

# Стійкість критичних інфраструктур: методологія оцінки ризиків для енергетичних коридорів

НАПИСАНО

Андреа Карпіньяно, Даніеле Гроссо, Рафаелла Джербоні та Андреа Болонья

Надіслано: 30 червня 2020 р. Переглянуто: 26 жовтня 2020 р. Опубліковано: 21 листопада 2020 р.

DOI: 10.5772/intechopen.94755

## Анотація

Потреба в наукових методологіях для кількісної оцінки стійкості КІ до стихійних лих (землетруси, повені, шторми, зсуви, лісові пожежі) протягом останнього десятиліття стала актуальним аспектом для деяких країн і ЄС. Насправді, ця кількісна оцінка може дозволити встановити та впровадити ефективні заходи для запобігання або пом'якшення негативних соціально-економічних наслідків, які може спричинити можливе порушення роботи цих інфраструктур, спричинене екстремальними природними явищами. Ця стаття зосереджується, зокрема, на енергетичних коридорах і пропонує новий підхід до оцінки їх стійкості, заснований на визначенні індексу критичності, здатного оцінити економічні збитки, пов'язані з усіма небезпеками, беручи до уваги просторовий вимір інфраструктури та шлях поєднання різних взаємозалежних параметрів, які можуть впливати на рівень критичності. Процедура було перевірено за допомогою застосування до спрощеного прикладу. Отримані результати підкреслили основні переваги визначеного методу, особливо у ранжуванні критичних ділянок інфраструктури та визначенні пріоритетів інвестицій для її зміцнення та захисту або у визначенні подальших тестів, які необхідно виконати, особливо у випадку повторної оцінки прийняттого ліміту ризику.

## 1. Введення

Зменшення вразливості до всіх можливих небезпек, які можуть завдати шкоди КІ, шляхом підвищення рівня захисту та підвищення стійкості ОКІ, є однією з головних цілей ЄС. Мета полягає в тому, щоб максимально обмежити ймовірність поширених негативних наслідків для громадян та економіки ЄС шляхом забезпечення послуг навіть у разі значних руйнівних подій, узгоджених із цілями Стокгольмської програми<sup>1</sup> та Стратегії внутрішньої безпеки ЄС<sup>2</sup>.

Міжнародна стратегія ООН зі зменшення ризиків стихійних лих (UNISDR) визначила стійкість як «здатність системи, спільноти чи суспільства, які зазнають небезпеки, протистояти, поглинати, пристосовуватися до наслідків небезпеки та відновлюватися після них своєчасно та ефективно, у тому числі шляхом збереження та відновлення його основних базових структур і функцій»<sup>3</sup>. Це загальне твердження також стосується КІ.

Згідно з визначенням, вперше наданим Європейським Співтовариством у Повідомленні 2004 року «Захист КІ в боротьбі з тероризмом»<sup>4</sup>, КІ – це ключові системи, об'єкти, мережі або активи, порушення яких призведе до відповідного впливу на соціально-економічний стан і розвиток держави-члена. Для посилення їх захисту не тільки від тероризму, а й від усіх інших небезпек (зокрема, стихійних лих) була створена Європейська програма захисту КІ (EPCIP)<sup>5,6</sup>. Метою цієї програми було визначення загальної основи, заснованої на кількох принципах, включаючи субсидіарність, секторний підхід, взаємодоповнюваність,

конфіденційність, пропорційність та співпрацю зацікавлених сторін. Вона була зосереджена на ідентифікації європейських критичних інфраструктур (ЄКІ), визначених як КІ, розташовані в державах-членах ЄС, збій у яких суттєво вплине принаймні на дві країни-члени<sup>5</sup>. Вона також розглянула їхню можливу взаємозалежність, оцінку їхнього ризику за допомогою спільних підходів та заходів, які можуть бути встановлені для покращення їхнього захисту, коли наслідки після аварії за межами кордонів ЄС можуть впливати на ЄС, плани на випадок непередбачених обставин для зменшення або пом'якшити негативних наслідків порушень КІ<sup>5</sup>.

Одним із найбільш актуальних документів для імплементації захисту європейської КІ є Директива 2008 року про «ідентифікацію та позначення ЄКІ та оцінку потреби у покращенні їх захисту»<sup>7</sup>. Він являє собою перший підхід до ідентифікації ЄКІ та оцінки потреби у підвищенні рівня її захисту, і він стосується лише двох конкретних секторів (енергетики та транспорту), вказуючи на необхідність майбутніх переглядів, спрямованих на включення інших секторів, таких як інформація та комунікаційні технології (ІКТ). Він також вимагає від власників/операторів ідентифікованого ЄКІ розробляти плани безпеки оператора (ПБО), які визначають існуючі або реалізовані варіанти захисту ЄКІ.

У 2013 році було запроваджено перегляд Європейської Програми Захисту КІ<sup>8</sup>, спрямований на організацію виконання заходів за трьома робочими потоками (запобігання, готовність та реагування), на поглиблення аналізу взаємозалежностей (міжгалузевих і транскордонних) і враховування зв'язок КІ з іншими КІ (особливо КІ виробництва та передачі електроенергії).

У 2017 році Європейська комісія започаткувала оцінку впровадження Директиви 2008 року та зосередження уваги на її актуальності, узгодженості, ефективності, доданої вартості та стійкості для ЄС. Процес оцінки завершився у 2019 році. Це свідчить про необхідність перегляду Директиви, включаючи інші сектори, окрім енергетичного та транспортного, та враховуючи взаємозалежність між секторами. Крім того, це підкреслює актуальність, яку можуть мати нові загрози, в тому числі ті, що пов'язані зі штучним інтелектом, впровадження передових ІКТ-рішень, які можуть створювати нові вразливості, і залучення третіх країн до володіння та експлуатації КІ<sup>9,10</sup>.

Для ефективного посилення захисту КІ необхідні кількісні методиками, здатні оцінити стійкість КІ і цілісно оцінити різні задіяні виміри. Зокрема, підходи, запропоновані в науковій літературі, зосереджені на деяких ключових аспектах, пов'язаних із концепцією стійкості інфраструктури, а саме: спеціальні методології оцінки ризиків для кількісного визначення стійкості КІ, взаємозв'язки та взаємозалежності між КІ, аналіз вразливості інфраструктури з огляду на різний рід загроз. Деякі з цих підходів також намагаються оцінити багатовимірний (енергетичний, соціальний, екологічний та економічний) вплив через руйнівні події за участю КІ.

Що стосується цих аспектів, у літературі доступні різні огляди запропонованих досліджень, напр. ті, що були проведені Ouyang<sup>11</sup>, Griot<sup>12</sup>, Wang et al.<sup>13</sup> і Liu et al.<sup>14</sup>

Розглядаючи кількісні методології для оцінки стійкості КІ, насамперед можна згадати два дослідження, підготовлені JRC. Зокрема, Galbusera et al.<sup>15</sup> запропонували техніко-економічне обґрунтування застосування стрес-тестів (подібних до тих, що застосовуються в ядерному та економічному секторах) для оцінки стійкості КІ проти кількох небезпек. Giannopoulos et al.<sup>16</sup> провели аналіз сучасного стану методологій оцінки ризиків, які можуть бути корисними для захисту КІ. Загальний підхід до аналізу ризиків та управління системами систем можна знайти в дослідженнях, проведених Haines et al.<sup>17</sup> та Ariel Pinto<sup>18</sup>.

Eusgeld et al.<sup>19</sup> проаналізували альтернативні варіанти моделювання (інтегровані та пов'язані моделі) для систем і запропонували конкретну архітектуру високого рівня для моделювання диспетчерського контролю та збору даних і «системи під контролем» (як система газопостачання або система електропостачання). Labaka et al.<sup>20, 21</sup> запропонували цілісну структуру (на основі ідентифікації політик стійкості, їх впливу та методології їх реалізації), спрямовану на підвищення стійкості КІ шляхом визначення рівня їх стійкості, їх слабких сторін та можливих покращень, які необхідно реалізувати. Mao et al.<sup>22</sup> підкреслили, що різні заходи, спрямовані на підвищення стійкості КІ, можуть бути узгодженими або суперечити один одному через відсутність системного підходу. Отже, вони запропонували структуру, засновану на розгортанні функції якості, яка враховує кореляції між діями щодо покращення стійкості на різних етапах життєвого циклу КІ. Nan et al.<sup>23</sup> запропонували метод оцінки стійкості, який поєднує гібридну багаторівневу модель (для фіксації взаємодії між різними підсистемами) та інтегровану метрику (для кількісного визначення стійкості, враховуючи різні можливості стійкості). Ouyang et al.<sup>24</sup> зосереджено на захисті КІ, починаючи з дій, які можуть бути прийняті для захисту слабких компонентів системи до того руйнівної події. Порівнюючи підхід, заснований на надійності (в основному пов'язаний із рівнем функціональності системи, що залишився після події та до неї) та відновленні стійкості (включає можливий шлях відновлення та відповідну швидкість).

Кілька авторів підкресливали можливість моделювати інфраструктурні мережі як взаємопов'язану систему, щоб правильно описати каскадні ефекти через їх сильну взаємозалежність. Theocharidou et al.<sup>25</sup> запропонував нову методологію – Critical Infrastructures & Systems Risk and Resilience Assessment Methodology (CRISRRAM) – розроблену в перспективі всіх небезпек і на основі системного підходу, який вводить три рівні (суспільство, активи та систему) і оцінює впливи на економіку, навколишнє середовище та громадян. Інший підхід, заснований на концепції системи, моделюванні Монте-Карло та представленні взаємозалежних КІ за допомогою ієрархічного графіка, описаний Ferrario et al.<sup>27</sup>, який було застосовано до двох прикладів – відносно малих електричних і газових мереж (плюс система SCADA) і великої розподільчої електричної мережі – для оцінки їх надійності. Kröger et al.<sup>28</sup> і Zio<sup>29,30</sup> також запропонували підхід, корисний для захисту КІ, заснований на концепціях ризику та вразливості та здатний дозволити ідентифікацію можливих уразливостей, таким чином уникаючи збоїв, які можуть виникнути, коли КІ зазнають небезпек множинної природи. Johansson et al. також зосередився на можливості використання аналізу вразливості для завершення досліджень надійності КІ<sup>31</sup> і продемонстрував це шляхом застосування підходу Монте-Карло для аналізу надійності та вразливості електроенергетичної системи. Крім того, Johansson et al.<sup>32</sup> запропонував модель, яка може бути корисною в рамках аналізу вразливості взаємозалежних інфраструктур, які описуються мережевою (на основі теорії графів) і функціональною моделлю. Stergiopoulos et al.<sup>33</sup> досліджували взаємозалежності між КІ, які спричиняють каскадні ефекти у випадку аварії. Для цього автори виходили з методології ризику залежності, запропонованої Kotzanikolaou et al.<sup>34,35</sup>, і представили метрики центральності графа, щоб ідентифікувати вузли, які головним чином впливають на шляхи ризику і якими, таким чином, можна керувати, щоб покращити пом'якшення ризику. Крім того, Stergiopoulos et al.<sup>36</sup> розширили дослідження Kotzanikolaou et al.<sup>34,35,37</sup> шляхом розгляду еволюції кожної залежності в часі (з використанням нечітких моделей) і одночасних каскадних відмов із загальної причини, розробивши допоміжний інструмент для прийняття рішень (аналіз залежностей КІ). Цей інструмент може бути корисним для оцінки стійкості КІ за різних сценаріїв та ефективності можливих заходів пом'якшення. Fu

et al.<sup>38</sup> також зосередився на можливості розглядати інфраструктурні мережі як взаємозалежну систему систем, тоді як Utne et al.<sup>39</sup> запропонували методологічний підхід до моделювання взаємозалежностей між КІ, побудованими на основі використання відносно простих каскадних діаграм. Крім того, JRC розробив платформу оцінки геопросторових ризиків і стійкості (GRRASP), графічний інструмент для аналізу мережевих систем, який можна застосувати для ідентифікації критичних елементів мережі та оцінки каскадних ефектів збоїв КІ, враховуючи перехресні галузеві та транскордонні взаємозалежності<sup>40</sup>.

