

The Effect of April 2019 Flash Flood on the Morphology of the Meandering Confluence of the Dinver River to Gamasiab Using SRH-2D Numeric Model

Iraj Jabbari^{1✉}, Rasool Ghobadian², Anis Jadid³

1. Associate Professor of Geomorphology, University of Razi, Kermanshah, Iran

✉ E-mail: iraj.jabbari@razi.ac.ir

2. Associate Professor of Water Engineering, University of Razi, Kermanshah, Iran

E-mail: rsgbobadian@gmail.com

3. M. Sc Student of Geomorphology, University of Razi, Kermanshah, Iran

E-mail: anis.jadidi111@gmail.com



How to Cite: Jabbari, I; Ghobadian, R; & Jadid, A. (2023). The Effect of April 2019 Flash Flood on the Morphology of the Meandering Confluence of the Dinver River to Gamasiab Using SRH-2D Numeric Model. *Geography and Development*, 21 (70), 1-26.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2023.7401>

Received:

11 February 2022

Received in revised form:

8 April 2022

Accepted:

5 October 2022

Published online:

20 January 2023

ABSTRACT

Understanding the morphodynamics of river junctions is an important part of fluvial geomorphological studies that were provided suitable conditions to measure erosion and sediment changes at the junction of Dinver and Gamasiab rivers by the occurrence of floods in April 2019. Due to the complexity, 3D numerical simulation is not cost-effective, and one-dimensional models, also, have some errors. For this reason, the use of two-dimensional models can be useful. Therefore, the SRH-2D model was used to investigate the effect of the flood on the morphology of the confluence of the Dinver River to Gamasiab. To study the morphological changes in the study area, elevation position and topography was mapped in two stages before and after the flood and also a granulometric experiment was performed. Due to the fact that the SRH_2D model does not have the ability to network, the required mesh was prepared using SMS software and the output file of the model was saved in TECPLOT format. The results showed that in a flood with a 35-year return period of the Dinver River to Gamasiab junction, with a meander- meander junction at a 40-degree angle, bed erosion in the downstream part of the junction begins to occur early in the onset of flooding and gradually expands to the upstream. However, sedimentation occurs shortly after the peak of the flood in the stagnation zone and then growing the spurs as the flood decreases, and developing the outer arch of the Gamasiab River as at the flood goes to end.

Keywords:

Fluvial geomorphology,
River confluence,
Bed morphology,
Flood,
SRH-2D model.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

1. Introduction

The dynamics of rivers depend on two variables, flow and sediment regimes, which are known as driving forces, and river channels create their shape with the adjustments they make to them. In the river junction, complex patterns of flow and sediment transport are formed, which show the distinct morphology of the bed with three elements: a steep

part, called the avalanche face at the mouth of the junction, a central deep scour hole and a bar in the separation zone in the lower connection corner. The most important factors that control the function of these processes are the junction angle and the flow ratio between the main and tributary channels. Despite these studies, they have not yet revealed what changes in the general shape of the landforms of the junctions occur with the changes in the above

parameters in the nature. In this research, an attempt has been made to select a river with a meander junction to meander to investigate the changes that occur in its channel and landforms using the SRH-2D method and at the same time, it should be determined how successful the mentioned model can be in predicting these changes. Therefore, the flood of 2019 allowed to model the geomorphic changes of the river channel at the junction of the two rivers Gamasiab and Dinver, which have the same meandering pattern, and to measure accuracy of the model by subsiding the flood.

2. Methods and Material

The research area is the junction of two rivers, Gamasiab and Dinver, near Biston in Kermanshah province. Both of these rivers have a meandering state at the junction, in such a way that, Dinver river at the end of its meandering arc enters to Gamasiab meandering arc with an angle of 40 degrees. The average daily discharges are 6.85 m³/s in Gamasiab river and 6.01 m³/s in Dinver river which reached 696.9 m³/s and 198.701 m³/s respectively in the flood of April 2018.

To carry out this research, first, a selected reach from the junction of the Dinver to Gamasiab rivers was mapped using the digital Total Station. Also, for the grading and morphometry of bed sediments, samples were collected from the bed and banks of the rivers including their position recording by GPS device, then the granulometry was performed on the collected samples.

After confirming SRH-2D model capacity for flow and sediment simulation, various models including mesh size, boundary conditions, appropriate roughness coefficient, sediment transport equation were defined as follows: size of the meshes in SMS software 3471 cells and 3023 nodes; flood entering the area of the confluence of Gamasiab and Dinver rivers for 208 hours from 2019/03/30 to 2019/04/07 as the upstream boundary conditions; the relationship between the discharge flow and the sediment discharge as the sediment flux; the rating curve constructed based on Manning's equation as the downstream boundary condition; Strickler's equation (1923) was used to determine Manning's coefficient and Parker's model was used to calculate the sediment capacity.

3. Results and Discussion

The results of the SRH-2D model output showed that there are many changes in the cross-section at the junction of Dinver and Gamasiab due to the non-identity of the bed and bank materials. In the corner of the tributary, the minimum flow depth can be seen in the separation zone. As the flow enters into the main channel from the secondary channel and the flow interferes, the velocity vectors in the main channel are diverted to the left side of the main channel, and when the flow passes through the area of the maximum erosion rate, intersection occurs in the bed and the depth of the flow increases. The decrease in the depth of the flow in the distance of 50 to 70 meters from the river bank is caused by the advance of the tributary mouth bar (in the stagnation area) on the river bottom towards the downstream side, which causes the bed level to rise and as a result, the depth of the flow decreases.

In general, the zoning of the flow velocity shows that the flow velocity values are always higher in the inlet branch of Gamasiab compared to Dinver, and the maximum velocity value is after joining the flow of both rivers at the downstream of the junction of the rivers and in terms of time in 90 hours occurs after the start of the flood. Along the middle profile of Gamasiab, the velocity increase starts from a distance of about 300 meters from the beginning of the junction, and after 60 meters, it reaches its maximum value, and then there is a slight decrease until the end.

In the middle axis of Dinehor river, the bed was eroded up to a distance of 200 meters from the intersection until 90 hours after the beginning of the flood, but from this distance and after 60 hours, the bed reached a state of equilibrium and only minor changes are observed in it. From 90 hours onwards, that is, after the peak of the flood has passed, sedimentation can be seen in the first 170 meters of the reach. This shows that the maximum movement of bed sediment load does not occur at the same time as the maximum flood discharge and is associated with a time delay after that. Similar conditions can be seen in the axis of Gamasiab channel; with the difference that after the peak of the flood, relatively more sedimentation occurs at the entrance and middle of the channel at a distance of 0 to 170 meters; In such a way that after 208 hours, a sudden advance of the sediment spur has occurred in the bed.

4. Conclusion

The results of this research showed that firstly, the SRH_2D model offers a good insight in relation to the channel bed changes during floods. Secondly, in a flood with a return period of 35 years, the junction of the Dinver to Gamasiab river, which enters a meander at an angle of 40 degrees into another meander, because of the increase in the flow rate in the main channel and also the formation of the flow separation area downstream of the junction, the flow velocity has increased rapidly due to two main reasons (increase in discharge and decrease in

cross-sectional area) and the morphology of the junction area, especially the river bed, has undergone drastic changes. The most changes occur after 80 hours from the beginning of the flood and mainly occur downstream of the confluence. Such changes that occurred in a time of 208 hours do not seem to occur in a long time with normal flow. Therefore, severe floods should be expected for the development of stagnant areas and separation of the flow, as well as the deepening of scour holes.

Keywords: Fluvial geomorphology, River confluence, Bed morphology, Flood, SRH-2D model.

5. References

- Abrishemi, J. and Hosieni, S.M (1998). Open channel hydraulics, Mashhad, Astan Ghodse Razavi. [in Persian] <https://telketab.com/book>.
- Ashmore, P.E., Ferguson, R.I., Prestegard, K.L., Ashworth, P.J., Paola, C., 1992. Secondary flow in anabranch confluences of a braided, gravel-bed stream. *Earth Surf. Process. Landf.* 17 (3), 299-311. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3290170308>
- Best J.L (1988). "Sediment transport and bed morphology at river channel confluences". *Sedimentology*, 35, 3, 481-498. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3091.1988.tb00999.x>
- Best, J. L. (1987). Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M., Harvey, M. D. (Eds.), *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*, Special Publication 39. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, OK, 27-35. https://archives.datapages.com/data/sepm_sp/SP39/Flow_Dynamics_at_River.htm
- Best, J.L., Reid, I (1984). Separation zone at open-channel junctions. *J. Hydraul. Eng.* 110(11), 1588-1594. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1588\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1588))
- Best, J.L., Roy, A.G (1991). Mixing layer distortion at the confluence of channels of different depth. *Nature* 350 (6317), 411-413. <https://www.nature.com/articles/350411a0>
- Biron, P., Best, J. L., Roy, A. G (1996). Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences. *Journal of Hydraulic Engineering* 122(12), 676-682. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:12\(676\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:12(676))
- Biron, P., Ramamurthy, A.S., Han, S (2004). Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 130 (3), 243-253. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:3\(243\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(243))
- Biron, P., Roy, A.G., Best, J.L., Boyer, C.J (1993). Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels. *Geomorphology* 8, 115-129. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0169555X9390032W>
- Biron, P.M., Lane, S.N (2008). Modelling hydraulics and sediment transport at river confluence. In: Rice, S.P., Roy, A., Rhoads, B.L. (Eds.), *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO198SQ, England, 17-37. [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=MEun3R1-QwMC&oi=fnd&pg=PA17&dq=Biron,+P.M.,+Lane,+S.N.,+2008.+Modelling+hydraulics+and+sediment+transport+at+river+confluence.+In:+Rice,+S.P.,+Roy,+A.,+Rhoads,+B.L.+\(Eds.\),+River+Confluences,+Tributaries+and+the+Fluvial+Network.+John+Wiley+and+Sons+Ltd,+The+Atrium,+Southern+Gate,+Chichester,+West+Sussex+PO198SQ,+England,+17-37.](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=MEun3R1-QwMC&oi=fnd&pg=PA17&dq=Biron,+P.M.,+Lane,+S.N.,+2008.+Modelling+hydraulics+and+sediment+transport+at+river+confluence.+In:+Rice,+S.P.,+Roy,+A.,+Rhoads,+B.L.+(Eds.),+River+Confluences,+Tributaries+and+the+Fluvial+Network.+John+Wiley+and+Sons+Ltd,+The+Atrium,+Southern+Gate,+Chichester,+West+Sussex+PO198SQ,+England,+17-37.)

- Borghai, S. M., and A. Jabbari Sahebari (2010). "Local scour at open-channel junctions", *Journal of Hydraulic Research*, 48, 538-542.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221686.2010.492107>
- Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., Biron, P., Roy, A.G (2001). Role of bed discordance at asymmetrical river confluences. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 127 (5), 351-368.
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:5\(351\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(351))
- Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., Biron, P.M., Roy, A.G (2000). Large eddy simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. *J. Hydraul. Res.* 38(3), 207-215.
https://www.researchgate.net/publication/239395418_Large_Eddy_Simulation_of_periodic_flow_characteristics_at_river_channel_confluences
- Chrlton, R (2017). *Fundamental of fluvial Geomorphology*, Translated by, Seghefi, M. and Rezaie Moghedem, M. H., Tehran, Semt. [in Persian]
<https://samta.samt.ac.ir/product/14908>
- Chen K. L., Feng M. Q. Zhang T (2018). Experimental study on Flow field in Intersection of open channel based on PIV Technology. *Journal of Hydroelectric Engineering* 37(11), 43-55.(in Chinese)
https://www.researchgate.net/publication/327589072_Experimental_Study_of_Flow_and_Turbulence_characteristics_around_Simple_and_Complex_Piers_using_PIV
- Chow, V.T (1959). *Open channel hydraulics*. Mc Graw-Hill Press, Michigan, 680p.
https://www.academia.edu/9092662/Open_Channel_Hydraulics
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., Sukhodolov, A (2016). Influence of planform geometry and momentum ratio on thermal mixing at a stream confluence with a concordant bed. *Environ. Fluid Mech.* 16 (4), 845-873.
https://www.researchgate.net/publication/301940957_Influence_of_planform_geometry_and_momentum_ratio_on_thermal_mixing_at_a_stream_confluence_with_a_concordant_bed
- Ghobadian, R. and Qanbari, S (2014). Investigation of the effect of sub-channel curvature on the flow pattern in the 90 degree intersection of open channels using two-dimensional numerical model SRH-2D, 14th Iranian Hydraulics Conference, Zahedan, [in Persian]
<https://civilica.com/doc/437867>
- Ghobadian, R and Shafai-Bajestan, M and Mousavi Jahromi, S.H (2006). Experimental Investigation of Flow Separation Zone in River Confluence in Subcritical Flow Conditions, *Iran-Water Resources Research*, 2 (2), 67-77. [in Persian]
http://www.iwrr.ir/article_15425.html
- Herrero, H. S.; Lozada, D.; Jose, M.; Garcia, C. M.; Szupiny, R. N.; Best, J.; Pagot, M (2018). The influence of tributary flow density differences on the hydrodynamic behavior of a confluent meander bend and implications for flow mixing. *Geomorphology*, V. 304, 99-112.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X17305330>
- Jabbari, I (2019). *Geomorphology: Structure, Processes and Landforms*, Tehran, Semt.
<https://samta.samt.ac.ir/product/15091>. [In Persian]
- Moges, EM (2010). "Evaluation of sediment transport equations and parameter sensitivity analysis using the SRH-2D Model", PhD Thesis, Universität Stuttgart.
<https://docplayer.net/54898739-Evaluation-of-sediment-transport-equations-and-parameter-sensitivity-analysis-using-the-srh-2d-model.html>
- Moradi, M. and Gobadian, R (2013). Two-dimensional simulation of the flow pattern in a uniform 180 degree arc using the SRH-2D model, the 4th National Conference on Comprehensive Water Resources Management, Shahid Bahonar University, Kerman. [in Persian].
<https://www.researchgate.net/profile/Mehrdad-Moradi-5>
- Mosley, M.P (1976). An experimental study of channel confluences. *J. Geol.*, 84,535-562.
<https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/628230>

