Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p 33-50

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Generation of Unstructured Grids based on Sedimentation Data Obtained from the Map of Erosion and Sedimentation (Case Study: Dez Dam Watershed)

A. Daneh-Dezfuli[1*] and S.S. Bahrainian[2]

1- Correponding Author, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (a.danehdezfuli@scu.ac.ir).*
2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 5 June 2024
Revised: 21 August 2025
Accepted: 6 September 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Unstructured Grid, Sedemintation Data, Dez Dam Watershed.

TO CITE THIS ARTICLE:

Daneh-Dezfuli, A., Bahrainian, S. S. 2026. Generation of Unstructured Grids based on Sedimentation Data Obtained from the Map of Erosion and Sedimentation (Case Study: Dez Dam Watershed)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 33-50. doi: 10.22055/jise.2025.45666.2112

Abstract

This paper presents the generation of unstructured triangular grids based on the sediment data obtained from the erosion and sedimentation map of the Dez Dam watershed, covering an area of 17,320 km². The proposed grid generation algorithm starts the refinement process with a coarse initial grid. The grid refinement is an iterative process that simultaneously employs both point insertion and cell subdivision methods. Edge-based and cell-based connectivity matrices have been employed to accelerate the retrieval of grid information. An advantage of using these matrices is the minimal number of computations required to extract information for each grid element (vertex, edge, and cell). For instance, the database can identify the cells adjacent to an edge using only two computational operations. The improvement of the final grid quality is another aspect addressed in the proposed grid generation algorithm. The novelty of this paper lies in the use of erosion and sedimentation data for the adaptive distribution of grid vertices. In this study, erosion distribution data obtained from the PSIAC model were utilized to define edge sources. From a performance standpoint, the proposed algorithm produces unstructured grids in less than one second. More than 70% of the grid cells exhibit shapes close to equilateral triangles.

Introduction

Water resources are of fundamental importance to the socio-economic and environmental sustainability of Iran. Protecting these resources, particularly natural freshwater reservoirs such as dams, is a strategic necessity given the country's high dependence on surface water for agriculture, domestic use, and energy production. One of the most critical challenges threatening water reservoirs is sedimentation, primarily caused by soil erosion processes in upstream watersheds. Sediment transport leads to numerous environmental and operational problems: reduction in reservoir storage capacity, obstruction of irrigation networks and waterways, degradation of agricultural soils, increased river turbidity, and deterioration of water quality downstream. In addition, sediments act as carriers of nutrients and pollutants, intensifying ecological risks and drawing the attention of earth scientists and environmental engineers.

Mitigating these challenges requires implementing targeted soil conservation and watershed management strategies. A crucial prerequisite is the accurate quantification of soil erosion and sediment yield across watersheds and the identification of high-priority areas for intervention. To support effective modeling and decision-making, computational approaches such as grid

generation are widely employed. However, conventional grid generation often neglects the spatial variability of sediment distribution, which can limit its applicability in erosion and sediment transport modeling. The present study addresses this gap by developing an adaptive grid generation approach that incorporates sediment yield data as a controlling parameter. Specifically, the Dez Dam watershed, one of Iran's most important water reservoirs, is selected as a case study. The method involves generating unstructured triangular grids whose refinement is driven by sedimentation maps derived from the PSIAC model (Pourali et al., 2008). The novelty of the proposed approach lies in introducing the concept of edge sources to control both the distribution of vertices and the termination of the refinement process. By linking vertex density directly to sediment yield, the resulting grid provides an efficient and accurate foundation for hydrological and sediment transport simulations.

Methodology

The grid generation algorithm begins with an initial coarse triangular grid covering the study domain. Refinement is then carried out iteratively through point insertion and cell subdivision techniques (Bahrainian et al., 2015). To achieve computational efficiency, the algorithm employs edge-based and cell-based matrix data structures. These data structures reduce memory requirements and enable rapid access to grid elements. Once the main refinement steps are complete, a final grid quality enhancement phase is applied to improve geometric properties such as angle distribution and aspect ratio.

A central feature of the methodology is the use of grid adaptation to regulate vertex distribution across the computational domain. To implement this, edge sources are defined. These sources act as control agents that manage the desired edge lengths of cells during refinement. They also govern the continuation and automatic termination of the refinement process.

The operational procedure of edge sources can be summarized as follows. Prior to inserting a new vertex on an edge, the source measures the current edge length. If this length exceeds the target value defined for the corresponding region, vertex insertion is permitted. A critical aspect of this approach is the definition of desired edge lengths across different regions of the watershed.

As a case in point, for demonstration of the presented grid generation application, the Dez Dam watershed domain is divided into four regions with varying specific sediment yields: Region I (550 $m^3/km^2/yr$), Region II (750 $m^3/km^2/yr$), Region III (1150 $m^3/km^2/yr$), and Region IV (1550 $m^3/km^2/yr$).

To operationalize this setup, six edge sources (S1, S2, …, S6) are defined on the initial grid. Each source is represented as a vector with two spatial coordinates. For the placement of a new vertex along an edge, the vertical distance d of the midpoint of the longest edge from each edge source is calculated. The nearest source is then identified, and the orientation of vertex placement is determined by evaluating the sign of the dot product (S × r), where r is the vector from the edge midpoint to the corresponding edge source. This ensures that each new vertex is associated with one of the four sediment yield regions.

The desired edge length in each region, denoted as dl, is defined as a function of sediment yield according to the following equation: $dl=\alpha_i\times(Q_{s,\min}/Q_{s,i})$, i = I, II, III, and IV, where $0 \le \alpha_i \le 1$. Here, $Q_{s,\min}$ denotes the minimum sediment yield across all regions, while $Q_{s,i}$ represents the sediment yield in the ith region. The coefficient α_i can be uniformly applied to all regions or individually adjusted depending on model requirements. Finally, if the maximum selected edge length exceeds the desired value, the algorithm triggers the refinement process until the grid meets the specified resolution criteria.

Results and Discussion

Sediment yield data from the PSIAC model (Pourali et al., 2008) were integrated into the adaptive refinement procedure to generate the final grid for the Dez Dam watershed. The algorithm proved computationally efficient, producing refined grids in less than one second on standard computing hardware. The resulting grids exhibited several favorable characteristics. First, no skewed or degenerate cells were observed, confirming the robustness of the refinement strategy. Second, more than 70% of the triangular elements were close to equilateral in shape, reflecting

high geometric quality. Such quality is essential for ensuring numerical stability and accuracy in subsequent hydrological and sediment transport simulations. Third, the adaptive refinement successfully captured the spatial variability of sediment yield. Areas with higher sedimentation rates were represented by denser vertex distributions and smaller edge lengths, while regions with lower sedimentation rates retained coarser resolution. This adaptive representation ensures that computational resources are focused on critical regions without unnecessarily increasing grid complexity in low-priority areas.

The results highlight the effectiveness of edge sources in dynamically managing grid density. By linking vertex distribution directly to sediment yield data, the method produces grids that are both computationally efficient and hydrologically meaningful. This integration of sedimentological information into the grid generation process represents a significant improvement over traditional approaches that treat refinement as a purely geometric or uniform process.

Conclusions

This study presents a novel approach for generating unstructured triangular grids that integrate sediment yield data into the refinement process. Using the Dez Dam watershed as a case study, the method demonstrates how vertex distribution can be adaptively controlled through the concept of edge sources. These sources govern both the initiation and termination of refinement, ensuring that the resulting grid aligns with the spatial variability of sediment yield across the watershed.

In conclusion, the integration of erosion and sedimentation data into unstructured grid generation represents a promising advancement for computational watershed studies. The adaptive refinement guided by edge sources ensures that grid structures are not only computationally optimized but also environmentally relevant, thereby offering a practical pathway toward improved water resource management in sediment-sensitive regions such as the Dez Dam watershed.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this manuscript the authors used AI-assisted tools to a small degree for language polishing, grammar correction and making some sentences clearer. No AI tools were used to create data, perform analyses, produce results, and offer interpretations or list references. Every part of the content was carefully checked, confirmed and agreed upon by the authors. The authors are fully responsible for the correctness and honesty of the manuscript

Authors' contribution

First Author: Alireza Daneh-Dezfuli, Writing, Review & Editing, Writing Original Draft, Validation, Project Administration, Methodology.

Second Author: Seyed Saied Bahrainian, Writing, Review & Editing, Project Administration.

Acknowledgment

This research has no acknowledgments.

References

1- Bahrainian, S.S., Daneh-Dezfuli, A., Noghrehabadi, A. 2015. Unstructured grid generation in porous domains for flow simulations with discrete-fracture network model, *Transport in Porous Media 109*: pp. 693-709.