Нарешті, з посиланням на аналіз впливу різних загроз на КІ, були розроблені спеціальні моделі для оцінки фізичної безпеки та стійкості самих КІ проти окремих видів небезпек. Зокрема, Khalil et al.<sup>41</sup> зосереджено на моделюванні фізичної безпеки КІ під час сценаріїв атак за допомогою імовірнісного динамічного підходу на основі Монте-Карло. Urlainis et al.<sup>42</sup> натомість реалізував допоміжний інструмент для прийняття рішень, придатний для оцінки ризику, пов'язаного з КІ нафти та газу після виникнення сейсмічної події. Цей інструмент використовує дерева відмов, дерева рішень і криві нестабільності та дозволяє ідентифікувати найбільш критичні розділи аналізованої системи на основі стану пошкодження її компонентів. Shakou et al.<sup>43</sup> запропонував структуру для підвищення стійкості КІ щодо явищ зміни клімату, засновану на різних часових масштабах і таку, що сприяє гнучкості, модульності та диверсифікації.

У порівнянні зі згаданими дослідженнями, доступними в науковій літературі, новий методологічний підхід, запропонований у цій статті, зосереджується головним чином на окремих великих інфраструктурах (енергетичних коридорах для постачання нафти та газу) і спрямований на врахування їх географічного виміру, що дозволяє аналізувати характеристику високої просторової зернистості. Крім того, запропонована процедура здатна розглянути найбільш релевантні взаємозалежності між параметрами, які можуть вплинути на критичність інфраструктури, за допомогою простого математичного формулювання. Тому ця робота має на меті стати допоміжним інструментом не лише для компаній з управління інфраструктурою та цивільного захисту, а й для державних адміністрацій.

У статті розглядаються енергетичні КІ: згідно з Директивою ЄС 2008 року до цієї категорії належать ОКІ для виробництва та транспортування електроенергії, для видобутку, обробки, зберігання та транспортування нафти та газу, а також LNG-термінали<sup>7</sup>. Зокрема, йдеться про енергетичні коридори (нафто- та газопроводи, лінії електропередач).

Його мета — визначити методологію для оцінки індексу критичності, пов'язаного з несправністю ЕКІ через надзвичайні природні небезпеки (землетруси, повені, шторми, зсуви, лісові пожежі). Цей індекс критичності корисний для оцінки рівня критичності кожної ділянки самої інфраструктури (з урахуванням її просторового виміру) щодо соціально-економічного збитку (вимірюваного в економічних одиницях), спричиненого аварією. Крім того, можливість оцінити відстань від статусу критичності навіть у випадку некритичних сценаріїв і порівняти стан критичності з критерієм прийнятності ризику (визначення – для найбільш критичних секцій – необхідності проходження структурних випробувань) може дати цінну підтримку у визначенні пріоритетів інвестицій та у визначенні відповідних контрзаходів і захисних заходів.

## 2. Методика

Запропонований підхід виходить з концепції енергетичного коридору. Коридор можна визначити як розгалужену інфраструктуру (наприклад, газопроводи, нафтопроводи та великі лінії електропередач), що характеризується початковою та кінцевою точками, що з'єднує виробничі/нафтопереробні підприємства з розподільними вузлами. Енергетичні коридори зазвичай є стратегічними елементами для економіки країн, які з ними пов'язані. Їхній вплив поширюється на велику територію, не обмежуючись географічним сусідством інфраструктури. У майбутньому світі, який буде взаємопов'язаний з великомасштабними енергетичними ринками, роль енергетичних коридорів може стати вирішальною: диверсифікація джерел і можливість забезпечення функціональності інфраструктур можуть суттєво вплинути на безпеку енергопостачання і на економічні системи країн, що характеризуються високим рівнем залежності від імпорту енергоносіїв.

З цих причин кількісна оцінка стійкості енергетичних коридорів проти можливих несприятливих подій шляхом чисельної оцінки рівня їх критичності та одночасне визначення відповідних критеріїв прийнятності ризику є важливими для визначення ділянок, які потребують уваги та інвестицій для запобігання потенційно серйозним збоєм, які можуть вплинути на ВВП із втратами в різних масштабах.

Відповідно до методології, спочатку було визначено набір параметрів, що впливають на статус критичності коридору та їх взаємозалежності (Розділ 2.1). Потім було створено зв'язок цих параметрів, щоб визначити новий індекс критичності (розділ 2.2). Критерій прийнятності ризику (розділ 2.3) і застосування всієї процедури до спрощеного прикладу обговорювалися (розділ 3).

### **2.1 Ідентифікація параметрів та їх взаємозалежності**

Запропонована методологія зосереджена на кількісній оцінці критичності окремої ділянки енергетичного коридору в перспективі всіх можливих екстремальних природних явищ.

Для цього першим кроком було визначення набору параметрів, які можуть вплинути на рівень критичності енергетичної КІ, шляхом їх кластеризації в різні групи та аналізу їх взаємозалежностей. Для врахування просторового розміру енергетичних коридорів була досліджена можлива залежність кожного параметра від географічного положення  $z_c$  (в межах від 0 до довжини коридору  $l_c$  і вимірюється в км) уздовж коридору. Трубопровід зазвичай може пролягати на великій довжині, і природне середовище може суттєво змінитися вздовж маршруту: певні природні небезпеки можна розглядати лише для обмеженого набору відгалужень, а не для загальної довжини коридору. Зрештою, було оцінено вплив зміни значення кожного параметра на шкоду. У цьому дослідженні було розглянуто 15 параметрів і 4 групи («Пов'язані з подіями», «Пов'язані з коридором», «Пов'язані з резервними джерелами» та «Пов'язані з користувачами»). Параметри наведені в таблиці 1, а залежність матриці наведена в таблиці 2. Взаємозалежності визначаються за припущенням збільшення значення кожного незалежного параметра та звітування про вплив на залежний параметр (зменшення або збільшення). У таблиці також наведено вплив кожного параметра на пошкодження.

Група	Параметр	Опис	Одиниця
Пов'язані з подією	$p$	Імовірність залучення більше ніж 1 об'єкта	-
	$\lambda$	Площа пошкодження (міра потенційної площі пошкодження від інциденту)	km
	$\tau$	Часовий масштаб інциденту (міра тривалості)	s

	$s$	Сезонний фактор (вплив пори року на подію)	-
Коридорний			
	$l_c$	Довжина коридору	km
	$c_{p,c}$	Пікова пропускна здатність коридору	GJ/s
	$RT$	Час ремонту	s
Пов'язані джерела резервного копіювання			
	$d_b$	Відстань між джерелом і коридором	
	$c_{p,b}$	Пікова потужність джерела	
	$r_{m,b}$	Мінімально доступні резерви для 1 джерела	
	$a_b$	Наявність джерела	
	$a_{tec}$	Технічна доступність джерела	
Пов'язані користувачі			
	$i$	Переривна ємність	GJ/s
	$a_i$	Наявність переривної ємності	-
	$e$	Енергоємність для розглянутого товару	€/GJ

Таблиця 1. Розглянуті параметри по групах.

Параметр	Опис	Залежність від займаної позиції $z_c$	Вплив на пошкодження		Взаємозалежності	
			↑	↓	↑ із	↓ із
$p$	Ймовірність залучення більшої кількості об'єктів	X	X		$\lambda$	$d_b$
$\lambda$	Відстань пошкодження		X			
$\tau$	Шкала часу події		X		$s$	$S$
$s$	Пора року					
$l_c$	Довжина коридору	X	X			
$c_{p,c}$	Пікова пропускна здатність коридору		X		$s$	$S$
$RT$	Час ремонту	X	X		$\tau, s$	$S$
$d_b$	Відстань джерело-коридор	X		X		
$c_{p,b}$	Пікова потужність джерела			X	$s$	$S$
$r_{m,b}$	Мінімальний запас джерела			X	$s$	$S$
$a_b$	Наявність джерела	X		X	$s, d_b$	$\lambda, s$
$a_{tec}$	Технічна доступність			X	$S$	$S$
$i$	Переривна ємність			X	$S$	$S$
$a_i$	Наявність та доступність $i$			X	$s$	$s$
$e$	Енергоємність		X			

Таблиця 2. Взаємозалежності та вплив на пошкодження.

Посилаючись на групу 1, сезонність  $s$ , яка представляє мінливість розглянутої природної події протягом року, є параметром, який головним чином впливає на інші. Імовірність того, що природна подія може вплинути не тільки на аналізований коридор, але й на інші інфраструктури, що постачають той самий товар (резервні джерела), строго пов'язана з масштабом самої події та географічним контекстом. Вона залежить від відстані між коридором (або відгалуженням коридору) і резервним джерелом, і на площі потенційного пошкодження для розглянутої події, кількісно визначеної через відстань пошкодження  $\lambda$ . Усі об'єкти, розташовані на відстані менше або дорівнює  $\lambda$ , залучені подією настільки, що їх функціональність втрачається.

Збільшення всіх параметрів, що стосуються коридору (група 2), викликає збільшення потенційної шкоди. Слід підкреслити, що  $RT$  – який включає не лише час, необхідний для ремонту інфраструктури, але й час для досягнення пошкодженої ділянки коридору та час для отримання запитаних запасних частин – залежить не лише від сезону, а й від часового і просторового масштабу події: чим більше географічне поширення природної події та її тривалість, тим більше часу потрібно для досягнення пошкодженої ділянки.

Збільшення параметрів, пов'язаних з доступністю резервних джерел, призводить до зменшення збитку. Середня відстань між резервними джерелами надає інформацію про ймовірність того, що резервне джерело може бути залучене до розглянутої екстремальної події: чим вище значення параметра, тим менша ймовірність. Доступність цих джерел залежить не тільки від сезонності, але й від відстані між коридором і джерелом. Зокрема, вона збільшується, якщо джерело знаходиться далеко від епіцентру події.

