \quad (3)$$

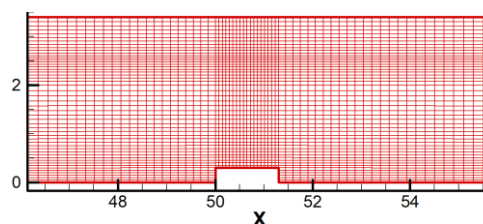
که در این رابطه،  $\mu_t$  لزجت گردابه‌های (*eddy viscosity*)،  $\rho$  چگالی سیال و  $U$  بردار سرعت است.

محاسبه‌ی پارامترهای میدان جریان و افت در کانال‌ها و تونل‌های انتقال آب با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بسیار پیچیده است، زیرا جریان به دلیل تشکیل گردابه‌های کوچک اطراف پله‌شدگی و انحراف هندسی

تولن محاسبه شده است. با توجه به نوع مدل سازی دوفازی جریان، سلول های شبکه از نظر مقدار وجود آب می توانند مقادیر بین ۰ تا ۱ داشته باشند که مقدار یک به معنی وجود ۱۰۰ درصد آب در سلول و صفر به معنی عدم وجود آب در سلول است. مقدار کسر حجمی آب در عمق متغیر است و برای جریان آزاد از مقدار یک در کف کانال تا مقدار صفر برای هوای موجود در سطح آب، متغیر است. با توجه به این امر، سطح آزاد جریان در بازه ای که مقدار آب در سلول ها بین صفر تا یک است، قرار می گیرد. برای محاسبات افت فرض شده که سلول هایی که مقدار فاز آب در آن ها بیش از ۹۰ درصد است، سطح آزاد جریان را تشکیل می دهند. با ایجاد مقاطعی در راستای عمود بر محور طولی تولن، از مقادیر فشار استاتیکی و دینامیکی و تراز در سلول های آن مقطع از کف تا سطح جریان انتگرال گیری گردید و با تقسیم بر حجم سلول، مقادیر میانگین فشار استاتیکی، فشار دینامیکی و تراز حاصل شده است. مجموع این مقادیر برابر با هد کل جریان در آن مقطع است. با به دست آوردن مقادیر هد کل در هر موقعیت، میزان افت موضعی در ناحیه پله شدگی با محاسبه اختلاف هد کل در دو مقطع مورد نظر حاصل می گردد. مقطع اول در ۴۹ متری ابتدای تولن (۱ متر قبل از شروع اولین پله) و مقطع دوم در نقطه حداکثر هد کل بعد از پله ها در نمودار هد کل بر حسب طول تولن در نظر گرفته شده است. محل مقطع دوم بر اساس ارتفاع پله و تعداد پله ها متغیر است. محاسبات مربوط به هد کل، افت و پیدا کردن مقطع دوم با استفاده از یک برنامه جانبی تحت فرترن انجام پذیرفته است.

مرحله ساخت هندسه و مش بندی توسط نرم افزار *Gambit* و مرحله حل توسط *Fluent* انجام گرفته است. بطور کلی ابتدا باید شکل تولن، یا مقطع تولن را به نحوی ایجاد کرد. از آنجا که مدل سازی سه بعدی جریان نیازمند صرف زمان زیادی است و هرگونه خطا در مدل سازی موجب از دست رفتن زمان می شود، بنابراین ابتدا با مدل سازی دو بعدی جریان که تبعاً نیازمند زمان کمتری است، مدل سازی به صورت بهینه از طریق آزمون و خطا صورت می پذیرد تا مقدمه ای برای مدل سازی سه بعدی شود. همچنین نتایج مدل سازی دو بعدی به عنوان پیش زمینه ای برای درک موضوع مورد بررسی قرار می گیرد. برای مدل سازی جریان دو

پله داری (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ سانتی متر) در کف و در دیواره مورد بررسی قرار گرفته است که این پله شدگی ها به صورت تکی و متوالی (به صورت دو پله تا پنج پله متوالی) با فاصله معین مدل شده اند. بدین ترتیب ۶۰ مدل سازی متفاوت برای بررسی صورت گرفته است. طول پله شدگی ها در تمامی مدل ها ۱/۳ متر و فاصله بین آن ها نیز ۱/۳ متر در نظر گرفته شده است.

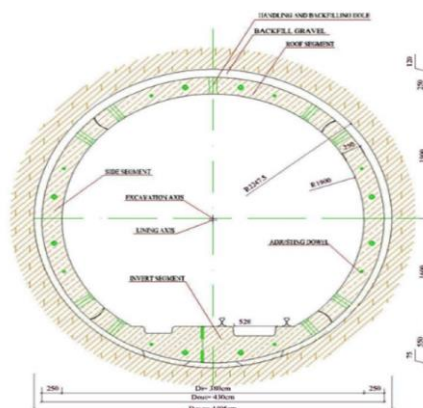


الف) دو بعدی



ب) سه بعدی

شکل ۲- نمونه مش در مدل سازی تولن



شکل ۳- مقطع تولن انتقال آب گلاب

برای محاسبه افت، انرژی پتانسیل متوسط در مقطع

جدول ۱- مشخصات تونل واقعی و جایگزین در مدل سه

بعدی			
مشخصات	واحد	مقطع گرد	مقطع مستطیلی
ارتفاع تونل	$m$	۳/۸	۳/۴
عرض تونل	$m$	-	۳/۴
ارتفاع آب	$m$	۲/۷۳	۲/۶۰
شعاع هیدرولیکی	$m$	۱/۰۸	۱/۰۳
مساحت	$m^2$	۸/۹۵	۸/۸۴
دبی	$m^3/s$	۱۸/۶	۱۸/۶

