

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд і технологій

(повна назва факультету)

Кафедра будівельної механіки

(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

Дослідження напружено-деформівного стану

великопролітної полімерної арки при дії експлуатаційних навантажень

Виконав: студент VI курсу, групи МБнм-61  
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»  
(шифр і назва спеціальності)

Студент

(підпис)

Палац П. З.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Чорномаз Н. Ю.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мещерякова О. М.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Ясній В. П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Чубик В. Ф.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій

(повна назва факультету)

Кафедра Будівельної механіки

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

студенту Палацу Петру Зіновійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження напружено-деформівного стану великопролітної полімерної арки при дії експлуатаційних навантажень»

Керівник роботи ЧорномазНаталіяЮріївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 09 » 04 2026 року № 4/9-178

2. Термін подання студентом завершеної роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ; Розділ 1 Архітектурно-будівельний; Розділ 2 Розрахунково-конструктивний; Розділ 3 Науково-дослідний; Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

---



---



---



---



---



---



---

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каспрук В.Б. доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С. ст. викл.		
Нормоконтроль	Мещерякова О.М. ст.викл.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1 Огляд літератури		
2	Розділ 2 Розробка розрахункової схеми з використанням програмного комплексу ЛІРА		
3	Розділ 3 Чисельні дослідження НДС конструкції зі склопластику за допомогою ПК ЛІРА		
4	Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
5	Висновки		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Палац П. З.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Чорномаз Н. Ю.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
1.1 Праці вітчизняних вчених.....	8
1.2 Праці зарубіжних авторів.....	10
1.3 Висновки до розділу.....	14
РОЗДІЛ 2 Розробка розрахункової схеми з використанням програмного комплексу ЛІРА.....	16
2.1 Вибір розрахункової схеми конструкції.....	16
2.1.1 Арка з розбивкою на 10 секцій.....	16
2.1.2 Арка з розбиттям на 5 секцій.....	29
2.1.3 Арка з розбиттям на 4 секції.....	37
2.1.4 Стрілчаста арка.....	45
2.2 Порівняння форм арок.....	47
2.3 Висновки до розділу.....	48
РОЗДІЛ 3 Чисельні дослідження НДС конструкції зі склопластику за допомогою ПК ЛІРА.....	50
3.1 Моделювання в ПК ЛІРА.....	50
3.2 Результати розрахунку.....	52
3.3 Висновки до розділу.....	63
РОЗДІЛ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	65
4.1 Охорона праці.....	65

4.1.1 Інженерні рішення з охорони праці .....	65
4.1.2 Огородження території.....	67
4.1.3 Визначення небезпечних зон на будівельному майданчику .....	67
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	69
4.2.1 Законодавча база України .....	69
4.2.2 Стійкість будівлі від ударної хвилі .....	69
4.3 Висновки до розділу 4 .....	73
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	75
БІБЛІОГРАФІЯ .....	77

## ВСТУП

Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується активним впровадженням великопролітних конструкцій у промисловому, транспортному та громадському будівництві. Особливого поширення набувають аркові системи, які дозволяють перекривати значні прольоти при відносно невеликій матеріалоемності та високій просторовій жорсткості.

Одним із перспективних напрямів розвитку великопролітних систем є використання полімерних та композитних матеріалів. Полімерні конструкції характеризуються малою власною вагою, високою корозійною стійкістю, технологічністю виготовлення та можливістю формування складних геометричних форм. Застосування склопластикових і композитних елементів дозволяє суттєво зменшити навантаження на несучі та фундаментні конструкції, підвищити довговічність системи та знизити експлуатаційні витрати. Водночас полімерні матеріали мають складну механічну поведінку, що пов'язано з їх анізотропністю, реологічними властивостями та підвищеною чутливістю до тривалих і змінних навантажень.

Надійність великопролітних аркових конструкцій значною мірою визначається особливостями їх напружено-деформованого стану при дії експлуатаційних навантажень. Для таких систем характерною є складна просторова робота, при якій внутрішні зусилля та деформації залежать від геометричних параметрів арки, жорсткості вузлів, фізико-механічних характеристик матеріалу та характеру прикладання навантаження. Особливої актуальності набуває дослідження роботи полімерних арок в умовах дії снігових, вітрових і несиметричних навантажень, які можуть спричиняти суттєвий перерозподіл внутрішніх зусиль та локальні концентрації напружень у найбільш навантажених ділянках конструкції.

Традиційні методи розрахунку аркових систем не завжди дозволяють повною мірою врахувати особливості роботи великопролітних полімерних конструкцій у реальних умовах експлуатації. У зв'язку з цим важливого значення набуває застосування сучасних методів чисельного моделювання, зокрема методу скінченних елементів, який дозволяє виконувати детальний аналіз напружено-деформованого стану конструкції, оцінювати переміщення, внутрішні зусилля та просторову жорсткість системи при різних схемах навантаження.

**Актуальність теми** обумовлена необхідністю підвищення достовірності оцінювання напружено-деформованого стану великопролітних полімерних арок та вдосконалення підходів до їх розрахунку при дії реальних експлуатаційних навантажень із використанням сучасних методів чисельного аналізу.

**Метою роботи** є дослідження напружено-деформованого стану великопролітної полімерної арки при дії експлуатаційних навантажень.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувалися такі завдання:

- провести аналіз науково-технічної літератури та сучасних підходів до дослідження великопролітних аркових конструкцій;
- дослідити особливості роботи полімерних і композитних конструкцій при дії експлуатаційних навантажень;
- розробити розрахункові схеми великопролітної полімерної арки з різними геометричними параметрами;
- виконати чисельне моделювання напружено-деформованого стану конструкції при дії снігових, вітрових та комбінованих навантажень;
- провести аналіз переміщень, внутрішніх зусиль та деформативності конструкції;
- визначити найбільш ефективну геометричну схему арки з точки зору жорсткості, економічності та простоти зведення;

– оцінити працездатність конструкції при поетапному та косиметричному навантаженні.

**Об’єктом дослідження** є великопролітна полімерна аркова конструкція.

**Предметом дослідження** є параметри напружено-деформованого стану та особливості роботи великопролітної полімерної арки при дії експлуатаційних навантажень.

**Методи дослідження** базуються на аналізі науково-технічної літератури, положеннях будівельної механіки, теорії пружності та чисельному моделюванні методом скінченних елементів із використанням ЛІРА-САПР.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає у комплексному дослідженні напружено-деформованого стану великопролітної полімерної арки та встановленні особливостей її роботи при дії експлуатаційних навантажень із урахуванням геометричних параметрів конструкції та просторової взаємодії елементів системи.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у можливості використання результатів дослідження при проектуванні великопролітних полімерних і композитних конструкцій, виборі раціональних геометричних схем арок та вдосконаленні методик чисельного аналізу просторових систем.

**Апробація.** Основні положення та окремі результати даного дослідження доповідались на ІХ Міжнародні студентські науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання».

**Ключові слова:** ВЕЛИКОПРОЛІТНА АРКА, ПОЛІМЕРНА КОНСТРУКЦІЯ, КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЛІРА-САПР, ПЕРЕМІЩЕННЯ, ВНУТРІШНІ ЗУСИЛЛЯ.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Праці вітчизняних вчених

Проблематика дослідження напружено-деформованого стану великопролітних конструкцій у сучасній будівельній науці є однією з найбільш актуальних, що обумовлено поширенням просторових покриттів, необхідністю зменшення власної ваги конструкцій та підвищенням їхньої енергоефективності. Особливий інтерес становлять великопролітні аркові системи, виготовлені із полімерних та композитних матеріалів, які поєднують високу міцність, корозійну стійкість і відносно невелику масу. Водночас складність просторової роботи таких конструкцій потребує детального аналізу їхнього напружено-деформованого стану при дії експлуатаційних навантажень.

У вітчизняних дослідженнях значна увага приділяється аналізу просторових аркових і оболонкових систем. У роботі Р. В. Коренєва досліджено вплив діафрагм жорсткості на напружено-деформований стан та стійкість спеціальних оболонкових систем [2]. Автором встановлено, що введення додаткових елементів жорсткості забезпечує більш рівномірний розподіл внутрішніх зусиль та зменшує деформативність конструкції. Отримані результати підтверджують важливість урахування просторової взаємодії елементів при моделюванні великопролітних арок.

Подальший розвиток цієї тематики представлений у роботі С. С. Гребенчука, П. А. Резніка, Л. В. Гапонової та Р. В. Коренєва, де розглянуто питання стійкості металевих оболонкових систем та запобігання їх прогресуючому руйнуванню [3]. У дослідженні виконано чисельне моделювання просторових конструкцій, визначено характер перерозподілу напружень і форми втрати стійкості при різних схемах навантаження. Праця демонструє ефективність застосування скінченно-елементного аналізу для оцінювання роботи великопролітних систем, що є важливим і для полімерних аркових конструкцій.

Важливе значення для розвитку сучасних великопролітних конструкцій мають дослідження у сфері полімерних та композитних матеріалів. У роботі І. Рудневої розглянуто технологічні особливості підсилення металевих конструкцій високоміцними фіброармованими полімерними системами [4]. Автором відзначено, що використання композитних матеріалів дозволяє суттєво підвищити несучу здатність конструкцій без значного збільшення їхньої маси. Такі матеріали характеризуються високою корозійною стійкістю, що є особливо важливим для великопролітних покриттів, які експлуатуються в умовах змінного температурно-вологісного режиму.

Схожі результати наведено у праці І. Рудневої, О. Молодіда та Б. Богдана, присвяченій експериментальному дослідженню підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням композитними матеріалами FRP [5]. У роботі встановлено, що застосування композитного армування дозволяє зменшити деформації та підвищити жорсткість конструкції. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні полімерних аркових систем, оскільки підтверджують ефективність використання сучасних композитів у несучих елементах великопролітних конструкцій.

Окремий напрям досліджень стосується впливу експлуатаційних навантажень на просторові системи. У роботі Ю. А. Казачонка, Б. С. Охріменка та Д. В. Михайловського виконано аналіз напружено-деформованого стану конструкції з клеєної деревини при дії реального вітрового навантаження [6]. Авторами показано, що нерівномірний розподіл вітрового тиску суттєво впливає на характер деформування конструкції та призводить до локального збільшення напружень у найбільш навантажених зонах. Наведені підходи є доцільними для використання при моделюванні полімерних арок, особливо в частині врахування просторової роботи та дії змінних експлуатаційних навантажень.

У дослідженні Д. В. Михайловського, М. Комара та О. Комара розглянуто напружено-деформований стан плит із перехресно-клеєної деревини, підсилених композитними стрічками [7]. Автори встановили, що використання композитних матеріалів сприяє підвищенню жорсткості елементів та зменшенню прогинів при навантаженні. Праця підтверджує перспективність застосування полімерних композитів у несучих конструкціях та демонструє ефективність чисельного моделювання при оцінюванні їхньої роботи.

Теоретичні аспекти деформування конструкційних матеріалів висвітлено у роботі С. С. Гомона, присвяченій теорії роботи та методам розрахунку дерев'яних елементів при одноразових і повторних навантаженнях [8]. Автор підкреслює, що реальна робота конструкцій значною мірою залежить від нелінійності деформування матеріалу та зміни жорсткісних характеристик у процесі навантаження. Такі положення є актуальними і для полімерних конструкцій, оскільки вони характеризуються складною реологічною поведінкою та чутливістю до тривалої дії навантаження.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить, що в сучасних дослідженнях достатньо широко висвітлені питання моделювання напружено-деформованого стану великопролітних систем, роботи аркових конструкцій та застосування композитних матеріалів. Водночас дослідження саме великопролітних полімерних арок при дії експлуатаційних навантажень залишаються недостатньо розкритими. Це підтверджує актуальність подальших досліджень, спрямованих на визначення особливостей роботи таких конструкцій, оцінювання їхньої деформативності, стійкості та несучої здатності із застосуванням сучасних методів чисельного моделювання.

## **1.2 Праці зарубіжних авторів**

У зарубіжній науковій практиці дослідження великопролітних конструкцій із полімерних та композитних матеріалів займають важливе місце у сфері сучасного

будівництва. Це обумовлено необхідністю створення легких, корозійностійких та енергоефективних конструкцій, здатних працювати в умовах значних експлуатаційних навантажень. Основна увага приділяється аналізу напружено-деформованого стану, стійкості, довговічності та особливостей нелінійної роботи полімерних систем.

Однією з фундаментальних праць у сфері механіки композитних конструкцій є дослідження J. N. Reddy [9], у якому сформовано теоретичні основи аналізу ламінованих композитних пластин і оболонки. Автор розглядає математичні моделі визначення напружень, деформацій та втрати стійкості композитних елементів з урахуванням анізотропії матеріалу. Праця є важливою для дослідження великопролітних полімерних арок, оскільки дозволяє описати особливості їхньої просторової роботи та деформування.

У роботі A. A. Baker, S. Dutton та D. Kelly [10] наведено сучасні підходи до проектування конструкцій із полімерних композитів. Автори виконали аналіз механічної поведінки композитних матеріалів при статичних і циклічних навантаженнях, а також дослідили процеси руйнування та втрати несучої здатності. Отримані результати підтверджують перспективність використання композитів у великопролітних конструкціях завдяки їх високій питомій міцності та малій вазі.

Питання механіки композитних матеріалів також детально розглянуто у праці R. M. Jones [11]. Автор досліджує вплив структури матеріалу, орієнтації армувальних волокон і типу навантаження на формування напружено-деформованого стану конструкції. Праця є важливою для аналізу полімерних аркових систем, оскільки їхня робота значною мірою залежить від фізико-механічних характеристик композитного матеріалу.

У дослідженні L. Ascione, A. Feo та G. Mancusi [12] проаналізовано поведінку криволінійних композитних конструкцій при дії зовнішніх навантажень. Авторами встановлено, що аркові та оболонкові системи з полімерних композитів

характеризуються підвищеною чутливістю до локальних концентрацій напружень і втрати стійкості у вузлових зонах. Результати дослідження підтверджують необхідність детального скінченно-елементного моделювання великопролітних арок.

Теоретичні основи чисельного моделювання просторових конструкцій висвітлено у праці O. C. Zienkiewicz та R. L. Taylor [13]. Автори розглянули застосування методу скінченних елементів для аналізу напружено-деформованого стану складних конструктивних систем. Запропоновані методики сьогодні широко використовуються у програмних комплексах COMSOL Multiphysics, ANSYS та Abaqus при дослідженні великопролітних полімерних конструкцій.

Питання механічних характеристик полімерних композитів досліджено у роботі J. F. Mandell та F. J. McGarry [14]. Авторами встановлено, що полімерні матеріали мають складну деформаційну поведінку, а їхня міцність і жорсткість суттєво залежать від тривалості та характеру навантаження. Такі особливості необхідно враховувати при проектуванні великопролітних арок, які експлуатуються під дією постійних і змінних навантажень.

У праці Y. J. Weitsman [15] розглянуто вплив тривалої дії навантаження, температури та вологості на поведінку полімерних композитів. Автор зазначає, що реологічні властивості полімерів можуть призводити до збільшення деформацій у процесі експлуатації, що є особливо важливим для великопролітних конструкцій із значною гнучкістю.

Окрему увагу сучасні дослідники приділяють безпосередньо композитним арковим конструкціям. У роботі Z. Y. Xia, T. Jiang та T. Yu [16] наведено огляд сучасних аркових систем із композитних матеріалів. Автори аналізують особливості проектування, механічної поведінки та перспективи застосування полімерних композитів у великопролітних конструкціях. У дослідженні підкреслюється, що композитні арки забезпечують значне зменшення власної ваги конструкції при збереженні високої несучої здатності.

Праці Н. J. Walton [17, 18] присвячені дослідженню композитних аркових мостових систем. Автором виконано експериментальні та чисельні дослідження заглиблених композитних арок, визначено їхню деформативність, характер розподілу напружень та вплив взаємодії конструкції з ґрунтовим середовищем. Результати показують ефективність застосування композитних матеріалів у великопролітних криволінійних системах.

У роботі Y. Zhang, X. Liu та H. Zhao [19] досліджено напружено-деформований стан аркових конструкцій із GFRP-композитів з урахуванням співвідношення стріли підйому та прольоту. Авторами встановлено, що геометричні параметри арки суттєво впливають на величину прогинів і розподіл внутрішніх зусиль, а найбільші напруження виникають у приопорних ділянках.

Фундаментальні положення теплопровідності та процесів тепломасообміну наведені у працях D. W. Hahn та M. N. Özisik [20], а також R. B. Bird, W. E. Stewart та E. N. Lightfoot [21]. Ці дослідження мають важливе значення для оцінювання температурного впливу на полімерні конструкції, оскільки полімерні матеріали є чутливими до змін температурного режиму.

Проблеми повзучості та тривалої деформації конструкцій розглянуто у праці Z. P. Bažant [22]. Автором встановлено, що тривала дія навантаження може викликати поступове збільшення деформацій і зміну жорсткісних характеристик конструкції. Для полімерних арок це питання є особливо актуальним через виражені реологічні властивості полімерів.

У роботі F. Meng, R. H. Pritchard та E. M. Terentjev [23] досліджено процеси релаксації напружень і пластичної деформації полімерних мереж. Отримані результати підтверджують, що полімерні матеріали мають складну нелінійну поведінку, яку необхідно враховувати при моделюванні великопролітних конструкцій.

Праця Z. Boufaïda, J. Boisse, S. André та L. Farge [24] присвячена механічному аналізу склотканинних полімерних композитів із застосуванням чисельного моделювання та томографічних досліджень. Автори підтвердили ефективність використання скінченно-елементного аналізу для прогнозування локальних зон концентрації напружень у композитних елементах.

У дослідженні Z. Yousaf, N. Morrison та W. J. Parnell [25] розглянуто механічні характеристики полімерних композитів із синтаксичною структурою. Автори встановили, що такі матеріали характеризуються високою питомою міцністю та можуть бути перспективними для створення легких великопролітних конструкцій.

### **1.3 Висновки до розділу**

У першому розділі кваліфікаційної роботи магістра проведено аналіз науково-технічної літератури, присвяченої дослідженню напружено-деформованого стану великопролітних аркових конструкцій, виготовлених із полімерних та композитних матеріалів. Встановлено, що сучасний розвиток транспортної інфраструктури в умовах складного клімату потребує застосування легких, корозійностійких та енергоефективних конструктивних систем, здатних забезпечувати надійну роботу при дії снігових, вітрових та температурних навантажень.

У результаті аналізу праць вітчизняних дослідників встановлено, що значна увага приділяється питанням моделювання просторових оболонкових та аркових систем, дослідженню їхньої стійкості, жорсткості та особливостей перерозподілу внутрішніх зусиль. Визначено, що використання сучасних методів скінченно-елементного аналізу дозволяє ефективно оцінювати напружено-деформований стан великопролітних конструкцій та враховувати просторову взаємодію елементів системи. Особливий інтерес становлять дослідження, присвячені застосуванню

полімерних і композитних матеріалів для підсилення та створення нових несучих конструкцій.

Проведений аналіз зарубіжних наукових праць показав, що у світовій практиці активно розвиваються дослідження полімерних і композитних аркових конструкцій, орієнтовані на зменшення власної ваги систем, підвищення їх довговічності та стійкості до агресивного середовища. Встановлено, що найбільшу увагу приділено дослідженню нелінійної роботи композитних матеріалів, процесам втрати стійкості, впливу тривалих навантажень, температури та реологічних властивостей полімерів на роботу конструкцій.

У роботі встановлено, що для великопролітних аркових конструкцій із композитних матеріалів характерним є складний просторовий напружено-деформований стан, який суттєво залежить від геометричних параметрів арки, фізико-механічних характеристик матеріалу, умов закріплення та характеру прикладання навантаження. Визначено, що найбільш небезпечними є локальні концентрації напружень у вузлових зонах, приопорних ділянках та місцях зміни геометрії конструкції.

Проведений огляд літературних джерел підтвердив ефективність використання методу скінченних елементів для дослідження роботи великопролітних аркових систем. Встановлено, що сучасні програмні комплекси дозволяють моделювати просторову роботу конструкцій, визначати внутрішні зусилля, переміщення та оцінювати вплив різних схем навантаження на напружено-деформований стан системи. Разом із тим визначено, що питання дослідження великопролітних полімерних арок в умовах дії реальних експлуатаційних навантажень, характерних для північних регіонів, залишаються недостатньо висвітленими та потребують подальшого дослідження

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ЛІРА

#### 2.1 Вибір розрахункової схеми конструкції

Для можливості проведення експерименту необхідно вибрати розрахункову схему конструкції, яка повинна мати такі властивості: економічність; легкість зведення; ефективність.

Прийняті сніговий та вітровий райони - V та III відповідно. Нормативне значення ваги снігового покриву на  $1\text{ м}^2$  горизонтальної поверхні дорівнює  $0,6\text{ кПа}$ .

Пульсаційна складова вітрового впливу (шр) буде обчислена автоматично в ПК Ліра Софт, тому достатньо задати лише основний вітровий вплив. Нормативне значення вітрового тиску приймається для III вітрового району становить  $0,38\text{ кПа}$ . Тип місцевості - А.