З огляду на Групу 4, параметри пов'язані з еталонним ринком: у разі можливого збою коридору оператор ринку може прийняти рішення про припинення постачання для деяких вибраних користувачів, щоб зменшити навантаження на розглянуту інфраструктуру. Переривна потужність може залежати від сезону. Енергоємність  $e$  (тобто кількість енергії, необхідна для виробництва одиниці ВВП), натомість, дає міру важливості товару, що постачається розглянутим коридором, дозволяючи кількісно визначити економічний збиток від втрати поставок як наслідок екстремальної події.

Можна підкреслити, що параметри, пов'язані з подією, можна оцінити на основі геологічних досліджень і досліджень природних небезпек щодо конкретного аналізованого місця. Серед них ймовірність залучення більшої кількості об'єктів потребує спеціальних формулювань і не може бути виражена у загальному вигляді за допомогою єдиного математичних співвідношень (як далі обговорюється в розділі 2.2). Більшість параметрів, пов'язаних із коридором і резервними джерелами, натомість є технічними даними, які зазвичай доступні для конкретної розглянутої інфраструктури. Тільки час ремонту слід оцінювати за допомогою відповідних баз даних або спеціальних досліджень (аналіз ремонтпридатності). Зрештою, посилаючись на параметри, пов'язані з користувачами, переривна потужність – це інформація, яка повинна бути відома залежно від уже підписаних контрактів і угод, тоді як енергоємність для товару, що перевозиться коридором, можна отримати зі статистичних джерел.

Крім того, для запропонованого методу коридор можна вважати одновимірним, тобто характеризувати лише біжучою координатою  $z$ . Це пов'язано з тим, що лише положення вздовж коридору, відстань між резервними джерелами по відношенню до коридору та відстань між епіцентром розглянутої природної небезпеки та самим коридором мають значення для аналізу.

## 2.2 Визначення індексу критичності

Починаючи з параметрів і взаємозалежностей, визначених у Розділі 2.1, для визначення індексу критичності, здатного кількісно визначити критичність окремої гілки/коридору, було визначено співвідношення, що виражає соціально-економічний збиток  $D$  через певний екстремальний природний ризик (рівняння (1)). Він виражає пошкодження  $D$  на ділянці гілки/коридору, визначеному координатою  $z_c$  (проходить по довжині коридору, від  $\theta$  до  $l_c$ ).

$$D(s, p, z_c, \tau) = \left\{ RT(s, z_c, \tau) \cdot \left[ c_{p,c}(s) - \alpha_i(s) \cdot i(s) - \sum_b \alpha_b(s, p) \cdot c_{p,b}(s) \cdot \left( \frac{T_b}{RT(s, z_c, \tau)} \right) \right] \cdot \frac{1}{e} \right\}$$

where:

$$\begin{cases} T_b = T_b(s, z_c, \tau) = RT(s, z_c, \tau) & RT(s, z_c, \tau) \leq \frac{r_{m,b}}{c_{p,b}} \\ T_b = T_b(s) = \frac{r_{m,b}(s)}{c_{p,b}(s)} & RT(s, z_c, \tau) > \frac{r_{m,b}}{c_{p,b}} \end{cases} \quad E_2$$

$$\alpha_b(s, p) = \alpha_{tec}(s) \cdot [1 - p(z_c)] \quad E_3$$

Рівняння (1) визначає економічну цінність частки товару, що перевозиться коридором з протягом надзвичайного періоду часу (ідентифікованого  $RT$ ), який не може бути доставлений за напрямом, незважаючи на внесок перериваючих користувачів і наявність резервних джерел. Насправді, зосереджуючись на квадратній дужці в рівнянні:

- термін  $c_{pc}$  визначає максимальну кількість товару, який може бути доставлений за секунду протягом сезону  $s$  і який втрачається через несправність; як наслідок, добуток між  $c_{pc}$  та  $RT$  визначає кількість енергії, недоступної протягом часу ремонту після несприятливої події, яка спричинила збій коридору
- добуток між  $ai$ ,  $i$  та  $RT$  визначає частину цього живлення, якої можна уникнути під час надзвичайної ситуації через те, що деякі користувачі перериваються
- добуток між  $ab$ ,  $cp,b$  і  $Tb$  відповідає кількості енергетичного товару, який може бути забезпечений резервними джерелами протягом часу ремонту.

Посилаючись на ймовірність того, що подія може включати інші об'єкти (зокрема, резервні джерела), крім розглянутого коридору, це може бути виражено декількома взаємозв'язками або більш складними міркуваннями, які не дозволяють просте математичне формулювання відповідно до різних класів природні події. Наприклад, у разі паводку річки  $p$  є функцією не тільки відстані між коридором і об'єктом, але й відстані між річкою та об'єктом. Крім того,  $p$  дорівнює  $\theta$ , якщо розглянутий об'єкт знаходиться поза межами природної небезпеки, незалежно від відстані між джерелом і коридором. Можливе співвідношення, яке можна прийняти для деяких класів подій, таких як землетруси, виражене в рівнянні (4) де можливі залучені об'єкти мають бути резервними джерелами  $b$ . Якщо відстань між резервним джерелом і коридором  $db$  менша, ніж відстань пошкодження  $\lambda$ , вважається, що об'єкт безумовно залучений до події. Якщо відстань  $db$  перевищує  $\lambda$  (тобто об'єкт розташований



поза зоною потенційного пошкодження), ймовірність того, що об'єкт залучено до події, зменшується пропорційно зі збільшенням  $db$ .

$$p(z_c) = \begin{cases} \frac{\lambda}{d_b(z_c)} & d_b(z_c) \geq \lambda \\ 1 & d_b(z_c) < \lambda \end{cases} \quad E4$$

Moreover, it has to be highlighted that Eq. (1) is defined if

$$c_{p,c}(s) - \alpha_i(s) \cdot i(s) - \sum_b \alpha_b(s, p) \cdot c_{p,b}(s) \cdot \left( \frac{T_b(s)}{RT(s, z_c, \tau)} \right) > 0$$

оскільки, з точки зору аналізу ризику, збиток  $D$  має бути позитивне визначення. Від'ємне значення  $D$  означає, що відповідна ділянка коридору не є критичною: від'ємні значення цього члена можуть бути отримані у випадку, якщо природним явищем не задіяні інші об'єкти, а втрата пропускної здатності коридору повністю компенсується резервними джерелами.

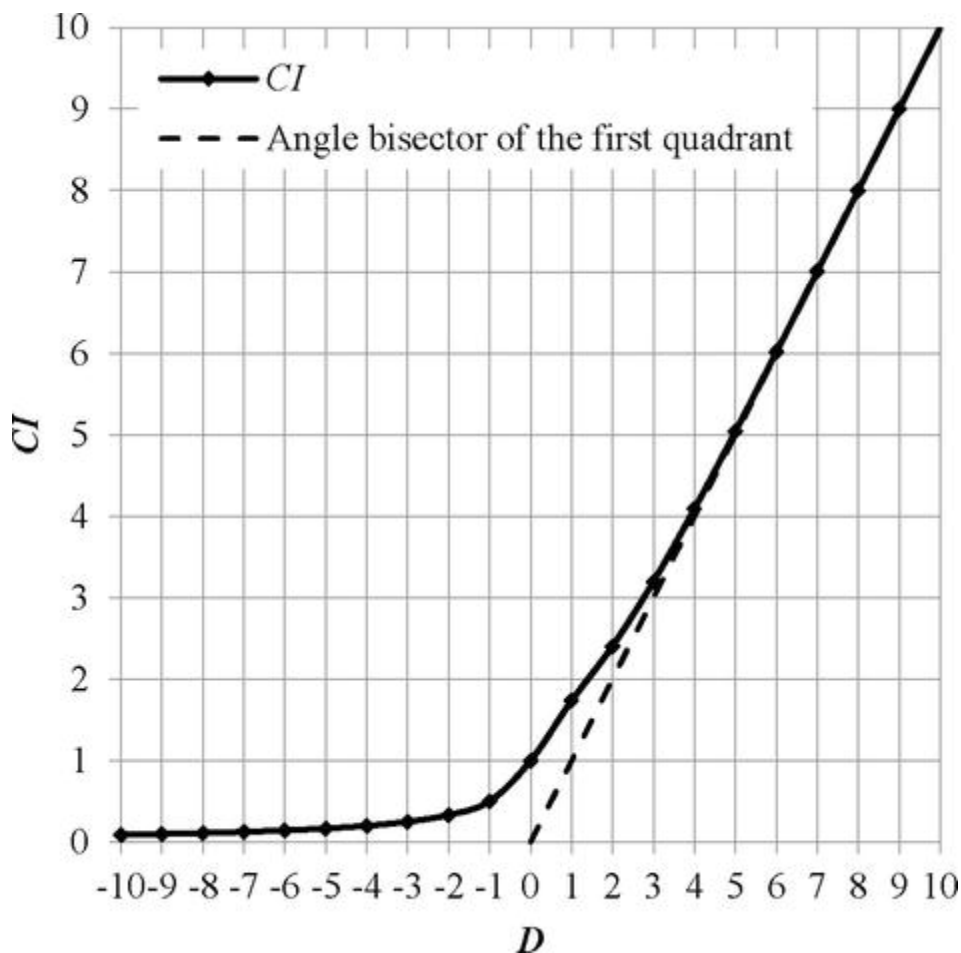
З цієї причини запропоноване співвідношення для визначення індексу критичності КІ як функції соціально-економічного збитку є таким, яке наведено в рівнянні. (5):

$$CI = \begin{cases} [1 + D(s, p, z_c, \tau)] \cdot [1 + e^{-D(s, p, z_c, \tau)}] - 1 & D(s, p, z_c, \tau) \geq 0 \\ \frac{1}{1 - D(s, p, z_c, \tau)} & D(s, p, z_c, \tau) < 0 \end{cases} \quad E5$$

У цьому випадку КІ не відповідає економічному значенню збитку, спричиненого розглянутою подією, але він дозволяє пов'язати числове значення також з ділянками коридору, які не є строго критичними, таким чином вимірюючи їх «наближеність» до реального потенційного збитку та ранжуючи їх відповідно до точки зору критичності, оскільки запаси безпеки поступово зменшуються, коли від'ємне значення  $D$  наближається до 0.

Як можна помітити, зв'язок  $CI$  будується для того, щоб  $\lim_{D \rightarrow \infty} CI = D \lim_{D \rightarrow \infty} CI = \text{and } CI = 1 \text{ for } D = 0$  (тобто, коли стан інфраструктури змінюється з «некритичного» на «критичне»).

Графічне зображення КІ як функції  $D$  можна спостерігати на малюнку 1.



Малюнок 1. Графічне представлення KI як функції D.

### 2.3 Критерії прийнятності ризику

У науковій літературі доступно небагато досліджень для визначення критеріїв прийнятності ризику для соціально-економічного ризику, а відмінності між економічними системами не дозволяють визначити прості процедури, придатні для застосування в різних контекстах.

З цієї причини в цій статті запропоновано спеціальний критерій, заснований на загальній економічній оцінці збитків внаслідок природних явищ, який враховує як прямі (будинкам, інфраструктурі, промисловим об'єктам), так і непрямі (продуктивні втрати, відсутність базових послуг для населення).