در مدل‌سازی سه بعدی علاوه بر در نظر گرفتن پله‌های کف، به صورت مجزا پله‌شدگی در دیواره تونل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. پله‌شدگی در دیواره تنها در یکی از دیواره‌های جانبی تونل مدل شده است. طول تونل ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده و پله‌شدگی در طول ۵۰ متری از ابتدای تونل قرار داده شده است. همانطور که گفته شد؛ شش ارتفاع مختلف برای پله‌داری (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ سانتی‌متر) در کف و در دیواره مورد بررسی قرار گرفته است که این پله‌شدگی‌ها به صورت تکی مدل شده‌اند. طول پله‌شدگی‌ها ۱/۳ متر در نظر گرفته شده است.

در این بخش شکل کلی جریان در تونل با وجود پله‌شدگی در دیواره مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور برای درک بهتر الگوی جریان، از پله‌شدگی ۵۰ سانتی‌متری که در آن تغییرات جریان شدیدتر می‌باشد، استفاده شده است. ابتدا شکل جریان در پله‌شدگی تکی بررسی می‌گردد. برای بررسی جریان سه مقطع در نظر گرفته شد. مقطع  $A-A$  که موازی سطح جریان در پلان قرار می‌گیرد و ارتفاع آن از کف ۱ متر می‌باشد. مقاطع  $B-B$  و  $C-C$  که موازی دیواره‌های تونل می‌باشند، در شکل ۴، نشان داده شده است و از دیواره نزدیک به اندازه ۱/۷ متر و ۰/۴ متر فاصله دارند.

مقطع  $A-A$  از تونل در شکل ۵-الف، نشان داده شده است و در آن منحنی‌های مقدار اندازه سرعت به همراه بردارهای سرعت رسم گردیده است. همان‌گونه که مشخص است بعد از پله یک جریان برگشتی ایجاد می‌شود که ناحیه آبی رنگ نشان دهنده آن می‌باشد. در این ناحیه جریان به اصطلاح دچار جداشدگی می‌گردد و با افت پتانسیل همراه است. در ناحیه تنگ شدگی سرعت جریان افزایش یافته و

راه وجود دارد. راه اول که ساده‌تر نیز می‌باشد، به صورت تک فازی است و با این فرض همراه است که از تغییرات سطح آب صرف نظر می‌گردد و تنها فاز آب در مدل‌سازی وجود دارد. راه دوم استفاده از مدل دو فازی آب و هوا است که در آن تغییرات سطح آزاد آب مدل‌سازی می‌شود.

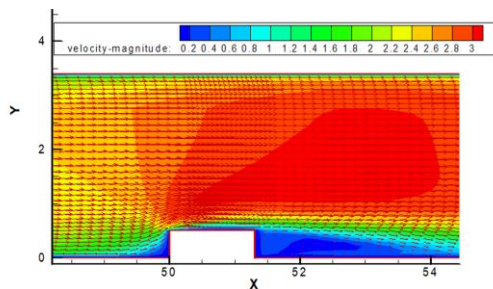
ابتدا، مدل تک فازی جریان به علت صرف زمان بسیار کمتر نسبت به مدل دو فازی تحلیل شده است. ولی با بررسی جریان و نمودارهای هم فشار مشخص شد که در پله‌های بلندتر از ۲۰ سانتی متر عملاً صرف نظر از تغییرات سطح آب موجب ایجاد خطا می‌گردد. بنابراین مدل‌سازی دو فازی به عنوان گزینه بهتر انتخاب شد (Najafi & Nabipour, 2012). برای مش‌بندی تونل نیز از تجربه‌های پژوهش‌های پیشین (Najafi & Nabipour, 2012) و (Nabipour, et al., 2020) از سعی و خطا استفاده شد. به علت حساسیت مدل در ناحیه پله‌شدگی و همچنین در ناحیه سطح آزاد جریان، از شبکه ریزتری برای این نواحی استفاده شده است. در مدل‌سازی جریان از مدل آشفتگی  $k - \epsilon RNG$  استفاده شده است (Nabipour, et al., 2020).

## ۲-۳- مدل‌سازی و تحلیل عددی

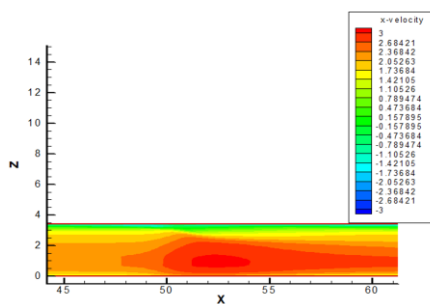
در این مطالعه؛ مقطع دایره‌ای شکل تونل به جهت ساده‌سازی در معادلات و همچنین محاسبات نرم‌افزاری با یک مقطع مستطیلی با مشخصات مشابه، معادل‌سازی شد. به طوری که همان میزان دبی با سرعت متوسط یکسان را انتقال دهد، از سوی دیگر، با توجه به اینکه بسیاری از مجراهای انتقال آب و حتی کالورت‌ها برای انتقال سیلاب بصورت مستطیلی طراحی می‌گردند، لذا این معادل‌سازی می‌تواند جنبه کاربردی نیز داشته باشد. البته لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن این موضوع، از جنبه سازه‌ای تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع مستطیلی بیشتر از مقطع دایره‌ای می‌باشد. شرایط مقطع اولیه و مقطع معادل شده در جدول ۱، آمده است.