- Penna, N.; De Marchis, M.; Canelas, O. B.; Napoli, E.; Cardoso, A. H.; Gaudio, R (2018). Effect of the Junction Angle on Turbulent Flow at a Hydraulic Confluence. *Water*, V. 10, N. 4.
<https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/469>
- Yeh, K. Ch.; Li, Sh. J. and Chen, W. L (1995). " Modeling non-uniform-sediment fluvial process by characteristics method". *J. Hydraul. Engine. ASCE*. 2: 159-170.
<https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/2093/1/A1995QD42200006.pdf>
- Rhoads, B. L., Johnson, K. K (2018). Three-dimensional flow structure, morphodynamics, suspended sediment, and thermal mixing at an asymmetrical river confluence of a straight tributary and curving main channel. *Geomorphology* 323, 51-69.
<https://experts.illinois.edu/en/publications/three-dimensional-flow-structure-morphodynamics-suspended-sedimen>
- Sakhaee, F (2020). Steady and unsteady flow simulation with SRH-2D, *Journal of Ocean Engineering and Science*,5,4, 297-309.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468013320300085>
- Strickler M (1923). Contributions to the question of speed formula and the roughness pay for current channels and closed lines, *Messages of the world Office for water management, Bern, Switzerland*. N. 16 (in German).
<https://authors.library.caltech.edu/29103/>
- Taylor, E. H (1944). "Flow characteristics at rectangular open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*", ASCE, 109:893-912.
<http://www.sciepub.com/reference/39936>
- Tong-Huan, L., Yi-Kui, W., Xie-Kang, W., Huan-Feng, D., Xu-Feng, Y (2020). Morphological environment survey and hydrodynamic modeling of a large bifurcation-confluence complex in Yangtze River, China, *Science of The Total Environment*, Volume 737, 1-16.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720332253>
- Weber, L.J., Schumate, E.D. and Mawer, N (2001). Experimentals on flow at a 900 open channel Junction. *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 127, 340-350.
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:5\(340\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(340))
- Yong G.Lai and Blair P.Greimann (2007). Numerical modeling of alternate bar formation downstream of a dike . ASCE world environmental and water resources congress, tampa, florida, may 15-19.
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40927\(243\)390](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40927(243)390)
- Zhang, Y. F., Wang, P., Wu, B. S., Hou, S. Z (2015). An experimental study of fluvial processes at asymmetrical river confluences with hyperconcentrated tributary flows. *Geomorphology*, 230, 26-36.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X14005364>



تأثیر سیل فروردین ۱۳۹۸ بر ریخت‌شناسی پیوندگاه مائندری دو رودخانه دینور به گاماسیاب با استفاده از مدل عددی SRH-2D

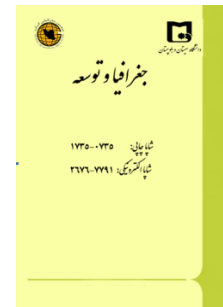
دکتر ایرج جباری^{۱*}، دکتر رسول قبادیان^۲، انیس جدیدی^۳

مقاله پژوهشی

چکیده

درک مورفودینامیک پیوندگاه رودخانه‌ها بخش مهمی از بررسی‌های ژئومورفولوژی رودخانه‌ای است که با وقوع سیل فروردین ۱۳۹۸ شرایط مناسبی فراهم شد تا تغییرات فرسایش و رسوب ناشی از آن در پیوندگاه دو رودخانه دینور به گاماسیاب سنجیده شود. با توجه به پیچیده بودن الگوی جریان و رسوب در این محل و همچنین با افزایش ناگهانی این دو پارامتر، شبیه‌سازی عددی سه بعدی مقرون به صرفه نیست و مدل‌های تک‌بعدی نیز به دلیل بی‌توجهی به ماهیت سه‌بعدی جریان عموماً با خطا همراه هستند؛ به همین دلیل استفاده از مدل‌های دو بعدی در صورت قابل قبول بودن خطای آن می‌تواند مفید باشد؛ بنابراین در تحقیق حاضر از مدل SRH-2D برای بررسی تأثیر سیل فروردین ۱۳۹۸ بر ریخت‌شناسی محل تلاقی رودخانه دینور به گاماسیاب استفاده شد. برای بررسی تغییرات مورفولوژی منطقه مورد مطالعه، منطقه در دو مرحله قبل و بعد از سیل، از نظر توپوگرافی نقشه برداری شد. همچنین برای بررسی عوامل مؤثر بر ریخت‌سنجی رسوبات بستر رودخانه‌ها و مشخص کردن قطر ذرات رسوب و ضریب زبری بستر آزمایش گرانومتری انجام گرفت. با توجه به اینکه مدل SRH_2D قابلیت شبکه‌بندی را ندارد، مش مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار SMS تهیه شد و قابل خروجی مدل با فرمت TECPLOT ذخیره شد. نتایج این تحقیق نشان داد در یک سیلاب با دوره بازگشت ۳۵ ساله پیوندگاه رودخانه دینور به گاماسیاب که با زاویه ۴۰ درجه به صورت مائندری به داخل مائندری اصلی وارد می‌شود، فرسایش بستر در اوایل وقوع سیل در بخش پایین دست پیوندگاه به سبب به وجود آمدن ناحیه جریان‌ات آشفته آغاز شده و به تدریج به بخش‌های بالا گسترش می‌یابد؛ در حالی که رسوب‌گذاری کمی بعد از اوج سیلاب در محل رکود اتفاق می‌افتد و با کاهش سیل باعث گسترش دماغه و در اواخر سیلاب توسعه جانبی قوس خارجی رودخانه گاماسیاب می‌شود.

جغرافیا و توسعه، شماره ۷۰، بهار ۱۴۰۲
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۳
صفحات: ۱-۲۶



واژه‌های کلیدی:

ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، پیوندگاه رودخانه، تلاقی رود، مورفولوژی بستر، سیل، مدل SRH-2D.

می‌کنند (Biron and Lane, 2008: 17; Rhoads and

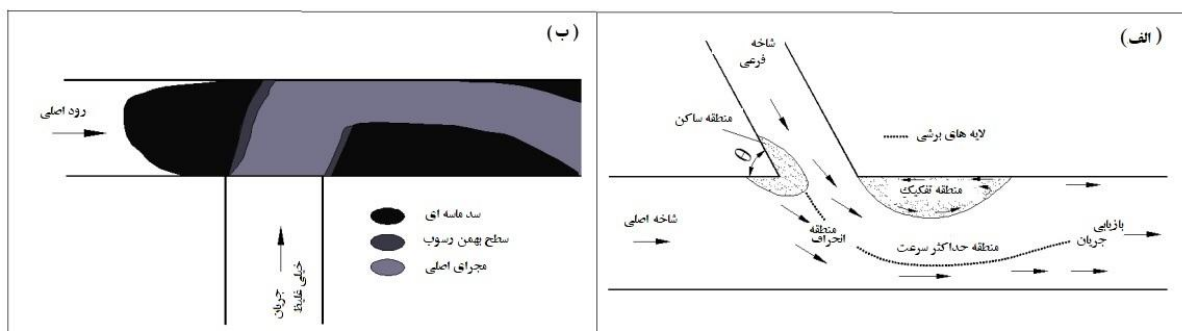
Johnson, 2018: 51) بررسی این موضوع به شیوه‌های مختلف آزمایشگاهی (Best and Roy, 1992: 411; Biron et al, 1996: 676; Chen et al, 2018: 43; Mosley, 1976: 84; Best and Reid, 1984: 1588; Ashmore et al, 1992: 299; Bron et al, 1993: 115; Zhang et al, 2015: 230; Rhoads & Johnson, 2018: 51) شبیه‌سازی عددی (Bradbrook et al, 2000: 207; Bradbrook et al, 2001: 351; Biron et al, 2004: 243; Constantinescu, 2016: 845) فرایندهای

مقدمه

دینامیک رودخانه‌ها به دو متغیر جریان و رسوب که به متغیرهای محرکه معروف‌اند، وابسته هستند و مجاری رودخانه‌ای با تنظیماتی که نسبت به آن‌ها انجام می‌دهند شکل خود را به وجود می‌آورند (جباری، ۱۳۹۶: ۲۰۴؛ چارلتون، ۱۳۹۶: ۲۴۳). پیوندگاه رودخانه‌ها از این نظر دارای شرایط پیچیده‌ای هستند. در این محل با همگرایی ناگهانی آب و رسوبی که رخ می‌دهد، تغییراتی در ساختار جریان به وجود می‌آید که رودها اغلب در واکنش به آن‌ها ریخت‌شناسی بستر خود را دگرگون

مطالعات تجربی اخیر در پیوندگاه‌های نامتقارن با جریان خیلی غلیظ (بیش از ۲۰۰ کیلوگرم در مترمکعب) در یکی از شاخه‌ها نشان داد که غلظت رسوب بالاتر بر ریخت‌شناسی بستر تأثیر زیادی دارد (Zhang et al, 2015: 26-36). مدل مفهومی وی نشان می‌دهد که یک تپهٔ رسوبی در منطقهٔ آب برگشتی، یک تپهٔ رسوبی در منطقهٔ جداسازی، یک خط‌القعر برای انتقال جریان و حمل رسوب و تپه‌های رسوبی در قسمت پایین‌دست ناحیهٔ جداسازی جریان به‌وجود می‌آیند (شکل ۱-ب). عوامل اصلی که ریخت‌شناسی بستر، انتقال رسوبات و الگوی جریان منطقهٔ هیدرودینامیک را در محل پیوندگاه کنترل می‌کنند، در حالت‌های ساده شامل تقارن شکل پلان (اتصال Y شکل یا I شکل)، زاویهٔ اتصال، نسبت شار گشتاور (نسبت چگالی در دبی در میانگین سرعت دو مجرا) و تناسب ارتفاعی است (Rhoads & Johnson, 2018: 51).

پیچیدهٔ آب‌شناختی، ریخت‌شناختی و رسوب‌شناختی را در نقطهٔ پیوندگاه آشکار ساخته است. مطالعهٔ تجربی در پیوندگاه‌های با پیکربندی هندسی ساده نشان داد که ساختار جریان در محل پیوندگاه دارای ویژگی‌های بسیار پیچیده سه بعدی است که یکی از مدل‌های مفهومی آن را بست (۱۹۸۷) ارائه داده است. وی جریان را در منطقهٔ هیدرودینامیک محل پیوندگاه به شش ناحیه تقسیم می‌کند: (۱) منطقهٔ رکود که سرعت جریان در نزدیکی گوشهٔ بالادست پیوند کاهش می‌یابد، (۲) منطقهٔ انحراف جریان که وارد محل پیوندگاه می‌شود، (۳) محل تماس لایهٔ اختلاط/ لایهٔ برش بین دو جریان پیوندی، (۴) منطقهٔ جداسازی جریان در گوشهٔ پایین‌دست پیوندگاه، (۵) منطقهٔ حداکثر شتاب سرعت/ جریان در پایین‌دست مجرا و (۶) بازایی جریان در انتهای پایین‌دست منطقهٔ هیدرودینامیک مجرا (شکل ۱-الف). علاوه بر جریان نسبت بار رسوب نیز در این راستا نقش ایفا می‌کند.