##### 2.1.1 Арка з розбивкою на 10 секцій

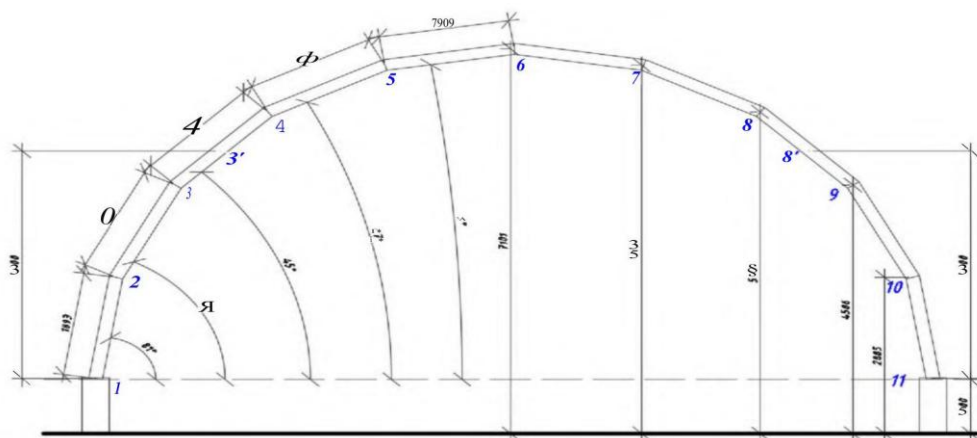


Рисунок 1.1 - Арка з розбивкою на 10 секцій

Підбір навантажень:

а) Снігові навантаження:

Для будівель зі склепінчастими та близькими до них за контуром покриттями слід приймати:

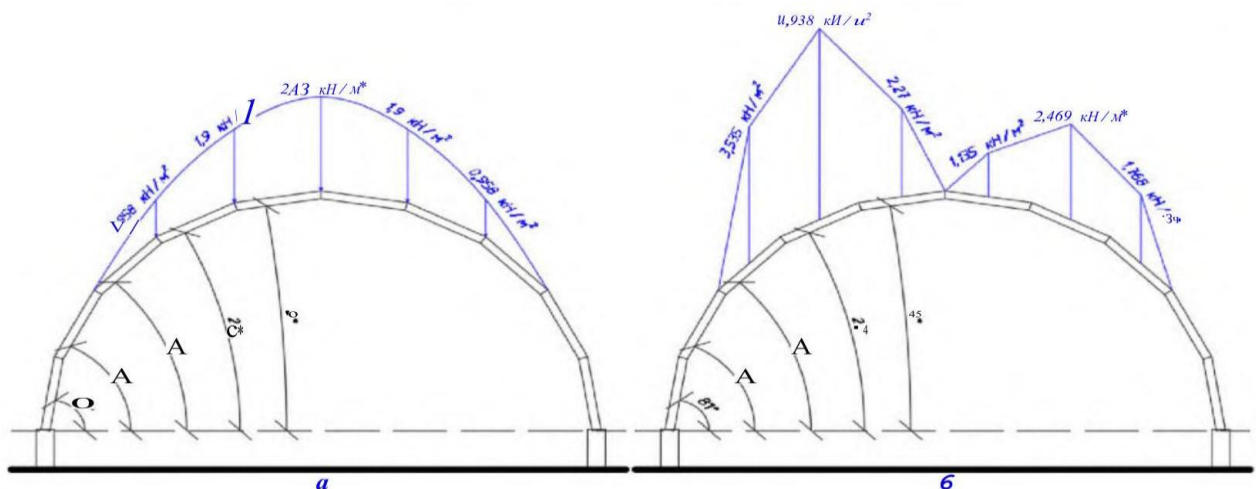
$$14 = A > 8(1,5 >:); D_2 = 23 \quad (1.1)$$

де  $a$  - ухил покриття, град. При цьому значення  $\mu_1$  обчислюються в кожній точці покриття, значення  $\mu_2$  - у точках з ухилом  $a = 30^\circ, 60^\circ$  та в крайньому перерізі покриття. Проміжні значення  $\mu_2$  визначаються лінійною інтерполяцією. При  $a \geq 60^\circ/4 = 15^\circ = 0$ .

З рисунка 1.1 випливає, що необхідно обчислити коефіцієнти  $\mu_1$  та  $\mu_2$  при кутах 45, 27 та 9 градусів.

Таблиця 1.1 – Кути  $\mu_1$  і  $\mu_2$  для арки з розбивкою на 10 частин

Кут, град.	$\mu_1$	Навантаження від 4, кН/м <sup>2</sup>	$\mu_2$	Навантаження від $L_2$ , кН/м <sup>2</sup>
45	0,383	0,958	1,414	3,535
27	0,76	1,9	1,975	4,938
9	0,972	2,43	0,908	2,27



а - навантаження від  $\mu_1$  ; б - навантаження від  $\mu_2$ .

Рисунок 1.2 - Снігові навантаження

б) Вітрові навантаження:

Для визначення аеродинамічних коефіцієнтів необхідно визначити еквівалентну висоту:

$b = 7 \text{ м}; 3 = 12 \text{ м}; lt < cl \Rightarrow$  приймаємо 7 м .

розрахункова еквівалентна висота: 5,2 м .

коефіцієнти:

$$\frac{l}{l} = \frac{4}{12} = 0,5 \quad (1.2)$$

$$\frac{\Pi 2}{l} = \frac{1}{12} = 0,083 \quad (1.3)$$

За обчисленими даними визначаємо аеродинамічні коефіцієнти:

Таблиця 1.2 - Аеродинамічні коефіцієнти

Коефіцієнт	Значення
$C_{e1}$	0,8
$C_{e2}$	1,2
$C_{e3}$	0,4

Обчислимо коефіцієнти, що враховують зміну вітрового тиску для висоти  $C_{e2}$ , а також зусилля основн ого вітрового впливу для кожного елемента.

Таблиця 1.3 - Розрахунок зусиль вітрового впливу для типу місцевості А

№ ел. та на рис. 1	Висота від рівня землі, м	Висота $h_e$ , м	Кут К	Нормативне навантаження вітрового тиску, $\text{кН/м}^2$
1,2	1	1	0,75	0,228
2,3	2,885	2,32	0,75	0,228
3,3'	5,2	3,94	0,76	0,228
3'. 4	4,586	3,51	0,75	-0,342
4 · 5	5,936	4,455	0,797	-0,342
5,6	6,803	5,062	0,84	-0,343

## Продовження таблиці 1.3

№ ел. та на рис. 1	Висота від рівня землі, м	Висота $h_e$ , м	Кут $K$	Нормативне навантаження вітрового тиску, $kH/m^2$
6,7	7,101	5,271	0,855	-0,348
7,8	6,803	5,062	0,84	-0,343
8.8'	5,2	3,94	0,76	-0,342
8'. 9	5,936	4 455	0,797	-0,114
9,10	4,586	3,51	0,75	-0,114
10-11	2,885	2,32	0,75	-0,114

## в) Навантаження від ваги плівки

Плівка ЕТРЕ має щільність  $1750 \text{ кг/м}^3$ . При товщині плівки  $1 \text{ мм}$ , навантаження складе  $1,75 \text{ кг/м}^2$ .

Була створена розрахункова схема тунелю довжиною  $100 \text{ м}$  з кроком арок  $2 \text{ м}$  у ПК Ліра. У фундаменті арок встановлені фундаментні стовпчики із залізобетону висотою  $1 \text{ м}$ . Арки спираються на них шарнірно у своїй площині.

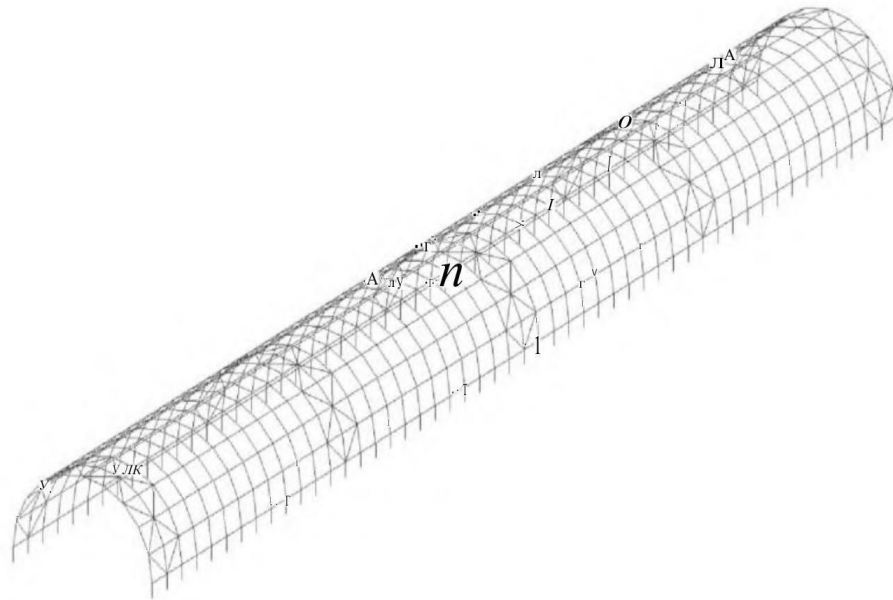


Рисунок 1.3 - Розрахункова схема тунелю з арками з 10 частин

3)+(1\*L4)+(1\*L6)

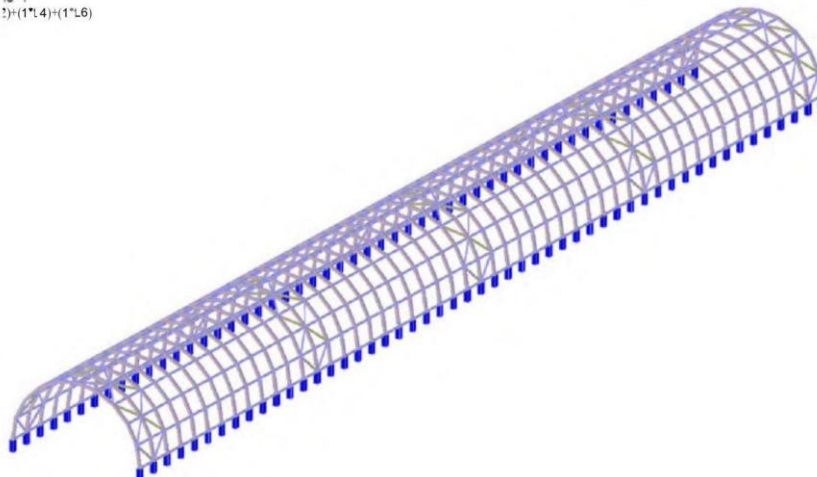


Рисунок 1.4-3D Візуалізація розрахункової схеми тунелю з арками з 10 частин

Зв'язки прикріплені до основних конструкцій шарнірно. Фундаментні стовпчики мають жорсткі зв'язки з основою.

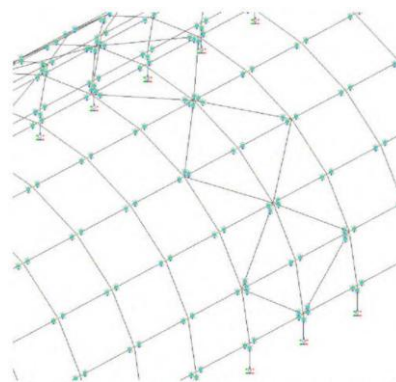


Рисунок 1.5 - Фрагмент тунелю з візуалізацією зв'язків

Раніше розраховані навантаження задані на розрахункову схему.





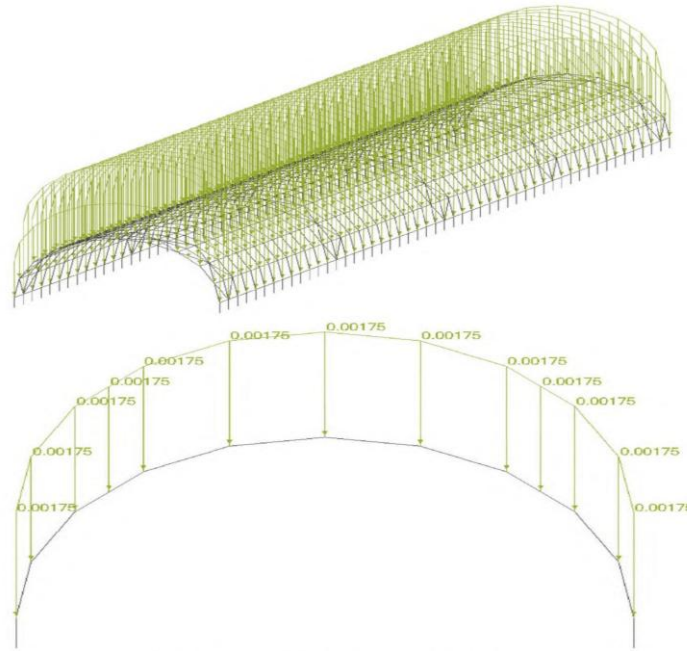


Рисунок 1.10 - Навантаження від ваги плівки

Динаміка з розкладом за власними формами коливань: Пульсаційна складова вітрового впливу (Вітер пульс 1).

Було створено 2 комбінації навантажень, в яких враховуються 2 варіації снігового навантаження.

Таблиця 1.4 - Комбінації навантажень

Найменування навантаження	Кут приведення до розрахункових навантажень	Комбінація 1	Комбінація 2
Власна вага	1,05	+	+
1 варіація снігового навантаження	1,4	+	-
2 варіація снігового навантаження	1,4	-	+
Пульсаційна складова вітрового впливу 1	1,4	+	-
Пульсаційна складова вітрового впливу 2	1,4	-	+
Вага плівки	1,05	+	+

Основним параметром, за яким у першу чергу здійснюється підбір перерізів, є прогин по осі 2. Для конструкції з прольотом 12 м гранично допустимий прогин становить:

$$\frac{12000}{250} = 48\text{мм}$$

В якості основних несучих конструкцій було підібрано перетин зі склопластику у вигляді коробки розмірами 180 × 200 × 8 мм.

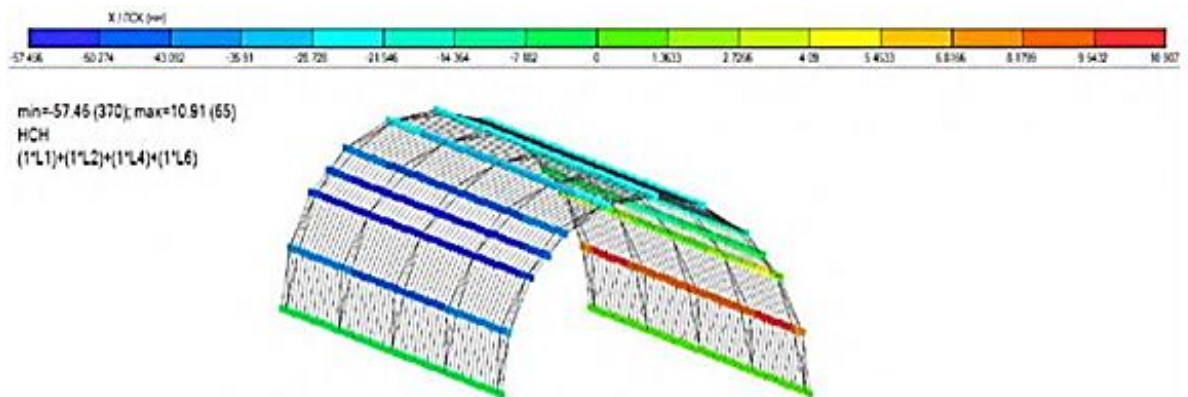


Рисунок 1.11 - Переміщення по X (max -57,456 мм)

На рисунку 1.11 наведено результати переміщень конструкції по осі X. Максимальне значення горизонтального переміщення становить -57,456 мм, при цьому найбільші деформації спостерігаються у верхній частині аркової конструкції під дією розрахункової комбінації навантажень.

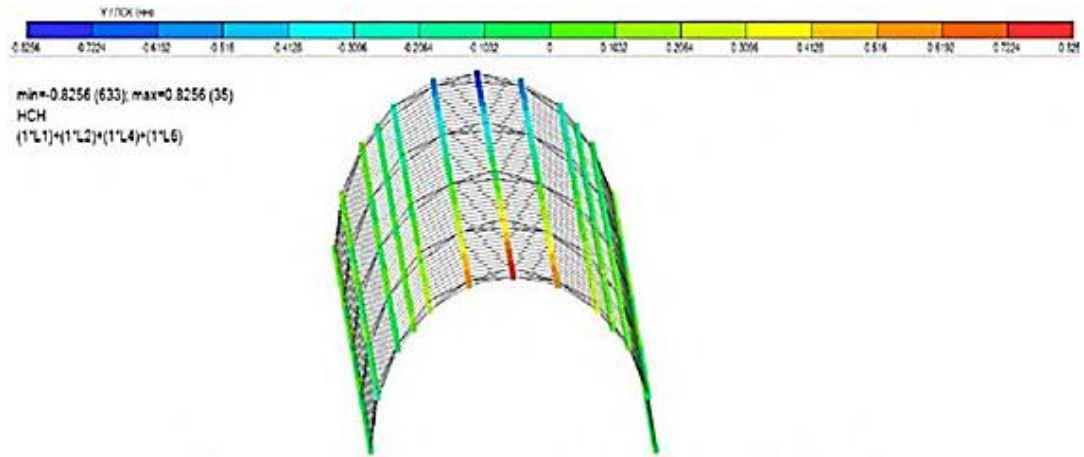


Рисунок 1.12 - Переміщення по У (max—0,8256 мм)

На рисунку 1.12 показано переміщення конструкції по осі Y. Отримані значення не перевищують гранично допустимих показників для арки прольотом 12 м, а розподіл деформацій має рівномірний характер по довжині конструкції.

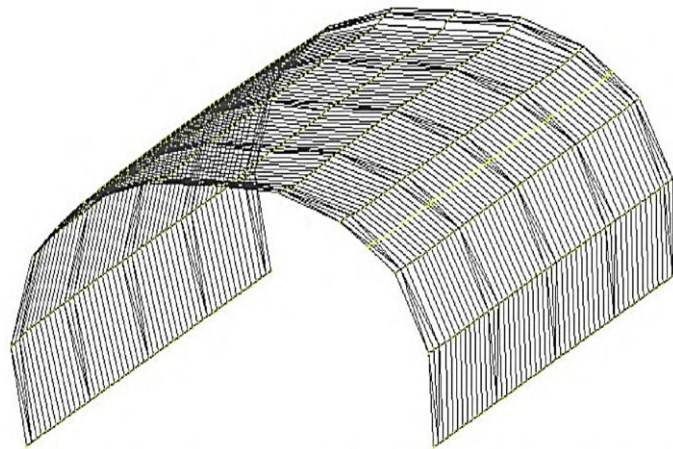


Рисунок 1.13 - Деформована розрахункова схема від поєднання навантажень 1

На рисунку 1.13 представлено деформовану розрахункову схему від поєднання навантажень 1. Максимальні прогини виникають у центральній частині прольоту, що відповідає характеру роботи арочної системи при дії снігових та вітрових навантажень.

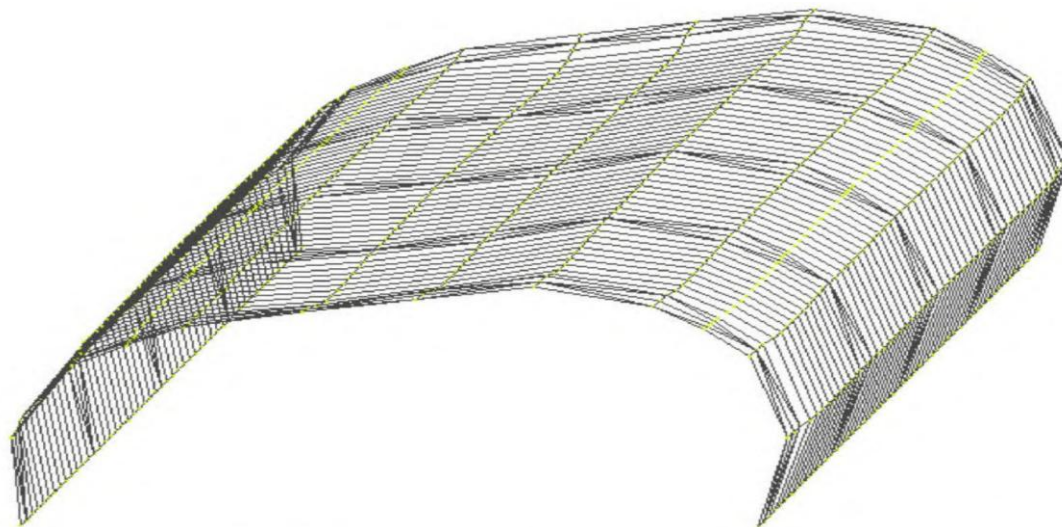


Рисунок 1.14 - Деформована схема від поєднання навантажень 2

На рисунку 1.14 наведено деформовану схему конструкції від поєднання навантажень 2. Характер деформування є симетричним відносно осі арки, а максимальні переміщення зосереджені у верхній зоні прольоту під дією розрахункових навантажень.

