



DOI: [10.71167/uacg.2025.580308](https://doi.org/10.71167/uacg.2025.580308)

Получена: 13.06.2025 г.

Приета: 24.06.2025 г.

ИЗТОЧНИЦИ НА ВХОДНА НЕСИГУРНОСТ И ТЯХНОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ПРОГНОЗАТА ЗА ОПАСНОСТ ОТ НАВОДНЕНИЯ

М. Маврова-Гиргинова¹, С. Мечкарова²

Ключови думи: наводнения, несигурност, Монте Карло симулации

РЕЗИЮМЕ

Във водосбори, които са слабо наблюдавани, или във водосбори, в които не се правят измервания, степента на несигурност при прогнозирането на риска от наводнения е висока. За съжаление това е често срещана картина в България. Наличието на климатични промени и несигурността при определяне на основни входни параметри като водно количество, коефициент на грапавина по Манинг и др. влияят чувствително при моделиране на наводнения. В търсене на адаптивни и надеждни стратегии за управление на риска от наводнения в подобни условия, несигурността се оценява количествено чрез метода Монте Карло за генериране на вероятностни резултати.

1. Въведение

В края на 40-те години на 20 век Станислав Улам изобретява съвременната версия на метода Монте Карло с веригата на Марков, докато работи по проекти за ядрени оръжия в Националната лаборатория в Лос Аламос [1]. През 1946 г. физиците в Лос Аламос изследват дифузията на неутрони в ядрото на ядрено оръжие. Въпреки че разполагат с повечето от необходимите данни, те не успяват да решат проблема с помощта на конвенционални, детерминистични математически методи. Улам предлага

¹ Мария Маврова-Гиргинова, проф. д-р инж., кат. „Хидротехника и хидромелиорации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: margir_fhe@uacg.bg

² Славка Мечкарова, гл. ас. д-р инж., кат. „Хидротехника и хидромелиорации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: mechkarova_fhe@uacg.bg

да се използват случайни експерименти. Той разказва за вдъхновението си по следния начин:

„Първите мисли и опити, които направих да практикувам [метода Монте Карло], бяха подсказани от един въпрос, който ми хрумна през 1946 г., докато се възстановявах от болест и играех на пасианси. Въпросът беше какви са шансовете пасианс на Канфийлд с 52 карти да излезе успешен? След като прекарах много време в опити да ги изчисля чрез чисто комбинаторни изчисления, се замислих дали по-практичен метод от „абстрактното мислене“ не би било да го подреда, да речем, сто пъти и просто да наблюдавам и да броя броя на успешните изигравания. Това вече беше възможно да се осъществи с настъпването на новата ера на бързите компютри и аз веднага се сетих за проблемите на неутронната дифузия и други въпроси на математическата физика, а в по-общ план – как да се променят процесите, описани с определени диференциални уравнения, в еквивалентна форма, интерпретируема като поредица от случайни операции. По-късно (през 1946 г.) описах идеята на Джон фон Нойман и започнахме да планираме реални изчисления“ [2].

Тъй като работата на фон Нойман и Улам е секретна, тя изисква кодово име. Колегата на фон Нойман и Улам, Николас Метрополис, предлага да се използва името Монте Карло, което се отнася до казиното Монте Карло в Монако, където чичото на Улам вземал пари назаем от роднини, за да играе хазарт. Методите Монте Карло заемат централно място в симулациите, необходими за по-нататъшното следвоенно развитие на ядрените оръжия, включително проектирането на водородната бомба, макар и силно ограничени от изчислителните инструменти по това време. Фон Нойман, Никълъс Метрополис и други програмират компютъра ENIAC за извършване на първите напълно автоматизирани изчисления Монте Карло през пролетта на 1948 г. През 50-те години на 20 век корпорацията Ранд и Военновъздушните сили на САЩ са две от основните организации, отговорни за финансирането и разпространението на информация за методите Монте Карло, и те започват да намират широко приложение в много различни области.

2. Входна несигурност при моделиране на открити течения

Моделирането на открити речни течения е една от основните задачи в хидродинамиката. По този начин се генерира информация за разпространението на замърсители, ефективността на хидротехническите съоръжения, поведението при екстремно високи води и др. Въпреки напредъка в числените методи и изчислителните техники, едно от основните предизвикателства при тези изследвания е входната несигурност. Тази несигурност се отнася до входните данни, които се използват за изграждане и симулиране на модели на открити течения, и има изключително важно значение за точността и надеждността на резултатите от моделите [3].