2- Pourali, S.H., Matkan, A.A. and Hosseini-Asl, A. 2008. Preparing the map of erosion hazard and sedimentation in Dez watershed by remote sensing and GIS. *Environmental Sciences, 8*(1): 83-100.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۵۰-۳۳

تولید شبکه‌های بی‌سازمان بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه‌های فرسایش و رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد دز)

علیرضا دنه‌دزفولی[1*] و سیدسعید بحرینیان[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. a.danehdezfuli@scu.ac.ir
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

دریافت:۱۴۰۳/۰۳/۱۶ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

چکیده

در این مقاله به تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب حوضه آبخیز سد دز با مساحتی بالغ بر ۱۷۳۲۰ کیلومتر مربع پرداخته شده است. الگوریتم تولید شبکه ارائه شده با یک شبکه اولیه درشت شروع به فرآیند ریزسازی شبکه می‌کند. فرآیند ریزسازی شبکه یک فرآیند تکرار است و به‌طور هم‌زمان از روش‌های جاگذاری گره و تقسیم سلول استفاده می‌برد. به‌منظور افزایش سرعت فراخوانی اطلاعات شبکه از پایگاه‌های داده‌ای با ماتریس‌های مبنا-ضلع و مبنا-سلول استفاده شده است. یک مزیت به‌کارگیری این پایگاه‌های داده‌ای در اندک بودن تعداد عملیات محاسباتی برای استخراج اطلاعات هر المان شبکه (گره، ضلع و سلول) است. به‌عنوان مثال، این پایگاه داده تنها با دو عملیات محاسباتی می‌تواند سلول‌های همسایه یک ضلع را مشخص نماید. بهبود کیفیت شبکه نهایی از دیگر گزینه‌هایی است که در الگوریتم تولید شبکه ارائه شده مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری مقاله ارائه شده در استفاده اطلاعات فرسایش و رسوب به‌منظور تطبیق و توزیع گره‌های شبکه بوده است. در این تحقیق از اطلاعات توزیع فرسایش به‌دست آمده مدل پسیاک در تعریف چشمه‌های ضلعی استفاده شده است. از نظر کیفی، الگوریتم ارائه‌شده در کمتر از یک ثانیه به تولید شبکه‌های بی‌سازمان خروجی می‌پردازد. بیش از ۷۰ درصد کل سلول‌های شبکه، شبیه‌ترین به مثلث متساوی‌الاضلاع بوده‌اند.

کلید واژه‌ها: شبکه بی‌سازمان، اطلاعات رسوب، حوضه آبخیز سد دز.

مقدمه

با توجه به اهمیت منابع آبی در کشور ایران، نیاز است تا از مخازن طبیعی نگهداری آب‌های شیرین مانند سدها محافظت بیشتری شود. یکی از مهمترین روش‌های حفظ این منابع آبی، انجام مدیریت صحیح در جهت کاهش فرسایش و تولید رسوب می‌باشد. نقش فرسایش و تولید رسوب در کاهش حاصلخیزی و هدر رفت خاک، کاهش حجم موثر مخازن سدها، گرفتگی و انسداد مجاری آبیاری، آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، گل‌آلود شدن آب رودخانه‌ها و کاهش کیفیت آب و آلودگی آب‌های مناطق پایین‌دست رسوب به‌عنوان حامل مواد آلاینده از دیر باز شناسایی شده و مورد توجه متخصصین و کارشناسان علوم زمین بوده است. برای جلوگیری و یا کاهش اثرات یاد شده، نیاز به مدیریت و اجرای اقدامات حفاظت خاک و کنترل رسوب می‌باشد. لازمه مدیریت و اتخاذ تصمیم درباره مهار فرسایش و رسوب، آگاهی از میزان فرسایش و تولید رسوب در یک حوضه آبخیز و شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی آن‌ها برای اجرای برنامه‌ها و اقدامات آبخیزداری برای کاهش فرسایش و مهار تولید و حمل رسوب است (Pourali et al., 2008).

عدم وجود یا کمبود داده‌ها در زمان فرسایش خاک و تولید رسوب در بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشور، کاربرد روش‌های تجربی به‌منظور برآورد فرسایش خاک و رسوب‌زایی را الزام می‌دارد. سالانه حجم قابل ملاحظه‌ای رسوب وارد سدهای کشور می‌شود که باعث کاهش عمر مفید سدها خواهند شد. برآورد میزان رسوب موجب می‌شود تا عوامل مهم در رسوب‌دهی حوضه آبخیز شناسایی شوند. پیش‌بینی تولید رسوب با استفاده از مدل‌های تشکیل رسوب در حوضه‌های آبخیز سدها یکی از روش‌های مدیریت صحیح است. این مدل‌ها مقدار تولید رسوب و توزیع آن را در یک حوضه آبخیز سد ارائه می‌دهند.

تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب حوضه آبخیز سد دز (مطالعه موردی) هدف از این مقاله است. حوضه آبخیز سد دز دارای مختصات جغرافیایی ´۱۰ و °۴۸ تا ´۲۱ و °۵۰ طول شرقی و ´۳۶ و °۳۲ تا ´۷ و °۳۴ عرض شمالی می‌باشد. حوضه آبخیز سد دز روی شش استان خوزستان، اصفهان، مرکزی، همدان، چهار محال و بختیاری و لرستان گسترده شده است. سهم مساحت هر یک از این استان‌ها در حوضه آبخیز سد دز و همچنین درصد مساحت هر یک در قیاس با دیگر استان‌ها در جدول (۱) خلاصه شده است. بر اساس داده‌های این جدول می‌توان دریافت که این حوضه آبخیز دارای ۱۷۳۲۰ کیلومتر مربع مساحت است. جانمایی هر یک از این شش استان در حوضه آبخیز سد دز در شکل (۱) نشان داده شده است.

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

جدول ۱- مساحت استان‌های مختلف واقع در حوضه آبخیز سد دز (Pourali et al., 2008)

Table 1- Area of different provinces located in Dez dam watershed (Pourali et al., 2008)

Province name	Area (km2)	Relative Area (%)
Khozestan	2305	13.3
Esfehan	1864	10.76
Markazi	1259	7.27
Hamadan	14	0.08
Chahar-o-Bakhtiyari	735	4.24
Lorestan	11143	64.35
Whole Watershed	17320	100

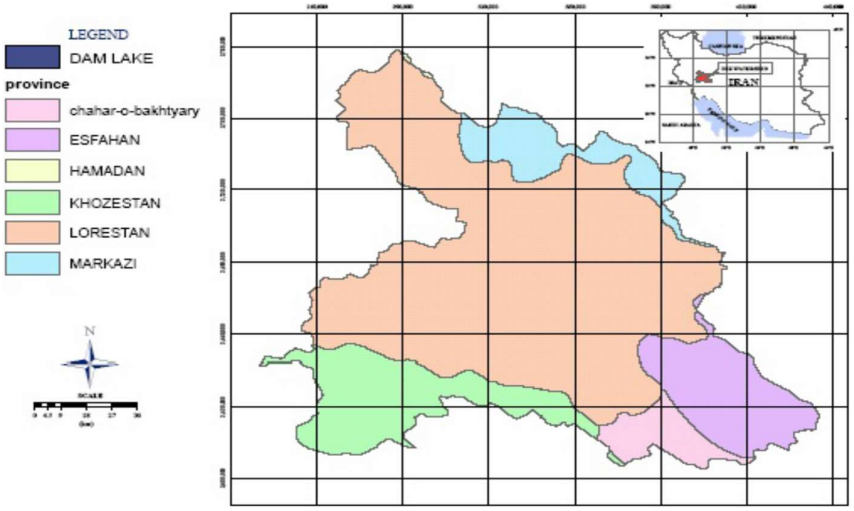


Fig 1- Location of different six provinces in Dez dam watershed (Pourali et al., 2008)

شکل ۱- موقعیت شش استان مختلف در حوضه آبخیز سد دز (Pourali et al., 2008)

تعریف مسئله

یک فرآیند تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی در حوضه آبخیز سدها نیاز دارد تا توزیع گره‌های شبکه تابعی از خصوصیات فرسایش و رسوب در آن حوضه باشد. نوآوری مقاله حاضر در استفاده از اطلاعات رسوب در فرآیند تولید شبکه است. توزیع تراکم رسوب بر حسب $m^3/km^2/Yr$ به عنوان ورودی به الگوریتم تولید شبکه داده می‌شود. از این اطلاعات در جهت تطبیق اتوماتیک تراکم گره‌های شبکه در نواحی مختلف حوضه آبخیز استفاده خواهد شد.

ساختار مقاله حاضر بدین شکل است که در بخش بعد به مطالعه تحقیقات صورت گرفته در خصوص تولید شبکه‌های بی‌سازمان پرداخته شده است. در ادامه به ارائه الگوریتم تولید شبکه‌های بی‌سازمان اختصاص داده شده است. سپس به مطالعه آماری شبکه‌های تولید شده پرداخته شده است. جمع‌بندی و تیجه‌گیری نتایج در بخش آخر ارائه شده است.

