



DOI: [10.71167/uaceg.2025.580405](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.580405)

Получена: 29.04.2025 г.

Приета: 23.05.2025 г.

УСТОЙЧИВА ГРАДСКА ИНФРАСТРУКТУРА: ПОДОБРЕНА НАЦИОНАЛНА МЕТОДИКА ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ДЪЖДОВНИЯ ОТТОК В КАНАЛИЗАЦИЯТА

И. Рибарова¹, Б. Борисов², Д. Вълчев³, Е. Цанов⁴, К. Малчева⁵,
Л. Бочева⁶, Т. Игнева⁷

Ключови думи: канализация, оразмерителен дъжд, IDF (Intensity-Duration-Frequency) зависимост, интензивност на дъжда, повторяемост на дъжда, продължителност на дъжда

РЕЗИЮМЕ

Съществуващата национална наредба за изчисляване на дъждовния отток в урбанизирани територии не отразява адекватно настоящите климатични реалности, тъй като се основава на остарели данни за дъждовната интензивност от преди повече от 40 години. Настоящото изследване предлага актуализирана и научно обоснована методика. Ключов принос е въвеждането на по-прецизно зонироване на страната – от две към дванадесет обособени зони, за които са разработени индивидуални зависимости тип

¹ Ирина Рибарова, проф. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на води“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ribarova_fhe@uacg.bg

² Боян Борисов, гл. ас. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на води“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: borisov_fhe@uacg.bg

³ Добрил Вълчев, гл. ас. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на води“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dvalchev_fhe@uacg.bg

⁴ Емил Цанов, гл. ас. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на води“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tsanov_fhe@uacg.bg

⁵ Кръстина Малчева, инж., деп. „Метеорология“, НИМХ, бул. „Цариградско шосе“ 66, 1784 София, e-mail: krastina.malcheva@meteo.bg

⁶ Лилия Бочева, доц. д-р, деп. „Метеорология“, НИМХ, бул. „Цариградско шосе“ 66, 1784 София, e-mail: lilia.bocheva@meteo.bg

⁷ Таня Игнева, гл. ас. д-р инж., кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на води“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: igneva_fhe@uacg.bg

„интензивност-продължителност-честота“ (IDF). Те се базират на статистическа обработка на емпирични данни за дъждовете и международно утвърден теоретичен модел. Предложените формули за всяка зона демонстрират значително по-добра точност спрямо действащата методика.

1. Въведение

Изграждането на климатично адаптивна градска инфраструктура е съществен елемент в концепцията за устойчиви и интелигентни градове. Ускорената урбанизация и нарастващото влияние на интензивните валежи водят до повишен риск от наводнения, претоварване на канализационната мрежа и замърсяване на водните басейни. Това налага необходимостта от адекватни подходи за коректно определяне на дъждовния отток в селищните канализационни системи. Освен това, подобряването на оразмерителните методи води до намаляване на капиталовите и оперативните (за експлоатация и поддръжка) разходи за канализационните системи.

Основен параметър при определянето на дъждовното водно количество при хидравлично оразмеряване на гравитационни канализационни мрежи по рационалния метод е интензивността на оразмерителния дъжд. Това е параметър, който зависи от честотата (реципрочната стойност на повторемостта на даден интензивен валеж) и продължителността на дъжда. Взаимовръзката на интензивността с продължителността и честотата на дъжда е известна в международната литература като IDF (Intensity-Duration-Frequency) зависимост. В действащата нормативна уредба България е разделена на две оразмерителни зони и за всяка от тях IDF зависимостта е определена аналитично [1].

За зона I:

$$q_{t,p}^I = [9,4771 - 3,1359 \lg(t+5)]^3 (1 - \lg p) + [11,2883 - 3,5422 \lg(t+5)]^3 \lg p. \quad (1)$$

За зона II:

$$q_{t,p}^{II} = [9,0899 - 3,0077 \lg(t+5)]^3 (1 - \lg p) + [10,8270 - 3,3974 \lg(t+5)]^3 \lg p, \quad (2)$$

където $q_{t,p}^I$ и $q_{t,p}^{II}$ е интензивността на дъжда в l/s.ha.

t – времетраенето на дъжда в min;

p – периодът на повторемост на дъжда в години, респ. периодът на еднократно препълване на канализационните мрежи.

Налице са няколко съществени недостатъка в действащата Наредба [1]: а) географските граници на двете зони не са ясно дефинирани, което затруднява проектирането; б) съвременни климатологични изследвания предполагат наличието на повече от две зони [2, 3] и в) данните за дъждовете, използвани за извеждане на IDF зависимостите не са актуализирани повече от 40 години.

Тези фактори налагат необходимостта от проверка на методиката за определяне на оразмерителната интензивност на дъждовете в България, която е извършена в рамките на договор между Министерството на регионалното развитие и благоустройството (МРРБ) и Университета по архитектура, строителство и геодезия

(УАСГ), с подизпълнител Националният институт по метеорология и хидрология (НИМХ). Направената проверка обосновава необходимостта от актуализиране на съществуващата методика [4].

Обзорът на методите в световен мащаб за определяне на интензивността на дъжда показва, че една от най-широко използваните теоретични разработки е тази на Koutsoyannis et al. [5]. Авторите предлагат следната формула за интензивността на дъжда q :

$$q = \frac{\alpha(T)}{\beta(t)}, \quad (3)$$

където числителят е функция за зависимостта от периода на повторемост T , а знаменателят – за зависимостта от продължителността на дъжда t .

Тази формула обобщава наличните методи. Основните разлики между тях произтичат от начина на определяне на числителя, като се очертават два основни подхода:

1) Емпиричен подход

Това е най-старият подход, който все още се прилага в много страни. Частен случай на емпирична зависимост е, например, известната формула [6]:

$$q = \frac{a}{(t+b)^c}, \quad (4)$$

където q е интензивността на дъжда в инчове за час [inch/hour];

t – времетраене на дъжда, часове;

a, b, c – коефициенти, специфични за всеки период на повторемост.

Основен недостатък на този метод е липсата на теоретично съответствие с функциите на вероятностното разпределение на максималните интензивности. Освен това е доказано, че използваните константи всъщност са променливи, които зависят от периода на повторемост. Това намалява точността на резултатите [5].