Входната несигурност може да произтича от различни източници, като основните от тях включват неточности в измерванията или липса на измервания на водно количество, скорост, дълбочина и др. [4]; невъзможност за точно описание на топографията и морфологията на терена; грешки на прогнозата, когато се използват, например климатични модели за генериране на входни данни за моделиране на открити течения; предположения и приближения на хидродинамичния модел и др.

Влиянието на входната несигурност върху точността и надеждността на прогнозите, получени от моделите на открити течения, може да бъде значително. В зависимост от чувствителността на модела, малки вариации в началните условия или

параметри биха довели до значителни различия в резултатите. Това може да затрудни прилагането на модела при вземане на решения. При проектиране на хидротехнически съоръжения или управление на наводнения, например, дори малки отклонения могат да имат сериозни последици. В тези случаи несигурността може пряко да повлияе на безопасността и ефективността на решенията.

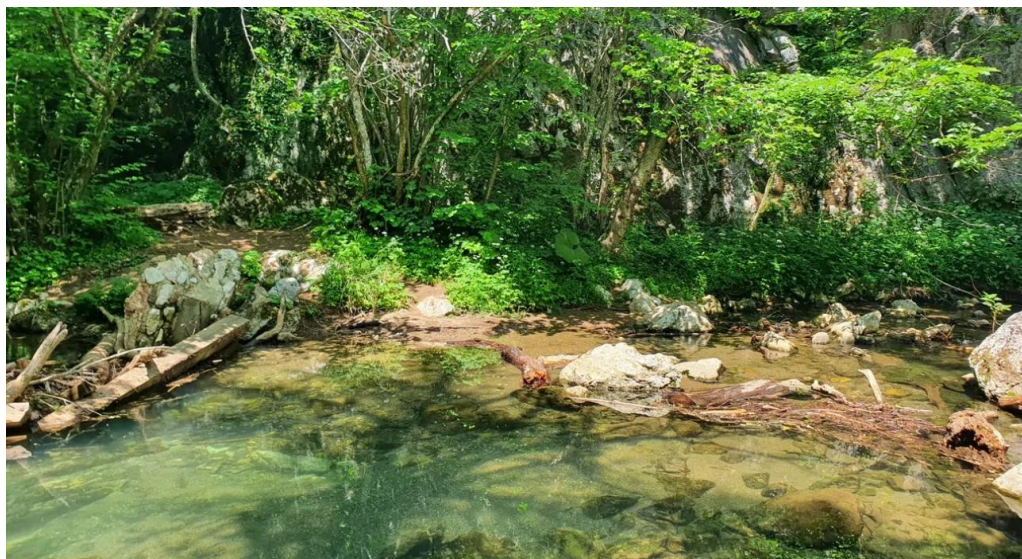
За справяне с входната несигурност се използват различни подходи, които могат да подобрят разбирането и да минимизират влиянието на несигурността върху резултатите. Калибрирането на хидродинамичните модели на открити течения стои безспорно на първо място [4]. Но у нас се налага да работим преди всичко в слабо наблюдавани водосбори, или такива, в които изобщо не се правят измервания. Без емпирични данни калибрирането, т.е. настройването на параметрите на модела, така че да се минимизират разликите между прогнозите на модела и наблюдаваните резултати, е невъзможно.

Универсален е подходът на анализа на чувствителността, който изследва как промените в различни входни параметри влияят на резултатите от модела [5]. Чрез този анализ може да се идентифицират ключовите параметри, които имат голямо въздействие върху резултатите, и да се фокусира вниманието върху тях.

Настоящото изследване използва подхода на стохастичното моделиране и методите Монте Карло, които предлагат друг начин да се включи несигурността в моделите. Методите Монте Карло позволяват генериране на множество сценарии с различни входни данни и оценка на резултатите като вероятностни разпределения, което предоставя по-богата информация относно несигурността в прогнозите [6 – 8].

3. Обект на изследване

Избраният район за числено моделиране се намира в поречието на р. Младежка в района на Странджа.