در این تغییر مقطع سرعت، عدد فرود و عدد رینولدز در مقطع گرد به ترتیب حدود ۹۹، ۹۶ و ۱۰۴ درصد مقطع مستطیلی می‌باشد.

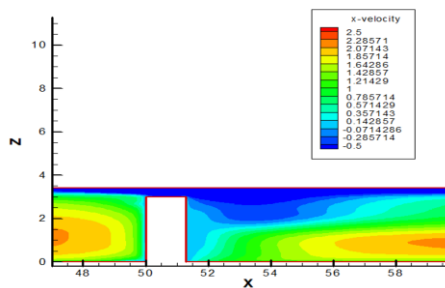
زبری تونل، فروافتادگی و عرض پله شدگی ارائه شده است.



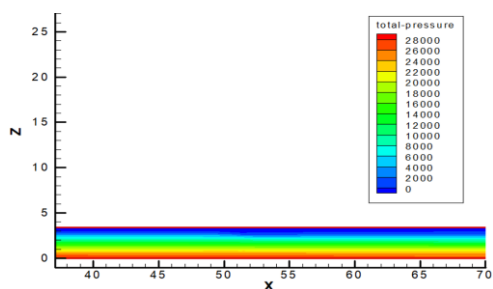
الف) نمودارهای هم سرعت در مقطع A-A



ب) نمودارهای هم سرعت در مقطع B-B



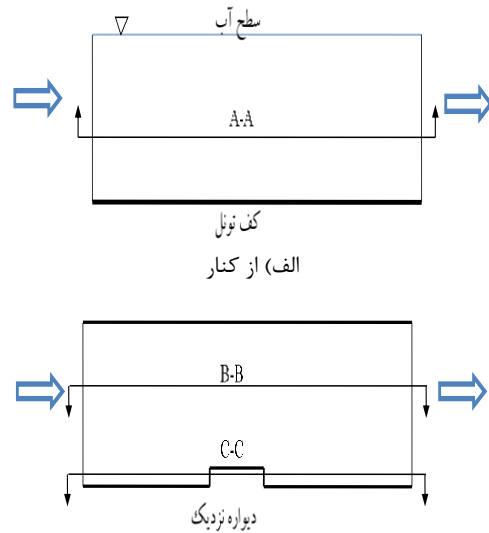
ج) نمودارهای هم سرعت در مقطع C-C



د) نمودارهای هم فشار در مقطع B-B

شکل ۵- مقطع نمودارهای هم سرعت و هم فشار برای حالت تک پله ۵۰ سانتی متری دیواره

این افزایش سرعت جریان با کاهش ارتفاع همراه خواهد بود که در مقاطع دیگر نشان داده خواهد شد. همان گونه که مشخص است ارتفاع پله تاثیر بسزایی بر طول و عرض ناحیه جدانشدگی دارد و با کاهش ارتفاع پله، طول و عرض ناحیه جدانشدگی کاهش می یابد.



ب) از پلان

شکل ۴- مقطع نمای شماتیک تونل از کنار و پلان در پله شدگی دیواره

در شکل ۵-ب و شکل ۵-ج، نمودارهای هم سرعت برای مولفه  $x$  بردار سرعت در مقاطع  $B-B$  و  $C-C$  نشان داده شده است. همان گونه که از نمودار مشخص است، در این مقطع هیچگونه جریان برگشتی مشاهده نمی گردد ولی افزایش سرعت در ناحیه تنگ شدگی (طول ۵۰ متر) و بعد از آن مشهود است. ولی در نمودار شکل ۴-ج، ناحیه جدانشدگی مشخص می باشد و نکته مهم این است که از کف تونل با افزایش عمق طول ناحیه جدانشدگی افزایش می یابد. در شکل ۵-د، نمودار فشار کل در مقطع  $B-B$  نشان داده شده است. بعد از طول ۵۰ متر که پله در این موقعیت قرار دارد، کاهش فشار کل که با کاهش تراز آب همراه است، مشهود است.

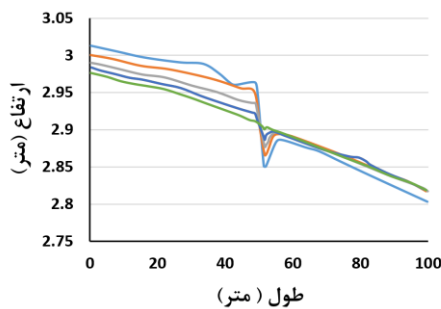
### ۳- نتایج، بحث و بررسی

نتایج بررسی ها انجام شده در قالب عوامل انرژی پتانسیل، ارتفاع و توالی پله شدگی، دبی عبوری از تونل، طول سگمنت،