شکل ۱: مدل مفهومی در یک پیوندگاه نامتقارن: (الف) ساختار جریان با پیکربندی هندسی ساده (مأخذ: بست، ۱۹۸۷) (ب) مورفولوژی بستر در پیوندگاه با جریان خیلی غلیظ (مأخذ: زانگ و همکاران، ۲۰۱۵)

نسبت دبی بین دو مجرای اصلی و فرعی است؛ به‌نحوی که موزلی (۱۹۷۶) به روش آزمایشگاهی نشان داد که در زاویه اتصال از ۱۵ تا ۷۵ درجه آب‌شستگی به‌شدت و از آن به بعد به‌آهستگی افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه پیوند و نسبت دبی، سهم رسوب از مجاری پیوندی به‌تدریج در مسیرهای خود در امتداد محل اتصال جدا می‌شوند و رسوبات به‌جای مرکز

بنابراین در پیوندگاه رودخانه‌های الگوهای پیچیده‌ای از انتقال جریان و رسوب شکل می‌گیرد که ریخت‌شناسی متمایز بستر را با سه عنصر بخش پرشیب به نام سطح بهمن در دهانهٔ پیوندگاه، یک چالهٔ فرسایشی عمیق مرکزی و یک سد در ناحیهٔ جداسازی در گوشهٔ اتصال پایین‌دست به‌وجود می‌آورد. مهم‌ترین عواملی که عملکرد این فرایندها را کنترل می‌کنند، زاویهٔ اتصال و

کرد که با استفاده از سرعت و عمق جریان در رابطه با هیدرودینامیک جریان می‌توان تغییرات بستر را شبیه‌سازی کرد. با وجود این، مدل‌های تک‌بعدی هرچند از نظر زمان اجرای برنامه مقرون‌به‌صرفه‌اند؛ ولی به دلیل طبیعت سه‌بعدی جریان با خطای قابل ملاحظه‌ای برخوردار هستند؛ از این رو مدل‌های دو بعدی و سه بعدی نیز توسعه یافته‌اند که می‌توانند جهت‌های مختلف جریان و شدت عمل آن‌ها را در رابطه با شرایط مرزی پیش‌بینی کنند.

بررسی دو بعدی جریان و رسوب در سامانه‌های رودخانه‌ای در مقایسه با مدل‌های تک‌بعدی جزئیات بیشتری را در اختیار محققان قرار می‌دهد و با توجه به نزدیکی بیشتر به ماهیت سه بعدی جریان با خطای کمتری مواجه هستند. در این باره یانگ و همکاران (۲۰۰۷) با مطالعه آزمایشگاهی روی یک مجرای مستطیلی با استفاده از مدل SRH-2D، به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور از دقت خوبی برخوردار است. همچنین تولوسا (۲۰۰۸) مدل‌های هیدرودینامیکی Hydro As 2D و مدل SRH-2D را در بازه‌های رودخانه‌ای دارای اهمیت اکولوژیکی با هم مقایسه کرد و نشان داد، برای شبیه‌سازی و محاسبات هیدرولیکی هر دو مدل با هم قابل رقابت هستند؛ به همین دلیل موگز و همکاران (۲۰۱۰) برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب در رودخانه‌های مئاندری از مدل دو بعدی SRH-2D استفاده کردند و مرادی و قبادیان (۱۳۹۳) با شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت نشان دادند که یکی دیگر از نقاط قوت مدل SRH_2D شبیه‌سازی میدان جریان در قوس یکنواخت است. نتایج بهتر این مدل باعث شد تا قبادیان و قنبری (۱۳۹۴) با استفاده از آن به بررسی تأثیر انحنای مجرای فرعی بر الگوی جریان در تلاقی ۹۰ درجه مجاری روباز بپردازند. در اینجا نیز نتایج نشان داد که مدل عددی تطابق بسیار خوبی با

پیوندگاه به اطراف منتقل می‌شوند. این تفکیک بارهای رسوبی با عقب‌نشینی سطح بهمن مجرای اصلی از پیوندگاه، افزایش در عمق آب‌شستگی، تغییر جهت چاله فرسایشی و افزایش اندازه سد رسوبی منطقه جداشدگی همراه می‌شود (Best, 1988:27). با وجود این، پژوهش‌ها با استفاده از دو عامل نسبت دبی و زاویه پیوند روابط جدیدی را آشکار کرده‌اند. رابطه‌ای که در شرایط آب زلال بین عمق و موقعیت چاله فرسایشی با سه متغیر زاویه اتصال، نسبت پهنا و دبی شاخه فرعی به شاخه اصلی و نسبت میانگین سرعت پایین دست رود به سرعت آستانه، برقرار شده است (Borghai & Jabbari Sahebari, 2010: 538) یا رابطه‌ای که بین طول و پهناى ناحیه جداشدگی جریان و نسبت دبی شاخه فرعی به شاخه اصلی، عدد فرود جریان در مجرای پایین دست در یک پیوند ۹۰ درجه برقرار شده است (Ghobadian et al, 2006: 66) نمونه‌ای از این روابط می‌باشد.

تغییرات در مجاری رودخانه‌ای به صورت آرام اتفاق می‌افتند و شناخت این متغیرها همراه با توسعه مدل‌های رایانه‌ای امکان پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات ریخت‌شناختی مجاری را فراهم آورده است که شاید در این باره تیلور (۱۹۴۴) را جزء پیشگامان این نوع مدل‌سازی به حساب آورد. وی در خصوص پیوندگاه آبراهه‌ها با صرف نظر کردن از اثرات اصطکاکی مرزها و با فرض یکسان بودن عمق جریان در مجاری بالادست پیوندگاه و براساس معادله‌های بقای جرم و مومنوم، مدل یک‌بعدی را برای محاسبه نسبت بین عمق‌های جریان بالادست و پایین دست محل پیوندگاه رودخانه‌ها در زوایای ۴۵ تا ۱۳۵ درجه معرفی کرد. چند سال بعد از تیلور، راهول (۱۹۹۵) با استفاده از یک مدل عددی که بر پایه مفاهیم ریاضی بنا شده بود، هیدرودینامیک جریان و رسوب‌گذاری را در رودخانه‌ها و مجاری آبرفتی شبیه‌سازی کرد و مشخص

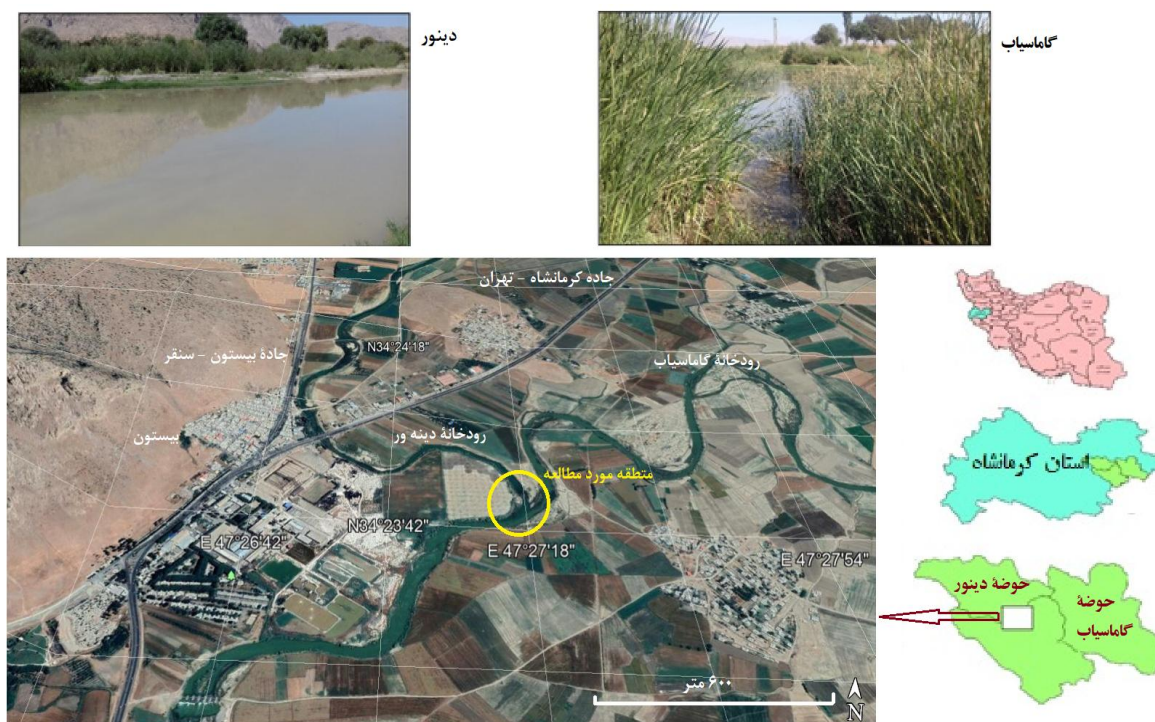
دینور به علت عبور از دشت سیلابی و رودخانه گاماسیاب به علت جریان در امتداد گسل دارای تقعر زیادی در نیمرخ طولی خود هستند. هر دوی این رودخانه‌ها در محل پیوند حالت مئاندری دارند، به نحوی که رودخانه دینور در انتهای قوس مئاندری خود بایک زاویه ۴۰ درجه به داخل قوس مئاندری گاماسیاب وارد می‌شود (شکل ۲). میانگین دبی روزانه جریان ورودی رودخانه دینور ۶/۰۱ مترمکعب در ثانیه و ورودی رودخانه گاماسیاب ۶/۸۵ مترمکعب در ثانیه همچنین دبی اوج سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در رودخانه دینور ۱۹۸/۷ مترمکعب در ثانیه و رودخانه گاماسیاب ۶۹۶/۹ مترمکعب در ثانیه با دوره بازگشت ۳۵ ساله برآورد شده است. از نظر فصلی بیشترین میزان بارندگی در فروردین و کمترین آن در شهریور گزارش شده است. رودخانه گاماسیاب به دلیل مصارف بیش از حد و پمپاژ غیرمجاز معمولاً در تابستان خشک است و به همین دلیل در محل پیوندگاه بستر از نیزار پوشیده شده است و کف آن را ماسه و شن خیلی ریز و متوسط از ۰/۰۷۵ میلی‌متر تا ۲۵ میلی‌متر می‌پوشاند؛ درحالی‌که دینور در نزدیک پیوندگاه بستر ماسه‌ای یا شنی دارد و تنها کرانه‌های آن از پوشش گیاهی درختی و درختچه‌ای اشغال شده است (شکل ۲).

نتایج آزمایشگاهی دارد. بیشترین خطا در خط مرکزی مجرا کمتر از ۳ درصد و در محدود ناحیه جداسازی جریان حدود ۷/۵ درصد است.

با وجود این مطالعات هنوز آشکار نکرده‌اند که با تغییرات در پارامترهای فوق چه تغییراتی در شکل کلی زمین‌ریخت‌های محدوده پیوندگاه‌ها در طبیعت به وجود می‌آید. در این تحقیق سعی شده است با انتخاب رودخانه‌ای با پیوندگاه مئاندر به مئاندر با روش SRH-2D تغییراتی که در مجرا و زمین ریخت‌های آن رخ می‌دهد، بررسی شود و ضمن آن مشخص شود که مدل یادشده تا چه اندازه می‌تواند در پیش‌بینی این تغییرات موفق عمل کنند؛ از این رو سیل ۱۳۹۸ این امکان را داد تا ضمن مدل‌سازی تغییرات ژئومورفیک مجرای رود در پیوندگاه دو رودخانه گاماسیاب و دینور که از الگوی مئاندری یکسانی برخوردار هستند، صحت آن نیز با فروکش کردن سیل سنجیده شود.

محدوده مورد مطالعه

محدوده منطقه مورد بررسی این تحقیق محل پیوند دو رودخانه گاماسیاب و دینور در نزدیک بیستون در استان کرمانشاه در نظر گرفته شده است (شکل ۲). این دو رودخانه نیمرخ طولی منظمی دارند، رودخانه



شکل ۲: موقعیت محدوده مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

سواحل رودخانه‌ها صورت گرفت و موقعیت همه نقاط توسط دستگاه GPS ثبت شد، سپس آزمایش دانه‌بندی با الک روی نمونه‌های برداشت‌شده انجام شد (شکل ۳). داده‌های مربوط به دبی از طریق معاونت طرح و توسعه شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه دریافت شد که شامل اطلاعات دبی سیلابی ایستگاه‌های حیدرآباد روی رودخانه دینور و ایستگاه دوآب بر رودخانه گاماسیاب و همچنین ایستگاه پل‌چهر در پایین دست محل تلاقی، به مدت ۲۰۸ ساعت از تاریخ ۱۰ فروردین ۱۳۹۸ تا ۱۸ فروردین ۱۳۹۸ است. در نهایت برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از مدل SRH-2D استفاده شد.