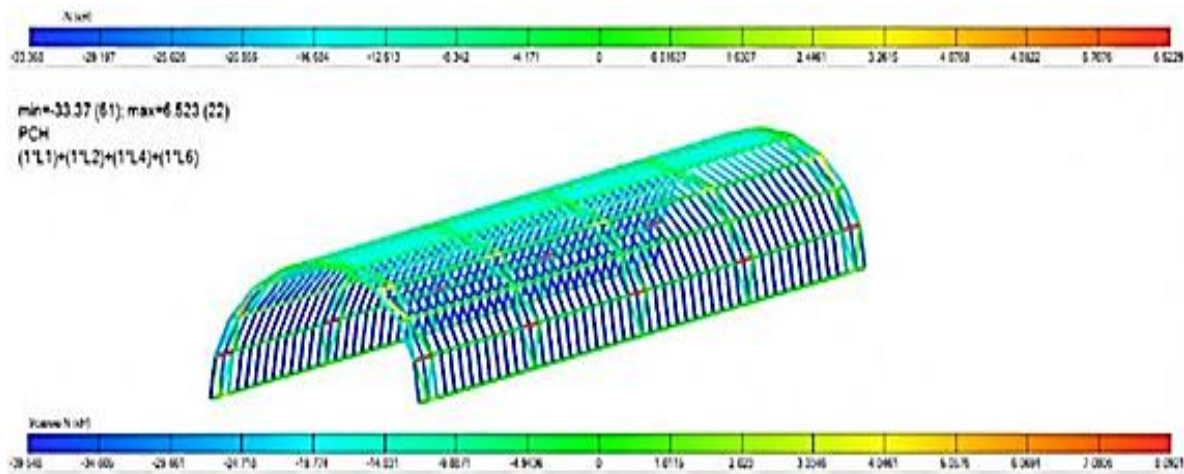


Рисунок 1.15 - Зусилля N від двох комбінацій (max—39,548кН)

На рисунку 1.15 показано розподіл поздовжніх зусиль N для двох розрахункових комбінацій. Найбільші значення поздовжніх зусиль виникають у

припорних ділянках арки, що обумовлено передачею основного стискаючого навантаження на опори.

Комбінація «2» РСН (1\* L1) + (1\* L3) + (1\* L5) + (1\* L6)

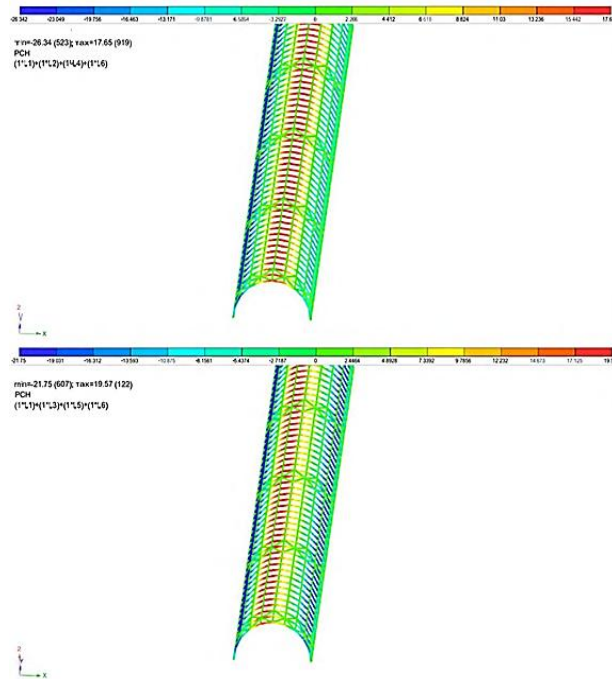


Рисунок 1.16 - Зусилля Mu від двох комбінацій

На рисунку 1.16 представлено розподіл згинальних моментів Mu для двох розрахункових комбінацій навантажень. Аналіз результатів показує, що найбільші значення згинальних моментів формуються у вузлових зонах та припорних ділянках арки, де відбувається концентрація внутрішніх зусиль унаслідок зміни напрямку елементів конструкції. У центральній частині прольоту значення моментів є меншими, що характерно для арочних систем, у яких основна робота конструкції здійснюється за рахунок стиску. Отриманий характер розподілу зусиль підтверджує просторову роботу конструкції та дозволяє оцінити найбільш навантажені ділянки при підборі перерізів елементів.

Проведемо перевірку перерізу на міцність за формулою:

$$\left| \frac{N}{A y_c} + N \sqrt{f y_c} \right| \leq K_y, \quad (4)$$

де  $N$  - по здовжнє зусилля, кН;

$M_y$  - зусилля згинального моменту, кН\*м;

$A$  - площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup> ;

$W_y$  - момент опору перерізу, м<sup>3</sup>;

$y_c$  - коефіцієнт роботи;

$K_y$  - розрахунковий опір матеріалу на вигин, МПа.

$N = .39,548$ кН;

$M_y = 26,342$ кН \* м;

$A = 0,005824$  м<sup>2</sup>;

$$W_y = \frac{b a^3 - b z a}{6 a} = \frac{0,18 * 0,23 - 0,164 * 0,1843}{6 * 0,2} = 0,000349 \text{ м}^3$$

$y_c = 1$ ;

$K_y = 226,9$  МПа= 226900 кПа.

$$\left| \frac{-39,548}{0,005824} + \frac{-26,342}{0,000349} \right| = 82269,032 \text{ кПа} < 226900 \text{ кПа}.$$

Коефіцієнт використання перерізу становить 36,26% .



Таблиця 1.6 - Розрахунок зусиль вітрового впливу для типу місцевості А

№ ел. та на рис. 19	Висота від рівня землі, м	Висота $h_e$ , м	Кут $K()$	Нормативне навантаження вітрового тиску, $\text{кН/м}^2$
1,2	4,62	3,534	0,75	0,228
2,2'	5,2	3,94	0,75	0,228
2'. 3	6,838	5,0866	0,754	-0,343824
3,4	6,838	5,0866	0,754	-0,343824
4,4'	5,2	3,94	0,75	-0,114
4,5	4,62	3,534	0,75	-0,114

Створення розрахункової схеми:

Була створена розрахункова схема, аналогічна до рис. 2.1.1, змінено форму арок і зв'язків.

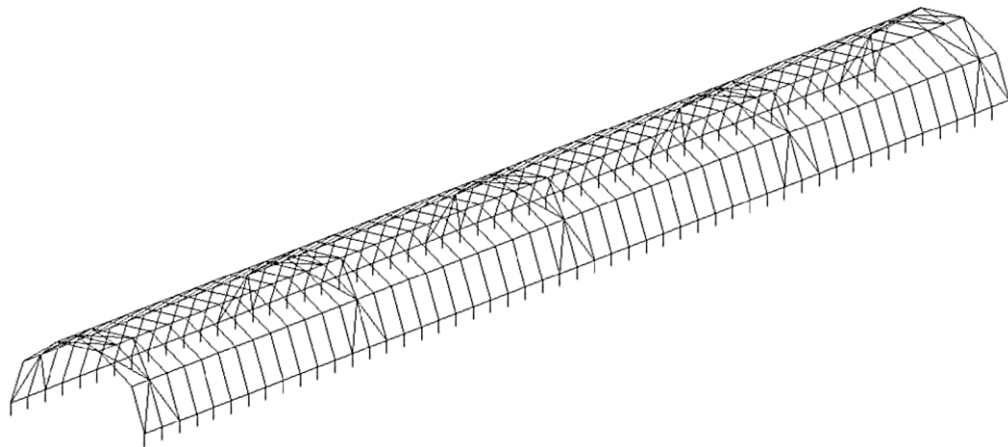


Рисунок 1.18 - Розрахункова схема тунелю з арками з 5 частин

На рисунку 1.18 наведено розрахункову схему тунелю з арками, розбитими на 5 секцій. Конструкція сформована з п'яти основних елементів арки, що дозволило зменшити кількість вузлів та загальну матеріаломісткість системи порівняно зі схемою з 10 секцій. Крок арок у тунелі становить 2 м, а загальна довжина конструкції прийнята 100 м.

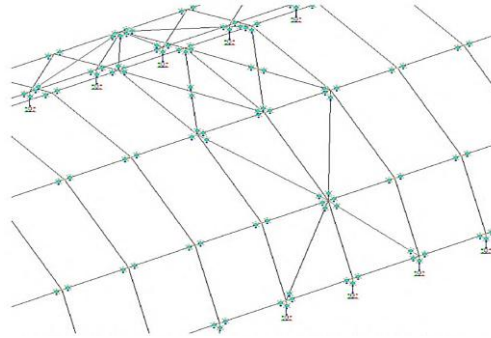


Рисунок 1.19– 3D-візуалізація розрахункової схеми тунелю з арками з 5 частин

На рисунку 1.19 представлено 3D-візуалізацію розрахункової схеми тунелю з арками, розбитими на 5 секцій. Просторова модель дозволяє оцінити геометрію конструкції, розташування зв'язків та роботу арокних елементів у складі тунелю довжиною 100 м при кроці арок 2 м.

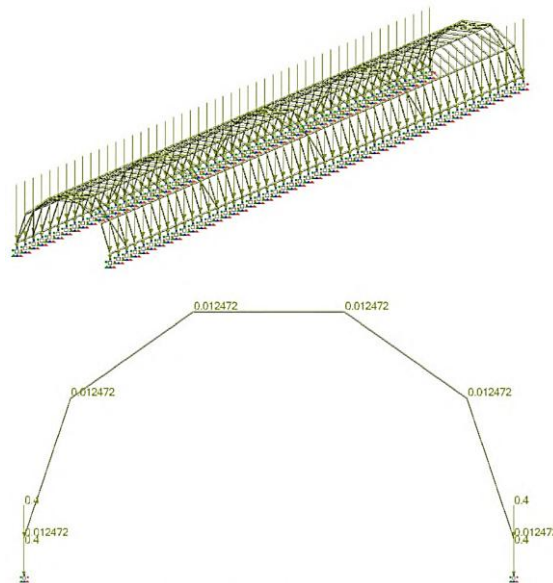


Рисунок 1.20 - Власна вага

На рисунку 1.20 наведено навантаження від власної ваги конструкції, прикладене до розрахункової схеми. Власна вага враховує масу склопластикових елементів арок, зв'язків та допоміжних конструктивних елементів, що беруть участь у роботі системи.

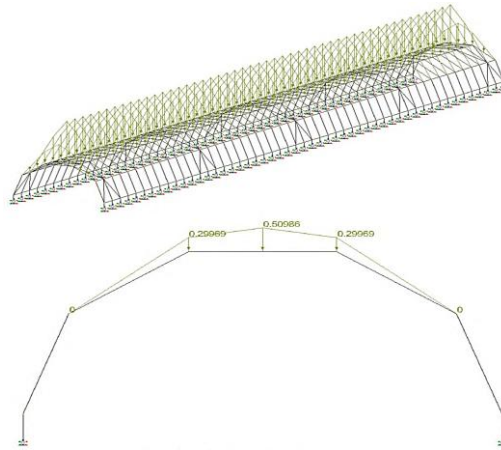


Рисунок 1.21 - Варіація снігового навантаження

На рисунку 1.21 наведено першу варіацію снігового навантаження для арки з 5 секцій. Навантаження прикладене нерівномірно відповідно до форми покриття та розрахункових коефіцієнтів снігового впливу.

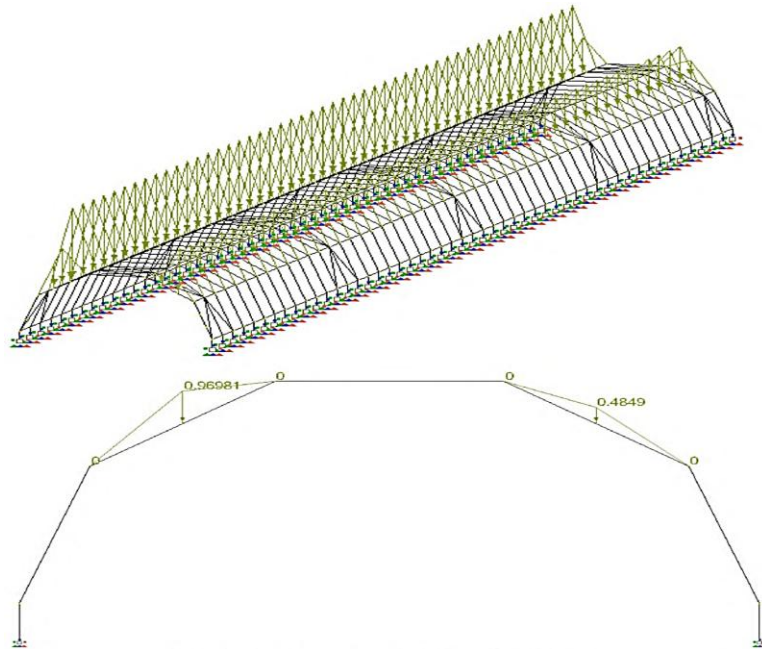


Рисунок 1.22 - 2 варіація снігового навантаження

На рисунку 1.22 показано другу варіацію снігового навантаження. Схема враховує несиметричний розподіл снігового покриву по поверхні арки під дією вітрового впливу.

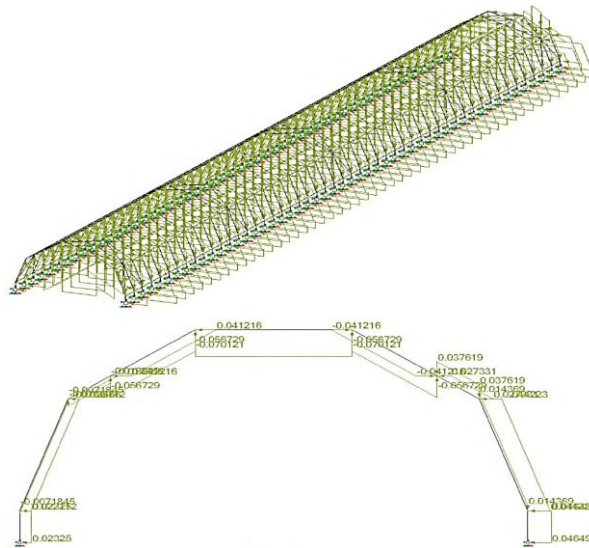


Рисунок 1.23 - Вітрове навантаження

На рисунку 1.23 представлено вітрове навантаження на конструкцію тунелю. Розрахунок виконано для III вітрового району при нормативному тиску 0,38 кПа.

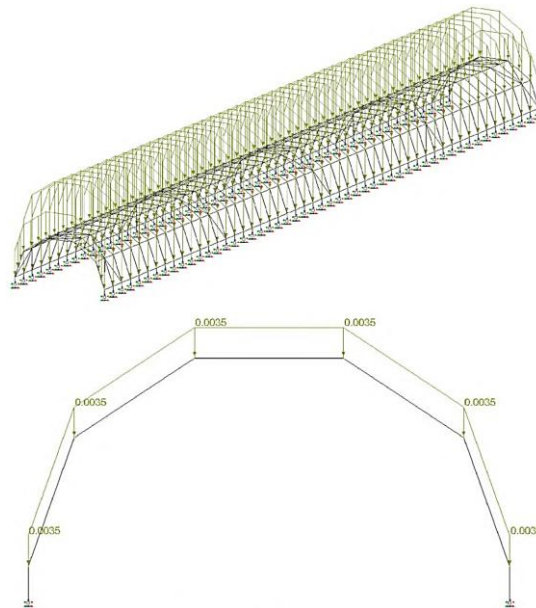


Рисунок 1.24 - Вага плівки

На рисунку 1.24 наведено навантаження від ваги плівкового покриття. Навантаження рівномірно розподілене по поверхні арки та враховує щільність ETFE-плівки 1750 кг/м<sup>3</sup>.

В якості основних несучих конструкцій було підібрано перетин зі склопластику у вигляді коробки розміром  $140 \times 180 \times 8$  мм .

Комбінація «1» (1'L1) + (1'L2) + (1'L4) + (1'L6)

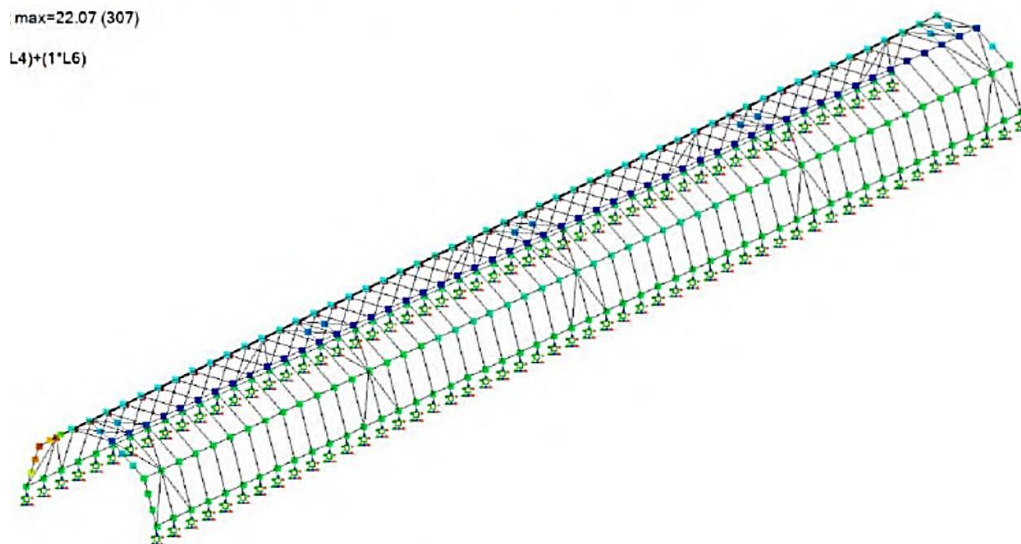


Рисунок 1.25 - Переміщення по Z (max -40,94 мм)

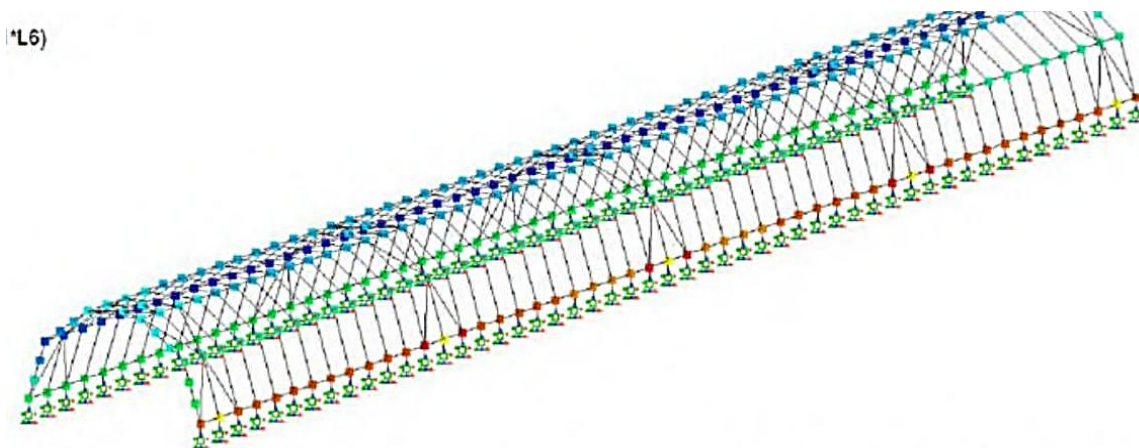


Рисунок 1.26 - Переміщення по X (max -68,5 мм)

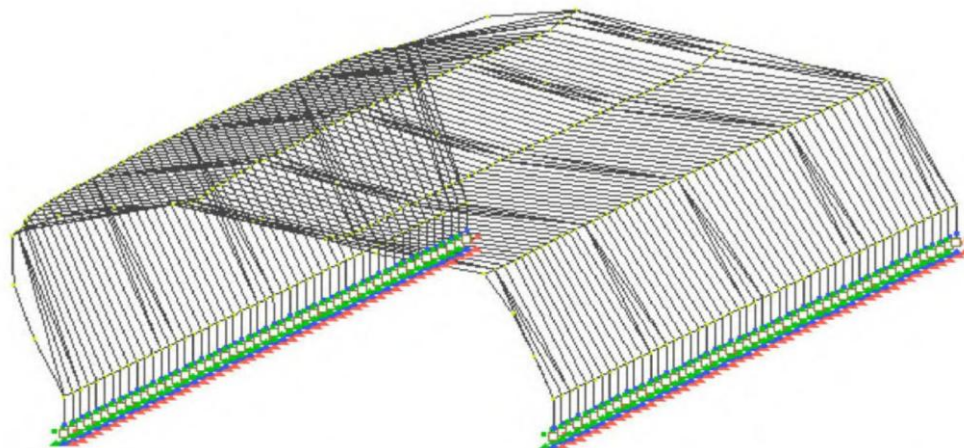


Рисунок 1.27 - Деформована розрахункова схема від комбінації навантажень 1

Деформована розрахункова схема від комбінації навантажень 1 демонструє плавний характер зміни форми арки без локальних концентрацій переміщень у вузлах. Найбільші прогини виникають у центральній частині прольоту. Робота конструкції характеризується переважно стискуючим напруженим станом основних елементів. Просторова жорсткість системи забезпечується спільною роботою арок і зв'язків. Отримана форма деформації відповідає розрахунковій роботі арочної конструкції при дії комбінованих навантажень.