### ۳-۱- انرژی پتانسیل

برای محاسبه افت، انرژی پتانسیل (هد کل) متوسط در مقاطع تونل محاسبه شده است. با به دست آوردن مقادیر هد کل در هر مقطع، میزان افت موضعی در ناحیه پله‌شدگی با محاسبه اختلاف هد کل در دو مقطع مورد نظر حاصل می‌شود. نمودارهای تغییرات هد کل برای حالت تک پله‌ای با ارتفاع‌های مختلف در کف در شکل ۶، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، نمودارها با یک شیب تقریباً ثابت از بالادست به سمت پایین دست کشیده شده‌اند که نشان از وقوع افت در جریان دارد. این افت با شیب ثابت ناشی از اصطکاک دیواره‌ها است که به صورت افت طولی در مسیر تونل ظاهر می‌شود. در مقطع شروع پله‌داری ( $x=50$ ) افت شدیدی در جریان رخ می‌دهد که ناشی از افت موضعی ناشی از پله‌شدگی می‌باشد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است با افزایش ارتفاع پله، ارتفاع نمودار قبل از شروع پله‌داری بیشتر می‌شود. در واقع جریان برای جبران افت رخ داده ناشی از پله‌داری و رسیدن به شرایط مرزی انتهایی (ارتفاع ۲/۶ متری) ناچار است که ارتفاع آب در بالادست را افزایش دهد و این امر با افزایش ارتفاع پله‌داری افزایش می‌یابد.

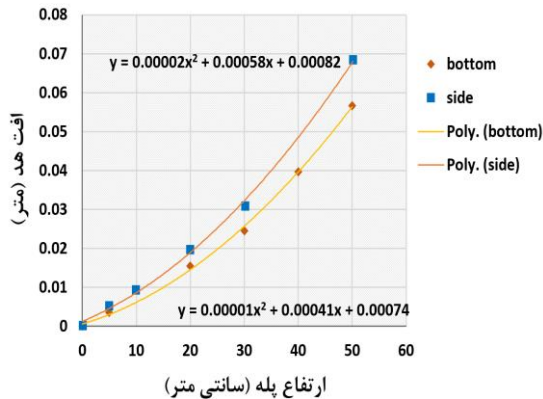


شکل ۶- نمودارهای هد کل برای حالت تک پله‌ای در کف

### ۳-۲- ارتفاع و توالی پله‌شدگی

نتایج افت موضعی ناشی از پله‌شدگی تکی در کف و دیواره با ارتفاع‌های متفاوت در شکل ۷، نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده از این مطالعه در ارتباط با عامل ارتفاع و توالی پله‌شدگی می‌توان گفت؛ با افزایش ارتفاع پله، مقدار افت ناشی از پله‌شدگی کف و دیواره افزایش می‌یابد و نرخ این افزایش روندی صعودی دارد. افت ناشی از پله‌شدگی

کف بیشتر از پله‌شدگی دیواره است. اثر توالی پله‌شدگی باعث کاهش نرخ افزایش افت می‌شود. به عبارت دیگر، افت ناشی از دو پله‌شدگی متوالی از دو برابر افت ناشی از همان پله‌داری کمتر است و برای تعداد پله‌شدگی‌های بیشتر نیز این قضیه صادق است. البته این موضوع تحت تاثیر فاصله بین پله‌شدگی قرار می‌گیرد.



شکل ۷- نمودارهای افت حالت تک پله‌ای در کف و دیواره با ارتفاع‌های متفاوت

### ۳-۳- دبی عبوری از تونل

یکی از مهمترین عوامل تاثیر گذار بر روی میزان افت انرژی جریان در تونل، میزان دبی عبوری از تونل است. به‌منظور بررسی میزان افت انرژی جریان در تونل تحت دبی‌های متفاوت، پنج دبی مطابق با جدول ۲، در مدل تک پله‌ای مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که در تمامی حالت‌ها، پله‌داری ۳۰ سانتی‌متری هم در کف و هم در دیواره مدل‌سازی شده است.

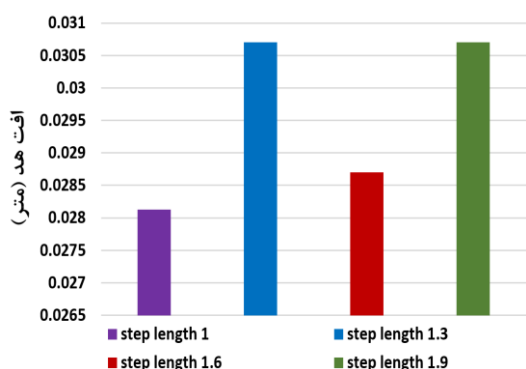
جدول ۲- مقدار دبی‌های در نظر گرفته شده برای

مدل‌سازی		
دبی ( $m^3/s$ )	ارتفاع جریان (m)	سرعت متوسط (m/s)
۵	۱/۰۱	۱/۴۶
۱۰	۱/۶۷	۱/۷۶
۱۵	۲/۲۸	۱/۹۳
۱۸/۶	۲/۶	۲/۰۸
۲۲	۳/۰۸	۲/۱

نتایج در شکل ۸، نشان داده شده است. با توجه به

### ۳-۵- زبری تونل

برای بررسی تاثیر زبری بر افت ناشی از پله شدگی، زبری‌های ۰/۰۱۸، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۴ برای تک پله شدگی ۳۰ سانتی‌متری در کف و دیواره در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، در پله شدگی‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متری کف افزایش زبری باعث افزایش افت شده است ولی از پله ۲۰ سانتی‌متری تا ۵۰ سانتی‌متری با کاهش افت همراه است، که با افزایش ارتفاع پله این اختلاف افزایش می‌یابد. برای پله شدگی دیواره تاثیر زبری اثر کمتری داشته است و نمودارها نزدیک به هم هستند (شکل ۱۰-ب). با توجه به نتایج به دست آمده تاثیر زبری بر افت موضعی ناشی از پله داری (خصوصاً برای پله‌های با ارتفاع کمتر از ۲۰ سانتی‌متر) ناچیز است و قابل صرف نظر کردن است.



