

ПРОГНОЗИРАНЕ РАЗВИТИЕТО НА КОРОЗИЯ В СУХОТРЪБИЯ ЗА ПОЖАРОГАСЕНЕ

Емилия Станева¹, Марин Костов²

FORECASTING CORROSION DEVELOPMENT IN DRY PIPE FIRE SUPPRESSION SYSTEMS

Emiliya Staneva, Marin Kostov

Abstract:

The report presents the results of an experimental study aimed at assessing the condition and identifying corrosion processes in dry pipe fire suppression systems using an endoscopic camera. A method for analyzing and forecasting corrosion development is proposed, based on the processing and interpretation of digital graphic images. The methodology is adapted for the internal cylindrical surface of a circular cross-section pipe: for quantitative assessment, the area is calculated using the cylinder's unrolled lateral surface development, while in the absence of reliable calibration, a dimensionless pixel indicator is utilized exclusively. The developed approach is presented in a practical aspect, with a view to its application in the maintenance and inspection of dry pipe fire suppression installations.

Keywords:

dry pipe fire suppression systems, corrosion, endoscopic diagnostics, digital image processing, fire safety, maintenance, forecasting

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Сухотръбието е специализирана сградна противопожарна инсталация, представляваща вертикална тръбна система, която при нормална експлоатация е празна, но при пожар се захранва с вода от пожарен автомобил. Практическото му значение е свързано с намаляване на времето за развързване на шлангови линии по стълбищата и с осигуряване на по-бърз достъп на гасителните екипи до етажните нива [2,4].

В българската нормативна рамка изискванията за сухотръбия са включени в Наредба № Из-1971 за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар [1]. Предходният анализ на Костов и Станева посочва, че нормативните текстове регламентират основното наличие на системата, но оставят практически въпроси относно

¹ Емилия Юлиянова Станева, курсант, факултет „Пожарна безопасност и защита на населението“, Академия на МВР, гр. София, ул. „Пиротска“ № 171, Е-mail: stanevaemi05@gmail.com.

² Марин Руменов Костов, курсант, факултет „Пожарна безопасност и защита на населението“, Академия на МВР, гр. София, ул. „Пиротска“ № 171, Е-mail: marinp8lite@gmail.com.

защитата на входящите и етажните възли, избора на материали, периодичния контрол и експлоатационното изпитване [2]. Подобни въпроси са разглеждани и в други изследвания върху приложението, конструктивните особености и методите за контрол на сухотръбията [3].

Международната практика разглежда сухите и мокрите пожарни водопроводи като системи, които трябва да се проектират, изграждат, изпитват и поддържат като цялостни противопожарни активи. BS 9990:2015 дава препоръки за проектиране, монтаж, изпитване и поддръжка на неавтоматични пожарогасителни системи, включително сухи и мокри пожарни магистрали [14]. NFPA 14 определя изисквания за инсталиране на standpipe и hose systems, така че те да доставят надежден воден дебит при пожар [13].

Проблемът, разгледан в настоящия доклад, е скритата деградация. Сухотръбието може да изглежда изправно при външен оглед, докато вътрешната му повърхност е засегната от корозия, люспи, отпадъци, утайка или чужди тела. Тези дефекти повишават вероятността от запушване, влошават хидравличната проводимост и могат да доведат до повреди в съединители, шлангове и струйници. Корозионните понятия следва да се използват в съответствие с ISO 8044:2024, а влиянието на атмосферната среда и влагата може да се описва чрез класификацията и факторите на ISO 9223:2012 [8,9].

Целта на доклада е да предложи проверим метод за цифрово-графично установяване, количествена оценка и прогнозиране на видимото развитие на корозия в сухотръбия за пожарогасене. Методът съчетава ендоскопска визуализация, калибриране на изображението, сегментиране на корозионно засегнатите зони, периодично повторение на измерването и проверка чрез допълнителни неразрушаващи или лабораторни методи [5-7,10-12,15,16].

