



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)  
« » 2023 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 Чубков Микола Володимирович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи « Дослідження напружено-деформівного стану каркасу будівель із CLT-панелей при дії особливих навантажень »

Керівник роботи Чорномаз Наталія Юріївна, к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 10 » 04 2023 року № 4/7-364.

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

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)  
Стан питання основного напрямку дослідження. Аналіз розрахунку CLT плит перекриття з урахуванням ортотропних та ізотропних властивостей деревини. Розрахунок і аналіз НДС дерев'яної багатоповерхової будівлі із CLT панелей при сейсмічних впливах

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	Огляд літератури за темою досліджень		
2	Аналіз розрахунку CLT плит перекриття з урахуванням ортотропних та ізотропних властивостей деревини		
3	Розрахунок і аналіз НДС дерев'яної багатоповерхової будівлі із CLT панелей при сейсмічних впливах		
4	Охорона праці		
5	Загальні висновки		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Чубков М.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Чорномаз Н.Ю.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	3
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ПЕРЕХРЕСНО КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ .....	7
1.1 Огляд багатоповерхових об'єктів із деревини перехресно клеєної .....	7
1.2 Властивості перехресно клеєної деревини .....	12
1.3 Структура CLT панелей .....	16
1.4 Методики розрахунку поперечно-клеєної деревини.....	18
1.5 Методи розрахунку багатоповерхових будівель із CLT .....	22
1.6 Висновки до розділу .....	25
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ CLT ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ З УРАХУВАННЯМ ОРТОТРОПНИХ ТА ІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИНИ.....	26
2.1 Моделювання матеріалів. Ортотропна пружність.....	26
2.2 Моделювання CLT панелі перекриття.....	28
2.3 Розрахунок CLT панелей у ПК Ansys .....	31
2.4 Розрахунки CLT плити в ПК ЛІРА .....	41
2.5 Топологічна оптимізація CLT плити перекриття .....	43
2.6 Основні висновки до розділу .....	49
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК І АНАЛІЗ НДС ДЕРЕВ'ЯНОЇ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ ІЗ CLT ПАНЕЛЕЙ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВАХ .....	51
3.1 Розробка просторової розрахункової моделі багатоповерхової будівлі з CLT панелей ПК LIRA .....	51
3.2 Статичний розрахунок.....	54
3.3 Розрахунок на сейсмічні впливи лінійно-спектральним методом.....	57
3.4 Розрахунок на дію акселерограм.....	62

3.5 Висновки за розділом .....	67
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	
.....	68
4.1 Охорона праці.....	68
4.1.1 Організація охорони праці працівників на підприємстві .....	68
4.1.2 Правила поведінки під час виконання робіт з монтажу будівельних	
конструкцій .....	69
4.1.3 Висновки до підрозділу 4.1 .....	72
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	73
4.2.1 Заходи при землетрусі .....	73
4.2.2 Заходи щодо підвищення стійкості об'єкта.....	74
4.2.3 Системи сейсмозахисту будівель і споруд.....	75
4.2.4 Висновки до підрозділу 4.2.....	75
ВИСНОВКИ .....	77
БІБЛІОГРАФІЯ .....	78

## ВСТУП

Світовий досвід показує, що дерев'яне домобудівництво є дешевою, швидко зведеною, екологічною і зручною технологією будівництва [3-7]. Найбільше використання деревини як основи при будівництві будинків відзначають у США (95%), Фінляндії (90%), Канаді (83%), Швеції (78%). Канада, Фінляндія і Швеція є лідерами за обсягом експорту дерев'яних будинків заводського виготовлення. Частка експорту в лісовій промисловості Фінляндії перебуває на рівні 22% від усього експорту країни на 2019 рік [8].

У зв'язку з появою перших багатоповерхових будівель із перехресно клеєної деревини (CLT) в Україні та зростаючою популярністю на багатоповерхові будівлі з клеєної деревини в усьому світі, проблема забезпечення їхньої безпеки при землетрусах є однією з найважливіших, а особливо прогноз їхньої поведінки під час сильних землетрусів.

**Мета роботи:** Аналіз і дослідження напружено-деформованого стану багатоповерхової дерев'яної будівлі виконаної із CLT панелей, під час сейсмічних впливів.

**Об'єкт досліджень** – багатоповерхові (панельні та каркасні) будівлі, виконані з CLT панелей і клеєних дерев'яних конструкцій.

**Предмет дослідження** – Напружено-деформований стан (НДС) багатоповерхових будівель з CLT панелей.

**Доцільність проведення досліджень** зумовлена тим, що отримані результати дадуть можливість підвищити економічність та довговічність каркасів житлових будівель виконаних з CLT панелей при їх експлуатації.

**Завдання роботи:**

- огляд наявних рішень у царині розрахунків багатоповерхових будівель із CLT панелей;
- розробка скінченно-елементної моделі багатоповерхової будівлі із

CLT панелей;

- чисельні дослідження напружено деформованого стану ортотропних CLT панелей з елементами оптимального проектування.

-чисельні дослідження напружено-деформованого стану будівлі із CLT панелей з урахуванням конструктивних рішень, на дію сейсмічних навантажень.

-аналіз і зіставлення результатів чисельних досліджень багатоповерхової будівлі із CLT панелей під час дії сейсмічного навантаження та рекомендації щодо їхнього розрахунку і конструювання.

**Методи дослідження** – теоретичний аналіз і скінченно-елементне моделювання багатоповерхових дерев'яних будівель у розрахункових програмних комплексах.

**Галузю застосування** результатів роботи є проектування нових, реконструкція та експлуатація існуючих будівель.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому,що розроблено скінченно-елементну модель багатоповерхової будівлі із CLT панелей з урахуванням ортотропних властивостей деревини.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані в роботі результати досліджень можуть бути використані для зведення нових та реконструкції існуючих житлових каркасних будівель.

**Апробація результатів** магістерської роботи виконана на VI Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. актуальні питання» (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 27-28 квітня 2023 року.).

**Публікація результатів магістерської роботи** здійснена у збірнику тез вищезазначеної конференції.

Робота виконана згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри будівельної механіки ТНТУ та державними програмами надійності і економічності будівельних виробів, матеріалів і конструкцій.

**Ключові слова:** клеєна деревина, CLT панелі, сейсмічні впливи.

# РОЗДІЛ 1

## СУЧАСНИЙ СТАН ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ПЕРЕХРЕСНО КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ

### 1.1 Огляд багатопверхових об'єктів із деревини перехресно клеєної

Деревина - поновлюваний природний матеріал, який застосовують у багатьох галузях промисловості та народного господарства. Застосування деревини в будівництві зростає за останні роки.

Дерево як будівельний матеріал зараз набирає високих темпів розвитку. У багатьох провідних країнах будують житлові та громадські будівлі з дерев'яних конструкцій. Найчастіше при будівництві таких об'єктів використовують клеєну деревину, зокрема панелі з CLT і LVL брус. Прикладом таких споруд є об'єкт Brock Commons у Канаді. Проєкт Brock Commons має кілька особливостей. По-перше, це не елітна житлова і не комерційна нерухомість, як більшість збудованих досі висотних дерев'яних будівель. Brock Commons - університетський гуртожиток. Вартість будівництва проєкту не має бути надто високою і суттєво перевищувати витрати на будівництво такого ж класу об'єктів із традиційних будівельних матеріалів. При цьому інноваційні технології, а також дерев'яне домобудівництво з відсиланням до природоохорони та екології - значущі для іміджу університету чинники.

Тому, по-друге, було обрано проєкт із гібридною конструкцією. Бетон обрано як матеріал для фундаменту, цокольного поверху і несучих веж, що забезпечують бічну стійкість. Каркас, міжповерхові перекриття 17-дерев'яних поверхів виготовлено з інженерної деревини (дерев'яний клеєний брус і багатошарові плити - CLT панелі), обшивка та віконні блоки - метал і деревокомпозити (панелі ДВП), каркас даху та покрівля метал [11].

Brock Commons має дерев'яний каркас, який формують колони з клеєної балки (Glulam) з попередньо встановленими вузлами швидкого з'єднання. Міжповерхові перекриття утворюють панелі (2,85x4,0 м) з п'ятишарової перехресно-клеєної



деревини. Зібрана конструкція надійно перерозподілятиме і витримуватиме вертикальне навантаження від 17 поверхів, а її зв'язки з бетонними колонами забезпечать передачу на останні бічні навантаження. Така конфігурація каркасу і перекриттів як несучих елементів будівлі дає змогу, за умови використання деревини, задовольнити новим вимогам (2015 року) сейсмостійкого дизайну Національного будівельного кодексу Канади ((National Building Code of Canada).

Стіни будівлі утворюють виготовлені заздалегідь фасадні панелі зі встановленими вікнами. Каркас панелі (довжина секції 8 м, висота 2,81 м) - сталь. Термоізоляція - скловолоконні мати. Облицювання - деревоволокнисті плити високого тиску з вмістом деревних волокон 70% і термозатверджувальним полімерним сполучним. Фасадні панелі декоровані під масив дерева або однорідний чорний матовий будівельний матеріал. Для захисту від негоди панелі ламіновані гідроізоляційним покриттям. Усі дерев'яні конструкції всередині будівлі зашиті кількома шарами гіпсокартону, що істотно підвищує рівень пожежної безпеки, а також спрощує оздоблювальні роботи.



Рисунок 1.1 - Гуртожиток у Канаді Brock Commons

Інший відомий об'єкт із дерева М'єсторнет був визнаний Радою з висотних будівель і міського середовища проживання (СТВУН) як найвища дерев'яна будівля

у світі, а також занесений у Книгу рекордів Гіннеса. Вежа також отримала безліч нагород і визнань, як-от New York Design Awards, Norwegian Tech Awards та СТБУН Award of Excellence. 19-поверхова дерев'яна будівля була відкрита в березні 2019 року і має загальну площу близько 11 300 квадратних метрів. Для гостей готелю М'єсторнетотель є апартаменти, офіси, ресторан і місця загального користування, а також плавальний зал у прилеглий прибудові на першому поверсі. Це близько 4700 квадратних метрів у розмірі, побудованих у деревині [3].

Висота: 85,4 м

Поверховість: 18

Площа: 11 300 м<sup>2</sup>

Термін здачі: Березень 2019 Виробник CLT-панелей: Moelven

М'єсторнет був розроблений норвезькою студією Voll Arkitekter для AB Invest. Дерев'яні конструкції були встановлені норвезькою фірмою Moelven Lintre, зокрема несучі конструкції з клеєного бруса. Поперечні клесні бруси використовувалися для сходових клітин, ліфтових шахт і балконів.

Оскільки основні вертикальні / бічні конструктивні елементи і системи перекриттів М'єсторнет побудовані з деревини, будівля вважається суцільнодеревною конструкцією, що може включати використання локалізованих недеревних з'єднань між дерев'яними елементами. Він також може містити недеревну підлогу, якщо палуби підтримуються основною конструкцією, виконаною з дерева (що спирається на дерев'яні балки). У М'єсторнеті на верхніх семи поверхах були використані бетонні плити, щоб відповідати критеріям комфорту та акустики.



Рисунок 1.2 – М'єсторнет Tower

Наступною за висотою дерев'яною будівлею є 24-поверхова вежа Хохо висотою 84 м (276 футів) у Відні, Австрія. Однак ця будівля являє собою дерев'яно - бетонну композитну будівлю, оскільки вона має бетонне ядро, що стабілізує будівлю, згідно з визначенням СТБУН [13].

Висота: 84 м

Поверховість: 24

Площа: 25 000 м<sup>2</sup>

Термін здачі: Квітень 2019

Виробник CLT -панелей: HASSLACHER NORICA TIMBER



Рисунок 1.3 – вежа Хохо, Відень

Також існує низка житлових будинків середньої поверховості у Швеції, Фінляндії, Австрії та інших країнах Європи.

Дерев'яні конструкції вже зараз можуть скласти серйозну конкуренцію залізобетону та металу. Це можна підтвердити перевагами дерева як будівельного матеріалу:

- можливість комбінованого оздоблення внутрішніх і зовнішніх стін без підготовчих робіт;
- допустимість використання крос-брус панелей у міжповерхових перекриттях;
- можливість реалізації будь-якого архітектурного стилю;
- стабільність розмірів і статична міцність у всіх напрямках;
- можливість 100% оздоблення та розведення мереж на заводі-виробнику;
- низька теплопровідність (0,13 Вт/мК) і висока питома теплоємність (2,10 кДж/кг);
- зниження термінів будівництва вдвічі. Дерев'яна монолітна плита, склеєна в заводських умовах з висушеної деревини, не вимагає штукатурки, тим

самим даючи змогу скоротити час оздоблювальних робіт і терміни введення будівлі в експлуатацію;

- можливість підбору на заводі лицьових ламелей за породами і сортами для фінішного оздоблення;

- збільшення внутрішнього простору за рахунок зменшення товщини стін (на 1/3 порівняно з бетоном і клеєним брусом).

## **1.2 Властивості перехресно клеєної деревини**

CLT панель складається з декількох шарів деревини, і її характеристики тісно пов'язані з механічними властивостями цільної деревини. Для розуміння механічних характеристик CLT панелі, розглянемо характеристики вихідної деревини.

Деревина є органічним, ортотропним матеріалом із властивостями, оптимальними для зовнішніх впливів, яких зазнають дерева. Стовбур дерева має круглу форму, щоб протистояти вітровому навантаженню, а його гілки несуть на собі листя або голки, які беруть участь у процесі фотосинтезу. Істотний вплив на ортотропні властивості деревини має її анатомічна будова (макробудова).

Розташований між деревиною і корою тонкий прошарок світлої тканини (камбій) містить два типи живих початкових клітин (ініціалів), з яких переважним є тип ініціалів, що мають сильно витягнуту форму і утворюють у дереві анатомічні елементи, орієнтовані вздовж його осі [14].

Деревина хвойних і листяних порід складається з різного набору анатомічних елементів, для яких спільною є їх упорядкована волокниста структура. Механічну (опорну) функцію в деревині хвойних порід виконують насамперед трахенди, які розташовані в дереві, що росте, головним чином вертикально і становлять 90% об'єму деревини. Будова листяної деревини дещо менш упорядкована.

Механічну функцію виконують тут волокна лібриформу та волокнисті трахеїди. Волокнисті трахеїди та волокна лібриформу об'єднуються загальним поняттям

"деревне волокно".

Розташування деревних волокон уздовж осі дерева зумовлює різку відмінність механічних властивостей деревини вздовж і впоперек стовбура. Ця відмінність посилюється впливом орієнтації мікрофібрил у клітинних стінках та орієнтації частини молекул целюлози в мікрофібрилах.

Таким чином, відмінність у характеристиках властивостей деревини вздовж і впоперек волокон зумовлена її макро- і мікробудовою.

Модулі пружності для напрямку вздовж волокон майже в 40 разів більші, ніж поперек (смерека), а межа міцності під час стиснення в 10 разів, під час розтягування - в 20-30 разів. Відношення величини модуля пружності вздовж і поперек волокон для деревини хвойних порід у середньому виявляється вищим, ніж для деревини листяних. Пояснюється це менш упорядкованою будовою деревини листяних порід і відносно більшим впливом серцевинних променів на їхню жорсткість у поперечному напрямку [14].

Напруга в напрямку волокон майже лінійна до моменту руйнування. Спочатку відбувається невелика пластична деформація, потім розколювання і різке падіння несучої здатності. Загальна форма для розтягування паралельно і перпендикулярно зерну істотно не відрізняється, за винятком граничної міцності, оскільки гранична міцність у перпендикулярному напрямку становить від 1 до 5% від міцності в поздовжньому напрямку. На рівні матеріалу можливі два режими руйнування. Або волокно руйнується, або витягується з матричного матеріалу. Як правило, при розтягуванні деревини виникають змішані режими руйнування, тому результати випробувань важко перенести на математичні моделі. Результати випробувань необхідно розмазати по декількох випробуваннях, щоб отримати середню поведінку. Типові криві напруга-деформація для деревини під час розтягування паралельно і перпендикулярно до напрямку волокон показано на рисунку 1.4.