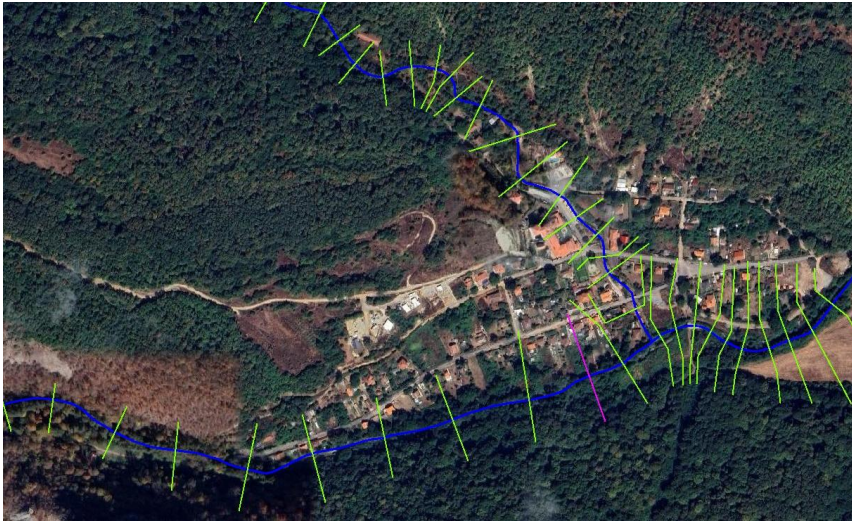


Фиг. 1. Река Младежка

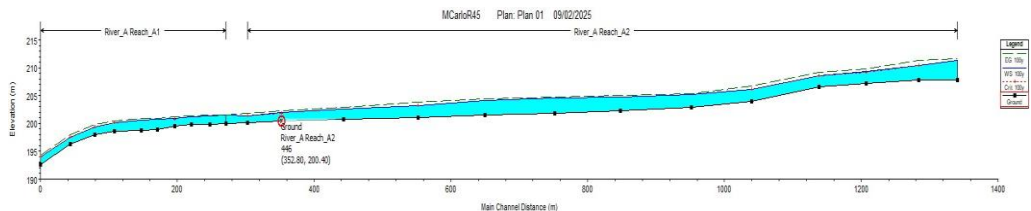
Цифровият модел на терена е създаден въз основа на карти в мащаб 1:5000. Водосборът е ненаблюдаван. Хидроложки данни за високи води са получени въз основа на регионални зависимости.

Моделирана е заплахата от наводнение на село Младежко. Хидродинамичните модели са разработени и симулирани в детерминистичен и вероятностен анализ в средата на HEC-RAS.

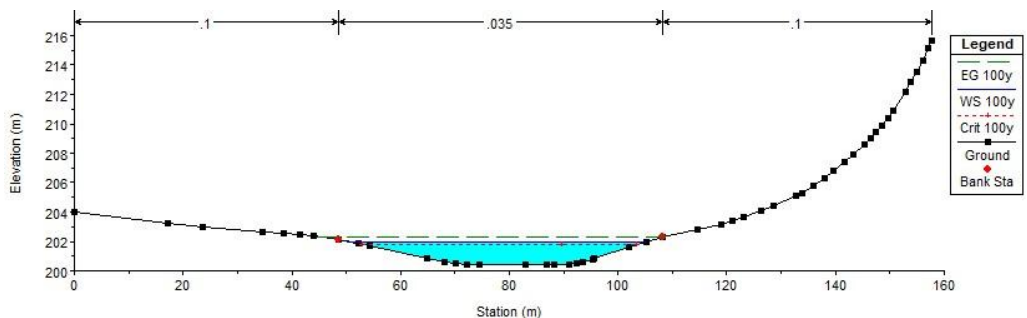
Избрано е контролно напречно сечение, ориентирано към центъра на селото, разположено в левия, полегат бряг на реката.