Згідно зі статистичними даними страхової компанії Munich Re, що стосуються глобальних природних втрат у всьому світі (включаючи географічні, метеорологічні, гідрологічні та кліматологічні події) за період 1980–2015 рр.<sup>44</sup>, загальні збитки у 2015 р. становили близько 0,14% від глобальний ВВП (дані зі статистики Світового банку<sup>45</sup>). Проте протягом попередніх років було досягнуто значно вищих процентних значень, зокрема у 2011 році (головним чином через землетрус Тохоку та цунамі в Японії), коли збитки досягли максимуму в 380 мільярдів доларів США, а також у 2005 році, головним чином пов'язаним з ураганом Катріна в США. Ці дві події, зокрема, підкреслюють, що надзвичайні події за участю розвинених країн зазвичай призводять до більш відповідних економічних ефектів навіть у глобальному масштабі.

Запропонований вираз для прийняттого річного економічного збитку, пов'язаного з певним коридором, оцінюється як частка річного ВВП, враховуючи внесок енергетичного сектору

у структуру ВВП, внесок аналізованого коридору в загальне енергопостачання країни/території, вага економічних втрат через надзвичайну природну подію.

Зокрема:

- Внесок енергетичного сектору у ВВП виражається коефіцієнтом  $f_{en}$ , який визначається як:

$$f_{en} = \frac{VA_{en}}{GDP} \quad E6$$

де:

$VA_{en}$ : додана вартість енергетичного сектору. Слід зазначити, що ВВП у ринкових цінах є сумою валової доданої вартості у ринкових цінах для всіх виробничих секторів<sup>46,47</sup>.

- Внесок аналізованого коридору в регіональне енергопостачання визначається економічною вартістю товару, що транспортується коридором  $c$  на рік; коефіцієнт  $f_c$  визначається як:

$$f_c = \frac{EV_c}{VA_{en}} \quad E7$$

де:

$EV_c$ : економічна вартість енергетичного товару, що постачається коридором  $c$

- Річне значення економічних втрат і витрат, пов'язаних з руйнуванням коридору  $c$  через природну подію  $ne$ , приймається як максимально прийнятний ризик, а коефіцієнт  $f_{ne}$  визначається як:

$$f_{ne} = \frac{L_{ne}}{GDP} \quad E8$$

де:

$L_{ne}$ : загальні економічні збитки та витрати внаслідок природної події  $ne$ .

Оскільки статистичних даних для оцінки витрат та економічних втрат для конкретної природної події  $ne$ , що спричиняє зрив коридору  $c$ , немає, середнє значення  $f_{ne}$ , визначене в масштабі регіону/країни, використовується як еквівалент «місцевого» співвідношення між річними економічними збитками та витратами, пов'язаних з несправністю коридору  $c$ , і економічною вартістю  $EV_c$  товару, що перевозиться через  $c$  на рік.

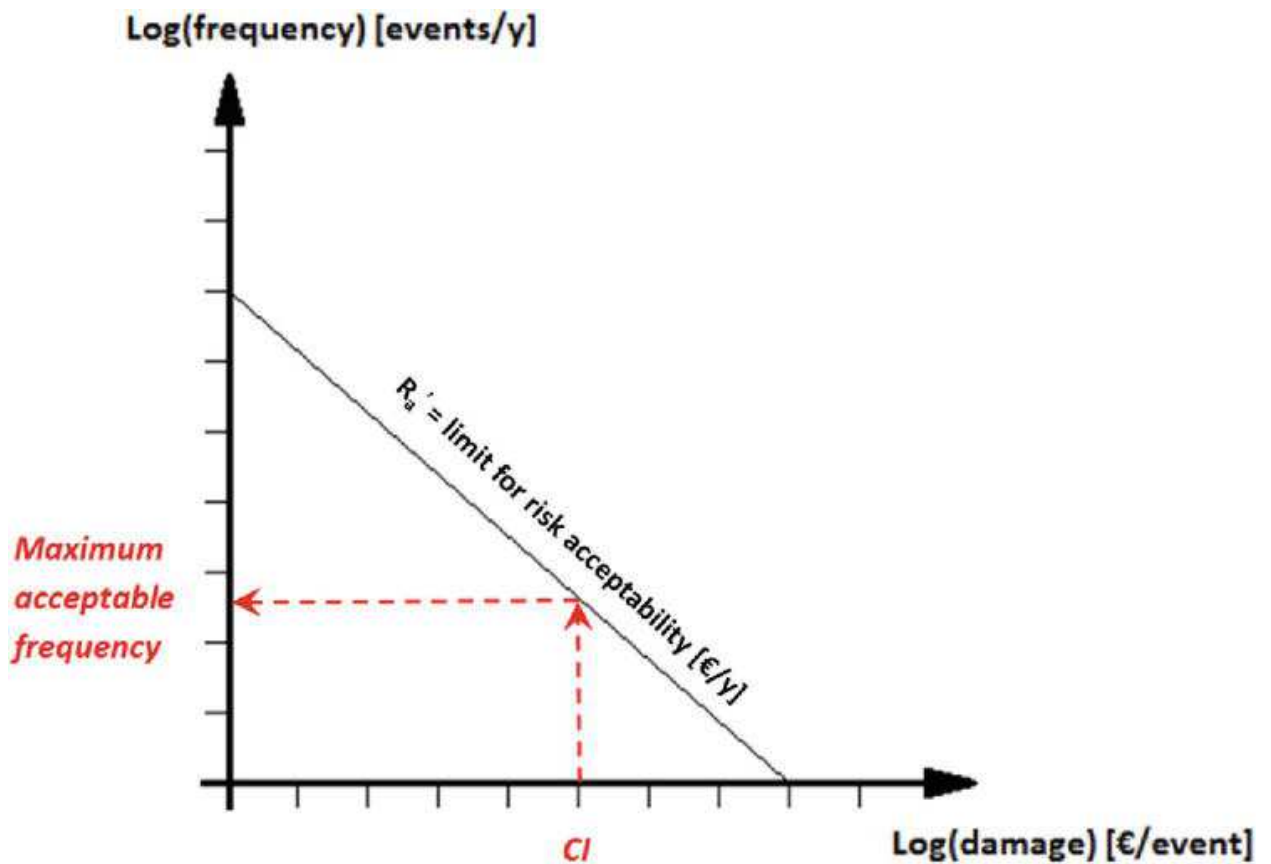
Попередньо описані кроки можна звести до єдиного співвідношення (Рівняння 9), яке дозволяє кількісно визначити поточний економічний ризик у термінах грошових втрат як наслідок несприятливої природної події  $ne$ :

$$R_a = f_{ne} \cdot f_{en} \cdot f_c \cdot GDP$$

Е9

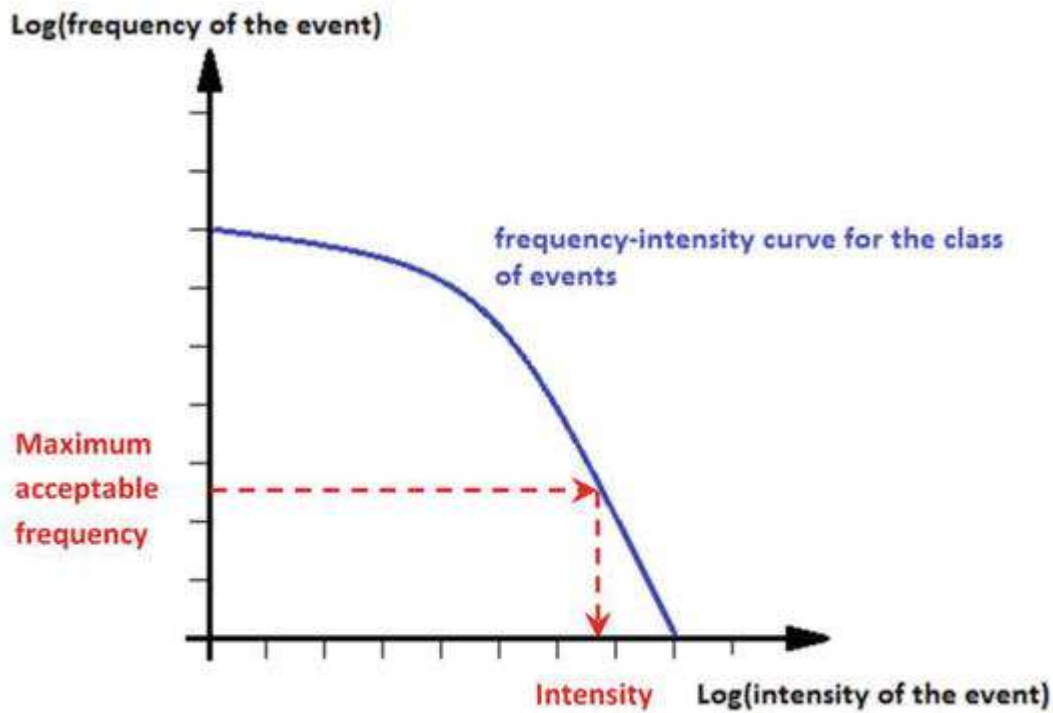
Необхідно підкреслити, що конкретні оцінки загальних економічних збитків і витрат  $L_{ne}$  не є загальнодоступними як публічні дані і повинні надаватися страховими компаніями.

Після визначення поточного ризику максимально допустима частота (кількість подій на рік) для даного збитку на ділянці коридору, визначеній координатою  $z_c$ , оцінюється за допомогою графічного підходу, який починається з попередньо визначеного індексу критичності (тобто економічної величини збитку, спричиненого порушенням послуги внаслідок аналізованої події) (мал. 2).



**Малюнок 2. Визначення максимально допустимої частоти відповідно до значення  $CI$ .**

З отриманої максимально прийнятної частоти можна оцінити відповідну інтенсивність події за допомогою кривої частота-інтенсивність, яка є характерною для кожного класу подій (рис. 3).



**Малюнок 3.** Оцінка інтенсивності події, пов'язаної з максимально допустимою частотою відповідно до кривої частота-інтенсивність.

У літературі є кілька досліджень щодо зв'язку між частотою та інтенсивністю (або величиною) природних явищ. Наприклад, ті, що виконані Hungr et al.<sup>48</sup>, Jakob et al.<sup>49,50</sup>, Riley et al.<sup>51</sup> (щодо зсувів селевих потоків), Hooke<sup>52</sup>, Zhang et al.<sup>53</sup> (зосереджується на повенях) і Paradakis<sup>54</sup> (розглядає землетруси в Греції).

Загалом, інтенсивність пов'язана з конкретними характеристиками розглянутої події (наприклад, пікове прискорення ґрунту для землетрусів, максимальний рівень води для повеней, максимальна швидкість вітру для штормів і тепловий потік для пожеж) і зв'язок між інтенсивністю, а частота оцінюється на основі аналізу історичних даних.

Отриману інтенсивність необхідно порівняти з проектним граничним значенням для аналізованої інфраструктури.