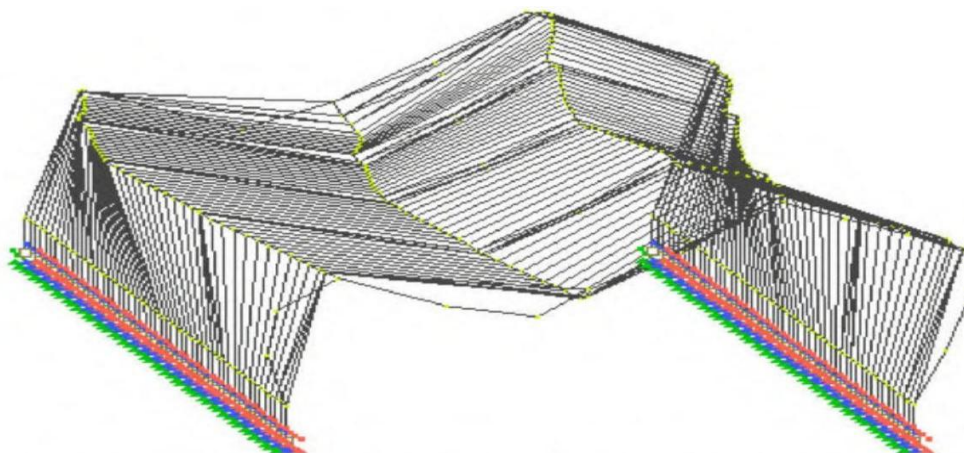


Рисунок 1.28 - Деформована розрахункова схема від комбінації навантажень 2

Деформована розрахункова схема від комбінації навантажень 2 характеризується зміною характеру переміщень унаслідок іншої схеми прикладання

снігового навантаження. Максимальні деформації спостерігаються у верхній зоні арки та середині прольоту. При цьому конструкція зберігає загальну геометричну стійкість. Перерозподіл внутрішніх зусиль між елементами має плавний характер. Результати підтверджують працездатність арки з розбиттям на 5 секцій при розрахункових навантаженнях.

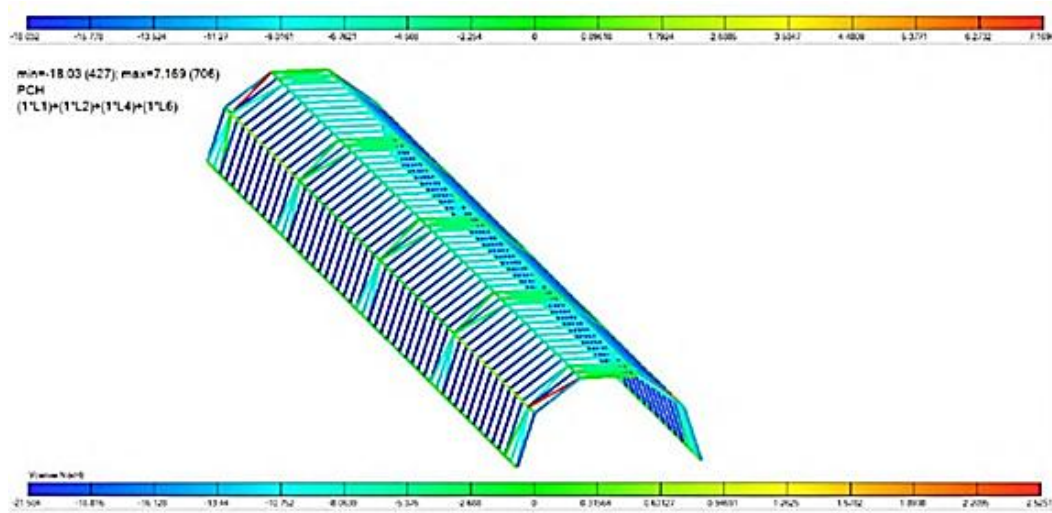


Рисунок 1.29 - Зусилля N від двох комбінацій

Розподіл поздовжніх зусиль N для двох комбінацій навантажень показує переважання стискаючих зусиль у несучих елементах арки. Найбільші значення виникають у припорних ділянках та вузлах зміни геометрії конструкції. У центральній частині арки поздовжні сили мають менші значення. Різких перепадів зусиль між сусідніми елементами не спостерігається. Отримані результати використані для перевірки міцності та підбору поперечних перерізів елементів.

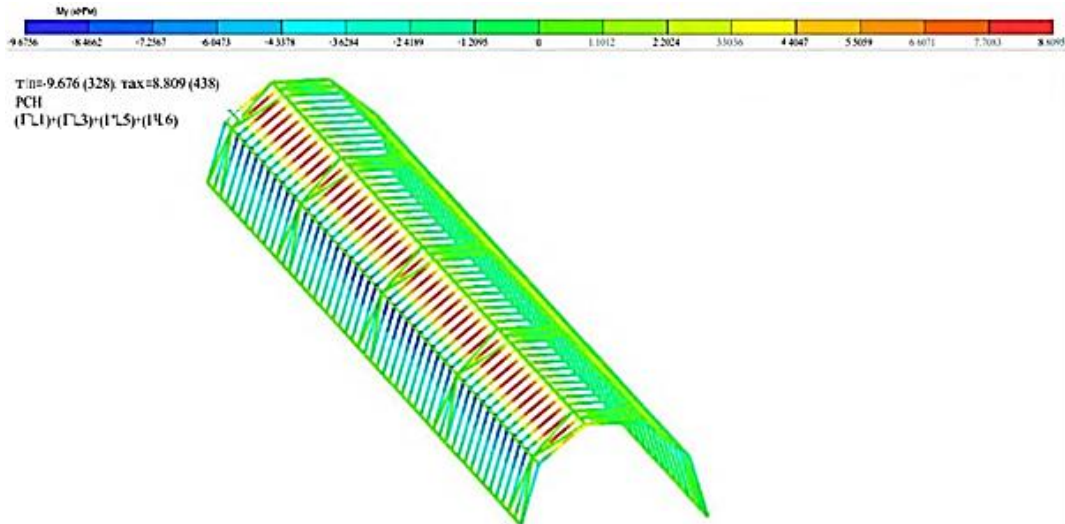


Рисунок 1.30 - Зусилля  $M_y$  від двох комбінацій

$$\left| \frac{-21,504}{0,004863} + \frac{-22,078}{0,00025} \right| = 92733,962 \text{ кПа} < 226900 \text{ кПа.}$$

Коефіцієнт використання перерізу становить 40,87%.

### 2.1.3 Арка з розбиттям на 4 секції

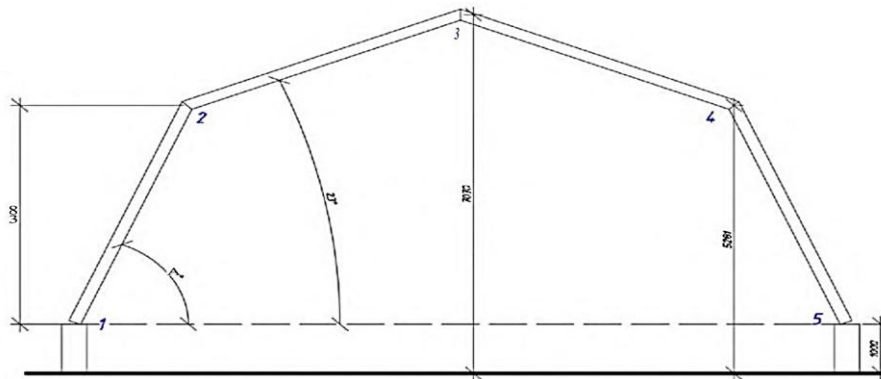


Рисунок 1.31 - Арка з розбиттям на 4 секції

Підбір навантажень:

а) Снігові навантаження:

Підбір снігових навантажень проводиться аналогічно п. 2.1.1.

Таблиця 1.7 - Коефіцієнти  $\mu_1$  і  $\mu_2$  для арки з поділом на 10 частин

Кут, град.	$\mu_1$	$\mu_2$
23	0,82413	1,86716
0	1	0

б) Вітрові навантаження:

Підбір вітрових навантажень проводиться аналогічно до п. 2.1.1.

Таблиця 1.8 - Аеродинамічні коефіцієнти

Коефіцієнт	Значення
$C_{e1}$	0,8
$C_{e2}$	· 1,2
$C_{e3}$	· 0,4

Таблиця 1.9 – Розрахунок зусиль вітрового впливу для типу місцевості А

№ ел. та на рис. 35	Висота від рівня землі, м	Висота $h_e$ , м	Кут $K()$	Нормативне навантаження вітрового тиску, $\text{кН/м}^2$
1,2	5,281	3,9967	0,75	0,228
2,3	7,07	5,249	0,763	-0,348
3,4	5,281	3,9967	0,75	-0,114

Створення розрахункової схеми:

Була створена розрахункова схема, аналогічна п. 2.1.1, змінено форму арок і зв'язків.

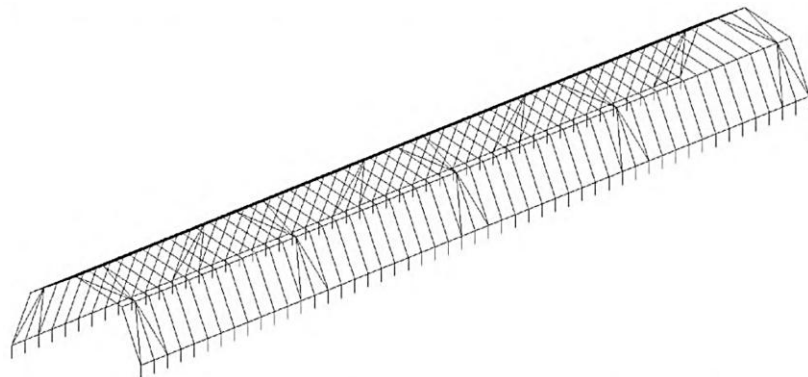


Рисунок 1.32 - Розрахункова схема тунелю з арками з 4 частин

Розрахункова схема тунелю з арками, розбитими на 4 секції, сформована зі зменшеною кількістю вузлів та елементів порівняно з попередніми варіантами. Конструкція має більш просту геометричну схему, що дозволило знизити матеріаломісткість та власну вагу системи. Крок арок прийнято 2 м при загальній довжині тунелю 100 м. Просторова робота конструкції забезпечується системою зв'язків між арками. Отримана схема використана для подальшого чисельного аналізу НДС конструкції.

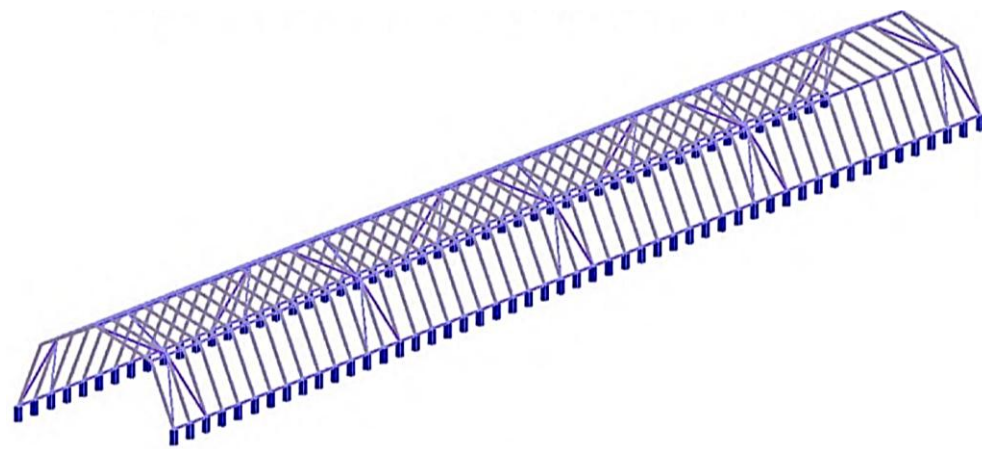


Рисунок 1.33 - 3D-візуалізація розрахункової схеми тунелю з арками з 4 частин

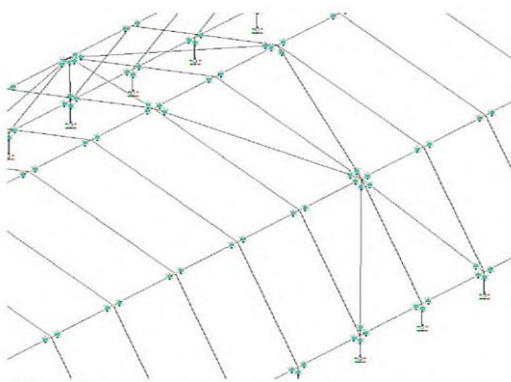


Рисунок 1.34 - Фрагмент тунелю з візуалізацією зв'язків

Фрагмент тунелю з візуалізацією зв'язків демонструє розташування елементів просторового закріплення між арками. Зв'язки забезпечують спільну роботу конструкції та підвищують її просторову жорсткість. Кріплення зв'язків до основних

несучих елементів виконано шарнірно. Основне навантаження передається через арочні елементи на опорні вузли конструкції. Просторова схема забезпечує стабільність системи при дії комбінованих навантажень.

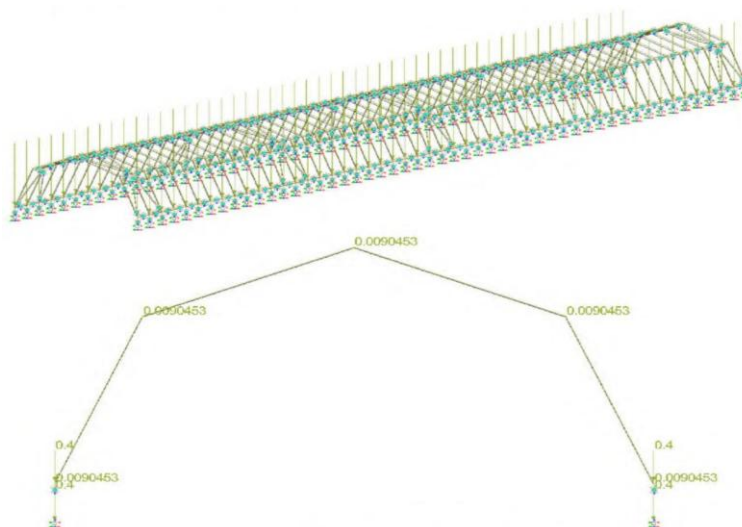


Рисунок 1.35 - Власна вага

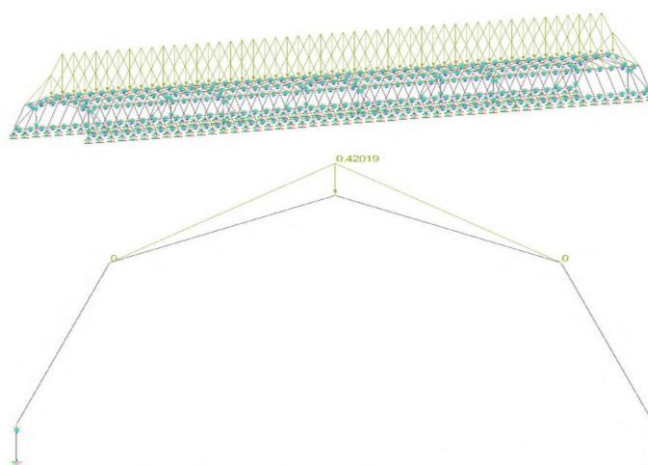


Рисунок 1.36 - 1 варіація снігового навантаження

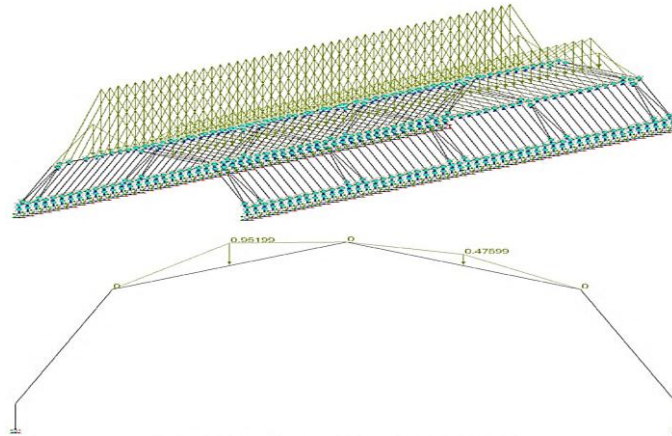


Рисунок 1.37 - 2 варіація снігового навантаження

Варіації снігового навантаження для арки з розбиттям на 4 секції враховують можливий симетричний та несиметричний розподіл снігового покриву по поверхні конструкції. Навантаження прикладені відповідно до геометрії арки та розрахункових коефіцієнтів снігового впливу. Розрахункові схеми дозволяють оцінити зміну напружено-деформованого стану конструкції при різних умовах накопичення снігу. Основний вплив навантаження проявляється у верхній частині прольоту та приопорних ділянках арки. Отримані схеми використані для подальшого аналізу внутрішніх зусиль і переміщень конструкції.

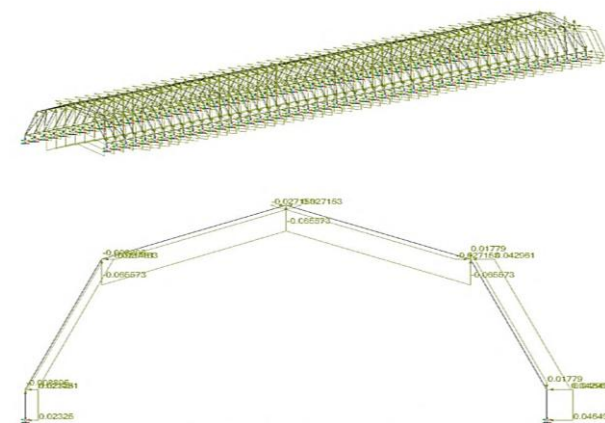


Рисунок 1.38 - Вітрове навантаження

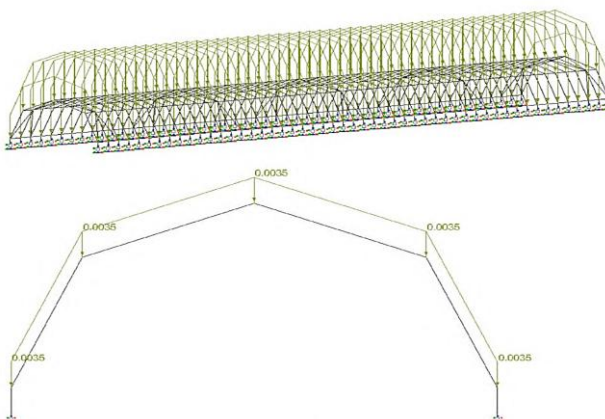


Рисунок 1.39 - Вага плівки

Схеми вітрового навантаження та навантаження від ваги плівкового покриття сформовані для просторової розрахункової моделі тунелю з арками, розбитими на 4 секції. Вітровий вплив визначений для III вітрового району при нормативному тиску 0,38 кПа з урахуванням аеродинамічних коефіцієнтів і типу місцевості А. Навантаження від ETFE-плівки прикладене рівномірно по поверхні арокних елементів та враховує щільність матеріалу 1750 кг/м<sup>3</sup>. Сукупна дія навантажень використана для визначення переміщень, внутрішніх зусиль та перевірки просторової жорсткості конструкції. Отримані схеми навантаження забезпечують наближення розрахункової моделі до реальних умов експлуатації тунелю.

В якості основних несучих конструкцій було підібрано перетин зі склопластику у вигляді коробки розміром 100 × 180 × 8 мм .

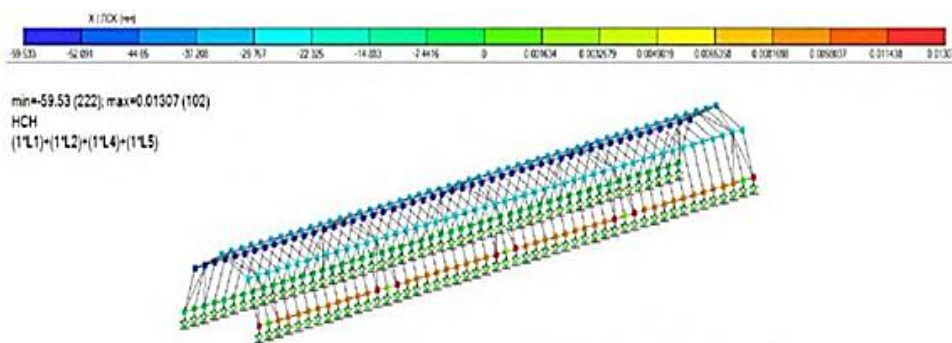


Рисунок 1.40 - Переміщення по X (макс. –59,5 мм)

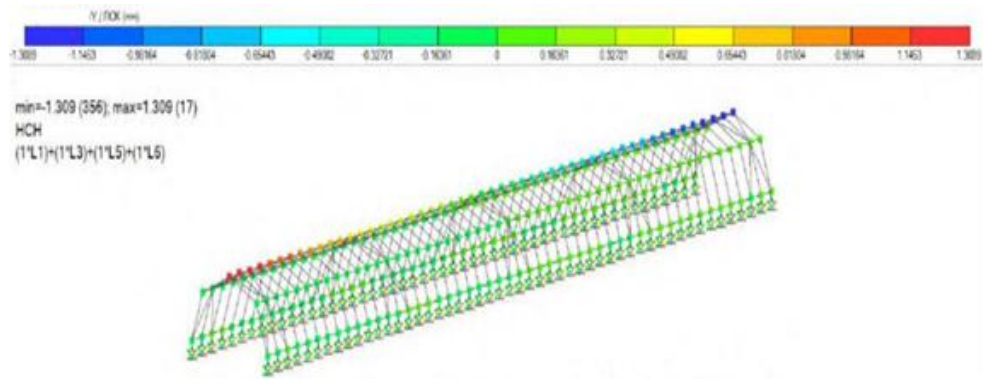


Рисунок 1.41 - Переміщення по Y (max 1,3 мм)

Результати переміщень конструкції по осі X та осі Y свідчать про просторову роботу арочної системи під дією розрахункових навантажень. Максимальне переміщення по осі Y становить 1,3 мм, що не перевищує допустимих значень для конструкції даного прольоту. Найбільші деформації спостерігаються у верхній зоні арки та центральній частині прольоту. Розподіл переміщень має плавний характер без локальних концентрацій деформацій у вузлах. Отримані результати підтверджують достатню жорсткість конструкції з арками, розбитими на 4 секції.