Фиг. 2. 1D хидродинамичен модел на заплахата от наводнение на с. Младежко и контролно напречно сечение А-А



Фиг. 3. Надлъжен профил и място на контролното сечение А-А

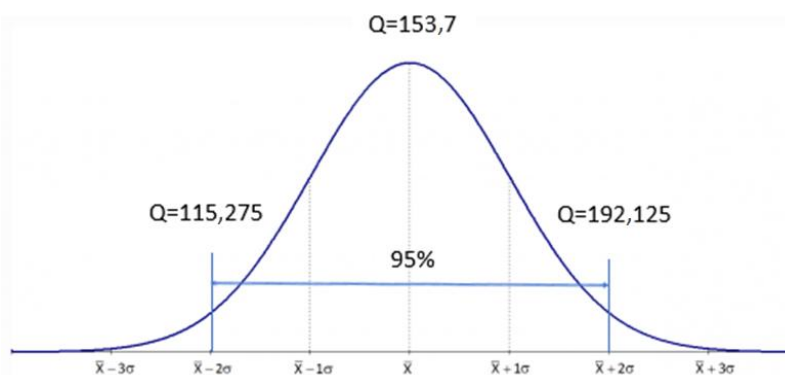


Фиг. 4. Контролно сечение А-А за анализ на промените в симулираните водни нива

4. Вероятностен подход и симулации Монте Карло

В настоящия момент Монте Карло е често използван метод за апроксимиране на резултатите от решения на задачи, при които входните данни са с висока степен на несигурност. Приложенията на метода се различават в широки граници, подкрепяйки усилията за вземане на решения, основани на риск, в различни области на науката, инженерството, застраховането, финансите, спорта и т.н. За статистически валидни резултати симулацията Монте Карло може да изисква многократни реализации, чийто брой може да достигне десетки или стотици хиляди, в зависимост от броя на избраните входни параметри и допустимата грешка. В случая с хидродинамичното моделиране на открити течения, изпълнението на едно решение по несложен нестационарен модел в средата на HEC-RAS може да отнеме минути при избран за изследване един брой входен параметър. Една едноминутна реализация на модела, изпълнена 10 000 пъти, ще отнеме почти седем дни [9]. В проекта се използват възможностите за четене и запис на входни файлове на HEC-RAS, които правят осъществимо автоматизирането на процеса, в случая с помощта на създадени на Visual Basic текстове на програми. За намаляване на изчислителното време е избрано да се работи с еднодименсионален хидродинамичен модел при стационарно движение.

Принципно вероятностният подход трябва да оцени всички значителни несигурни входни величини, които влизат в хидродинамичния модел. Те могат да включват, например коефициент на оттока, коефициент на грапавина, гранични условия, изчислителни параметри като изчислителна стъпка и зададена точност. В настоящото изследване се разглеждат две от несигурните входни величини в хидродинамичното моделиране, които внасят неточности, а именно стойностите на максималния отток и коефициента на грапавина.



Фиг. 5. Нормално разпределение на възможните стойности на Q_{100} при очаквана/средна стойност $Q_{100} = 153,7 \text{ m}^3/\text{s}$

Ако се използват данните от хидроложкия анализ, публикуван в Доклада [10], то регионалните зависимости за модула на максималния отток за района на Южно Бургаски реки са определени със значителна несигурност при средна процентна грешка на получените регионални зависимости до 25 – 30 %. Ето защо при определяне на

максималния отток с обезпеченост 1 % (Q_{100}), вероятно грешим значително, например плюс или минус 25 %. За да се улови тази несигурност във входните стойности на максималния отток с обезпеченост 1 %, може да се конструира нормално разпределение със средна стойност, равна на очакваната стойност на Q_{100} , и стандартното отклонение, дефинирано така, че по-голямата част от възможните стойности да попадат в камбановидната извивка. Тук използваме нормално разпределение, което често дава добро описание на случайни величини, групирани около средна стойност.

Фигура 5 илюстрира нормално разпределение на възможните стойности на Q_{100} . Очакваната или средната стойност за Q_{100} е $153,7 \text{ m}^3/\text{s}$ с диапазон от плюс/минус 25 %. Задаването на тези граници на стандартно отклонение σ показва, че вярваме с 95 % увереност, че истинската стойност на Q_{100} ще бъде някъде между $115,275 \text{ m}^3/\text{s}$ и $192,125 \text{ m}^3/\text{s}$, концентрирана около очакваната стойност от $153,7 \text{ m}^3/\text{s}$ чрез нормално разпределение. За всяка реализация в симулацията Монте Карло стойността на Q_{100} ще бъде избрана на случаен принцип. На теория при достатъчен брой реализации, 95 % от произволно избраните стойности на Q_{100} ще бъдат между $115,275 \text{ m}^3/\text{s}$ и $192,125 \text{ m}^3/\text{s}$, а средната стойност на всички избрани стойности на Q_{100} ще бъде $153,7 \text{ m}^3/\text{s}$. С други думи, избраните стойности на Q_{100} ще следват формата на приетото нормално разпределение.