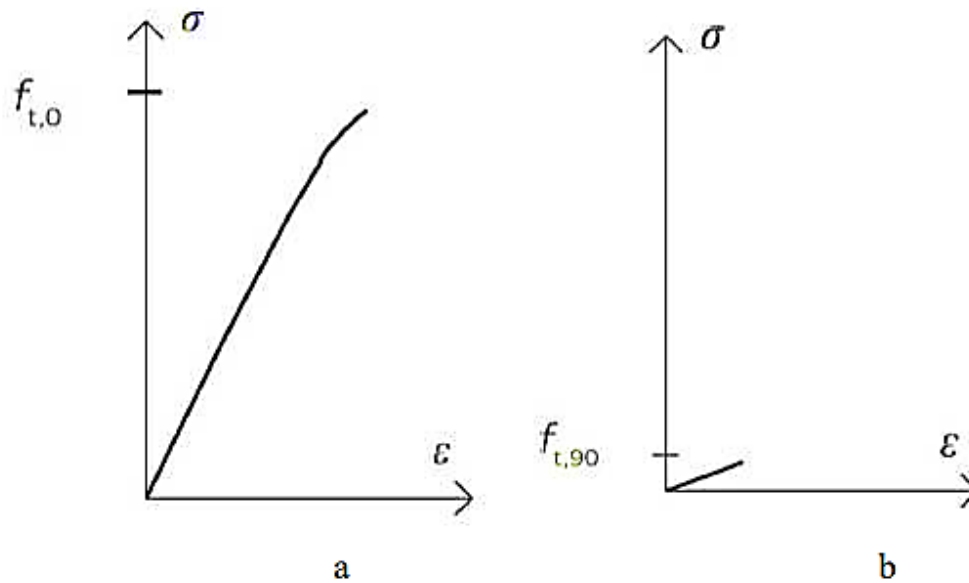


Рисунок 1.4 – Типові криві напруга-деформація для деревини під час розтягування паралельно (а) та перпендикулярно (б) напрямку волокон

Однак стиснення деревини - це близько до в'язкого руйнування. Стиснення в осьовому напрямку призводить до високої міцності, з падінням плинності та подальшим плато [15]. Занадто високе навантаження призводить або до зминання, або до вдавнення волокон в інші волокна. При виникненні зминання здатність сприймати більш високі навантаження знижується, і таку поведінку можна класифікувати як пластифікацію. Якщо клітини деревини стискаються в перпендикулярному напрямку, клітини трубки роздавлюються. Для цього потрібна невелика сила, і, отже, при стисненні перпендикулярно волокнам міцність і жорсткість низькі. Однак, коли всі трубчасті клітини розчавлені, рівень напруги може знову зрости через ущільнення. Якщо деревина стискається під кутом до зерна, поведінка може бути іншою. За кута від  $10^\circ$  до  $45^\circ$  активізація розтягування і зсуву призводить до більш крихких режимів руйнування. Подальше збільшення кута призводить до чистого руйнування при стисненні перпендикулярно зерну. Типові криві напруга-деформація для деревини під час стиснення паралельно і перпендикулярно до напрямку волокон показані на рисунку

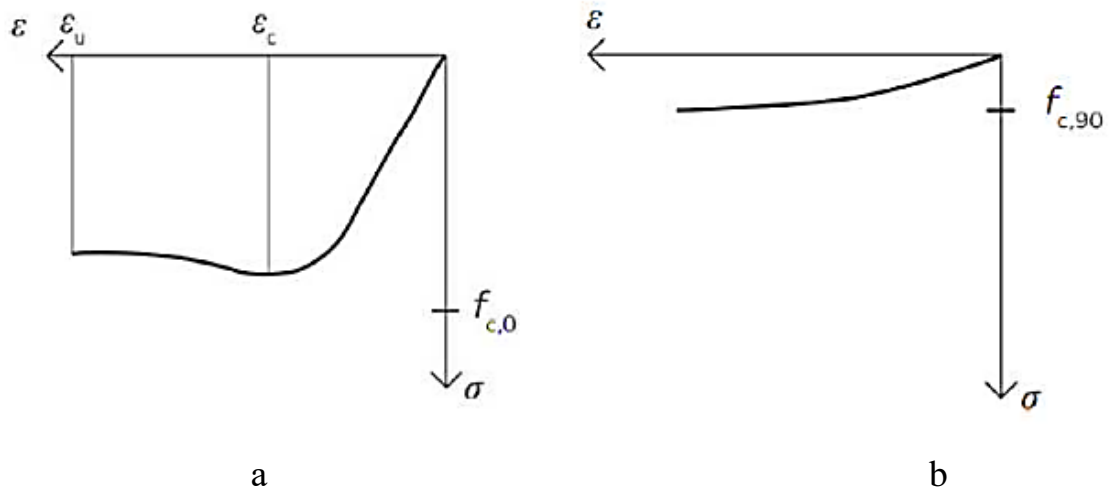


Рисунок 1.5 – Типові криві напруга-деформація для деревини в разі стиснення паралельно (а) та перпендикулярно (b) напрямку волокон [3]

Випробування деревини на зсув, найімовірніше, є найскладнішими випробуваннями. Залежно від методу випробування, піки напруги можуть викликати передчасне руйнування, а зразкам може не бути дозволено слідувати своїм власним площинам руйнування, що може призвести до неточних значень. Масштаб проблеми легко зрозуміти, якщо подивитися на значення, отримані в результаті різних випробувань ялини.

Van de Kuilen і Leijten [16] наводять середнє значення міцності під час зсуву 9,1 МПа, у той час як Grosse [17] наводить значення від 6,3 до 11,3 МПа. Денцлер і Глос [18] провели випробування згідно з EN 408 зі склесеними сталевими пластинами й отримали середні значення від 3,3 до 4,4 МПа. Розкид між представленими значеннями досить високий і становить від 3,3 до 11,3 МПа. Руйнування при зсуві зазвичай крихкі, як і при розтягуванні. Руйнування за способом П завжди відбувається в площині LT або LR і зазвичай слідує за річними кільцями. Звичайні руйнування за зсуву зазвичай слідує зигзагоподібною кривою, слідує за тангенціальною площиною і перескакуючи в радіальному напрямку на іншу тангенціальну площину.

На мікроскопічній площині руйнування під час зсуву демонструють той самий механізм розриву, що й під час розтягування перпендикулярно зерну [18].



### 1.3 Структура CLT панелей

CLT панель включає щонайменше три шари клеєних дощок або дощок, виготовлених із хвойної або листяної деревини. Кожен шар розташований під кутом 90 градусів до наступного. Панелі CLT складаються з дощок завтовшки від 20 до 60 мм, а сировиною слугує деревина.

Вміст вологи в шаруватих матеріалах має становити від 5 до 15 %, коли вони склеєні разом. Найкраще зчеплення виходить, коли вміст вологи під час використання близький до рівноважного, що зводить до мінімуму розщеплення деревини. Однак деяке розщеплення неминуче, але зазвичай це не чинить ніякого шкідливого впливу на несучу здатність панелі. При створенні поперечного перерізу CLT зазвичай використовується деревина більш високої міцності в поверхневих шарах і в основному напрямку навантаження, де напруги є найбільшими [19].

Ортотропні властивості матеріалу деревини та поперечне укладання забезпечують відносно складну деформаційну поведінку CLT. Вона представлена двовимірним багат шаровим композитом з товстими і сильно анізотропними шарами. Високе співвідношення жорсткості в напрямку волокон поздовжніх шарів і низький модуль поперечного зсуву поперечних шарів викликають високі деформації зсуву по товщині пластини. Поперечні деформації зсуву сильно переривчасті на границях розділу шарів, тоді як напруження зсуву безперервні і сильно не лінійні за товщиною [20].

Основною структурною проблемою, пов'язаною з вигином пластин CLT, є низька міцність зрізу поперечних шарів, що призводить до обертання волокон і так званого руйнування під час зрушення під час зсуву, під час прокатки [20].

Явище зсуву під час тертя, коли на межі розділу шарів виникає площина поздовжнього зсуву, часто має вирішальне значення при визначенні міцності панелей. Міцність на зсув і модуль пружності самі по собі залежать від багатьох факторів, таких як розміри дощок CLT і породи деревини. Для кількісної оцінки модуля зсуву під час

кочення було розроблено різні моделі, але жоден єдиний метод не був прийнятий повсюдно. Описані вище характеристики матеріалу CLT ускладнюють належний і точний кінематичний опис матеріалу. Для інтенсивного і безпечного використання CLT у важко навантажених конструктивних елементах, завдання на етапі проектування вимагають застосування складних чисельних моделей [20].

Порівняно з компонентами, виготовленими з конструкційної деревини, компоненти, виготовлені з CLT, мають більшу міцність і менший розкид значень. Для конструкційної деревини міцність визначається найслабшим поперечним перерізом, таким як сучок, зубчасте з'єднання або будь-який інший дефект. З іншого боку, в CLT змішують дошки з різною міцністю, і ризик того, що в них буде найслабший поперечний переріз в одному й тому самому напрямку і шар, дуже малий. Зазвичай це називається системним ефектом [20].

Різні способи руйнування CLT панелі пов'язані з анатомією деревини, а також взаємодією між її окремими дошками. Класифікацію різних режимів тріщин можна побачити на рисунку 1.6 з описом нижче.

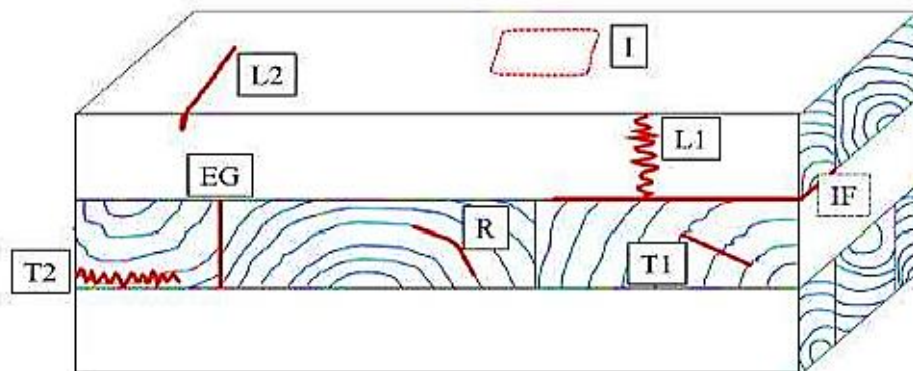


Рисунок 1.6 - Класифікація режимів тріщин у CLT

L1: Руйнування під час розтягування в напрямку волокон, коли тріщина росте перпендикулярно волокнам.

L2: Руйнування при стисненні в напрямку волокон, що призводить до

руйнування з перегином через нестабільність клітин деревини.

I: руйнування при вдавлюванні перпендикулярно волокнам, часто характеризується екстремальною пластичною деформацією.

R: Руйнування під час розтягування в радіальному напрямку, яке здебільшого відбувається в ранніх клітинах деревини. Руйнування є результатом поздовжньої або сколюючої напруги зсуву. Поверхня руйнування часто розташовується всередині дошки, слідуючи якомога довше за річними кільцями.

T1: Руйнування під час розтягування в поперечному напрямку, яке відбувається як у ранній, так і в пізній деревині. Руйнування зазвичай відбувається внаслідок напруги зсуву кочення, з компактною поверхнею руйнування.

T2: Руйнування при розтягуванні в поперечному напрямку, яке відбувається в зоні переходу до сусідніх плит і характеризується майже плоскою траєкторією тріщини.

EG: Руйнування по шару склеювання дощок між собою.

IF: Руйнування між шарами.

CLT, що складається з декількох шарів, є гетерогенним і анізотропним продуктом. Його механічні властивості варіюються залежно від напрямку застосування сили.

Як правило, режими руйнування L1 і T2 призводять до глобального руйнування і відповідають за режим руйнування конструкції. Режими R і T1 залишаються скоріше локальними і майже не впливають на ефективну жорсткість і міцність [20].

#### **1.4 Методики розрахунку поперечно-класної деревини**

У Європі були прийняті різні методи для визначення жорсткості та міцності властивостей CLT. Деякі з цих методів є експериментальними за своєю природою, тоді як інші є аналітичними. Інші методи містять поєднання як емпіричних, так і аналітичних підходів, заснованих на модельних випробуваннях.

Експериментальна оцінка включає визначення властивостей при вигині шляхом випробування повнорозмірних панелей або секцій панелей. Проблема з експериментальним підходом полягає в тому, що кожного разу, коли змінюється розкладка, тип матеріалу або будь-який з виробничих факторів змінюються параметри, необхідно проводити додаткові випробування для оцінки властивостей цих виробів. Аналітичний підхід, підтверджений даними випробувань, пропонує більш загальну і менш витратну альтернативу. Такий аналітичний підхід може загалом передбачити міцність і жорсткість властивості панелей з CLT, ґрунтуючись на властивостях матеріалу деревини, з яких складається панель. Протягом останніх двох десятиліть було розроблено різні типи аналітичних моделей для оцінки основних механічних властивостей панелей з CLT. У цьому розділі подано тільки основну інформацію за трьома найбільш часто використовуваними методами [21].

Найпоширеніший аналітичний підхід у Європі ґрунтується на "Теорії механічно з'єднаних балок". Як випливає з назви, цей метод був спочатку розроблений для балок (наприклад, Г або Т-подібні балки), з'єднаних механічними кріпленнями з певною жорсткістю, рівномірно розташованими по довжині балки. Цей метод, також званий методом у (Гамма), включений до Додатка В Єврокоду 5 (EM 2009). Згідно з цим методом, властивості жорсткості механічно з'єднаних балок визначають за допомогою "ефективної згинальної жорсткості" ( $EI_{\text{eff}}$ ), яка залежить від властивостей перерізу балок і "коефіцієнта ефективності з'єднання" у. Коефіцієнт у залежить від жорсткості кріпильних елементів, при цьому  $u = 1$  являє собою повністю склеєний елемент, а  $u = 0$  - повна відсутність з'єднання. Цей підхід забезпечує тільки закрите (визначене) розв'язання для диференціального рівняння підтримуваних балок/панелей із синусоїдальним розподілом навантаження; однак відмінності між визначеним розв'язанням і розв'язанням для рівномірно розподіленого навантаження або точкового навантаження мінімальні й тому прийнятні в інженерній практиці. Оскільки панелі з CLT є клеєними виробами, що не мають механічних з'єднань, знадобилися деякі зміни в теорії, щоб зробити її застосовною. Якщо ми припустимо,

що тільки плити, орієнтовані в поздовжньому напрямку, несуть навантаження, то ми можемо взяти до уваги жорсткість на зсув поперечних шарів як жорсткість (або деформацію), спричинену "уявними кріпильними елементами", що з'єднують поздовжні шари. Іншими словами, поздовжні шари панелей з CLT розглядаються як "балки", з'єднані "механічними кріпильними елементами" (розпірками), жорсткість яких дорівнює жорсткості зсувної деформації поперечних шарів. Цей метод ігнорує вплив зсувних деформацій у поздовжніх шарах на загальний прогин панелі. Залежно від компонування поперечного перерізу, частка зсувної може становити до 30% від деформації вигину. Іншим недоліком цього методу є той факт, що ( $EI_{\text{eff}}$ ) залежить від прольоту  $l$ , таким чином, є величиною, що залежить від системи. Крім того, використання цього методу для CLT -панелей із загальною кількістю сім або більше шарів вимагає деяких модифікацій, які роблять його громіздким [21].

Також у Європі було розроблено метод "Аналогії зсуву", який можна застосувати для суцільних панелей із поперечними шарами. Методика враховує зсувну деформацію паралельних і поперечних шарів і не обмежується певною кількістю шарів у панелі. Аналогічно методу Гамма, цей метод також використовує ( $EI_{\text{eff}}$ ) при розрахунку жорсткості на вигин. Деформація зсуву між шарами вводиться через новий член жорсткості на зсув, що позначається як ( $GA_{\text{eff}}$ ). Хоча цей метод не дає "закритого рішення", він доволі точний для панелей із CLT. З цих причин цей метод було використано для визначення властивостей жорсткості панелей із CLT за навантаження, перпендикулярного лицьовій поверхні, як у стандартах PRG 320, так і в стандарті CSA 086.

Теорія балок Ейлера-Бернуллі широко використовується в структурному аналізі та проектуванні, і в більшості посібників з проектування елементів конструкцій з будь-якого матеріалу використовується виключно ця теорія. Основним недоліком теорії балок Ейлера-Бернуллі є те, що вона неточна для балок з великою висотою перерізу, в яких висота перерізу не є нехтувано малою порівняно з довжиною. Теорія балок Тимошенка є розширенням теорії балок Ейлера-Бернуллі, яка включає

деформації зсуву та ефекти обертального вигину під час розроблення основних рівнянь, що робить її придатною для прогнозування поведінки товстих балок і багатошарових композитів (балки/плити), таких як CLT.

Теорія балок Тимошенка широко використовується в Європі та в кількох спеціалізованих комп'ютерних програмах для CLT [11]. Бласс і Феллмозер (2004) застосували "Теорію композитів" (також звану "К-методом") для прогнозування деяких розрахункових властивостей CLT. Однак цей метод не враховує деформацію зсуву деформацію зсуву в окремих шарах. Цей метод досить точний для панелей з високим відношенням прольоту до глибини.

У 2015 році Шахневаз та ін. [12] підтвердили "Теорію механічно з'єднаних балок", порівнявши її з експериментальними даними випробувань балки і стінки CLT, опублікованими в канадському керівництві CLT. Модель FEA було розроблено з використанням Ansys, а з'єднання між шарами в панелі змодельовали з використанням контактних елементів з високим коефіцієнтом тертя, заснованим на жорсткості клею. Модель дала результати з різницею приблизно в 10% порівняно з експериментальними даними щодо пружної жорсткості. Серрано і Енквіст змодельовали тришарові панелі CLT із зусиллям стиснення на верхній поверхні. Вони заявили, що для більш точного аналізу слід розглянути взаємодію між окремими шарами. Вони також виявили, що за низьких навантажень на межі розділу шарів виникають великі деформації. Щоб повністю відобразити поведінку після піку, було запропоновано модель ортотропного пластичного матеріалу. Богенспергер та ін. [14] досліджували руйнування при вигині та зсуві в панелях CLT за концентрованих навантажень. Для спрощення напруженнями при взаємодії між шарами знехтували. Матеріал був змодельований як ортотропний з пружно-пластичними властивостями. Результати FEA були приблизно на 20% нижчими порівняно з експериментальними значеннями для лінійно-пружного відгуку. Для нелінійної стадії механічна міцність була сильно завищена. Щоб уявити розм'якшення через руйнування під час розтягування в зовнішніх ламелях, невеликій частині FEA -моделі було присвоєно

властивості пошкодження, що поліпшило постлінійну поведінку.

Сааведра Флорес та ін. [15] досліджували руйнування панелей CLT при зсуві, використовуючи багатомасштабний підхід. Стратегія моделювання включала інформацію про матеріали в нано-, мікро- і міліметровому масштабі. Розтріскування було змодельовано шляхом введення в модель когезійних факторів. Прогнозовані результати загалом добре узгоджуються з експериментальними результатами, із завищенням першого режиму відмови приблизно на 10%. Сандхаас та ін. [16] використовували складену 3D-модель деревини, яка може визначати режими руйнування і комбінувати як пластичні, так і крихкі переломи в рамках однієї і тієї ж моделі. Модель розроблена з використанням підходу безперервного пошкодження, в якому можна моделювати прогресуюче руйнування.

Визначаються вісім різних режимів руйнування деревини, а також параметри розм'якшення після того, як відбулося пошкодження. Модель матеріалу програмується як підпрограма в Abaqus [20], яка перевіряє наявність ушкоджень відповідно до різних критеріїв відмови на кожному часовому кроці та оновлює матрицю жорсткості, якщо відбувається збій. Цей підхід дає змогу ідентифікувати режими руйнування та візуалізувати еволюцію пошкоджень у матеріалі. Аналіз дав задовільні результати з точки зору жорсткості та несучої здатності. Результати FEA були приблизно на 20% нижчими порівняно з експериментальними значеннями для лінійно-пружної реакції. Для нелінійної стадії механічна міцність була значно завищена. Щоб уявити розм'якшення через руйнування під час розтягування в зовнішніх ламелях, невеликій частині FEA-моделі надали властивостей пошкодження, що поліпшило нелінійну поведінку [25].

### **1.5 Методи розрахунку багатоповерхових будівель із CLT**

Був проведений статичний розрахунок 4-х поверхової будівлі з CLT панелей у розрахунковому комплексі Dubal (рисунки 1.7-1.8),

розрахунку на сейсмічне навантаження проведено не було.

