

Numerical Analysis of Flow Field and Flood Risk in Solid Urban Block Street Intersections

Akbar Safarzadeh ^{1*}, Vadoud Hasanniya ², Majid Pasbani³

1- Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.

2- PhD student, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.

3- Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil.

* safarzadeh@uma.ac.ir

Received: 8 June 2023

Accepted: 21 August 2023

Discussion: 22 September 2024



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Floods can cause significant damage to goods and people, particularly in densely populated urban areas with high asset values. Flood risk is typically assessed using flow depth, flow velocity, and water level parameters (de Moel et al., 2009). Meja-Morales et al., (2021) studied the impact of flow exchanges between a porous urban block and surrounding streets and found that porosity significantly affects urban flood flow characteristics. In another study, Meja-Morales et al., (2023) examined the effect of flow instability and open areas in urban blocks on key flood characteristics and reported that the instability level of incoming hydrographs greatly affects the volume of flood water stored in urban blocks. This research aims to evaluate the distribution of flow depth, velocity, and flow patterns in non-porous urban block streets by considering changes in stable inflow. The study seeks to understand multidirectional flow paths caused by the street network and develop a flood risk map for humans using Flow3D software.

Methodology: In this research, the computational fluid dynamics method (Flow-3D commercial software) has been used to explore the flow in the urban flood model. The specifications of the numerical model and the dimensions of the solution domain were selected according to the laboratory model (Mejía-Morales et al., 2021) for urban flooding. The physical model includes a rectangular urban block and the streets around it, two streets are considered as flood entrances and four street are the outlet of the flood. In this research, according the width of the streets, the effects of the changes in the flow of the inlets on the distribution of the quantities of depth, speed, flow patterns and flood risk map for humans in the street were analyzed. Non-porous urban blocks of 7 different flow rates were used. In order to reduce the operation volume, three mesh blocks were used to simulate the flow in the urban flood model. The numerical model used in the present study achieved a stable flow state for the entrances and exits of the urban block and its adjacent streets within 40 seconds. Accordingly, the simulation duration of the current research was set to 45 seconds to account for changes in the inlet flow rate.

Results and Discussion: The validation results of the numerical model showed that the $k-\varepsilon(RNG)$ turbulence model had the highest correlation with the laboratory model, with a relative error of 3% and 6.8% for the velocity profile near the water surface and averaged velocity at depth, respectively. In all models, the right and upstream streets had the highest and lowest depth, speed, and human stability number, while the downstream street had the

largest range of flood parameters, with 2 to 3 times the average speed and 3 to 4 danger zones for pedestrians. Increasing the flow rate at Inlet 1 for a constant flow rate at inlet 2 increased the flooding characteristics of the right and downstream streets while decreasing the speed in the left street. Conversely, increasing the flow rate at Inlet 2 for a constant flow rate at Inlet 1 increased the flooding characteristics of the left street, decreased the speed in the right and downstream streets, and had minimal effect on the flood characteristics of the upstream street.

Conclusion: The study found that changes in flow discharge at inlets 1 and 2 had a direct impact on flood flow parameters in the right and left streets. Moreover, some models showed that increasing the flow rate at inlet 2 for a constant flow rate at inlet 1 resulted in increased depth, decreased speed, and decreased stability number at the entrance of the right street. Therefore, when developing flood risk maps for urban areas with varying geometries, it is advisable to account for different discharges from other city streets.

Keywords: Urban flood, Discharge changes, Computational fluid dynamics, Product number.



© 2024 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of
the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی عددی ساختار جریان و خطر سیلاب در خیابان‌های متقاطع با بلوک شهری صلب


اکبر صفرزاده^{۱*}، ودود حسن نیا^۲، مجید پاسبانی^۳

۱- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

* safarzadeh@uma.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰، نقد و بررسی: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: افزایش جمعیت در مناطق شهری و وقوع روزافزون سیلاب‌های شهری نیازمند ارزیابی دقیق‌تر برای درک بهتر فرآیندهای هیدرولیکی غالب خطر سیل می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی تاثیر تغییرات دبی جریان ورودی بر ویژگی‌های سیل در یک بلوک شهری پرداخته شده است. مدل‌سازی‌ها در شرایط جریان پایدار، با استفاده از ۷ دبی جریان در ورودی‌ها با هندسه ثابت بلوک شهری انجام شد. برای این منظور از یک بلوک شهری غیر متخلخل با چهار خیابان در اطراف، دو خیابان به عنوان ورودی و چهار خیابان به عنوان خروجی مطابق آزمایش‌های موجود در مراجع استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی مدل عددی نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon(RNG)$ پروفیل سرعت نزدیک سطح آب و سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، با خطای نسبی ۳ و ۶/۸ درصد، نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی، دارای همبستگی بیشتری با مدل آزمایشگاهی بود. در تمامی مدل‌ها خیابان راست و بالادست به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان عمق، سرعت و عدد پایداری انسان بودند. این در حالی است که خیابان پایین‌دست با اختلاف ۲ تا ۳ برابری سرعت متوسط و دارا بودن ۳ الی ۴ ناحیه خطر برای عابران پیاده بیشترین طیف گستردگی در میزان پارامترهای سیلاب را دارا بودند. همچنین افزایش دبی در ورودی ۱ به ازای دبی ثابت در ورودی ۲، باعث افزایش ویژگی‌های سیلابی خیابان‌های راست و پایین‌دست و افزایش عمق و کاهش سرعت در خیابان چپ می‌گردد. این در حالی است که افزایش دبی در ورودی ۲ به ازای دبی ثابت در ورودی ۱، باعث افزایش ویژگی‌های سیلابی خیابان چپ و افزایش عمق و کاهش سرعت در خیابان‌ها راست و پایین‌دست می‌گردد. لازم به ذکر است تغییرات دبی در هر دو ورودی تاثیر چندانی بر روی ویژگی‌های سیلابی خیابان بالادست ندارد.

کلیدواژگان: سیل شهری، تغییرات دبی، دینامیک سیالات محاسباتی، عدد پایداری.

۱- مقدمه

قرار گرفتن مردم و کالاهای آن‌ها در معرض خطر سیل افزایش می‌یابد. این در حالی است که بنابر پیش‌بینی سازمان ملل تا سال ۲۰۵۰ جمعیت منطقه‌های شهری به بیش از دو سوم جمعیت جهان می‌رسد (UNDESA, 2019). از سوی دیگر هیئت ویژه بین‌دولتی تغییرپذیری‌های آب و هوا گزارش می‌دهد که «احتمال دارد فراوانی بارندگی‌های شدید در قرن بیست و یکم افزایش یابد» (Field et al., 2012). لذا توسعه روش‌هایی برای ارزیابی خطر سیل شهری و خطر مرتبط با آن با دقت

سیل از جمله رویدادهای خطر آفرین طبیعی است که هر ساله موجب تلفات انسانی و دامی، آسیب و زیان به ساختمان‌ها، تأسیسات و منابع طبیعی می‌شود. خسارت‌های وارده ناشی از سیل به کالاها و افراد به ویژه در سکونتگاه‌های شهری، به طور عمده به دلیل تراکم بالای جمعیت و ارزش دارایی‌ها قابل توجه می‌باشد. از آنجایی که منطقه‌های پرجمعیت شهری اغلب در دشت‌های سیلابی و منطقه‌های کم ارتفاع ساحلی قرار دارند، لذا

ساختمان معرفی کرده‌اند (Hill, 1974; Black, 1975). Beck et al., 2002; همچنین نخاله‌های سیلی (مواد جامد داخل سیل) می‌تواند به عنوان عامل افزایش دهنده خطر سیل عمل کند. کنش‌های ایستایی، پویایی و فرسایش به عنوان سه عامل مهم خطر نخاله‌های سیلی شناخته می‌شوند (Kelman & Spence, 2004). عامل نخاله‌های ساکن به دلیل تجمع رسوب‌های بیرونی یا درونی در ساختمان رخ می‌دهد (USACE, 1984). عامل پویایی نخاله هنگامی رخ می‌دهد که نخاله‌های جابجا شده توسط آب به ساختمان ضربه می‌زند (Lewis, 1999). نخاله‌ها می‌توانند با کشیده شدن سنگریزه‌ها یا وسیله‌های خانه همراه با جریان و بیرون کشیدن خاک از کناره‌ها یا بستر آبراهه جریان باعث فرسایش و فروریزش شوند (Kelman & Spence, 2004).

در راستای شناسایی منطقه‌های حساس به سیل در شهرها، تهیه نقشه‌های خطر و خطر سیل شهری امری ضروری است (Meja-Morales et al., 2023). در راستای تحقق این امر، بیشتر بررسی و ارزیابی‌های سیل شهری برای تعیین کمیت‌های توزیع سرعت و عمق جریان در محیط‌های مختلف انجام می‌شود (Chen et al., 2019; Costabile et al., 2020; Galuppini et al., 2020). با این حال، الزام گنجاندن جزئیات عوارض یا پستی و بلندی‌های مختلف (مانند ساختمان‌ها، چیدمان خیابان و وسیله‌های نقلیه، سامانه فاضلاب، مترو و ...) و تاثیر توأمان توپوگرافی و هیدرولیک (مانند تعامل با بازدارنده‌های ثابت و متحرک، شبکه فاضلاب خیابان‌ها یا مبادله‌های جریان خیابان‌ساختمان) باعث به چالش کشیده شدن بررسی رویدادهای سیل در یک محیط شهری می‌شود (Meja-Morales et al., 2023). اگرچه بلوک‌های شهری واقعی و ساختمان‌های منفرد شامل: درها، پنجره‌ها، دروازه‌ها، حیاط‌ها و پارکینگ‌ها می‌شوند، اما بیشتر بررسی‌های سیل شهری آنها را به عنوان سازه‌های نا متخلخلی در نظر می‌گیرند که سیل به آن وارد نمی‌شود (Ishigaki, 2003; Araud et al., 2014; Finaud-Guyot et al., 2018). اطلاعات اضافی در مورد میدان‌های سرعت برای درک مسیرهای جریان چند جهته ناشی از شبکه ساخته شده از خیابان‌ها و منطقه‌های باز، ساختمان‌ها و سامانه‌های