Получените резултати следва да се обработят статистически, за определяне на тяхната обезпеченост въз основа на несигурността на входните стойности на Q_{100} . Вместо заплахата от наводнение в дадено напречно сечение да се представи с дълбочина или с кота водно ниво (детерминистичният подход), тук заплахата ще се характеризира с вероятностно разпределение на възможните стойности на дълбочината, респективно на котата на водната повърхност, което по своята същност признава несигурността на стойностите на Q_{100} , отразява нейното влияние и информира за вероятността даден обект да бъде наводнен от сто годишната вълна Q_{100} .

Аналогично, ако изследваният входен параметър бъде коефициентът на грапавина на Манинг, приеман в хидродинамичния модел на откритото течение параметър, който винаги представлява значителен източник на входна несигурност, вместо да избираме нашето „най-добро приближение“ на стойностите на коефициента на Манинг с традиционните детерминистични подходи, ще признаем несигурността и ще я определим количествено, като използваме метода Монте Карло за генериране на вероятности резултати.

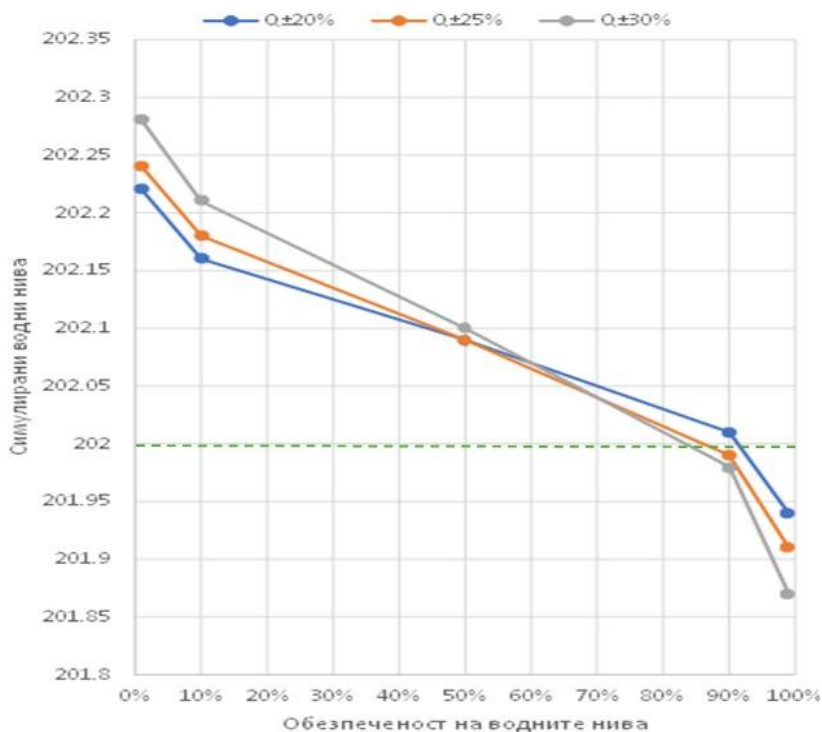
Тук първо се дефинира статистическото разпределение на възможните стойности на коефициента на Манинг за всяко напречно сечение. Очакваната (средна) стойност на коефициента на Манинг може да бъде определена въз основа на снимки, уравнения, опит и експертна оценка или комбинация от всички. Въпреки това, и тук трябва да признаем, че приближението може да бъде погрешно със значителна разлика, например до плюс или минус 25 процента. За да се улови тази несигурност във входните стойности на коефициента на Манинг, конструираме също нормално разпределение със средна стойност, равна на очакваната стойност на коефициента, и стандартното отклонение, дефинирано така, че по-голямата част от възможните стойности да попадат в камбановидната извивка. Например ако очакваната или средната стойност на грапавината в дадено напречно сечение е $0,035$ с диапазон от плюс/минус 25 %, задаването на тези граници на стандартно отклонение показва, че вярваме с 95 %

увереност, че истинската стойност на N на Манинг ще бъде между 0,02625 и 0,04375, концентрирана около очакваната стойност от 0,035 чрез нормално разпределение.