مواد و روش‌ها

اهداف این پژوهش اثر وقوع سیلاب در تغییرات مورفولوژیک محل پیوندگاه رودخانه دینور با گاماسیاب و همچنین بررسی توانایی مدل SRH-2D در شبیه‌سازی دوبعدی جریان و رسوب در محل پیوندگاه دو رودخانه است؛ بنابراین برای دستیابی به این اهداف در ابتدا به برداشت موقعیت ارتفاعی و توپوگرافی نیاز بود؛ به همین دلیل در گام نخست، به نقشه‌برداری بازه انتخابی از محل پیوندگاه رودخانه دینور به گاماسیاب با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن^۱ دیجیتال پرداخته شد. همچنین به منظور دانه‌بندی و ریخت‌سنجی رسوبات بستر، برداشت رسوب از بستر و



شکل ۳: مراحل انجام آزمایش الک

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

صحت‌سنجی برای انتخاب مدل

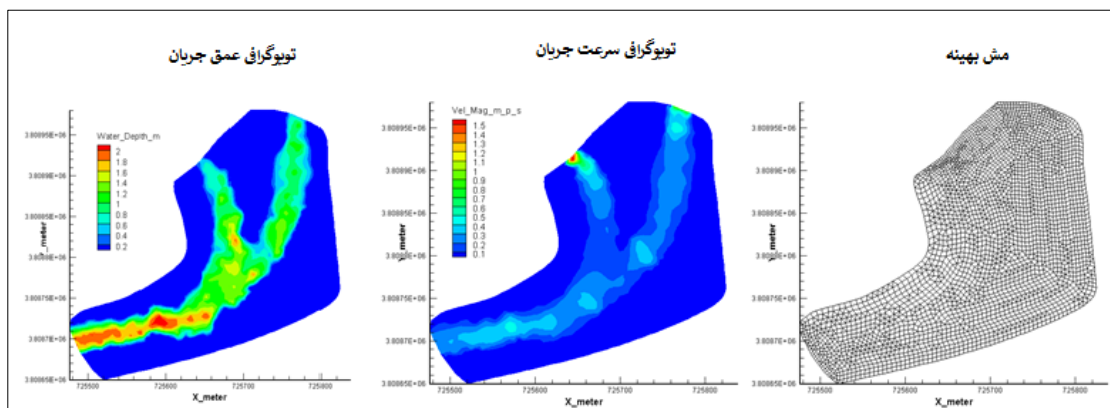
مدل SRH_2D توسط مؤسسه USBR توسعه داده شده است. از جمله کاربردهای این مدل می‌توان به شبیه‌سازی جریان و رسوب در محل پیوندگاه شاخه فرعی به اصلی، روندیابی سیلاب و نقشه پهنه‌بندی سیل، شبیه‌سازی جریان در اطراف سازه‌های درون آبراه‌های مثل سرریزها، سدهای انحرافی، درچه‌ها، فرازبندها و... اشاره کرد. همچنین این مدل دارای الگوریتم‌های خشک‌تر یکپارچه و قوی است. تمامی رژیم‌های جریان یعنی، جریان‌های فوق‌بحرانی، انتقالی و بحرانی را می‌توان به طور هم‌زمان شبیه‌سازی کرد. با توجه به اینکه خود مدل قابلیت شبکه‌بندی و تولید مش را ندارد، مش موردنیاز این نرم‌افزار با استفاده از نرم‌افزار SMS تهیه می‌شود.

مدل SMS به دلیل انعطاف‌پذیری در تولید مش امکان شبیه‌سازی در نواحی با هندسه پیچیده را امکان‌پذیر می‌کند و مش تولیدشده در محیط SRH-2D فراخوانی می‌شود. از فایل‌های خروجی مدل برای مشاهده و بررسی الگوی جریان شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. فرمت فایل خروجی مدل توسط کاربر انتخاب می‌شود و اغلب فایل‌های خروجی با فرمت TECPLOT ذخیره می‌شوند. برای بررسی توانایی مدل SRH_2D شبیه‌سازی جریان در تقاطع دو مجرا، قبادیان و قنبری (۱۳۹۴) از نتایج داده‌های آزمایشگاهی وبر و همکاران (۲۰۰۱)

استفاده کردند. با توجه به ماندگار بودن جریان، دبی ورودی ثابت در مقاطع بالادست مجرای اصلی و فرعی برابر با ۰/۱۲۷ و ۰/۰۴۳ مترمکعب بر ثانیه به‌عنوان شرایط مرزی بالادست در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به زیر بحرانی بودن جریان در خروجی رقوم سطح آب برابر با ۰/۲۹۶ به‌عنوان شرایط مرزی پایین‌دست مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نیم‌رخ طولی سطح آب شبیه‌سازی‌شده با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل از توانایی بسیار خوبی برای شبیه‌سازی سطح آب برخوردار است. بیشترین خطا در خط مرکزی مجرا کمتر از ۳ درصد و در محدوده ناحیه جدادشگی جریان حدود ۷/۵ درصد است. خطای بیشتر که در ساحل مجاور در ناحیه جدادشگی اتفاق می‌افتد، به دلیل وجود جریان گردابی در ناحیه جدادشگی و ضعف مدل آشفتگی و احتمالاً خطای اندازه‌گیری رقوم سطح آب به دلیل تلاطم شدید جریان است. تحقیقات صورت‌گرفته در باره شبیه‌سازی تغییرات زمانی جریان و رسوب با استفاده از مدل SRH-2D (برای مثال: سخایی، ۲۰۲۰، موگر و همکاران، ۲۰۱۰، مرادی و قبادیان، ۱۳۹۳، قبادیان و قنبری، ۱۳۹۴) نشانگر دقت و توانایی این مدل در شبیه‌سازی انتقال رسوب در رودخانه‌های و مجاری رو باز و همچنین شبیه‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری در اطراف سازه‌های آبی است.

بزرگ‌ترین اندازه‌ی مشی که براساس پارامترهای سرعت و عمق بعد از آن تغییرات معناداری نداریم، به عنوان مش بهینه در نظر گرفته می‌شود. به همین منظور در ابتدا شش نوع مش‌بندی با سایزهای بسیار بزرگ تا بسیار ریز توسط نرم‌افزار SMS ایجاد شد. در گام بعد مدل SRH_2D با متوسط دبی بلندمدت در حالت ماندگار ۶/۸۶ مترمکعب بر ثانیه در رودخانه‌ی گاماسیاب، ۶/۰۲ مترمکعب بر ثانیه در رودخانه‌ی دینور و عمق آب پایین‌دست ۶ متر به مدت ۱۰ ساعت اجرا شد. در نهایت از مش شماره‌ی سوم به بعد تغییرات معناداری در عمق و سرعت مشاهده نشد؛ پس به‌عنوان مش بهینه با تعداد ۳۴۷۱ سلول و ۳۰۲۳ گره در نظر گرفته و در گام‌های بعد برای تسریع در نتایج از آن استفاده شد (شکل ۴).

شبیه‌سازی جریان و رسوب منطقه‌ی مورد مطالعه پس از اطمینان از توانایی مدل SRH-2D برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در محل پیوندگاه رودخانه‌ها به مطالعه‌ی محل پیوندگاه رودخانه‌ی دینور به گاماسیاب پرداخته شد. برای این منظور پارامترهای مختلف از جمله اندازه‌ی مش، نوع شرایط مرزی، ضریب زبری مناسب، معادله‌ی انتقال رسوب و ضریب طول تطبیق مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که اندازه و تعداد مش‌های ایجادشده بر دقت کار و افزایش زمان اجرای نرم‌افزار تأثیر بسیار زیادی می‌گذارد؛ از این رو به‌دست‌آوردن مش بهینه بسیار اهمیت دارد. مش مطلوب مشی است که مقادیر خروجی از مدل وابسته به اندازه‌ی مش نباشد و تاحد امکان فضا و زمان کمتری از کامپیوتر را به خود اختصاص دهد؛ به‌عبارت‌دیگر

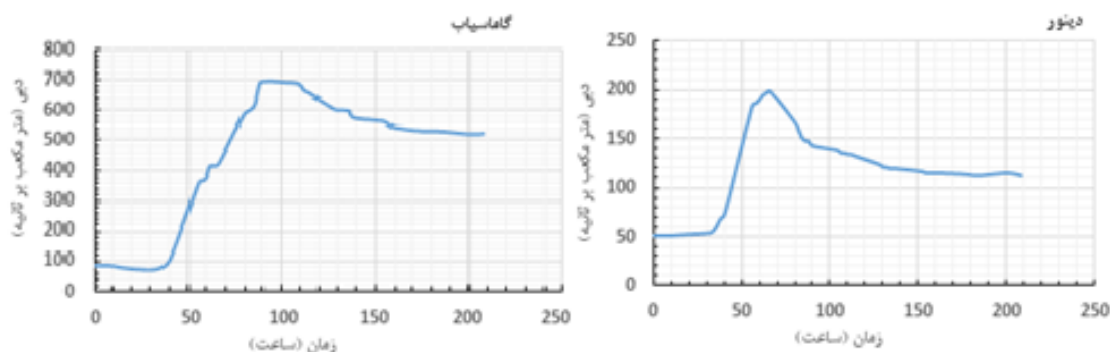


شکل ۴: مش بهینه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

بر خواهد گرفت؛ بنابراین دو شرط مرزی در بالادست و یک شرط مرزی در پایین‌دست موردنیاز است. در تحقیق حاضر سیلاب ورودی به محدوده‌ی پیوندگاه رودخانه‌ی گاماسیاب و دینور، به مدت ۲۰۸ ساعت از تاریخ ۱۰ فروردین ۱۳۹۸ تا ۱۸ فروردین ۱۳۹۸ برای مدل به‌عنوان شرایط مرزی بالادست تعریف شده است (شکل ۵).

در گام اول و قبل از شروع گام زمانی، برای پیش‌بینی جریان و رسوب در بازه‌ای از رودخانه نیاز به تعیین شرایط مرزی منطبق با واقعیت است. شرایط مرزی، نشان‌دهنده‌ی وضعیت ورودی و خروجی جریان در بالادست و پایین‌دست منطقه‌ی مورد مطالعه است. بدیهی است انتظار دریافت مشخصه‌های دقیق از جریان، ضرورت ارائه‌ی داده‌های صحیح در مرزها را در

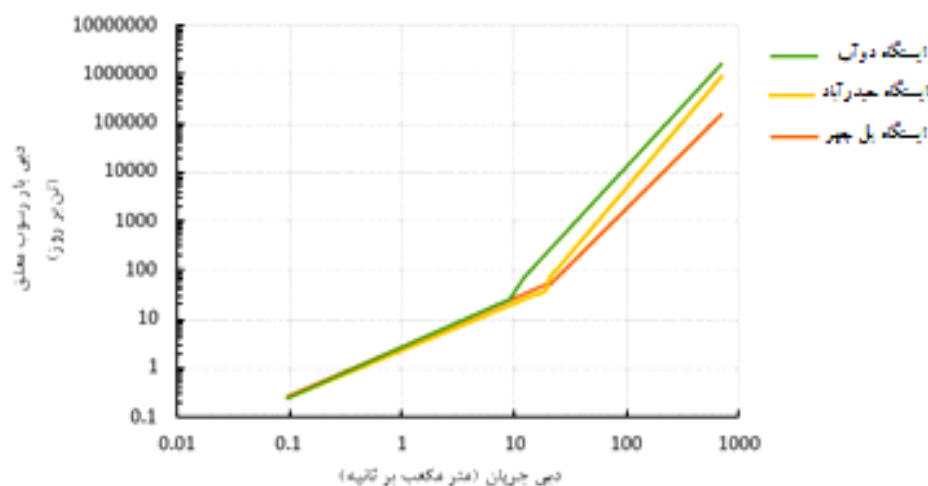


شکل ۵: هیدروگراف سیلاب

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

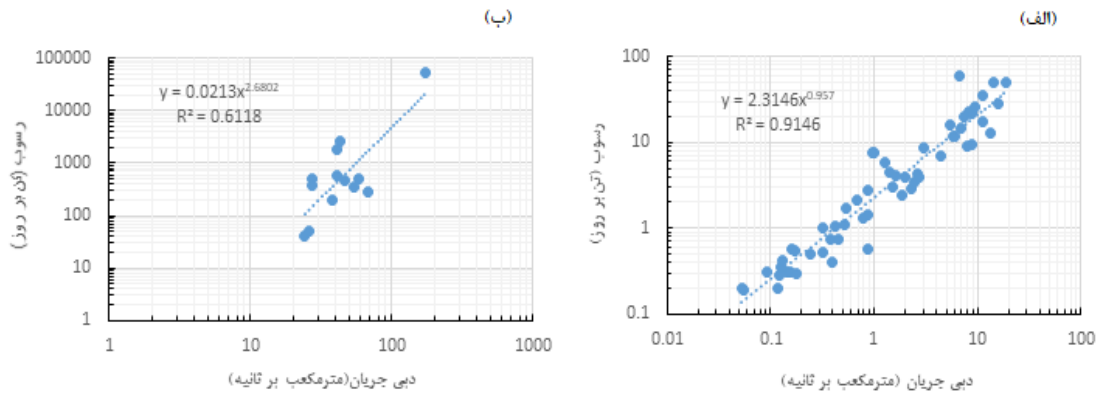
اصلی و فرعی متفاوت است؛ به عبارتی دیگر، به ازای یک دبی یکسان رسوب متفاوتی وارد می‌شود. این موضوع به عوامل مختلفی مانند شیب حوضه، سرعت جریان، جنس خاک، آبخیزداری و... بستگی دارد. به همین منظور برای دبی رسوب سیلاب از رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب هر ایستگاه به صورت جداگانه استفاده شد (شکل ۷ و ۸). در نهایت رابطه دبی-اشل ساخته شده براساس رابطه مانینگ (شکل ۱۰) به عنوان شرط مرزی پایین دست بازه مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