2. МЕТОДОЛОГИЯ

2.1. Диагностична концепция

Предложеният диагностичен цикъл включва пет последователни операции: подготовка на входящия и етажните възли; ендоскопски оглед на вътрешната повърхност на тръбата; калибриране на цифровото изображение; сегментиране на зоните с корозия и количествено изчисляване на засегнатата площ; сравнение с предходни измервания за получаване на прогноза за развитие. Цикълът е приложим при приемни проверки, периодична поддръжка и целеви оглед след съмнение за запушване или повреда.

Концепцията, развита от Костов и Станева, включва широкоъгълна камера, която предава 360-градусово изображение в реално време, светлинен източник за заснемане на корозионните петна и ултразвуков сензор за локализиране на чужди тела във вътрешността на сухотръбието [2]. В настоящия доклад тази концепция се допълва с формализирана процедура за измерване на площта и прогнозиране на изменението във времето.

Диагностиката не трябва да се свежда само до визуално разпознаване. Цветът и текстурата на корозионните продукти могат да варират според осветлението, влажността, типа на покритието и състоянието на повърхността. Затова е необходимо да се работи със сравними изображения, постоянна схема на осветяване, запис на настройките на камерата и запазване на суровия файл за последваща проверка. Подходи за анализ на корозия чрез цветови и текстурни признаци са разглеждани в съвременната литература [15,16].

2.2. Количествена оценка чрез цифрово изображение

Методът на Шопов и Бонев е разработен за повърхностни, практически плоски стоманени елементи, при които мащабираното изображение може да се разглежда като ортогонална проекция и един пиксел представя приблизително еднаква площ [5]. При сухотръбието обектът е вътрешната цилиндрична повърхност на тръба с кръгло сечение.

Поради това директното приложение на равнинната зависимост $A_c = s^2 \cdot \Sigma I$ върху неразгънат ендоскопски кадър не е достатъчно акуратно, освен при много малък локален участък, който се приема за плосък.

За да бъде резултатът геометрично коректен в mm^2 , изображението трябва да бъде калибрирано и приведено към разгъвка на цилиндъра. Нека D_i е вътрешният диаметър на тръбата, $R_i = D_i/2$ - вътрешният радиус, l - дължината на обследвания тръбен сегмент, а φ - ъгловият обхват на видимия сектор в радиани ($\varphi = 2\pi$ при пълна 360-градусова разгъвка). Ако в разгъвката има n_z пиксела по оста на тръбата и n_θ пиксела по периферното направление, осевият мащаб е:

$$s_z = \frac{l}{n_z}, \text{ mm/pixel} \quad (1)$$

Ъгловата стъпка на един пиксел в периферното направление е:

$$\Delta Q = \frac{\varphi}{n_\theta}, \text{ rad/pixel} \quad (2)$$

Площта, представена от един пиксел върху разгънатата цилиндрична повърхност, е:

$$\Delta A_{cyl} = R_i \cdot \Delta \theta \cdot s_z = \frac{D_i}{2} \cdot \frac{\varphi}{n_\theta} \cdot \frac{l}{n_z}, \text{ mm}^2/\text{pixel} \quad (3)$$

Ако $I_k(i,j)$ е бинарен индикатор, равен на 1 за пиксел от k -тия кадър, класифициран като корозионно засегнат, и 0 за останалите пиксели, корозионната площ върху цилиндричната повърхност се получава като:

$$A_{c,k} = \Delta A_{cyl} \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sum_{j=1}^{n_\theta} I_k(i,j) \quad (4)$$

Референтната площ на разгънатия анализиран сектор е:

$$A_{ref,k} = R_i \cdot \varphi \cdot l = \frac{D_i}{2} \cdot \varphi \cdot l; \varphi = 2\pi \Rightarrow A_{ref} = \pi \cdot D_i \cdot l \quad (5)$$

Относителната степен на видимо корозионно увреждане се определя като:

$$D_{A,k} = \frac{A_{c,k}}{A_{ref,k}} \cdot 100, \% \quad (6)$$

Така адаптираният показател е акуратен за цилиндричен елемент, защото площта се отчита по разгъвката на вътрешната повърхност, а не по перспективната проекция на ендоскопския кадър. Когато липсват D_i , l , φ или надеждна разгъвка на изображението, резултатът не трябва да се отчита в mm^2 ; допустим е само безразмерен процент пиксели в постоянна област на интерес.