С вероятностния подход оценяваме поединично влиянието на всяка от двете несигурни входни величини – Q_{100} и коефициент на Манинг, като изследваме три степени на несигурност при тяхната оценка – че грешим с плюс или минус 20 %, 25 % и с 30 %.

5. Резултати и дискусия

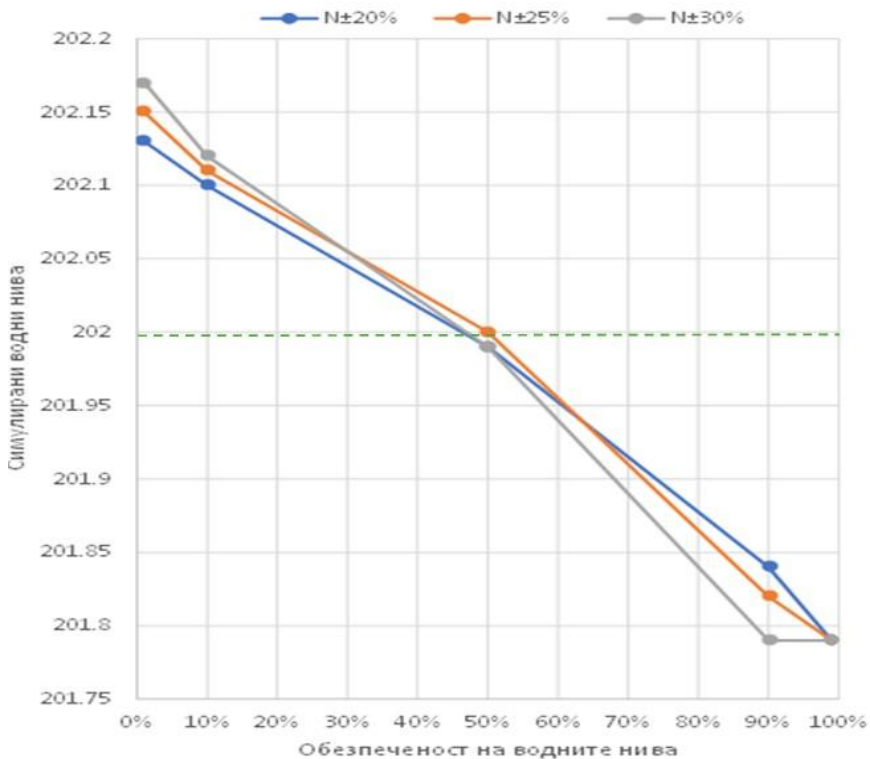
Получените резултати за влиянието на входната несигурност върху заплахата от наводнение на село Младежко от сто годишна висока вълна са илюстрирани в контролно сечение А-А. Следват кривите на обезпеченост на симулираните по модела водни нива в избраното сечение, като в синьо се показват последиците от влиянието на съответния входен параметър при 20 % несигурност; в оранжево – при 25 %, а в сиво – при 30 % несигурност, съответно за входен параметър Q_{100} (за краткост: Q) и за коефициент на Манинг (N). Зелената пунктирна линия, съответстваща на водно ниво 201,991, изобразява прогнозата за заплаха по детерминистичния сценарий с приети стойности на Q и N равни на очакваните средни стойности: $Q = 153,7 \text{ m}^3/\text{s}$ и $N = 0,035$.



Фиг. 6. Обезпеченост на симулираните водни нива при различна степен на несигурност на входен параметър Q_{100} (за краткост: Q). В синьо при несигурност 20 %, в оранжево 25 % и в сиво 30 %