شرایط مرزی رسوب برای بازه بالادست هر دو رودخانه منحنی سنجه رسوب یا همان رابطه دبی-رسوب انتخاب شد. ابتدا از رابطه بلندمدت بین دبی جریان و دبی رسوب سه ایستگاه حیدرآباد بر رودخانه دینور، ایستگاه دوآب بر رودخانه گاماسیاب و ایستگاه پل چهر در پایین دست محل تلاقی منحنی سنجه رسوب ترسیم شد (شکل ۶). در نهایت مشخص شد که تقریباً تا دبی ۱۰ مترمکعب بر ثانیه مقدار رسوبی که وارد می‌شود یکسان است؛ ولی هر چقدر مقدار دبی افزایش پیدا می‌کند مقدار رسوب وارد شده بر شاخه



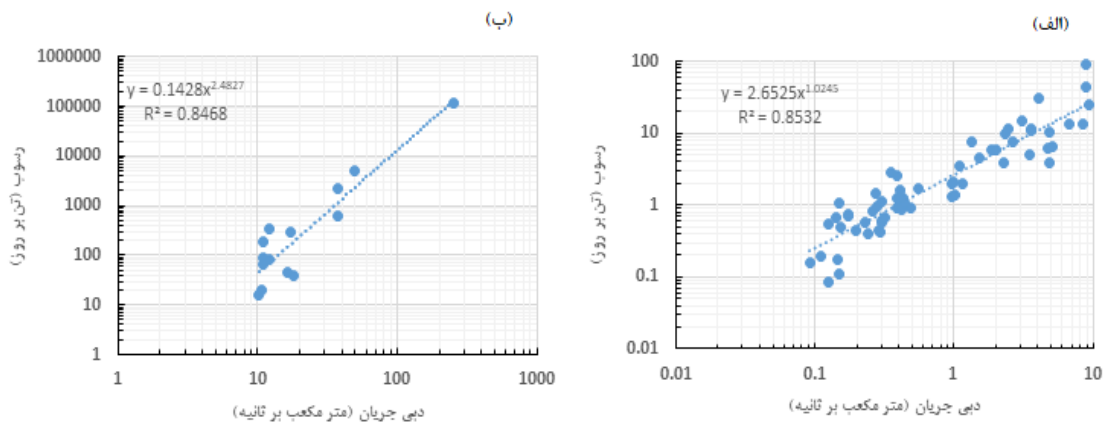
شکل ۶: منحنی سنجه رسوب معلق ایستگاه‌های مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



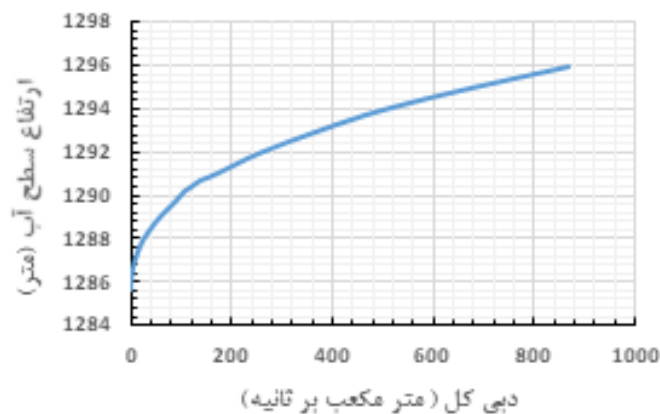
شکل ۷: رودخانه دینور: (الف) دبی زیر ۲۰ مترمکعب بر ثانیه. (ب) دبی بالای ۲۰ مترمکعب بر ثانیه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۸: رودخانه گاماسیاب: (الف) دبی زیر ۲۰ مترمکعب بر ثانیه. (ب) دبی بالای ۲۰ مترمکعب بر ثانیه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۹: رابطه دبی-اشل برای مقطع پایین دست

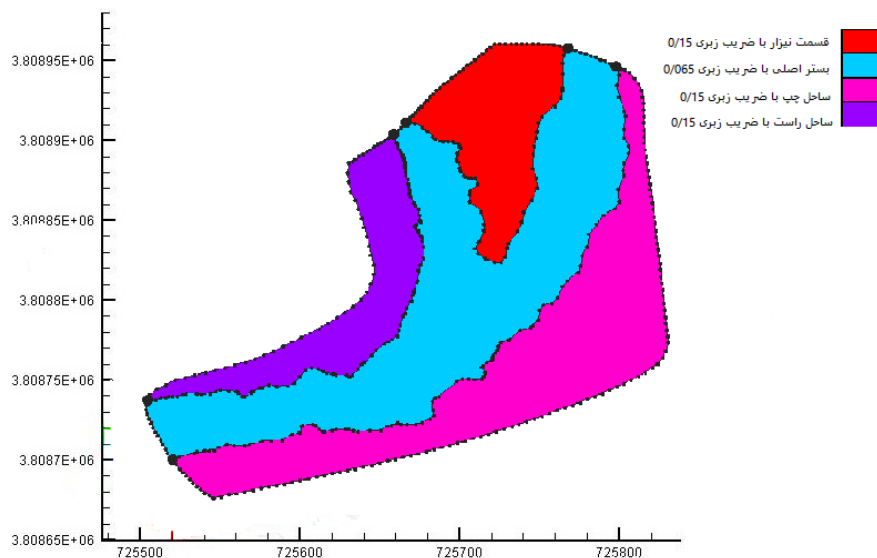
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

از معادله استریکلر^۱ (۱۹۲۳) استفاده شده است.

$$n = \left(ks^{\frac{1}{6}}\right) / 21.1$$

که در آن k_s پارامتر زبری است و در این رابطه معادل اندازه میانگین ذرات رسوب در نظر گرفته می‌شود. ابتدا از طریق آزمایش دانه‌بندی قطر ذرات به دست آمد و مشخص شد قطر ذرات از ۰/۰۷۵ تا ۲۵ میلی‌متر هستند که آن‌ها در ۵ کلاس تقسیم‌بندی شدند (۰/۰۷۸ تا ۴/۵، ۴/۵ تا ۷، ۷ تا ۹/۵، ۹/۵ تا ۱۷ و ۱۷ تا ۲۵ میلی‌متر). بعد از انجام دانه‌بندی و مشخص کردن قطر ذرات برحسب d_{50} (قطری که ۵۰ درصد رسوبات از آن کوچک‌تر است) میزان ضریب مانینگ محاسبه شد. در نهایت با ضریب مانینگ‌های (۰/۰۶۵) برای بستر اصلی، (۰/۱۱۵) ساحل چپ، (۰/۱۱۵) ساحل راست و (۰/۱۱۵) قسمت نیزار به مدت ۲۰۸ ساعت مدل اجرا شد (شکل ۱۰).

ضریب زبری یا ضریب مانینگ یکی از پارامترهای مهم در انتقال جریان بوده و عوامل مختلفی از جمله: زبری سطح، نامنظمی سطح مقطع مجرا، عمق و شدت جریان، جنس بستر، پوشش گیاهی، اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر، شکل بستر ناشی از بارهای رسوبی و تل‌ماسه‌ها، نامنظمی آبراهه‌ها، سیلاب دشت، رسوب‌گذاری، فرسایش و کف‌کنی رودخانه، موانع عمودی موجود در مسیر جریان، مورفولوژی رودخانه و غیره در مقدار آن تأثیر دارند (Abrishemi & Hosieni, 1998: 153). با توجه به اینکه افت طولی ناشی از زبری در تراز سطح آب و سرعت جریان در هر مقطع نقش عمده‌ای دارد و یکی از افت‌های انرژی در رودخانه است، تعیین مقدار مناسب این ضریب که بیانگر شرایط واقعی رودخانه باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که باید در انتخاب آن دقت کافی به عمل آید (Chow, 1959: 98). در این تحقیق برای تعیین ضریب مانینگ



شکل ۱۰: نواحی با زبری متفاوت

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

جریان از کانال فرعی به کانال اصلی و تداخل جریان، بردارهای سرعت در مجرای اصلی به کناره سمت چپ مجرای اصلی منحرف شده (شکل ۱۱-ب) و با عبور جریان از منطقه، حداکثر سرعت فرسایش در بستر تلاقی رخ داده و به تبع آن عمق جریان در این ناحیه افزایش یافته است. کاهش عمق جریان در حفاصل ۵۰ تا ۷۰ متری از ساحل رودخانه (شکل ۱۲-الف) ناشی از پیشروی دماغه رسوبی (در ناحیه رکود) در کف رودخانه به سمت پایین دست است که باعث بالآمدن رقوم کف بستر و در نتیجه کاهش عمق جریان می شود. در دبی های سیلابی نزدیک به اوج و بعد از آن کاملاً مشخص است که دو مجرای جریان در بستر تشکیل شده است، عمق جریان در محل این دو مجرا بیشتر از سایر نقاط مقطع عرضی است و همان گونه که گفته شد در حفاصل بین این دو مجرا به دلیل توسعه دماغه رسوبی و بالآمدن بستر عمق جریان کاهش یافته است.

سرعت جریان در شرایط غیردائمی بین ۰/۱ تا ۲/۳ متر بر ثانیه متغیر است (شکل ۱۲-ب). بیشترین سرعت جریان ۹۰ ساعت پس از شروع سیلاب یعنی در حوالی نقطه اوج هیدروگراف های سیل مشاهده می شود. همچنین موقعیت حداکثر مقدار سرعت در محدوده میانه مقطع عرضی ab قابل مشاهده است که این موضوع یکی از خصوصیات پیوندهای تقریباً متقارن است. در پیوندهای نامتقارن موقعیت حداکثر سرعت جریان در عرض مقطع بستگی به نسبت دبی، نسبت پهنای مقاطع رودخانه های بالادست، زاویه پیوند، رژیم جریان و رسوب دارد (Zhang et al, 2015: 230; Rhoads and Johnson, 2018: 51; Penna et al, 2018: 496; Herrero et al, 2018: 99). عرضی سرعت برای زمان ۹۰ ساعت در شکل (۱۲-ب) نشان می دهد که در محدوده مجرای جریان رودخانه گاماسیاب سرعت حدود ۲/۳ متر بر ثانیه و در محدوده مجرای جریان رودخانه دینور نزدیک ۱/۹ متر بر ثانیه

انتقال رسوب موضوع پیچیده ای است که با روش های تجربی یا نیمه تجربی بررسی می شود. نرخ انتقال رسوب را می توان توسط یک یا دو عامل غالب مانند دبی جریان، سرعت متوسط جریان، شیب انرژی و تنش برشی به دست آورد. در این زمینه معادلات متعددی بیان شده است. از آنجایی که هر کدام از توابع انتقال رسوب در شرایط مختلف توسعه داده شده اند، ممکن است نتایج به دست آمده از هر تابع با توابع دیگر بسیار متفاوت باشد. با توجه به اینکه D90 ذرات بستر مورد مطالعه در این تحقیق ۲۰ میلی متر است که در محدوده ذرات شنی قرار دارد، مطابق با محدوده های مشخص شده توسط مدل SRH-2D برای این ذرات روابط یانگ^۱، ۷۹، یانگ^۲، ۹۳، وو^۳، ویلکوک^۴، پارکر^۴، مایرپیترمایر^۵ پیشنهاد شده است. پس از اجرای مدل با روابط مختلف مشخص شد که روابط یانگ^۱، ۷۹، وو^۳ و ویلکاک قادر نیستند الگوی فرسایش و رسوب گذاری پیوندگاه رودخانه دینور به گاماسیاب را به خوبی شبیه سازی کنند؛ از این رو رابطه پارکر به عنوان بهترین رابطه، برای ادامه کار با نرم افزار انتخاب شد.