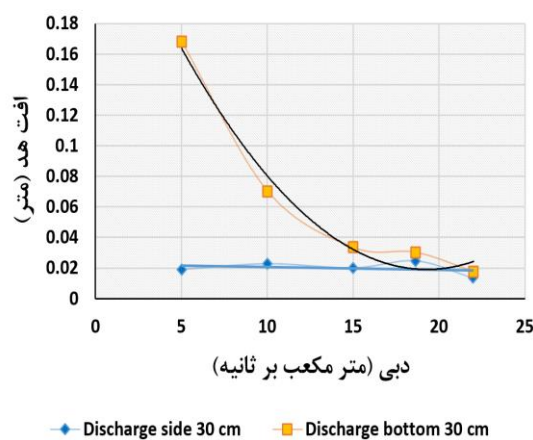
شکل ۹- نمودار افت پله‌داری با طول‌های متفاوت در کف

### ۳-۶- فروافتادگی

پله شدگی‌ها می‌توانند به صورت فروافتادگی‌هایی در دیواره رخ دهند (شکل ۱۱-الف). بر همین اساس برای بررسی تفاوت میان فروافتادگی و برآمدگی، برای حالت تک پله ای در دیواره و کف، فروافتادگی مدل گردیده است.

در شکل (۱۱-ب) هد کل جریان در تونل برای فروافتادگی‌های ۵ تا ۵۰ سانتی‌متر در دیواره نشان داده شده است. پله‌داری در فاصله ۵۰ متری آغاز و تا ۵۱/۳ متری ادامه دارد. در مقایسه با نمودارهای برآمدگی، در حالت فروافتادگی افت بسیار کمی رخ داده است. علت عدم تاثیر فروافتادگی بر افت موضعی با بررسی جریان روشن شود. در اینجا فروافتادگی ۵۰ سانتی‌متری که

شکل ۸، افزایش دبی در پله شدگی دیواره، تاثیری بر افت ندارد ولی برای پله‌داری کف با افزایش دبی، افت رخ داده در تونل کاهش می‌یابد. علت این امر این است که با کاهش دبی و در نتیجه عمق جریان در پله‌داری کف، نسبت ارتفاع پله به ارتفاع جریان افزایش می‌یابد (زیرا ارتفاع پله ثابت است و عمق کاهش می‌یابد) و همانند حالت افزایش ارتفاع پله در دبی ثابت، افت جریان افزایش می‌یابد. در حالت پله شدگی دیواره، اگرچه عمق جریان کاهش می‌یابد ولی نسبت ارتفاعی از پله که در تماس با آب است به ارتفاع جریان ثابت است و بنابراین افت تقریباً ثابت باقی مانده است.

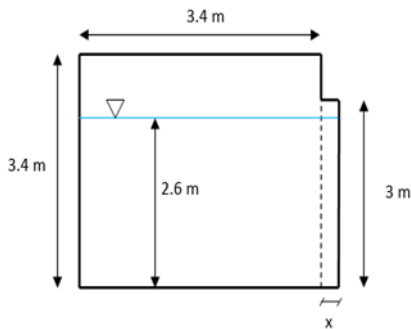


شکل ۸- نمودار افت ناشی از پله‌داری در کف و دیواره تحت دبی‌های متفاوت

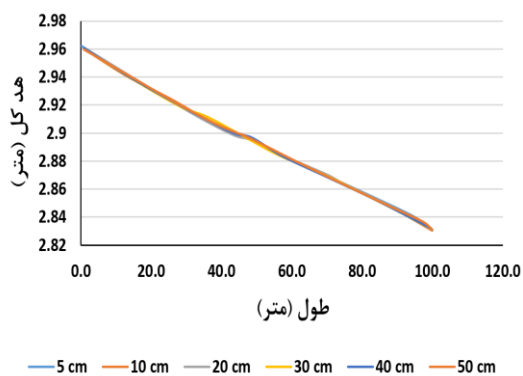
### ۳-۴- طول سگمنت

منظور از طول سگمنت، بعد طولی پله شدگی در مسیر جریان قرار دارد. به منظور بررسی تاثیر طول سگمنت بر افت رخ داده در تونل، چهار طول ۱، ۱/۳، ۱/۶ و ۱/۹ متر که طول‌های معقولی برای پوشش‌های بتنی است، در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی برای تک پله کف با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر انجام پذیرفته است و نتایج در شکل ۹، نشان داده شده است. در نمودار افت‌ها روند خاصی مشاهده نمی‌شود و با یک اختلاف حدود ۲ میلی‌متری، تقریباً در یک بازه مساوی قرار دارند و که آن را می‌توان خطای مدل‌سازی در نظر گرفت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در بازه سگمنت‌های ۱ تا ۲ متری، طول سگمنت تاثیری بر افت نخواهد داشت.