2) Аналитичен подход, базиран на статистическо моделиране

Интензивността на дъжда се определя въз основа на теоретични вероятностни разпределения, приложими към максималните интензивности на валежите. При този подход, числителят във форм. (3) се извежда аналитично от функцията на вероятностно разпределение, определена въз основа на наличните емпирични данни. Тъй като съществуват различни статистически разпределения, съответно са възможни и различни формули за определяне на числителя на форм. (3).

Направеният обзор за практиките в другите страни показва следното:

- **Германия:** Страната разполага с гъста измервателна мрежа. IDF зависимостите се определят индивидуално за всяка станция и са регламентирани със стандарт DWA-A 531 [7]. Използваните аналитични зависимости са частен случай на форм. (3), като за числителя е прието експоненциално разпределение на валежната височина спрямо периода на еднократна повторемост. Оразмерителните интензивности за дъждовете в определена точка от картата се изчисляват автоматично и се получават

директно чрез онлайн софтуер KOSTRA, което неимоверно улеснява процеса на проектиране.

- **САЩ:** Липсва единен подход. Някои райони използват локални емпирични формули (като, например, форм. (4)), докато други разчитат на мрежови анализи [8].
- **Румъния:** Територията е разделена на 19 зони със средна площ около 12 000 km², като за всяка зона са дадени графични зависимости.
- **Италия:** Съществува детайлно зонироване, представено на уеб базирана платформа [9].
- **Гърция:** Гъстотата на измервателната мрежа в Гърция е близка до тази в България. Страната е разделена на няколко хидроложки региона с различни климатични и географски характеристики. IDF кривите следват форм. (3) с разпределение от тип „Парето“ [10].

Обзорът на съществуващите подходи очертава две основни тенденции в световен аспект:

- **Увеличаване на броя на измервателните станции**, което води до намаляване на площта на зоните, използващи една зависимост или формула. В напредналите страни като САЩ и Германия измервателната мрежа е изключително гъста.
- **Синхронизиране на аналитичните IDF зависимости със статистическата обработка** на входните данни, което подобрява точността на прогнозите.

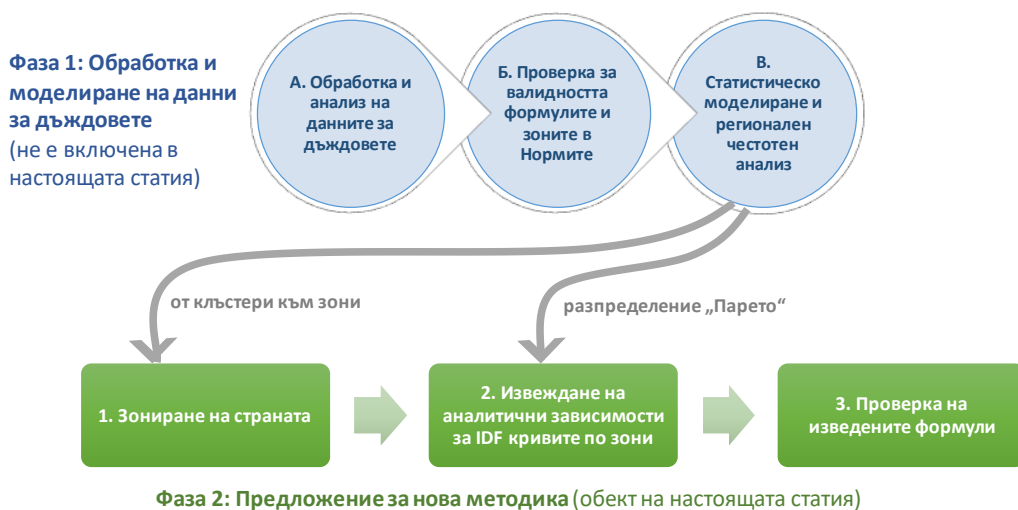
Тези тенденции са обусловени от нарастващото разбиране, че интензивните валежи са специфични за дадена територия и не могат да се моделират коректно чрез обобщени зависимости. Интензивните валежи не следват логиката на 24-часовите валежи, които показват сходни характеристики за относително големи географски райони. Разширяването на географската област, обслужвана от една измервателна станция, намалява точността на оценката на интензивността на валежите. Въпреки това, броят на станциите трябва да бъде разумно съобразен с честотата на интензивните валежи за даден район, урбанизацията и потенциалните щети от наводнения.

Настоящото изследване предлага подобряване на съществуващата нормативна методика за определяне на интензивността на дъжда. Предложената методика се състои от ново зонироване на България и усъвършенстван метод за определяне на IDF зависимостта, който е съобразен със съвременните научни разработки и международните добри практики.

2. Материали и методи

2.1. Подход

Изследването включва 2 фази, показани на фиг. 1.



Фиг. 1. Подход на изследването

2.2. Фаза 1: Обработка и моделиране на данните за дъждовете

Фаза 1 не е предмет на настоящата статия, но е представена на фиг. 1 и е описана накратко, тъй като нейните резултати са основа за разработването на Фаза 2.

Стъпка А: Обработка и анализ на данните за дъждовете

Дигитализираната архивна информация за интензивните валежи в периода 1961 – 2020 г., събрана от 46 станции от метеорологичната мрежа на НИМХ, е подложена на първичен експертен и автоматизиран контрол. Проверката включва анализ на съгласуваността, хомогенността, автокорелацията и наличието на аутлайъри (единични стойности, значително отклоняващи се от средните статистически данни). Тази първична обработка гарантира надеждност на резултатите. След това данните са използвани за създаване на масиви от синтетични дъждове с максимална интензивност за различни продължителности на валежите. За целта е приложен т. нар. метод на годишните превишения над определена прагова стойност (AES), който осигурява извличането на всички максимални стойности за разглеждания период и формирането на дълги времеви редици дори за по-големите продължителности на валежите [11].

Стъпка Б: Проверка на валидността на формулите и зоните в Наредбата

Извършената проверка показва, че настоящата нормативна методика [1] не е в добра съгласуваност с реално измерените интензивности по станции. В повечето случаи изчисленията по действащите формули надценяват интензивността на валежите (средно с около 20 %), но в отделни станции се наблюдават и занижени стойности (с над 20 %). Основен фактор за тези несъответствия е прекалено голямата площ на съществуващите две оразмерителни зони (приблизително 55 000 km² всяка), които включват разнообразни климатични региони. В такива случаи не е възможно да се изведе една регионална IDF крива, която да отразява коректно характеристиките на валежите в целия регион, тъй като интензивните валежи в различните части на зоната са със специфичен режим.