2.3. Прогнозиране и проверка

Прогнозиране на развитието е възможно само при най-малко две измервания на един и същ тръбен сегмент, извършени при еднаква геометрична дефиниция на разгъвката. Най-простият измерим индикатор е годишната промяна на процента видима корозия:

$$v_D = \frac{D_A(t_2) - D_A(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

където v_D е скоростта на изменение в процентни пункта за година. Консервативна линейна прогноза може да се запише като:

$$D_{A(t)} = D_A(t_0) + v_D \cdot (t - t_0) \quad (8)$$

При зададен праг D_{lim} прогнозният момент за достигане на прага е:

$$t_{\lim} = t_0 + \frac{D_{\lim} - D_A(t_0)}{v_D} \quad (9)$$

Прагът $D_{\lim}$ не е нормативно определена стойност в настоящия доклад. Той трябва да се задава от компетентен инженер или орган за конкретния обект, като се отчитат материалът на тръбата, дебелината на стената, резултатите от хидравлично изпитване, надеждността на хранващите и етажните възли и изискванията на приложимите стандарти.

При лабораторни или полеви купонни измервания корозионната скорост може да се проверява чрез стандартната форма за загуба на маса при изпитване на потапяне:

$$CR = \frac{87,6 \cdot W}{\rho \cdot A \cdot T} \quad (10)$$

където CR е в mm/year, W е загубата на маса в mg, ρ е плътността на метала в g/cm³, A е действително експонираната площ в cm², а T е времето на експозиция в часове. За тръбен сегмент A трябва да бъде вътрешната цилиндрична площ, т.е. $\pi \cdot D_i \cdot l$ за пълен периметър или $R_i \cdot \phi \cdot l$ за сектор. ASTM G1 описва подготовка, почистване и оценяване на корозионни пробни тела, а ASTM G31 разглежда лабораторно потапяне на метали [10, 11].

За проверка на остатъчната дебелина на тръбата може да се използва ултразвуково измерване по импулсно-ехов метод. Основната геометрична зависимост е:

$$h = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (11)$$

където h е дебелината или разстоянието до отражателя, c е скоростта на ултразвуковата вълна в материала, а Δt е измереното време за двупосочно преминаване на сигнала. При тръба измерването трябва да се извършва с калибриран уред, подходящ преобразувател и достатъчен брой точки по периферията и дължината, тъй като локалните питинги и кривината могат да влияят на повтаряемостта.

3. ДАННИ

Като експлоатационен контекст е използван предходният доклад на Костов и Станева [2]. В настоящия текст анкетното проучване не се разглежда като самостоятелен статистически резултат, а само като практическа индикация за два риска, които трябва да се проверяват при оглед: вътрешна корозия и възможни запушвания на входящите/изходящите възли и тръбния път.

Основният проверим числов пример е от изследването на Шопов и Бонев върху плосък повърхностен стоманен елемент [5]. Той не се използва като директен геометричен модел на тръбата, а като база за проверка на стъпките по цифрово-графична сегментация и изчисляване на относително засегната площ. При приложение в сухотръбие площта се изчислява по разгъвка на вътрешната цилиндрична повърхност, съгласно формули (1)-(6).

Таблица 1. Числови данни от цифрово-графичното изследване на корозия върху плосък стоманен елемент [5].

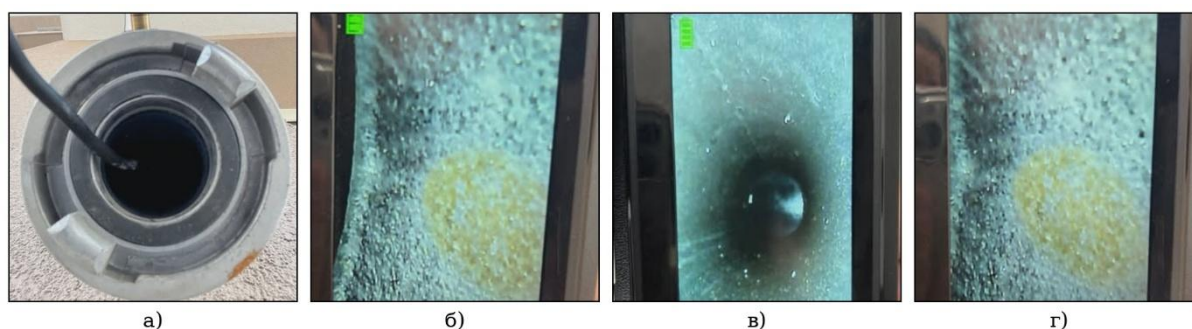
Параметър	Стойност / процедура	Използване в настоящия метод
Референтен елемент	Плоска стоманена планка с размери 165 x 100 mm	Известна геометрия за проверка на алгоритъма; при тръба се използва цилиндрична разгъвка
Референтна площ A_{ref}	16 500 mm ²	Площ на плоския елемент; при сухотръбие се заменя с A_{ref} от формула (5)