بالتر بسیار مهم است. خطر سیل به طور معمول با فراسنجه‌های عمق جریان، گستره سیل، سرعت جریان، انتشار موج سیل، مدت زمان سیل و سرعت افزایش سطح آب توصیف می‌شود (De Moel et al., 2009). خطر زمانی قابل درک است که بی‌ثباتی ناشی از سیل برای یک هدف مشخص آغاز شود. در این میان، رایج‌ترین فراسنجه‌ها برای پیش‌بینی ناپایداری ناشی از سیل برای یک هدف مشخص مانند افراد (Abt et al., 1989; Karvonen et al., 2000; Cox et al., 2010; Bonham and Hattersley, 1967; Gordon and Stone, 1973; Shu et al., 2011) و آسیب ساختمان (Clark, 1990; Milanese et al., 2018)، سرعت و عمق جریان محلی می‌باشد که به صورت حاصل ضرب دو فراسنجه استفاده می‌شود. (Abt et al., 1989) به بررسی آزمایشگاهی پایداری انسان و جسم صلب شبیه انسان در مقابل جریان با عمق و سرعت‌های متفاوت پرداختند. این محققان با معرفی عدد پایداری بر حسب وزن، ارتفاع و عرض انسان نشان دادند که نمونه آزمایش شده انسانی نسبت به نمونه سخت شبیه انسان دارای ۶۰ الی ۱۲۰ درصد پایداری بیشتری می‌باشد. (Xia et al., 2014) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی معادله‌های کلی برای پیش‌بینی آستانه لغزش و آستانه واژگونی انسان ارائه دادند. بررسی عددی پایداری وسیله نقلیه و عابر پیاده در مقابل جریان سیل توسط Arrighi et al. (2017) صورت پذیرفت. این محققان دریافتند در عمق‌های زیاد با سرعت جریان کم (عدد فرود کمتر از ۰/۶) به دلیل ویژگی‌های پیکربندی، پایداری عابر پیاده در مقایسه با وسیله نقلیه بیشتر است. این در حالی است که در عمق‌های کم جریان با سرعت‌های زیاد پایداری وسیله نقلیه بسیار بیشتر از عابر پیاده می‌باشد.

(Clausen & Clark, 1990) فراسنجه‌های اصلی خطر برای تخمین خسارت سیل به ساختمان را عمق آب، سرعت جریان، تنش برشی بستر، نیروهای پویایی، سرعت افزایش سیل و توان بالقوه ریزش شناسایی می‌کند. این در حالی است که محققان زیادی عمق جریان و سرعت را به عنوان رایج‌ترین فراسنجه برای تعیین خطر خسارت سیل به

غالب، تأثیر قوی (به طور موضعی افزایش یا کاهش) بر سرعت، عمق جریان و تقسیم تخلیه پایین دست دارد. در نهایت، (Meja-Morales et al., 2023) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر ناپایداری جریان و منطقه‌های باز بلوک شهری مستطیلی ساده متشکل از چهار خیابان، بر روی ویژگی‌های کلیدی سیل پرداختند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح ناپایداری آب نگار ورودی، به ویژه در مرحله افزایش، تأثیر زیادی بر حجم آب سیلاب ذخیره شده در بلوک شهری دارد. افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی در بلوک شهری منجر به کاهش دبی خروجی اوج کلی، کاهش عمق جریان و افزایش محلی سرعت در برخی از خیابان‌ها و درون بلوک شهر می‌شود.

هدف از این تحقیق تعیین تأثیر تغییرپذیری‌های جریان ورودی پایدار در یک بلوک شهری بر ویژگی‌های سیل شهری می‌باشد. در این پژوهش از یک منطقه شامل یک بلوک شهری نا متخلخل با چهار خیابان در پیرامون آن، دو خیابان به عنوان ورودی و چهار خیابان به عنوان خروجی بنابر تحقیق (Meja-Morales et al., 2021) استفاده شده است. در هندسه بلوک شهری از تأثیر نفوذ جریان صرف نظر شده است (Meja-Morales et al., 2021) و Morales et al., 2023). با توجه به اینکه در نتایج و بررسی‌های پیشین رایج‌ترین فراسنجه برای خطر سیل شهری را، عمق و سرعت جریان معرفی کرده‌اند. لذا در این تحقیق سعی شده است با در نظر گرفتن تغییرپذیری‌های جریان ورودی پایدار به ارزیابی توزیع کمیت‌های عمق جریان، سرعت، الگوهای جریان برای درک مسیرهای جریان چند جهته ناشی از شبکه ساخته شده از خیابان‌ها و نقشه خطر سیل برای انسان در خیابان‌های بلوک شهری نا متخلخل به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار Flow3D پرداخته شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی نرم‌افزار

در این تحقیق از روش پویایی سیال‌های محاسبه شدنی (نرم‌افزار تجاری Flow-3D) برای بررسی جریان در مدل سیل شهری استفاده شده است. پویایی سیال‌های محاسبه

زیرزمینی (مانند شبکه زهکشی) به ویژه در شرایط سیل شدیدتر ضروری است (Rubinato et al., 2018). اندازه‌گیری‌های سرعت نقطه‌ای به دلیل شرایط چالش‌برانگیز برای اندازه‌گیری میدانی در طول یک رویداد بزرگ سیل شهری محدود می‌مانند (Chanson and Brown, 2015). همچنین میدان‌های جریان آشفته پیچیده در مخزن‌های کم عمق سیل گیر نیز به صورت جت‌های متقارن، نامتقارن یا پریچ و خم رخ می‌دهد که این ویژگی‌های جریان مستقیماً بر عملکرد مخازن تأثیر می‌گذارد (Stovin and Saul, 2000; Dewals et al., 2008; Kantoush et al., 2008). به عنوان مثال، میزان، حجم و مکان رسوب‌ها به شدت به الگوی جریان بستگی دارد (Adamsson et al., 2003; Isenmann et al., 2017). همچنین Haun and Olsen (2012) پیشنهاد کردند که یک رویکرد سه بعدی برتری‌هایی نسبت به دو بعدی دارد، زیرا جریان‌های ثانویه را می‌توان همراه با "منطقه‌های چرخش عمودی و دیگر ویژگی‌های جریان که در آن ویژگی‌های سرعت نا لگاریتمی است" بازتولید کرد.

در میان ابزارهای مورد استفاده برای بررسی و ارزیابی این رویدادها، مدلسازی عددی پرکاربردترین روش است (Mignot et al., 2006; Bazin et al., 2017). با این حال، کمبود داده‌های دقیق و قابل اعتماد در مورد رویدادهای سیل شهری، یک مسئله مهم در واسنجی و اعتبارسنجی این مدل‌ها می‌باشد که می‌توان از بررسی‌های آزمایشگاهی به عنوان یک معیار برای واسنجی مدل‌های عددی استفاده کرد (Macchione et al. 2019). Mejía-Morales et al. (2021) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تبادل جریان در یک بلوک شهری متخلخل و خیابان‌های پیرامون آن، بر روی عمق و سرعت جریان پرداختند. ایشان گزارش کردند که افزایش تخلخل انتقال دیواره‌های کناری بلوک می‌تواند عمق، سرعت جریان و در پی آن خطر سیل برای عابران پیاده را به ترتیب ۱۲ تا ۷۰ درصد به طور موضعی تغییر دهد (افزایش یا کاهش نسبت به بلوک شهری بدون تخلخل). (Li et al. 2021). تأثیر طرح ساختمان در یک بلوک شهری را بر شدت سیل بررسی و تأکید کردند که تخلخل ساختمان‌ها در جهت جریان

مسئله‌های هیدرولیکی و نیازهای محاسبه شدنی قابل قبول برای صحت‌سنجی انتخاب شد.

۲-۲- مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ ساده‌ترین و پرکاربردترین مدل آشفتگی دو معادله‌ای می‌باشد. در این مدل ترم μ_t ، به صورت $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ حل می‌شود. معادله انرژی جنبشی آشفتگی (K) و نرخ هدر رفت آن (ε) به صورت زیر بیان می‌شود (Lauder and Spalding, 1972).

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

در رابطه‌های بالا، σ_k و σ_ε به ترتیب اعداد پراکتل و اشمیت، P_k آشفتگی ناشی از نیروهای گرانی و C_μ ، $C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ ضریب‌های تجربی می‌باشند. مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$ دیگر مدل آشفتگی دو معادله‌ای می‌باشد که بر مبنای حل معادله‌های انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ هدر رفت آشفتگی به حل معادله‌های حاکم بر جریان می‌پردازد. به طور خاص، مدل $k-\varepsilon(RNG)$ برای توصیف جریان‌هایی که دارای منطقه‌های برشی قوی هستند با دقت بیشتری شناخته می‌شود، لذا کاربرد گسترده‌تری نسبت به مدل $k-\varepsilon$ دارد (Yakhot and Smith., 1992). معادله انرژی جنبشی آشفتگی در مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$ همانند مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ بوده، اما میزان ضریب‌های σ_ε ، و $C_{2\varepsilon}$ در معادله هدر رفت انرژی تغییر کرده، ضریب $C_{2\varepsilon}$ نیز ثابت نیست و تابعی از فراسنجه P_k می‌باشد.

دیگر مدل آشفتگی مورد بررسی در این تحقیق مدل آشفتگی $k-\omega$ می‌باشد که در آن به جای نرخ هدر رفت انرژی از بسامد آشفتگی ($\omega = \frac{\varepsilon}{k}$) استفاده شده و ترم μ_t ، به صورت $\mu_t = \rho \frac{k}{\varepsilon}$ حل می‌شود (Wilcox, 1994). در این

شدنی (CFD) روشی برای شبیه‌سازی فرآیندهای جریان می‌باشد که در آن معادله‌های جریان مانند معادله ناویر-استوکس و معادله بقای جرم، گسسته شده و برای هر سلول محاسبه شدنی حل می‌شود. نرم‌افزار Flow-3D توانایی محاسبه راه‌حل‌ها با استفاده از گزینه‌های مختلف حل کننده ضمنی و آشکار را دارد (Flow Science Inc. 2016). این نرم‌افزار بر مبنای معادله‌های ناویر-استوکس بوده و از روش Volume-of-Fluid (VOF) برای تعیین سطح مشترک آب و هوا استفاده می‌کند. در مختصات کارتزین معادله‌های حاکم برای تجزیه و تحلیل جریان آشفتگی دائمی سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط معادله‌های مومنتم و پیوستگی به شکل زیر بیان می‌شود (Celik and Rodi, 1984):

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + g_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

در رابطه‌های بالا، u_i ، u'_i و g_i به ترتیب سرعت نوسانی، سرعت میانگین و نیروهای بیرونی در راستای x_i ، μ لزوجت جنبشی، ρ چگالی آب و p فشار جنبشی می‌باشند. در مختصات دکارتی $i, j = 1, 2, 3$ ، $u_i = u, v, w$ ، $x_i = x, y, z$ و $u'_i = u', v', w'$ می‌باشد. بر مبنای فرضیه بوزینسک برای عبارت تنش رینولدز ($\overline{\rho u'_i u'_j}$) داریم:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

در رابطه فوق μ_t گرانیوی آشفتگی می‌باشد که روش حل آن مبنای مدل‌های مختلف آشفتگی را تشکیل می‌دهد. نرم‌افزار Flow-3D برای حل عبارت تنش رینولدز از چندین مدل آشفتگی مختلف استفاده می‌کند. به دلیل پیچیدگی‌های موجود در جریان‌های آشفتگی تاکنون هیچ مدلی برای حل طیف گسترده‌ای از مسئله‌های که در جریان‌های آشفتگی یافت می‌شوند به طور جهانی پذیرفته نشده است (Safarzadeh and Brevis., 2016). در این تحقیق مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ ، $k-\omega$ و $k-\varepsilon(RNG)$ به دلیل اعتمادپذیری در حل

مدل سیل شهری استفاده شد. برای مش بلاک اول و دوم به طور یکسان، شرایط مرزی شدت جریان در مقطع ورودی، در مقطع خروجی Continuitive، شرط مرزی Symmetry برای سطح آزاد سیال و همچنین برای کناره‌ها و کف از شرایط مرزی Wall که همانند یک دیوار بدون لغزش عمل می‌کند، استفاده شد.