Необхідно додатково підкреслити, що  $R_a$  представляє поточний загальний ризик, пов'язаний з подією  $ne$ . Якщо для цієї події бажана нижня межа прийнятності ризику, необхідно виконати повторну оцінку (тобто зменшення) відповідно до рівняння (10).

$$R'_a = \alpha_{ne} \cdot R_a \quad E_{10}$$

де:

$R'_a$ : переоцінений ліміт прийнятності ризику (див. Малюнок 2)

$\alpha_{ne}$ : коефіцієнт переоцінки для визначення ліміту прийнятності ризику, пов'язаного з класом природних явищ  $ne$ ;  $\alpha \in [0,1]$

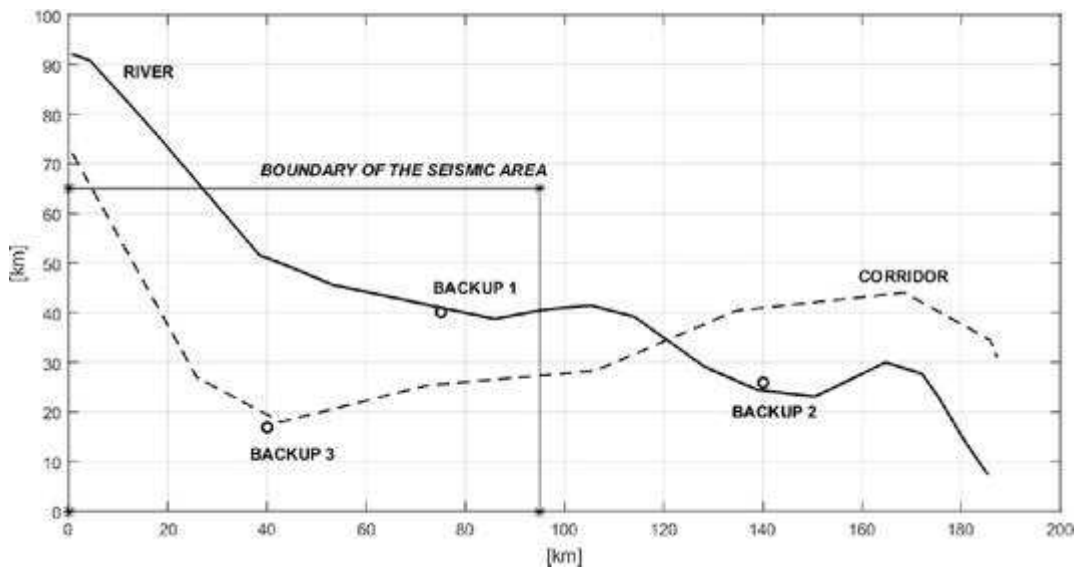
У цьому випадку те саме значення КІ відповідає нижній максимально допустимій частоті, яка, у свою чергу, відповідає вищій інтенсивності, яка може перевищувати проектні умови інфраструктури. У такій ситуації потрібно виконати новий структурний аналіз, щоб перевірити його стійкість і можливу потребу в діях пом'якшення, таких як структурне посилення, резервування або переміщення.

### 3. Кейс-стаді та обговорення результатів

Методологічний підхід, описаний у розділі 2, було перевірено шляхом застосування його до спрощеного прикладу. Основні прийняті припущення можна підсумувати таким чином:

- враховано ідеальний коридор і відповідне навколишнє середовище;
- розглянуто лише 2 класи екстремальних природних явищ (річкові повені та землетруси);
- наявні 3 резервні джерела, здатні покрити навантаження на весь період неготовності коридору; ці альтернативні джерела не залежать від самого коридору;
- відсутня переривна ємність;
- передбачається переоцінка ліміту прийнятності ризику зі зниженням ризику на 1 порядок.

Просторове розташування коридору та резервних джерел показано на малюнку 4, а їх характеристики та значення основних параметрів наведено в таблиці 3.



Малюнок 4. Просторова схема коридору та резервних джерел.

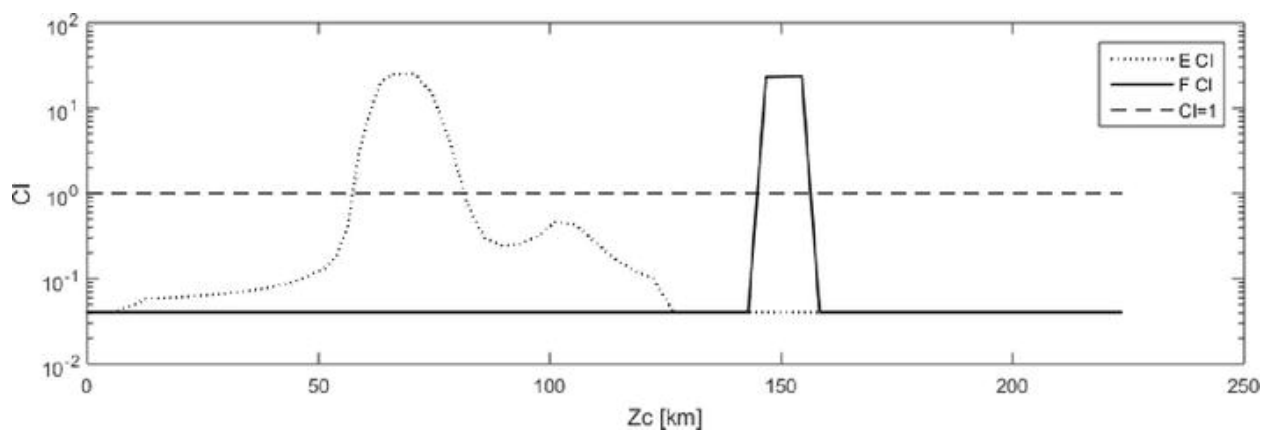
Параметр	Опис	Значення	Одиниця вимірювання
$p_{1,f}$	Імовірність залучення резервного джерела 1 – затоплення	0,5	-
$p_{2,f}$	Імовірність залучення резервного джерела 2 – затоплення	0,5	-
$p_{3,f}$	Імовірність залучення резервного джерела 3 – затоплення	0	-
$\lambda_e$	Масштаб пошкодження від землетрусу	5	Km
$\lambda_f$	Масштаб пошкодження від повені	5	km
$s$	Сезонний фактор (вплив пори року на подію)	0	-
$c_{p,c}$	Пікова пропускна здатність коридору	100	J/h

$RT$	Час ремонту	1	h
$c_{m,b1}$	Мінімальний оперативний запас потужності – резервне джерело 1	50	J/h
$c_{m,b2}$	Мінімальний оперативний запас потужності – резервне джерело 2	35	J/h
$c_{m,b3}$	Мінімальний оперативний запас потужності – резервне джерело 3	45	J/h
$\alpha_{t,b1}$	Технічна наявність резервного джерела 1	0,95	-
$\alpha_{t,b2}$	Технічна наявність резервного джерела 2	0,95	-
$\alpha_{t,b3}$	Технічна наявність резервного джерела 3	0,95	-
$i$	Переривна ємність	0	J/h
$e$	Енергоємність для розглянутого товару	1	€/J
$DBE$	Магнітуда розрахункового базового землетрусу	4,8	
$DBF$	Максимальна витрата розрахункової базової повені	2000	m <sup>3</sup> /s
$R_a$	Значення поточного ризику	1	€/y
$\hat{R}_a$	Переоцінений ліміт прийнятності ризику	0,1	€/y

**Таблиця 3. Значення основних розглянутих параметрів.**

Необхідно підкреслити, що в цьому спрощеному прикладі значення параметрів вибрані максимально реалістичні, але все таки вони не відповідають реальному випадку. Зокрема, всі параметри вважалися сезонно незалежними. Крім того, значення були встановлені для опису реалістичної конфігурації з фізичної точки зору, тоді як з економічної точки зору було вибрано унітарне значення для поточного ліміту ризику (1 євро/рік), головним чином через недоступність певної громадськості дані про загальні економічні збитки та витрати. При переоцінці ліміту прийнятності ризику висунуто гіпотезу про його зниження на порядок. Загалом, якщо запропоновану процедуру застосовувати до реальної системи, оцінку параметрів слід виконувати відповідно до міркувань, викладених у розділі 2.1.

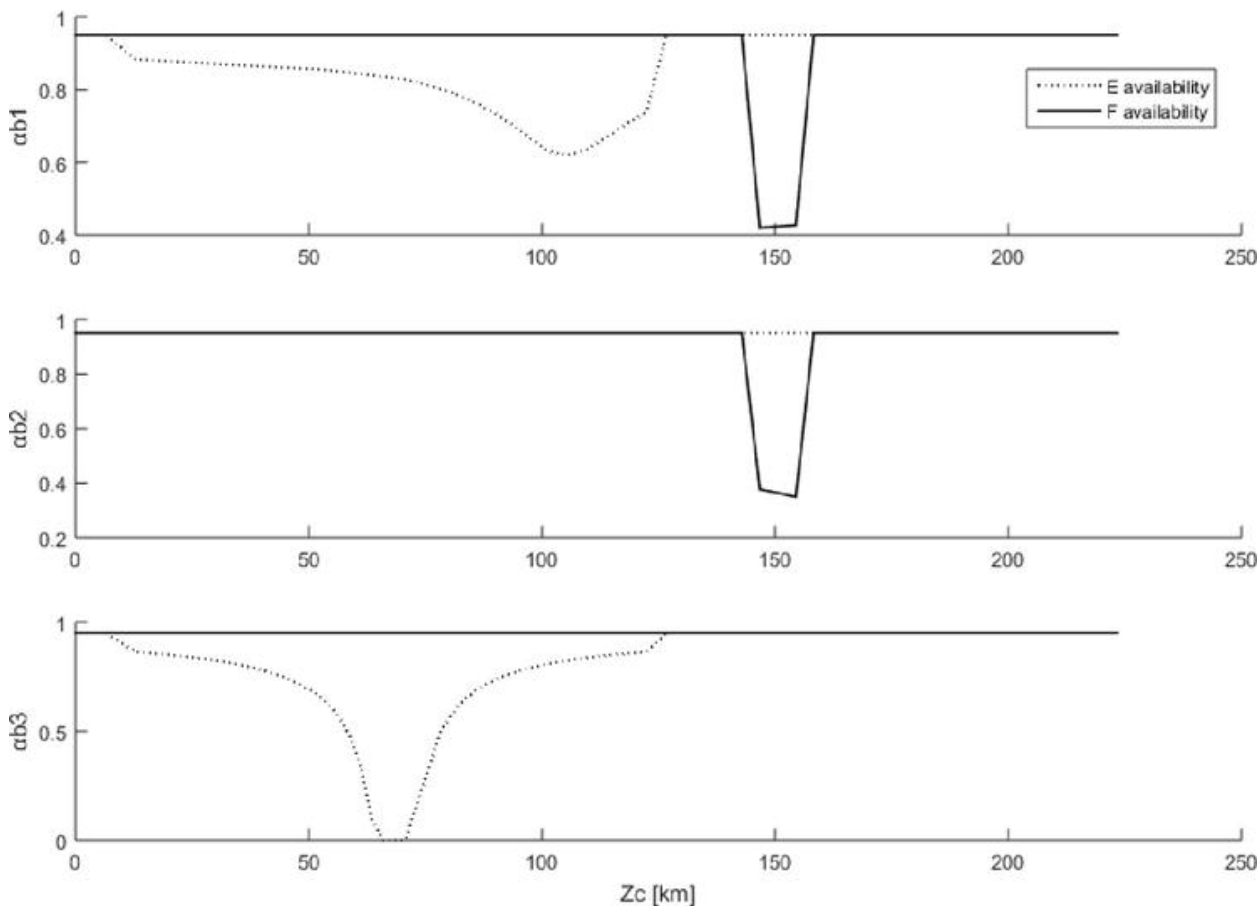
Отриманий ДІ ( $z_c$ ) показаний на малюнку 5 як для землетрусу ( $E$ ), так і для повені ( $F$ ). Зокрема, можна помітити, що ділянки коридору, які характеризуються найвищими значеннями КІ, знаходяться поблизу резервних джерел у сейсмічній зоні (у разі землетрусу) та до річки (у разі повені). Ділянки, де  $KI < 1$ , відповідають пошкодженню  $D < 0$ , тобто потужність резервних джерел перевищує ту, яка вимагається для забезпечення покриття навантаження у випадку недоступності коридору.