Параметър	Стойност / процедура	Използване в настоящия метод
Измерена корозионна площ A_c	2 109.5908 mm ²	Равнинен резултат от източника; при цилиндър се изчислява чрез ΔA_{cyl} от формула (3)
Относителна засегната площ D_A	12.7853%	Проверка на площното отношение; не се приема автоматично за площ по тръбата

4. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

4.1. Практически пример от авторски ендоскопски снимки

За да се покаже практическата приложимост на метода, в анализа е включен полеви снимков материал, направен от авторите при оглед на вътрешността на пожарно сухотръбие с ендоскопска камера. На фиг. 1 е показано въвеждане на камерата през съединител тип „Щорц“ и няколко мониторинжни кадъра от вътрешната повърхност. Видими са неравномерна грапавина, отделни светли частици, тъмни локални участъци и жълтеникаво-кафяво петно, което е подходящо за демонстрация на цветово отделяне на зона с променен външен вид.



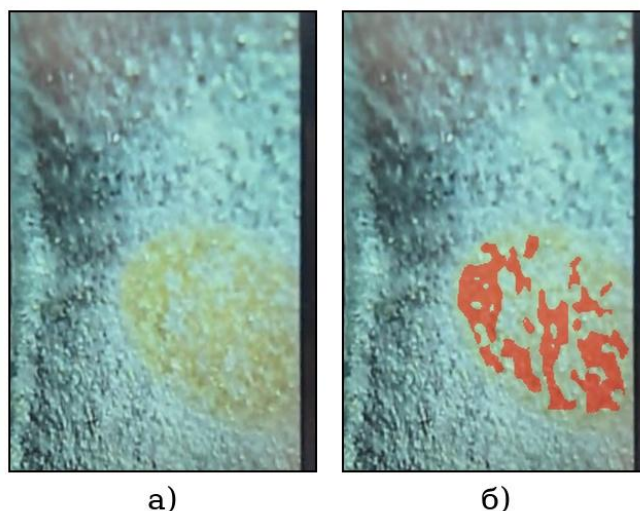
Фигура 1. Авторски снимки от ендоскопски оглед на сухотръбие: а) въвеждане на камера през съединител тип „Щорц“; б) локално жълтеникаво-кафяво оцветяване и налепи; в) изглед по оста на тръбата; г) повторен кадър на зоната с оцветяване. Снимки: Е. Станева и М. Костов.

Тези кадри не трябва да се тълкуват като окончателно доказателство за загуба на дебелина, защото са снимки от дисплей и не съдържат калибровъчен размер. Те обаче са полезни като практическа база за първичен протокол: идентифициране на тръбния сегмент, описание на видимите отложения, архивиране на кадрите и избор на участък за повторна проверка или за ултразвуково измерване.

Когато липсват надежден мащаб и цилиндрична разгъвка, не се изчислява площ в mm². В този случай може да се използва само безразмерен визуален индикатор за цветово различимата зона:

$$I_{vis,k} = \frac{N_{yb,k}}{N_{ROI,k}} \cdot 100, \% \quad (12)$$

където $N_{yb,k}$ е броят пиксели, отделени като жълто-кафява или ръждоподобна зона в k-тия кадър, а $N_{ROI,k}$ е броят пиксели в избраната област на интерес. Индикаторът $I_{vis,k}$ служи само за сравнение между повторни снимки, направени при еднакви настройки, и не замества площната оценка върху разгънатата цилиндрична повърхност.