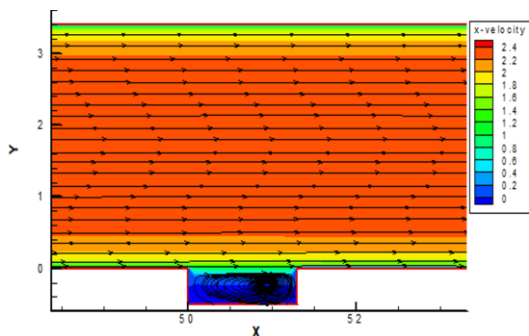




الف) مقطع تونل در ناحیه پله‌داری به شکل فروافتادگی



ب) نمودار هد کل برای پله‌داری دیواره به شکل فروافتادگی



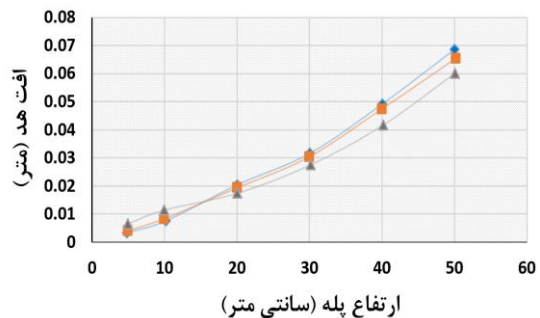
ج) خطوط جریان در مقطع موازی کف تونل برای پله‌داری ۵۰ سانتی‌متری در دیواره به شکل فروافتادگی

شکل ۱۱- مقطع تونل، نمودار هد کل برای پله‌داری دیواره در ناحیه پله‌داری و خطوط جریان در مقطع موازی کف تونل به شکل فروافتادگی

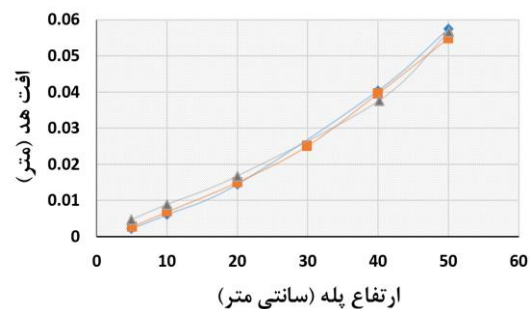
### ۳-۷- عرض پله‌شدگی

منظور از عرض پله‌شدگی در کف، بعد طولی پله‌شدگی در عرض تونل و در پله‌شدگی دیواره، ارتفاع پله‌شدگی است. در مدل‌سازی‌های پیشین پله با عرض کامل در کف و دیواره در

شدیدترین تغییرات را دارد، در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۱-ج) مقطعی از جریان موازی با کف تونل و در ارتفاع ۱/۵ متری نشان داده شده است و خطوط جریان در آن رسم شده است. همانطور که مشخص است، خطوط جریان بدون هیچ انحرافی در اثر فرورفتگی در مسیر مستقیم در حرکت هستند. جریان در ناحیه فروافتادگی به صورت چرخشی و با سرعت کم وجود دارد و تاثیری بر جریان اصلی ندارد. در واقع فاصله ۱/۳ متری پله‌داری به اندازه‌ای کم است که جریان در فروافتادگی فرصت توسعه و خروج از آن را ندارد. این اتفاق در تمامی فروافتادگی‌ها (۵ تا ۵۰ سانتی‌متری) رخ داده است و بر همین اساس افت آن ناچیز است. در پله‌شدگی کف نیز همین اتفاق رخ می‌دهد.



الف) اثر زبری افت ناشی از پله‌شدگی در کف تونل

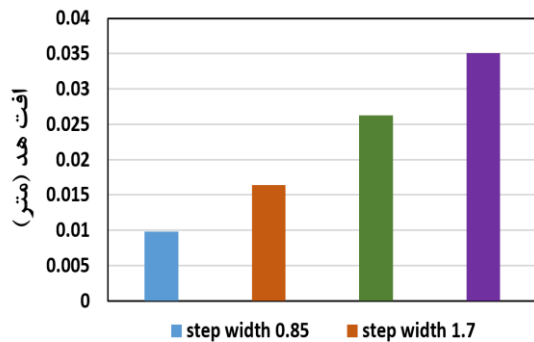


ب) اثر زبری افت ناشی از پله‌شدگی در دیواره تونل

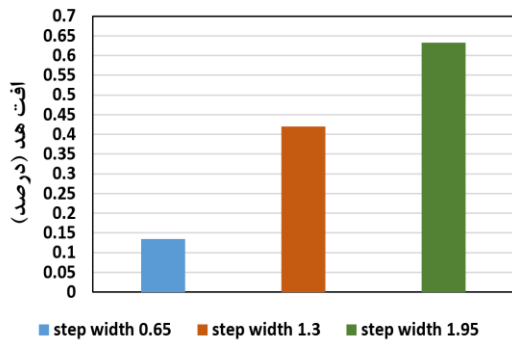
شکل ۱۰- اثر زبری افت ناشی از پله‌شدگی در کف تخت و زبری‌های متفاوت

شده است. همانگونه که انتظار می رفت با افزایش عرض پله، افت نیز افزایش می یابد.