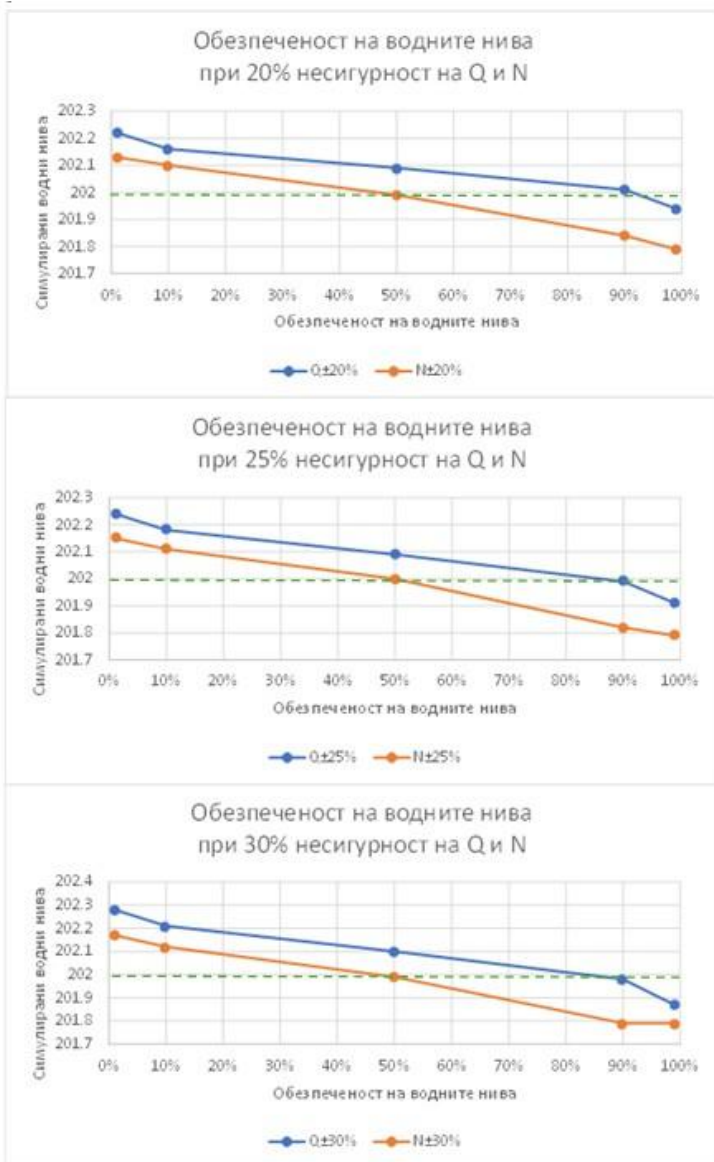
На фигури 6 и 7 може да се проследи влиянието на несигурността на входните параметри водно количество Q , респективно коефициент на грапавина по Манинг N върху заплахата от наводнение в контролното сечение. Вероятностното изследване показва, че допускането на несигурност във входните параметри води до занижаване на много вероятните водни нива и повишаване на малко вероятните водни нива спрямо детерминистичната прогноза с приети стойности на Q и N , равни на очакваните средни стойности.

От друга страна се наблюдава тенденция с увеличаване на несигурността оценките на много вероятните водни нива на заливане с обезпеченост 99 % и 90 % да се понижават, докато оценките на водните нива с обезпеченост 10 % и 1 % да нарастват.



Фиг. 7. Обезпеченост на симулираните водни нива при различна степен на несигурност на входен параметър коефициент на Манинг (N). В синьо при несигурност 20 %, в оранжево 25 % и в сиво 30 %

Анализът на чувствителността показва, че в разгледания пример на ненаблюдаван водосбор входната несигурност на хидрологията има по-голямо въздействие върху резултатите за оценка на заплахата от наводнение, отколкото несигурността във входния параметър грапавина – коефициент на Манинг. Фигури 8 демонстрират това сравнение при равни нива на несигурност на разглежданите входни параметри.



Фиг. 8. Чувствителност на симулираните водни нива от степента на несигурност на Q_{100} (за краткост: Q) и коефициента на Манинг (N)

6. Заключение

Входната несигурност е неизбежен компонент в моделирането на открити течения, но с използването на съвременни методи за анализ и управление на несигурността може да се постигне значително подобрение в точността и надеждността на прогнозите. Чрез комбинирането на методи за анализ на чувствителността и стохастични техники, можем да създадем модели, които по-добре отразяват реалните

условия за по-информирано вземане на решения в областта на управление на водните ресурси и в частност за защита от наводнения.

Извършените числени експерименти по метода Монте Карло позволиха проблемът с входната несигурност да се третира стохастически. Беше определена обезпечеността на заплахата от заливане въз основа на степента на несигурност на входните стойности поотделно на водното количество Q_{100} и на коефициента на грапавина по Манинг. Вместо заплахата от наводнение в контролното напречно сечение да се представи само с дълбочина или с кота водно ниво (както в детерминистичния подход), тук степента на заплахата е характеризирана с вероятно разпределение на възможните стойности на дълбочината, респективно на котата на водната повърхност, което отразява влиянието на входната несигурност.