جدول ۱ تغییرپذیری‌های دبی در ورودی‌های بلوک شهری

برای مدل عددی تحقیق حاضر

Table 1 Discharge variation in urban block inlets for the numerical model of the present study

Model	Discharge		
	Inlet 1	Inlet 2	total
Q4.5-2	4.5	2	6.5
Q4.5-1.5	4.5	1.5	6
Q4.5-2.5	4.5	2.5	7
Q4-2	4	2	6
Q4-1.5	4	1.5	5.5
Q5-2	5	2	7
Q5-2.5	5	2.5	7.5

مقطع ورودی مش بلاک سوم Continuitive و به منظور تأثیرناپذیری جریان در مقطع خروجی مش بلاک سوم شرایط مرزی Outflow انتخاب شد. در جدول ۲ ابعاد دامنه حل و شرایط مرزی استفاده شده برای شبکه‌بندی مدل عددی آورده شده است. همچنین برای محاسبه زمان پایان شبیه‌سازی، تغییرپذیری‌های مجموع دبی ورودی و خروجی و دبی در خیابان‌های بلوک شهری مهار شد. نتایج نشان داد که جریان در مدل عددی این تحقیق برای ورودی‌ها و خروجی‌های بلوک شهری و خیابان‌های مجاور آن در زمان ۴۰ ثانیه به حالت پایداری می‌رسد. بنابراین در مدل عددی این تحقیق با توجه به اعمال تغییرپذیری‌های در دبی ورودی مدت زمان شبیه‌سازی ۴۵ ثانیه انتخاب شد.

۲-۴- محاسبه‌های مربوط خطر سیل برای عابر

پیاده (عدد پایداری)

همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد برای هر نمونه از جریان، عمق جریان و سرعت میانگین باهم (خطر) امکان ارزیابی سطح خطر را برای عابران پیاده فراهم می‌کند. آسیب‌پذیری بر مبنای عدد پایداری (PN = U*d)، که در

مدل معادله‌های k و ω به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$-\alpha \frac{\omega}{k} P_k + \beta \rho \omega^2$$

که در آن σ_ω ، β' ، β و α ضریب‌های ثابت هستند.

۲-۳- معرفی مدل آزمایشگاهی و عددی

ویژگی‌های مدل عددی و ابعاد دامنه حل با توجه به مدل آزمایشگاهی (Mejía-Morales et al. (2021) برای سیل شهری انتخاب شد. مدل فیزیکی (Mejía-Morales et al., (2021) یک آبراهه مستطیلی به طول ۵/۴ و عرض ۳/۲ متر که شامل یک بلوک مستطیلی (به عنوان منطقه شهری) به طول ۱/۵۶ متر و عرض ۰/۹۶ متر و چهار خیابان پیرامون آن (بالادست، پایین‌دست، راست و چپ) با عرض یکسان ۰/۱۵ متر، با دو ورودی دبی (انتهای بالادست خیابان راست و چپ)، ۴ خروجی تخلیه (انتهای پایین‌دست همه خیابان‌ها) و شیب طولی ۰/۱۲ درصد می‌باشد. کل دبی ورودی، ۶/۵ لیتر بر ثانیه، دبی جریان ورودی در خیابان سمت راست ۴/۵ لیتر بر ثانیه و خیابان چپ ۲ لیتر بر ثانیه بوده و در انتهای پایین‌دست هر خیابان، از یک سرریز برای مهار عمق جریان خیابان‌ها استفاده شده است. ارتفاع سرریز در مدل فیزیکی (Mejía-Morales et al. (2021) به گونه‌ای تنظیم شده است که خیابان سمت راست عمق جریان بیشتری نسبت به خیابان سمت چپ داشته باشد (ارتفاع سرریز ۴ سانتی‌متر در خروجی ۱، در حالی که ۳ سانتی‌متر در خروجی‌های ۲، ۳ و ۴)، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق با توجه به محدوده عرضی خیابان‌ها، برای بررسی تأثیر تغییرپذیری‌های دبی ورودی‌ها بر روی توزیع کمیت‌های عمق، سرعت، الگوهای جریان و نقشه خطر سیل برای انسان در خیابان‌های بلوک شهری نا متخلخل از ۷ دبی مختلف استفاده شد (جدول ۱). به منظور کاهش حجم عملیات از سه مش بلاک برای شبیه‌سازی جریان در

آن U، سرعت میانگین در عمق و d عمق جریان، مشخص می‌شود. در این تحقیق از سه آستانه عدد پایداری برای عابران پیاده استفاده می‌شود. $PN = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$ ، حد پایین پایداری افراد که بنابر نتایج بررسی‌های انجام شده توسط Xia et al. (2014a) و Abt et al. (1989) (نتایج به دست آمده با استفاده از بتن یکپارچه)، عمق جریان تا ۰/۷ متر (Ishigaki et al., 2009) و سرعت میانگین در عمق جریان تا ۲ متر بر ثانیه تعریف می‌شود (Russo et al., 2013 و Martínez-).

در این محدوده بی ثباتی برای شمار بسیار کمی از عابران پیاده رخ می‌دهد. $PN = 0.7 \text{ m}^2/\text{s}$ ، حد بالایی نتایج Xia et al. (2014a) و Takahashi et al. (1989) و Abt et al. (1989) و Russo et al. (2013) سرعت بالای ۲/۷ متر (1992) جایی که نخستین نشانه‌های بی ثبات افراد در مطالعات و مشاهده شده است. در این محدوده در برخی از عابران پیاده بی ثباتی مشاهده شده است (تا ۲۰ درصد از کل مجموعه).

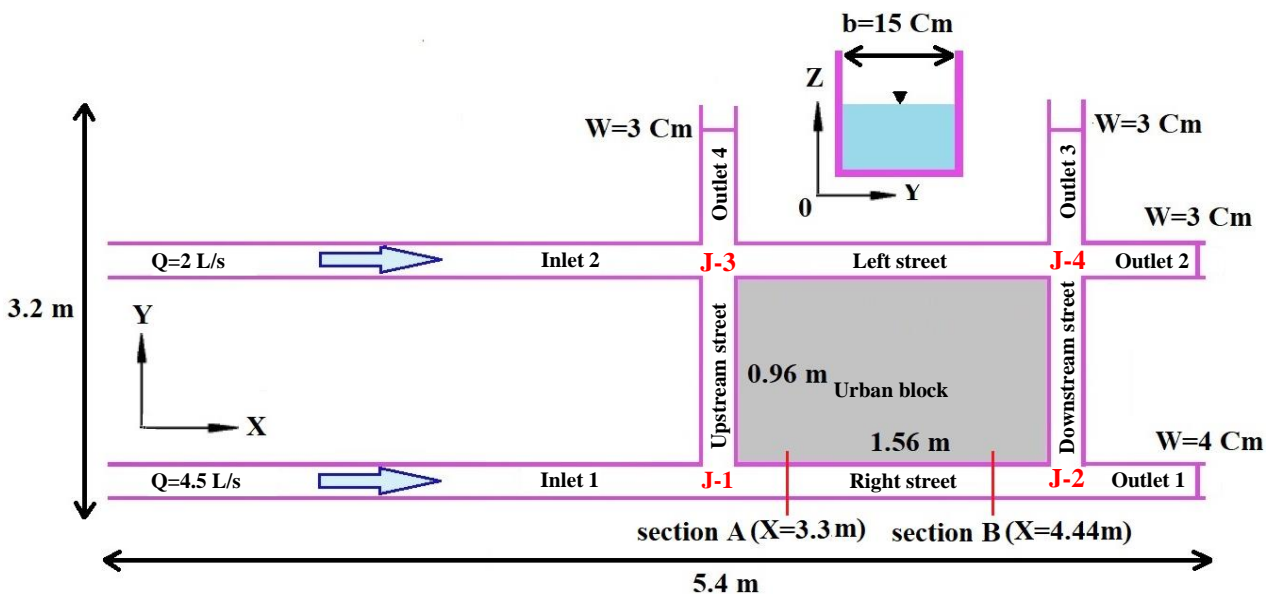


Fig. 1 General overview of the urban model (Mejía-Morales et al., 2021)

شکل ۱ نمای کلی مدل شهری (Mejía-Morales et al., 2021)

جدول ۲ ابعاد دامنه حل و شرایط مرزی مدل عددی

Table 2 Dimensions of the solution domain and boundary conditions of the numerical model

Direction		Size			boundaries		
		Mesh plan 1	Mesh plan 2	Mesh plan 3	Mesh plan 1	Mesh plan 2	Mesh plan 3
X	min	0	0	2.85	Volume flow rate	Volume flow rate	Continuative
	max	2.85	2.85	5.4	Continuative	Continuative	Outflow
Y	min	0	1.1	0	Wall	Wall	Wall
	max	0.17	1.28	3.2	Wall	Wall	Outflow
Z	min	0	0	0	Wall	Wall	Wall
	max	0.1	0.09	0.1	Symmetry	Symmetry	Symmetry

یعنی بالاتر از این حد به تقریب همه عابران پیاده ناپایداری از خود نشان می‌دهند. در جدول ۳ توضیح‌های مختصر مربوط به عدد پایداری آورده شده است.