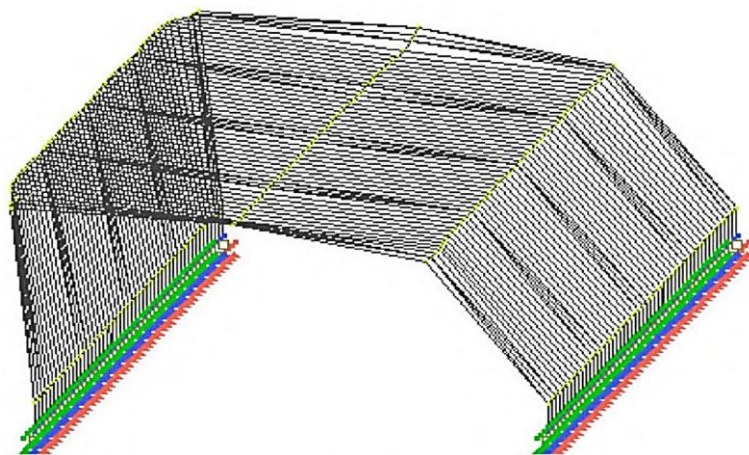


Рисунок 1.42 - Деформована розрахункова схема від поєднання навантажень 1

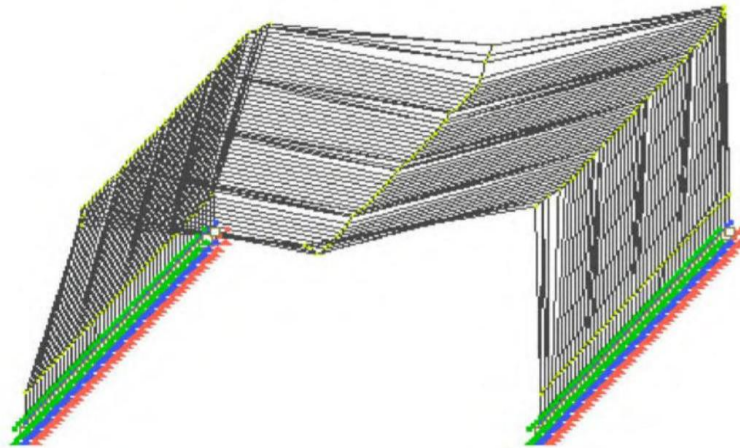


Рисунок 1.43 - Деформована розрахункова схема від поєднання навантажень 2

Деформовані розрахункові схеми від двох комбінацій навантажень демонструють характер просторової роботи арочної конструкції при різних схемах прикладання снігового та вітрового впливу. Максимальні переміщення виникають у центральній частині прольоту та верхній зоні арки, що відповідає роботі конструкції на згин і стиск. При зміні комбінації навантажень спостерігається перерозподіл деформацій між окремими елементами та вузлами системи. Конструкція зберігає геометричну стійкість і не втрачає загальної просторової жорсткості. Отримані результати підтверджують ефективність прийнятої схеми арки з розбиттям на 4 секції при дії розрахункових навантажень.

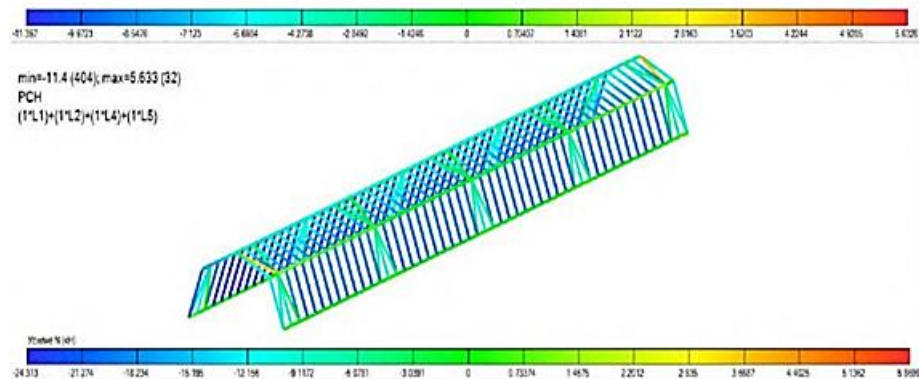


Рисунок 1.44 - Зусилля N від двох комбінацій (max – 24,31кН )

Проведемо перевірку перерізу на міцність за формулою:

$$\left| \frac{N}{A_{yc}} + \frac{-1}{y_{yc}} \right| \leq K_y, \quad (6)$$

де  $N$  - поздовжнє зусилля, кН;

$M_y$  - зусилля згинального моменту, кН\*м;

$A$  - площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup> ;

$I_y$  - момент опору перерізу, м<sup>3</sup> ;

$y_c$  - коефіцієнт роботи;

$K_y$  - розрахунковий опір матеріалу на вигин, МПа.

$$N = -24,313 \text{ кН};$$

$$M_y = 16,305 \text{ кН} * \text{м};$$

$$A = 0,004224 \text{ м}^2;$$

$$I_y = 0,000197 \text{ м}^3$$

$$y_c = 1;$$

$$K_y = 226,9 \text{ МПа} = 226900 \text{ кПа}.$$

$$\left| \frac{-24,313}{0,004224} + \frac{-16,305}{0,000197} \right| = 88522,42 \text{ кПа} < 226900 \text{ кПа}.$$

Коефіцієнт використання перерізу становить 39,01%.

#### 2.1.4 Стрілчаста арка

Проведемо розрахунок геометричних характеристик стрілчастої арки при прольоті 12 м ; стрілі підйому 6 м :

Довжина хорди піварки: 8,485 м.

Стріла підйому дуги піварки: 0,566 << 1 м.

Довжина дуги піварки 8,794 м.

Радіус кривизни осі піварки 9,5 м.

Кут піварки  $53,05^\circ$ .

Кут нахилу хорди піварки до горизонту  $\text{tg}\alpha = 45^\circ$ .

Кут нахилу радіуса, що проходить через опору арки:

$$P_0 = 90^\circ - \alpha - \frac{\varphi}{2} = 90^\circ - 45^\circ - \frac{53,05^\circ}{2} = 18,475^\circ$$

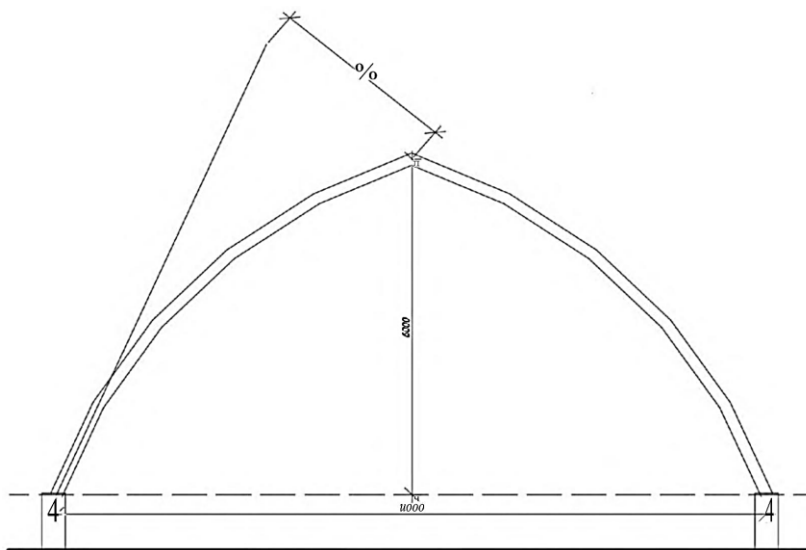


Рисунок 1.45 - Стрілчаста арка

Завод-виробник готовий виготовляти стрижні потрібної форми за умови великого замовлення. Для проведення експерименту виробник відмовився виготовляти невелику партію, тому, щоб надати стрижням необхідної форми, слід їх зігнути, що спричинить виникнення внутрішніх зусиль ще на стадії зведення конструкції.

На рис. 1.46 вказано відстань, на яку необхідно перемістити верхній вузол прямого стрижня для надання йому форми піварки. Припустимо, що ми використовуємо переріз  $180 \times 200 \times 8$  мм. У ПК Ліра-Софт створимо стрижень необхідної довжини ((8,8 м) і задамо переміщення крайнього вузла.

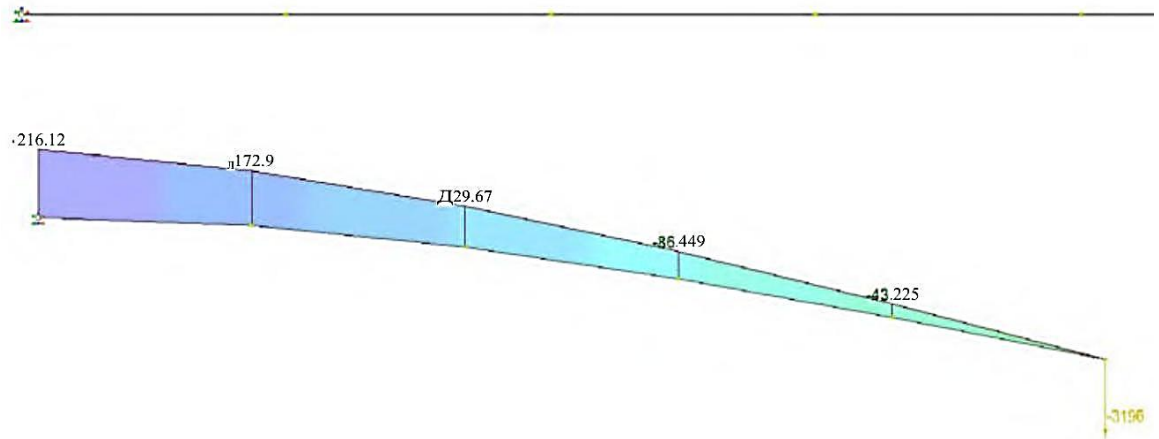


Рисунок 1.46 - Задане переміщення крайнього вузла стрижня

Коефіцієнт використання перерізу становить 272,97% .Вибір форми стрілкової арки можливий, якщо збільшити стрілу підйому, що, у свою чергу, підвищить витрати на матеріали, а більша частина тунелю не буде задіяна в роботі.

Дану форму арок далі розглядати не будемо.

## 2.2 Порівняння форм арок

Порівняння проводиться за трьома критеріями — економічність, легкість зведення та ефективність.

Як критерії економічності розглядатимемо та порівнюватимемо власну вагу всієї 100-метрової конструкції без урахування фундаментних стовпчиків. Як критерії легкості зведення — кількість вузлів та елементів в одній арці. Критерій ефективності — відношення максимального прогину конструкції до площі перерізу.

Таблиця 1.10 - Критерії економічності арок

Найменування	Власна вага, т.	К-сть вузлів	К-сть елементів	Макс. прогин, мм	Площа поперечного А, мм
3 10 частин	22,487	11	10	46,335	5824
3 5 частин	16,394	6	5	40,94	4864
3 4 частин	13,849	5	4	42 868	4224

За всіма критеріями найкраще себе показала форма арки з 4 частин, подальша робота буде проводитися на основі даної форми (див. п. 2.1.3).

### 2.3 Висновки до розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи магістра виконано розробку розрахункових схем арочної конструкції зі склопластику з використанням програмного комплексу ЛІРА-САПР та проведено порівняльний аналіз різних геометричних варіантів арок. Основною метою дослідження було визначення найбільш ефективної форми конструкції з точки зору економічності, жорсткості, простоти монтажу та роботи при дії розрахункових навантажень.

У процесі дослідження сформовано розрахункові моделі арок із розбиттям на 10, 5 та 4 секції, а також стрілкової арки. Для кожної конструктивної схеми визначено снігові, вітрові та постійні навантаження відповідно до прийнятих кліматичних умов. Розрахунок виконано для V снігового та III вітрового районів при нормативному значенні снігового навантаження 0,6 кПа та вітрового тиску 0,38 кПа.

У результаті чисельного аналізу встановлено, що арка з розбиттям на 10 секцій характеризується найбільшою матеріаломісткістю та власною вагою конструкції. Власна вага 100-метрової системи для даного варіанту становить 22,487 т при

максимальному прогині 46,335 мм та площі поперечного перерізу 5824 мм<sup>2</sup>. Максимальні горизонтальні переміщення по осі X досягали -57,456 мм. Отримані результати свідчать про достатню жорсткість конструкції, однак значна кількість вузлів та елементів ускладнює монтаж і підвищує матеріальні витрати.

Для арки з розбиттям на 5 секцій встановлено зменшення власної ваги конструкції до 16,4 т та зниження кількості вузлів і елементів системи. Максимальний прогин конструкції становив 40,94 мм при площі поперечного перерізу 4864 мм<sup>2</sup>. Проведений аналіз показав, що дана схема характеризується більш рівномірним розподілом внутрішніх зусиль та зменшенням матеріаломісткості порівняно з аркою із 10 секцій.

Найкращі результати отримано для арки з розбиттям на 4 секції. Встановлено, що дана конструктивна схема має найменшу власну вагу — 13,849 т, мінімальну кількість вузлів і елементів, а також достатню просторову жорсткість при максимальному прогині 42,868 мм та площі поперечного перерізу 4224 мм<sup>2</sup>. Максимальне переміщення по осі Y становило 1,3 мм, що не перевищує допустимих значень для конструкції даного прольоту. Отримані результати підтвердили ефективність даної схеми з точки зору економічності, жорсткості та простоти зведення.

## РОЗДІЛ 3

### ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НДС КОНСТРУКЦІЇ ЗІ СКЛОПЛАСТИКУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПК ЛІРА

#### 3.1 Моделювання в ПК ЛІРА

У розрахунковому комплексі ПК Ліра була створена розрахункова схема, яка точно повторює модель, що використовується в натурному експерименті. Несучі стрижні, склопластикові та дерев'яні зв'язки, а також брус для укладання цегли були задані на схемі. За допомогою «об'єднання переміщень» брус для цегли був пов'язаний з несучими стрижнями. У вузлах арок, де розташовані дерев'яні вставки, були задані пружні шарніри. Для відображення більш точних результатів кількість вузлів у стрижнях була збільшена шляхом розбиття на 5 частин кожного з них.

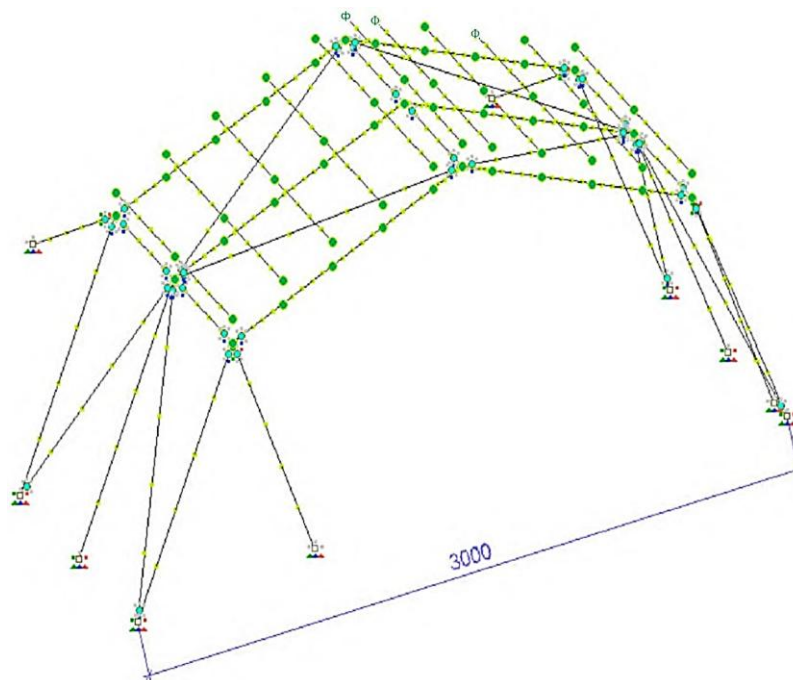


Рисунок 3.1 - Розрахункова схема

Розрахункова схема, створена у ПК Ліра, відтворює геометричні та конструктивні параметри натурної моделі тунельної конструкції зі склопластику. У моделі враховано несучі стрижні, склопластикові та дерев'яні зв'язки, а також брус

для укладання навантаження. Для забезпечення сумісної роботи елементів використано об'єднання переміщень між брусом і несучими стрижнями. У вузлах арок, де розташовані дерев'яні вставки, задано пружні шарніри, що дозволяють врахувати податливість з'єднань. Кожен стрижневий елемент додатково розбитий на 5 частин для підвищення точності визначення внутрішніх зусиль і переміщень. Побудована схема забезпечує можливість детального аналізу напружено-деформованого стану конструкції при різних стадіях навантаження.

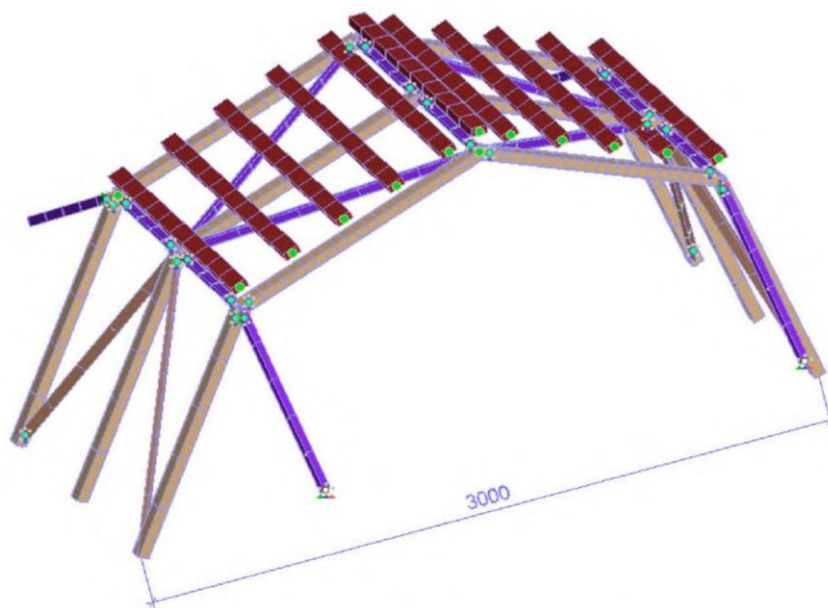


Рисунок 3.2 - Розрахункова схема в об'ємі

Просторова розрахункова схема в об'ємі відображає взаємне розташування арок, зв'язків та допоміжних елементів конструкції. Тривимірна модель дозволяє врахувати просторову роботу системи при дії вертикальних і горизонтальних навантажень. У схемі відображено розташування вузлів, характер закріплення елементів та конфігурацію зв'язкової системи. Несучі стрижні працюють спільно із поперечними та поздовжніми зв'язками, що забезпечує загальну жорсткість конструкції. Побудована модель використана для визначення переміщень, поздовжніх зусиль та згинальних моментів у елементах тунельної системи.

Були задані наступні навантаження та їх поєднання, представлені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 - Навантаження та їх комбінації

Найменування	К-т приведення	Поєднання					
		Без нав.	1 стадія	2 стадія	3 стадія	4 стадія	Кососим. нав
Власна вага склопластику	1,05	+	+	+	+	+	+
Вага плівки	1,1	+	+	+	+	+	+
Вага вставок у несучі стрижні	1,1	+	+	+	+	+	+
Вага вставок у зв'язку	1,1	+	+	+	+	+	+
Вага кріплення плівки	1,1	+	+	+	+	+	+
Вага бруса для укладання цегли	I	+	+	+	+	+	+
1 стадія завантаження	1,2	-	+	+	+	+	-
2 стадія завантаження	1,2	-	-	+	+	+	-
3 стадія завантаження	1,2	-	-	-	+	+	-
4 стадія завантаження	1,2	-	-	-	-	+	-
Косиметричне навантаження	1,2	-	-	-	-	-	+

Кожна стадія завантаження в сумі має вагу 300 кг.