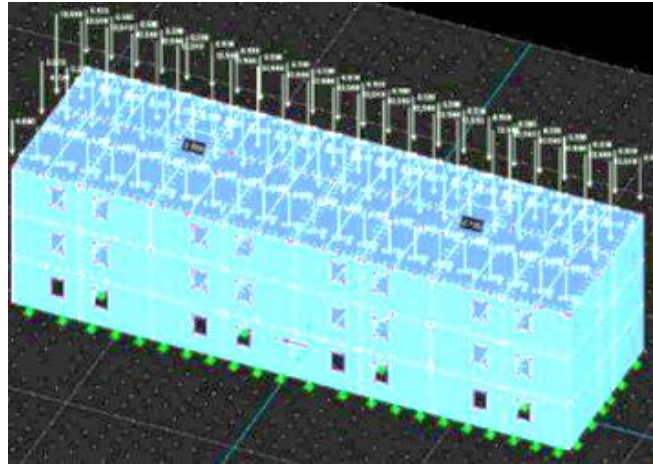


Рисунок 1.7 - Проектна схема будівлі в Dubai

Для оцінки граничного стану перевірки підлягають загальний відносний прогин плити під дією навантаження (комбінація навантажень від власної ваги панелей і експлуатаційного навантаження) і граничні прогини. Як видно на рисунку 1.8, граничний прогин становив 9,22 мм за допустимого прогину в 20 мм.

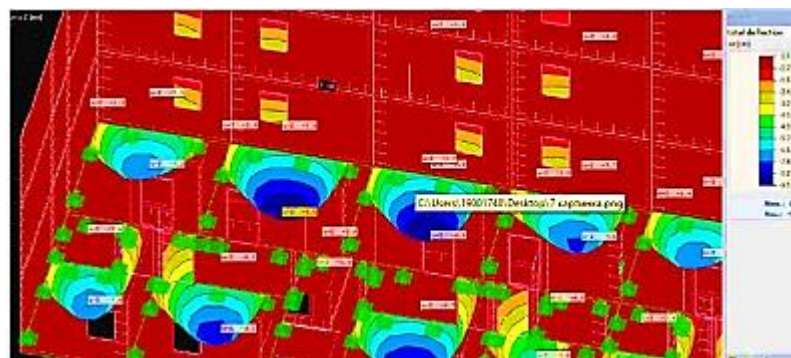


Рисунок 1.8 - Значення вертикальних прогинів

У результаті авторами було встановлено первинну методику статичного розрахунку будівлі з CLT панелей із використанням Revit, RFEM, а також за результатами досліджень було визначено величину допустимих локальних напружень несучого вузла. Подальші випробування матеріалів на розтягнення, стиск, опір



стружці, прогин і локальну деформацію в з'єднаннях можна виконати в програмі RFEM (finite element structural analysis program).

Проблемою дослідження напружено-деформованого стану багатопверхових каркасів будівель на сейсмічний вплив також займалися автори Prof. Gianmarco De Felice, Prof. Vlatka Rajčić, Student: Elisa Moretti, ними було проведено лінійний динамічний аналіз. Лінійний динамічний аналіз складається з:

- визначення способів вібрування конструкції (модальний аналіз);
- розрахунку ефектів сейсмічного впливу, представлених спектром відгуку проекту для кожного з виявлених коливальних режимів.

Нормативна документація Чехії вимагає, щоб усі режими розглядалися з масою участі понад 5% і щоб сума не перевищувала 85%.

У разі розглянутих сил 100% у напрямку x і 30% у напрямку y було отримано зсув максимальної суми 93,7 мм. [17].

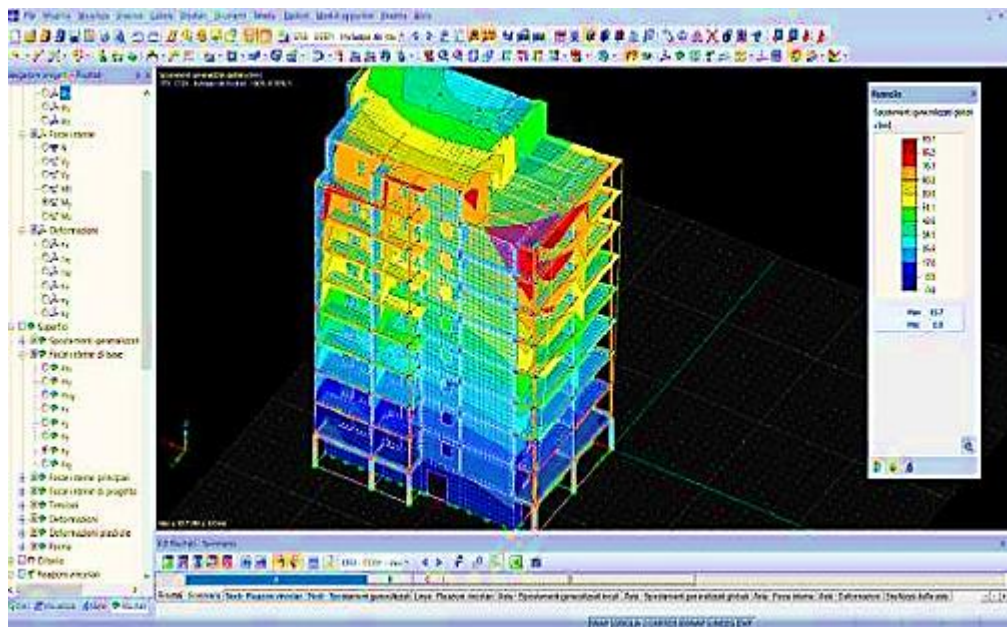


Рисунок 1.9 - Динамічний аналіз 100% X-30%У результатів

У разі розглянутих сил 100% у напрямку y і 30% у напрямку x ми маємо максимальне зміщення 123,38 мм

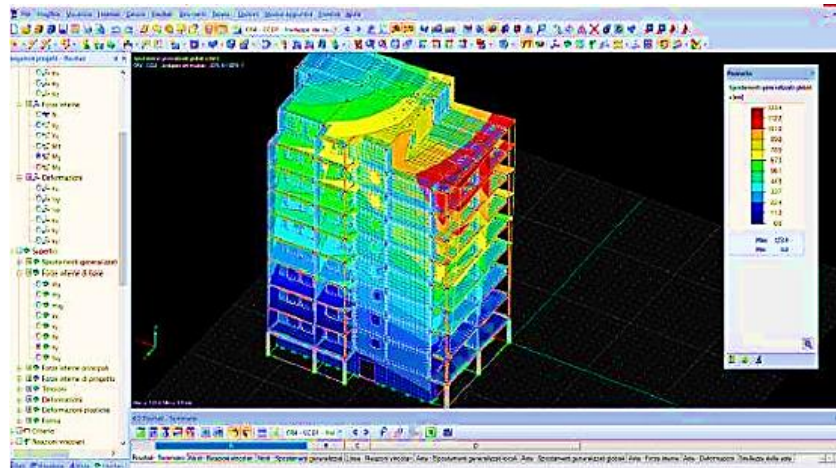


Рисунок 1.10 - Динамічний аналіз 100%Y-30%X результати

Під час дослідження було проведено динамічний розрахунок на дії сейсмічного навантаження 10-ти поверхової будівлі, загальною висотою 30 метрів. Перший поверх спроектовано з бетону, тоді як інші поверхи виконано CLT.

## 1.6 Висновки до розділу

Виконавши огляд літератури, в якій було відображено досвід проєктування багатоповерхових будівель з перехресно клеєної деревини, а також теоретичні підходи до розрахунку деревини перехресно клеєної, з урахуванням ортотропних властивостей матеріалу, можна зробити такі висновки:

- будівництво багатоповерхових будівель і споруд з клеєної деревини широко поширене за кордоном, з'являються багатоповерхові будівлі, каркас яких повністю виконаний з деревини.

- світовий досвід показує різноманітність підходів до розрахунку панелей з деревини перехресно клеєної, деякі з них є експериментальними, заснованими на тестуванні моделей. У практиці використовують: балкову теорію розрахунку Тимошенка, теорію аналогії зі зсувом, теорію пучків Ейлера-Бернуллі, теорію композитів.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ СЛТ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ З УРАХУВАННЯМ ОРТОТРОПНИХ ТА ІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИНИ

#### 2.1 Моделювання матеріалів. Ортотропна пружність

Деревина і композити з них важко піддаються моделюванню. Матеріал деревини неоднорідний, сильно анізотропний, має різну міцність під час стиснення і розтягування, а також в'язкі та крихкі режими руйнування, що відбуваються одночасно. Усі ці питання часто призводять до чисельних проблем, і підходи для моделювання деревини зазвичай вибирають залежно від конкретного застосування. Крихке моделювання можна проводити за допомогою механіки руйнування з використанням континуальної структури, а в'язкі моделі можуть охоплювати теорію пластичності з використанням ортотропних критеріїв плинності, таких як критерій Гілла або критерій Цай-Ву [21].

Деревину можна розглядати як композит природного походження, що складається з трубчастих клітин у лігніновій матриці.

Завдяки такій структурі деревина має різні властивості в різних напрямках. Сама деревина може розглядатися як ортотропний матеріал із трьома головними матеріальними осями.

Перша - у поздовжньому напрямку, а дві інші - у тангенціальному та радіальному напрямках [21]. Основні напрямки ортотропної структури матеріалу показано на рисунку 2.1

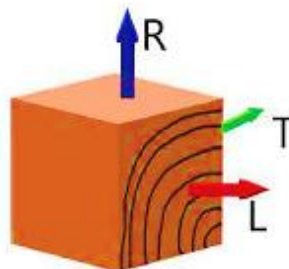


Рисунок 2.1 – Напрямки матеріалу

Жорсткість і модуль зсуву в різних напрямках показані на рисунку 2.2

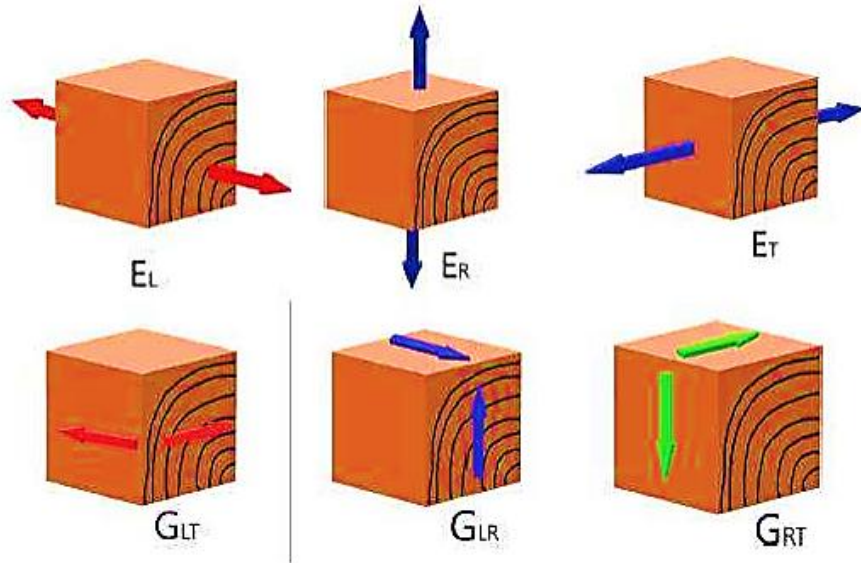


Рисунок 2.2 – Модуль жорсткості та зсуву в різних напрямках

Ортотропні матеріали - такі матеріали, у яких є принаймні дві площини симетрії, де властивості матеріалу не залежать від напрямку в межах кожної площини [14].

Фундаментальний закон Гука для ортотропного матеріалу можна подати у вигляді:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix}$$

Рисунок 2.3 – Матриця жорсткості з позначеннями для напрямків відповідно до рисунка 2.2

Матриця відповідності складається з 12 змінних, але через вимоги симетрії співвідношення між коефіцієнтами Пуассона дано у вигляді:

$$\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$$

скоротивши при цьому кількість незалежних змінних до 9.

## 2.2 Моделювання CLT панелі перекриття

З метою подальшого дослідження напружено-деформованого стану дерев'яної 9-ти поверхової будівлі з CLT панелей, було виконано серію розрахунків і аналіз НДС окремої панелі з CLT у ПК ANSYS і ПК Ліра Софт. Було верифіковано фізико-механічні властивості деревини перехресно клеєної та проведено порівняльний аналіз двох моделей з урахуванням ортотропних властивостей та ізотропних властивостей перехресно клеєної деревини.

Далі на основі отриманої моделі матеріалу було проведено параметричну оптимізацію в АК ANSYS і отримано усереднені фізико-механічні властивості для багатошарової панелі.

Аналіз впливу ортотропної структури матеріалу було виконано для моделі панелі розміром 3x6 м., товщиною 165 мм, що складається з 5 шарів товщиною по 33 мм, склеєних між собою (рисунок 2.4). Плита закріплена по двох коротких сторонах шарнірно-рухою опорою праворуч і шарнірно-нерухою опорою ліворуч. Розрахунок панелі проводили на поєднання навантажень: експлуатаційне, власна вага панелі, власна вага від матеріалу підлоги. Збір навантажень наведено в таблиці 2.1.

Тип розрахунку в ПК Ansys 2021 - статичний лінійний аналіз з урахуванням лінійно-пружних властивостей матеріалу та умов опирання.

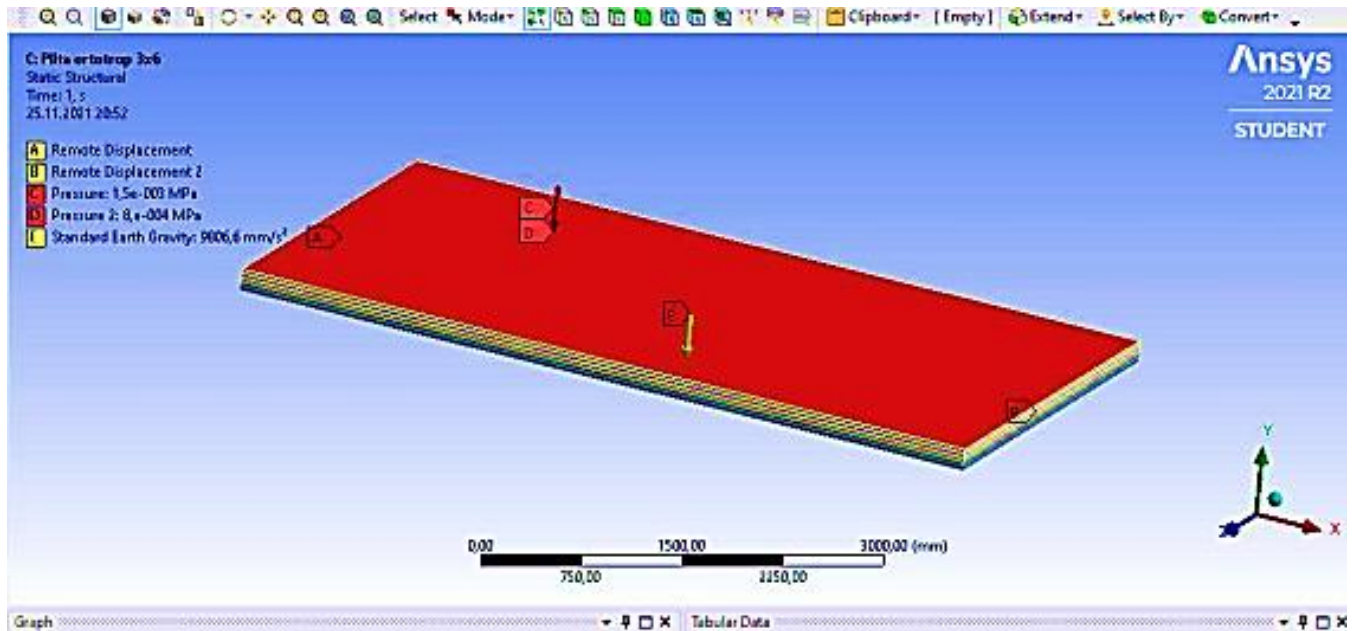


Рисунок 2.4 – Розрахункова модель в Ansys

Таблиця 2.1 – Збір навантажень на панель перекриття

Вид навантаження	Значення, кН/м <sup>2</sup>	Значення, МПа
Власна вага панелі	0,825	0,000825
Експлуатаційне навантаження	1,5	0,0015
Власна вага матеріалів підлоги	0,8	0,0008
Сумарне навантаження	3,12	0,00312

Для розрахунку ортотропної плити, ґрунтуючись на фундаментальних дослідженнях фізико-механічних властивостей деревини, наведених у книзі "Анізотропія деревини і деревних матеріалів", Ашкеназі Е.К. [14], а також ґрунтуючись на експериментальних даних, що підтверджують фізико-механічні властивості CLT панелей, було визначено параметри матеріалу в системі координатних осей, що показана на рисунку 2.2.

У результаті було отримано таблицю 2.2. фізико-механічних

характеристик CLT панелі.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні характеристики CLT панелі

Шар	$E_{\text{позд}} (x)$ МПа	$E_{\text{попер}} (y)$ МПа	$G_{\text{позд}}(xy)$ МПа	$G_{\text{попер}} (xy)$ МПа	$\nu_{\text{позд}}(xy)$ МПа	$\nu_{\text{попер}} (xy)$ МПа
Поздовжній	11700	390	730	73	0,35	0,07
Поперечний	9000	300	560	56	0,35	0,07

Завдання отриманих фізико-механічних характеристик поздовжнього і поперечного шарів CLT панелі в ПК Ansys 2021 наведено на рисунку 2.5, 2.6.