مروری بر تحقیقات پیشین

تولید شبکه‌های بی‌سازمان به‌صورت کاربردی توسط Weatherill (1988) و Baker (1989) به جامعه علمی معرفی شد. دو روش اساسی برای تولید شبکه‌های بی‌سازمان وجود دارند که بیش از دیگر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها شامل معیار تولید شبکه مثلثی Delaunay (1934) و Advancing Front Technique، Löhner (1988) است. معیار Delaunay (1934) ریشه در اصول هندسه محاسباتی دارد. روش Advancing Front یک روش ابتکاری در تولید شبکه‌های بی‌سازمان است. با این وجود روش‌های نوظهوری در تولید شبکه‌های بی‌سازمان علاوه بر شیوه‌های نام‌برده وجود دارند. روش جاگذاری گره و تقسیم سلول در زمره این روش‌ها است (Bahrainian et al., 2015).

معیار Delaunay (1934) منجر به تولید الگوریتم‌های بی‌شماری برای ساخت شبکه‌های بی‌سازمان شده است. نکته قابل توجه در این الگوریتم‌ها وجود عدم همزمانی در تولید گره و تشکیل مثلث‌ها است. به عبارت دیگر در این الگوریتم‌ها پیش از تعیین مثلث‌ها نیاز به ساخت مجموعه‌ای از گره‌ها می‌باشد. یکی از روش‌های تولید گره‌ها استفاده از دیاگرام‌های Voronoi است. این دیاگرام‌ها توسط Dirichlet (1850) و Voronoi (1908) ارائه شده‌اند.

Bowyer (1981) و Watson (1981) به‌صورت جداگانه ولی در یک زمان الگوریتمی برای تولید شبکه‌های مثلثی بر مبنای را ارائه کردند. این الگوریتم با یک شبکه اولیه مثلثی شروع می‌شود که با استفاده از معیار Delaunay (1934) ساخته شده است.

سپس گره‌های جدید را به‌ترتیب روی شبکه اضافه می‌کند. روش الگوریتم آن‌ها به این شرح است که ابتدا یک گره به شبکه اضافه می‌شود. سپس تمام سلول‌های موجود که شامل گره جدید هستند از شبکه حذف می‌شوند. با این عمل یک حفره در شبکه به‌وجود می‌آید. در انتها از هر گره روی مرز حفره به سوی گره جدید یک ضلع عبور داده می‌شود.

Sloan و Houlsby (1984) الگوریتم Watson (1981) را به‌صورت یک کد کامپیوتری ارائه نمودند. این کد با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FORTRAN 77 تهیه شده است. شبکه اولیه در این الگوریتم از تشکیل مثلث‌هایی روی دیاگرام Dirichlet (1850) به‌دست می‌آید. Rebay (1993) به تعمیم و بهینه‌سازی الگوریتم Bowyer (1981) و Watson (1981) در تولید شبکه‌های بی‌سازمان بر مبنای معیار Delaunay (1934) پرداخت. مثلث‌های اولیه در این تعمیم از اتصال گره‌های روی مرز خارج و سطح جسم جامد ساخته می‌شود.

الگوریتم Projection دیدگاه دیگری است که در تولید شبکه استفاده می‌شود (Imai, 2000). شبکه تولید شده با این الگوریتم، معیار Delaunay (1934) را نیز ارضا می‌سازد. الگوریتم Projection، مسئله تولید شبکه را از یک سطح دوبعدی به یک رویه سه‌بعدی با تشکیل یک پوشش محدب انتقال می‌دهد. این الگوریتم گره‌های شبکه دوبعدی را روی رویه محدب تصویر می‌کند. سپس گره‌های تصویر شده روی رویه، تشکیل یک پوشش مثلثی را خواهند داد. در انتها این گره‌ها به همراه اضلاع بین آن‌ها از فضای سه بعدی به فضای دوبعدی بازتصویر می‌شوند.

Chew (1989) به‌منظور غلبه بر مشکلات عدم حفظ مرزهای شبکه به معرفی روش تولید شبکه بر مبنای معیار Constrained Delaunay پرداخت. اندازه اضلاع سلول‌های مثلثی در این روش پیش از شروع ریزسازی شبکه تعیین می‌شود. نتیجه اصلی کار آن است که با این روش یکپارچگی مرزهای دامنه حفظ خواهد شد.

کاربردهای چشم‌گیر Advancing Front Technique در حوضه تولید شبکه‌های بی‌سازمان توسط Pirzadeh (1992)، معرفی گردیدند. این روش شامل تولید سلول در هر لحظه روی یک لبه پیش‌رو است. تولید شبکه‌های دوبعدی در این روش با گسسته‌سازی مرزهای هندسی شروع می‌شود. این اضلاع تشکیل دهنده لبه پیش‌رو هستند که قرار است به داخل میدان حرکت کنند. در هر لحظه یک ضلع انتخاب می‌شود و یک مثلث جدید توسط آن خلق می‌شود. قاعده این مثلث روی لبه قرار دارد و رأس دیگر آن که یک گره جدید است درون میدان قرار دارد. دیگر اضلاع این لبه به‌طور مشابه توسط مثلث‌های جدید پوشیده می‌شوند. پیشانی لبه با تولید هر مثلث جابه‌جا می‌شود. بنابراین لبه پیش‌رو یک صف الویت‌دار را تشکیل می‌دهد که اضلاع مدام به آن ورود و یا خروج پیدا می‌کنند. فرآیند تولید شبکه زمانی خاتمه می‌یابد که صف خالی گردد. یعنی هنگامی که تمام لبه‌ها با یکدیگر ممزوج شوند و دامنه کاملاً پوشیده شده باشد. علت اصلی این فرآیند در تولید سلول‌هایی بسیار شبیه به مثلث متساوی‌الاضلاع است.

Daneh-Dezfuli و Bahrainian (2014) به ارائه الگوریتمی جدید برای تولید شبکه‌های بی‌سازمان در هندسه مخازن هیدروکربوری تحت‌الارضی پرداختند. پیش از آن، این الگوریتم برای تولید شبکه‌های محاسباتی در مسائل زمین‌شناسی استفاده شده است. در این مقاله بناست تا به توسعه این الگوریتم برای تولید شبکه در حوضه آبریز سد دز پرداخته شود.

کنترل کیفیت شبکه شامل توانایی تولید میدان‌های گسسته‌ای است که دارای توزیع مناسب گره‌ها (انباشتگی)، شامل سلول‌هایی با نسبت ظاهری مناسب (چولیدگی) و تغییرات حجم یکنواخت (هموار) است (Spragle et al., 1991). مکانیزم کنترل کیفیت بر مبنای فرآیندهایی از ظهور سلول‌های نامناسب ممانعت می‌گردد. چرا که اثر حضور یک سلول نامناسب می‌تواند در شبکه گسترش یابد و بر کیفیت شکل دیگر سلول‌های محاسباتی تأثیر گذارد.

روش تولید شبکه‌های بی‌سازمان

در این مقاله بنا است تا با استفاده از روش تولید شبکه ارائه شده به گسسته‌سازی حوضه آبخیز سد دز بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب پرداخته شود. شبکه‌ای که با استفاده از روش ارائه شده تولید می‌شود، دامنه فیزیکی را به تعدادی از زیردامنه‌های مثلثی تقسیم می‌سازد. $i=1,...,N$ تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی را نشان می‌دهد. این تقسیم‌بندی دارای ویژگی‌های زیر است:

۱- Ω_i یک چند ضلعی محدب است.

۲- $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset$.

۳- اگر $\Omega_i \cap \Omega_j \neq \emptyset$ باشد، آنگاه :

۳-۱- اشتراک Ω_i و Ω_j در یک گره است.

۳-۲- اشتراک Ω_i و Ω_j در یک ضلع است.

در ادامه، روش تهیه شبکه اولیه، نحوه تشکیل ماتریس‌های اتصالات و همچنین فرآیند ریزسازی شبکه اولیه بیان شده است. براین اساس، تولید شبکه بی‌سازمان نهایی در دامنه حوضه آبخیز سد دز بدون در نظر گرفتن اطلاعات رسوب و سپس با تطبیق شبکه نهایی تولیدشده با استفاده از اطلاعات تولید رسوب به دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب ارائه شده است.

شبکه اولیه

روش تولید شبکه ارائه شده بر اساس یک فرآیند تکرار به ساخت شبکه‌های مثلثی می‌پردازد. هر فرآیند تکرار نیاز به یک حدس اولیه دارد. حدس اولیه این روش یک شبکه اولیه است. شبکه اولیه یک شبکه درشت در هندسه مسئله است. شکل (۲) نمایی از شبکه اولیه تهیه شده در دامنه حوضه آبخیز سد دز شکل (۱) را نشان می‌دهد.

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

شبکه اولیه شکل (۲) دارای ۵۴۱ گره، ۱۰۴۱ ضلع و ۵۲۰ سلول مثلثی است. ویژگی شبکه اولیه تهیه شده آن است که تنها توسط گره‌های مرزی ساخته شده است. به عبارت دیگر، در ساخت این شبکه نیازی به استفاده از گره‌های داخلی نیست.