$PN = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ ، عمق بالای ۱/۲ متر پیشنهاد شده توسط (Cox et al., 2010)، که بزرگترین عمق جریان آزمایش شده و تا سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه که بنابر نظر Russo et al. (2013) و Martínez-Gomariz et al. (2016) تا حدودی حد بالایی پایداری افراد در جریان کم عمق است،

شبیه‌سازی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه و درصد خطای نسبی (Re) برای هر یک محاسبه شد. با توجه به نتایج ارائه شده و مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مشخص شد که شبکه محاسبه شدنی (M4) با ۲۶۷۳۹۳۳ شمار سلول محاسبه شدنی به عنوان مش بهینه انتخاب شد. همچنین به منظور انتخاب مدل آشفتگی مناسب، نتایج رخنمای سرعت نزدیک سطح آب و میانگین گیری شده در عمق برای خیابان راست در محل (X=3.3m) به دست آمده از شبیه‌سازی مدل عددی برای سه مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ ، $k - \omega$ و $k - \varepsilon(RNG)$ ، شکل با مدل آزمایشگاهی (Mejía-Morales et al. (2021) شکل ۲ ارائه شد. برابر شکل ۲ مشاهده می‌شود که نتایج مدل آشفتگی $k - \varepsilon(RNG)$ برای هر دو رخنمای سرعت نزدیک سطح آب و سرعت میانگین‌گیری شده در عمق به ترتیب با خطای نسبی ۳ و ۶/۸ درصد نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی دارای همبستگی بیشتری با مدل آزمایشگاهی می‌باشد. همچنین به منظور بررسی کیفی میزان همبستگی مدل‌های آشفتگی این تحقیق با مدل آزمایشگاهی هم تراز سرعت در جهت (X) برای خیابان راست در محل (X=4.44 m) در شکل ۳ آورده شده است. مقایسه کیفی نتایج مدل‌های مختلف آشفتگی با مدل آزمایشگاهی برای هم تراز سرعت خیابان سمت راست در محل (X=4.44 m) نشان می‌دهد که مدل آشفتگی $k - \varepsilon(RNG)$ نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی دارای همبستگی بیشتری با مدل آزمایشگاهی می‌باشد. بنابراین در این تحقیق مدل آشفتگی $k - \varepsilon(RNG)$ برای شبیه‌سازی جریان انتخاب شد.

جدول ۳ توضیح‌های عدد پایداری افراد

Table 3 Description of the number of people's stability

PN	Instability of the total set (%)	Range name
<0.3	2	Low
0.3-0.7	20	Moderate
0.7-1	to 50	Significant
>1	More than 50	High

پیش‌بینی سطح محلی خطر برای عابران پیاده نیاز به انتقال نتایج از مقیاس مدل عددی به مقیاس نمونه اولیه واقعی دارد. با استفاده از همانند فرود، $Fr_m = Fr_p$ ، نسبت‌های زیر به دست می‌آید:

$$\frac{U_p}{U_m} = \lambda_z^{0.5} \quad (8)$$

$$\frac{d_p}{d_m} = \lambda_z \quad (9)$$

$$PN_p = (10^{0.5} * U_m) * (10 * d_m) \quad (10)$$

که در آن: U_p سرعت میانگین نمونه واقعی، U_m سرعت میانگین نمونه مدل عددی، d_p عمق نمونه واقعی، d_m عمق نمونه مدل عددی، $\lambda_z = 10$ مقیاس عمقی و PN_p عدد پایداری نمونه واقعی می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی مدل عددی

در این تحقیق برای مدل سیل شهری مورد بررسی، از ۴ حالت مختلف با اندازه‌های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آن‌ها از روی داده‌های آزمایشگاهی در نهایت مش‌بندی بهینه برای مدل یاد شده انتخاب شد. برای این کار برابر جدول ۴ نتایج رخنمای سرعت برای خیابان سمت راست در محل (X=3.3m) به دست آمده از

جدول ۴ انتخاب مش‌بندی بهینه بر مبنای نتایج رخنمای سرعت برای خیابان سمت راست در محل (X=3.3m)

Table 4 Choosing the optimal mesh based on velocity profile results for the right street at the location (X=3.3m)

Computing network	Downstream of the right street		Upstream of the left street		Part urban block		Total mesh	Percentage of relative error (Re)	
	Mesh size (mm)	Mesh count	Mesh size (mm)	Mesh count	Mesh size (mm)	Mesh count		U (Average)	U (Near surface velocity)
M1	15	14630	15	12540	12	320139	347309	10	15
M2	12	26656	12	24656	10	561000	702312	9.9	17.5
M3	10	48450	10	43605	8	1116500	1208555	8.31	9.7
M4	9	66253	9	60230	6	2547450	2673933	6.67	3
M5	Smaller than the M4 computing network, requiring a high processing system and spending more time on simulation								

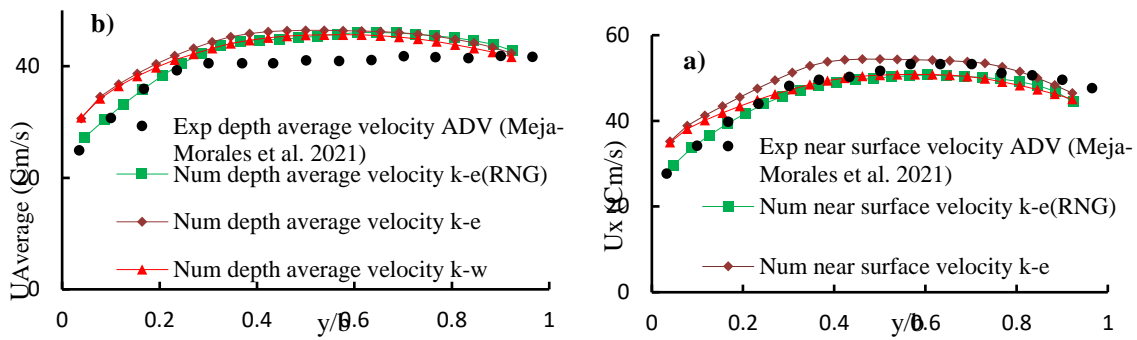


Fig. 2 Comparing the results of different turbulence models and laboratory for a) Near surface velocity b) Depth average velocity
 شکل ۲ مقایسه نتایج مدل‌های آشفتگی مختلف و آزمایشگاهی برای (a) رخنمای سرعت نزدیک سطح آب و (b) رخنمای سرعت میانگین.

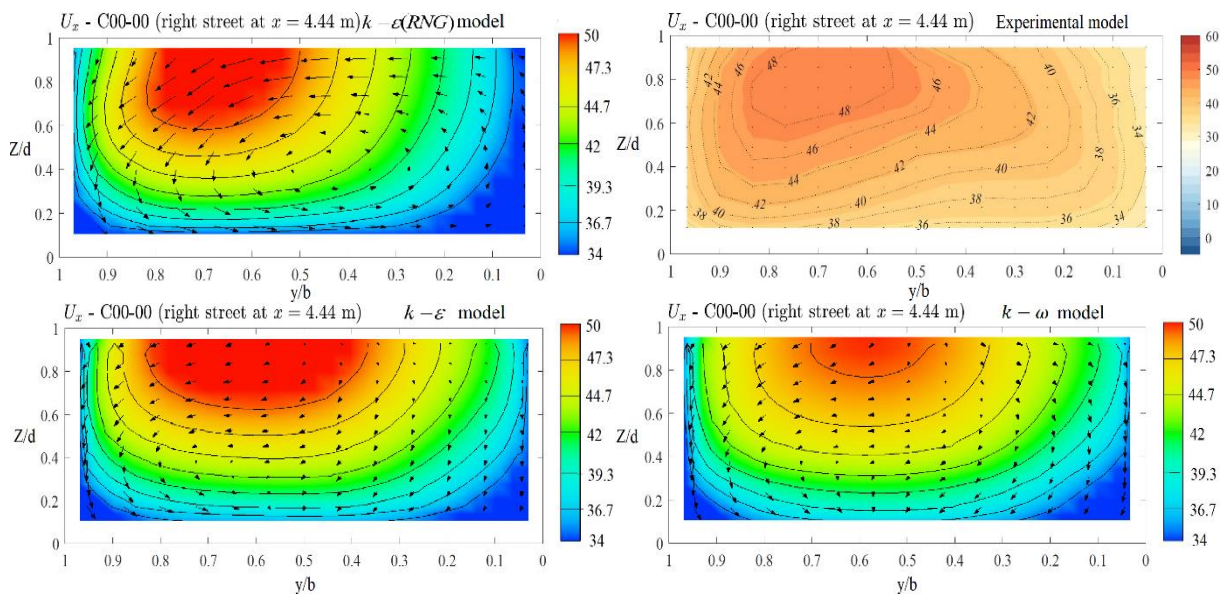


Fig. 3 Velocity contour for different turbulence models and laboratory in cross-section $X=4.44\text{m}$ (Mejía-Morales et al., 2021)
 شکل ۳ هم تراز سرعت برای مدل‌های آشفتگی مختلف و آزمایشگاهی در مقطع $X=4.44\text{m}$ (Mejía-Morales et al., 2021)

راست میزان سرعت به دلیل وجود دبی زیاد جریان نسبت به دیگر خیابان‌ها بیشتر است. لازم به یادآوری است که بیشینه نقطه‌ای میزان سرعت در سمت راست ورودی خیابان پایین دست رخ می‌دهد. این در حالی است که خیابان بالادست و خیابان سمت چپ دارای سرعت کمتری نسبت به دیگر خیابان‌ها می‌باشند. همچنین شکل (۵) به منظور تعیین مسیر جریان در طول و عرض خیابان‌های بلوک شهری ارائه شد. برابر شکل در ابتدای خیابان بالادست رخداد یک ناحیه چرخشی توسعه یافته مشهود می‌باشد. علت شکل‌گیری این ناحیه، برهمکنش اندازه حرکت طولی در امتداد خیابان راست و اندازه حرکت عرضی در امتداد خیابان بالادست وارد بر یک ذره واقع در محل تلاقی (J-1) می‌باشد. بدین صورت که توده

۳-۲- الگوی جریان در مدل بلوک شهری شاهد
 عمق و سرعت جریان از مهم‌ترین فراسنجه‌های تعیین میزان خطر سیل شهری می‌باشند، لذا پیش‌بینی این فراسنجه‌ها در محیط شهری دارای اهمیت زیادی است. شکل (۴) توزیع عمق و سرعت جریان در خیابان‌های بلوک شهری را نشان می‌دهد. برابر شکل، مشاهده می‌شود در خیابان سمت راست به دلیل دبی زیاد جریان نسبت به ورودی دیگر و وجود سرریز ۴ سانتی‌متری در خروجی آن، دارای عمق جریان بیشتری نسبت به دیگر خیابان‌ها می‌باشد. همچنین به دلیل وجود شیب مثبت به سمت خیابان‌های پایین دست عمق جریان از سمت ورودی به خروجی میزان کمی افزایش می‌یابد. برابر شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود در خیابان سمت

چرخشی در خیابان بالادست بسیار محدودتر می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان به موارد زیر مرتبط دانست:

۱- جریان عبوری از خیابان سمت راست ضمن گذر از نقطه (J-1) بخشی از دبی خود را از دست داده و در نتیجه زمان رسیدن به نقطه (J-2) به واسطه کاهش دبی اندازه حرکت طولی کمتری نسبت به نقطه (J-1) داشته و در نتیجه در زمان ورود جریان به خیابان پایین‌دست، مکش جانبی سریع‌تر به اندازه حرکت طولی غالب شده و ناحیه چرخشی سریع‌تر بسته می‌شود.