Properties of Outline Row 4: Wood 1 layer 2				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	500	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input checked="" type="checkbox"/>
5	Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C <sup>-1</sup>	
6	Isotropic Elasticity			<input checked="" type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	2,278E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3742		
10	Bulk Modulus	3,018E+10	Pa	
11	Shear Modulus	8,2885E+09	Pa	
12	Orthotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
13	Young's Modulus X direction	11700	MPa	<input type="checkbox"/>
14	Young's Modulus Y direction	390	MPa	<input type="checkbox"/>
15	Young's Modulus Z direction	390	MPa	<input type="checkbox"/>
16	Poisson's Ratio XY	0,35		<input type="checkbox"/>
17	Poisson's Ratio YZ	0,07		<input type="checkbox"/>
18	Poisson's Ratio XZ	0,07		<input type="checkbox"/>
19	Shear Modulus XY	730	MPa	<input type="checkbox"/>
20	Shear Modulus YZ	73	MPa	<input type="checkbox"/>
21	Shear Modulus XZ	730	MPa	<input type="checkbox"/>
22	Tensile Yield Strength	Tabular		<input type="checkbox"/>
23	Tensile Ultimate Strength	Tabular		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.5 – Поздовжній шар CLT панелі

Properties of Outline Row 3: Wood 1 layer				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	500	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input checked="" type="checkbox"/>
5	Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C <sup>-1</sup>	
6	Isotropic Elasticity			<input checked="" type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	2,278E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3742		
10	Bulk Modulus	3,018E+10	Pa	
11	Shear Modulus	8,2885E+09	Pa	
12	Orthotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
13	Young's Modulus X direction	9000	MPa	
14	Young's Modulus Y direction	300	MPa	
15	Young's Modulus Z direction	300	MPa	
16	Poisson's Ratio XY	0,35		
17	Poisson's Ratio YZ	0,07		
18	Poisson's Ratio XZ	0,07		
19	Shear Modulus XY	560	MPa	
20	Shear Modulus YZ	56	MPa	
21	Shear Modulus XZ	560	MPa	
22	Tensile Yield Strength	Tabular		
23	Tensile Ultimate Strength	Tabular		

Рисунок 2.6 – Поперечний шар CLT панелі

### 2.3 Розрахунок CLT панелей у ПК Ansys

Результати розрахунку багатошарової плити з урахуванням ортотропних властивостей, за різної густоти сітки скінченних елементів (СЕ), у вигляді ізополів прогинів та еквівалентних напружень на комбінацію навантажень за таблицею 2.1 показано на рисунках 2.7-2.13

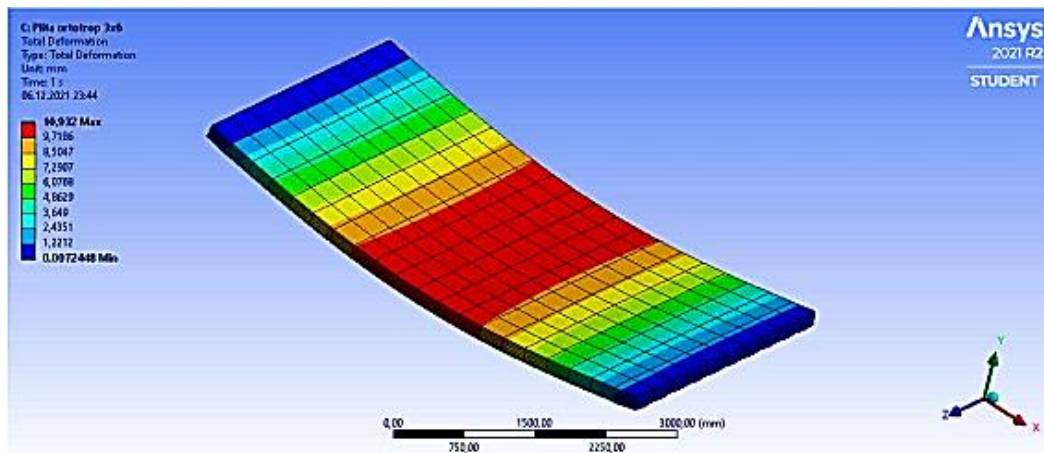


Рисунок 2.7 – Розмір сітки 300 мм, максимальні переміщення 10,9 мм



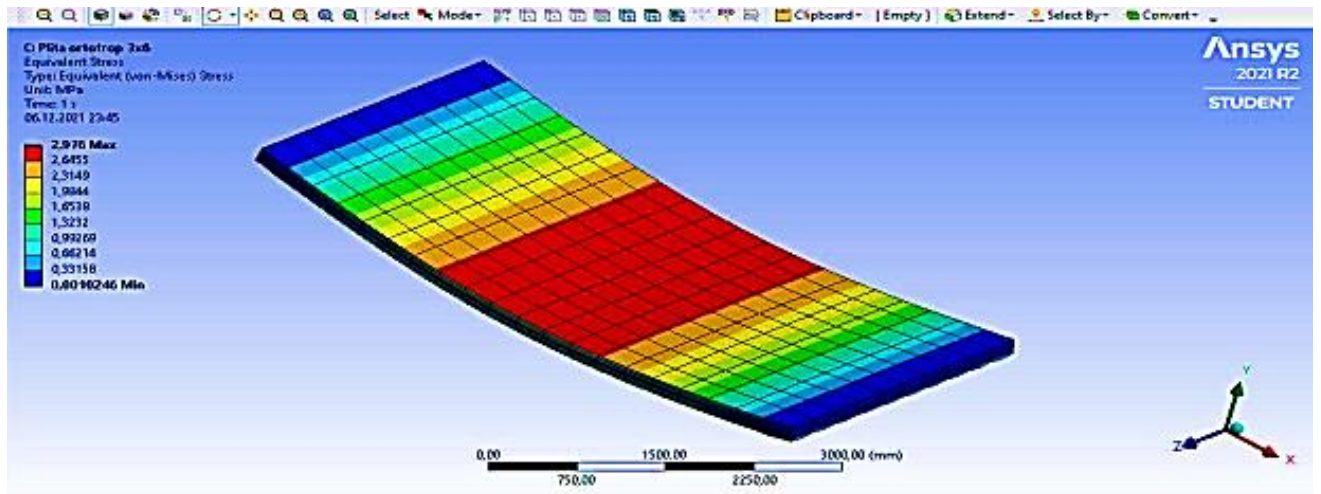


Рисунок 2.8 – Розмір сітки 300 мм, максимальні напруження 2,97 МПа

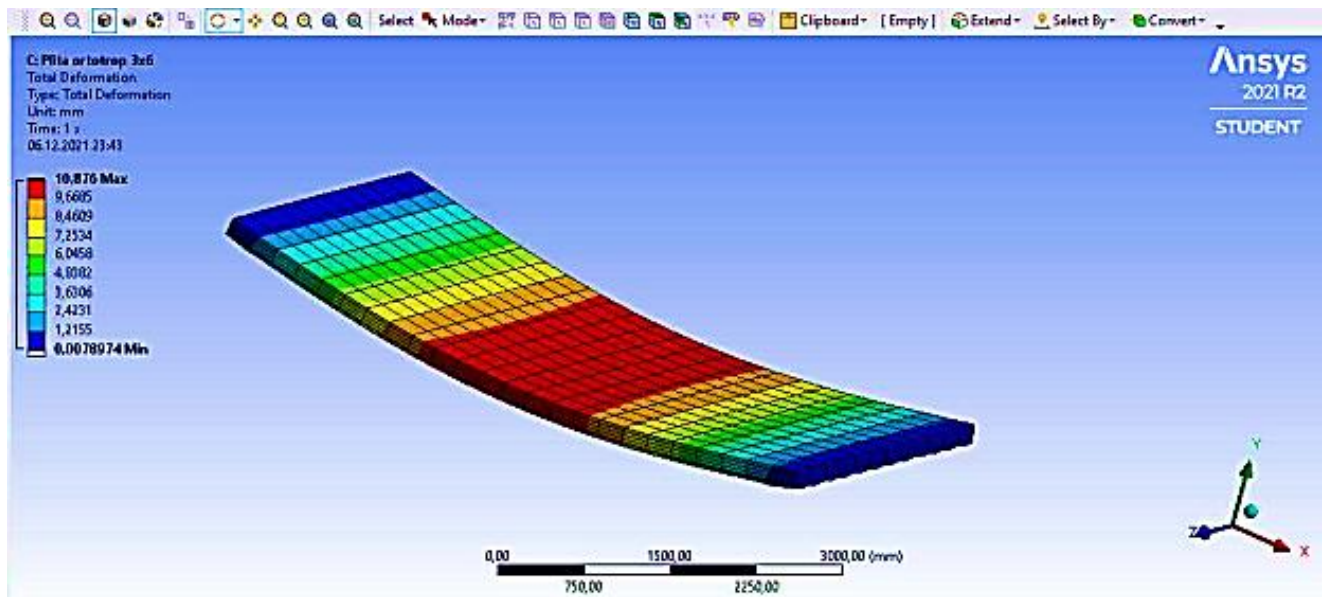


Рисунок 2.9 – Розмір сітки 250 мм, максимальні переміщення 10,87 мм

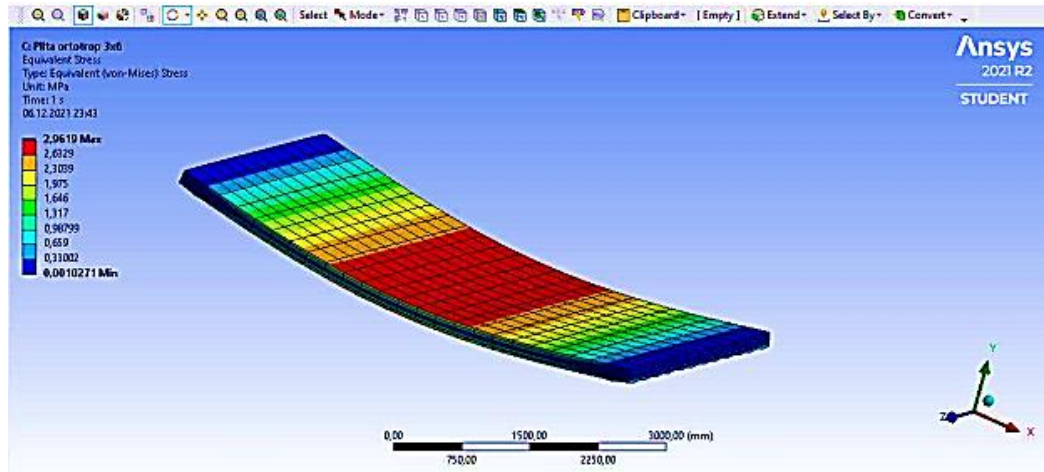


Рисунок 2.10 – Розмір сітки 250 мм, максимальні напруження 2,96 МПа

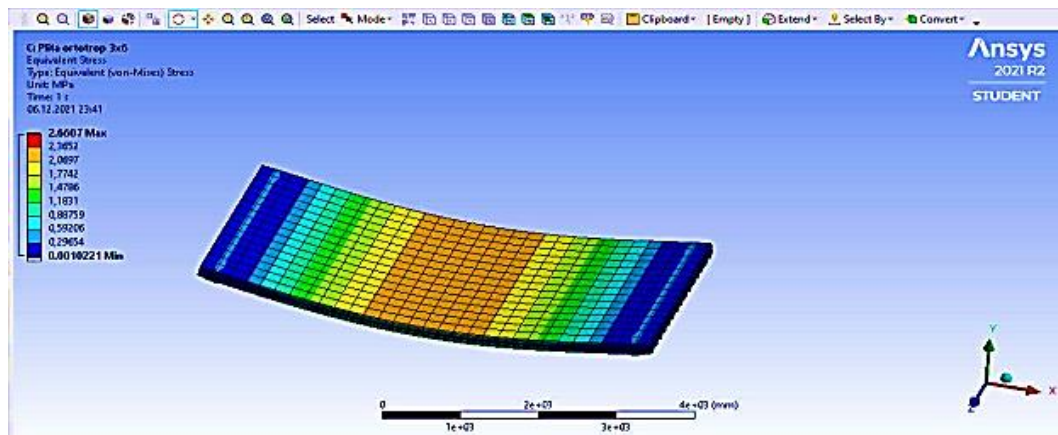


Рисунок 2.11 – Розмір сітки 250 мм, максимальні напруження 2,66 МПа

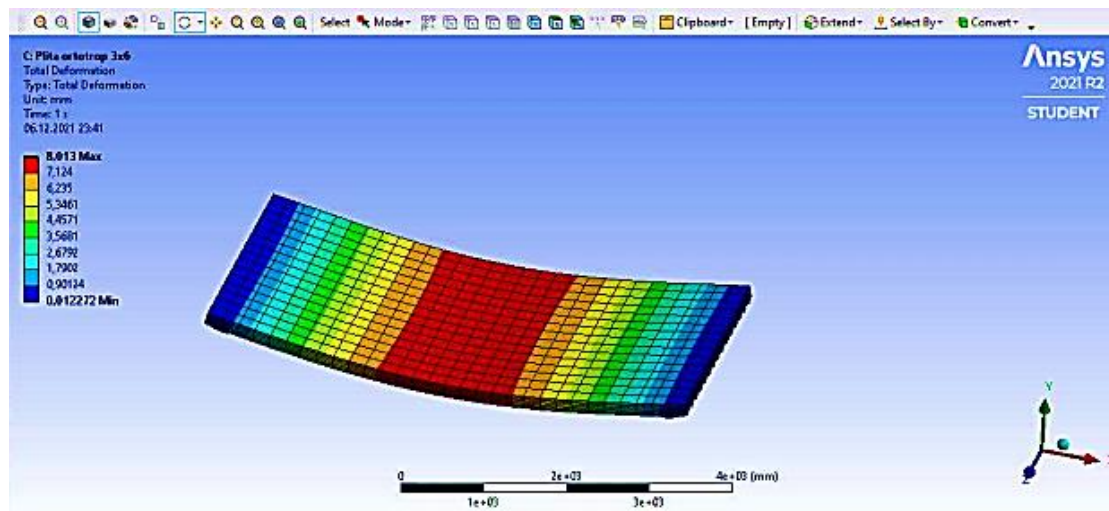


Рисунок 2.12 – Розмір сітки 200 мм, максимальні переміщення 8,01 мм

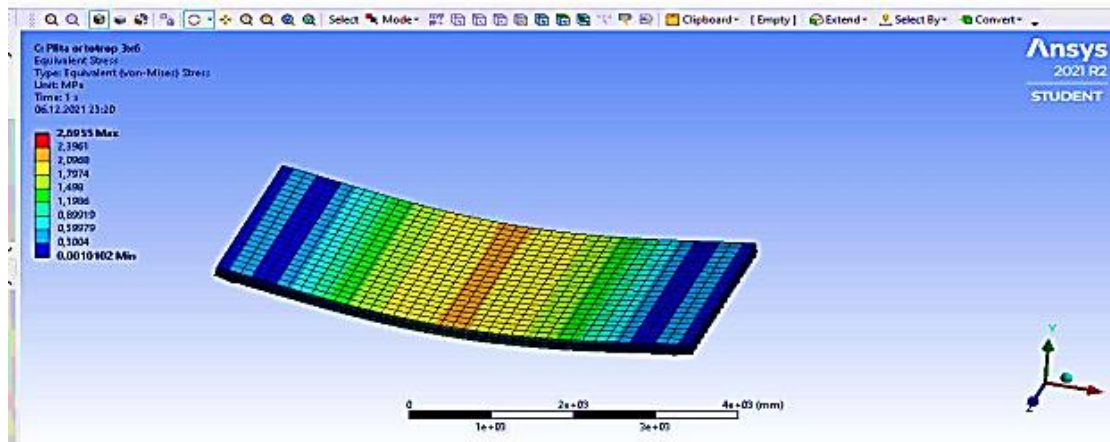


Рисунок 2.13 – Розмір сітки 150 мм, максимальні напруження 2,69 МПа

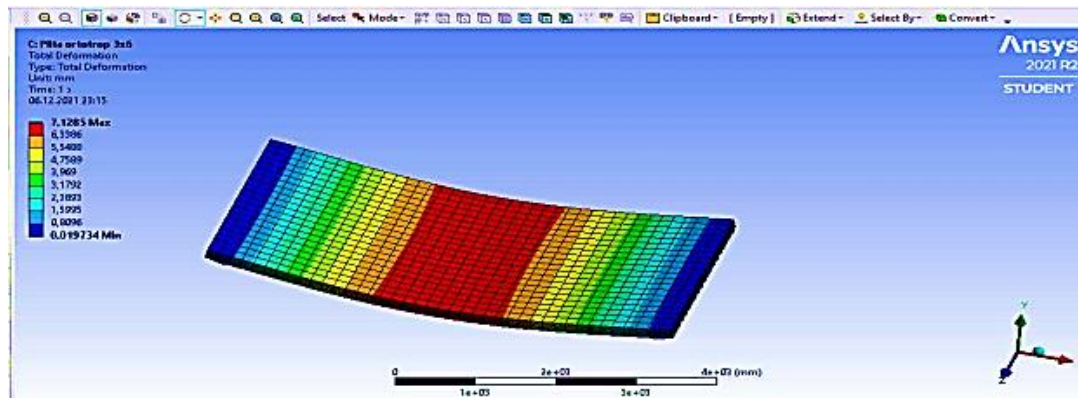


Рисунок 2.14 – Розмір сітки 150 мм, максимальні переміщення 7,13 мм

Таблиця 2.3 – Напруження і переміщення за різного розміру сітки

Розмір сітки в мм	Напруження в МПа	Переміщення в мм
300	2,97	10,9
250	2,96	10,87
200	2,66	8,01
150	2,69	7,13

Графік залежностей напружень і переміщень від розміру сітки показано на рисунку 2.15.

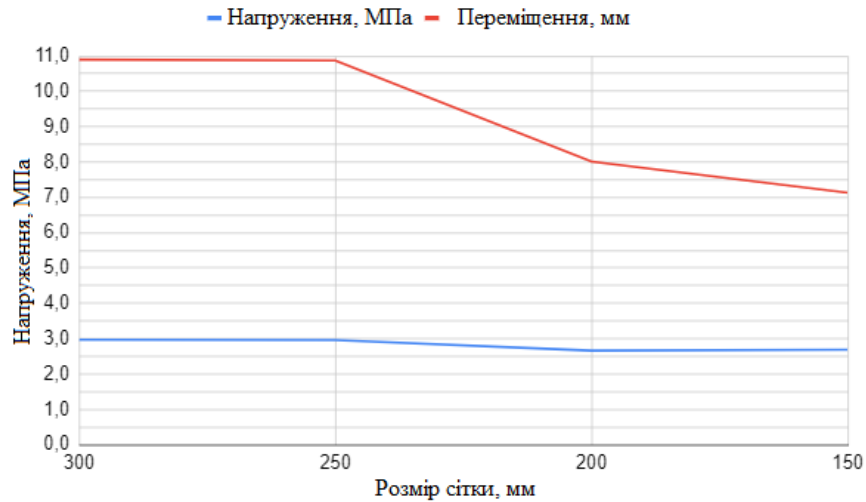


Рисунок 2.15 – Графік залежності напружень і переміщень від розміру сітки в ортотропній моделі матеріалу

Як видно з графіка, переміщення й еквівалентні напруження практично стабілізуються за кроку скінченно-елементної сітки від 200-150 мм. Значення переміщень змінюються на 35%, напружень на 10% зі зменшенням розміру сітки.