Малюнок 5. Еволюція КІ відносно положення вздовж коридору  $z_c$ ;  $KI < 1$  відповідає  $D < 0$ .

Однак слід зазначити, що всі ділянки, які характеризуються значенням КІ трохи нижче 1, повинні розглядатися, оскільки вони близькі до критичного стану.

Посилаючись на еволюцію параметра доступності  $ab(s,p)$  для 3 резервних джерел, можна помітити (мал. 6), що чим менша відстань між коридором і джерелом, тим нижча доступність. Це тому, що якщо Природна подія передбачає територію, в якій коридор і резервне джерело знаходяться близько один до одного, ймовірність пошкодження резервного джерела вища, а отже, його доступність нижча.

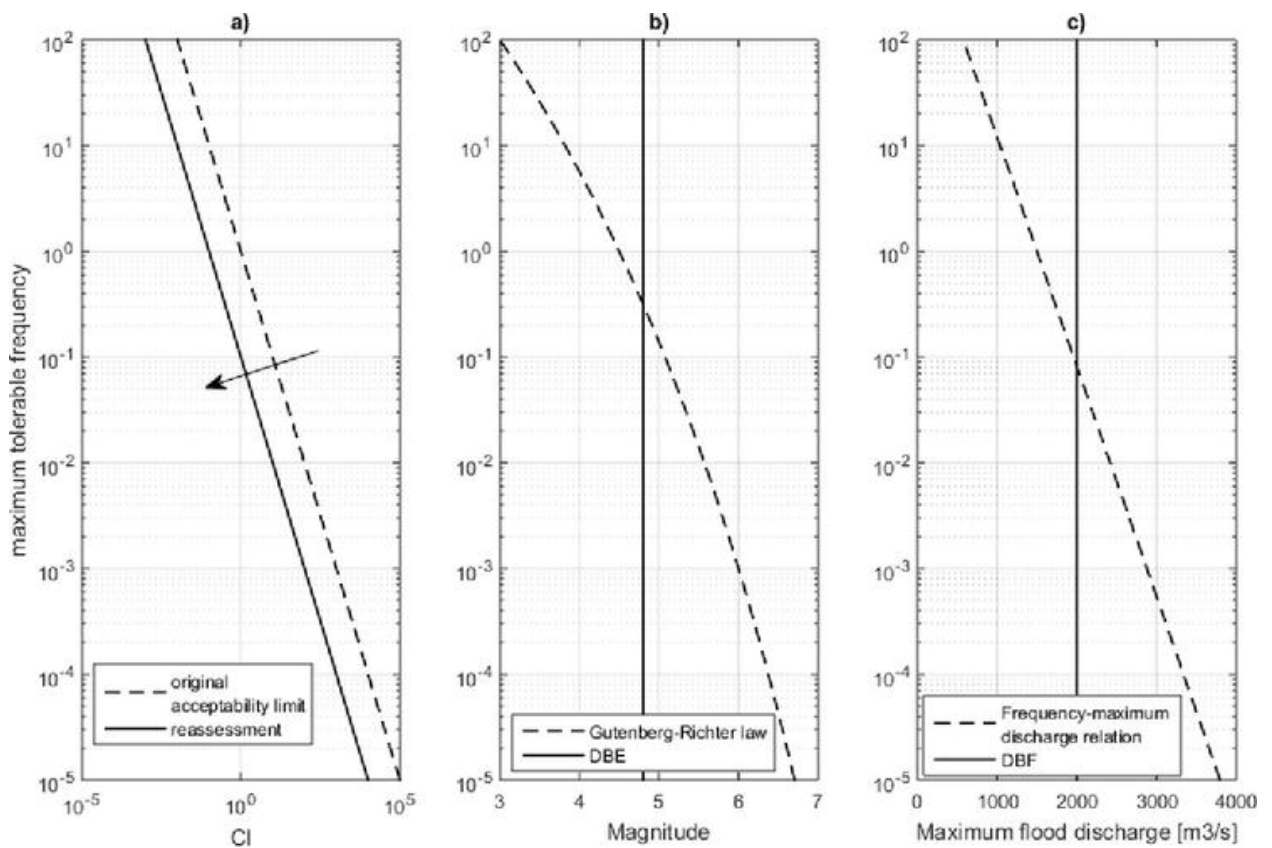


Малюнок 6. Еволюція доступності резервних джерел відносно положення вздовж коридору  $z_c$ .

На малюнку 7 показані криві частоти-КІ, що відповідають початковому ліміту прийнятності ризику та переоціненому. На малюнках 7(b) і (c) представлені криві частота-величина, які були побудовані з використанням двох різних підходів для двох розглянутих класів природних явищ:

- закон Гутенберга-Ріхтера<sup>55</sup> у випадку землетрусів;
- логарифмічне співвідношення, засноване на запропонованому Wald et al.<sup>56</sup> у разі затоплення.

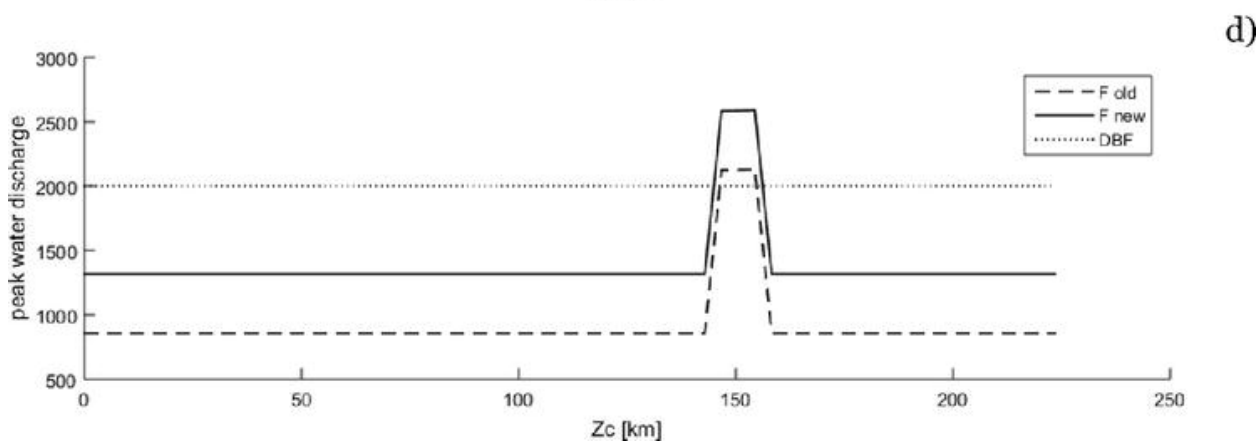
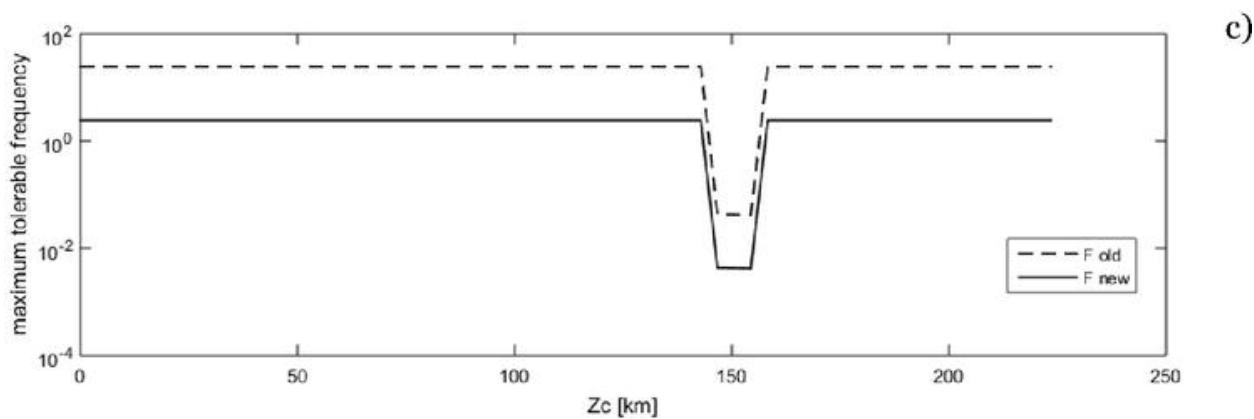
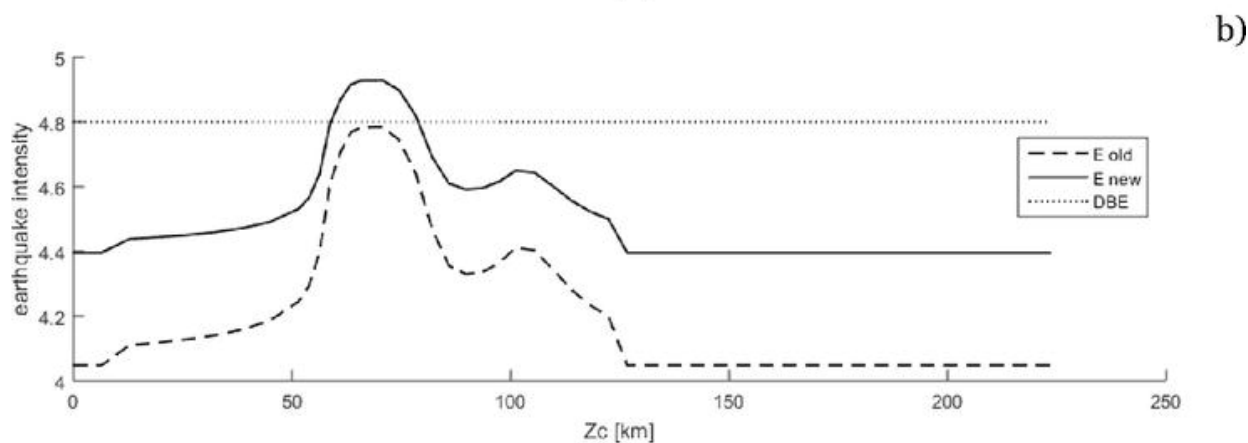
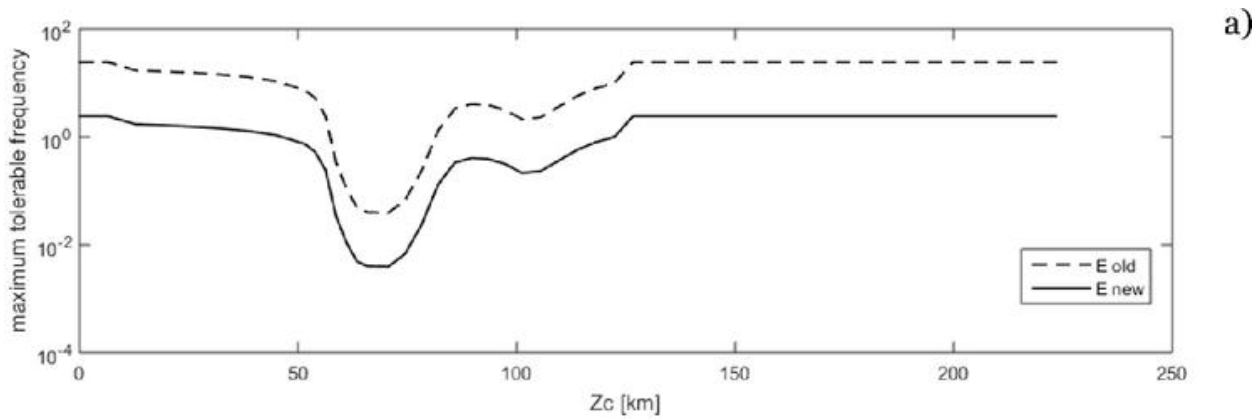