نتایج و بحث

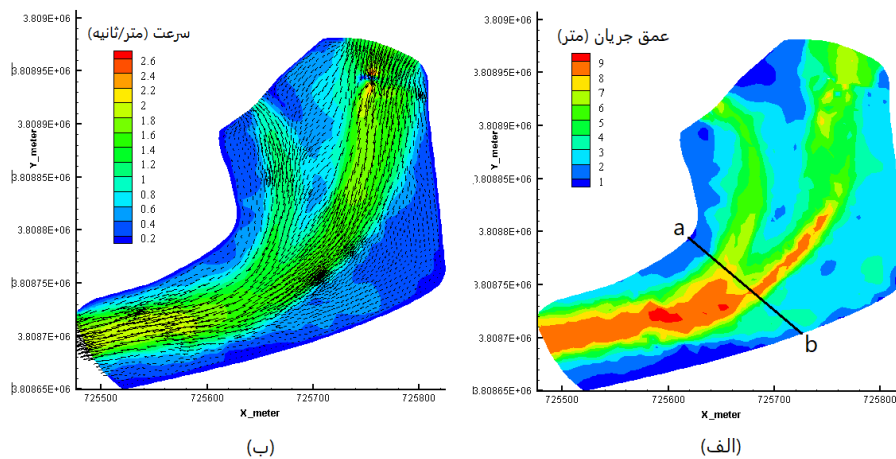
بررسی روند تغییرات عرضی جریان و پهنه رسوب در منطقه مورد مطالعه

نتایج حاصل از خروجی مدل SRH-2D نشان داد که تغییرات هندسی- هیدرولیکی جریان در عرض مقطع (نیم رخ ab شکل ۱۱-الف) به طور کلی از روند ثابتی پیروی نمی کند. با توجه به یکسان نبودن جنس بستر و کناره ها در محل اتصال شاخه فرعی دینور به گاماسیاب در عرض مقطع تغییرات زیادی رخ می دهد. در گوشه مجرای فرعی حداقل عمق جریان در منطقه جداشدگی قابل مشاهده است (شکل ۱۱-الف). با ورود

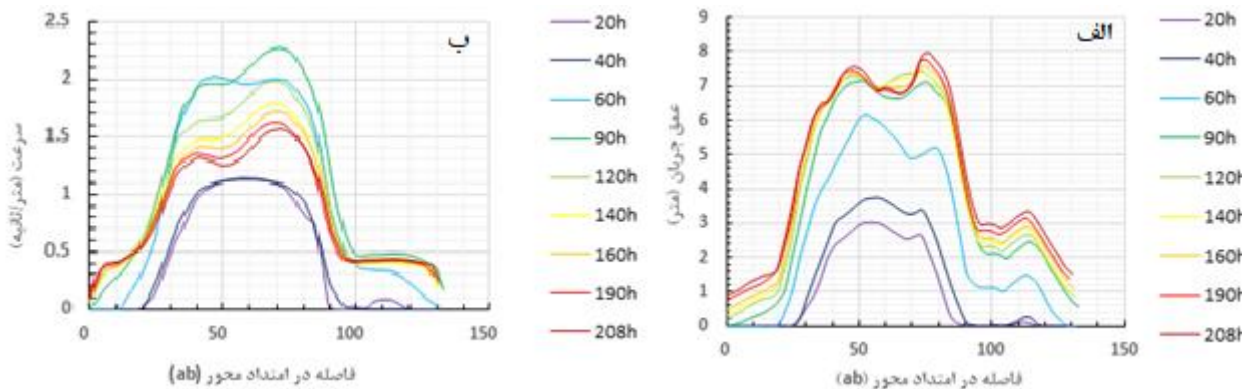
1. Yang
2. Wu
3. Wilcock
4. Parker
5. Meyer_peter_Muller

تلاقی وارد می‌شود. در زمان ۹۰ ساعت دبی ورودی از طرف رودخانه گاماسیاب حدود ۷۰۰ مترمکعب بر ثانیه و دبی دینور نزدیک ۱۴۰ مترمکعب بر ثانیه است (شکل ۶).

است. در حالی که نمودار شکل ۱۲-الف برای همین زمان عمق جریان یکسان را در محل وقوع این دو مقدار سرعت نشان می‌دهد (حدود ۷/۲ متر). دلیل این اختلاف سرعت ناشی از مقدار دبی جریان متفاوتی است که در این زمان از طرف دو رودخانه به محل



شکل ۱۱: پهنه‌بندی (الف) عمق جریان در محدوده پیوندگاه و (ب) اندازه و جهت بردارهای سرعت ۲۰۸ ساعت بعد از وقوع سیلاب (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱)



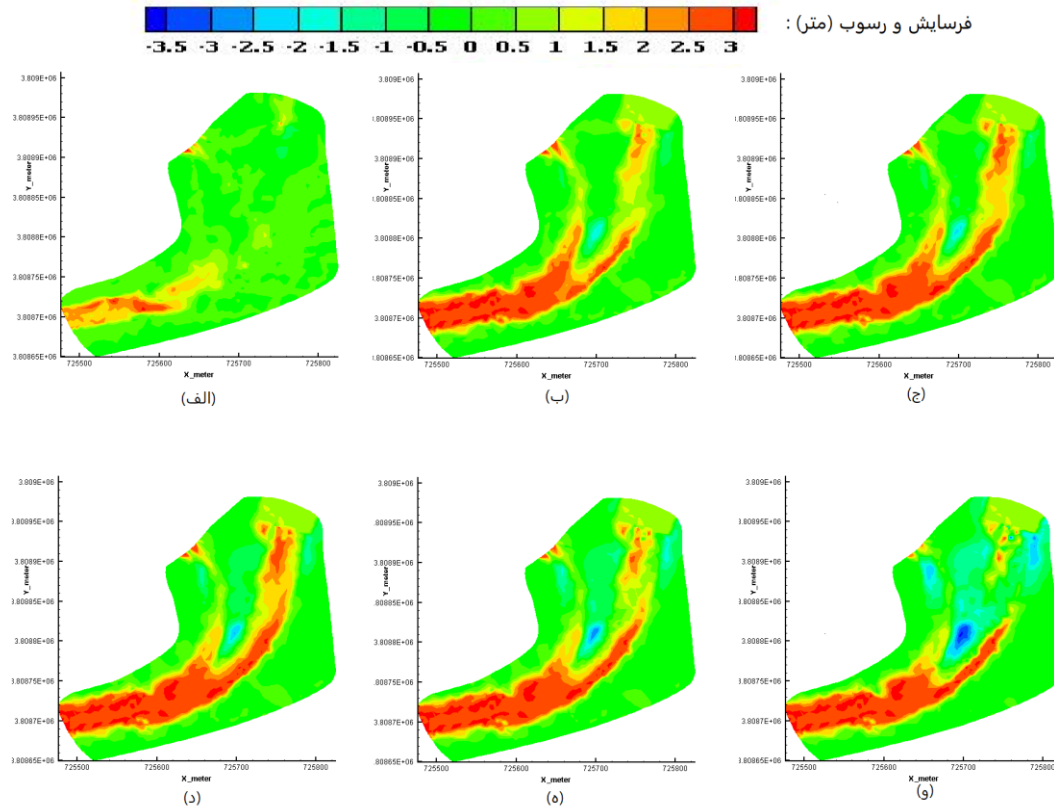
شکل ۱۲: تغییرات وابسته به زمان (الف) عمق جریان، (ب) سرعت جریان در مقطع عرضی تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

پیوندگاه رودخانه‌ها را تحت پوشش قرار می‌دهد و با محدوده‌های فرسایشی در بستر رودخانه‌های ورودی به هم می‌پیوندد (شکل ۱۳-ب-د). نکته قابل توجه دیگر رشد چشمگیر رسوب‌گذاری در ناحیه رکود جریان است که از زمان حدود ۷۸ ساعت پس از وقوع سیلاب

تغییرات در عملکرد رودخانه بلافاصله بعد از آغاز سیلاب با تولید فرسایش در بخش‌های پایین‌تر از پیوندگاه و کف مجاری ورودی شروع می‌شود (شکل ۱۳-الف). به تدریج با ادامه سیلاب و گسترش پهنه سیل فرسایش محدوده وسیع‌تری در پایین‌دست

زیرآب و با فروکش کردن سیلاب رسوبات خود را در این محدوده‌ها نهشته‌اند نیز کاملاً مشهود است (شکل ۱۳-و).

(شکل ۱۳- ب) تا انتهای زمان شبیه‌سازی ادامه می‌یابد. علاوه بر این توسعه نواحی رسوب‌گذاری در محدوده بالادست ناحیه رکود که در اوج سیلاب به



شکل ۱۳: الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری وابسته به زمان (الف) بعد از ۴۰ ساعت (ب) بعد از ۷۸ ساعت

(ج) بعد از ۸۸ ساعت (د) بعد از ۱۱۰ ساعت (ه) بعد از ۱۴۰ ساعت (و) بعد از ۲۰۸ ساعت

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

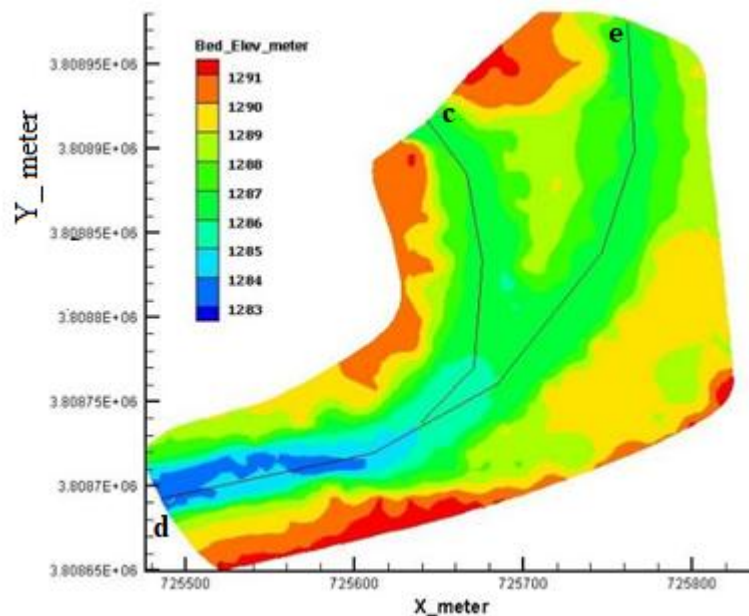
است. حداکثر مقدار سرعت مربوط به زمان ۹۰ ساعت و حدود $3/5$ متر بر ثانیه است. از فاصله ۲۹۰ متری تا انتهای مسیر مقادیر سرعت شروع به کاهش می‌کنند. این کاهش سرعت به دلیل افزایش عمق جریان ناشی از فرسایش بستر و عمیق‌تر شدن مجرا در این محدوده است. نکته قابل توجه دیگر کاهش مقادیر سرعت جریان در همه زمان‌ها (با استثنای ۶۰ ساعت) در مقایسه با زمان‌های ۲۰ و ۴۰ ساعت در محدوده صفر تا ۵۰ متری از ابتدای مسیر است. هر چند مطابق با هیدروگراف ورودی نشان‌داده شده در شکل ۶ مقادیر

بررسی روند تغییرات وابسته به زمان جریان و رسوب در نیم‌رخ طولی منطقه مورد مطالعه

بررسی تغییرات سرعت در امتداد نیم‌رخ طولی (در شکل ۱۴) نشان می‌دهد، مقادیر سرعت جریان تا فاصله حدود ۱۸۰ متری از ابتدای نیم‌رخ در تمام زمان‌های نشان‌داده شده در شکل (۱۵-الف) تغییرات نسبتاً اندکی دارند. از این فاصله تا انتهای نیم‌رخ مقادیر سرعت شروع به افزایش شدید می‌کنند، هرچه به زمان اوج سیلاب (حدود ۹۰ تا ۱۰۰ ساعت) نزدیک می‌شویم مقادیر سرعت بیشتری قابل مشاهده

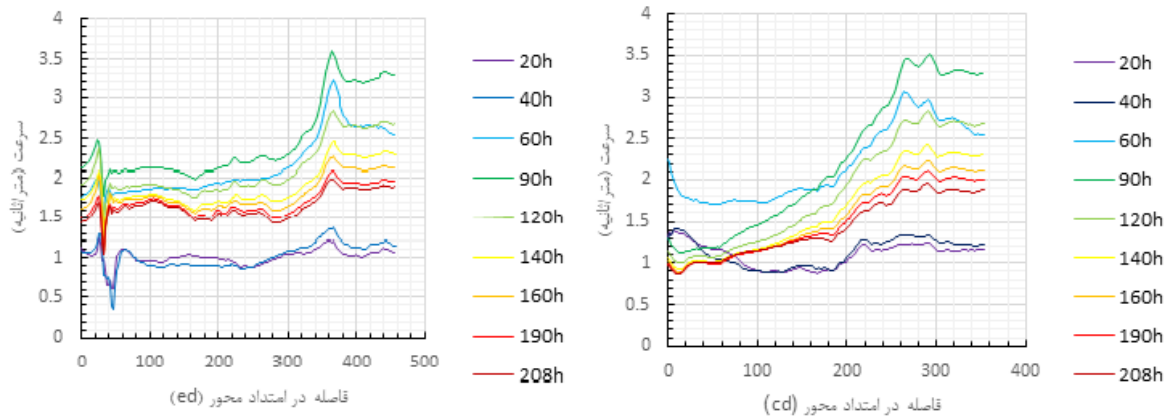
شکل (۱۵-ب) فرسایش و افزایش عمق و نهایتاً سطح مقطع جریان است. در اینجا نیز حداکثر مقدار سرعت مربوط به زمان ۹۰ ساعت است که متناظر با محدوده اوج سیلاب است. این مقدار حدود ۳/۵ متر بر ثانیه است. دلیل بی‌نظمی‌ای که ابتدای این نیمرخ در مقادیر سرعت رخ داده است، می‌تواند تغییرات شکل مقطع به علت تغییرات رقوم بستر یا پهنای مجرای رودخانه گاماسیاب در فاصله صفر تا ۳۰ متر ابتدای بازه باشد. در حالت کلی پهنه‌بندی سرعت جریان (شکل ۱۶) نشان می‌دهد مقادیر سرعت جریان همواره در شاخه ورودی گاماسیاب در مقایسه با دینور بیشتر است و حداکثر مقدار سرعت بعد از به هم پیوستن جریان هر دو رود در پایین دست پیوندگاه رودخانه‌ها رخ می‌دهد.