Для порівняльного аналізу впливу властивостей ортотропії на НДС плити розглянемо простішу її модель з ізотропними властивостями.

Завдання фізико-механічних характеристик ізотропної плити CLT панелі в ПК Ansys 2021 наведено на рисунку 2.16.

Properties of Outline Row 5: Wood, IZOTROOP				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	Table		
3	<input checked="" type="checkbox"/> Density	500	kg m <sup>-3</sup>	
4	<input type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	<input checked="" type="checkbox"/> Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C <sup>-1</sup>	
6	<input type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	10000	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,49		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	3,3557E+09	Pa	
12	<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	Tabular		
13	<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	Tabular		

Рисунок 2.16 – Ізотропні характеристики матеріалу

Результати розрахунку ізотропної плити, зокрема за різного розміру сітки SE, у вигляді ізополів прогинів та еквівалентних напруг на комбінацію навантажень, наведену в таблиці 2.4, наведені на рисунках 2.17 - 2.24.

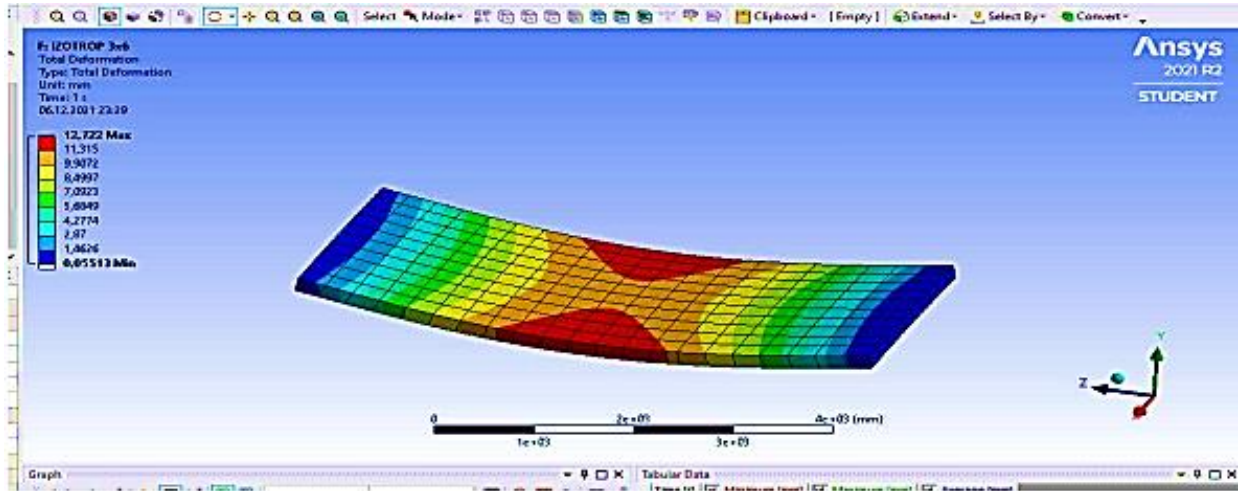


Рисунок 2.17 – Розмір сітки 300 мм, максимальні переміщення 12,7 мм

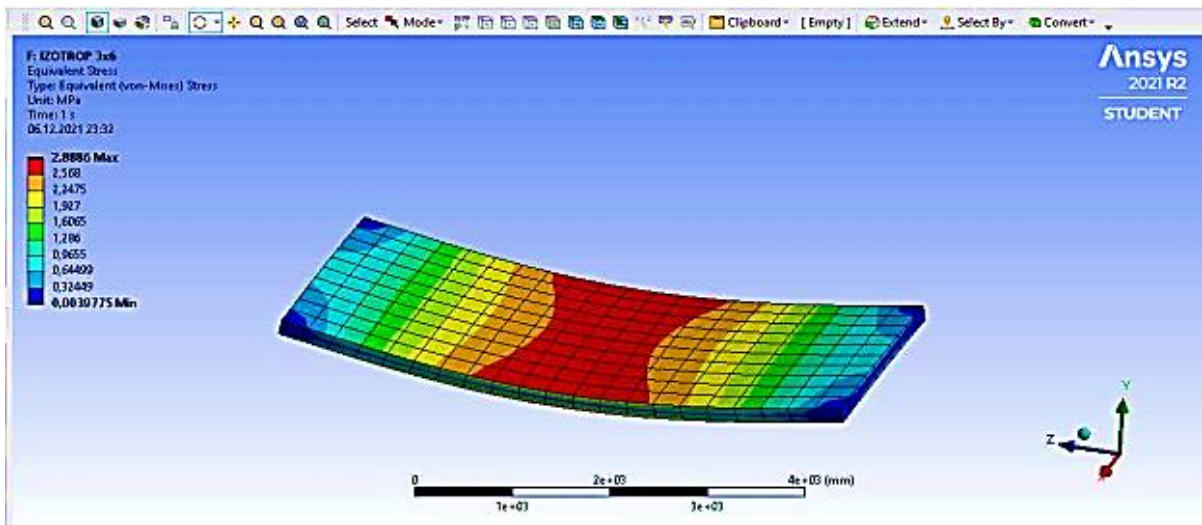


Рисунок 2.18 – Розмір сітки 300 мм, максимальні напруження 2,8 МПа

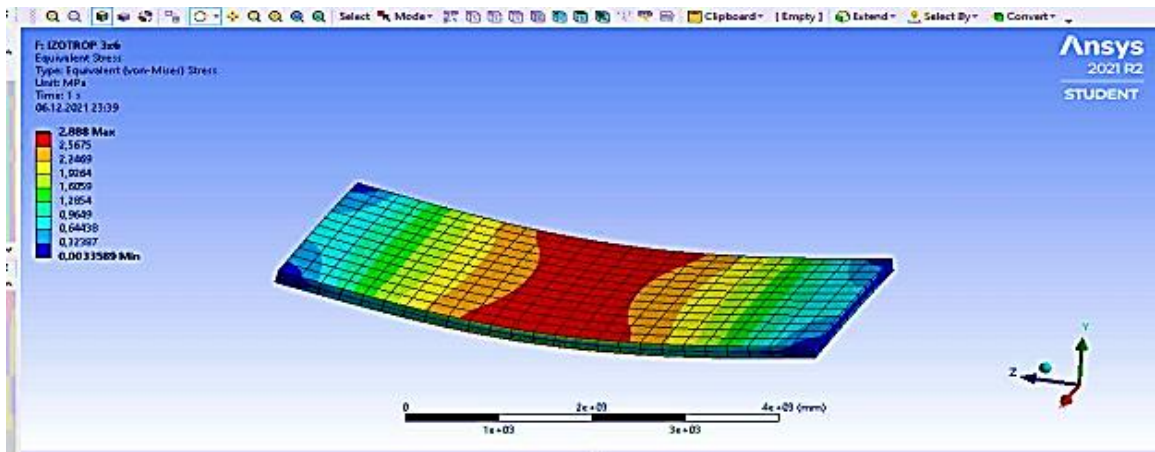


Рисунок 2.19 – Розмір сітки 250 мм, максимальні напруження 2,888 МПа

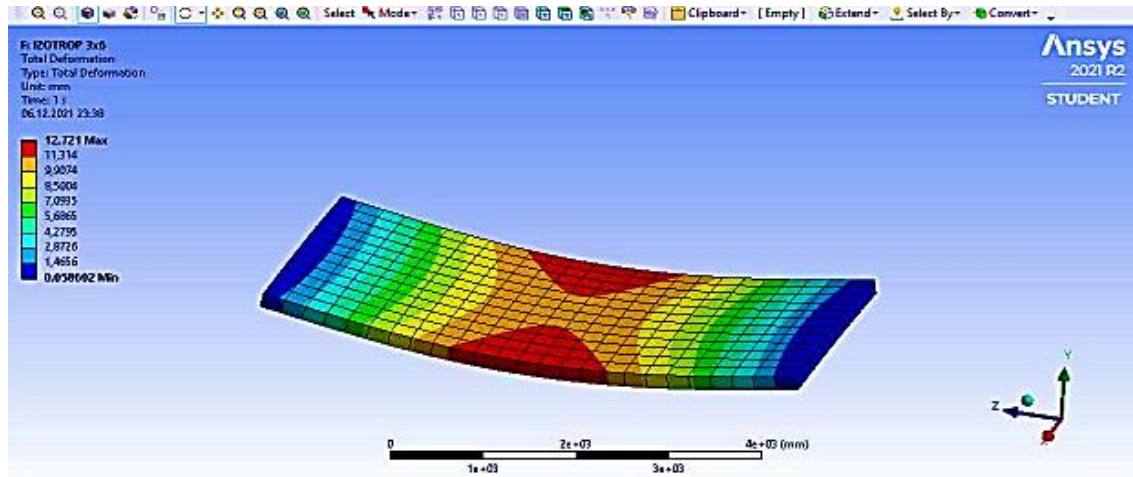


Рисунок 2.20 – Розмір сітки 250 мм, максимальні переміщення 12,721 мм

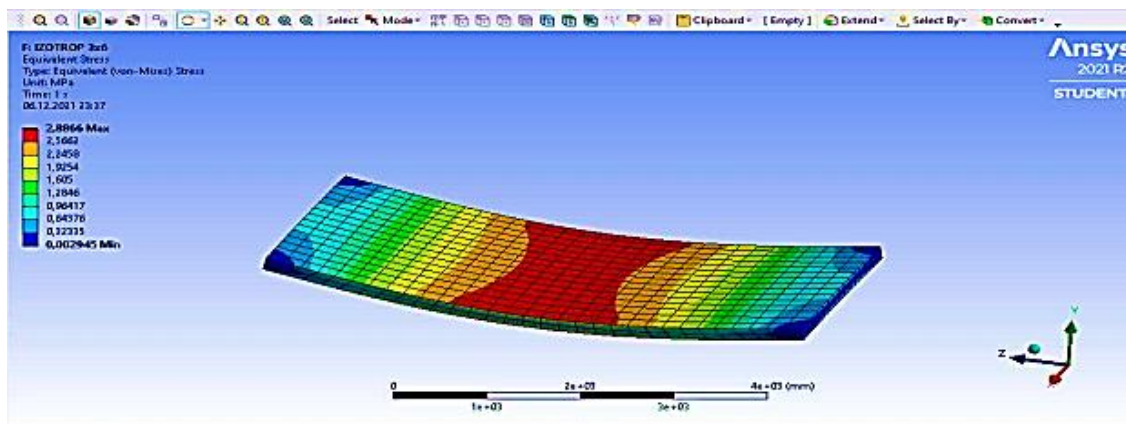


Рисунок 2.21 – Розмір сітки 200 мм, максимальні напруження 2,886 МПа

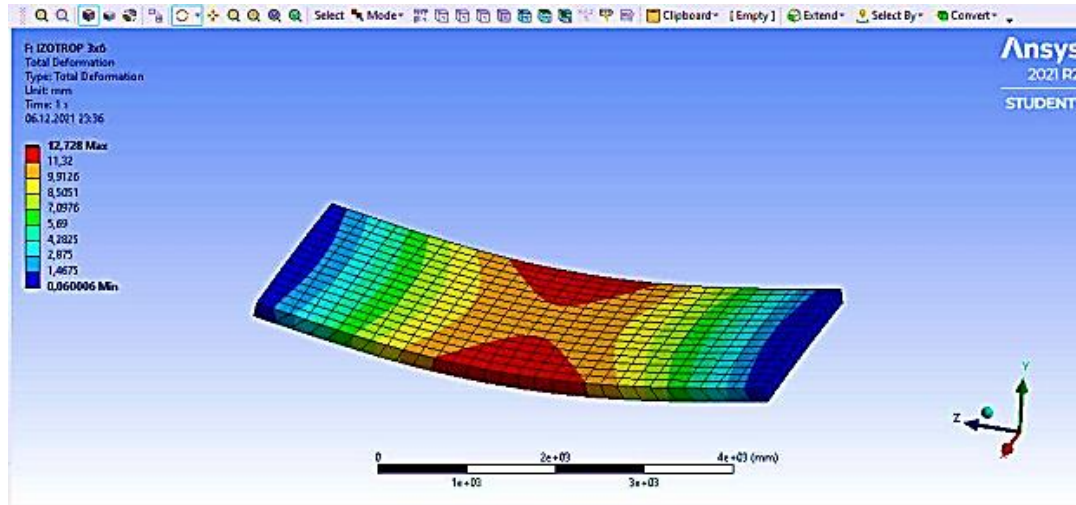


Рисунок 2.22 – Розмір сітки 200 мм, максимальні переміщення 12,728 мм

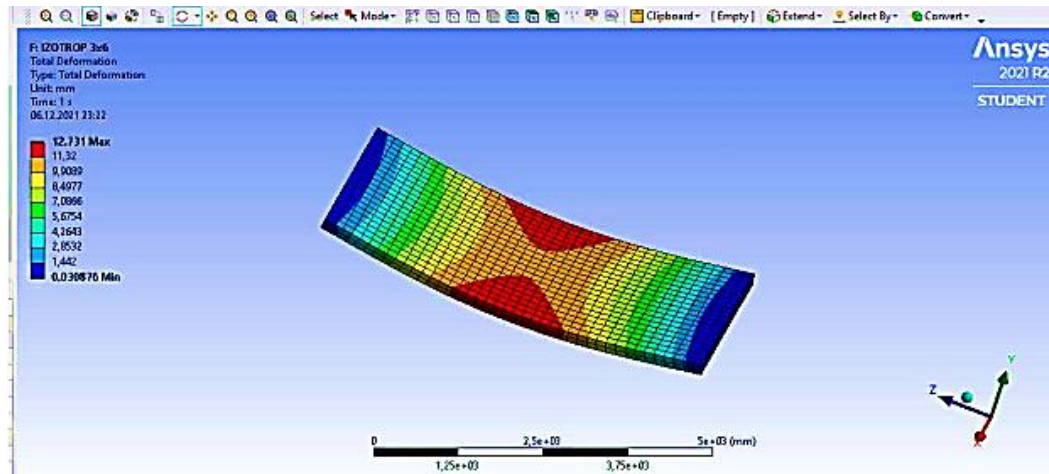


Рисунок 2.23 – Розмір сітки 150 мм, максимальні переміщення 12,731 мм

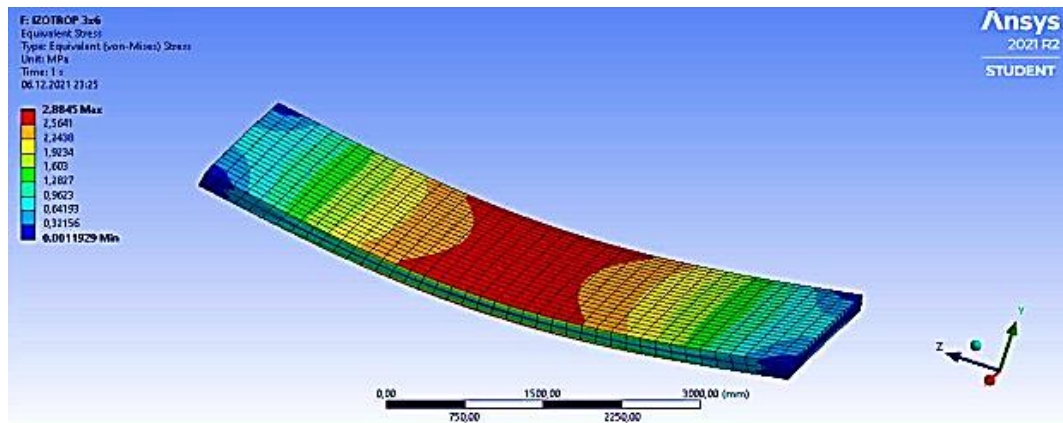


Рисунок 2.24 – Розмір сітки 150 мм, максимальні напруження 2,884 МПа

Таблиця 2.4 – Напруження і переміщення під час розрахунку при різному розмірі сітки

Розмір сітки в мм		Напруження в МПа	Переміщення в мм
300		2,888	12,722
250		2,888	12,721
200		2,886	12,728
150		2,884	12,731



Рисунок 2.25 – Графік залежності напружень і переміщень від розміру сітки в ортотропній моделі матеріалу

За результатами розрахунку панелі з ізотропною моделлю матеріалу за різного розміру сітки SE від 300 мм до 150 мм значення напружень і переміщень змінюються менш ніж на 1%.

Для порівняння залежностей напружень і переміщень від розміру сітки SE в ізотропному й ортотропному матеріалі побудовано графік рисунок 2.26. З огляду на розрахунки видно, що під час зміни розміру сітки в ізотропному матеріалі значення



переміщень і напруг залишалося незмінним, тоді як в ортотропному матеріалі значення переміщень зі зміною розміру сітки зменшилися на 33%.