در شکل (۱۲-ج) افت های ناشی از هر کدام از عرض ها بر افت ناشی از پله داری با عرض کامل (پله با عرض ۳/۴) تقسیم گردیده است و بی بعد شده است. از آنجا که عرض های ۰/۱۷، ۰/۸۵، ۱/۷، ۲/۵۵ به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درصد عرض کامل تونل می باشند، مشاهده می گردد که افت های رخ داده نیز در حدود ۲۸، ۴۷ و ۷۵ درصد افت ناشی از پله با عرض کامل است. پس می توان نتیجه گرفت که نسبت افت ناشی از پله با عرض ناقص به افت ناشی از پله با عرض کامل برابر نسبت عرض ها است.

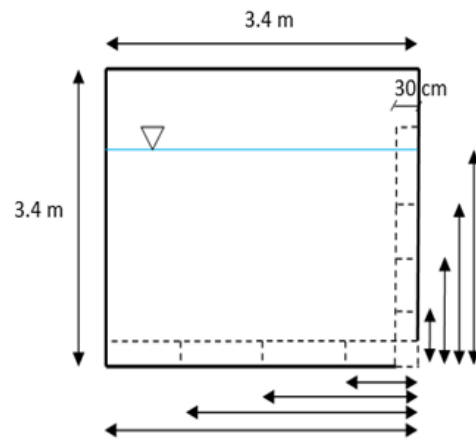


ب) نمودار افت ها برای پله داری در کف با عرض های متفاوت

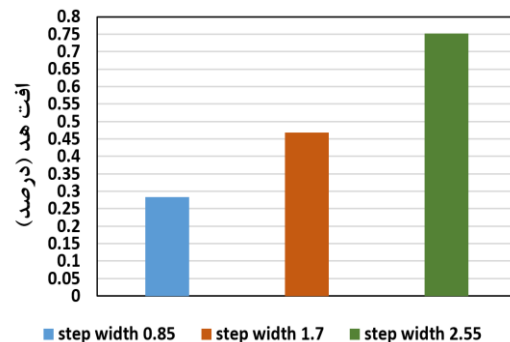


د) نمودار درصد افت ها برای پله داری در دیواره با عرض های متفاوت نسبت به عرض کامل

نظر گرفته شده بود. درحالی که این پله داری می تواند درصدی از این اندازه باشد. در همین راستا برای بررسی تاثیر این امر بر افت رخ داده در تونل، پله با عرض های متفاوت در نظر گرفته شده است. این عرض ها در کف عبارت است از ۰/۱۷، ۰/۸۵، ۱/۷ و ۲/۵۵ متر (که عرض ۳/۴ متر همان عرض کامل تونل است). برای دیواره، عرض های در نظر گرفته شده عبارت است از ۰/۶۵، ۱/۳، ۱/۹۵ و ۲/۶ متر (که در واقعیت به جای عرض ۲/۶ متر، عرض ۳ متر به کار گرفته شده است و به علت این که عمق جریان ۲/۶ متر است، عرض موثر همان ۲/۶ متر در نظر گرفته شده است) (شکل ۱۲-الف). نتایج افت در کف در شکل ۱۲-ب نشان داده



الف) شماتیک مقطع تونل برای پله داری با عرض های متفاوت



ج) نمودار درصد افت ها برای پله داری در کف با عرض های متفاوت نسبت به عرض کامل شکل

شکل ۱۲- شماتیک مقطع تونل، نمودار افت ها برای پله داری در کف، نمودار درصد افت ها برای پله داری در کف و نمودار درصد افت ها برای پله داری در دیواره

بازه مساوی قرار دارند و که آن را می‌توان خطای مدل‌سازی در نظر گرفت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در بازه سگمنت‌های ۱ تا ۲ متری، طول سگمنت تأثیری بر افت نخواهد داشت.

در خصوص عامل زبری تونل نیز نتایج این مطالعه به این صورت است که؛ در پله‌شدگی‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متری کف افزایش زبری باعث افزایش افت گردیده است ولی از پله ۲۰ سانتی‌متری تا ۵۰ سانتی‌متری با کاهش افت همراه می‌باشد که با افزایش ارتفاع پله این اختلاف افزایش می‌یابد. برای پله‌شدگی دیواره تأثیر زبری اثر کمتری داشته است و نمودارها نزدیک به هم می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده تأثیر زبری بر افت موضعی ناشی از پله‌داری (خصوصاً برای پله‌های با ارتفاع کمتر از ۲۰ سانتی‌متر) ناچیز است و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

نتایج این مطالعه در ارتباط با عامل فروافتادگی بیان‌کننده این موضوع است که، خطوط جریان بدون هیچ انحرافی در اثر فرورفتگی در مسیر مستقیم در حرکت هستند. جریان در ناحیه فروافتادگی به صورت چرخشی و با سرعت کم وجود دارد و تأثیری بر جریان اصلی ندارد. در واقع فاصله ۱/۳ متری پله‌داری به اندازه‌ای کم است که جریان در فروافتادگی فرصت توسعه و خروج از آن را ندارد. این اتفاق در تمامی فروافتادگی‌ها (۵ تا ۵۰ سانتی‌متری) رخ داده است و بر همین اساس افت آن ناچیز است. نتایج این مطالعه در ارتباط با عرض پله‌داری نیز بر این اساس است که؛ از آنجا که عرض‌های ۰/۸۵، ۱/۷، ۲/۵۵ به ترتیب ۵۰ و ۷۵ درصد عرض کامل تونل می‌باشند، مشاهده می‌گردد که افت‌های رخ داده نیز در حدود ۲۸، ۴۷ و ۷۵ درصد افت ناشی از پله با عرض کامل است. پس می‌توان نتیجه گرفت که نسبت افت ناشی از پله با عرض ناقص به افت ناشی از پله با عرض کامل برابر نسبت عرض‌ها است.