### 3.2 Результати розрахунку

Комбінація без завантаження цеглою

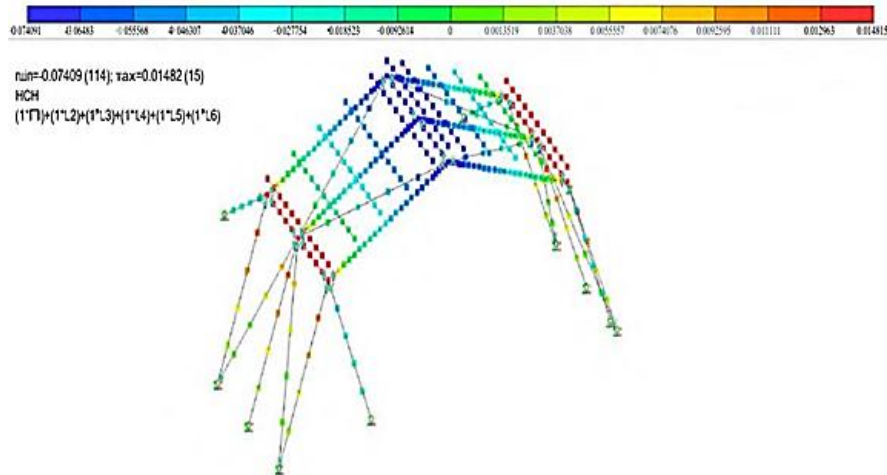


Рисунок 3.3 - Прогини по осі 2

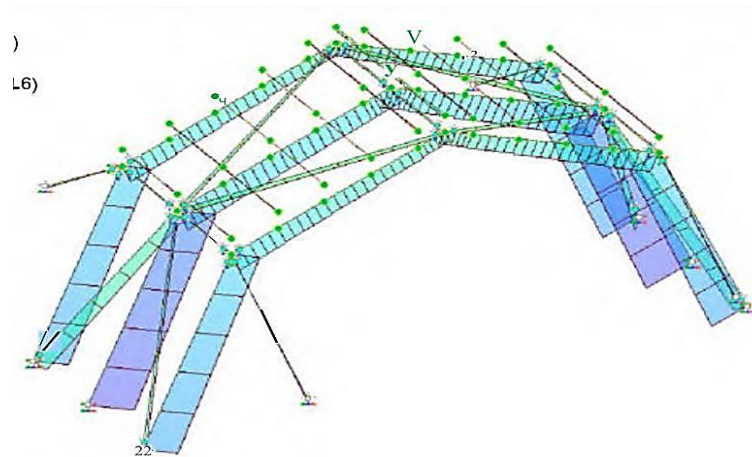
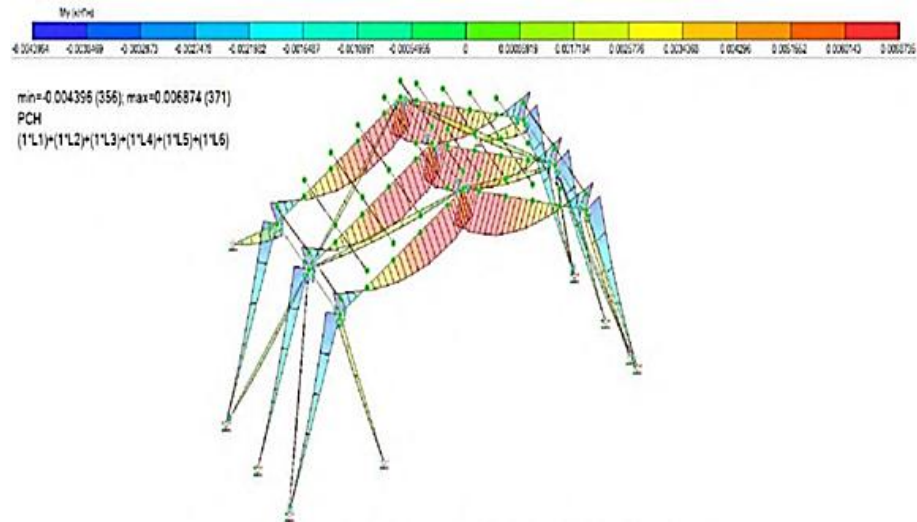


Рисунок 3.4 - Зусилля N (тах · 0,075 кН)

Результати розрахунку для комбінації без додаткового завантаження цеглою показують початковий напружено-деформований стан конструкції під дією власної ваги елементів та плівкового покриття. Прогини по осі Z мають незначні значення та рівномірно розподіляються по довжині арочної системи. Поздовжні зусилля N досягають максимального значення 0,075 кН, що свідчить про роботу конструкції переважно у пружній стадії. Найбільші стискаючі зусилля виникають у приопорних ділянках арки та вузлах з'єднання елементів. Отримані результати використовуються як базовий стан для подальшого порівняння роботи конструкції при поетапному збільшенні навантаження.

Рисунок 3.5 - Зусилля  $M_y$ 

## Комбінація 1 стадії навантаження

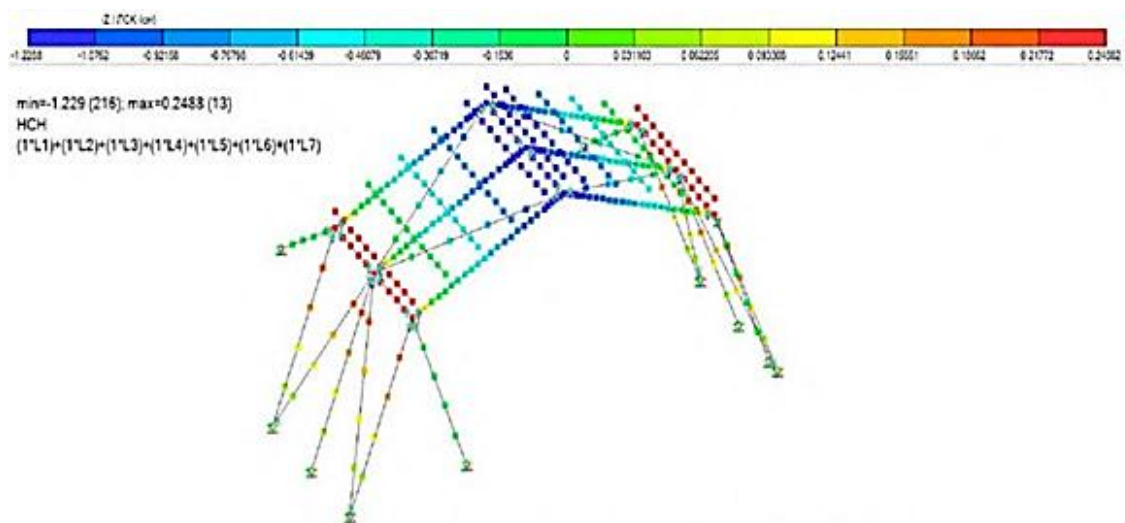


Рисунок 3.6 - Прогини по осі Z (max -1,2 см)

Розподіл згинальних моментів  $M_y$  для комбінації без додаткового завантаження характеризує початкову роботу арочної системи під дією власної ваги та постійних навантажень. Значення моментів є мінімальними порівняно з подальшими стадіями навантаження, оскільки відсутнє додаткове навантаження від цегли. Основні зони

виникнення згинальних моментів зосереджені у вузлах арки та ділянках зміни геометрії стрижнів.

Прогини по осі Z для 1 стадії навантаження досягають максимального значення -1,229 см. Деформації збільшуються порівняно з комбінацією без завантаження, що пов'язано з прикладанням першої стадії навантаження масою 300 кг. Найбільші вертикальні переміщення формуються у центральній частині прольоту арочної конструкції.

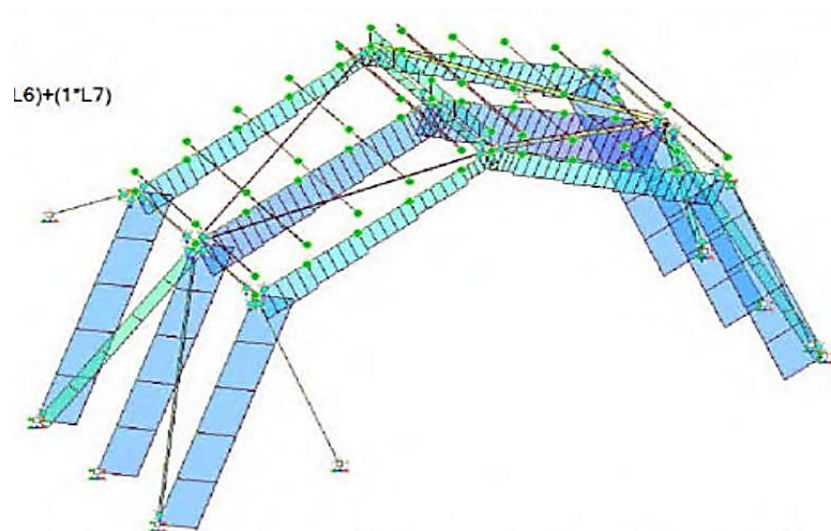


Рисунок 3.7 - Зусилля N

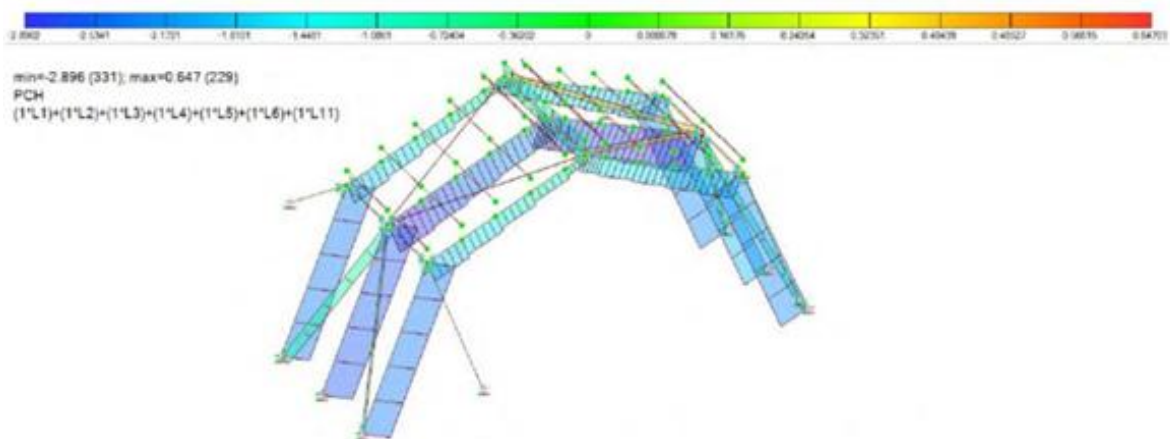


Рисунок 3.8 — Зусилля  $M_y$  (max 0,126кН \* М)

## Поєднання 2 стадії завантаження

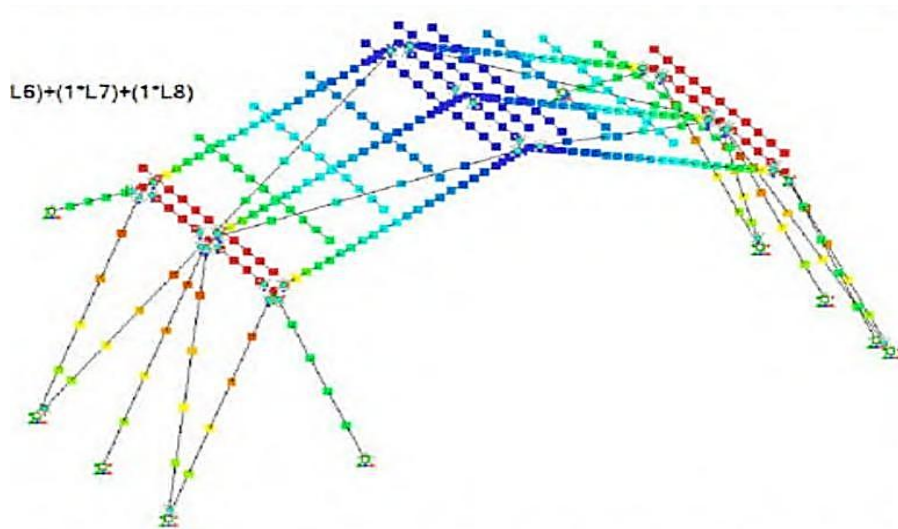


Рисунок 3.9- Прогини по осі Z (max -2,4 см)

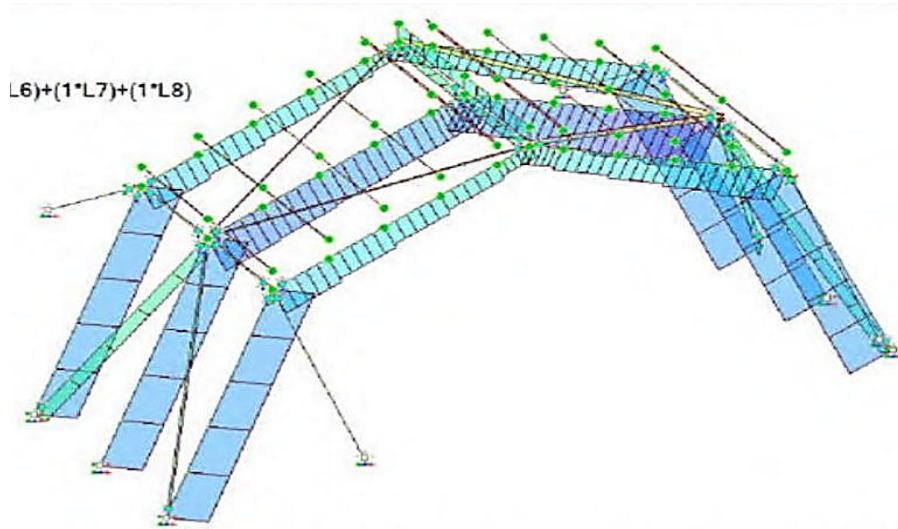


Рисунок 3.10 - Зусилля N(max – 1,6кН)

Прогини по осі  $Z$  для комбінації 2 стадії навантаження досягають максимального значення -2,4 см. Збільшення переміщень відбувається пропорційно підвищенню прикладеного навантаження та свідчить про збереження пружної роботи конструкції. Найбільші деформації формуються у центральній частині арки, де виникає максимальний вигин елементів.

Розподіл поздовжніх зусиль  $N$  для 2 стадії навантаження характеризується збільшенням стискаючих зусиль у припорних та вузлових ділянках конструкції. Перерозподіл внутрішніх зусиль між елементами має плавний характер без локальних перевантажень. Отримані результати підтверджують стійкість арочної системи при поетапному збільшенні зовнішнього навантаження.

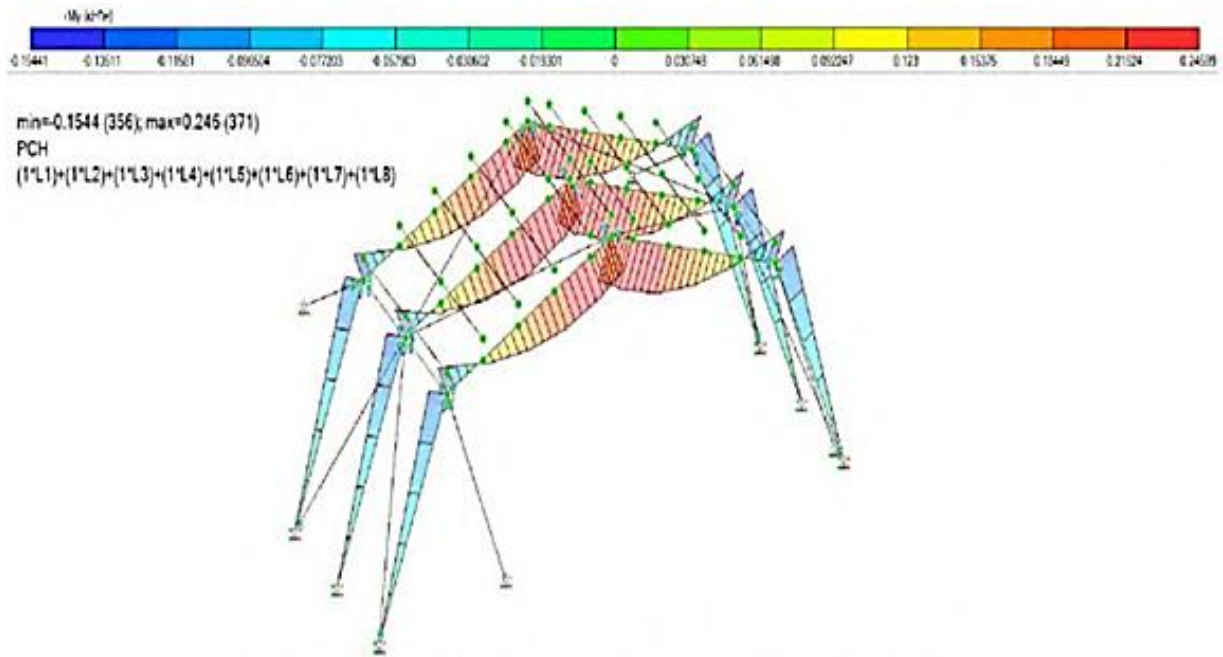


Рисунок 3.11 - Зусилля  $M_y$  (max 0,246 кН \* М)

Розподіл згинальних моментів  $M_y$  для 2 стадії навантаження демонструє збільшення внутрішніх зусиль у вузлових зонах та припорних ділянках арки. Максимальні значення моментів формуються у місцях зміни геометрії конструкції та передачі навантаження між елементами. Характер епюри свідчить про спільну роботу ародних елементів і зв'язкової системи при дії вертикального навантаження. Зростання згинальних моментів відбувається пропорційно збільшенню прикладеної маси навантаження.

## Комбінація 3 стадії завантаження

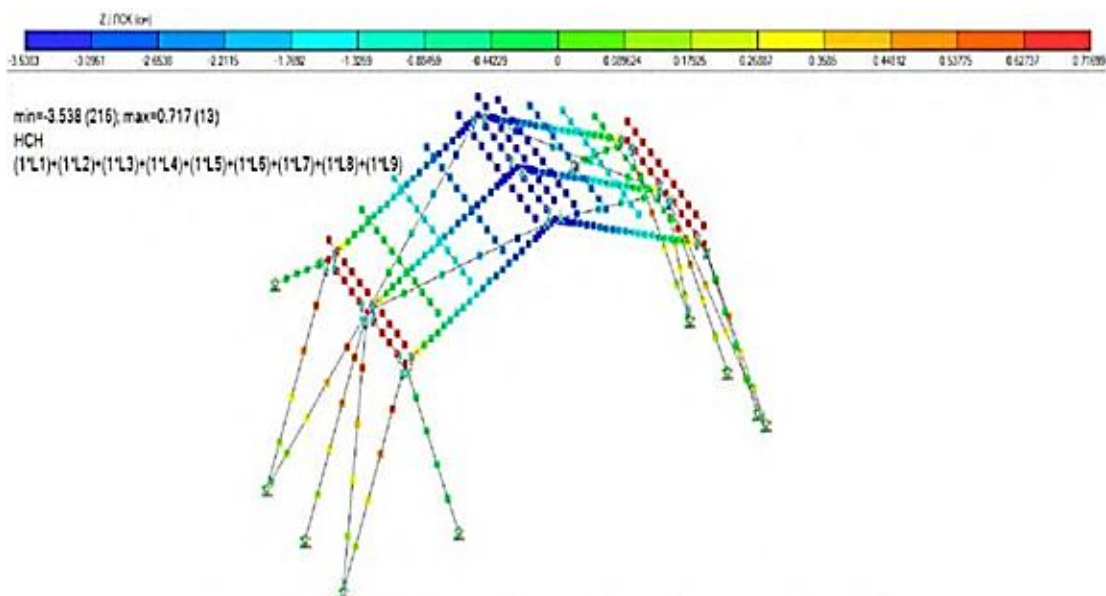


Рисунок 3.12 - Прогини по осі Z (max -3,538 см)

Комбінація «3 стадія» min = -2.322(331); max = 0.4383(230)

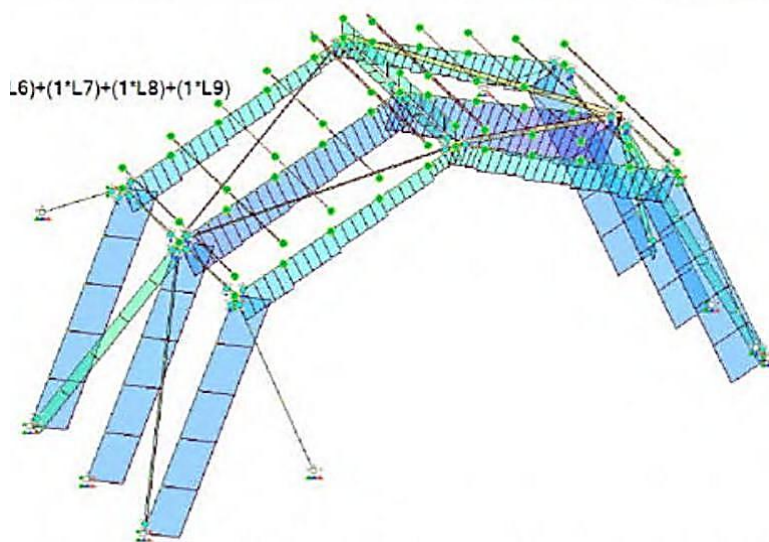


Рисунок 3.13 - Зусилля N (макс. -2,322 кН)