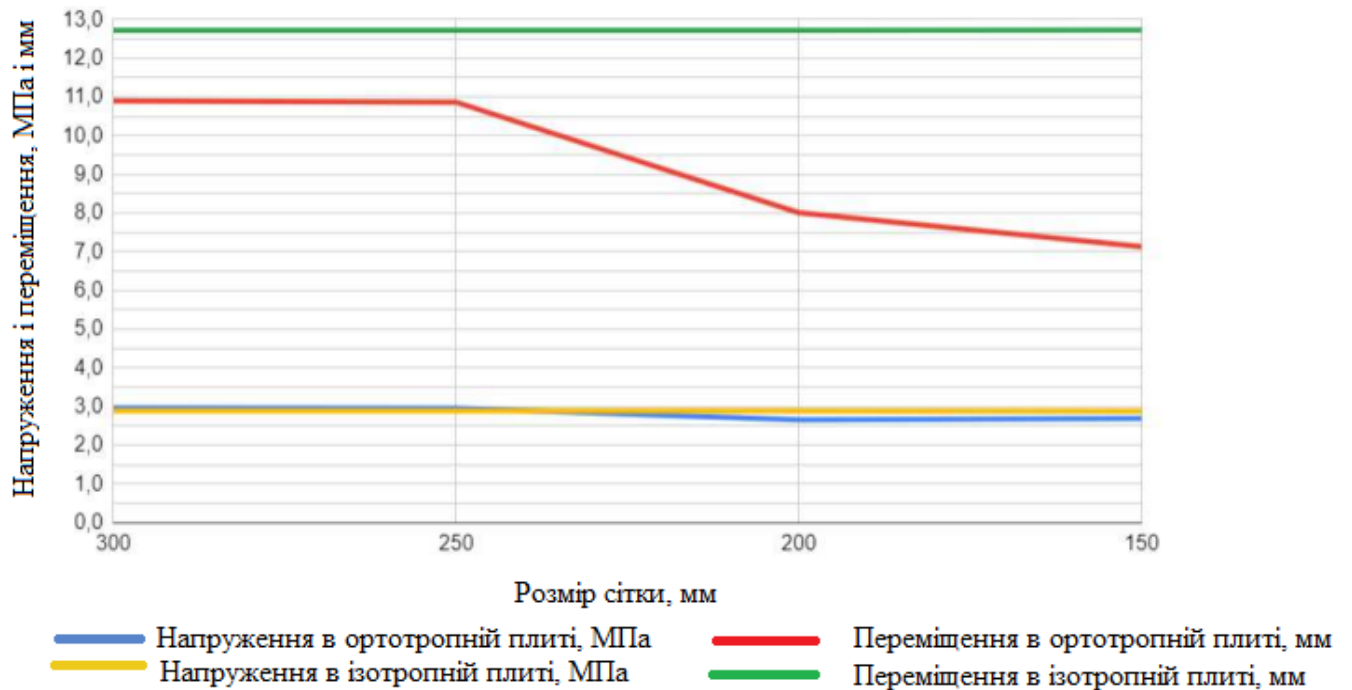


Рисунок 2.26 – Графік порівняння залежностей ортотропного матеріалу та ізотропного

Під час розрахунку ізотропної та ортотропної плити за різних розмірів сітки SE від 300 мм до 150 мм було виявлено значні відхилення в переміщеннях, тоді як напруження залишалися порівняно на одному рівні за зміни розміру сітки в ізотропній та ортотропній плиті (2,6-2,8 МПа). Під час розрахунку ізотропної плити переміщення і напруження були практично постійними, переміщення в ортотропній плиті збільшувалися зі збільшенням розміру сітки та стабілізувалися за розміру сітки у 250-300 мм. Різниця в переміщеннях за цього розміру становить 15% між ортотропною та ізотропною плитою.

## 2.4 Розрахунки CLT плити в ПК ЛІРА

Для підтвердження достовірності результатів розрахунку, отриманих у ПК Ansys 2021 був проведений розрахунок ідентичної плити з аналогічними геометричними характеристиками і комбінацією навантажень у ПК Ліра 10.12.

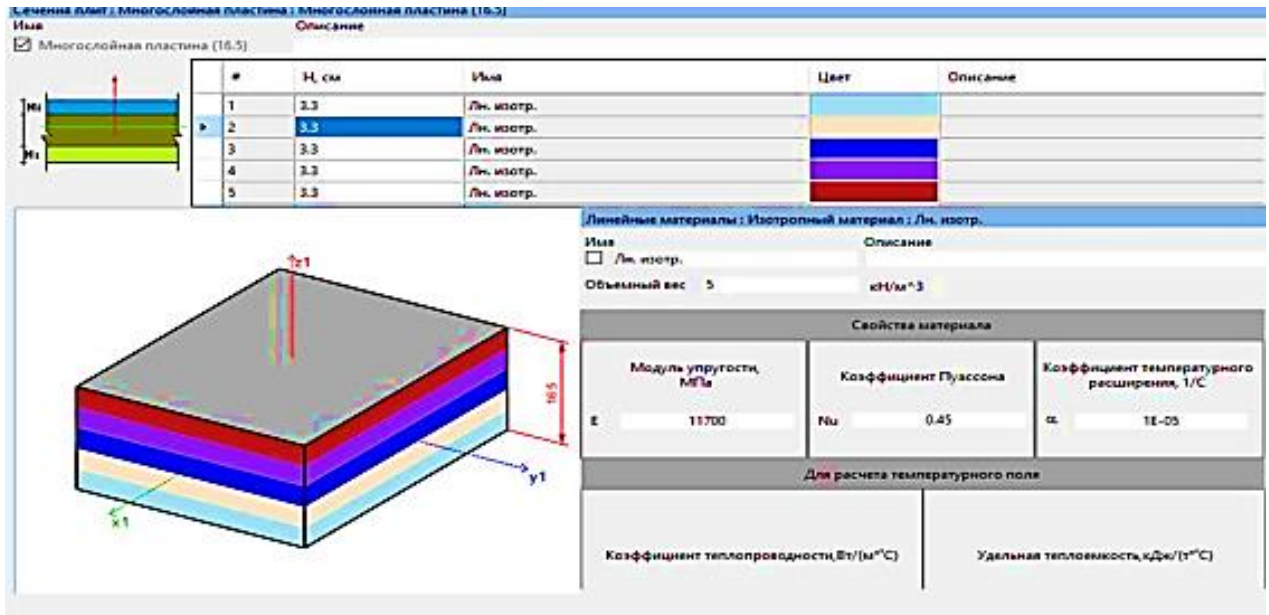
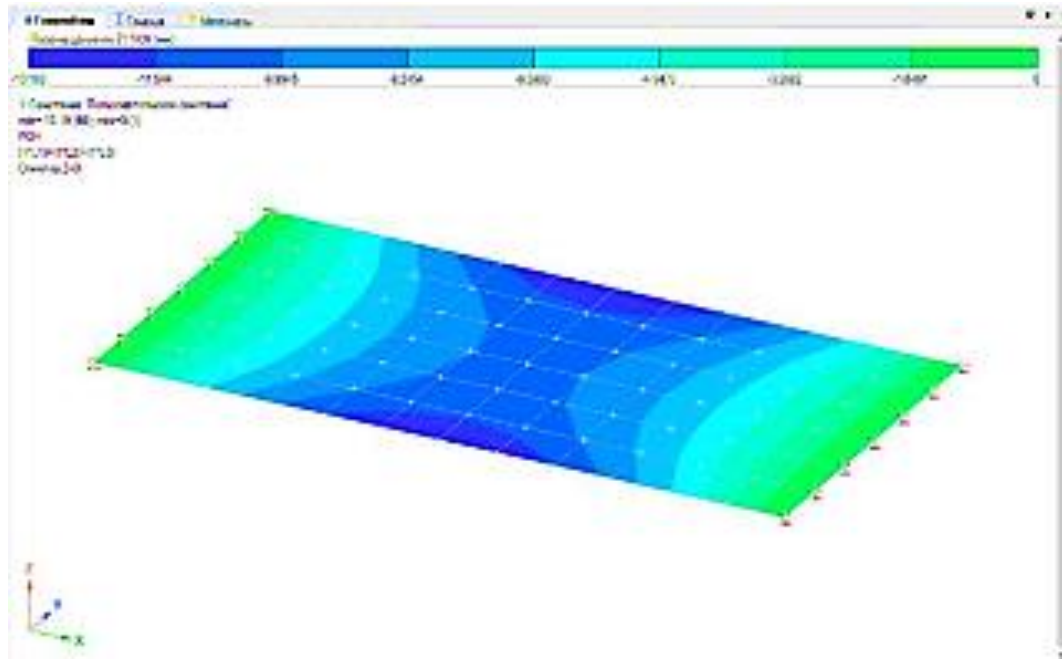
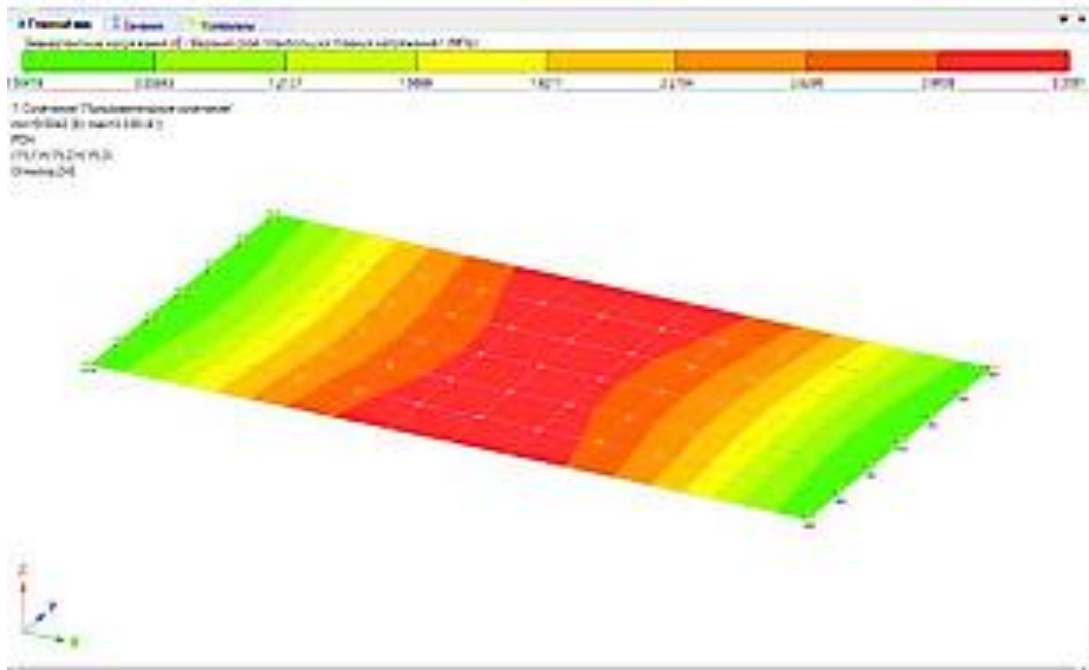


Рисунок 2.27 – Спосіб завдання багатошарової плити із завданням ізотропних характеристик для кожного шару

Результати розрахунку плити зі CLT у вигляді ізополів прогинів і еквівалентних напружень на комбінацію навантажень показано на рисунку 2.28.



а)



а - переміщення б - напруження

Рисунок 2.28 – Результати розрахунку в ПК ЛІРА

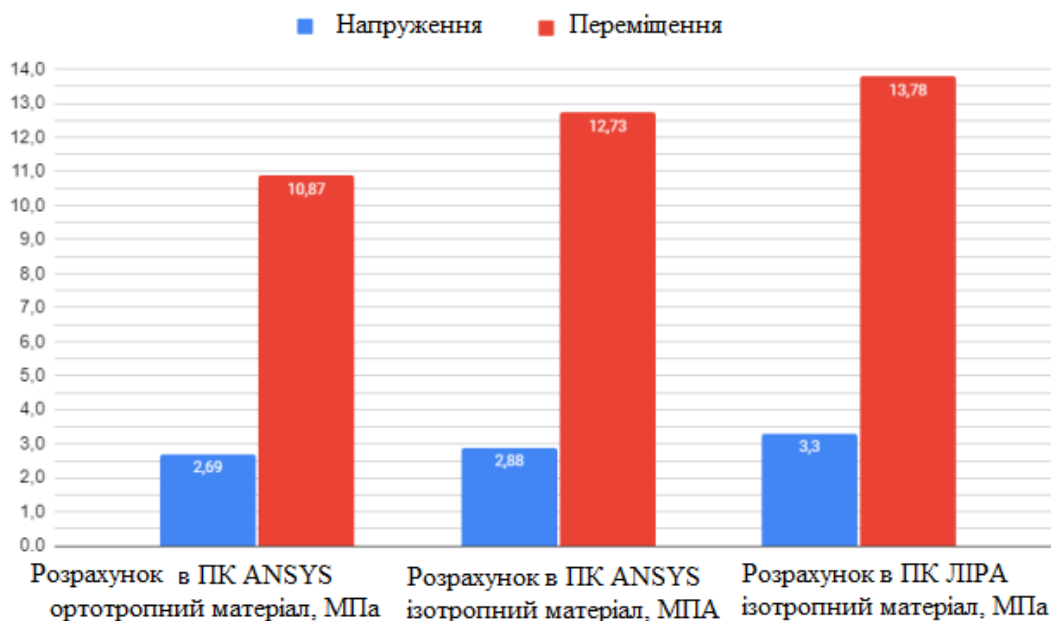


Рисунок 2.29 – Діаграма отриманих даних за напруженнями і переміщеннями

Висновки: За результатами розрахунку було виявлено найкращу роботу ортотропної моделі матеріалу. Еквівалентні напруження в ортотропній моделі матеріалу під час розрахунку в ПК ANSYS на 18,12 % відсотків менші, ніж в ізотропній моделі під час розрахунку в ПК Ліра, прогин на 21,1%. Також, у даному розрахунку було виявлено, що при зміні розміру сітки SE ортотропної моделі матеріалу в ПК ANSYS з 300 мм, до 150 мм, переміщення змінилися на 35,2% з 10,88 мм до 6,8 мм. Отримані дані еквівалентних напружень за цих навантажень і ортотропної моделі матеріалу збігаються з отриманими даними під час розрахунку інших фахівців.

## 2.5 Топологічна оптимізація CLT плити перекриття

Топологічна оптимізація є видом оптимізації форми конструкції, яку іноді називають оптимізацією компонування. Мета топологічної оптимізації полягає у визначенні найкращого використання матеріалу для досліджуваного об'єкта або

конструкції, так, щоб цільова функція (наприклад, загальна жорсткість або еквівалентні напруження) мали максимальне або мінімальне значення за наявності наявних обмежень (таких, наприклад, як зменшення об'єму або маси). На відміну від традиційної оптимізації, топологічна оптимізація не вимагає зазначення параметрів оптимізації (тобто незалежних змінних, що піддаються оптимізації) у явному вигляді. У топологічній оптимізації параметром оптимізації є функція розподілу матеріалу за обсягом конструкції.

Метою даної топологічної оптимізації є зменшення матеріаломісткості клеєної деревини та підвищення теплоізоляційних і звукоізоляційних властивостей без втрати несучої здатності. Розглядають панель із CLT розміром 33х6 м, товщиною 165 мм, за тих самих граничних умов, що й у попередніх розрахунках, на дію рівномірно розподіленого навантаження  $q = 3,12 \text{ кН/м}$  (рисунок 2.30).

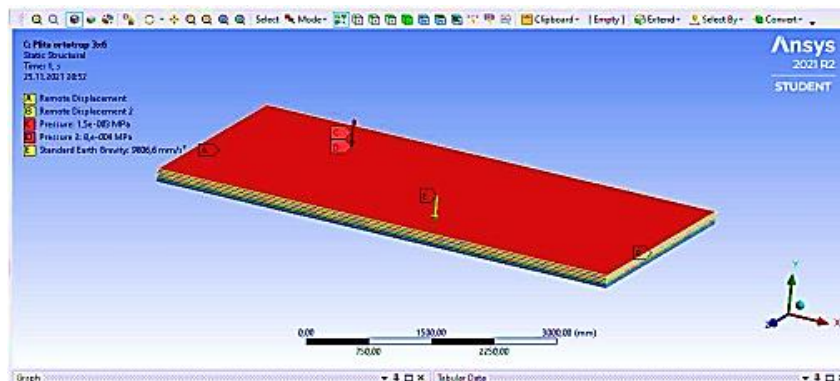
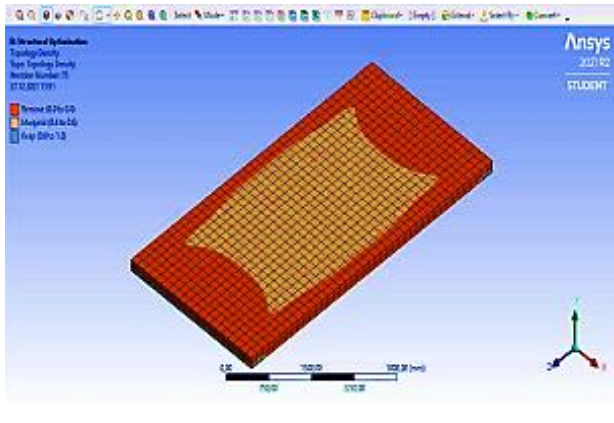
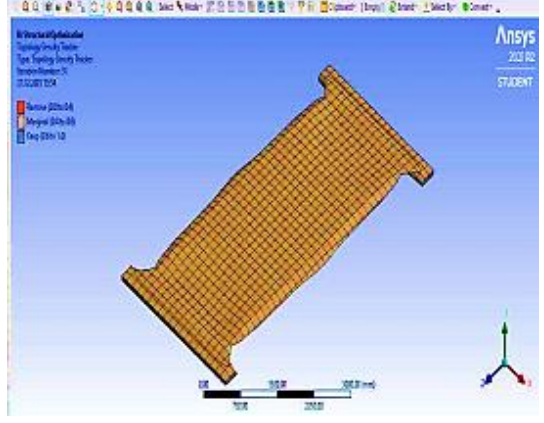
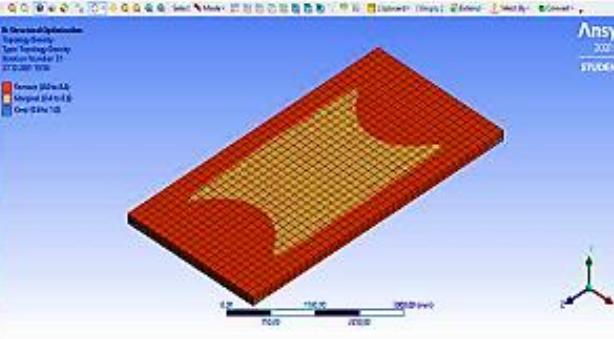
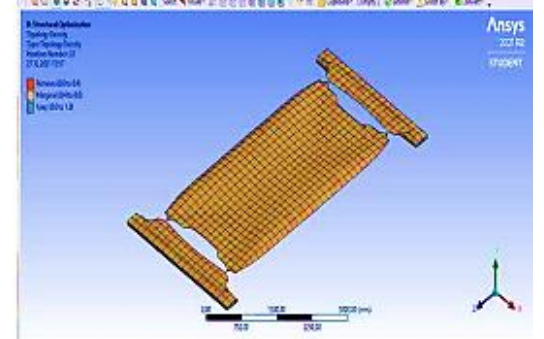
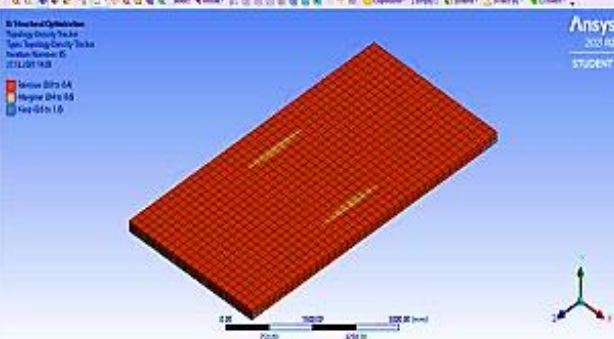
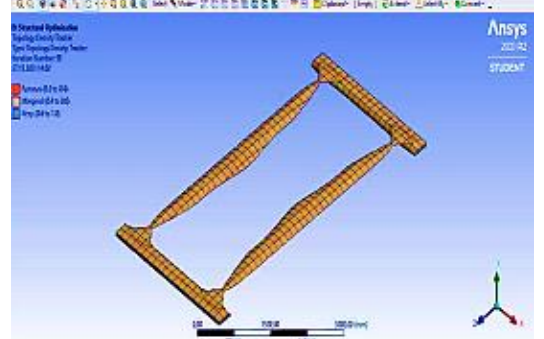


Рисунок 2.30 – Розрахункова модель у ПК Ansys

Як критерій топологічної оптимізації приймали досягнення максимальної жорсткості за заданого збереження маси матеріалу від 90% до 30%.