ماتریس‌های اتصالات شبکه

اهمیت ساخت شبکه اولیه علاوه بر استفاده به‌عنوان حدس اولیه روش تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی، در تهیه ماتریس‌های اتصالات شبکه نیز است. ماتریس‌های اتصالات شبکه شامل ماتریس‌های مبنا–ضلع و مبنا–سلول است. از این دو ماتریس به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود تا تعداد عملیات‌های محاسباتی در فراخوانی اطلاعات شبکه کاهش یابد. ماتریس مبنا–ضلع شامل اطلاعات سلول‌های همسایه هر ضلع به همراه گره‌های تشکیل‌دهنده آن ضلع است. ماتریس اتصالات مبنا–سلول در برگیرنده اطلاعات ضلع‌های هر سلول به علاوه گره‌های سازنده آن سلول هست.

ماتریس‌های اتصالات مبنا–ضلع و مبنا–سلول به همراه ماتریس ذخیره اطلاعات گره‌های شبکه تشکیل یک پایگاه داده را می‌دهند. نمودار بلوک دیاگرام این پایگاه داده در شکل (۳) نشان داده شده است.

از ویژگی‌های پایگاه داده ارائه شده در کاهش حافظه موردنیاز کامپیوتر به منظور ذخیره اطلاعات شبکه است. چرا که در این پایگاه نیازی به ذخیره اطلاعات ضمنی شبکه مانند طول اضلاع و یا سطح سلول‌ها وجود ندارد. ویژگی دیگر پایگاه داده ارائه شده در کاهش تعداد عملیات‌های محاسباتی در یافتن اطلاعات شبکه است. به‌عنوان مثال برای یافتن لیست گره‌های یک سلول در پایگاه داده مورد استفاده تنها نیاز به سه عملیات محاسباتی است.

روش ریزسازی شبکه

روش ریزسازی شبکه در الگوریتم ارائه شده برمبنای یک فرآیند تکرار است. هر شبکه در الگوریتم ارائه شده محصول دنباله‌ای از ریزسازی شبکه اولیه طی چند حلقه تکرار است. به‌منظور ریزسازی شبکه در هر حلقه، ابتدا سلول‌های شبکه برمبنای اندازه سطح آن‌ها در یک صف مرتب می‌شوند. سپس بلندترین ضلع بزرگ‌ترین سلول صف انتخاب شده و یک گره جدید در میانه آن ضلع جاگذاری می‌شود. در ادامه این گره به گره‌های روبه‌روی آن گره در سلول‌های مجاور (طرفین) آن ضلع متصل می‌شود تا دو سلول جدید ساخته شود. اطلاعات گره‌های روبه‌رو و سلول‌های مجاور با استفاده از ماتریس‌های اتصالات استخراج می شوند. برای نمایش بهتر اجرای روش ریزسازی شبکه ارائه شده، یک مرحله ریزسازی شبکه اولیه شکل (۲) در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۴) مشاهده می‌شود با جاگذاری یک گره جدید، سلول‌های همسایه آن ضلع، هر یک به دو سلول تقسیم شده‌اند. بدین ترتیب، دو سلول جدید به تعداد کل سلول‌های شبکه اضافه می‌شود.

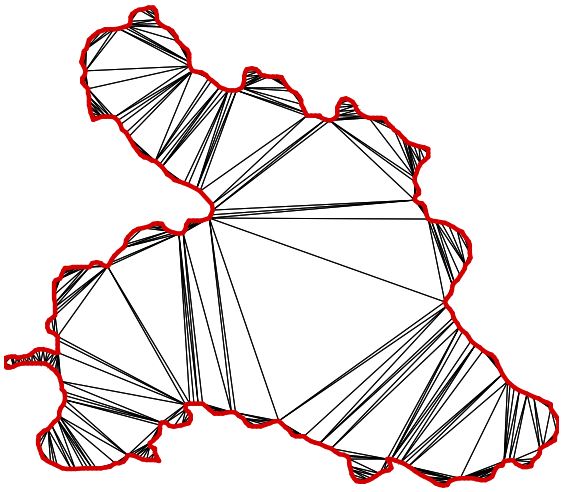


Fig. 2- Initial grid generated in Dez dam watershed
شکل۲- شبکه اولیه تولیدشده در دامنه حوضه آبخیز سد دز

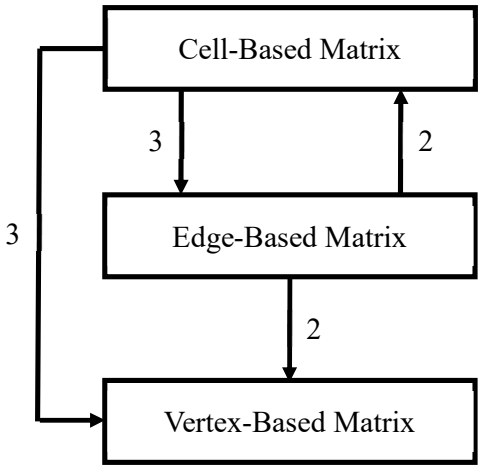


Fig. 3- Block diagram of grid data structure
شکل۳- بلوک دیاگرام پایگاه داده شبکه

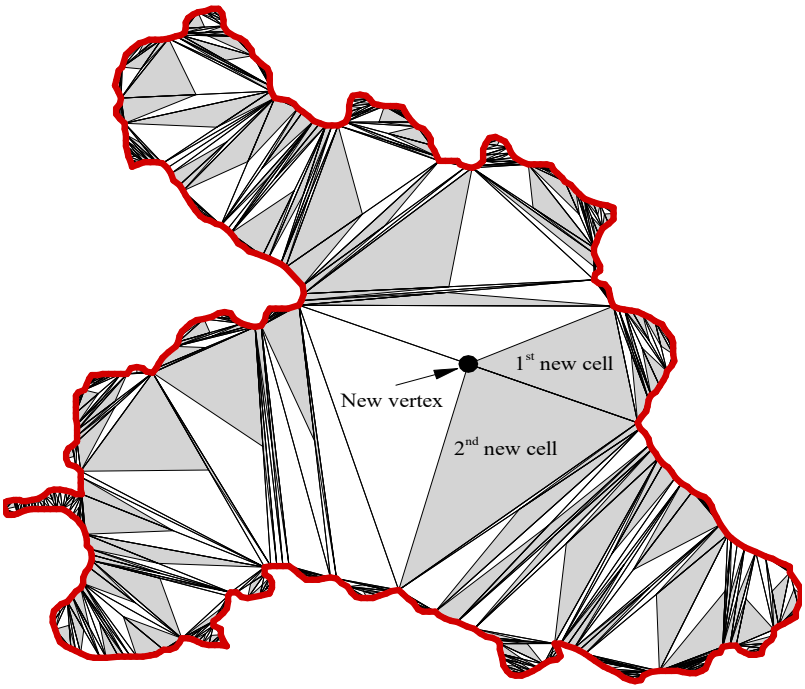


Fig. 4- One refinement stage of initial grid
شکل٤- یک مرحله ریزسازی شبکه اولیه

هاشورزدن سلول‌های جدید در شبکه شکل (۴) به‌منظور تمایز آن‌ها از سلول‌های شبکه اولیه است. با یک مرحله ریزسازی شبکه اولیه، تعداد ۴۱۳ سلول جدید به سلول‌های شبکه افزوده شده است. شبکه تولید شده در انتهای یک مرحله ریزسازی دارای ۷۴۸ گره، ۱۶۶۱ ضلع و ۹۳۳ سلول مثلثی است.

بهبود کیفیت شبکه

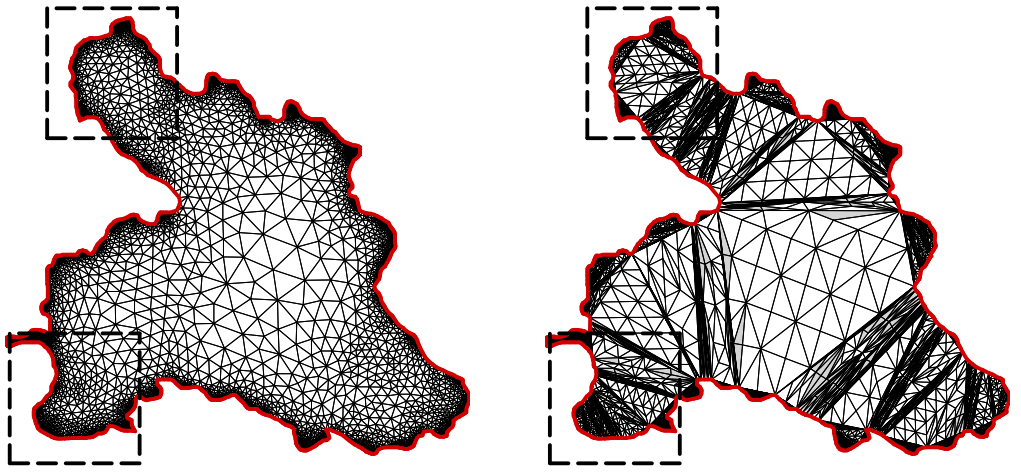
از دو الگوریتم بهبود کیفیت شبکه به‌منظور افزایش کیفیت نهایی شبکه‌های بی‌سازمان خروجی استفاده شده است (Bahrainian et al., 2015). اولین الگوریتم شامل روش تعویض ضلع است. روش تعویض ضلع دو سلول شبکه را حذف و آن‌ها را با دو سلول دیگر جایگزین می‌دارد. مجموع سطوح دو سلول جایگزین شده در این روش با مجموع دو سلول حذف شده برابر است. الگوریتم بهبود کیفیت دیگر شامل روش هموارسازی گره‌های شبکه است. روش هموارسازی بدون تغییر اتصالات (اضلاع) و تنها با جابه‌جایی موقعیت گره‌ها به بهبود کیفیت شبکه می‌پردازد. تصویری از شبکه نهایی تولید شده بدون و با استفاده از روش‌های بهبود کیفیت شبکه پس از پنج مرحله ریزسازی شبکه اولیه در شکل