۲- برابر شکل (۴-ا) به واسطه وجود دریاچه مهار عمق در خیابان سمت راست (خرجی ۱)، عمق آب در نقطه (J-2) بیشتر از نقطه (J-1) بوده و این امر موجب کاهش سرعت در امتداد خیابان سمت راست در نقطه (J-2) در مقایسه با نقطه (J-1) شده و موجب تشدید کاهش اندازه حرکت طولی جریان می‌شود.

سیال پیش از رسیدن به نقطه (J-1) به واسطه مکش جانبی اعمالی از سوی خیابان بالادست دچار انحراف عرضی شده و به تدریج به سمت خیابان بالادست کشیده می‌شود. در ابتدای ورودی خیابان بالادست، اندازه حرکت طولی بر اندازه حرکت جانبی غالب بوده و به این علت جریان از دیواره سمت چپ خیابان بالادست جدا می‌شود. به تدریج در طول خیابان بالادست از میزان اندازه حرکت طولی کاسته شده و اندازه حرکت طولی بر اندازه حرکت عرضی به واسطه مکش جانبی غالب می‌شود. در نتیجه این پدیده، به تدریج ناحیه چرخشی بسته شده و جریان ورودی به خیابان بالادست، اندازه حرکت طولی خود را از دست داده و تا حدودی با راستای خیابان بالادست همسو می‌شود. به نحوی که ضمن بسته شدن ناحیه چرخشی، جریان در انتهای خیابان بالادست تا حدودی دوباره به حالت توسعه یافتگی می‌رسد. در بخش ابتدایی خیابان پایین‌دست نیز همانند خیابان بالادست یک ناحیه چرخشی شکل گرفته است که ابعاد آن در مقایسه با ابعاد ناحیه

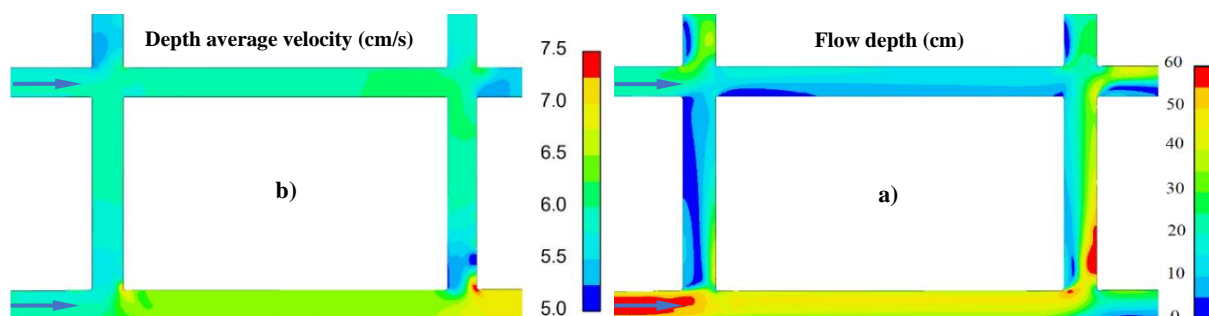


Fig. 4 a) Flow depth distribution b) Flow velocity in the streets of the city block

شکل ۴ (a) توزیع عمق و (b) سرعت جریان در خیابان‌های بلوک شهری

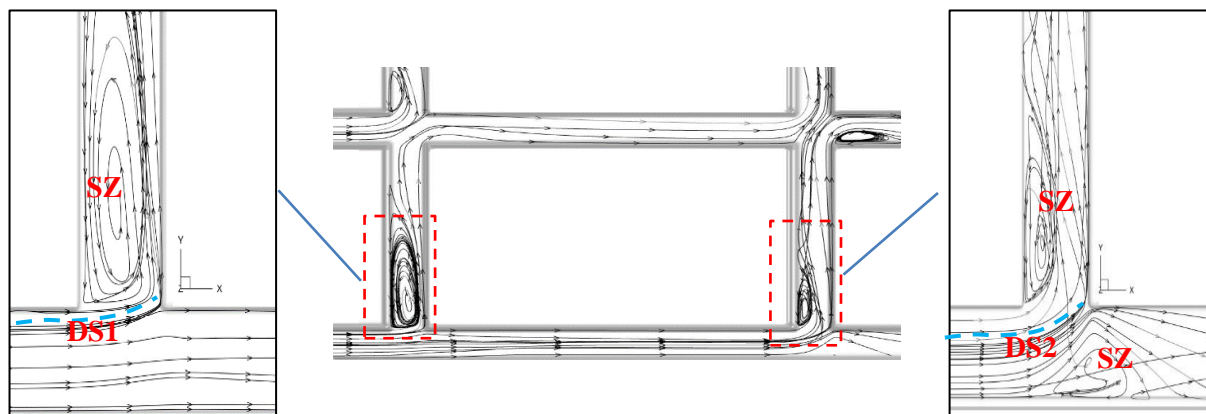


Fig. 5 streamlines in the urban block

شکل ۵ الگوی جریان در محل تلاقی خیابان‌ها در بلوک شهری

۳-۳-۳- بررسی فراسنجه‌ای

۳-۳-۳-۱- عمق جریان

شکل (۶) نشان دهنده توزیع عمق جریان در خیابان‌های بلوک شهری برای دبی‌های مختلف ورودی‌ها می‌باشد. برابر شکل مشاهده می‌شود که در همه مدل‌ها خیابان راست و بالادست به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان عمق می‌باشند. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تغییر دبی در یکی از ورودی‌ها یا خیابان‌ها تاثیر بالقوه‌ای بر روی تغییرپذیری‌های عمق در خیابان چپ یا راست دیگر می‌گذارد. به طور مثال با مقایسه عمق جریان در خیابان‌های راست و چپ مدل‌های (Q4-1.5) با (Q4.5-1.5)، (Q4-2) با (Q5-2) و (Q4.5-2.5) با (Q5-2.5) مشاهده می‌شود که با افزایش دبی در ورودی ۱ به ازای دبی ثابت در ورودی ۲، در خیابان‌های راست و چپ از سمت پایین‌دست به سمت بالادست و در خیابان‌های بالادست و پایین‌دست از سمت چپ به راست، عمق جریان افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج نشان داد که در همه خیابان‌ها، اختلاف میزان عمق بیشترین و کمترین میزان دبی ورودی‌ها ۱۰ الی ۱۲ درصد می‌باشد.

۳-۳-۳-۲- سرعت جریان

شکل (۷) نشان دهنده توزیع سرعت در خیابان‌های بلوک شهری برای دبی‌های مختلف در ورودی‌ها می‌باشد. برای همه مدل‌ها، میزان سرعت از ۰ تا ۶۰ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد که در مقیاس واقعی سرعت بین ۰ تا ۱/۸۹ متر بر ثانیه می‌باشد. در همه مدل‌ها به دلیل دبی زیاد ورودی ۱، بیشترین میزان سرعت در خیابان سمت راست و در ورودی این خیابان مشاهده می‌شود. این در حالی است که سرعت در خیابان چپ ۳ تا ۴ برابر کمتر از خیابان راست است. خیابان بالادست دارای یک ناحیه جریان کم سرعت (ناحیه جریان گردشی) که ناشی از برش با جریان در خیابان سمت راست می‌باشد. به طور میانگین، در بین تمام خیابان‌ها جریان در امتداد این خیابان دارای کم سرعت‌ترین ناحیه می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که خیابان پایین‌دست در بین همه مدل‌ها بیشترین طیف سرعت را داشته، که بیشترین میزان سرعت در این خیابان عمدتاً در امتداد دیوار سمت

راست قرار دارد. تفاوت سرعت در عرض خیابان پایین‌دست دو تا سه برابر می‌باشد. همچنین همان‌طور که انتظار می‌رود میزان سرعت میانگین در خیابان‌های راست و چپ به طور مستقیم به میزان دبی ورودی هر خیابان بستگی دارد. به عنوان مثال سرعت میانگین در طول خیابان‌های راست و چپ در مدل (Q5-2.5) نسبت به مدل شاهد (Q4.5-2) به ترتیب ۶ و ۱۲ درصد افزایش داشته‌اند. در خیابان بالادست سرعت میانگین در همه مدل‌ها در محدوده ۹ تا ۱۱ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. لازم به یادآوری است در بعضی از مدل‌ها افزایش دبی ورودی ۲ باعث بالا رفتن عمق در طول خیابان بالادست می‌شود. با رسیدن عمق افزایش یافته به ورودی این خیابان، خیابان سمت راست نیز تحت تاثیر این افزایش عمق قرار گرفته و باعث کاهش سرعت میانگین در ورودی خیابان راست می‌شود (به عنوان مثال: Q4.5-2.5). این در حالی است که خیابان پایین‌دست متاثر از هر دو دبی ورودی می‌باشد به طوری که با افزایش میزان دبی ورودی ۱ در یک دبی ثابت ورودی ۲، سرعت میانگین در طول خیابان پایین‌دست افزایش می‌یابد. اما با افزایش دبی ورودی ۲ به ازای دبی ثابت ورودی ۱، به دلیل افزایش عمق جریان از انتهای خیابان پایین‌دست به سمت ابتدای آن، میزان سرعت میانگین در طول خیابان کاهش می‌یابد.