Для апроксимації плити використовували плоский, 8-вузловий скінченний елемент Shell93 з кроком сітки крок сітки 0.15 м. Для розв'язання задачі топологічної оптимізації знадобилося 20 ітерацій. Результати оптимізації подано у вигляді топологічних форм за збереження маси панелі від 90% до 30% і зведено в таблицю 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати топологічної оптимізації панелі

Критерій	Результат топологічної оптимізації топологічної маси	
90%		
60%		
30%		

Як видно з картини розподілу щільності в таблиці 2.5, на отриманих проєктах плит добре проглядаються місця з найбільшим і найменшим розподілом матеріалу, тобто кістяк (скелет) отриманої конструкції, відповідний до навантаження, яке діє на нього, і граничних умов. При цьому найбільш структурованим (де чіткіше

промалювалися зони з найнеобхіднішим матеріалом, місця постановки ребер) вийшли проекти плити перекриття із заданим збереженням маси плити від 90% до 30%.

За даними топологічної оптимізації помітно, що за цих навантажень для зменшення матеріаломісткості без втрати несучої здатності потрібно підкріпити цю панель поздовжніми ребрами жорсткості. Для подальшої оптимізації панелей і розрахунку пропонованого варіанту конструкції плити, було зроблено розрахунок блоку будівлі і подальшу топологічну оптимізацію панелі перекриття. Геометричні розміри блоку в плані 3x9 м., панелі перекриття з'єднані між собою і розглядаються як єдина плита, обперта по 4 сторонах, товщина досліджуваної CLT панелі 165 мм. Попередньо було проведено статичний розрахунок блоку будівлі в ПК Ansys з урахуванням ортотропної моделі матеріалу на дії комбінації навантажень від власної ваги конструкцій перекриття і тимчасового експлуатаційного навантаження на плиту. Результати статичного розрахунку представлено на рисунках 2.31.

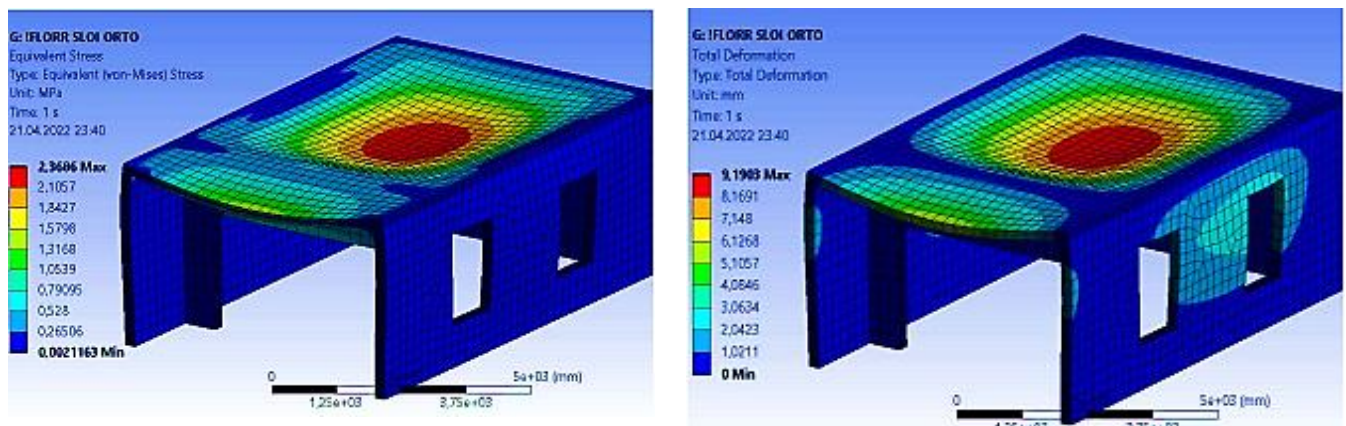
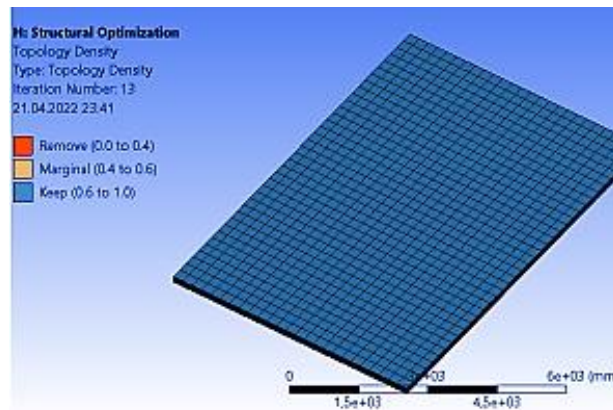


Рисунок 2.31 – Еквівалентні напруження, мінімальне значення 2,4 МПа  
максимальний прогин 9,20 мм

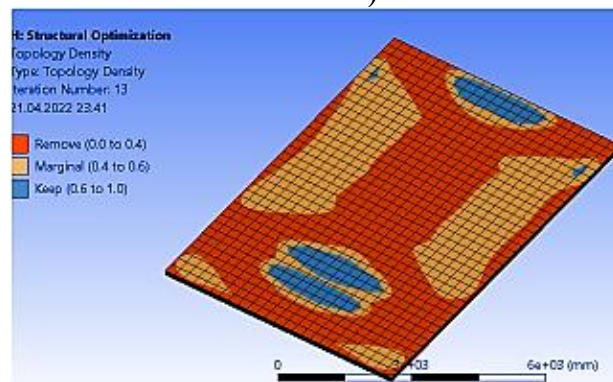
На рисунках 2.32 представлено результати топологічної оптимізації панелі перекриття з урахуванням ортотропних властивостей матеріалу. На рисунку 2.32 наочно видно вимогу залишити верхній і нижній шар панелі, тоді як на рисунку 2.40 зображено внутрішні шари панелі з обрисом потрібних ребер жорсткості на

короткому боці плити. Далі в таблиці 2.6 представлено два варіанти конструювання панелі перекриття з CLT. Варіант 1 являє собою ребристу панель перекриття з двома шарами CLT зверху розміщених ортогонально відносно один одного, ребра представлено брусом 120x100(h) мм, оптимальний крок ребер, виходячи з розрахунку, 570 мм.

Варіант 2 являє собою ребристу плиту перекриття з верхнім і нижнім розташуванням шарів з CLT і ребрами жорсткості всередині панелі. Ребра представлені брусом із перетином 120x100(h) мм, оптимальний крок ребер, виходячи з розрахунку, 960 мм. Порожнечі, що утворилися, в обох варіантах пропонується заповнити деревним утеплювачем. Дані статичних розрахунків обох варіантів представлені в таблиці 2.6.



а)

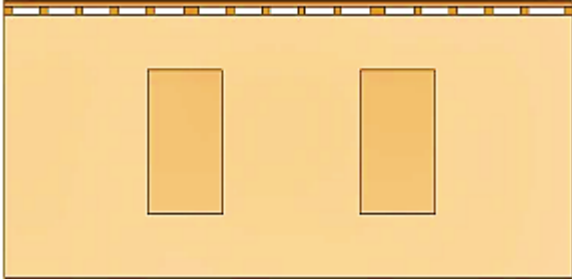
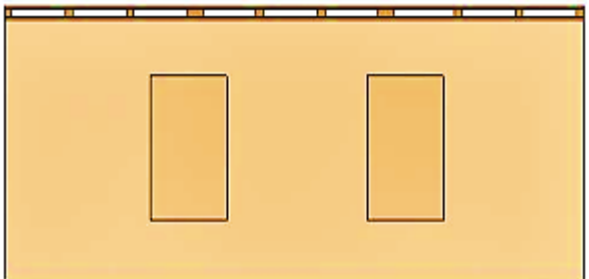
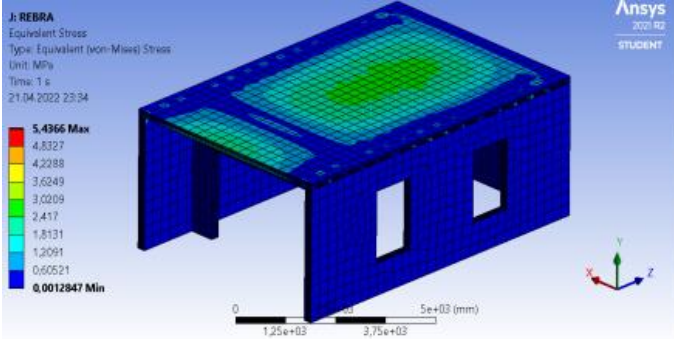
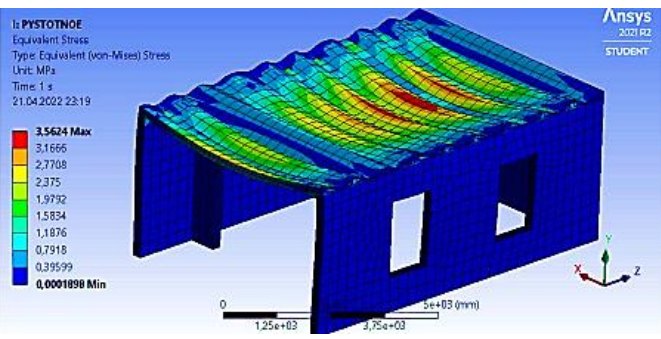
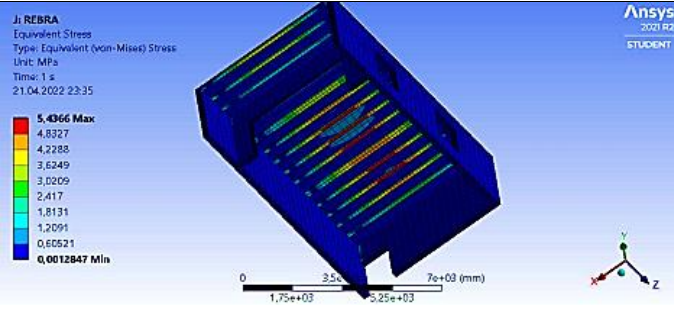
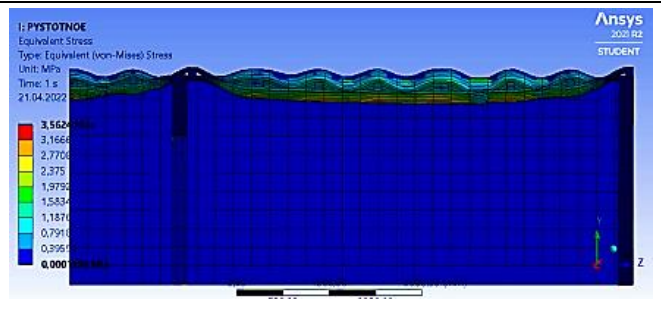
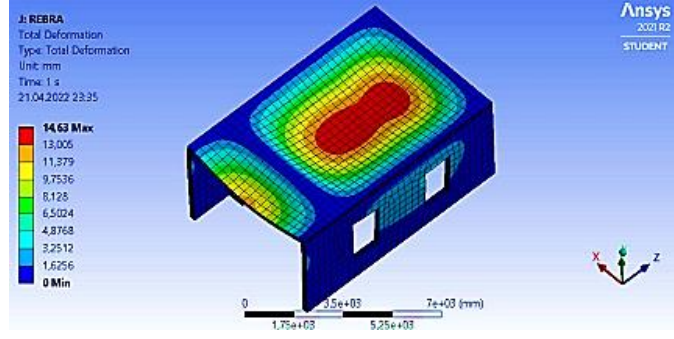
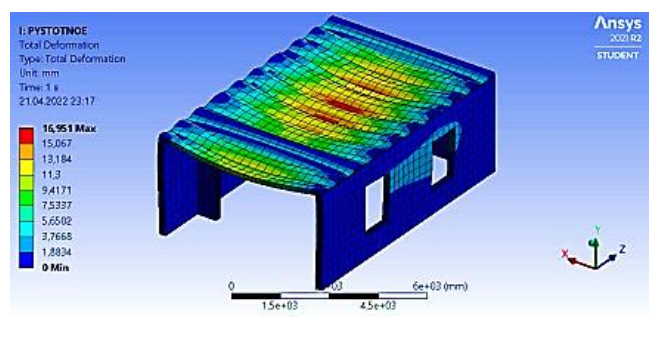


б)

а - верхній і нижній шари панелі б-внутрішні шари панелі  
Рисунок 2.32 – Результати топологічної оптимізації панелі



Таблиця 2.6 – Два варіанти конструкції плити перекриття

<p>1 варіант ребриста плита з двома шарами CLT зверху, крок ребер 570 мм (розмір плити 3х6 м)</p>	<p>2 варіант ребриста плита з двома шарами з CLT зверху і знизу, крок ребер 960 мм (розмір плити 3х6 м)</p>
	
<p>Максимальні значення напружень 5,4 МПа.</p>	<p>Максимальні значення напружень 3,5 МПа.</p>
	
	
	
<p>Максимальний прогин у плиті становив 14,63 мм, при допустимому 30 мм</p>	<p>Максимальний прогин у плиті становив 16,9 мм, за допустимого 30 мм</p>

За результатами перевірки двох варіантів конструкції плити перекриття впливає, що найоптимальнішим є варіант 2, оскільки за великого кроку ребер, а отже, за меншої витрати матеріалу, спостерігаються менші напруження, на 35% менші, ніж у варіанті 1, переміщення більші на 7% у варіанті 1, але так само входять у межу гранично допустимих переміщень для цієї конструкції. Під час розрахунку розглядали різні варіанти перерізу ребер жорсткості, різний крок, зведений аналіз показав, що варіант 2 є найкращим і на 50% знижує використання клеєної деревини порівняно з першопочатковим обсягом панелі. Пропонований варіант плити представлений на рисунку 2.33.

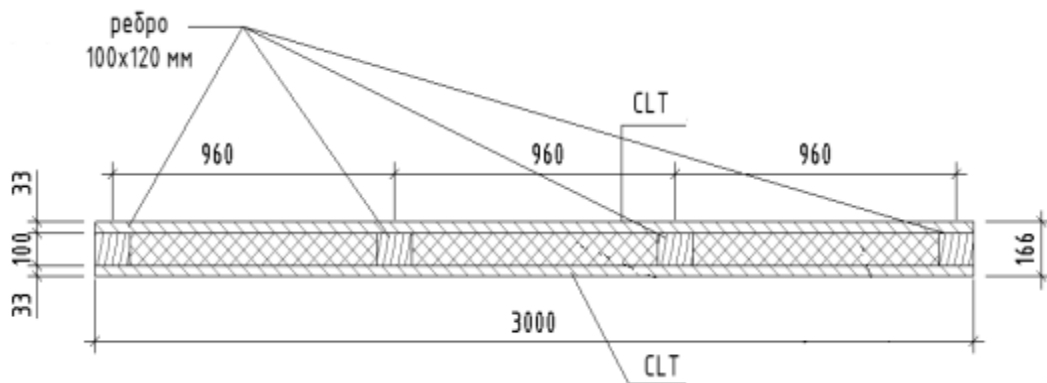


Рисунок 2.33 – Ребриста плита перекриття

Даний варіант плити передбачає заповнення пустот утеплювачем з відходів деревини, який призначений для створення ефективною та екологічно-чистою звуко/теплоізоляції будинку, а також його вітрозахисту.

## 2.6 Основні висновки до розділу

1) Було виконано розрахунок CLT панелі з різними розмірами SE-сітки від 300 мм до 150 мм, з урахуванням ортотропних та ізотропних властивостей матеріалу.

Розрахунок показав, що зі зменшенням розміру сітки в ортотропній багатошаровій плиті зменшуються переміщення на 15%, тоді як в ізотропній плиті

переміщення практично не змінилися. Порівнюючи ізотропну й ортотропну модель, можна дійти такого висновку: за дрібнішого розміру сітки в ортотропній плиті зменшуються переміщення, різниця з ізотропною плитою становить близько 38% (12,56 мм, переміщення в ізотропній плиті та 7,29 мм, в ортотропній плиті). Порівнюючи розрахунок у ПК ANSYS і ПК Ліра Софт з урахуванням ізотропних властивостей матеріалу, спостерігається різниця в отриманих значеннях еквівалентних напружень і переміщень у 7-9%. Ортотропний матеріал з багатошаровою структурою задати в даній версії Ліра Софт задати неможливо.

Дані розрахунку засвідчили, що найвигідніша в роботі модель - це ортотропна багатошарова панель з урахуванням різних фізико-механічних властивостей за шарами CLT панелі в поздовжньому і поперечному напрямку, якщо порівняти з ізотропною моделлю матеріалу.

Розв'язано задачі мінімізації маси шаруватих елементів конструкцій з урахуванням ортотропних властивостей матеріалу, за допомогою інструменту топологічної оптимізації в ПК ANSYS. За результатами оптимізації було запропоновано варіант конструкції панелі перекриття підкріпленої ребрами і закритий знизу і зверху шаром СТЛ. Цей варіант конструкції панелі перекриття верифіковано статичним розрахунком у ПК ANSYS.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРАХУНОК І АНАЛІЗ НДС ДЕРЕВ'ЯНОЇ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ ІЗ CLT ПАНЕЛЕЙ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВАХ

Для дослідження НДС 9-ти поверхової житлової будівлі типу Kajstaden на основі наявних креслень (рисунок 3.1-3.3), розроблено геометричну і скінченно-елементну модель будівлі заввишки 30,0 м, що має в плані прямокутну форму з розмірами в осях 25х16 м.

Виконано статичний розрахунок будівлі і два види розрахунків: на сейсмічні впливи - спектральним методом і розрахунок на горизонтальний вплив акселерограми землетрусу Ель-Центро 1940 у програмному комплексі Ліра 10.12.