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

(۵) نشان داده شده است. اطلاعات اندازه شبکه (تعداد گره‌ها، ضلع‌ها و سلول‌ها) و درصد تعداد سلول‌های با نسبت منظری (AR) کوچک‌تر از ۰/۳ در جدول (۲) خلاصه شده است. در اینجا، نسبت منظری به‌صورت طول کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین ضلع هر سلول تعریف شده است. سلول با $AR < ۰/۳$ ، چولیده نامیده می‌شود. به‌منظور سادگی در تشخیص، سلول‌های چولیده در شکل (۵) با هاشور خاکستری متمایز شده‌اند.

از مطالعه اطلاعات جدول (۲) نتیجه می‌شود که ۲۱/۵ درصد شبکه تولیدشده بدون استفاده از روش‌های بهبود کیفیت با سلول‌های چولیده پر شده است. این در حالی است که شبکه شکل (۵-ب) دارای سلول‌های مثلثی کاملا شبیه‌ترین به مثلث متساوی الاضلاع و بدون هیچ‌گونه سلول چولیده است. این ویژگی به‌واسطه استفاده از روش‌های بهبود کیفیت شبکه به‌دست آمده است. به‌منظور نمایش بهتر کیفیت سلول‌های مثلثی تولیدشده در شبکه‌های نهایی شکل (۵)، نمای بزرگ‌نمایی‌شده از سلول‌های واقع درون خط‌چین‌های گوشه‌های شمال غرب و جنوب غرب حوضه آبریز دو شبکه نهایی تولیدشده در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سلول‌های نمایش داده شده در شبکه تولیدشده شکل (۶-ب) بواسطه اعمال روش‌های بهبود کیفیت شبکه، شبیه‌ترین به مثلث‌های متساوی‌الاضلاع هستند. این در حالی است که در شبکه تولیدشده شکل (۶-الف) شامل سلول‌های چولیده می‌باشد که تأثیر منفی بر کیفیت شبکه و در نهایت کاهش دقت در محاسبه گرادیان‌های متغیرهای هیدرولیکی خواهند داشت.

به‌منظور مطالعه بیشتر کیفیت شبکه نهایی، به استخراج آماری توزیع زوایای میان اضلاع داخلی شبکه پرداخته شده است. این نتایج در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. نتایج این شکل برای دو شبکه تولید شده بدون و با استفاده از روش‌های بهبود کیفیت نسبت به یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، زوایای داخلی میان اضلاع در شبکه نهایی تولیدشده بدون بهبود کیفیت دارای ۴۶ درصد زوایای تند کوچک‌تر از ۵۰ درجه و ۳۳/۴ درصد زوایای باز بزرگ‌تر ۷۰ درجه هستند. این مطلب بیان می‌دارد که حدود ۷۹/۴ درصد سلول‌های شبکه از نوع سلول‌های چولیده هستند. اما در شبکه نهایی تولید شده با بهبود کیفیت شبکه تعداد این زوایا بسیار کاهش یافته است. علاوه بر این، ۶۸/۴ درصد زوایای داخلی شبکه در بازه ۵۰ تا ۷۰ درجه هستند. به عبارت دیگر، حدود ۷۰ درصد سلول‌های شبکه، شبیه‌ترین به مثلث متساوی‌الاضلاع هستند.



(a) Without employing grid quality improvment (b) With employing qrid quality improvment

Fig. 5- Final grid output in Dez dam watershed without grid adaptation
شکل۵- شبکه نهایی تولید شده در حوضه آبخیز سد دز بدون تطبیق شبکه

جدول۲- اطلاعات شبکه‌های خروجی شکل (۵)

Table 2- Information of Fig. 5's output grids

Grid name	No. of Vertices	No. of Edges	No. of Cells	AR ≤ 0.3 (%)
Output grid without quality improvment	5550	15375	9845	21.5
Output grid with quality improvment	5618	15701	10103	ZERO

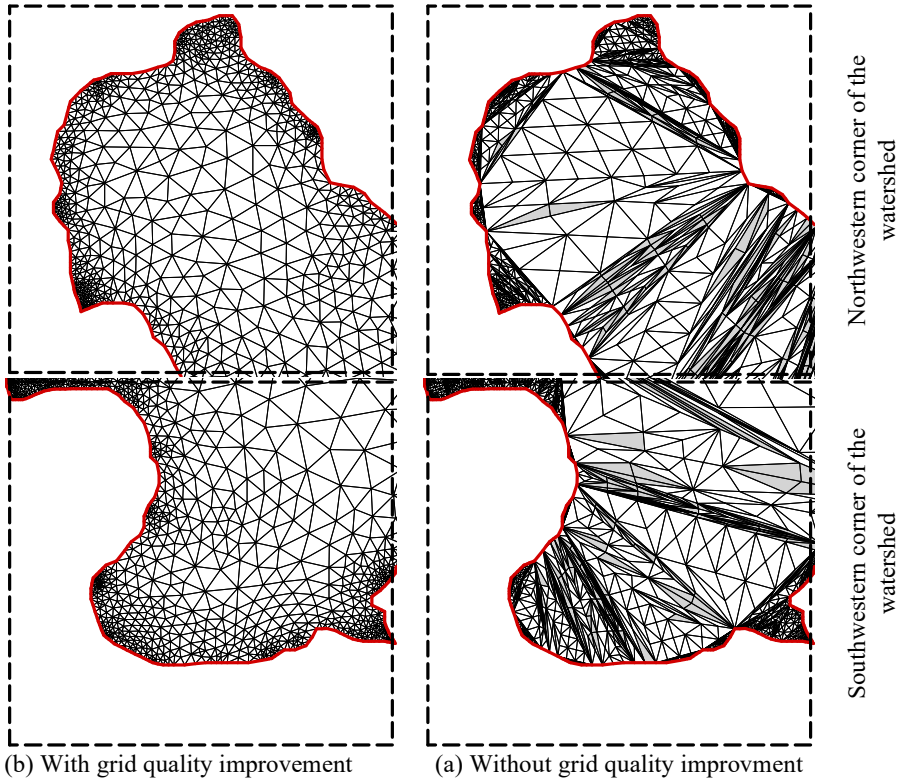


Fig. 6- Magnification view from dashed line corner of Fig. 5 final grid

شکل٦- نمای بزرگنمایی‌شده از شبکه‌های درون خط‌چین‌های شبکه‌های نهایی شکل (۵)

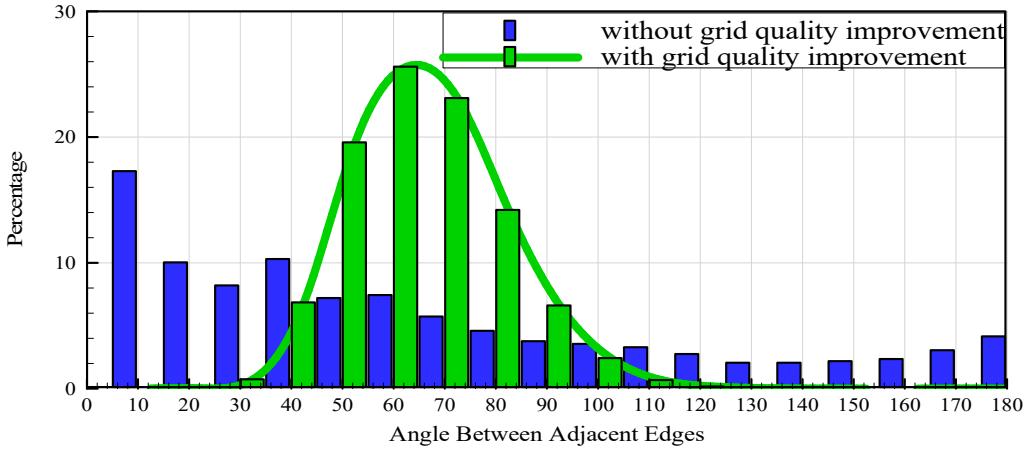


Fig 7- Distribution of interior angles between edges in the final grid

شکل۷- توزیع زوایای داخلی میان اضلاع در شبکه نهایی

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

تطبیق شبکه‌های مثلثی با استفاده از اطلاعات تولید رسوب

در این بخش روش تطبیق شبکه بر اساس اطلاعات تولید رسـوب ارائه شده است. اطلاعـات تولید رسوب توسط مدل فرسایش‌پذیری پسیاک برآورد می‌شوند. سپس از نتایج این مدل جهت توزیع گره‌های شبکه استفاده می‌شود.