Фигура 2. Демонстрационна обработка на мониторен кадър: а) изрязан кадър от фиг. 1, б); б) примерна сегментация на цветово различима жълто-кафява зона.

В демонстрационния кадър на фиг. 2 областта на интерес е 240×360 пиксела, т.е. $N_{ROI} = 86\,400$ пиксела. При използване на една и съща проста цветова настройка за жълто-кафявата зона се отделят $N_{yb} = 6\,320$ пиксела. По формула (12) се получава $I_{vis} = 6\,320 / 86\,400 \times 100 = 7.31\%$. Тази стойност е само вътрешнокадров индикатор за повторяеми сравнения и не представлява корозионна площ на тръбата.

Практическото решение по този пример е сухотръбието да се включи в списък за последваща проверка: почистване или промиване при установени свободни частици, повторно заснемане на същия сегмент, проверка за проходимост и ултразвуково измерване на дебелина в зоните с устойчиво нарастващи цветови и текстурни изменения.

4.2. Обобщена интерпретация

Предходният доклад на Костов и Станева [2] се използва преди всичко като експлоатационна мотивация: в него са посочени рисковете от скрита вътрешна корозия, запушвания и недостатъчна регулярна диагностика. Анкетното проучване е споменато само бегло и не е основа за самостоятелни статистически изводи в настоящия доклад.

Числовият пример на Шопов и Бонев потвърждава принципа на цифровото разграничаване на корозионно засегнати и незасегнати пиксели при плоска стоманена планка. При $A_{ref} = 16\,500\text{ mm}^2$ и $A_c = 2\,109.5908\text{ mm}^2$ се получава $D_A = 2\,109.5908 / 16\,500 \times 100 = 12.7853\%$, което съвпада с публикувания резултат [5]. Този пример валидира алгоритмичната стъпка за сегментация, но не е директна геометрична формула за сухотръбие.

За сухотръбие с кръгло сечение коректната анализирана повърхност е вътрешната странична повърхност на цилиндър. Ако се анализира сегмент с дължина l и ъглов обхват ϕ , референтната площ е $A_{ref} = R_i \cdot \phi \cdot l$; при пълен периметър $A_{ref} = \pi \cdot D_i \cdot l$. Следователно равнинната зависимост $A_c = s^2 \cdot \Sigma I$ е допустима само след разгъване и калибриране на цилиндричната повърхност, когато s^2 е заменено с ΔA_{cyl} от формула (3), или при ясно обосновано локално плоско приближение.

Практически това означава, че за всеки ендоскопски протокол трябва да се записват минимум: вътрешен диаметър или измерен радиус, обследвана дължина, ъглов сектор, схема на ориентиране в тръбата, настройки на осветяване и използвана маска за сегментация. Без тези данни резултатът остава качествен или относителен, както е примерът със снимка от дисплей.

Прогнозният модел трябва да се тълкува като инструмент за поддръжка, а не като самостоятелна конструктивна оценка. Увеличаването на корозионно засегнатата площ в изображенията може да показва активизиране на процеса, но не определя директно остатъчната носимоспособност или устойчивостта на тръбата при налягане. За такава оценка са необходими измервания на дебелина, изпитване на проходимост и проверка на херметичността.

Методът подобрява проследимостта на контрола. Всяка проверка генерира архив от изображения, калибрирани измервания, процент на видима корозия и бележки за наличие на отпадъци или препятствия. Когато един и същ тръбен сегмент се обследва периодически, промяната на ДА може да се използва за приоритизиране на ремонт, почистване, допълнително ултразвуково измерване или хидравлично изпитване.

5. ИЗВОДИ

1. Сухотръбията са критични пожарогасителни системи, но вътрешното им състояние може да остане неизвестно при обикновен външен оглед. Използваните данни потвърждават два основни практически риска: корозия и запушване от чужди тела [2].

2. Калибрираното и разгънато ендоскопско изображение може да осигури възпроизводим площен показател за видима корозия върху вътрешната повърхност на цилиндричен елемент. Формули (1)-(6) заменят равнинното s^2 -машабиране с площ на пиксел върху разгъвката на тръбата.