Стъпка В: Статистическо моделиране и регионален честотен анализ

За вероятностната оценка на интензивните валежи е използвано статистическо моделиране, което осигурява надеждно описание на статистическата същност на

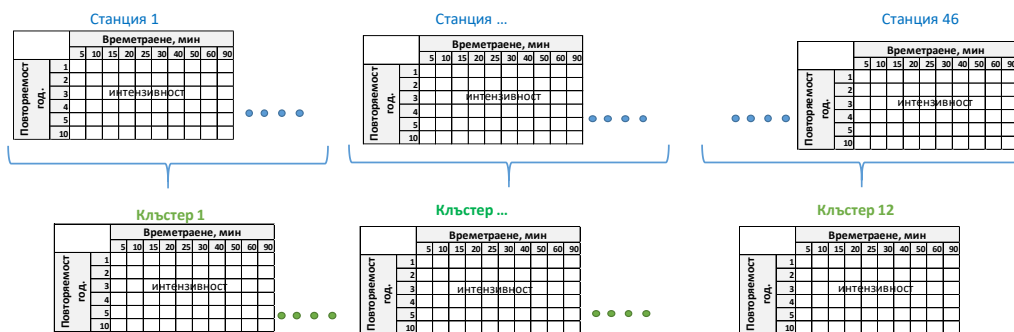
разглежданите променливи. Обработката на AES-масивите (стъпка А) от избраните 46 станции е извършена автоматизирано в R-среда чрез специално разработени скриптове, използващи пакетите ‘Imomco’ и ‘extRemes’. За всяка станция са изчислени L-моментите и техните съотношения за всички разглеждани продължителности на валежите (от 5 до 90 минути). Тези данни са използвани за статистическо моделиране на интензивностите по станции.

След това, станциите със сходни характеристики на интензивните валежи са групирани в кълстери чрез прилагане на итеративна процедура за кълстеризация. За идентифициране на кълстерите са извършени над 50 проби, като всяка проба включва оценка на степента на несъгласуваност и хетерогенност, анализ на приложимостта на статистическите модели за всеки кълстер, построяване на регионални IDF зависимости на базата на характеристичните стойности за периоди на повторяемост от 1 до 50 години, оценка на разликите между регионалните и индивидуалните IDF криви за всяка станция.

В резултат на итеративната процедура са обособени 12 кълстера с ясно дефинирани характеристики.

Краиният продукт на фаза 1 са IDF таблици с моделираните интензивности за всяко времетраене и повторяемост на дъжда (фиг. 2).

НИВО НА МОДЕЛИРАНЕ 1: IDF таблици по СТАНЦИИ (46 станции, 46 таблици)

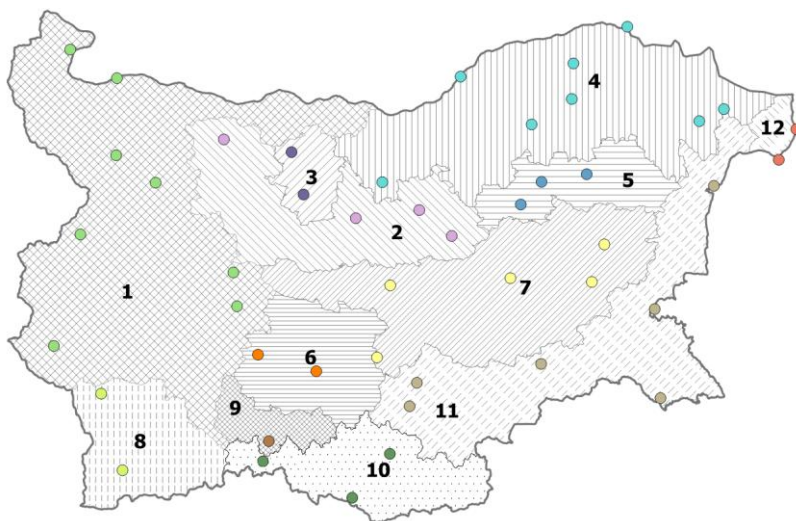


НИВО НА МОДЕЛИРАНЕ 2: IDF таблици по КЪЛСТЕРИ (12 кълстера, 12 таблици)

Фиг. 2. Краен продукт на фаза 1

На ниво станции (ниво 1 на моделиране) са съставени 46 броя таблици – по една за всяка станция (фиг. 2). Всяка IDF таблица предоставя дискретни стойности на моделираните интензивности за всяко времетраене и повторяемост на дъжда. Таблиците са получени в резултат на моделирането на емпиричните данни с вероятно разпределение тип „Парето“.

На ниво кълстери (ниво 2 на моделиране) са съставени 12 броя таблици – по една за всеки кълстер, на базата на изведените регионални IDF зависимости. Таблиците съдържат изчислените характеристични стойности на интензивността на дъжда за всяко времетраене и повторяемост. Използва се обобщеното разпределение на Парето. Регионалните IDF зависимости за всеки кълстер са получени чрез прилагане на методиката на регионалния честотен анализ за обединяване на станции със сходни характеристики в хомогенни райони. Броят на станциите във всеки кълстер е различен и се определя единствено от критериите за хомогенност. Фигура 3 показва местоположението и броя на станциите във всяка обособена зона/кълстер.



Фиг. 3. Разпределение на станциите по обособени зони/кълъстери

2.2. Фаза 2: Предложение за нова методика (зони и формули)

Стъпките от Фаза 2 (фиг. 1) са разгледани в отделни подточки по-долу. Предлаганата подобрена методика включва ново зонирание на страната и нови формули за интензивността на дъжда за всяка зона.

2.2.1. Зонирание на страната

Средната гъстота на мрежата на използваните 46 станции е приблизително 50×50 km, което се счита за недостатъчно за надеждно зонирание по отношение на характеристиките на интензивните дъждове. Поради тази причина за обособяване на зони е приложен евристичен подход, основан на:

- резултатите от кълъстерния и регионалния честотен анализ, извършени във Фаза 1;
- общото климатично райониране на страната;
- особеностите на атмосферната циркулация;
- обособените пет валежни района [2].

Като основа за зонирането е използвано административното разделение на страната по общини (ниво NUTS 3 съгласно европейската система за териториална подялба).