۳-۳-۳-۳- الگوی جریان

الگوی جریان سیل در خیابان‌های بلوک شهری برای دبی‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. برابر شکل مشاهده می‌شود که در همه مدل‌ها در محل تلاقی دو خیابان الگوهای چرخشی جریان با ابعادهای کوچک و بزرگ تشکیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که بزرگترین طول و عرض الگوهای چرخشی جریان در ورودی خیابان بالادست تشکیل می‌شود که ناشی از وجود اندازه حرکت طولی بیشتر در ابتدای خیابان سمت راست نسبت به دیگر خیابان‌ها می‌باشد. عرض الگوی چرخشی در خیابان بالادست هم عرض خیابان بوده و طول آن بسته به دبی دو ورودی متناهی می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش دبی در ورودی ۱ طول الگوی چرخشی افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش دبی در ورودی ۲ به ازای دبی ثابت در ورودی ۱، میزان طول

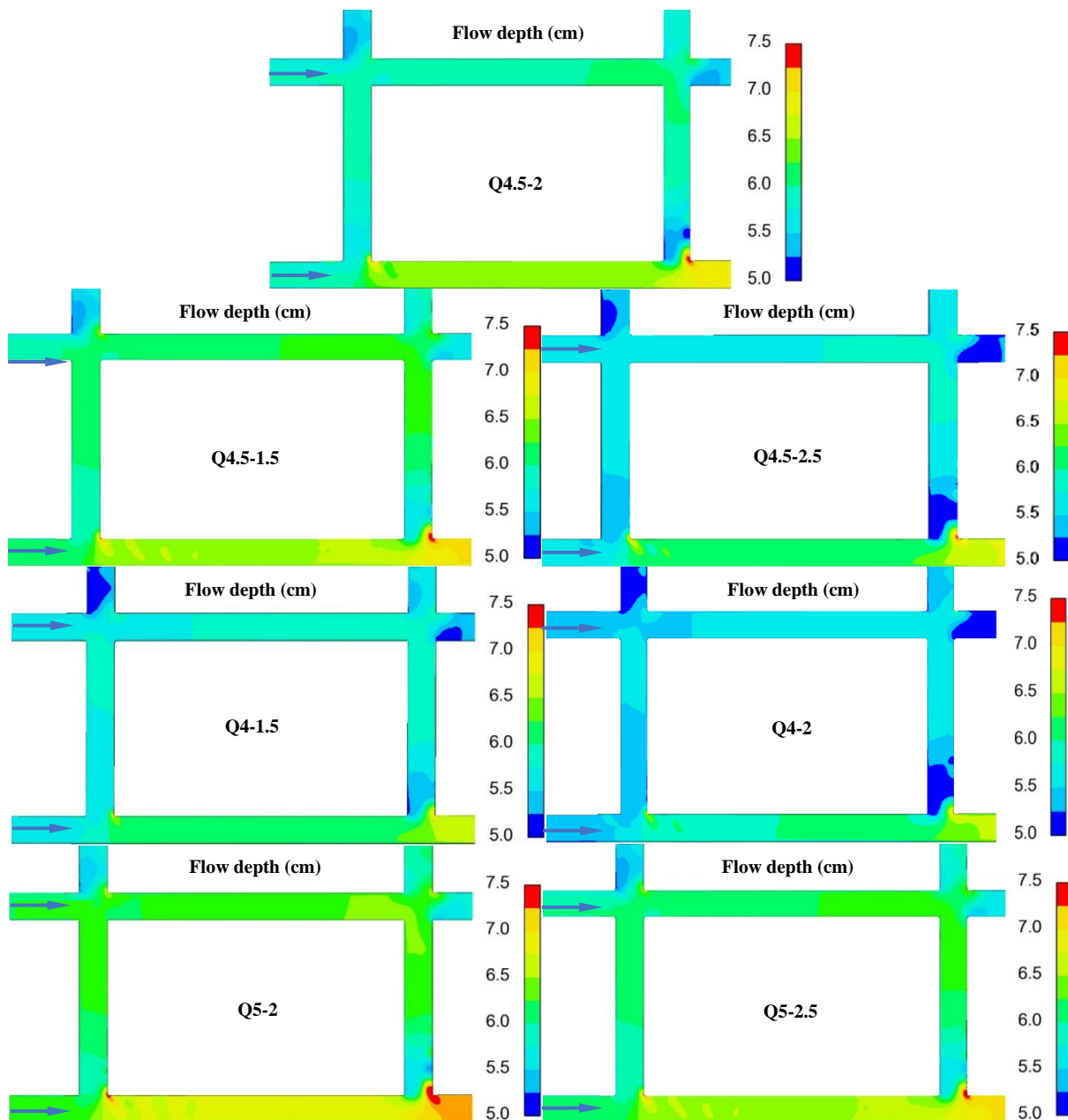


Fig. 6 Flow depth distribution in urban block streets for different discharges at inlets
 شکل ۶ توزیع عمق جریان در خیابان‌های بلوک شهری برای دبی‌های مختلف در ورودی‌ها

دبی‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. برابر شکل مشاهده می‌شود که در همه مدل‌ها در محل تلاقی دو خیابان الگوهای چرخشی جریان با ابعادهای کوچک و بزرگ تشکیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که بزرگترین طول و عرض الگوهای چرخشی جریان در ورودی خیابان بالادست تشکیل می‌شود که ناشی از وجود اندازه حرکت طولی بیشتر در ابتدای خیابان سمت راست نسبت به دیگر خیابان‌ها می‌باشد. عرض الگوی چرخشی در خیابان بالادست هم عرض خیابان بوده و طول آن بسته به دبی دو ورودی متناهی باشد. نتایج

الگوی چرخشی در خیابان بالادست کاهش می‌یابد. همچنین لازم به یادآوری است مسیر جریان ورودی ۲ نشان می‌دهد که بیشتر جریان ورودی از این خیابان از خروجی خیابان بالادست به بیرون منتقل می‌شود. به عبارت دیگر بیشتر جریان موجود در خیابان‌های بلوک شهری ناشی از جریان ورودی ۱ می‌باشد.

۳-۳-۴ الگوی جریان

الگوی جریان سیل در خیابان‌های بلوک شهری برای

که بیشتر جریان ورودی از این خیابان از خروجی خیابان بالادست به بیرون منتقل می‌شود. به عبارت دیگر بیشتر جریان موجود در خیابان‌های بلوک شهری ناشی از جریان ورودی ۱ می‌باشد.

نشان داد که با افزایش دبی در ورودی ۱ طول الگوی چرخشی افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش دبی در ورودی ۲ به ازای دبی ثابت در ورودی ۱، میزان طول الگوی چرخشی در خیابان بالادست کاهش می‌یابد. همچنین لازم به یادآوری است مسیر جریان ورودی ۲ نشان می‌دهد

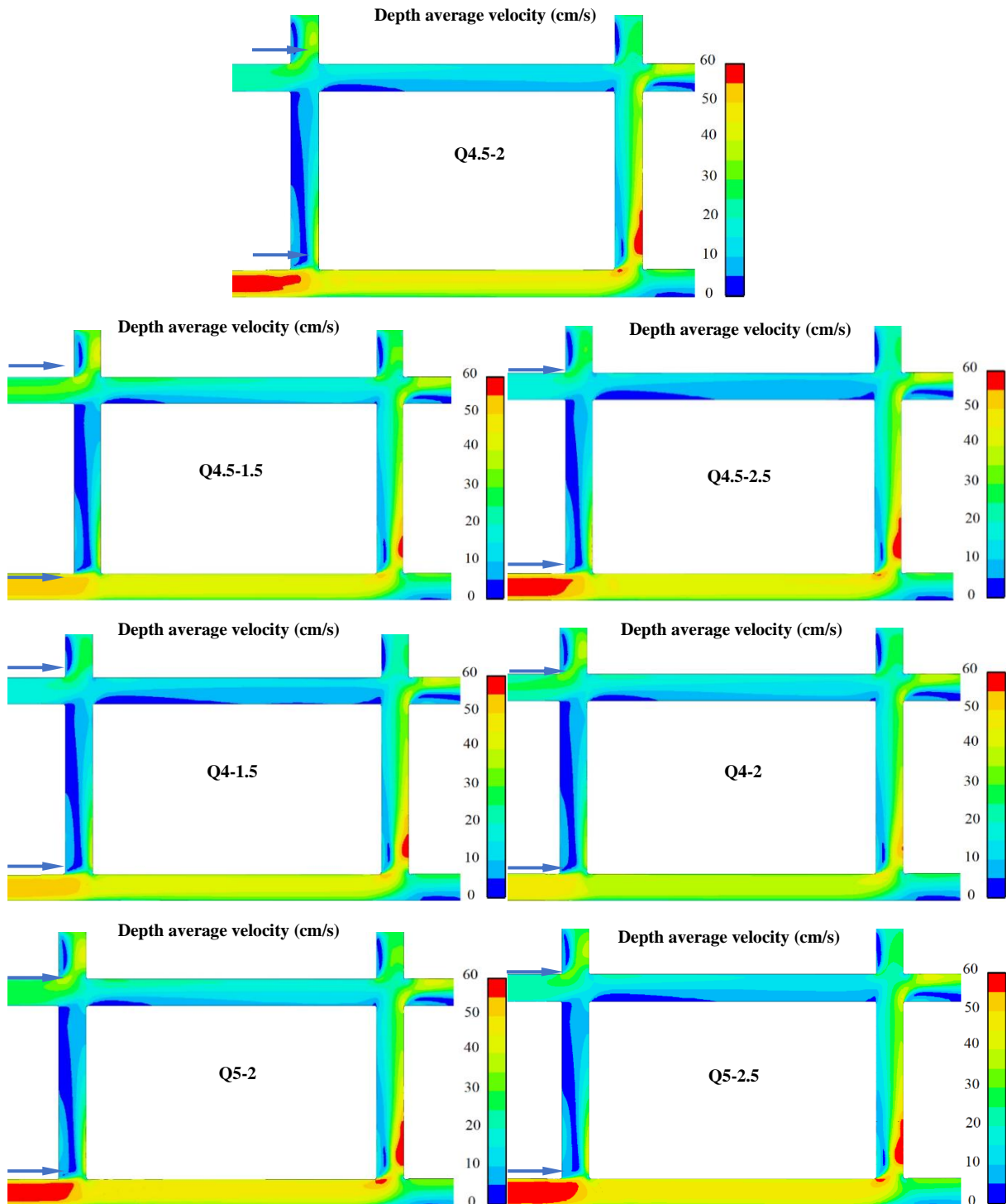


Fig. 7 Depth average velocity distribution in urban block streets for different discharges at inlets