3. Прогнозиране е възможно само при повторни измервания на един и същ сегмент, при еднаква дефиниция на разгъвката и сравнима осветеност. Скоростта v_D в процентни пункта за година е прозрачен индикатор за поддръжка, но не трябва да се използва самостоятелно като доказателство за конструктивна безопасност.

4. Методът чрез изображения трябва да се комбинира с хидравлични изпитвания, почистване, проверка на крановете и ултразвуково измерване на дебелина. Надеждността на сухотръбието зависи едновременно от проходимостта, херметичността, състоянието на стените и готовността на присъединителните възли.

5. Предходните експлоатационни наблюдения следва да се използват само като контекст за необходимостта от периодичен контрол, защита на входящите отвори, почистване на съединителите и проверка на проходимостта.

6. Бъдещата работа следва да включва повторни обследвания на реални сухотръбия, проверка на сегментацията при различна осветеност, сравнение с ултразвукови данни за дебелина и определяне на практически прагове за ремонт или извеждане от експлоатация.

7. Авторските ендоскопски снимки потвърждават практическата полза от документиран визуален оглед: локални налепи и цветово различни зони могат да бъдат регистрирани, архивирани и използвани за избор на участъци за повторен контрол, но трябва да се комбинират с калибриране и ултразвуково измерване преди инженерно заключение за остатъчна дебелина.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Наредба № Из-1971 от 29.10.2009 г. за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар, обн. ДВ, бр. 96/2009 г., доп. ДВ, бр. 46/2025 г., Министерство на регионалното развитие и благоустройството.
- [2] Костов М., Е. Станева, Относно някои проблеми при експлоатацията на сухотръбия за пожарогасене, Сборник доклади от научна конференция Актуални проблеми на сигурността, НВУ „Васил Левски“, 2026, 1296-1301, ISSN 2367-7465 (print), ISSN 2367-7473 (online),
- [3] Нейкова Ж., Сухотръбия - приложение, конструктивни особености, контрол, методи за изпитване. Сборник доклади на Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCivE 2021, Vol. 3, 2021, 530-539, ISSN 2535-0781.

- [4] Проданов Х., Развитие и ликвидиране на пожарите в многофамилни жилищни сгради, Академия на МВР, София, 2022, ISBN 978-954-348-234-4.
- [5] Шопов А., Б. Бонев, Определяне на корозията върху повърхностни елементи чрез използване на графично цифрово изображение, XVIII Юбилейна международна научна конференция по строителство и архитектура ВСУ'2018, 2018, 731-736.
- [6] Schneider C.A., W.S. Rasband, K.W. Eliceiri, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nature Methods*, 9(7), 2012, 671-675, DOI 10.1038/nmeth.2089.
- [7] ImageJ User Guide, IJ 1.46r, Analyze - Set Scale and measurements, National Institutes of Health / ImageJ documentation, 2012. Available: <https://imagej.net/ij/docs/guide/146-30.html> [посетен на 17 юни 2026 г.].
- [8] ISO 8044:2024, Corrosion of metals and alloys - Vocabulary, International Organization for Standardization, Geneva, 2024.
- [9] ISO 9223:2012, Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation, International Organization for Standardization, Geneva, 2012.
- [10] ASTM G1-03(2017)e1, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, DOI 10.1520/G0001-03R17E01.
- [11] ASTM G31-21, Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [12] ASTM E797/E797M-21, Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021, DOI 10.1520/E0797_E0797M-21..
- [13] NFPA 14, Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems, 2024 Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2024.
- [14] BS 9990:2015, Non automatic fire-fighting systems in buildings - Code of practice, British Standards Institution, London, 2015.
- [15] Pidaparti R.M., B. Hinderliter, D. Maskey, Evaluation of corrosion growth on SS304 based on textural and color features from image analysis, *ISRN Corrosion*, 2013, Article ID 376823, DOI 10.1155/2013/376823.
- [16] Naik D.L., H.U. Sajid, R. Kiran, G. Chen, Detection of corrosion-indicating oxidation product colors in steel bridges under varying illuminations, shadows, and wetting conditions, *Metals*, 10(11), 2020, 1439, DOI 10.3390/met10111439.