В случаите на слабообхванати от измервания водосбори или на ненаблюдавани водосбори сме принудени да работим с регионални хидроложки зависимости, което означава, че сме поставени в условията на значителна хидроложка несигурност. Анализът на чувствителността на хидродинамичния модел на река Младежка в района на село Младежко показва, че в този ненаблюдаван водосбор входната несигурност на хидрологията определено има по-голямо въздействие върху резултатите за оценка на заплахата от наводнение, отколкото несигурността във входния параметър грапавина.

Влиянието на степента на входната несигурност на Q_{100} и на коефициента на Манинг бе изследвано в три нива: 20 %, 25 % и 30 % несигурност. Установи се, че с увеличаване на степента на несигурност оценките на много вероятните водни нива на заливане с обезпеченост 99 % и 90 % се понижават, докато оценките на малко вероятните водни нива с обезпеченост 10 % и 1 % нарастват.

Настоящото изследване има и съществена приложна стойност, тъй като обръща внимание на вероятността дадени обекти да бъдат наводнени от стогодишна вълна Q_{100} и по този начин създава основа за риск анализ при вземане на решения за управление на заплахата от наводнение в даден район.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-292/24 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://bg.wikipedia.org/wiki/%E2%80%A6oldid=12203008>, poseten na 13.02.2025.
2. *Eckhardt, R.* Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo method. // Los Alamos Science, 1987, 15: 131 – 137.
3. *Mustafa, S. M. T., Nossent, J., Ghysels, G., Huysmans, M.* Estimation and Impact Assessment of Input and Parameter Uncertainty in Predicting Groundwater Flow With a Fully Distributed Model. // Water Resources Research, 2018, 54(9): 6585 – 6608. DOI: 10.1029/2017WR021857.
4. *Duan, Q., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Rousseau, A. N., Turcotte, R.* Calibration of Watershed Models. American Geophysical Union, 2003, from <http://doi.wiley.com/10.1029/WS006>, ISBN: 978-0875903555.

5. *Delenne, C., Guinot, V., Cappelaere, B.* Local sensitivity for uncertainty analysis in one-dimensional open channel flow modelling. // *La Houille Blanche*, 2013, 1: 50 – 59.
6. *Corlu, C. G., Akcay, A., Xie, W.* Stochastic simulation under input uncertainty: A review. // *Operations Research Perspectives*, 2020, 7: 100162. DOI: 10.1016/j.orp.2020.100162.
7. *Zhu, H., Liu, T., Zhou, E.* Risk Quantification in Stochastic Simulation under Input Uncertainty. // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2020, 30(1): 1 – 24. DOI: 10.1145/3329117.
8. *Mavrova-Guirguinova, M., Mancheva, J., Pencheva, D.* Decision Analysis for Robust Long-Term Flood Management: Uncertainty Exploration Using Probabilistic Approach and Information-Gap Decision Theory. // *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2023, 18(1): 117 – 124.
9. *Goodell, M. C. R.* Breaking the HEC-RAS Code: A User’s Guide to Automating HEC-RAS. h2ls, 2014.
10. Predvaritelna otsenka na riska ot navodnenia v Chernomorski baseyn, Baseynova direktsia „Chernomorski rayon“, 2011.

SOURCES OF INPUT UNCERTAINTY AND THEIR IMPACT ON FLOOD HAZARD FORECASTING

M. Mavrova-Guirguinova¹, S. Mechkarova²

Keywords: floods, uncertainty, Monte Carlo simulations

ABSTRACT

In catchments that are poorly monitored, or in catchments that are not gauged, the degree of uncertainty in predicting flood risk is high. Unfortunately, this is a common picture in Bulgaria. The presence of climatic changes and the uncertainty in the determination of basic input parameters, such as water quantity, Manning’s roughness coefficient, etc., influence the flood modelling process. Under these conditions, in the search for adaptive and reliable flood risk management strategies, the uncertainty is quantified using the Monte Carlo method to generate probabilistic results.

¹ Maria Mavrova-Guirguinova, Prof. Dr. Eng., Dept. “Hydraulic, Irrigation and Drainage Engineering”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: margir_fhe@uacg.bg

² Slavka Mechkarova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Hydraulic, Irrigation and Drainage Engineering”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: mechkarova_fhe@uacg.bg