2.2.2. Извеждане на аналитични зависимости за IDF кривите по зони

Тъй като зависимостта на интензивността на дъжда от периода на повторемост е изведена за разпределение тип „Парето“, общото теоретично уравнение на *Koutsoyannis et. al* (форм. (3)) се представя във вид, в който числителят да отговаря на това разпределение. Този подход е възприет и приложен за Гърция [10]. Настоящото изследване следва структурата на формулата, изведена за Гърция, а именно:

$$q = \frac{a(T^n - b)}{\left(1 + \frac{t}{c}\right)^m}, \quad (5)$$

където q е интензивността на дъжда в l/(s.ha);

T – период на повтораемост в години;

t – продължителност на дъжда в минути;

a, b, c, m, n – коефициенти. Коефициентът „ a “ е с измерение на интензивност на дъжда, а коефициентът „ c “ – на време (минути).

За определяне на коефициентите по избраната формула за всяка от обособените зони е използван софтуерът MatLab (отворен достъп). Чрез достатъчно голям брой итерации (десетки хиляди) е идентифицирана оптималната съвкупност от коефициенти, която минимизира отклоненията спрямо зададените дискретни стойности на интензивността на дъжда, неговата продължителност и периода на повтораемост. Използвана е функцията *Curve Fitter* в *MatLab*, като входните данни включват избрани аналитичен израз (форм. (5)) и IDF таблиците за всеки клъстер (определени във Фаза 1 и показани на фиг. 2).

Съгласно препоръките в литературата, и по-специално в немския стандарт, при определянето на коефициентите не са използвани стойности с период на повтораемост, по-голям от 10 години [7]. Причината е по-голямата несигурност на моделираните стойности за големи повтораемости, поради ограничената дължина на наличните редици от наблюдения.

При итерациите са зададени следните горни граници за коефициентите (на базата на използваните в Гърция стойности): a – до 1000; n – до 0,35; m – до 1 [10].

След първоначалното определяне на коефициентите алгоритъмът е стартиран отново, като последователно е намалявана точността им: за коефициент a – до цяло число, а за n и m – до втория знак след десетичната запетая. По време на този процес е проследявана промяната на регресионните параметри, за да се избегне значително влошаване на съответствието със зададените дискретни стойности. Тази процедура гарантира получаването на удобни за инженерната работа коефициенти, без компромис с точността на резултатите.

За оценка на точността на модела (*goodness of fit*), MatLab изчислява няколко параметъра. В рамките на настоящото изследване са използвани коефициент на детерминация R^2 и средноквадратичната грешка (RMSE).

2.2.3. Проверка на изведените формули

За валидиране на изведените аналитични зависимости са извършени две основни сравнения:

1) със статистически моделираните дискретни стойности на IDF кривите за всеки клъстер (ниво на моделиране 2, фиг. 2);

2) със статистически моделираните дискретни стойности на IDF криви за всяка измервателна станция (ниво на моделиране 1, фиг. 2).

Проследени са процентните отклонения между моделираните дискретни стойности и стойностите, изчислени с изведената формула.

Допълнително е направено сравнение между предлаганата нова методика и съществуващата.

3. Резултати

3.1. По отношение на новите 12 зони

Въз основа на проведените анализи и клъстеризацията на данните във Фаза 1, с настоящото изследване се предлага зонирването на страната да се прецизира чрез въвеждане на 12 обособени зони, вместо съществуващите 2 големи зони (фиг. 4).



Фиг. 4. Предложените нови 12 оразмерителни зони

Обособените зони са определени на базата на идентифицираните 12 клъстера във фаза 1. Границите на зоните са определени чрез евристичен подход, като са взети предвид особеностите на атмосферната циркулация, петте валежни района и административното разделение на страната по общини (ниво NUTS 3 съгласно европейската система за териториална подялба).

3.2. По отношение на изведените аналитични зависимости за IDF кривите по зони

3.2.1. Определени стойности на коефициентите във формулите

По процедурата, описана в „Материали и методи“, със софтуера MatLab за всяка зона са определени коефициентите във форм. (5) (табл. 1).

Таблица 1: Определени стойности на коефициентите във форм. (5) по зони

Зона	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a	961	714	998	950	786	880	651	906	350	780	877	879
b	0,69	0,46	0,61	0,65	0,60	0,67	0,48	0,67	0,22	0,51	0,64	0,69
n	0,10	0,16	0,15	0,11	0,11	0,11	0,16	0,10	0,30	0,16	0,12	0,14
c	12,78	9,70	10,66	11,29	14,17	12,40	11,39	9,15	9,67	8,73	11,07	9,21
m	0,99	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,92

Резултатите, обобщени в табл. 1, показват следните зависимости:

- по редове на таблицата – всеки от коефициентите е от един и същи порядък за различните зони, но минималните и максималните им стойности варират в достатъчно широки граници;
- по колони на таблицата – комбинациите от стойности на петте коефициента за дадена зона се различават значително между 12-те зони.

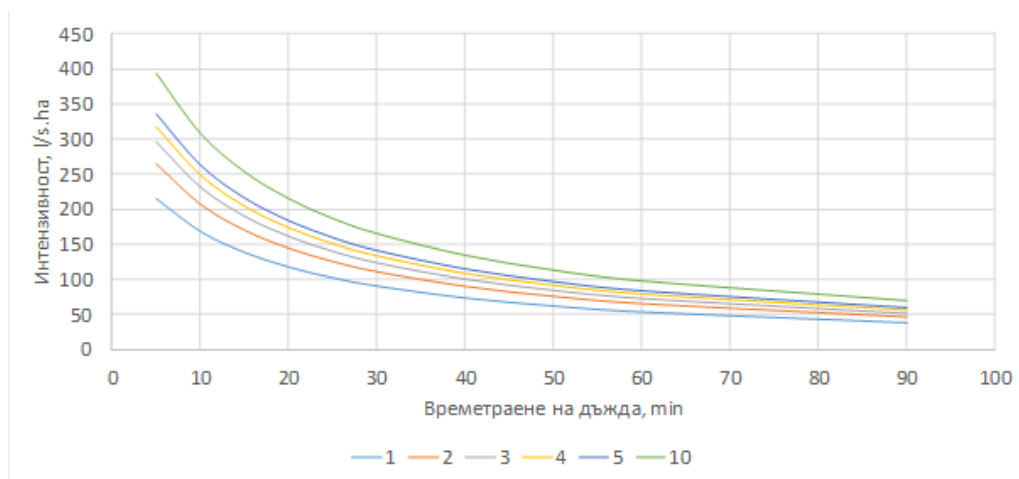
Тези наблюдения ясно подчертават необходимостта от обособяване на 12 зони вместо съществуващите 2.

Формулите по зони, с получените при математическите итерации коефициенти (табл. 1), са показани в табл. 2.