مدل تولید رسوب پسیاک

در مدل پسیاک برای ارزیابی فرسایش‌پذیری و تولید رسوب سالانه یک حوضه آبریز از نه پارامتر استفاده می‌شود. این پارامترها شامل زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، آب و هوا، رواناب، پستی و بلندی، پوشش زمین، کاربری اراضی، وضعیت فرسایش فعلی و فرسایش کانالی هستند. پارامترهای زمین‌شناسی، خاک، توپوگرافی، پوشش زمین و کاربری اراضی به عنوان پارامترهای طبیعی مرتبط با جغرافیای منطقه مطرح می‌شوند. این پارامترها به پارامتر آب و هوا یا بارندگی عکس‌العمل نشان داده و موجب توسعه فرآیند فرسایش خندقی و رودخانه‌ای می‌شوند. عکس‌العمل پارامترهای طبیعی مرتبط با جغرافیای منطقه در تقابل بارندگی با پارامترهای دیگر تحت عنوان رواناب و انتقال رسوب در کانال آبراهه بیان می‌شود.

هر یک از نه پارامتر مدل تولید رسوب پسیـاک با امتیازی بین صفـر تا ۱۵۰ امتیازدهی می‌شوند. پس از تعیین مقدار امتیاز هر یک از نه پارامتر و به دست آوردن مجموع امتیاز آن‌ها از جدول (۳) برای بـرآورد فرسایش‌پذیری و تولید رسوب در حوضـه آبخیـز استفاده می‌شود. شایان ذکر است که اندازه تولید رسوب در این مدل با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Pourali et al., 2008).

$$Q=38/77\ e(0/0353R) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، R درجه رسوب‌دهی یعنی مجموع امتیاز نه پارامتر مدل تولید رسوب و فرسایش‌پذیری پسیاک است و Q رسوب سالانه بر حسب متر مکعب بر کیلومتر مربع می‌باشد.

اطلاعات تولید رسوب در حوضه آبخیز سد دز

نقشه نهایی اطلاعات تولید رسوب و فرسایش‌پذیری حاصل از جمع پارامترهای نه‌گانه مدل پسیاک در حوضه آبخیز سد دز در شکل (۸) نشان داده شده است. حداکثر مجموع امتیاز پارامترهای نه‌گانه مدل پسیاک در این حوضه برابر با ۱۴۷ بوده است. براساس اطلاعات این نقشه، تقریباً ۳۵ درصد حوضه آبخیز سد دز در زمره نواحی با فرسایش و تولید رسوب خیلی زیاد بوده است.

جدول۳- میزان رسوب و فرسایش در روش پسیاک (Pourali et al., 2008)

Table 3- Erosion value and sediment in PSIAC technique (Pourali et al., 2008)

Sediment Class	Intensity of Sedimentation	Sedimentation *M3/km2*	R-score of PSIAC Technique
V	Very High	1429>	100>
IV	High	1429 - 476	100 - 75
III	Average	476 - 238	75 - 50
II	Low	238 - 95	50 - 25
I	Very Low (Little)	95<	25 - 0

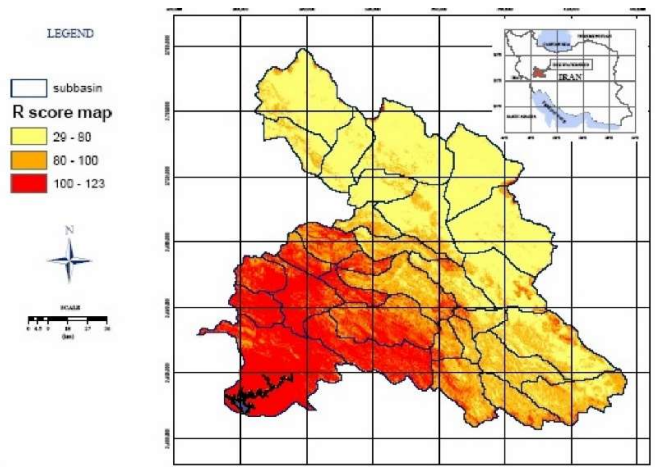


Fig 8- Final score map of erosion and sediment production from combination of PSIAC model's 9 parameters (Pourali et al., 2008)

شکل۸- نقشه امتیاز نهایی فرسایش و تولید رسوب حاصل از جمع پارامترهای نه‌گانه مدل پسیاک (Pourali et al., 2008)

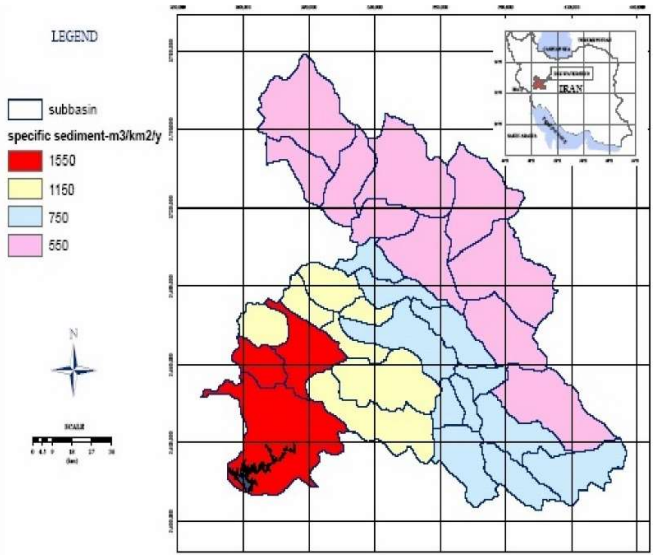


Fig 9- Final specific sediment map in Dez dam watershed (Pourali et al. 2008)

شکل۹- نقشه نهایی رسوب ویژه در حوضه آبخیز سد دز (Pourali et al., 2008)

مقدار برآورد اولیه تولید رسوب طبق رابطه (۱) حدود ۱۷۲۶۷۲۴۵ مترمکعب در سال در تمام اراضی حوضه آبخیز سد دز بوده است. این برآورد اولیه با استفاده از مقدار اندازه‌گیری شده رسوب در محل سد دز مقایسه و کالیبره شد. برای کالیبره نمودن رسوب، این مقدار برآورد اولیه بر عدد رسوب حاصل از بررسی مخزن سد دز تقسیم شد. عدد رسوب مخزن سد دز برابر با ۱۵/۳ میلیون مترمکعب در سال بوده است. نتیجه این کالیبراسیون تولید نقشه نهایی تولید رسوب ویژه، Q_s، در حوضه آبخیز سد دز بوده است. این نقشه در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، تولید رسوب ویژه در حوضه آبخیز سد دز به چهار ناحیه کلی تقسیم می‌شود. در ادامه از اطلاعات نقشه شکل فوق برای تطبیق توزیع گره‌های شبکه نهایی تولید شده در حوضه آبخیز سد دز استفاده شده است.

روش تطبیق شبکه

روش تطبیق شبکه به‌منظور مدیریت توزیع گره‌ها در سراسر شبکه است. بدین منظور از تعریف چشمه‌های ضلعی استفاده شده است. این چشمه به‌صورت خودکار حین فرآیند ریزسازی شبکه به مدیریت و کنترل طول مطلوب اضلاع سلول می‌پردازند. از طرف دیگر کنترل خودکار فرآیندریزسازی و اتمام این فرآیند توسط همین چشمه‌های ضلعی صورت می‌گیرد.

روش استفاده از چشمه‌های ضلعی بدین شکل است که این چشمه‌ها پیش از فرآیند جاگذاری گره جدید روی هر ضلع، طول آن

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

ضلع را اندازه‌گیری می‌کنند. سپس چنانچه طول ضلع موردنظر بزرگتر از طول ضلع مطلوب در هر ناحیه از شبکه باشد، اجازه جاگذاری گره جدید را می‌دهند. نکته قابل توجه در تعریف طول ضلع مطلوب در هر ناحیه است. در این مقاله، شبکه بر حسب نقشه نهایی رسوب ویژه شکل (۹) دارای چهار ناحیه با طول اضلاع متفاوت باشد. نواحی موردنظر در شکل (۱۰) به‌صورت I، II، III و IV نام‌گذاری و نشان داده شده است. مقدار رسوب ویژه، Q_s، در این نواحی به‌ترتیب برابر با ۵۵۰، ۷۵۰، ۱۱۵۰ و ۱۵۵۰ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال است. براین اساس، تعداد شش چشمه ضلعی، به‌صورت بردارهای S_1، S_2 و ... و S_6 بر شبکه اولیه شکل (۲) هر یک توسط دو مختصات مکانی تعریف می‌شود. موقعیت هندسی این چشمه‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. به‌منظور جاگذاری یک گره جدید بر روی یک ضلع شبکه، ابتدا فاصله عمودی آن گره، d، نسبت به هر یک از چشمه‌ها سنجیده می‌شود. با تعیین نزدیکترین چشمه، برای قرارگیری گره نسبت به آن چشمه با محاسبه علامت ضرب داخلی (S×r) تعیین می‌شود. براین اساس، جاگذاری هر گره جدید الزاما در یکی از چهار نواحی توزیع رسوب ویژه قرار خواهد گرفت. طول ضلع مطلوب، dl، در هر ناحیه به‌صورت ضریبی، α، از مقدار رسوب ویژه یعنی $dl = \alpha_i \times (Q_{s,\min}/Q_{si})$ به‌دست می‌آید که در آن $0 \le \alpha_i \le 1$ و i=I, II, III, IV است. قابل ذکر است که ضریب α_i می‌تواند برای هر چهار ناحیه مقدار دلخواه خود را داشته باشد و یا یک مقدار یکسان برای کلیه نواحی استفاده شود. در انتها، چنانچه طول بزرگترین ضلع انتخابی از طول ضلع مطلوب بزرگتر باشد، آنگاه الگوریتم ریزسازی شبکه اجازه اجرا پیدا خواهد کرد.