Малюнок 7. Частота-КІ (а) і частотно-магнітудні криві (b, c) для аналізованого прикладу.

Вертикальні лінії відповідають розрахунковій базовій магнітуді землетрусу (DBE) і повені (DBF) для коридору.

Починаючи з цих кривих і з попередньо визначеної еволюції КІ, максимально допустимі частоти та пов'язані з ними інтенсивності для землетрусу і повеней, а також для початкового (Е/Ф старий) і повторно оціненого (Е/Ф новий) ліміту прийнятності ризику мають було оцінено, як показано на малюнку 8.



**Малюнок 8. Максимально допустимі частоти та інтенсивності землетрусів (a-b) і повеней (c-d) для аналізованого прикладу.**

Як можна спостерігати на малюнку 8а, максимально допустима частота землетрусів досягає свого мінімального значення (відповідає максимальній інтенсивності, видимій на малюнку

8b) в тій ділянці, де коридор і резервне джерело 3 знаходяться найближче один до одного і обидва постраждали ( $p = 1$  у рівнянні (4)). Крім того, у випадку переоцінки обмеження ризику, інтенсивність виходить за межі проектних умов (DBE, мал. 8b), що призводить до необхідності проведення випробувань для оцінки надійності залученої ділянки коридору та визначення відповідних заходів пом'якшення. Ті самі міркування справедливі для повені (Малюнок 8c і d): головна відмінність полягає в тому, що в найбільш критичній ділянці коридору інтенсивність перевищує проектне значення також для вихідного ліміту ризику (DBF, Малюнок 8d), вимагаючи подальших тестів на стійкість також без гіпотез про переоцінку межі прийнятності ризику.

Як зазначалося, значення розглянутих параметрів були прийняті без конкретного посилання на реальний випадок, оскільки метою аналізованого прикладу є показати функціонування та застосовність методології на теоретичному прикладі. Тому аналіз невизначеностей не проводився. Майбутні роботи, спрямовані на глибоке вивчення критичності існуючих інфраструктур, включно цього аспекту, особливо щодо параметрів, пов'язаних із подіями, з особливою увагою до ймовірності залучення різних об'єктів. Фактично ця ймовірність потребує детальних і складних міркувань, щоб бути належним чином кількісно визначеною щодо конкретної природної небезпеки та досліджуваного місця.

Проте, це спрощене прикладне дослідження показує потенційні можливості цього підходу в оцінці можливих критичних ділянок інфраструктури, визначенні пріоритетів для інвестицій та втручання для їх зміцнення та забезпечення їх стійкості до несприятливих екстремальних природних явищ.

З іншого боку, це також дозволяє визначити деякі аспекти, які можуть бути більш глибоко досліджені в майбутніх дослідженнях, щоб підвищити застосовність до реальних випадків і ефективність отриманих результатів. Зокрема, серед них можна назвати однозначне визначення меж системи. Насправді визначення меж може бути нелегким у випадку сітчастих мереж, таких як системи розподілу природного газу або лінії електропередач, для яких важко визначити єдину початкову та кінцеву точку. Інший важливий аспект представлений наявністю повних та уніфікованих баз даних як для технічних характеристик аналізованих інфраструктур/резервних джерел, так і для класів природних явищ, що впливають на середовище, що оточує інфраструктуру.

#### **4. Висновки**

Захист КІ від надзвичайних природних небезпек шляхом оцінки та підвищення її стійкості є однією з головних цілей багатьох країн або груп країн (наприклад, ЄС). Тому необхідні методології, здатні кількісно оцінити можливі критичні значення цих інфраструктур, щоб краще планувати та впроваджувати дії, контрзаходи та інвестиції, які дозволять обмежити або уникнути негативних енергетичних, соціальних та економічних наслідків, що впливають із впливу природних небезпек.

Щодо інших досліджень, доступних у науковій літературі, підхід, запропонований у цій статті, зосереджений на енергетичних коридорах і спрямований на визначення індексу критичності, який є функцією просторового положення вздовж аналізованого коридору, тому корисно кількісно визначити рівень критичності для кожної ділянки розглянутої інфраструктури. Цей індекс здатний враховувати велику різноманітність параметрів (пов'язаних із природною подією, коридором, доступністю альтернативних джерел і залученими користувачами) та їх взаємозалежності. Розроблена методологія може бути ефективним допоміжним інструментом для осіб, які приймають рішення, і державних адміністрацій, для компаній, які мають керувати важливою інфраструктурою для транспортування енергетичних товарів і для цивільного захисту, оскільки вона дозволяє – через просту математичну формулювання – визначити розділи енергетичний коридор, який є критичним щодо певної природної небезпеки або близький до критичного статусу, таким чином визначаючи пріоритетні сфери втручання, превентивних інвестицій, дій із пом'якшення наслідків та спеціальних контрзаходів.

Введений індекс критичності оцінює чисельним способом соціально-економічний збиток (вимірюваний у грошових одиницях) через вплив екстремальної природної події на вибрану інфраструктуру та може використовуватися для оцінки максимально прийнятної частоти та відповідної інтенсивності події що дозволяє порівняти з проектним станом коридору.

Крім того, можливість оцінки індексу критичності також для негативних значень пошкоджень (для некритичних конфігурацій) дозволяє вимірювати відстань від критичності, дозволяючи приділяти превентивну увагу ділянкам, які ближче до критичних ситуацій.

Загалом, описаний підхід дає можливість ранжувати окремі гілки коридору відповідно до їх критичності та для всіх різних природних небезпек, і, як наслідок, він дає органам влади, відповідальним за ЗКІ, можливість визначати пріоритети втручання.

Впровадження цієї методології на реальних кейсах вимагає спеціалістів із різних галузей та комплексної інформації. Це можна зробити також із застосування до спрощеного прикладу (з урахуванням коридору та двох екстремальних подій). Проте дослідження конкретного випадку підкреслило переваги процедури, особливо якщо запроваджено повторну оцінку межі прийнятності ризику, оскільки вона дає доказ запасу надійності щодо умов проектування або необхідності виконання структурних випробувань, кількісної оцінки стійкості інфраструктури .

Додаткові аспекти повинні бути глибоко проаналізовані у випадку широкого застосування запропонованої методології, включаючи наявність повних і однорідних технологічних і екологічних баз даних і правильне визначення меж системи, які можуть бути нетривіальними у випадку сітчасті мережі (мережі розподілу природного газу).

Подальші дослідження також можуть бути присвячені аналізу сценаріїв з кількома ризиками, тобто одночасному виникненню двох або більше екстремальних природних подій, визначенню відповідних стратегій для розподілу прийнятного ризику (наприклад, враховуючи запаси безпеки інфраструктури, якщо вони присутні), щоб перевірити стійкість інфраструктури в найгірших (і низькочастотних) мислимих умовах.

#### Список літератури

1.

Європейська рада. Стокгольмська програма – відкрита та безпечна Європа, яка обслуговує та захищає громадян, Офіційний журнал ЄС, 2010/С 115/01

2.

Європейська комісія. Стратегія внутрішньої безпеки ЄС у дії: 5 кроків до більш безпечної Європи, Повідомлення Комісії до Європейського парламенту та Ради, COM(2010) 673 final

3.

UNISDR. Термінологія зі зменшення ризику стихійних лих [Інтернет]. 2009. Доступно з: <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction> [Дата доступу: 2020-09-23]

4.

Європейська комісія. Захист критичної інфраструктури в боротьбі з тероризмом, Повідомлення Комісії до Ради та Європейського Парламенту, COM(2004) 702 final

5.

Комісія Європейських Співтовариств. Зелена книга про Європейську програму захисту критичної інфраструктури, COM(2005) 576 final

6.

Комісія Європейських Співтовариств. Повідомлення Комісії щодо Європейської програми для критичних захист інфраструктури, COM(2006) 786 final

7.

Рада Європейського Союзу. Директива Ради про ідентифікацію та призначення європейських критичних інфраструктур та оцінку потреби у покращенні їх захисту, Офіційний журнал Європейського Союзу, 2008/114/ЕС

8.

Європейська комісія. Робочий документ співробітників Комісії про новий підхід до Європейської програми захисту критичної інфраструктури. Зроблення європейських критичних інфраструктур більш безпечними, SWD(2013) 318 final

9.

Європейська комісія. Оціночне дослідження Директиви Ради 2008/114 про ідентифікацію та позначення європейських критичних інфраструктур та оцінку необхідності покращення їх захисту, Заключний звіт

10.

Європейська комісія. Робочий документ апарату комісії. Резюме оцінки Директиви Ради 2008/114 щодо ідентифікації та позначення європейських критичних інфраструктур та оцінки необхідності покращення їх захисту, SWD(2019) 308 final

11.

Ouyang M. Огляд моделювання та імітації взаємозалежних систем критичної інфраструктури. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016;121:43–60. DOI:10.1016/j.ress.2013.06.040

12.

Гріот К. Моделювання та симуляція для оцінки взаємозалежності критичної інфраструктури: мета-огляд для характеристики моделі. *Міжнародний журнал критичних інфраструктур*, 2010; 6: 363–379. DOI: 10.1016/j.ress.2013.06.040

13.