Таблица 2: Формули за 12-те зони

Зона 1	$q(t,T) = \frac{961 \cdot (T^{0,1} - 0,69)}{\left(1 + \frac{t}{12,78}\right)^{0,99}}$	Зона 7	$q(t,T) = \frac{651 \cdot (T^{0,16} - 0,48)}{\left(1 + \frac{t}{11,39}\right)^{0,99}}$
Зона 2	$q(t,T) = \frac{714 \cdot (T^{0,16} - 0,46)}{\left(1 + \frac{t}{9,7}\right)^{0,99}}$	Зона 8	$q(t,T) = \frac{906 \cdot (T^{0,1} - 0,67)}{\left(1 + \frac{t}{9,15}\right)^{0,99}}$
Зона 3	$q(t,T) = \frac{998 \cdot (T^{0,15} - 0,61)}{\left(1 + \frac{t}{10,66}\right)^{0,99}}$	Зона 9	$q(t,T) = \frac{350 \cdot (T^{0,3} - 0,22)}{\left(1 + \frac{t}{9,67}\right)^{0,99}}$
Зона 4	$q(t,T) = \frac{950 \cdot (T^{0,11} - 0,65)}{\left(1 + \frac{t}{11,29}\right)^{0,99}}$	Зона 10	$q(t,T) = \frac{780 \cdot (T^{0,16} - 0,51)}{\left(1 + \frac{t}{8,73}\right)^{0,99}}$
Зона 5	$q(t,T) = \frac{786 \cdot (T^{0,11} - 0,6)}{\left(1 + \frac{t}{14,17}\right)^{0,95}}$	Зона 11	$q(t,T) = \frac{877 \cdot (T^{0,12} - 0,64)}{\left(1 + \frac{t}{11,07}\right)^{0,99}}$
Зона 6	$q(t,T) = \frac{880 \cdot (T^{0,11} - 0,67)}{\left(1 + \frac{t}{12,40}\right)^{0,99}}$	Зона 12	$q(t,T) = \frac{879 \cdot (T^{0,14} - 0,69)}{\left(1 + \frac{t}{9,21}\right)^{0,92}}$

С цел визуализация на IDF кривите, изчислени по тези формули, на фиг. 5 е представен пример за зона 1.



Фиг. 5. IDF криви за зона 1, получени с изведената формула за период на повторяемост на дъжда от 1, 2, 3, 4, 5 и 10 години

Както беше изяснено, в статистическото моделиране и съответните изведени формули е използвано разпределение тип „Парето“. Получените IDF криви съответстват на наблюдаваните особености на интензивните валежи в България [12], което е онагледено на фиг. 5. При малките времетраения на дъжда интензивността намалява много стръмно, което е сходно на експоненциалното разпределение. В случай на големи времетраения, обаче, интензивността намалява плавно.

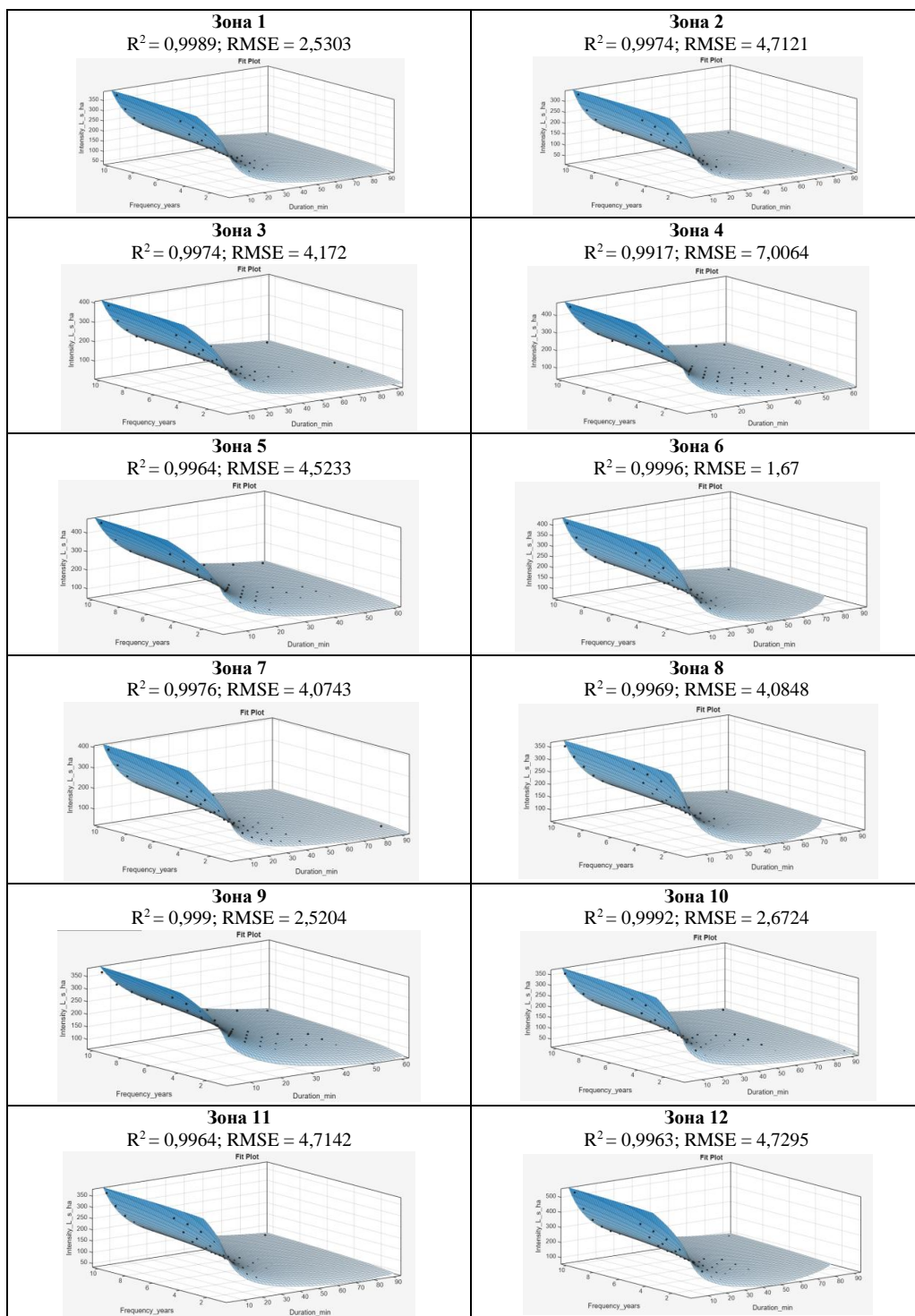
3.2.2. Регресионен анализ

IDF кривите са триизмерни, тъй като описват взаимовръзката между три величини – интензивност, продължителност и повторяемост. Поради това техните графики се представят като повърхнини. На фиг. 6 е показано, че изчислените повърхнини, получени чрез изведените формули, съответстват на дискретните входни данни, представени с точки. Освен това са дадени двата регресионни параметъра – R^2 и RMSE, които оценяват точността на това съответствие.