به‌منظور مطالعه اثر حساسیت ضریب طول ضلع مطلوب، نمایش چهار شبکه به ترتیب به ازای ۰/۰۹ ,۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۳ = α در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، توزیع چگالی گره‌ها در سراسر شبکه به‌صورت ناهمگن در چهار ناحیه است. این ناهمگنی گره‌های شبکه به‌دلیل کنترل و مدیریت توزیع آن‌ها توسط چشمه‌های ضلعی می‌باشد. بر این اساس در شبکه نهایی تولید شده، چهار اندازه متفاوت از اضلاع شبکه قابل مشاهده است. اطلاعات اندازه شبکه‌های تولیدشده در جدول (۴) خلاصه شده است. کد تولید شبکه توسط نرم‌افزار FORTRAN برنامه‌نویسی شده است. سخت‌افزار مورد استفاده شامل یک پردازنده دوهسته‌ای ۲/۸ گیگاهرتزی و حافظه کوتاه مدت دو گیگابایتی بوده است.

به‌منظور مطالعه بیشتر شبکه‌های شکل (۱۱)، فرآیند ریزسازی شبکه به ازای هر یک از ضرایب مورداستفاده در تعریف چشمه‌های ضلعی در شکل (۱۲) نمودار شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فرآیند تولید سلول (ریزسازی شبکه) در مراحل ۱۲، ۱۱، ۹ و ۷ به‌ترتیب به ازای α برابر با ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۹ خاتمه پیدا کرده است. این موضوع به دلیل محدودیتی است که توسط چشمه‌های ضلعی ایجاد می‌شود و خاتمه فرآیند ریزسازی شبکه به‌صورت خودکار شکل می‌گیرد.

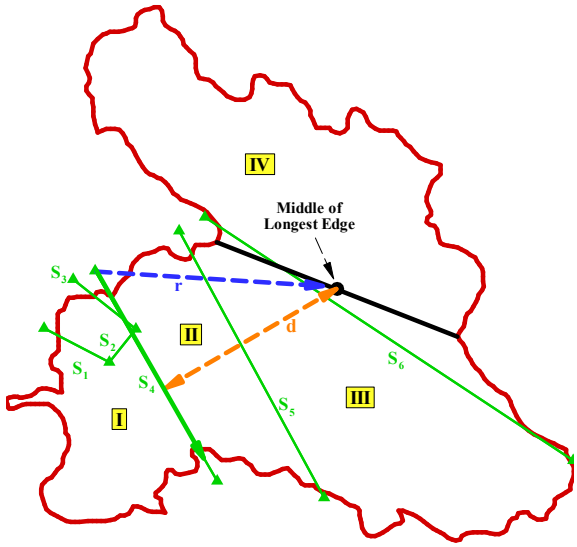
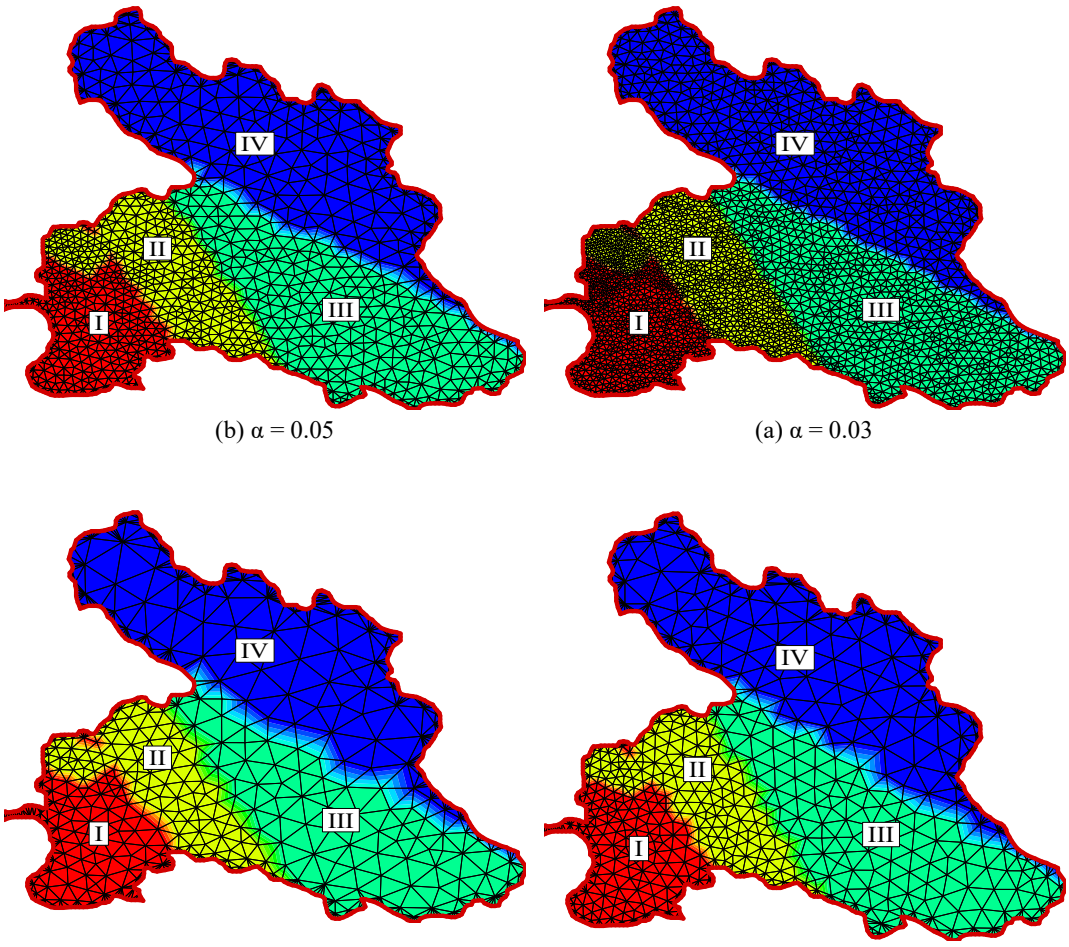


Fig. 10- Location of the edge sources defined on the map of Dez dam watershed
شکل ۱۰- جانمایی چشمه‌های ضلعی تعریف‌شده بر نقشه حوضه آبخیز سد دز



(b) α = 0.05 (a) α = 0.03

(d) α = 0.09 (c) α = 0.07

Fig. 11- Output adaptive grids in Dez dam watershed based on the Fig. 9 sediment information

شکل۱۱- شبکه‌های تطبیقی خروجی در حوضه آبخیز سد دز براساس اطلاعات رسوب شکل (۹)

جدول٤- اطلاعات شبکه‌های خروجی شکل (۱۱)

Table 4- Information of Fig. 11's output grids

α	No. of Vertices	No. of Edges	No. of Cells	CPU Time (s)
0.03	2963	8305	5362	0.93
0.05	1445	3753	2328	0.88
0.07	1022	2484	1482	0.81
0.09	856	1986	1150	0.74

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

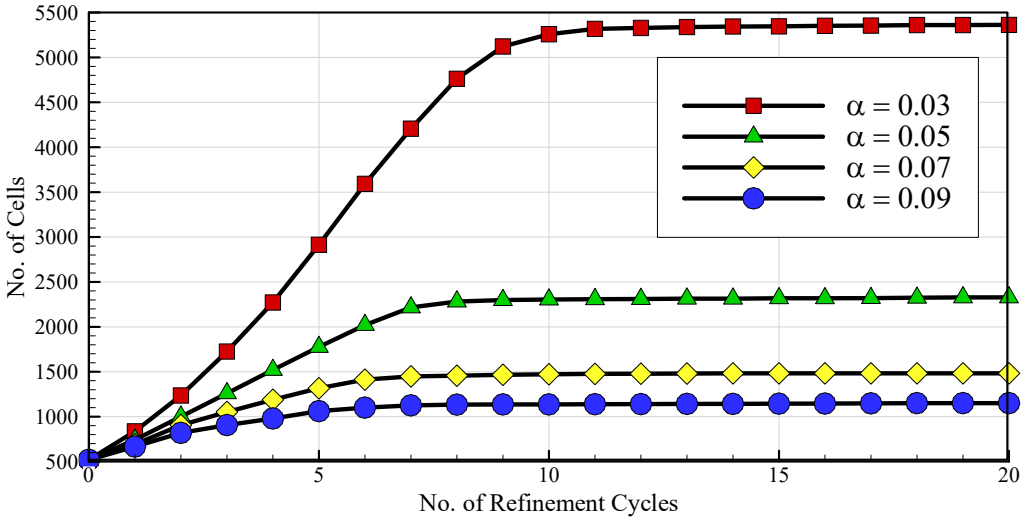


Fig. 12- Refinement procedure of the Fig. 11's adaptive grids
شکل۱۲- فرآیند ریزسازی شبکه‌های تطبیقی شکل (۱۱)