دبی ورودی به پیوندگاه رودخانه از طرف رودخانه دینور همواره بیشتر از دبی‌های مربوط به ۲۰ تا ۴۰ ساعت اولیه است؛ ولی به دلیل فرسایش مجرای ورودی و افزایش سطح مقطع جریان مقادیر سرعت بیشتر کاهش یافته است. دلیل استثناسدن زمان ۶۰ ساعت این است که در این زمان هنوز فرسایش جدی در مجرای ورودی دینور رخ نداده؛ در نتیجه به ازای دبی جریان بیشتر مقدار سرعت بیشتری نشان داده شده است. در امتداد نیمرخ ed نیز روند افزایش شدید سرعت از فاصله حدود ۳۰۰ متری از ابتدای مسیر شروع می‌شود. حداکثر مقدار سرعت موقعیت ۳۶۰ متری از ابتدا رخ می‌دهد و سپس تا انتهای مسیر مقداری کاهش می‌یابد. دلیل کاهش سرعت از فاصله ۳۶۰ متری تا انتها در همه زمان‌های نشان داده شده در



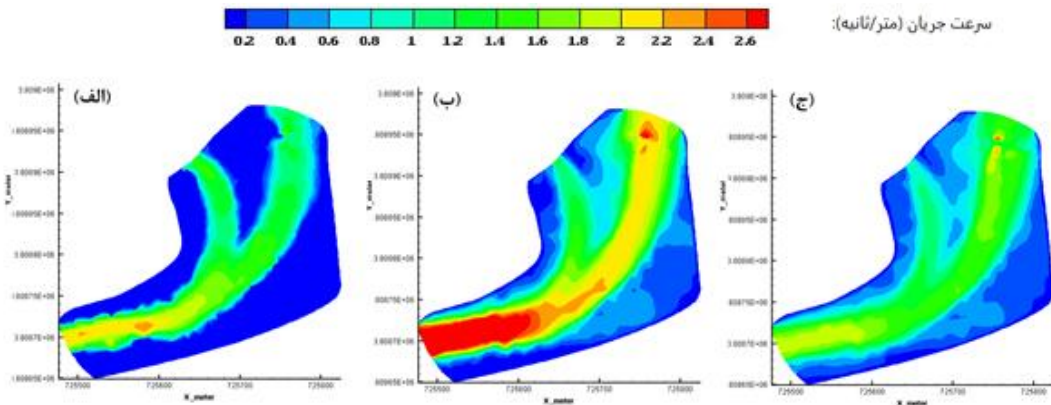
شکل ۱۴: محل نیمرخ‌های طولی: رودخانه گاماسیاب (ed)، رودخانه دینور (cd)

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۱۵: نیم‌رخ طولی سرعت وابسته به زمان. (الف) رودخانه دینور، (ب) رودخانه گاماسیاب

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

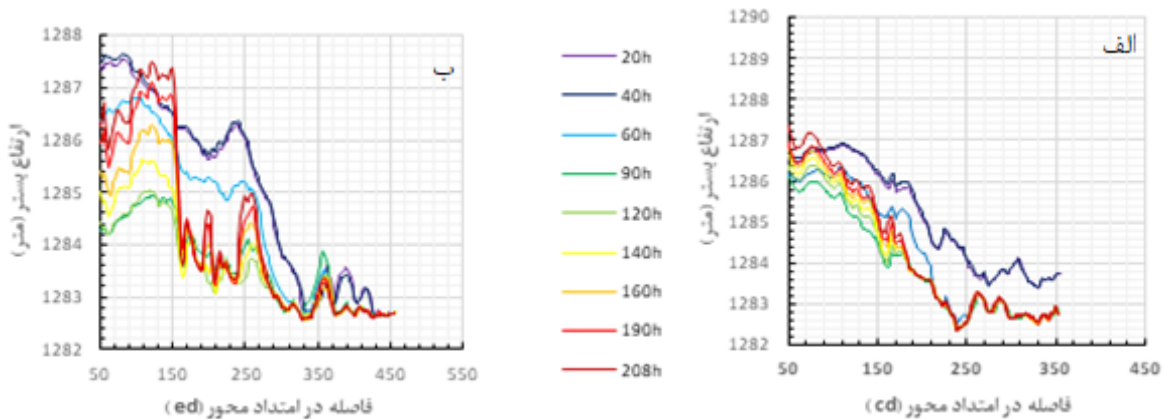


شکل ۱۶: الگوی سرعت جریان محاسبه شده (الف) شروع سیلاب، (ب) اوج سیلاب و (ج) فروکش سیلاب در محدوده مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

دیگر، اول اوج سیل قابل مشاهده است و با یک اختلاف زمانی اوج رسوب بار بستر از مجرا عبور می‌کند. به دلیل کاهش توان حمل رسوب جریان کاهش یافته در فاصله صفر تا ۱۷۰ متری محور cd بعد از عبور اوج سیل در رسوب گذاری قابل مشاهده است. در محور مجرای گاماسیاب (ed) نیز شرایط مشابهی دیده می‌شود. با این تفاوت که پس از عبور اوج سیلاب رسوب گذاری نسبتاً بیشتری در ورودی و میانه مجرا در فاصله صفر تا ۱۷۰ متری رخ می‌دهد؛ به گونه‌ای که بعد از ۲۰۸ ساعت یک پایین افتادگی ناگهانی دماغه رسوب در بستر به وجود آمده است.

با مقایسه رقوم بستر در امتداد محور cd شکل ۱۷ قبل و بعد از وقوع سیل مشخص می‌شود که تا زمان ۹۰ ساعت بستر در ۲۰۰ متر اول محور مذکور (دینور) در حال فرسایش است. فرسایش بستر از فاصله ۲۰۰ متر تا انتها محدود به بعد از ۶۰ ساعت از شروع شبیه سازی به حالت تعادل رسیده و در زمان‌های مختلف تغییرات ناچیزی در آن مشاهده می‌شود. از زمان ۹۰ ساعت به بعد یعنی پس از عبور اوج سیلاب، رسوب گذاری در ۱۷۰ متر اول امتداد مذکور قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که بیشترین حرکت بار رسوب بستر هم‌زمان با حداکثر دبی سیلاب رخ نمی‌دهد و با یک تأخیر زمانی پس از آن همراه است؛ به عبارتی

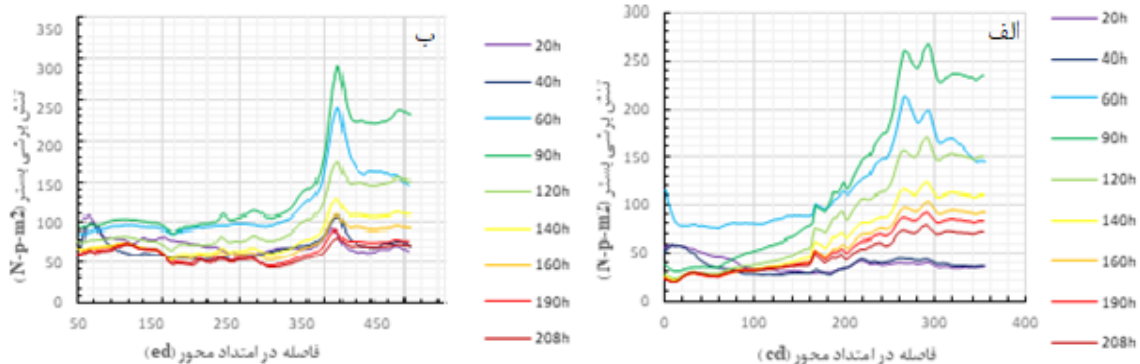


شکل ۱۷: نیم‌رخ طولی ارتفاع بستر در زمان‌های مختلف (الف) رودخانه دینور و (ب) رودخانه گاماسیاب

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

حداکثر تنش برشی قابل مشاهده است. نکته قابل توجه تغییرات مکانی تنشی برشی از ابتدای محورهای مذکور تا انتهای محدوده برای زمان ۹۰ ساعت است که از حدود ۳۵ نیوتن بر مترمربع برای رودخانه دینور و ۹۰ نیوتن بر مترمربع برای رودخانه گاماسیاب شروع می‌شود و به حداکثر حدود ۲۷۰ نیوتن بر مترمربع می‌رسد. موقعیت محل حداکثر تنش برشی با موقعیت محل حداکثر عمق فرسایش (شکل ۱۳- ج) نشان می‌دهد، این دو محل تقریباً یکسان هستند. به عبارتی دیگر محل حداکثر عمق فرسایش در محل حداکثر تنش برشی در زمان اوج سیلاب رخ داده است. با عبور اوج سیلاب همان‌گونه که انتظار می‌رفت، مقادیر تنش برشی نیز شروع به کاهش می‌گذارد.

ظرفیت حمل رسوب جریان ارتباط مستقیم با تنش برشی بستر دارد؛ از این رو درک صحیح تغییرات این پارامتر وابسته مکان و زمان، اطلاعات مفیدی درباره چگونگی حمل رسوب و الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری در اختیار می‌گذارد و مقادیر مختلف برشی در زمان‌های مختلف از شروع شبیه‌سازی در امتداد محورهای رودخانه‌های دینور و گاماسیاب ترسیم می‌شود (شکل ۱۸). همان‌گونه که نشان داده شده است تا قبل از شروع سیل و در زمان‌های ۲۰ تا ۴۰ ساعت از شروع شبیه‌سازی نوسانات تنش برشی در طول محورهای cd و ed چندان زیاد نیست. با این وجود پس از رسیدن موج سیل به پیوندگاه رودخانه تنش برشی شروع به افزایش می‌کند. در زمان ۹۰ ساعت یعنی همان محدوده زمانی دبی اوج سیلاب

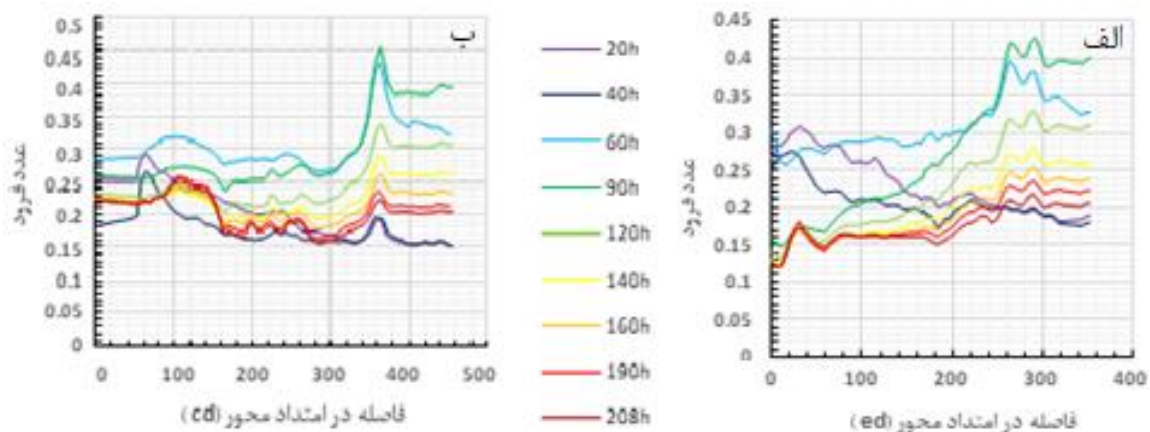


شکل ۱۸: نیم‌رخ طولی تنش برشی وابسته به زمان (الف) رودخانه دینور و (ب) رودخانه گاماسیاب

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

مقادیر عدد فرود کوچک‌تر از یک است؛ به عبارتی دیگر، جریان در محل پیوندگاه همواره زیر بحرانی است و در نظر گرفتن شرط مرزی در پایین دست پیوندگاه منطقی بوده است.