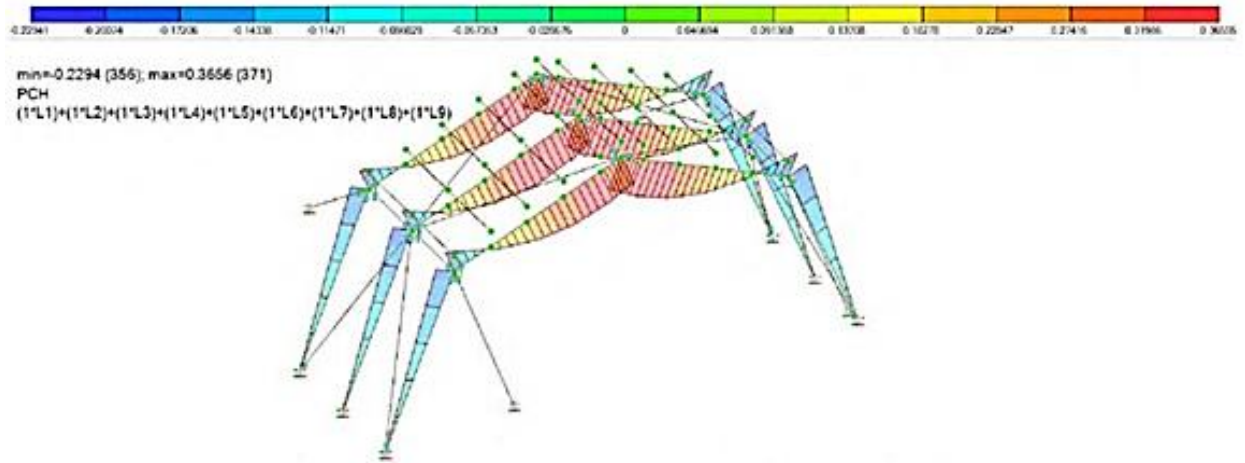


Рисунок 3.14 - Зусилля  $M_y$  (max 0,366 кН \* М)

#### Комбінація 4 стадії навантаження

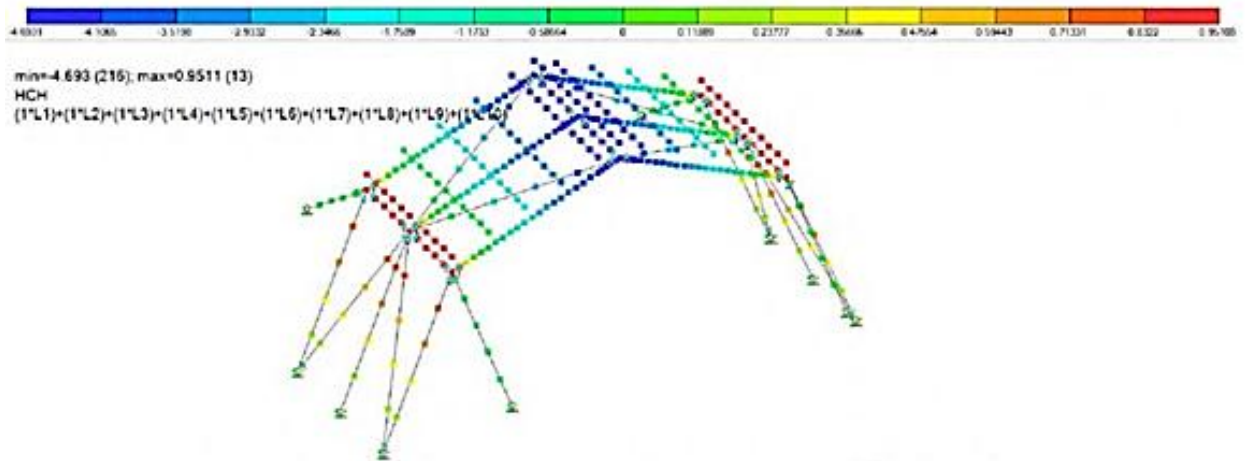


Рисунок 3.15 - Прогини по осі Z (макс. -4,693 см)

Розподіл згинальних моментів  $M_u$  для 3 стадії навантаження характеризується подальшим збільшенням внутрішніх зусиль у вузлових та приопорних ділянках конструкції. Найбільші значення моментів виникають у місцях прикладання навантаження та зміни геометрії арочних елементів. Епюра моментів зберігає плавний характер без різких локальних концентрацій напружень. Отримані результати свідчать про збереження спільної роботи всіх елементів системи при збільшенні навантаження.

Прогини по осі Z для 4 стадії навантаження досягають максимального значення -4,7 см. Зростання деформацій відбувається пропорційно збільшенню навантаження та відповідає пружному характеру роботи конструкції. Максимальні переміщення зосереджені у центральній частині прольоту арки. Просторова жорсткість системи зберігається, а деформації мають рівномірний характер по довжині конструкції.

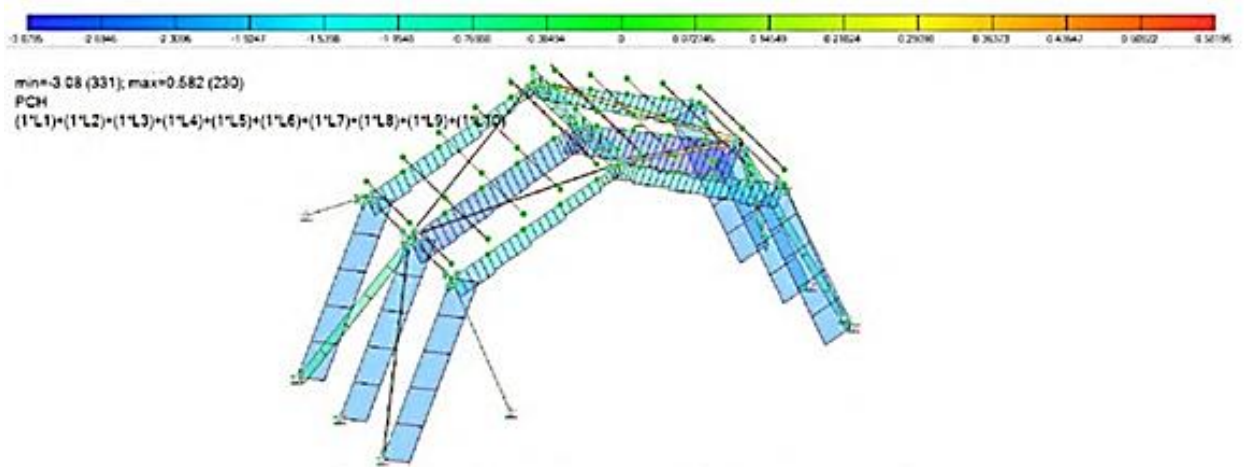


Рисунок 3.16 - Зусилля N (макс. -3,08 кН)

Поздовжні зусилля N для 4 стадії навантаження досягають максимальних значень серед усіх розглянутих етапів завантаження конструкції. Найбільші стискаючі зусилля виникають у приопорних ділянках та вузлах з'єднання арочних елементів. Збільшення значень N відбувається пропорційно зростанню прикладеного навантаження від стадійного укладання цегли. Розподіл зусиль має плавний характер, що свідчить про рівномірну роботу конструктивної системи без локальних перевантажень.

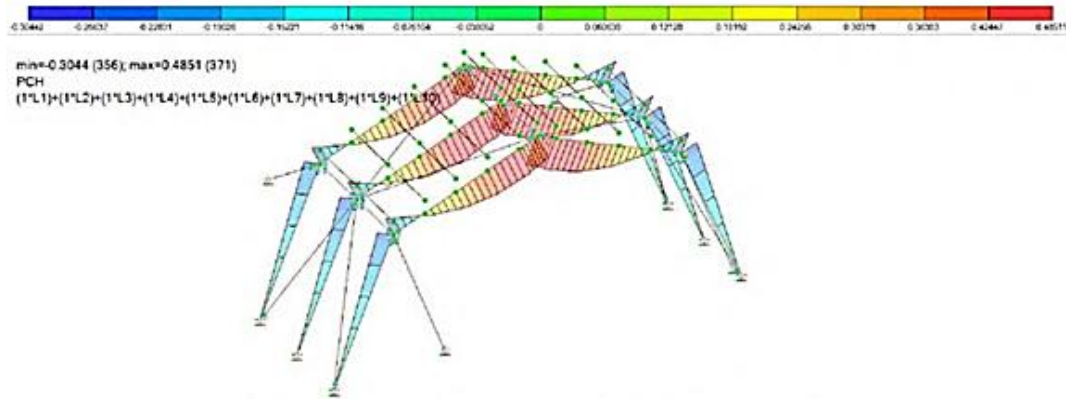


Рисунок 3.17 - Зусилля  $M_y$  (max 0,485кН \* м)

### Комбінація кососиметричного навантаження

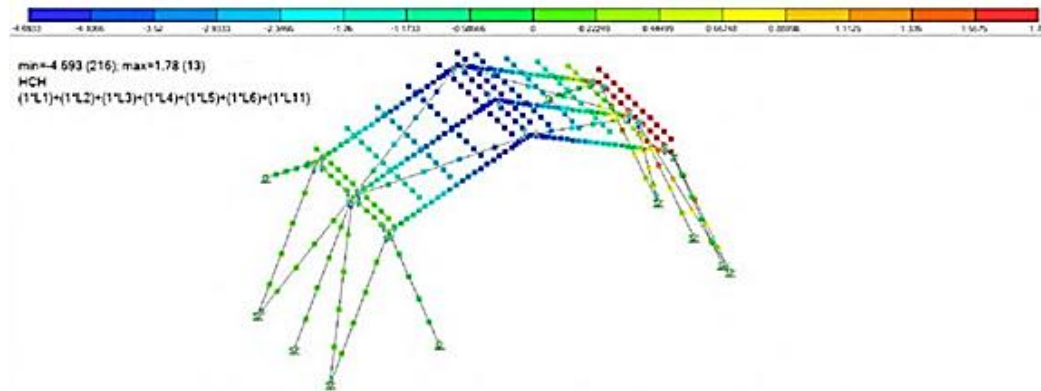


Рисунок 3.18 - Прогини по осі Z (макс. -4,693 см)

Розподіл згинальних моментів  $M_y$  для 4 стадії навантаження характеризується максимальними значеннями внутрішніх зусиль у порівнянні з попередніми етапами завантаження. Найбільші моменти виникають у вузлових зонах та приопорних ділянках арки, де спостерігається концентрація напружень. Зростання згинальних моментів є пропорційним збільшенню прикладеного навантаження від поетапного укладання цегли. Епюра моментів має плавний характер без локальних стрибків значень, що свідчить про рівномірну роботу конструктивної системи. Отримані результати підтверджують достатню жорсткість і несучу здатність елементів арочної конструкції при максимальному навантаженні.

Прогини по осі Z при кососиметричному навантаженні досягають максимального значення  $-4,7$  см. Несиметричне прикладання навантаження спричиняє нерівномірний розподіл деформацій між правою та лівою частинами конструкції. Найбільші переміщення виникають у зоні прикладання навантаження та центральній частині арки. При цьому конструкція зберігає загальну просторову стійкість і не втрачає жорсткості. Отримані результати дозволяють оцінити роботу системи при найбільш несприятливому варіанті навантаження.

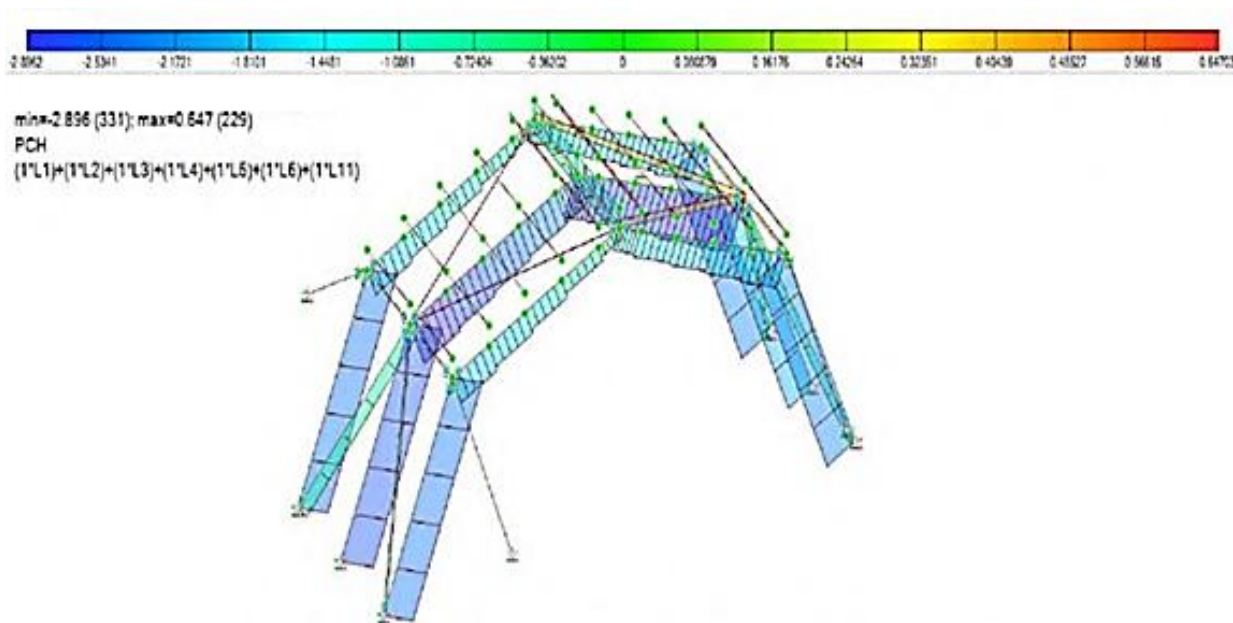


Рисунок 3.18 - Зусилля N (макс.  $-2,896$ кН )

Поздовжні зусилля N при кососиметричному навантаженні характеризуються нерівномірним розподілом стискаючих сил між елементами арочної системи. Найбільші значення зусиль виникають у зоні прикладання навантаження та приопорних вузлах конструкції. Несиметричний характер навантаження спричиняє перерозподіл внутрішніх сил між правою та лівою частинами арки. Незважаючи на це, різких локальних концентрацій напружень у елементах не спостерігається.

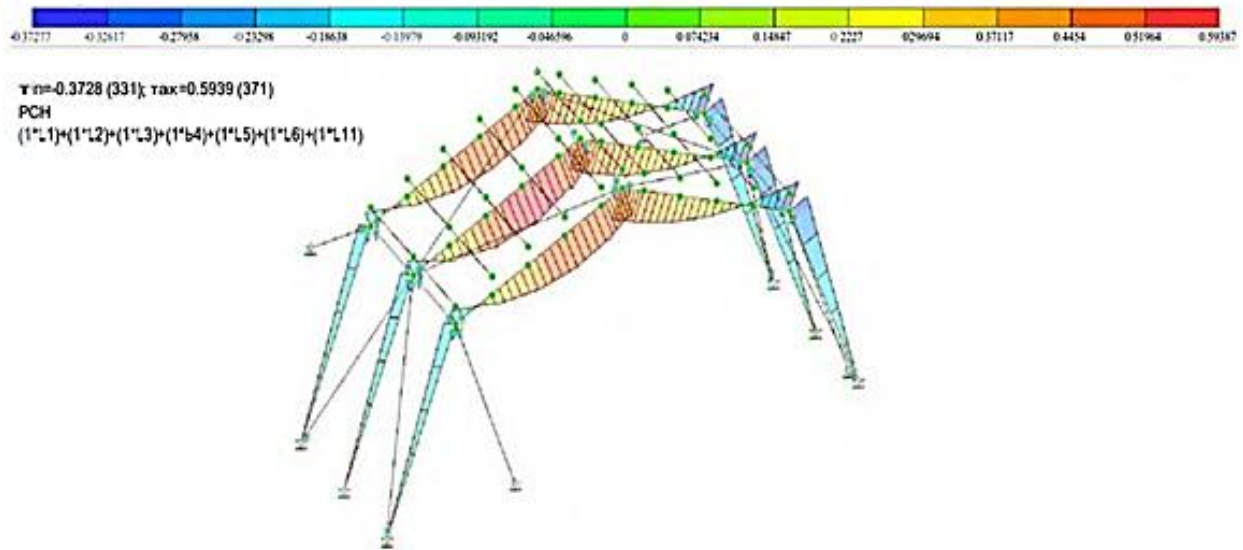


Рисунок 3.19 - Зусилля  $M_u$  (тах 0,594 кН\*м)

Розподіл згинальних моментів  $M_u$  при кососиметричному навантаженні характеризується нерівномірною епюрою внутрішніх зусиль відносно осі конструкції. Максимальне значення згинального моменту становить 0,594 кН·м та виникає у вузлових і приопорних ділянках арки. Несиметричне прикладання навантаження спричиняє перерозподіл моментів між окремими елементами конструкції. Основні концентрації згинальних зусиль формуються у місцях зміни геометрії та передачі навантаження між стрижнями.

### 3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи магістра виконано чисельне дослідження напружено-деформованого стану великопролітної арочної конструкції зі склопластику при дії експлуатаційних навантажень із застосуванням методу скінченних елементів. Проведений аналіз був спрямований на оцінювання просторової роботи конструкції, визначення характеру розподілу внутрішніх зусиль,

переміщень та напружень, а також встановлення впливу геометричних параметрів системи на її жорсткісні характеристики.

У результаті скінченно-елементного моделювання встановлено, що досліджувана арочна система характеризується достатньою просторовою жорсткістю та забезпечує сприйняття розрахункових снігових і вітрових навантажень без перевищення допустимих значень переміщень та напружень. Визначено, що найбільші деформації локалізуються у центральній частині прольоту арки, що відповідає загальним закономірностям роботи великопролітних криволінійних систем при дії симетричного вертикального навантаження.

Проведений аналіз показав, що для обраної конструктивної схеми арки з розбиттям на 4 секції максимальний прогин становив 42,9 мм при прольоті 100 м, що свідчить про достатню жорсткість системи та відповідність отриманих результатів вимогам експлуатаційної придатності. Встановлено, що найбільші значення еквівалентних напружень виникають у приопорних ділянках арки та вузлових зонах, де спостерігається концентрація внутрішніх зусиль, обумовлена зміною напрямків силових потоків і геометричними особливостями з'єднання елементів.

У ході дослідження встановлено, що геометрична схема конструкції суттєво впливає на характер її напружено-деформованого стану. Порівняльний аналіз досліджуваних варіантів підтвердив, що арка з розбиттям на 4 секції забезпечує найбільш раціональне співвідношення між власною вагою, жорсткістю та рівнем внутрішніх зусиль.

У результаті чисельного моделювання встановлено, що застосування склопластику як основного конструктивного матеріалу дозволяє суттєво зменшити власну вагу великопролітної системи при забезпеченні необхідної несучої здатності та корозійної стійкості конструкції.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Охорона праці

Охорона праці – це зведення законодавчих актів і правил, відповідних їм гігієнічних, організаційних, технічних та соціально-економічних заходів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я та працездатність людини в процесі праці. Організація будівельного майданчика, ділянки робіт та робочих місць повинна забезпечувати безпеку праці працюючих на всіх етапах виконання робіт.

Вирішення питань про охорону праці та здоров'я трудящих на будівельному майданчику є найважливішим завданням. При вирішенні завдань необхідно чітко представляти сутність процесів і відшукати способи (найбільш підходящі до кожного конкретного випадку), що усувають вплив на організм шкідливих і небезпечних факторів і унеможливають травматизм і професійні захворювання.

##### 4.1.1 Інженерні рішення з охорони праці

Проектом передбачені інженерні рішення з техніки безпеки будівельно-монтажних та супутніх допоміжних робіт.

При виробництві будівельно-монтажних робіт необхідно дотримуватись вимог [28].

Чинна система охорони праці (трудове законодавство, виробнича санітарія та техніка безпеки) забезпечує належні умови праці робітникам-будівельникам, підвищення культури виробництва, безпеку робіт та їх полегшення, що сприяє підвищенню продуктивності праці.

Створення безпечних умов праці у будівництві тісно пов'язане з технологією та організацією виробництва. Відповідальність за безпеку робіт покладено у

законодавчому порядку на технічних керівників будівель – головних інженерів та інженерів з охорони праці, виробників робіт та будівельних майстрів. Керівники будівництва зобов'язані організувати планування заходів з охорони праці та протипожежної техніки та забезпечити проведення цих заходів у встановлені терміни. Поліпшення організації виробництва, створення на будівельному майданчику умов праці, що усувають виробничий травматизм, професійні захворювання та забезпечують нормальні санітарно-побутові умови – одне з найважливіших завдань, від успішного вирішення якого залежить подальше підвищення продуктивності праці на забудовах.