شکل ۷ توزیع سرعت در خیابان‌های بلوک شهری برای دبی‌های مختلف در ورودی‌ها

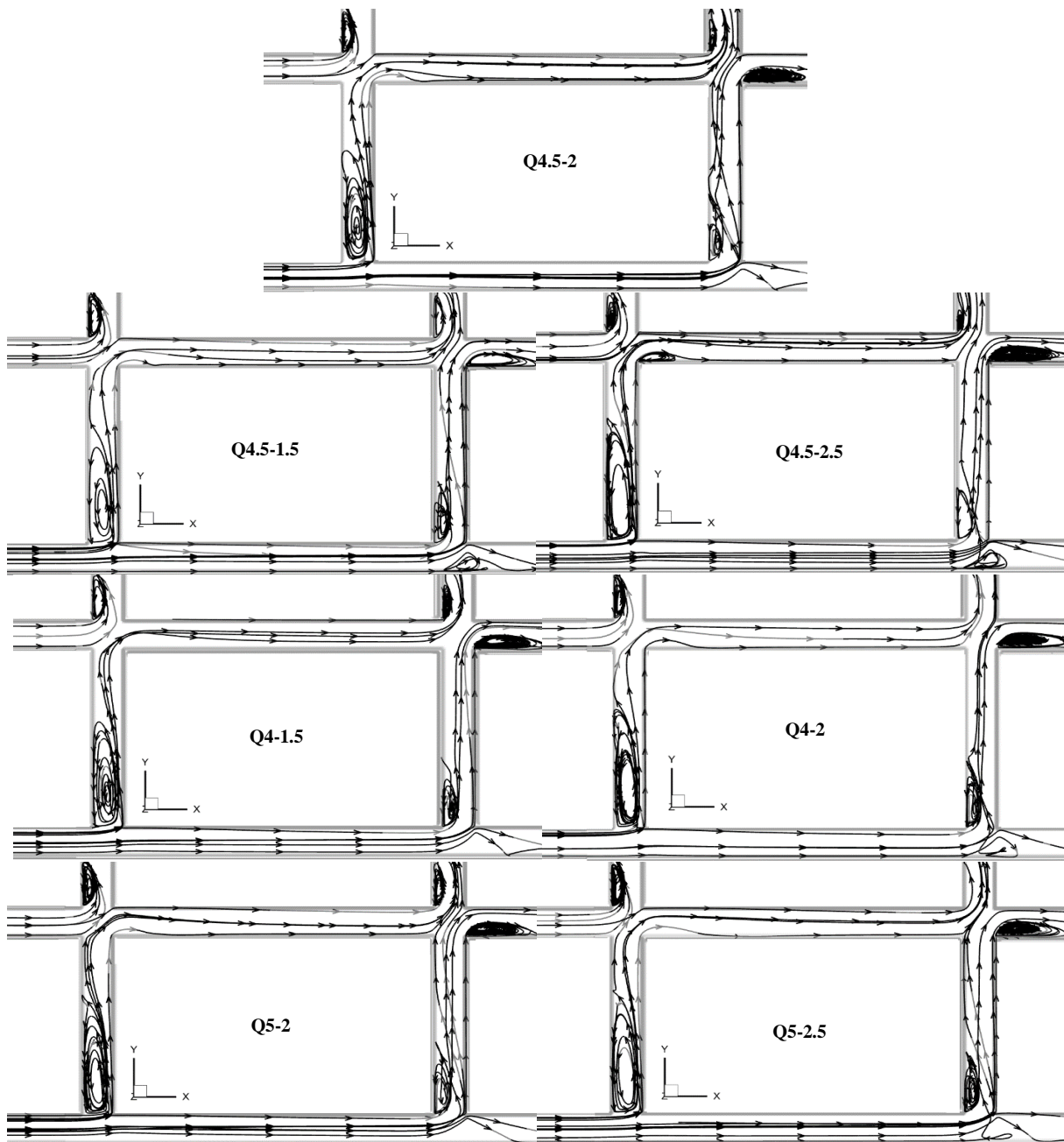


Fig. 8 Streamline in urban block streets for different discharges at inlets

شکل ۸ الگوی جریان در خیابان‌های بلوک شهری برای دبی‌های مختلف در ورودی‌ها

۳-۳-۵- خطر سیل عابران پیاده

عدد پایداری که یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین خطر برای عابران پیاده در هنگام رخداد سیل محلی می‌باشد با استفاده از رابطه (۱۰) برای نمونه واقعی قابل محاسبه است. در شکل (۹) نقشه خطر سیل عابران پیاده در بلوک شهری برای دبی‌های مختلف ارائه شده است. برابر شکل می‌توان دریافت که در همه مدل‌ها به دلیل دبی زیاد در ورودی ۱، خیابان راست به عنوان منطقه پر خطر برای عابران پیاده و

خیابان بالادست به عنوان منطقه کم خطر یا امن در سطح بلوک شهری می‌باشد. همچنین در همه مدل‌ها، به دلیل سرعت بالای جریان در سمت راست خیابان پایین دست، سطح خطر برای عابران پیاده قابل توجه می‌باشد. این در حالی است که سطح خطر در سمت چپ خیابان پایین دست بسیار کم است. در خیابان چپ نیز به طور عموم منطقه کم خطر حاکم بوده و به دلیل کشیده شدن مسیر جریان به سمت چپ این خیابان (به جهت وجود خروجی‌ها)، در سمت چپ خیابان چپ

خطر بالا حاکم می‌باشد. این در حالی است که با افزایش یا کاهش دبی در ورودی ۲، در مدل‌های (Q4.5-1.5) و (Q4.5-2.5) قدری از میزان خطر در ورودی خیابان راست کاسته می‌شود. دلیل این امر کاهش سرعت در مدل (Q4.5-2.5) و کاهش عمق جریان در مدل (Q4.5-1.5) در ورودی این خیابان می‌باشد که باعث پایین آمدن عدد پایداری می‌شود. افزایش دبی در ورودی ۱ به ازای دبی ثابت ورودی ۲، به طور عمومی باعث کاهش میزان خطر در خیابان چپ می‌شود. همچنین به

سطح خطر در حد میانگین می‌باشد. مقایسه مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دبی ورودی ۱ و ۲، به طور عمومی میزان خطر به ترتیب در خیابان‌های راست و چپ افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به این که دو فراسنجه عمق و سرعت جریان در تعیین سطح خطر تاثیرگذار می‌باشند لذا تغییر دبی ورودی ۲، نتایج متفاوتی را بر روی میزان سطح خطر در خیابان‌های راست و پایین دست نشان می‌دهد. به عنوان مثال در مدل شاهد (Q4.5-2) در ورودی خیابان راست منطقه با

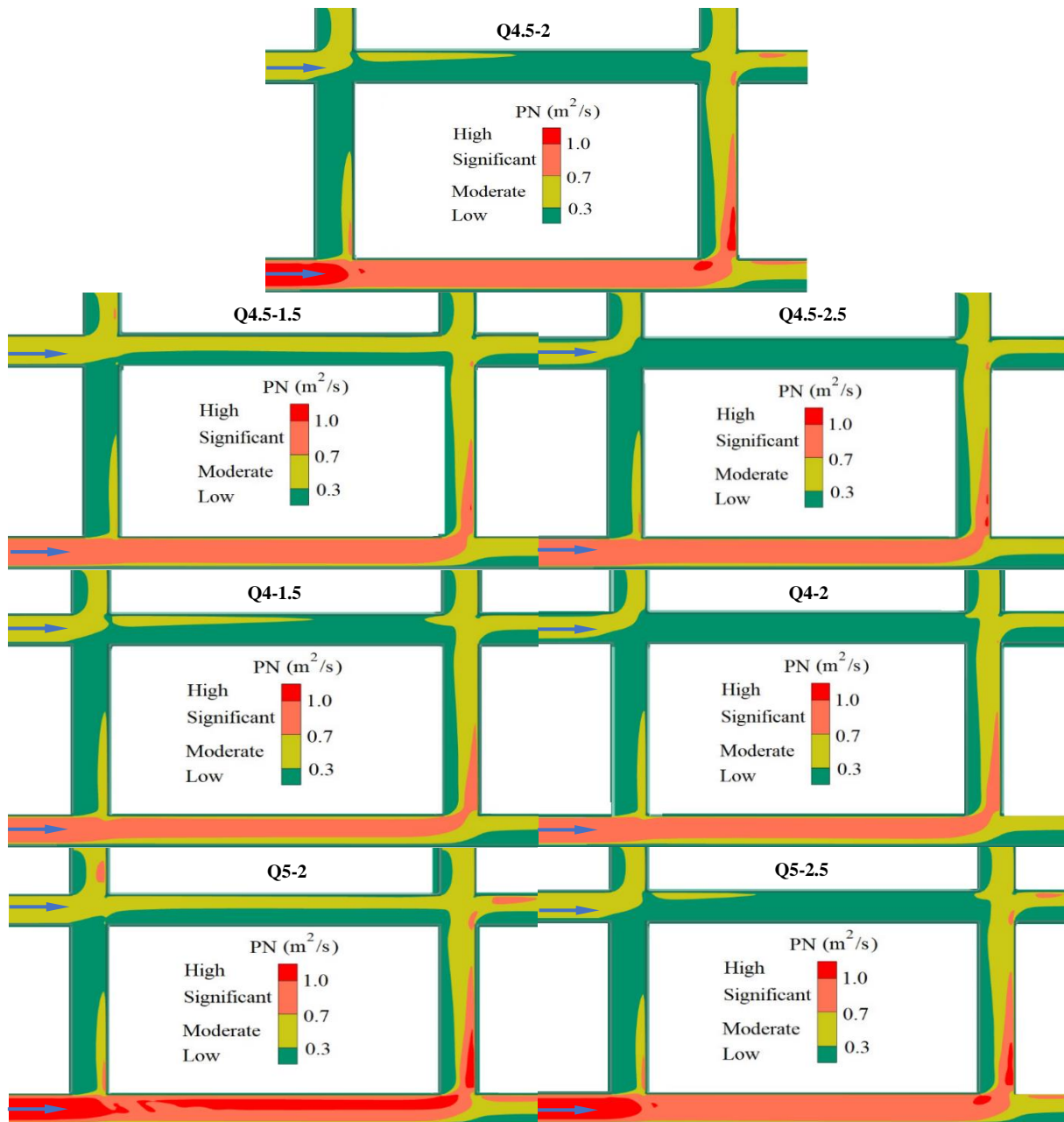


Fig. 9 Flood risk maps for adult pedestrians in urban block streets for different discharges at inlets
 شکل ۹ نقشه خطر سیلاب برای عابران پیاده بالغ در بلوک شهری برای دبی‌های مختلف

ارزیابی خطر سیل برای محیط‌های شهری با هندسه‌های مختلف، پیشنهاد و تاکید می‌شود هنگام تهیه نقشه‌های خطر سیل احتمال ورود دبی‌های مختلف از دیگر خیابان‌های شهر در نظر گرفته شود.

در نهایت، این نتایج تنها نمایانگر این هندسه ساده خاص با دبی‌های ثابت و بدون در نظر گرفتن فراسنجه‌های خاص مانند تاثیر متقابل بازدارنده‌های ثابت و متحرک موجود در خیابان‌های شهر (مانند وسیله‌های نقلیه و غیره) هستند و می‌توانند در چینش‌های واقعی‌تر منطقه‌های شهری حتی در طول رخداد سیلاب تغییر یابند.