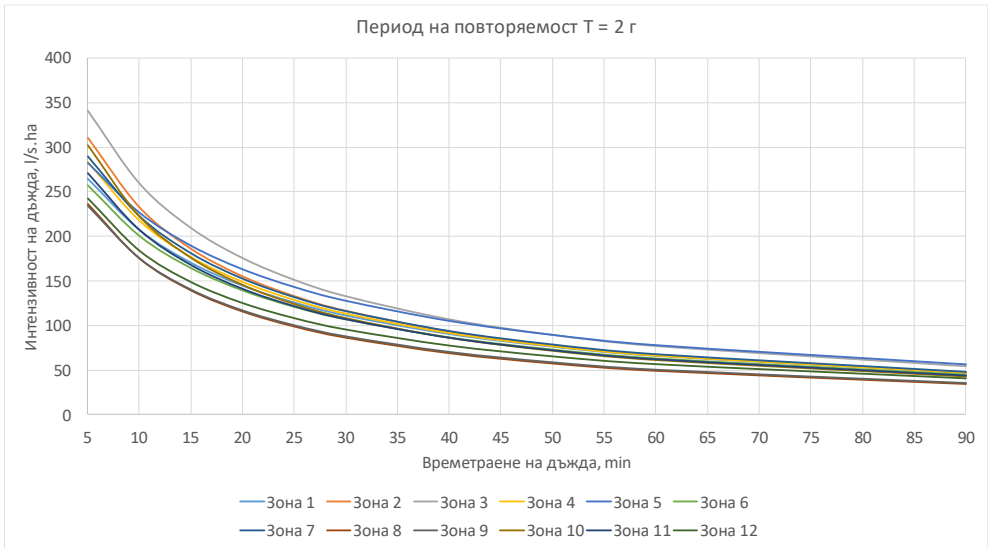
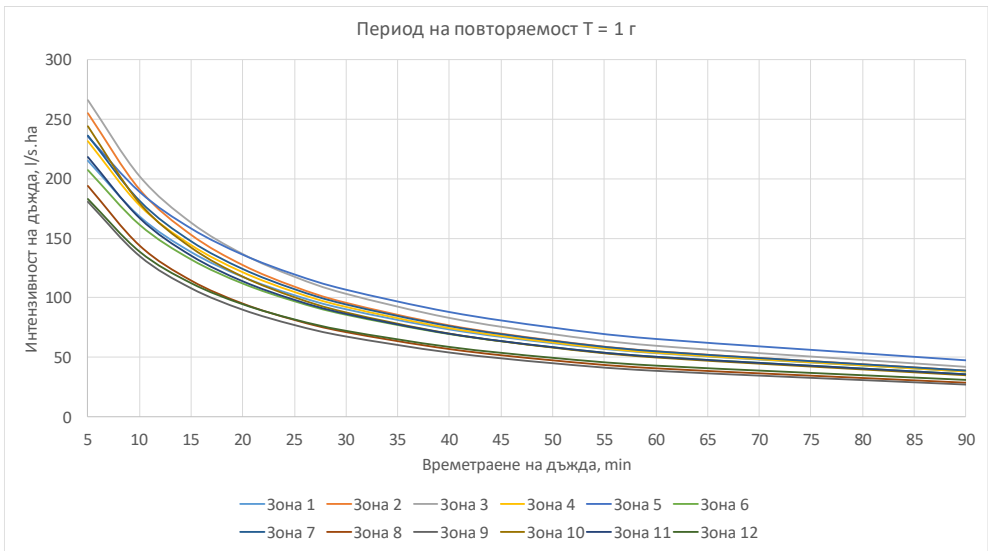
Като се има предвид, че максималната стойност на R^2 е 1 и че за всички зони (кълстери) стойността на R^2 е над 0,99, може да се заключи, че съответствието между дискретните входни данни и изведените функционални криви е изключително точно.

3.2.3. Сравнение на IDF кривите между 12-те зони

На фиг. 7 и фиг. 8 са визуализирани IDF кривите за четири периода на повторяемост – 1, 2, 5 и 10 години. Тези периоди са избрани, тъй като са най-често използвани при оразмеряването. Основната цел на фигурите е да се направи съпоставка между отделните зони за всеки период на повторяемост. Кривите са получени на базата на изведените формули за всяка зона.