До обов'язків адміністрації будівельних організацій з охорони праці входять:

- дотримання правил охорони праці, здійснення заходів з техніки безпеки та виробничої санітарії;
- розробка перспективних планів та угод колективних договорів щодо покращення та оздоровлення умов праці;
- забезпечення працюючих спецодягом, спецвзуттям, засобами індивідуального захисту;
- проведення інструктажів та навчання робочих правил техніки безпеки;
- організація пропаганди безпечних методів праці, забезпечення будівельних об'єктів плакатами, запобіжними написами тощо;
- організація навчання та щорічної перевірки знань, правил та норм охорони праці інженерно-технічного персоналу;
- проведення медичних оглядів осіб, зайнятих на роботах із підвищеною небезпекою та шкідливими умовами;
- розслідування всіх нещасних випадків та профзахворювань, що сталися на виробництві, а також їх облік та аналіз;
- ведення документації та перевірка встановленої звітності з охорони праці;
- видання наказів та розпоряджень з питань охорони праці.

Загальне керівництво робіт з техніки безпеки та виробничої санітарії, а також відповідальність за її стан покладається на керівників (начальників та головних інженерів) будівельних організацій.

#### **4.1.2 Огородження території**

Територія будівельного майданчика має бути виділена на території огорожами:

- захисно-охоронними, призначеними для запобігання доступу сторонніх осіб на ділянки з небезпечними та шкідливими виробничими факторами та забезпечення збереження матеріальних цінностей;
- захисними, призначеними лише запобігання доступу сторонніх осіб у ділянки з небезпечними виробничими чинниками;
- сигнальними, призначеними для попередження про межі територій та ділянок з небезпечними та шкідливими виробничими факторами.

Панелі огорож повинні бути прямокутними зі стандартною довжиною  $L=1,2; 1,6; 2,0$  м. Відстань між суміжними елементами огороження заповнення полотна панелей має бути 80...100 мм. Відстань між стійками сигнальних огорож не більше 6 м.

#### **4.1.3 Визначення небезпечних зон на будівельному майданчику**

При організації будівельного майданчика, розміщення ділянок робіт, робочих місць, проїздів будівельних машин, транспортних засобів, проходів для людей слід встановити небезпечні для людей зони, у яких постійно діють або потенційно можуть діяти небезпечні виробничі фактори.

Згідно [28] до зон небезпечних виробничих факторів відносяться зони:

- у смузі шириною до 2-х метрів по периметру від не захищених перепадів за висотою на 1,3 м і більше;

- у місцях переміщення машин та обладнання або їх робочих органів та відкритих частин, що рухаються або обертаються;
- у місцях, над якими відбувається переміщення вантажів вантажопідіймальними кранами;
- поблизу від відкритих неізольованих струмопровідних частин електроустановок та ЛЕП;
- у місцях, де рівні шуму, вібрації чи забруднення повітря робочої зони перевищують гігієнічні норми:  
До зон потенційно діючих небезпечних виробничих факторів відносяться:
  - монтажні зони - ділянки території поблизу будівлі або споруди, що будується;
  - поверхи (яруси) будівель та споруд в одній захватці, над якими відбувається монтаж (демонтаж) конструкцій або обладнання.

## 4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

### 4.2.1 Законодавча база України

Основа нормативно-правової бази в сфері цивільної оборони, захисту населення і території від наслідків надзвичайних ситуацій складають: Кодекс цивільного захисту України, закони «Про війська цивільної оборони», «Про аварійно-рятувальні служби»; укази Президента України «Про Концепції захисту населення і територій у випадку загрози і виникнення НС» і Положення «Про міністерство України з питань НС і в справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи», постанови Кабінету Міністрів України про затвердження «Положення про цивільну оборону України», «Про єдину державну систему попередження і реагування на НС техногенного і природного характерів», «Положення про керування з питань НС і цивільного захисту населення обласних і міських державних адміністрацій» та інші нормативні акти.

### 4.2.2 Стійкість будівлі від ударної хвилі

Нові об'єкти народного господарства повинні будуватися з урахування вимог, виконання яких сприяє підвищенню сталості об'єкта. Основні з них такі:

1. Будівлі і споруди на об'єкті необхідно розташовувати розосереджено. Відстані між будівлями повинні забезпечувати протипожежні розриви. При наявності таких розривів виключається можливість перенесення вогню з однієї будівлі на іншу, навіть якщо пожежу не гасять.

Ширина протипожежного розриву  $L_p$  м визначається за формулою:

$$L_p = H_1 + H_2 + (15 \dots 20), \quad (4.1)$$

де  $H_1$  і  $H_2$  — висоти сусідніх будівель, м.

Будівлі адміністративно господарського та обслуговуючого призначення повинні розташовуватися окремо від основних цехів.

Найважливіші виробничі будівлі слід будувати заглибленими або пониженої висотності, прямокутної форми у плані. Це зменшує парусність будівель і збільшує опірність їх ударній хвилі ядерного вибуху. Належну стійкість до впливу ударної хвилі мають залізобетонні будівлі з металевими каркасами в бетонній опалубці .

Для підвищення стійкості до світлового випромінення у будівлях та спорудах, що будуються, повинні застосовуватися вогнетривкі конструкції, а також вогнетривка обробка елементів будівлі, які горять. У кам'яних будівлях перекриття повинні бути виготовлені з армованого бетону або виконані з бетонних плит. Великі будівлі повинні розділятися на секції вогнетривкими стінами (брандмауерами).

У ряді випадків при проектуванні та будівництві промислових будівель і споруд має бути передбачена можливість герметизації приміщень від проникнення радіоактивного пилу. Це особливо важливо для підприємств харчової промисловості і продовольчих складів.

У складських приміщеннях повинна бути мінімальна кількість вікон і дверей. Складські приміщення для зберігання легкозаймистих речовин (бензин, гас, нафта, мазут) повинні розташовуватися в окремих блоках заглибленого або напівзаглибленого типу біля меж території об'єкта чи поза нею.

Деякі унікальні види технологічного обладнання доцільно розміщувати у найміцніших спорудах (підвалах, підземних приміщеннях) або у будівлях з легких вогнетривких конструкцій павільйонного типу, під накриттям чи без нього. Це обумовлюється тим, що у багатьох випадках обладнання може витримати набагато більший тиск ударної хвилі, ніж будівлі, в яких воно знаходиться, а при зруйнуванні будівель в результаті падіння конструкцій встановлене в них обладнання виходитиме з ладу [28].

На підприємствах, що виробляють або використовують сильнодіючі отруйні та вибухонебезпечні речовини, при будівництві і реконструкції необхідно передбачати захист ємностей та комунікацій від зруйнування ударною хвилею чи конструкціями, що падають, а також заходи, що виключають розливання отруйних речовин і вибухонебезпечних рідин.

Душові приміщення необхідно проектувати з урахуванням використання їх для санітарної обробки людей, а місця для миття машин — з урахуванням використання їх для знезараження автотранспорту.

Шляхи на території об'єкта повинні бути з твердим покриттям і забезпечувати зручне і найкоротше сполучення між виробничими будівлями, спорудами і складами; в'їздів на територію об'єкта має бути не менше двох з різних напрямків. Внутрізаводські залізничні шляхи повинні забезпечувати найпростішу схему руху, займати мінімальну площу території об'єкта та мати обгінні ділянки. Вводи залізничних ліній в цехи повинні бути, як правило, тупикові.

Системи побутової та виробничої каналізації повинні мати не менше двох випусків у міській каналізаційній мережі та пристрої для аварійних скидів у котловани, яри, траншеї тощо.

Дія ударної хвилі на об'єкт характеризується складним комплексом навантажень: надлишковим тиском, тиском відбиття, тиском швидкісного напору, тиском затікання, навантаження від сейсмовибухових хвиль і т.д. Значення їх залежить в основному від виду і потужності вибуху, відстані до об'єкта, конструкції і розмірів елементів об'єкта, орієнтації щодо епіцентру вибуху, місця розташування будинків і споруджень у загальній забудові об'єкта й окремих елементів виробництва в приміщеннях будинків, рельєфу місцевості і деяких інших факторів. Врахувати їх у сукупності для кожного елемента об'єкта, як правило, неможливо. Тому можливість елементів опиратися дії ударної хвилі характеризують тільки надлишковим тиском у

її фронті, вважаючи, що масштаби руйнувань не залежать від потужності і висоти найбільш ймовірних ядерних вибухів.

Для визначення ступеня руйнувань чи ушкоджень:

- вивчають вихідні дані і розраховують параметри ударної хвилі на відповідних відстанях;

- для розрахованих значень надлишкових тисків оцінюють ступінь руйнування розглянутих елементів;

- оцінюють можливість виникнення вторинних вражаючих факторів;

- з огляду на ступінь руйнувань найслабших елементів об'єкта, визначають ступінь руйнування об'єкта в цілому.

Вихідними даними для оцінки фізичної стійкості є: конструктивні особливості елемента, його форма, вага, габарити, характеристики міцності [29].

Оцінка ступеня руйнувань будинків і споруд, сховищ і ПРУ, енергетичного устаткування і мереж, верстатного і технологічного устаткування, вимірювальної апаратури, засобів зв'язку й оповіщення, транспортних та інших засобів може здійснюватися або методом порівняння наявних довідкових даних для розглянутого виду чи аналогічного йому елемента, або методом розрахунку впливу ударних навантажень і сил зсуву на елемент.

Для порівняльної оцінки необхідно мати відповідні таблиці можливих руйнувань елементів об'єкта в залежності від надлишкового тиску у фронті ударної хвилі: будинків, споруд, транспорту, устаткування, енергетичних споруд і мереж. Ці таблиці складаються на основі статистичних даних, отриманих при аналізі руйнувань у Хіросімі й Нагасакі та при проведенні випробувальних ядерних вибухів на полігонах, і можуть поповнюватися результатами розрахунків при конструюванні нових елементів.

Метод розрахунку передбачає визначення динамічних навантажень, створюваних надлишковим тиском у фронті ударної хвилі, і реакції елемента на ці

навантаження. Вихідними даними при використанні цього методу є: надлишковий тиск у фронті ударної хвилі і характер його зміни в часі (протягом фази стискання), тривалість фази стискання і швидкість руху фронту ударної хвилі. У більшості випадків дію ударної хвилі оцінюють питомим імпульсом — добутком надлишкового тиску на час його дії. Оскільки  $\Delta P_\phi$  залежить не тільки від часу, а й від відстані до епіцентру, і від потужності джерела ПУХ, розрахунок імпульсу з використанням інтегрального числення ускладнений. Тому звичайно використовують кусково-лінійну апроксимацію кривої  $\Delta P_\phi$  як функції часу.

Таким чином, дія ударної хвилі на об'єкт характеризується складним комплексом навантажень: надлишковим тиском, тиском відбиття, тиском швидкісного напору, тиском затікання, навантаження від сейсмовибухових хвиль і т.д. Значення їх залежить в основному від виду і потужності вибуху, відстані до об'єкта, конструкції і розмірів елементів об'єкта, орієнтації щодо епіцентру вибуху, місця розташування будинків і споруджень у загальній забудові об'єкта й окремих елементів виробництва в приміщеннях будинків, рельєфу місцевості і деяких інших факторів. Врахувати їх у сукупності для кожного елемента об'єкта, як правило, неможливо. Однак ряд таких заходів як розосередження нових будівель та споруд, забезпечення протипожежних розривів, наявність в будівлі залізобетонного каркасу та шляхів із твердим покриттям, запроектовані брандмауери істотно підвищують шанси людей вижити під час катастрофи, а також зменшують ризик отримання травм чи пошкоджень, сприяють швидшому доступу рятувальних служб до місця трагедії.

### **4.3 Висновки до розділу 4**

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи магістра розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час виготовлення, монтажу та експлуатації великопролітних аروحних конструкцій зі склопластику. Проведений аналіз показав, що забезпечення безпечних умов праці є необхідною складовою

технологічного процесу та безпосередньо впливає на надійність виконання монтажних робіт і безпечну експлуатацію споруди.

У роботі встановлено, що основними небезпечними факторами при виконанні монтажу великопролітних конструкцій є роботи на висоті, використання вантажопідіймальних механізмів, переміщення великогабаритних елементів, а також виконання робіт в умовах підвищеного вітрового навантаження. Визначено, що найбільший ризик виникає під час монтажу окремих секцій арки, коли конструкція ще не набула повної просторової жорсткості та стійкості.

Проведений аналіз показав, що ефективна система охорони праці повинна базуватись на комплексному застосуванні організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів. До основних заходів належать проведення інструктажів, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, контроль технічного стану монтажного обладнання, дотримання вимог електробезпеки та постійний контроль за стійкістю тимчасово змонтованих елементів конструкції.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що дотримання вимог чинних нормативних документів у сфері охорони праці та цивільного захисту, а також застосування сучасних методів контролю технічного стану конструкцій дозволяють підвищити рівень безпеки виконання монтажних робіт та забезпечити надійну експлуатацію великопролітних арок споруд зі склопластику. Отримані результати підтверджують необхідність комплексного підходу до забезпечення безпеки праці та стійкості конструкцій на всіх етапах життєвого циклу споруди.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра виконано дослідження напружено-деформованого стану великопролітної полімерної арки при дії експлуатаційних навантажень із використанням сучасних методів чисельного моделювання.

У процесі виконання роботи проведено аналіз науково-технічної літератури та сучасних підходів до дослідження великопролітних аркових конструкцій. Встановлено, що найбільш ефективним методом оцінювання роботи просторових полімерних систем є метод скінченних елементів, який дозволяє враховувати геометричні параметри конструкції, фізико-механічні характеристики матеріалу та особливості прикладання навантаження. Проведений аналіз показав, що питання дослідження великопролітних полімерних арок при дії реальних експлуатаційних навантажень залишаються недостатньо висвітленими та потребують подальшого розвитку.

У роботі досліджено особливості роботи полімерних і композитних конструкцій при дії експлуатаційних навантажень. Встановлено, що для полімерних аркових систем характерним є складний просторовий напружено-деформований стан, який залежить від геометричної схеми конструкції, жорсткості вузлів, фізико-механічних характеристик склопластику та характеру прикладання навантаження. Визначено, що найбільш небезпечними зонами є приопорні ділянки та вузлові з'єднання, у яких спостерігається концентрація внутрішніх зусиль і максимальні значення напружень.

У межах дослідження розроблено розрахункові схеми великопролітної полімерної арки з розбиттям на 10, 5 та 4 секції, а також стрілчастої арки. Чисельний аналіз показав, що арка з розбиттям на 4 секції є найбільш раціональною конструктивною схемою. Для даного варіанту власна вага конструкції становила 13,8 т, максимальний прогин — 42,+ мм, а максимальне переміщення по осі Y — 1,3 мм, що не перевищує допустимих значень для конструкції даного типу.

У процесі чисельного моделювання напружено-деформованого стану конструкції при дії снігових, вітрових та комбінованих навантажень встановлено, що абочна система забезпечує достатню просторову жорсткість і зберігає геометричну стійкість на всіх стадіях навантаження. Визначено, що максимальні прогини локалізуються у центральній частині прольоту, а найбільші поздовжні зусилля виникають у приопорних зонах конструкції..

Проведений аналіз переміщень, внутрішніх зусиль та деформативності конструкції показав, що зі збільшенням рівня навантаження відбувається закономірне зростання прогинів і поздовжніх зусиль при збереженні пружної роботи системи. Для першої стадії навантаження максимальний прогин становив -1,2 см, для другої стадії — -2,4 см.

У роботі визначено найбільш ефективну геометричну схему арки з точки зору жорсткості, економічності та простоти зведення. Порівняльний аналіз показав, що схема з розбиттям на 4 секції має найменшу матеріаломісткість, мінімальну кількість вузлів та елементів, а також забезпечує достатню просторову жорсткість при дії розрахункових навантажень. Встановлено, що зменшення кількості секцій дозволяє спростити монтаж конструкції та знизити її власну вагу без суттєвого погіршення жорсткісних характеристик системи.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Ковальчук Я. О. Методичний посібник для виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 192 “Будівництво та цивільна інженерія” / Я. О. Ковальчук, Г. М. Крамар, О. М. Мещерякова. - Тернопіль : ТНТУ, 2020. – 56 с.
2. Коренєв Р. В. Вплив діафрагм на напружено-деформований стан та стійкість спеціальних оболонкових систем // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Будівництво. 2019. С. 75–83.
3. Гребенчук С. С., Резнік П. А., Гапонова Л. В., Коренєв Р. В. Експериментально-теоретичні випробування ефективності конструктивних заходів щодо запобігання прогресуючому обваленню металевих оболонок спеціального виду // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2019. Вип. 185. С. 71–76.
4. Руднева І. Технологічні особливості підсилення металевих конструкцій методом наклеювання високоміцних фіброармованих систем при реконструкції // Будівельні конструкції. Теорія і практика. Київ : КНУБА, 2021. Вип. 8. С. 32–43.
5. Руднева І., Молодід О., Богдан Б. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів FRP // Дороги і мости. 2021. Вип. 24. С. 84–96.
6. Казачонок Ю. А., Охріменко Б. С., Михайловський Д. В. Напружено-деформований стан конструкції з клеєної деревини в формі діаґрида при реальному вітровому впливі // Архітектурний вісник КНУБА. Київ : КНУБА, 2018. Вип. 16. С. 334–339.
7. Михайловський Д. В., Комар М., Комар О. Аналіз напружено-деформованого стану плит з перехресно-клеєної деревини, підсилених композитними

стрічками // Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2024. № 14. С. 29–40. DOI: 10.32347/2522-4182.14.2024.29-40.

8. Гомон С. С. Теорія роботи і методи розрахунку елементів та з'єднань з деревини при одноразових і повторних навантаженнях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2020. 45 с.

9. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Reddy J. N. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2004. 831 p.

10. Composite Materials for Aircraft Structures Baker A. A., Dutton S., Kelly D. Composite Materials for Aircraft Structures. 2nd ed. Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 624 p.

11. Mechanics of Composite Materials Jones R. M. Mechanics of Composite Materials. 2nd ed. Philadelphia : Taylor & Francis, 1999. 519 p.

12. Composite Structures Ascione L., Feo A., Mancusi G. On the Behaviour of Curved Pultruded Composite Structures // Composite Structures. 2000. Vol. 48. No. 1–3. P. 217–225.

13. The Finite Element Method Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. Vol. 1: The Basis. 5th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. 689 p.

14. Polymer Composites Mandell J. F., McGarry F. J. The Mechanical Properties of Fiber Reinforced Polymer Composites // Journal of Composite Materials. 1979. Vol. 13. No. 3. P. 223–238.

15. Fatigue and Fracture of Fiber-Reinforced Composites Weitsman Y. J. Fatigue and Fracture of Fiber-Reinforced Composites. Amsterdam : Elsevier, 1990. 464 p.

16. Innovating arch structures with fiber-reinforced polymer composites: A review Xia Z. Y., Jiang T., Yu T. Innovating Arch Structures with Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review // Advances in Structural Engineering. 2023. Vol. 26(13). P. 2341–2358.

17. Behavior of Buried Composite Arch Bridges Walton H. J. Behavior of Buried Composite Arch Bridges : Dissertation. Orono : University of Maine, 2015. 428 p.
18. Research and Development to Advance Buried Composite Arch Bridge Systems Walton H. J., Dagher H. J. Research and Development to Advance Buried Composite Arch Bridge Systems. Washington : U.S. Department of Transportation, 2015. 392 p.
19. Considering the soil cover and rise-span ratio Zhang Y., Liu X., Zhao H. Experimental Investigation of Stress and Deformation of GFRP Arch Structures Considering Soil Cover and Rise-Span Ratio // Advances in Structural Engineering. 2022. Vol. 25(7). P. 1462–1476.
20. Heat Conduction Hahn D. W., Özisik M. N. Heat Conduction. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. 760 p.
21. Transport Phenomena Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2002. 895 p.
22. Creep Analysis of Structures Bažant Z. P. Creep Analysis of Structures // Journal of Engineering Mechanics. 2001. Vol. 127(1). P. 2–14.
23. Stress relaxation, dynamics and plasticity of transient polymer networks Meng F., Pritchard R. H., Terentjev E. M. Stress Relaxation, Dynamics and Plasticity of Transient Polymer Networks // Physical Review E. 2016. Vol. 93. P. 042501.
24. A Mechanical Study of a Glass Fabric-Thermoplastic Resin Composite Boufaida Z., Boisse J., André S., Farge L. A Mechanical Study of a Glass Fabric-Thermoplastic Resin Composite: 3D-DIC and X-ray Tomographic Observations Explained by Numerical Simulations // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. Vol. 91. P. 429–440.
25. Tensile properties of all-polymeric syntactic foam composites Yousaf Z., Morrison N., Parnell W. J. Tensile Properties of All-Polymeric Syntactic Foam Composites:

Experimental Characterization and Mathematical Modelling // Composite Structures. 2021. Vol. 279. P. 114791.

26. Гомон, С., Матвіюк, О., & Черномаз, Н. (2022). Поліпшення механічних властивостей деревини за рахунок їх склеювання. *Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування*, (62), 333-342.

27. Гомон, С., Матвіюк, О., Кулаковський, Л., & Черномаз, Н. (2022). До побудови повних діаграм деформування деревини вільхи та ялини за стандартної вологості. *Містобудування та територіальне планування*, (79), 87-92.

28. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

29. Методичні вказівки для написання розділу дипломного проекту з дисципліни «Охорона праці в галузі» / В. Б. Каспрук. - Тернопіль: ТНТУ, 2017. - 14 с.