۵- منابع

Abt, S.R., Wittier, R.J., Taylor, A. & Love, D.J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 25(4), 881-890.

Adamsson, Å., Stovin, V. & Bergdahl, L. (2003). Bed shear stress boundary condition for storage tank sedimentation. *Journal of Environmental Engineering*, 129(7), 651-658.

Araud, Q., Finaud-Guyot, P., Lawniczak, F., François, P., Vazquez, J. & Mosé, R. (2014). Modeling flood in an urban area: Validation of numerical tools against experimental data. *Advances in Hydroinformatics: SIMHYDRO 2012—New Frontiers of Simulation*, 207-220.

Arrighi, C., Oumeraci, H. & Castelli, F. (2017). Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 515-531.

Bazin, P.H., Mignot, E. & Paquier, A. (2017). Computing flooding of crossroads with obstacles using a 2D numerical model. *Journal of Hydraulic Research*, 55(1), 72-84.

Beck, J., Metzger, R., Hingray, B. & Musy, A. (2002). Flood risk assessment based on security deficit analysis. In: EGS General Assembly Conference Abstracts, 2121.

Black, R.D. (1975). Flood Proofing Rural Residences: A "Project Agnes" Report Prepared for the US Department of Commerce, Economic Development Administration. Department of Agricultural Engineering, Cornell University.

Bonham, A. & Hattersley, R. (1967). Low level causeways, University of New South Wales, Australia. Water Research Laboratory, Technical Report, 100.

طور عمومی تاثیر تغییرپذیری‌های دبی در هر دو ورودی بر روی سطح خطر سیل برای عابران پیاده در خیابان بالادست ناچیز می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق با تکیه بر مدل عددی، تاثیر تغییرپذیری‌های دبی ورودی‌ها بر جریان سیلاب را بررسی می‌کند. در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل عددی از مدل فیزیکی (Mejía-Morales et al., 2021) که شامل یک بلوک مستطیلی به عنوان منطقه شهری بدون تخلخل با چهار خیابان پیرامون آن، دو ورودی جریان و چهار خروجی استفاده شد. نتایج رخنمای سرعت نزدیک سطح آب و میانگین گیری شده در عمق نشان داد که نتایج مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$ برای هر دو رخنمای به ترتیب با خطای نسبی ۳ و ۶/۸ درصد تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. برای بررسی تاثیر تغییرپذیری‌های دبی‌های ورودی بر روی ویژگی‌های جریان سیلاب از ۷ نوع دبی مختلف استفاده شد. نتایج مشخص کرد که، خیابان راست و بالادست به ترتیب دارای بیشترین کمترین میزان عمق، سرعت و عدد پایداری در بین خیابان‌ها می‌باشند. خیابان پایین‌دست نیز بیشترین فراسنجه‌های عمق، سرعت و عدد پایداری را دارا می‌باشد. به طوری که سرعت میانگین در عمق با اختلاف ۲ تا ۳ برابر و ۳ الی ۴ ناحیه خطر برای عابران پیاده در عرض این خیابان رخ می‌دهد. بنابراین این نتیجه می‌تواند به عنوان چالشی برای معرفی ناحیه خطر برای عابران پیاده در عرض خیابان پایین‌دست باقی بماند. با این وجود این نتیجه باید توسط بررسی‌های بیشتری ارزیابی شود.

همچنین نتایج نشان داد که تغییرپذیری‌های دبی در ورودی‌های ۱ و ۲ به طور مستقیم بر روی فراسنجه‌های جریان سیلابی در خیابان‌های راست و چپ تاثیر می‌گذارد. همچنین مشخص شد در برخی از مدل‌ها به ازای دبی ثابت در ورودی ۱، افزایش دبی در ورودی ۲ باعث افزایش عمق، کاهش سرعت و کاهش عدد پایداری در ورودی خیابان سمت راست می‌شود. در نتیجه، در صورت نیاز به

- Galuppini, G., Quintilliani, C., Arosio, M., Barbero, G., Ghilardi, P., Manenti, S. & Creaco, E. (2020). A unified framework for the assessment of multiple source urban flash flood hazard: The case study of Monza, Italy. *Urban Water Journal*, 17(1), 65-77.
- Gordon, A.D. & Stone, P.B. (1973). Car stability on road floodways. National Capital Development Commission.
- Haun, S. & Olsen, N.R.B. (2012). Three-dimensional numerical modelling of reservoir flushing in a prototype scale. *International Journal of River Basin Management*, 10(4), 341-349.
- Hill, C. (1974). Potential flood damages, Willamette River system. US Army Engineer District, Portland.
- Isenmann, G., Dufresne, M., Vazquez, J. & Mose, R. (2017). Bed turbulent kinetic energy boundary conditions for trapping efficiency and spatial distribution of sediments in basins. *Water Science and Technology*, 76(8), 2032-2043.
- Ishigaki, T. (2003). Hydraulic model tests of inundation in urban area with underground space. In: Proc. of 30th IAHR Congress, Greece, 2003, 487-493.
- Kantoush, S.A., De Cesare, G., Boillat, J.L. & Schleiss, A.J. (2008). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(3-4), 139-144.
- Karvonen, R.A., Hepojoki, A., Huhta, H.K. & Louhio, A. (2000). The use of physical models in dam-break analysis. RESCDAM Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland.
- Kelman, I. & Spence, R. (2004). An overview of flood actions on buildings. *Engineering Geology*, 73(3-4), 297-309.
- Lauder, B.E. & Spalding, D.B. (1972). Lectures in mathematical models of turbulence. Academia Press, London, England.
- Lewis, J. (1999). Development in disaster-prone places: Studies of vulnerability. ITDG Publishing.
- Li, X., Erpicum, S., Mignot, E., Archambeau, P., Piroton, M. & Dewals, B. (2021). Influence of urban forms on long-duration urban flooding: Laboratory experiments and computational analysis. *Journal of Hydrology*, 603, 127034, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127034>.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., & De Lorenzo, G. (2019). Extracting quantitative data from non-conventional information for the hydraulic reconstruction of past urban flood events. Celik, I. & Rodi, W. (1985). Simulation of hydrodynamic and transport characteristics of rectangular settling basins. In: Transport of Suspended Solids in Open Channels, 129-132, Routledge.
- Chanson, H. & Brown, R. (2015). New criterion for the stability of a human body in floodwaters, *J. Hydraul. Res.*, 53(4), 540-541.
- Chen, W., Wang, X., Deng, S., Liu, C., Xie, H. & Zhu, Y. (2019). Integrated urban flood vulnerability assessment using local spatial dependence-based probabilistic approach. *Journal of Hydrology*, 575, 454-469.
- Clausen, L. & Clark, P.B. (1990). The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modelling of historical dam failures. In: International conference on river flood hydraulics, 369-380, John Wiley & Sons Ltd. Hydraulics Research Limited, Wallingford, England.
- Costabile, P., Costanzo, C., De Lorenzo, G. & Macchione, F. (2020). Is local flood hazard assessment in urban areas significantly influenced by the physical complexity of the hydrodynamic inundation model?. *Journal of Hydrology*, 580, 124231.
- Cox, R.J., Shand, T.D. & Blacka, M.J. (2010). Australian Rainfall and Runoff Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for People. Stage 1 Report. Prepared by the Water Research Laboratory. P10/S1/006. April 2010.
- Dewals, B.J., Kantoush, S.A., Erpicum, S., Piroton, M. & Schleiss, A. J. (2008). Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. *Environmental fluid mechanics*, 8, 31-54.
- De Moel, H.D., Van Alphen, J. & Aerts, J.C. (2009). Flood maps in Europe—methods, availability and use. *Natural hazards and earth system sciences*, 9(2), 289-301.
- Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F. & Dahe, Q. (Eds.) (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Finaud-Guyot, P., Garambois, P.A., Araud, Q., Lawniczak, F., François, P., Vazquez, J. & Mosé, R. (2018). Experimental insight for flood flow repartition in urban areas. *Urban Water Journal*, 15(3), 242-250.
- Flow Science Inc. (2016) FLOW-3D V 11.2 User's Manual, Santa Fe, NM, USA.

Research, 52(1), 93-104.

Yakhot, V. & Smith, L.M. (1992). The renormalization group, the expansion and derivation of turbulence models. *SIAM J Sci Comput*, 7(1), 35-61.

A case study. *Journal of Hydrology*, 576, 443-465.

Mejía-Morales, M.A., Mignot, E., Paquier, A. & Proust, S. (2023). Laboratory investigation into the effect of the storage capacity of a city block on unsteady urban flood flows. *Water Resources Research*, e2022WR032984, <https://doi.org/10.1029/2022WR032984>.

Mejía-Morales, M.A., Mignot, E., Paquier, A., Sigaud, D. & Proust, S. (2021). Impact of the porosity of an urban block on the flood risk assessment: A laboratory experiment. *Journal of Hydrology*, 602, 126715, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126715>.

Mignot, E., Paquier, A. & Ishigaki, T. (2006). Comparison of numerical and experimental simulations of a flood in a dense urban area. *Water Science and Technology*, 54(6-7), 65-73.

Milanesi, L., Pilotti, M., Belleri, A., Marini, A. & Fuchs, S. (2018). Vulnerability to flash floods: a simplified structural model for masonry buildings. *Water Resources Research*, 54(10), 7177-7197.

UNDESA, U. (2019). Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects.

Rubinato, M., Lee, S., Martins, R. & Shucksmith, J. D. (2018). Surface to sewer flow exchange through circular inlets during urban flood conditions. *Journal of Hydroinformatics*, 20(3), 564-576.

Safarzadeh, A. & Brevis, W. (2016). Assessment of 3D-RANS models for the simulation of topographically forced shallow flows. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64(1), 83-90.

Shu, C., Xia, J., Falconer, R.A. & Lin, B. (2011). Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 709-717.

Stovin, V.R. & Saul, A.J. (2000). Computational fluid dynamics and the design of sewage storage chambers. *Water and Environment Journal*, 14(2), 103-110.

USACE (1984). Shore Protection Manual, Vol. 2, 4th ed. USACE (United States Army Corps of Engineers) Coastal Engineering Research Centre, Washington, D.C., U.S.A.

Wilcox, D.C. (1994). Simulation of transition with a two-equation turbulence model. *AIAA journal*, 32(2), 247-255.

Xia, J., Falconer, R.A., Wang, Y. & Xiao, X. (2014). New criterion for the stability of a human body in floodwaters. *Journal of Hydraulic*