به‌طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق، در خصوص طراحی قطعات پیش‌ساخته تونل‌های انتقال آب و همچنین فضاهای زیرزمینی که نیاز به طراحی‌هایی این‌چنینی در خصوص انتقال آب می‌باشد بسیار کاربردی و موثر است.

با بی‌بعدسازی افت‌های رخ داده نسبت به افت ناشی از پله‌داری دیواره کامل در عمق که در نمودار شکل (۱۲-د) نشان داده شده است، مشخص است که با افزایش عرض پله به اندازه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد افت‌ها به اندازه ۱۴، ۴۲ و ۶۴ درصد افت در حالت پله‌داری با عرض کامل در دیواره به دست آمده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که افت‌ها حدوداً ۱۰ درصد کمتر از مقدار کاهش عرض هستند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به واسطه مدل‌سازی سه‌بعدی و دوفازی جریان در تونل انتقال آب، چرخش و فروافتادگی قطعات پوشش بتنی پیش‌ساخته بر افت هد هیدرولیکی و میدان جریان ناشی از پله‌شدگی و انحراف هندسی خطای نصب سگمنت بررسی شده‌است. نتایج کلی حاصل از این پژوهش در خصوص عوامل و پارامترهای مختلف شامل موارد زیر می‌شود.

نتایج این مطالعه در ارتباط با ارتفاع و توالی پله‌شدگی بیانگر این موضوع است که؛ با افزایش ارتفاع پله، مقدار افت ناشی از پله‌شدگی کف و دیواره افزایش می‌یابد و نرخ این افزایش روندی صعودی دارد. افت ناشی از پله‌شدگی کف بیشتر از پله‌شدگی دیواره می‌باشد. اثر توالی پله‌شدگی باعث کاهش نرخ افزایش افت می‌گردد. به عبارت دیگر، افت ناشی از دو پله‌شدگی متوالی از دو برابر افت ناشی از همان پله‌داری کمتر می‌باشد و برای تعداد پله‌شدگی‌های بیشتر نیز این قضیه صادق است.

نتایج این پژوهش در خصوص دبی عبوری از تونل بیان‌کننده این مورد است که، با توجه به نمودار افزایش دبی در پله‌شدگی دیواره، تأثیری بر افت ندارد ولی برای پله‌داری کف با افزایش دبی، افت رخ داده در تونل کاهش می‌یابد. علت این امر این است که با کاهش دبی و در نتیجه عمق جریان در پله‌داری کف، نسبت ارتفاع پله به ارتفاع جریان افزایش می‌یابد. در ارتباط پارامتر طول سگمنت نیز نتایج تحقیق بیان‌کننده این مطلب است که، افت‌ها روند خاصی ندارند و با یک اختلاف حدود ۲ میلی‌متری، تقریباً در یک

#### ۵- مراجع

Ando, T., & Shakouchi, T. (2004). Flow characteristics over forward facing step and through abrupt

- contraction pipe and drag reduction. *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ*, 29, 1-8.
- Berntsen, G. S., Kjeldsen, M., & Arndt, R. E. (2001). Numerical modeling of sheet and tip vortex cavitation with FLUENT 5.
- Biswas, G., Breuer, M., & Durst, F. (2004). Backward-facing step flows for various expansion ratios at low and moderate Reynolds numbers. *J. Fluids Eng.*, 1, (3) 26, 362-374
- Chanson, H. (1993). Self-aerated flows on chutes and spillways. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 220-243.
- Chanson, H. (2013). Hydraulics of aerated flows: *qui pro quo Journal of Hydraulic Research*, 51(3), 223-243.
- Falvey, H. T (1980) .Air-water flow in hydraulic structures. USBR Engrg. Monograph.
- Georg, J. H., & Davorin, K. (2004). Selection of segmental lining system and repair classification. CSSE Symposium DAMOCS, Dubrovnik.
- Jiao, J., Liu, Z., & Zheng, Y. (2007). Evaluations and modifications on Reynolds stress model in cyclone simulations. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry- Plant Equipment- Process Engineering- Biotechnology*, 30(1), 15-20.
- Khazhoyan, M., & Khakimzyanov, G. (2006). Numerical modeling of ideal incompressible fluid flow over a step. *Journal of applied mechanics and technical physics*, 47, 785-789.
- Nabipour, M., Rezapour, S., & Mohajeri, S. H. (2020). A parametric study on friction-loss in water conveyance tunnels considering misalignment of precast concrete segments. *Tunnelling and underground space technology*, 96, 103221.
- Najafi, M. R., & Nabipour, M. (2012). The effect of step on the hydraulic characteristics of the subcritical free surface flow in conveyance tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 28, 212-217.
- Vierendeels, J., & Degroote, J. (2009). Aspects of CFD computations with commercial packages. *Computational Fluid Dynamics*, 305-328.
- Wen, X., Ingham, D., & Widodo, B. (1997). The free surface fluid flow over a step of an arbitrary shape in a channel. *Engineering analysis with boundary elements*, 19(4), 299-308.
- Wendt, B. J. (2004). Parametric study of vortices shed from airfoil vortex generators. *AIAA journal*, 42(11), 2185-2195.