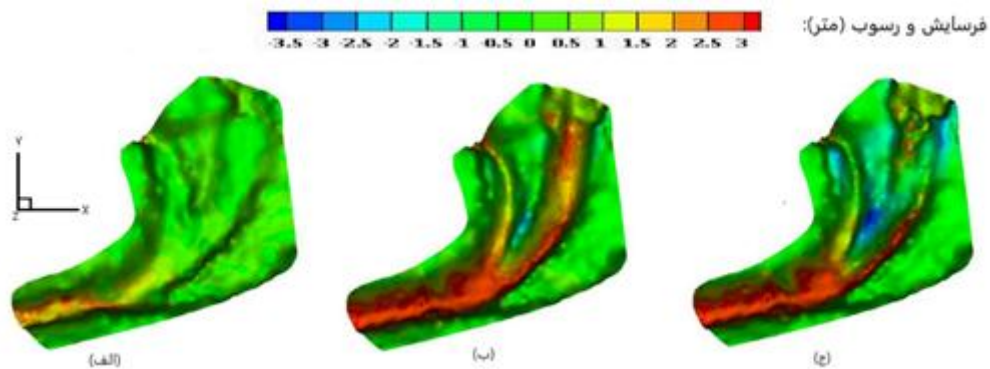
به منظور اطلاع از چگونگی نوع جریان از نقطه نظر زیر بحرانی یا فوق بحرانی بودن و همچنین اطمینان به درستی نوع شرایط مرزی انتخاب شده در این تحقیق مقادیر عدد فرود و تغییرات مکانی و زمانی آن (شکل ۱۹) نشان می‌دهد که طی وقوع سیلاب همواره



شکل ۱۹: نیم‌رخ طولی عدد فرود در زمان‌های مختلف از شروع شبیه‌سازی (الف) رودخانه دینور (ب) رودخانه گاماسیاب تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

رودخانه‌ای با شاخه فرعی است. پس می‌توان گفت مدل از دقت خوبی برخوردار است و می‌تواند الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری و همچنین الگوی جریان را به خوبی نشان دهد. بعد از فروکش کردن سیلاب نتایج نشان داد، سیلاب باعث توسعه جانبی قوس خارجی رودخانه گاماسیاب و حرکت انتقالی دماغه رسوب به سمت پایین دست شده است. افزایش ارتفاع آب باعث بریده شدن جزیره و انتقال آب از مجرای اصلی به سمت مجرای فرعی و همچنین غرقاب کردن دشت‌های حاشیه رودخانه شده است.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با واقعیت
برای تعیین میزان حداکثر عمق فرسایش و رسوب‌گذاری بعد از سیلاب مجدداً در چند نقطه در محل پیوندگاه رودخانه‌های مورد نظر این تحقیق اندازه‌گیری رقوم سطح آب و عمق جریان انجام شد و نتایج آن با قبل از سیلاب مقایسه شد. ارزیابی نهایی نتایج مدل عددی (شکل ۲۰) با در نظر گرفتن پارامترهایی که مناسب تشخیص داده شدند، در مقایسه با تصاویر هوایی (شکل ۲۱) و بازدیدهای میدانی حاکی از دقت بالای مدل SRH_2D در تحلیل شرایط واقعی تغییرات مورفولوژی بستر آبراهه اصلی در محل پیوندگاه



شکل ۲۰: نتایج تغییرات بستر رسوبی شبیه‌سازی شده در پیوندگاه رودخانه دینور به گاماسیاب با استفاده از مدل SRH_2D. (الف) ۲ ساعت بعد از شروع سیل، (ب) در زمان اوج سیلاب، (ج) ۲۰٫۸ ساعت بعد از اجرای مدل تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱



شکل ۲۱: تصاویر هوایی برگرفته از گوگل از پیوندگاه رودخانه دینور به گاماسیاب (الف) قبل از سیلاب، (ب) در زمان سیل و (ج) بعد از سیلاب تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۱

نتیجه

در این پژوهش با بهره‌گیری از مدل عددی SRH_2D تأثیر سیلاب فروردین ۱۳۹۸ بر جریان و رسوب پیوندگاه رودخانه دینور به گاماسیاب که الگوی مماندری یکسانی دارند، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل SRH_2D بینش خوبی را در رابطه با تغییرات بستر مجاری در طول سیلاب نشان می‌دهد. در یک سیلاب با دوره برگشت ۳۵ ساله پیوندگاه رودخانه دینور به گاماسیاب که با زاویه ۴۰ درجه به صورت مماندری به داخل مماندر اصلی وارد می‌شود، به سبب افزایش دبی جریان در مجرای اصلی و همچنین به وجود آمدن ناحیه جداشدگی جریان در پایین دست محل تلاقی سرعت جریان به دو دلیل

عمده (افزایش دبی و کاهش سطح مقطع) به سرعت افزایش یافته و مورفولوژی محل پیوندگاه به ویژه بستر رودخانه‌ها دچار تغییرات شدیدی شده است. حتی در این حالت نیز شرایط جریان در محل پیوندگاه همچنان زیر بحرانی (کمتر از یک) است. مشاهده‌های صحرائی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که ناحیه رکود جریان به صورت یک ماغه رسوبی به سمت محل پیوندگاه پیش روی می‌کند و تغییرات شدیدی در تنش برشی بستر در طی زمان سیلاب، حرکت رسوبات کف و اندرکنش آن‌ها با جریان در محل پیوندگاه بسیار قابل ملاحظه است. در زمان اوج سیلاب تغییرات مکانی تنش برشی در کف محل پیوندگاه رودخانه‌ها دلیل بر وجود فرم‌های بستر رودخانه است. مقدار

طولانی با دبی معمولی به وقوع پیوندد؛ بنابراین برای توسعه نواحی رکود و جداسازی جریان و همچنین عمیق تر شدن چاله‌های فرسایشی بستر باید منتظر سیلاب‌های شدیدی مانند سیلاب بررسی شده در تحقیق حاضر بود.

تنش برشی در بازه مورد مطالعه از ۱۰ نیوتن بر مترمربع تا ۳۰۰ نیوتن بر مترمربع تغییر می‌کند. بیشترین تغییرات بعد از گذشت ۸۰ ساعت از شروع سیلاب رخ می‌دهد و عمدتاً در پایین دست محل تلاقی به وجود می‌آید. یک چنین تغییراتی که در یک زمان ۲۰۸ ساعته رخ داده است، به نظر نمی‌رسد که در زمان

منابع

- ابریشمی، جلیل؛ سید محمود حسینی (۱۳۷۷). هیدرولیک کانال‌های باز، آستان قدس رضوی، مشهد.
<https://telketab.com/book>.
- جباری، ایرج (۱۳۹۶). ژئومورفولوژی: ساختمان، فرایند و زمین‌ریخت‌ها، سمت، تهران.
- چارلتون، رو (۱۳۹۶). مبانی ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، ترجمه: مهدی ثقفی و محمدحسین رضایی مقدم. سمت. تهران.
<https://samta.samt.ac.ir/product/14908>
- قبادیان، رسول؛ سارا قنبری (۱۳۹۴). بررسی تأثیر انحنای مجرای فرعی بر الگوی جریان در تلاقی ۹۰ درجه مجاری روباز با استفاده از مدل عددی دو بُعدی SRH-2D، چهاردهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران. دانشگاه سیستان و بلوچستان. زاهدان.
<https://civilica.com/doc/437867>
- قبادیان، رسول؛ محمود شفاعی بجستان؛ سیدحبیب موسوی جهرمی (۱۳۸۵). بررسی آزمایشگاهی جداسازی جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها برای شرایط جریان زیربحرانی، نشریه تحقیقات منابع آب ایران. دوره ۲. شماره ۲. صفحات ۶۷-۷۷.
http://www.iwrr.ir/article_15425.html
- مرادی، مهرداد؛ رسول قبادیان (۱۳۹۳). شبیه‌سازی دو بُعدی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت با استفاده از مدل SRH-2D، چهارمین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب. دانشگاه شهید باهنر. کرمان.
<https://www.researchgate.net/profile/Mehrdad-Moradi-5>

References

- Ashmore, P.E., Ferguson, R.I., Prestegard, K.L., Ashworth, P.J., Paola, C (1992). Secondary flow in anabranch confluences of a braided, gravel-bed stream. *Earth Surf. Process. Landf.* 17 (3), 299-311.
<https://doi.org/10.1002/esp.3290170308>.
- Best J. L (1988). "Sediment transport and bed morphology at river channel confluences". *Sedimentology*, 35,3, 481-498.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3091.1988.tb00999.x>
- Best, J.L (1987). Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M., Harvey, M. D. (Eds.), *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*, Special Publication 39. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, oK, 27-35.
<http://dx.doi.org/10.2110/pec.87.39.0027>.
- Best, J.L., Reid, I (1984). Separation zone at open-channel junctions. *J. Hydraul. Eng.* 110(11), 1588-1594.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1588))

- Best, J. L., Roy, A.G (1991). Mixing layer distortion at the confluence of channels of different depth. *Nature* 350 (6317), 411-413.
<https://doi.org/10.1038/350411a0>
- Biron, P., Best, J. L., Roy, A. G (1996). Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences. *Journal of Hydraulic Engineering* 122(12), 676-682.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:12\(676\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:12(676))
- Biron, P., Ramamurthy, A.S., Han, S (2004). Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 130 (3), 243-253.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:3\(243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(243))
- Biron, P., Roy, A.G., Best, J.L., Boyer, C.J (1993). Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels. *Geomorphology* 8, 115-129.
[https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90032-W](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90032-W)
- Biron, P.M., Lane, S.N (2008). Modelling hydraulics and sediment transport at river confluence. In: Rice, S.P., Roy, A., Rhoads, B.L. (Eds.), *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO198SQ, England, 17-37.
<https://doi.org/10.1002/9780470760383.ch3>
- Borghai, S. M., and A. Jabbari Sahebari (2010). "Local scour at open-channel junctions", *Journal of Hydraulic Research*, 48, 538-542.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221686.2010.492107>
- Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., Biron, P., Roy, A.G (2001). Role of bed discordance at asymmetrical river confluences. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 127 (5), 351-368.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:5\(351\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(351))
- Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., Biron, P.M., Roy, A.G (2000). Large eddy simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. *J. Hydraul. Res.* 38(3), 207-215.
<https://doi.org/10.1080/00221680009498338>
- Chen K. L., Feng M. Q. Zhang T (2018). Experimental study on Flow field in Intersection of open channel based on PIV Technology. *Journal of Hydroelectric Engineering* 37(11), 43-55.(in Chinese)
<https://doi.org/10.11660/slfdx.20181105>
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., Sukhodolov, A (2016). Influence of planform geometry and momentum ratio on thermal mixing at a stream confluence with a concordant bed. *Environ. Fluid Mech.* 16 (4), 845-873.
<https://doi.org/10.1007/s10652-016-9457-0>
- Chow, V.T (1959). *Open channel hydraulics*. Mc Graw-Hill Press, Michigan, 680.
https://www.academia.edu/9092662/Open_Channel_Hydraulics
- Herrero, H. S.; Lozarda, J. M. D.; Garcia, C. M.; Szupiny, R. N.; Best, J.; Pagot, M (2018). The influence of tributary flow density differences on the hydrodynamic behavior of a confluent meander bend and implications for flow mixing. *Geomorphology*, V.304, 99-112.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.025>
- Moges, EM (2010). Evaluation of sediment transport equations and parameter sensitivity analysis using the SRH-2D Model", PhD Thesis, Universität Stuttgart.
<https://docplayer.net/54898739-Evaluation-of-sediment-transport-equations-and-parameter-sensitivity-analysis-using-the-srh-2d-model.html>
- Mosley, M.P (1976). An experimental study of channel confluences. *J. Geol.*, 84,535-562.
<https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/628230>
- Penna, N.; De Marchis, M.; Canelas, O. B.; Napoli, E.; Cardoso, A. H.; Gaudio, R (2018). Effect of the Junction Angle on Turbulent Flow at a Hydraulic Confluence. *Water*, V. 10, N. 4.
<https://www.mdpi.com/2073-4441/10/4/469>

- Rahul, J. L (1995). Modeling non-uniform-sediment fluvial process by characteristics method. *J. Hydraul. Engin. ASCE*, 2: 159-170.
- Rhoads, B. L., Johnson, K. K (2018). Three-dimensional flow structure, morphodynamics, suspended sediment, and thermal mixing at an asymmetrical river confluence of a straight tributary and curving main channel. *Geomorphology* 323, 51-69.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.009>
- Sakhaee, F (2020). Steady and unsteady flow simulation with SRH-2D, *Journal of Ocean Engineering and Science*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.01.002>
- Strickler M (1923). Contributions to the question of speed formula and the roughness pay for current channels and closed lines, *Messages of the world Office for water management, Bern, Switzerland*, N. 16 (in German).
<https://authors.library.caltech.edu/29103/>
- Taylor, E. H (1944). "Flow characteristics at rectangular open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering"*, ASCE, 109:893-912.
<http://www.sciepub.com/reference/39936>
- Tong-Huan, L., Yi-Kui, W., Xie-Kang, W., Huan-Feng, D., Xu-Feng, Y (2020). Morphological environment survey and hydrodynamic modeling of a large bifurcation-confluence complex in Yangtze River, China, *Science of The Total Environment*, Volume 737, 1-16.
doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139705
- Tolosa, H. G (2008). Comparison of 2D hydrodynamic models in river reaches of ecological importance: hydro-AS -2D and SRH-2D. *Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stuttgart*.
- Weber, L.J., Schumate, E.D. and Mawer, N (2001). Experimentals on flow at a 900 open channel Junction. *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 127, 340- 350.
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:5\(340\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:5(340))
- Yong G. Lai and Blair P. Greimann (2007). Numerical modeling of alternate bar formation downstream of a dike .ASCE world environmental and water resources congress, tampa, florida, May 15-19.
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40927\(243\)390](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40927(243)390)
- Zhang, Y. F., Wang, P., Wu, B. S., Hou, S. Z (2015). An experimental study of fluvial processes at asymmetrical river confluences with hyperconcentrated tributary flows. *Geomorphology*, 230, 26-36.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.001>