نتیجه‌گیری

لزوم اهمیت دادن به منابع آبی کشور ایجاب می‌کند تا از مخازن طبیعی نگهداری آب‌های شیرین مانند سدها محافظت بیشتری شود. در این مقاله، به تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب حوضه آبخیز سد دز پرداخته شده است. الگوریتم تولید شبکه ارائه شده براساس یک شبکه اولیه درشت شروع به ریزسازی شبکه می‌کند. شبکه اولیه مورد استفاده در هندسه حوضه آبخیز سد دز دارای ۵۴۱ گره، ۱۰۴۱ ضلع و ۵۲۰ سلول مثلثی است. لازم به اشاره است که در ساخت این شبکه تنها از گره‌های مرزی هندسه استفاده شده است.

فرآیند ریزسازی شبکه به‌صورت تکرار بوده است. در ریزسازی سلول‌های شبکه به‌طور همزمان از روش‌های جاگذاری گره و تقسیم سلول استفاده شده است. به‌منظور افزایش سرعت فراخوانی اطلاعات شبکه حین ریزسازی شبکه از پایگاه داده‌ای با ماتریس‌های مبنا- ضلع و مبنا- سلول استفاده شده است. مزیت به‌کارگیری این پایگاه داده در پایین بودن تعداد عملیات‌های محاسباتی برای استخراج اطلاعات هر المان (گره، ضلع و سلول) شبکه است.

افزایش کیفیت شبکه نهایی تولید شده از دیگر گزینه‌هایی است که در الگوریتم تولید شبکه ارائه شده مورد توجه قرار گرفته است. دو روش تعویض ضلع و هموارسازی گره‌های شبکه به‌منظور بهبود کیفیت شبکه در این الگوریتم انتخاب شده‌اند. اثر استفاده از روش‌های بهبود کیفیت شبکه طی یک مطالعه آماری میان دو شبکه نهایی تولید شده بدون بهبود کیفیت و با بهبود کیفیت شبکه مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقایسه نشان داده شد که در شبکه تولید شده بدون بهبود کیفیت بیش از نیمی از سلول‌های شبکه از نوع سلول‌های چولیده و با کیفیت ظاهری بسیار پایین بوده‌اند. این در حالی است که در شبکه نهایی تولید شده با بهبود کیفیت شبکه، حدود ۷۰ درصد سلول‌های شبکه شبیه‌ترین به مثلث متساوی‌الاضلاع بوده‌اند. علاوه براین به طور کامل از تولید و خلق سلول‌های چولیده در شبکه نهایی جلوگیری به عمل آورده شده است.

در فرآیند تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی در حوضه آبخیز سد دز به تطبیق توزیع گره‌های شبکه بر اساس خصوصیات فرسایش و رسوب در آن حوضه نیز پرداخته شده است. بدین منظور از تعریف چشمه‌های ضلعی استفاده شده است. این چشمه‌ها به‌صورت خودکار به کنترل ادامه و یا توقف فرآیند ریزسازی می‌پردازند. علاوه‌براین به مدیریت توزیع گره‌های شبکه در نواحی مختلف شبکه براساس اطلاعات توزیع فرسایش نیز می‌پردازند. در این تحقیق از اطلاعات توزیع فرسایش به‌دست آمده از مدل پسیاک استفاده شده است. سپس این اطلاعات به الگوریتم تولید شبکه داده شد تا برمبنای آن‌ها به محاسبه اندازه طول اضلاع شبکه در نواحی مختلف آن پرداخته شود. الگوریتم تولید شبکه ارائه شده در کمتر از یک ثانیه به تولید شبکه خروجی می‌پردازد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در طول تهیه این مقاله، تا حد کمی از ابزارهای هوش مصنوعی برای اصلاح زبان، اصلاح دستور زبان و واضح‌تر کردن برخی جملات استفاده کردند. هیچ ابزار هوش مصنوعی برای ایجاد داده‌ها، انجام تجزیه و تحلیل‌ها، تولید نتایج و ارائه تفسیرها یا فهرست منابع استفاده نشده است. هر بخش از محتوا با دقت توسط نویسندگان بررسی، تأیید و مورد توافق قرار گرفت. نویسندگان کاملاً مسئول صحت و صداقت مقاله هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: علیرضا دنه‌دزفولی، نگارش، بررسی و ویرایش، نگارش پیش‌نویس اصلی، اعتبارسنجی، مدیریت پروژه، روش‌شناسی.

نویسنده دوم: سیدسعید بحرینیان، نگارش، بررسی و ویرایش، مدیریت پروژه.

تقدیر و تشکر

این مقاله فاقد تقدیر و تشکر است.

References

1- Bahrainian, S.S., Daneh-Dezfuli, A., Noghrehabadi, A. 2015. Unstructured grid generation in porous domains for flow simulations with discrete-fracture network model, *Transport in Porous Media 109*: pp. 693-709.

2- Baker, T.J. 1989. Automatic mesh generation for complex three-dimensional regions using a constrained delaunay triangulation. *Engineering with Computers, 5*(3-4). pp. 161-175. Doi: 10.1007/BF02274210

3- Bowyer, A. 1981. Computing Dirichlet tessellations. *Computer Journal, 24*(2). pp.162-166. Doi: 10.1093/comjnl/24.2.162

4- Chew, L.P. 1989. Constrained Delaunay triangulation. *Algorithmica, 4*(1). pp. 97-108. Doi: 10.1145/41958.41981

5- Daneh-Dezfuli, A. and Bahrainian, S.S. 2014. A grid generation algorithm for reservoir domains with discrete fracture networks. *International Journal of Oil, Gas & Coal Technology, 8*(4). pp. 417-431. Doi: 10.1504/IJOGCT.2014.066303

6- Delaunay, B. 1934. Sur la Sphère Vide, A la Mémoire de Georges Voronoi. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. Classe des sciences mathématiques et na, issue 6, pp. 793–800 (In French).

7- Dirichlet, G.L. 1850. Über die Reduktion der positiven quadratischen Formen mid drei unbestimmten ganzen Zahlen. *Journal für die reine und angewandte Mathematik, 40*. 209-227 (In French). Doi: 10.1515/crll.1850.40.209

8- Imai, K. 2000. Structures of triangulations of points. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E83-D(3). 428-437.

9- Löhner, R. 1988. Some useful data structures for the generation of unstructured grids. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 4*(1). 123-135. Doi: 10.1002/cnm.1630040116

10- Pirzadeh, S. 1992. Recent progree in unstructured grid generation. *30th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 92-0445, Reno, NV*. Doi: 10.2514/6.1992-445

11- Pourali, S.H., Matkan, A.A. and Hosseini-Asl, A. 2008. Preparing the map of erosion hazard and sedimentation in Dez watershed by remote sensing and GIS. *Environmental Sciences, 8*(1). 83-100.

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

12- Rebay, S. 1993. Efficient Unstructured Mesh Generation by Mean of Delaunay Triangulation and Bowyer-Watson Algorithm, *Journal of Computational Physics 106*(1). pp. 125-138.

13- Sloan, S.W. and Houlsby, G.T. 1984. An implemenstation of Watson's algorithm for computing 2-dimensional Delaunay triangulations. *Advances in Engineering Software, 6*(4). 192-197.

14- Spragle, G.S., McGrory, W.R., and Fang, J. 1991. Comparison of 2D unstructured grid generation techniques. 20th AIAA Aerospace Sciences Meeting, *AIAA Paper 91-0726, Reno, NV*. Doi: 10.2514/6.1991-726

15- Voronoi, G.F. 1908. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. *Journal für die reine und angewandte Mathematik, 134*. 198-287 (In French). Doi: 10.1515/crll.1908.134.198

16- Watson, D.F. 1981. Computing the n-dimensional tessellation with application to voronoi polytopes. *Computer Journal, 24*(2). 167-172. Doi: 10.1093/comjnl/24.2.167

17- Weatherill, N.P. 1988. A method for generating irrigular computational grids in multiply connected planar domains. *International Journal for Numerical Methods in Fluids, 8*(2). 181-197. Doi: 10.1002/fld.1650080206