Wang S, Hong L, Chen X, Zhang J, Yan Y. Огляд аналізу вразливості систем взаємозалежної інфраструктури. В кн.: *Матеріали 2-ї міжнародної конференції з інтелектуальних процесів управління та інформації*; 25–28 липня 2011 р.; Харбін, Китай: IEEE; 2011. стор. 446–451

14.

Liu W, Song Z. Огляд досліджень щодо стійкості мереж міської критичної інфраструктури, *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;193: 1–16. DOI:10.1016/j.ress.2019.106617

15.

Galbusera L, Giannopoulos G, Ward D. Розробка стрес-тестів для підвищення стійкості критичної інфраструктури: аналіз здійсненності, Люксембург: Офіс публікацій Європейського Союзу; 2014. DOI:10.2788/954065

16.

Giannopoulos G, Filippini R, Schimmer M. Методології оцінки ризиків для захисту критичної інфраструктури. Частина I: Сучасний стан, Люксембург: Офіс публікацій Європейського Союзу; 2012. DOI: 10.2788/22260

17.

Хаймес Ю.Й. Моделі управління ризиками систем систем. *Міжнародний журнал системної інженерії*. 2008;1:222-236. DOI:10.1504/ijssse.2008.018138

18.

Ariel Pinto C, McShane MK, Bozkurt I. System of system perspective on risk: to a unified concept. *Міжнародний журнал системної інженерії*. 2012; 3: 33.46. DOI: 10.1504/ijssse.2012.046558

19.

Eusgeld I, Nan C, Dietz S. Системний системний підхід для взаємозалежних критичних інфраструктур. Розробка надійності та безпека систем. 2011;96:6:679–686. DOI: 10.1016/j.ress.2010.12.010

20.

Лабака Л., Ернантес Дж., Саррієгі Дж.М. Структура стійкості для критичних інфраструктур: емпіричне дослідження на атомній станції. Розробка надійності та безпека систем. 2015;141:92-105. DOI: 10.1016/j.ress.2015.03.009

21.

Лабака Л., Ернантес Дж., Саррієгі Дж.М. Цілісна основа для створення стійкості критичної інфраструктури. Технологічне прогнозування та соціальні зміни. 2016;103:21-33. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.11.005

22.

Мао Q, Лі N, Реїна-Мора F. Структура на основі розгортання функції якості для підвищення стійкості систем критичної інфраструктури. Міжнародний журнал захисту критичної інфраструктури. 2019;26:100304. DOI: 10.1016/j.ijcip.2019.100304

23.

Nan C, Sansavini G. Кількісний метод оцінки стійкості взаємозалежних інфраструктур. Розробка надійності та безпека систем. 2017;157:35-53. DOI: 10.1016/j.ress.2016.08.013

24.

Ouyang M, Liu C, Xu M. Значення рішень на основі стійкості для захисту критичної інфраструктури: порівняння з рішеннями на основі надійності. Розробка надійності та системна безпека. 2019;190:106506. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106506

25.

Theocharidou M, Giannopoulos G. Методології оцінки ризиків для захисту критичної інфраструктури. Частина II: Новий підхід, Люксембург: Офіс публікацій Європейського Союзу; 2015. DOI:10.2788/621843

26.

ДеЛаурентіс Д. Роль людей у складності системи систем. У: Даффі В.Г., ред. Цифрове моделювання людини. Берлін-Гейдельберг: Springer; 2007. стор. 363–371. DOI: 10.1007/978-3-540-73321-8

27.

Ферраріо Е., Педроні Н., Зіо Е. Оцінка стійкості критичних інфраструктур за допомогою представлення ієрархічного графа, кластеризації та моделювання Монте-Карло. Розробка надійності та безпека систем. 2016;155:78–96. DOI: 10.1016/j.ress.2016.06.007

28.

Крегер В., Зіо Е. Вразливі системи. Лондон: Springer; 2011. DOI: 10.1007/978-0-85729-655-9

29.

Зіо Е. Аналіз вразливості та ризиків критичної інфраструктури. Європейський журнал досліджень безпеки. 2016;1:97-114. DOI: 10.1007/s41125-016-0004-2

30.

Зіо Е. Виклики аналізу вразливості та ризику критики І інфраструктури. Розробка надійності та безпека систем. 2016;152:137-150. DOI: 10.1016/j.res.2016.02.009

31.

Johansson J, Hassel H, Zio E. Аналіз надійності та вразливості критичних інфраструктур: порівняння двох підходів у контексті енергосистем. Розробка надійності та безпека систем. 2013;120, стор. 27–38. DOI: 10.1016/j.res.2013.02.027

32.

Йоханссон Дж., Хассел Х. Підхід до моделювання взаємозалежних інфраструктур у контексті аналізу вразливостей. Розробка надійності та безпека систем. 2010;95:1335-1344. DOI: 10.1016/j.res.2010.06.010

33.

Стергіопулос Г, Коцаніколау П, Теохаріду М, Гріцаліс Д. Стратегії зменшення ризиків для критичних інфраструктур на основі аналізу центральності графів. Міжнародний журнал захисту критичної інфраструктури. 2015;10:34–44. DOI: 10.1016/j.ijcip.2015.05.003

34.

Коцаніколау П, Теохаріду М, Гріцаліс Д. Оцінка залежностей n-го порядку між критичними інфраструктурами. Міжнародний журнал критичних інфраструктур. 2013;9:93-110. DOI: 10.1504/ijcis.2013.051606

35.

Коцаніколау П, Теохаріду М, Гріцаліс Д. Каскадні ефекти збоїв із загальної причини в критичних інфраструктурах. У: редактори Butts J, Shenoі S. Захист критичної інфраструктури VII. Гейдельберг: Шпрінгер; 2013. 171–182. DOI: 10.1007/978-3-642-45330-4

36.

Стергіопулос Г, Коцаніколау П, Теохаріду М, Ліку Г, Гріцаліс Д. Аналіз залежності критичної інфраструктури на основі часу для масштабних і міжгалузевих збоїв. Міжнародний журнал захисту критичної інфраструктури. 2016;12:46-60. DOI: 10.1016/j.ijcip.2015.12.002

37.

Коцаніколау П, Теохаріду М, Гріцаліс Д. Взаємозалежності між критичними інфраструктурами: аналіз ризику каскадних ефектів. У: Bologna S, Hammerli B, Gritzalis D, Wolthusen S. editors. Безпека критичної інформаційної інфраструктури. Берлін-Гейдельберг: Springer-Verlag; 2013. 104–115. DOI: 10.1007/978-3-642-41476-3

38.

Fu G, Khoury M, Dawson R, Bullock S. Аналіз вразливості взаємозалежних інфраструктурних систем. In: Proceedings of the European Conference on Complex Systems (ECCS'12); вересень 2012 р.; Брюссель. спрингер; 2012. стор. 317–323

39.



Utne IB, Hokstad P, Vatn J. Метод моделювання ризиків взаємозалежностей у критичних інфраструктурах. Розробка надійності та безпека систем. 2011;96:671-678. DOI: 10.1016/j.ress.2010.12.006

40.

Azzini I, Dido M. GRRASP версія 3.1 Посібник користувача. У: Giannopoulos G, Galbusera L, редактори. Люксембург: Офіс публікацій Європейського Союзу; 2016. DOI: 10.2760/999066

41.

Халіл Ю.Ф. Нова імовірнісна динамічна модель із часовим поясненням для сценаріїв атак на фізичну безпеку критичної інфраструктури. Безпека процесу та захист навколишнього середовища. 2016;102:473-484. DOI: 10.1016/j.psep.2016.05.001

42.

Урлайніс А., Шохет І. М., Леві Р. Імовірнісна оцінка ризику нафтогазової інфраструктури для екстремальних сейсмічних подій. Procedia Engineering. 2015;123:590-598. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.10.112

43.

Shakou LM, Wybo J, Reniers G, Boustras G. Розробка інноваційної основи для підвищення стійкості критичної інфраструктури до зміни клімату. Наука про безпеку. 2019;118, 364–378. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.05.019

44.

Munich Re. Події збитків у всьому світі 1980–2015 [Інтернет]. 2016. Доступно за адресою: [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Loss\\_events\\_worldwide\\_1980-2015.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Loss_events_worldwide_1980-2015.pdf) [Дата доступу: 2020-09-24]

45.

Світовий банк. Статистична база даних Світового банку [Інтернет]. 2020. Доступно за адресою: <http://data.worldbank.org/> [Доступ 24.09.2020]

46.

Агарвала СК. Принципи економіки. Нью-Делі; Excel Books India; 2009. стор. 324

47.

Бхаттачарія СК. Економіка енергетики. Концепції, проблеми, ринки та управління. Лондон: Springer-Verlag; 2011. стор. 721. DOI: 10.1007/978-0-85729-268-1

48.

Hungr O, McDougall S, Wise M, Cullen M. Магнітудно-частотні співвідношення селевих потоків і уламкових лавин у зв'язку з рельєфом схилу. Геоморфологія. 2008;96:355-365. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.03.020

49.

Якоб М., Фріле П. Частота та величина селевих потоків на річці Чикі, Британська Колумбія. Геоморфологія. 2010;114:382-395. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.08.013

50.

Якоб М., Холм К., Макдугалл С. Оцінка ризику сміттевого потоку, Оксфордська дослідницька енциклопедія природничих небезпек. Oxford University Press; 2016. DOI: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.37

51.

Райлі К. Л., Бендік Р., Гайд К. Д., Габет Е. Дж. Розподіл частоти та величини сміттевих потоків, складений із глобальних даних, і порівняння з постпожежними селевими потоками в геоморфології західної частини США. 2013;191;118–128. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.03.008

52.

Гук Дж.М. Варіації у співвідношенні величини повені та наслідків для оцінки ризику повені та управління річками. Геоморфологія. 2015;251:91-107. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.014

53.

Zhang Q, Gu X, Singh VP, Sun P, Chen X, Kong D. Величина, частота та час повеней у басейні річки Тарім, Китай: зміни, причини та наслідки. Глобальні та планетарні зміни. 2016;139:44–55. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.10.005

54.

Paradakis G, Vallianatos F, Sammonds P. Необширна статистична фізика, застосована до теплового потоку та розподілу частоти землетрусів і магнітуди в Греції. Physica A. 2016; 456: 135–144. DOI: 10.1016/j.physa.2016.03.022

55.

Гутенберг Б., Ріхтер К.Ф. Магнітуда та енергія землетрусів, Annali di Geofisica, 1956; 9: pp. 1–15. DOI: 10.4401/ag-4588

56.

Wald DJ, Jaiswal KS, Marano KD, Bausch D. Шкала впливу землетрусу. Огляд природних небезпек. 2011;125–139. DOI: 10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000040

*Цей текст є неофіційним перекладом документу, розміщеного на відкритому інформаційному ресурсі Департаменту національної безпеки Сполучених Штатів Америки (DHS), та може використовуватись лише з інформаційною та науковою метою.*

*Посилання на офіційний оригінал документа:*

<https://www.intechopen.com/chapters/74143>