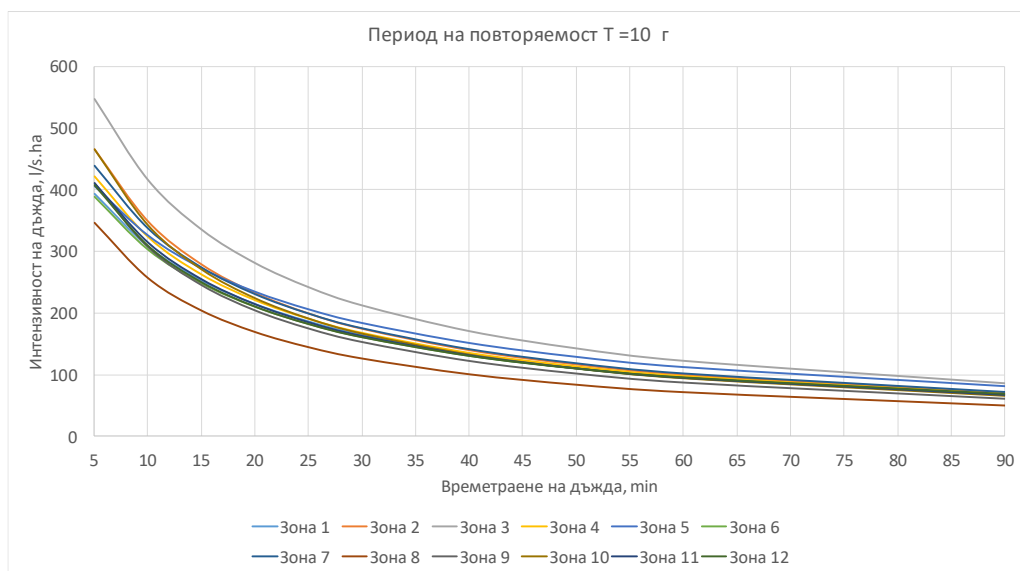
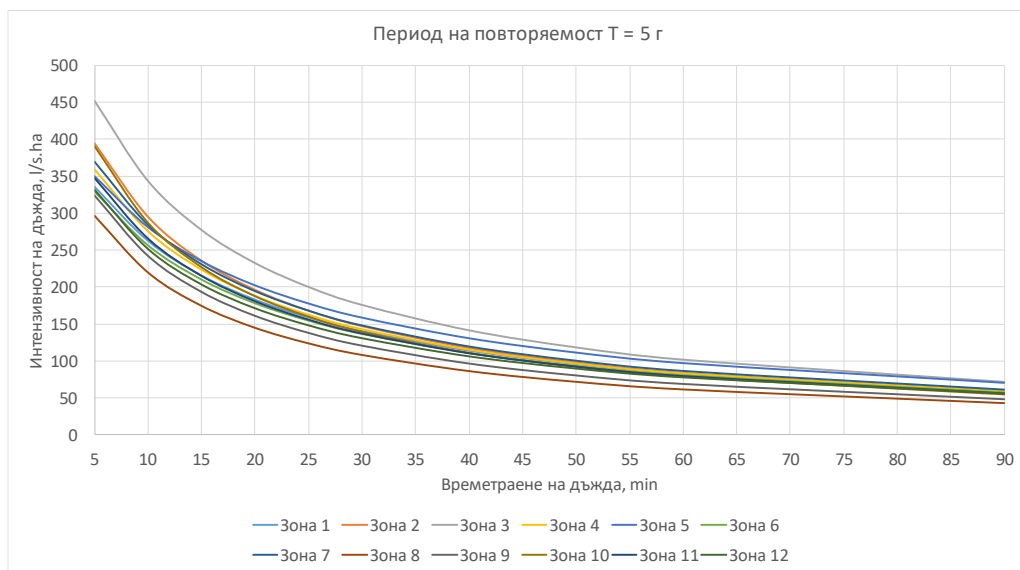
Фиг. 6. Съответствие между дискретните входни данни и изведените зависимости (табл. 2) с показани регресионни параметри за точността



Фиг. 7. IDF криви на 12-те зони за периоди на повторяемост $T = 1$ и 2 год.

Анализът на всяка отделна фигура показва, че освен различните стойности на интензивността за дадена продължителност на дъжда за всяка зона, кривите се преплитат при различните продължителности, т.е. дадена крива преминава над или под останалите. Това означава, че всяка зона има своя специфична динамика. Също така поведението на всяка зона е различно при различните повторяемости. Тази тенденция е най-ясно изразена при сравнение между $T = 1$ г. и $T = 10$ г. При $T = 10$ г. кривите за зона 8 и зона 3 се отклоняват значително от групата на останалите криви, докато при $T = 1$ г. това раздалечаване не е толкова отчетливо.

Тези наблюдения потвърждават, че обособените зони имат специфични характеристики и тяхното окрупняване би довело до намаляване на съответствието между изведените зависимости и регистрираните интензивни валежи.



Фиг. 8. IDF криви на 12-те зони за периоди на повторяемост $T = 5$ и 10 г.

3.3. По отношение на проверката на предложените аналитични зависимости

За всяка продължителност на дъжда и за всяка повторяемост, интензивността на дъжда, изчислена чрез изведените формули (табл. 2), е сравнена със съответните моделни стойности, получени чрез статистическия и клъстерния анализ:

- за региона (за зоната);
- за всяка отделна измервателна станция.

В допълнение, новата формула е сравнена със съответната формула за зоната в съществуващата методика.

Сравнението е извършено чрез анализ на процентните отклонения между всяка двойка стойности, което позволява да се оцени степента на съответствие.

Важно е да се отбележи, че при първичната обработка на пловдиографните ленти по метода на максималната интензивност се определят всички последователни петминутни интервали, в които интензивността на дъжда остава над приетата долна граница (0,18 mm/min) за съответната продължителност [12]. Това ограничение може да доведе до аномалии по отношение на валежните височини при формиране на синтетични дъждове в AES масива от данни, използван при моделирането. При превръщането на интензивността на дъжда във валежна височина следва за всеки синтетичен дъжд да се получава нарастващ ред, тъй като с увеличаване на продължителността на дъжда сумарната височина на падналия дъжд логично нараства. При големите продължителности, обикновено над 50 минути, в резултат на липсата на достатъчен брой дъждове с интензивност над 0,18 mm/min, се появяват намаляващи стойности на акумулираните валежни височини, което е алогично. Изведените аналитични зависимости коригират тези алогични височини. Поради тези причини моделните стойности на интензивността, водещи до алогични валежни височини, не участват в сравнителния анализ, дискутиран по-долу.

3.3.1. Сравнение на ниво зона

Резултатите от сравнението показват изключително добро съответствие между моделните регионални интензивности и тези, получени чрез изведените формули. В повечето случаи процентните отклонения са в рамките на 2 – 3 % (плюс или минус). Само за една стойност формулата е дала с 11 % по-ниска величина от моделната.

3.3.2. Сравнение по отделни станции

За сравнението по станции е определена граница на допустимост на отклонение от 13 %, като този праг е съобразен със съществуващата методика. В нея зоните 1 и 2 се различават с 13,3 %, което определя границата, показваща принадлежността на дадена станция към една от двете зони. Резултатите показват много добро съответствие, като разликите извън границите от -13 % до +13 % се наблюдават само за единични продължителности и в много малък брой случаи. Това е нормално явление при статистическото моделиране и е неизбежно при извеждане на обща формула за групирани станции. Единствено за гр. Кърджали се наблюдават систематично по-ниски стойности от допустимата граница, което показва, че тази станция не се вписва напълно в своя клъстер. Въпреки това, цялостната оценка от регионалния честотен анализ класифицира района като „приемливо хомоген“.

3.3.3. Сравнение между новата формула и съществуващата

Извършено е сравнение между новопредлаганата формула и формулата от съществуващата методика. Резултатите показват ясно предимство в полза на новото предложение. Съществуващата методика се характеризира с по-ниска точност, като води до генериране на изчислени стойности, които надвишават тези, получени чрез моделиране.

4. Изводи

Представената разработка има за цел да предостави по-надеждна основа за инженерното проектиране на канализационни системи, като се фокусира върху дъждовния отток. При изследването е използвана удължена редица от данни, включваща и интензивните валежи от последните 40 години, след разработването на методиката в настоящата Наредба.

Предложената методика подобрява съществуващия подход в няколко ключови аспекта:

А. Брой и големина на оразмерителните зони

- Съществуващите две оразмерителни зони обхващат твърде големи и климатично разнородни територии (~55 000 km²/зона), което води до значителни разлики между изчислените и реално измерените интензивности на дъждовете.
- Новото зонироване съвпада с глобалната тенденция за намаляване на обхвата на зоните, описвани чрез една формула. Новите 12 зони са определени чрез статистически анализ и моделиране на измерените дъждове, като се групират станции със сходни характеристики на интензивните валежи.
- Разделянето на страната на 12 зони осигурява извеждането на регионални IDF криви с по-добра съпоставимост спрямо реално измерените данни, което води до повишена точност при инженерните изчисления.
- Предложеното зонироване отразява климатичните особености на страната, като се вземат предвид атмосферната циркулация и петте валежни района.
- За удобство на инженерната практика са предложени ясни географски граници на зоните, които съответстват на административните граници на общините (ниво NUTS 3 по европейската система за териториална подялба).

Б. Аналитичен израз на IDF зависимостите

- Структурата на предложената аналитична зависимост (форм. (5)) се основава на ясна теоретична обосновка, която е доказана и успешно прилагана в международен план.
- Аналитичният израз на IDF кривите е синхронизиран със статистическата обработка на входните данни, което осигурява по-добра съгласуваност и точност на резултатите.
- Сравнението между изчислените интензивности по предложените формули и стойностите, получени чрез математическо моделиране по станции и клъстери, показва много добро съответствие. Единичните отклонения са нормално явление при моделирането и не могат да бъдат избегнати при групиране на станции.
- Новопредлаганата формула показва ясно предимство пред съществуващата методика, която води до по-високи и неточни стойности.

Интегрирането на новата методика в процесите на проектиране на канализационни системи ще подпомогне развитието на умни и устойчиви градове, които могат да се справят с динамичните климатични условия на бъдещето.

Благодарности

Авторите изказват благодарност на Министерството на регионалното развитие и благоустройство за финансиране на настоящата разработка в рамките на договор РД-02-29-2/04.01.2024 „Извършване на проучване и статистически анализ на наличната информация за параметрите на дъждовете в страната с цел актуализиране на методиката за определяне на оразмерителните дъждове при проектирането на канализационните системи“.

ЛИТЕРАТУРА

1. Naredba № RD-02-20-8 от 2013 за проектиране, изграждане и експлоатация на канализационни системи.
2. *Bocheva, L., Malcheva K.* Climatological assessment of extreme 24-hour precipitation in Bulgaria during the period 1931 – 2019. // Proceedings of 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, 2020, 20 (4.1): 357 – 364, DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.045](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.045).
3. *Malcheva, K. et al.* Znachenieto na sezonnite klimatichni otsentki v analiza na savremenniya klimat na Bulgaria. // Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology, 2023, 27(1): 1 – 53.
4. *Ribarova, I. et al.* Okonchatelen доклад po dogovor: “Izvarshvane na prouchvane I statisticheski analiz na nalichnata informatsiya za parametrite na dazhdovete v stranata s tsel aktualizirane na metodikata za opredelyane na orazmeritelnite dazhdove pri projektiraneto na kanalizatsionnite sistemi”, 2025, MRRB.
5. *Koutsoyannis, D. et al.* A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. // Journal of Hydrology, 1998, 206 (1-2): 118 – 135.
6. *Durrans, S.* Stormwater Conveyance Modeling and Design. Bentley Institute Press, 2007, ISBN 978-1934493007.
7. DWA-A 531 „Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer“, 2017.
8. https://library.municode.com/tx/austin/codes/drainage_criteria_manual.
9. <http://www.idrologia.polito.it/gndci/Vapi.htm>.
10. *Koutsoyannis, D.* Urban planning of drainage networks. National Polytechnic. Athens, 2011.
11. *Chow, V., Maidment, D., Mays, L.* Applied Hydrology. McGraw Hill, 1988, ISBN 978-0070108103.
12. *Kyuchukova, M. et al.* Klimatichen spravochnik – Intenzivni dazhdove v NR Bulgaria, BAN, Sofia, 1986.

SUSTAINABLE URBAN INFRASTRUCTURE: IMPROVED NATIONAL METHODOLOGY FOR DESIGN OF STORMWATER RUNOFF IN SEWERAGE SYSTEM

I. Ribarova¹, B. Borisov², D. Valchev³, E. Tsanov⁴, K. Malcheva⁵, L. Bocheva⁶,
T. Igneva⁷

Keywords: *sewerage system, design stormwater runoff, Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves, rainfall intensity, rainfall duration, rainfall frequency*

ABSTRACT

The existing national regulation for calculating stormwater runoff in urbanized areas does not adequately reflect current climatic realities, as it is based on outdated rainfall intensity data collected more than 40 years ago. The present study proposes an updated and scientifically grounded methodology. A key contribution is the introduction of a more precise zoning of the country – expanding from two to twelve distinct zones, for each of which individual intensity-duration-frequency (IDF) relationships have been developed. These are based on statistical processing of empirical rainfall data and an internationally recognized theoretical model. The proposed formulas for each zone demonstrate significantly improved accuracy compared to the existing methodology.

¹ Irina Ribarova, Prof. Dr. Eng., Dept. “Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ribarova_fhe@uacg.bg

² Boyan Borisov, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: borisov_fhe@uacg.bg

³ Dobril Valchev, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: dvalchev_fhe@uacg.bg

⁴ Emil Tsanov, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: tsanov_fhe@uacg.bg

⁵ Krastina Malcheva, Eng., Dept. “Meteorology”, NIMH, 66 Tsarigradsko shose Blvd., Sofia 1784, e-mail: krastina.malcheva@meteo.bg

⁶ Lilia Bocheva, Assoc. Prof. Dr., Dept. “Meteorology”, NIMH, 66 Tsarigradsko shose Blvd., Sofia 1784, e-mail: lilia.bocheva@meteo.bg

⁷ Tania Igneva, Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: igneva_fhe@uacg.bg