### 3.1 Розробка просторової розрахункової моделі багатоповерхової будівлі з CLT панелей ПК LIRA

Несуча конструкція являє собою панельну безкаркасну будівлю з поперечними несучими стінами, що включають жорстке з'єднання фундаментної плити і стінових панелей.

Товщина несучих CLT панелей і діафрагм жорсткості 215 мм, товщина перегородок 129 мм.

Товщина міжповерхових CLT плит перекриттів 169 мм. Висота поверху 3 м. Просторова жорсткість і стійкість будівлі забезпечується внутрішніми поперечними стінами, зокрема і стінами сходових кліток, що з'єднуються з поздовжніми зовнішніми стінами, утворюючи жорстку просторову коробку.

Плани 1-го і типового поверхів, об'ємна модель багатоповерхової будівлі наведені на рисунках 3.1- 3.3.

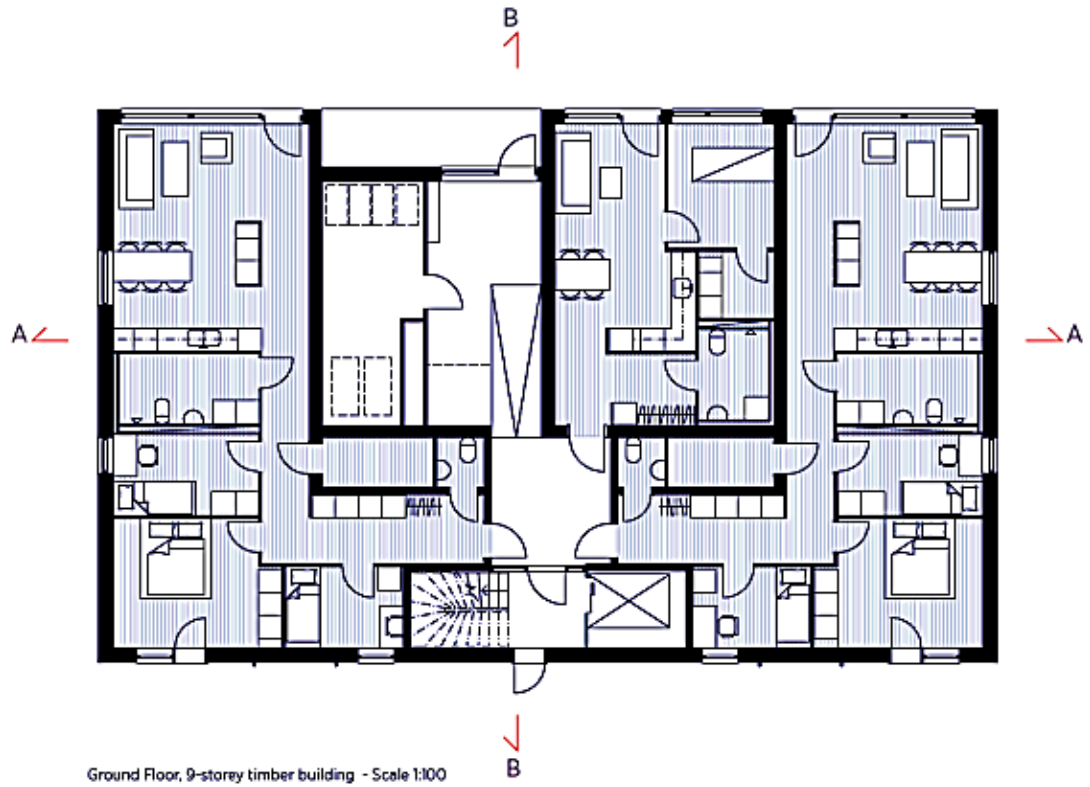


Рисунок 3.1 – План першого поверху

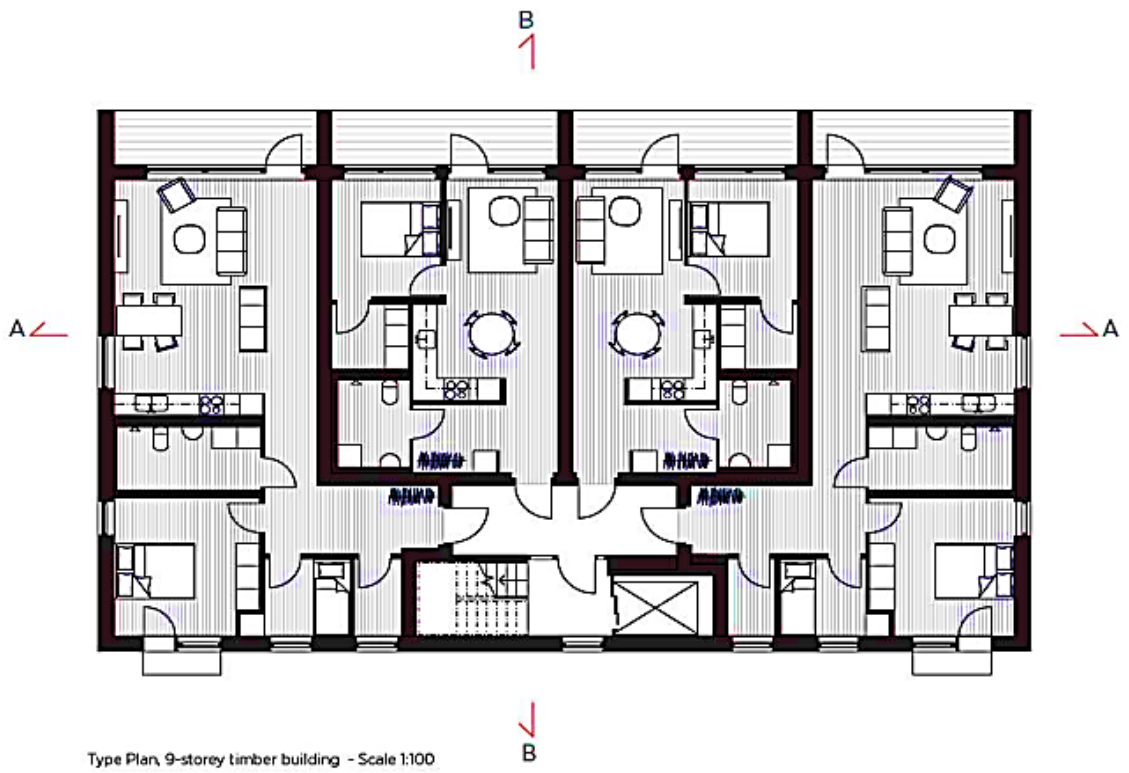


Рисунок 3.2 – План типового поверху

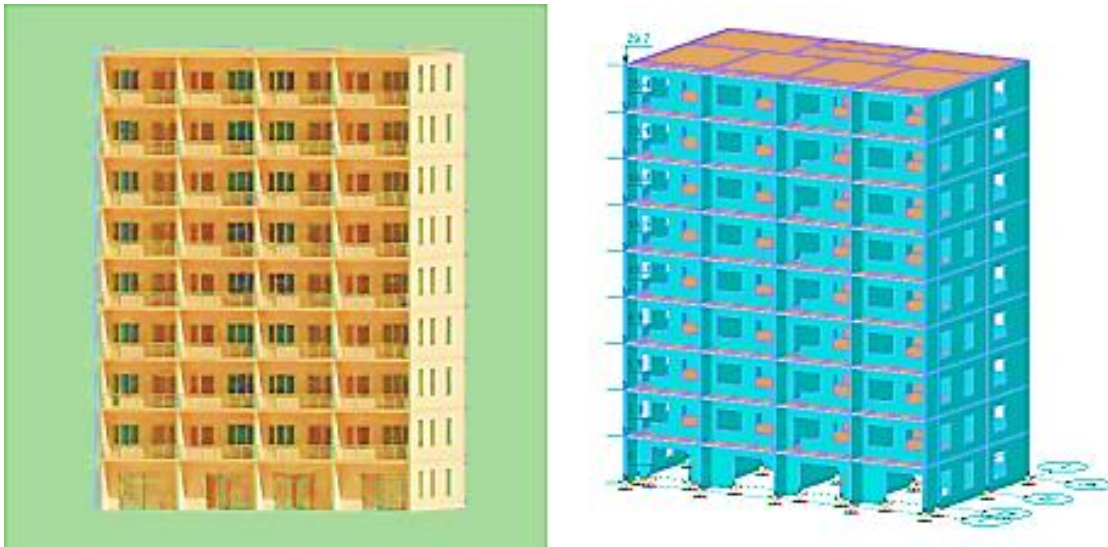


Рисунок 3.3 - BIM модель і скінченно-елементна модель багатоповерхової будівлі

Геометрична і скінченно-елементна модель будівлі створена в програмному комплексі (ПК) Revit і перенесена для подальшого розрахунку в програмний комплекс Ліра 10.12.

Для плит перекриття і несучих стін діафрагм розмір сіткової області становить 0,5x0,5м. При цьому розрахункова модель 9-ти поверхової будівлі складалася з 35650 вузлів і 38448 скінченних елементів.

У розрахунковому комплексі Ліра прикладаються повні розрахункові навантаження. За допомогою комбінації навантажень і модуля РСУ враховується система коефіцієнтів для розрахунку за I та II групами граничних станів, а також для розрахунку на сейсмічний вплив.

Розрахунок несучого каркаса багатоповерхової будівлі виконують на дію постійних навантажень від ваги несучих і огорожувальних конструкцій будівлі, тимчасових навантажень від снігу, вітру, корисного навантаження, від ваги підлогового покриття та особливе навантаження - сейсмічний вплив і на дію акселерограм.

Сейсмічне навантаження. Оскільки багатоповерховий будинок розташовується

в 6-8 сейсмічному, окрім розрахунків на основні навантаження, необхідно виконати розрахунок на сейсміку згідно [29], що поширюється на сферу проектування будівель і споруд, що зводяться в районах сейсмічністю 7, 8 і 9 балів.

Значення сейсмічного навантаження уточнювали з урахуванням сполучень сейсмічності для даного майданчика та призначення споруди згідно з Додатком А [29]. При цьому конструкції та основи будівель і споруд, які проектують для будівництва в сейсмічних районах, мають розраховувати на основні та особливі поєднання навантажень з урахуванням сейсмічних впливів.

Під час виконання розрахунків будинків і споруд з урахуванням сейсмічних впливів рекомендується використовувати дві розрахункові ситуації: 1) сейсмічні навантаження, які відповідають рівню проєктний землетрус [13], метою розрахунку якого є запобігання частковій або повній втраті експлуатаційних властивостей спорудою; 2) сейсмічні навантаження, які відповідають рівню максимальний розрахунковий землетрус.

Для будівель і споруд, що мають просте конструктивно-планувальне рішення, дозволяється приймати розрахункові сейсмічні навантаження, що діють горизонтально в напрямку їхніх поздовжніх і поперечних осей. Дію сейсмічних навантажень у зазначених напрямках можна враховувати окремо.

### **3.2 Статичний розрахунок**

За результатами розрахунків найбільш не вигідною комбінацією завантажень є комбінація СЗ.

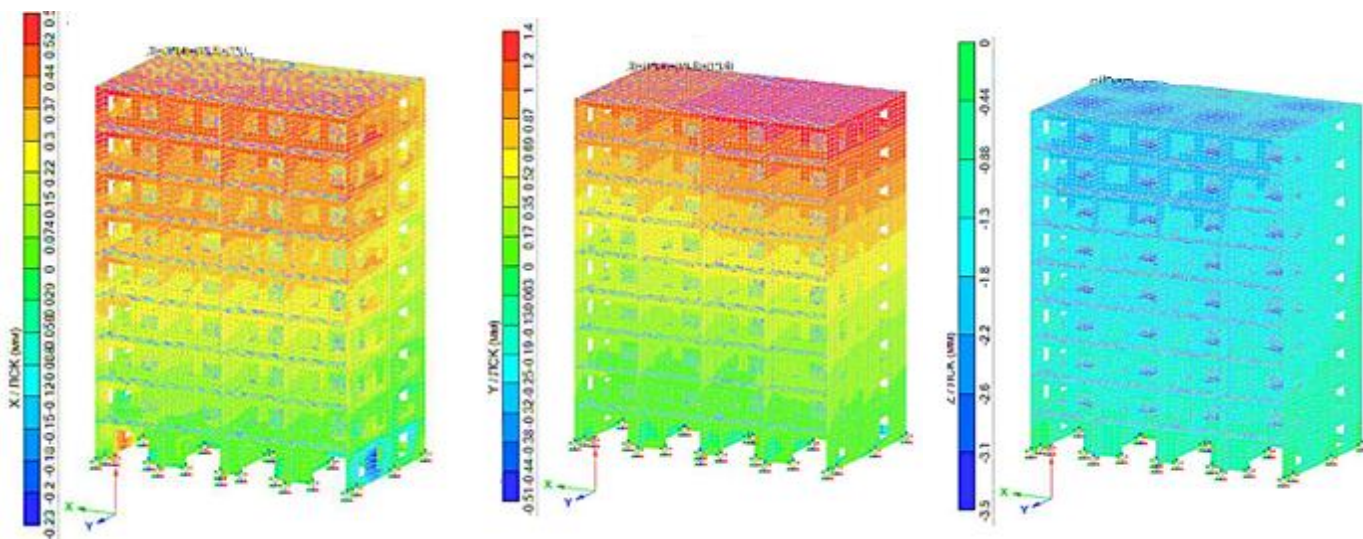
Для використання в аналізі НДС виберемо такі конструктивні елементи будівлі:

- для аналізу переміщення будівлі виберемо всі три осі X, Y, і Z;
- для аналізу напружень і моментів у перекриттях виберемо перекриття першого поверху, 5-го поверху і покриття 9-го поверху;

– для аналізу напружень і моментів у діафрагмах жорсткості оберемо діафрагму розташовану біля сходової клітки.

В інших розрахунках цієї глави обиратимемо ці самі конструктивні елементи, водночас аналізуючи максимальні значення і в інших елементах.

Результати статичного розрахунку будівлі з CLT панелей у вигляді повних лінійних переміщень і зусиль наведені на рисунку 3.4 і в таблиці 3.3.



Переміщення по осі X

Переміщення по осі Y

Переміщення по осі Z

Рисунок 3.4 – Лінійні переміщення багатоповислової будівлі під час статичного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

З рисунка 3.4. видно, що найбільші переміщення виникають у верхній будівлі і становлять 3.5 мм за віссю 7.

Отримані переміщення менші за нормативне значення для будівель заввишки до 150 м  $L = 1/500$ , що для цієї будівлі дорівнює 59.4 мм.

Далі подано колірні схеми відображення зусиль у CLT панелях у всій будівлі.



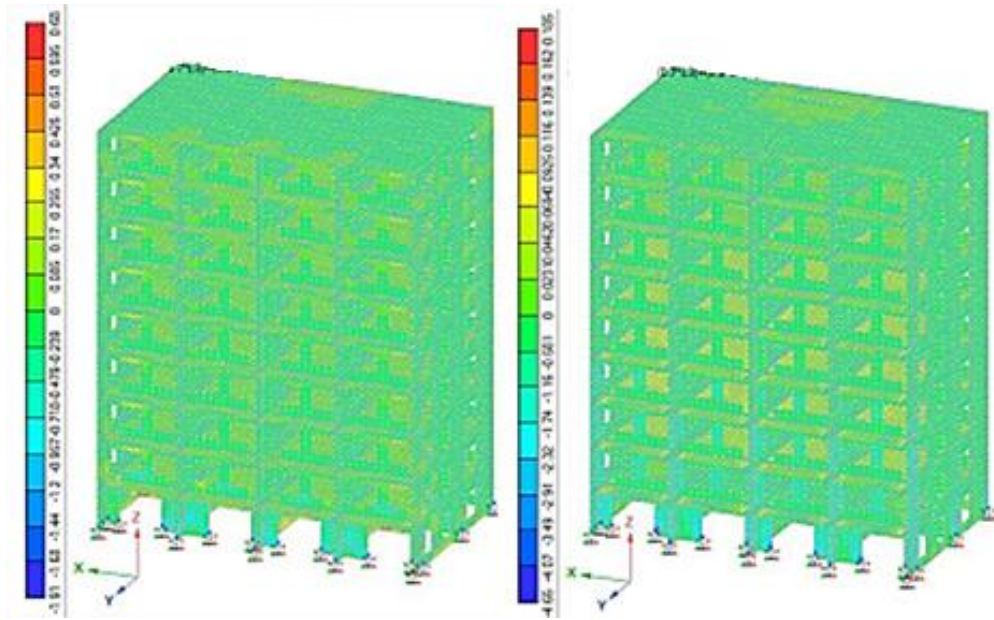


Рисунок 3.5 – Кольорова схема відображення зусиль  $N_{xy}$  під час статичного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

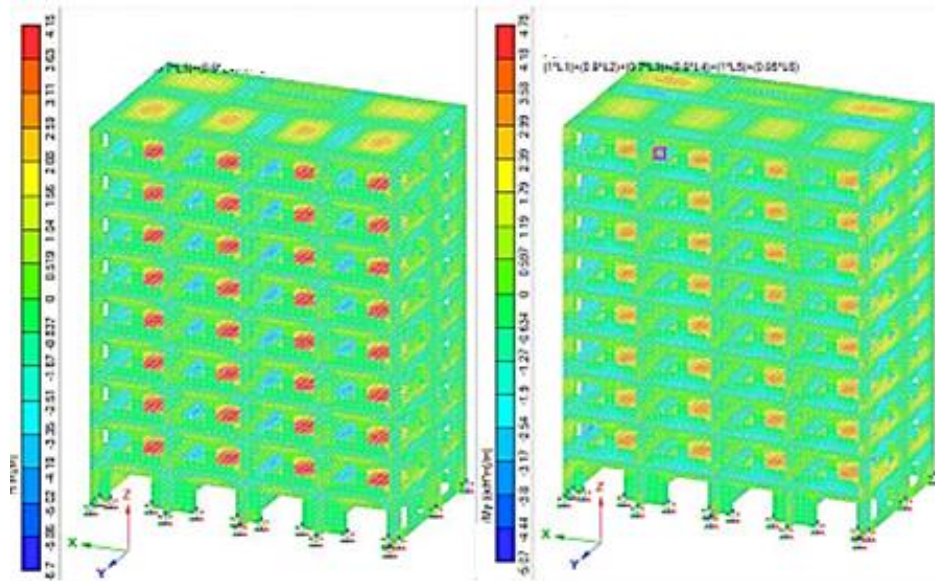


Рисунок 3.6 – Кольорова схема відображення зусиль  $M_x$ ,  $M_y$ , під час статичного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

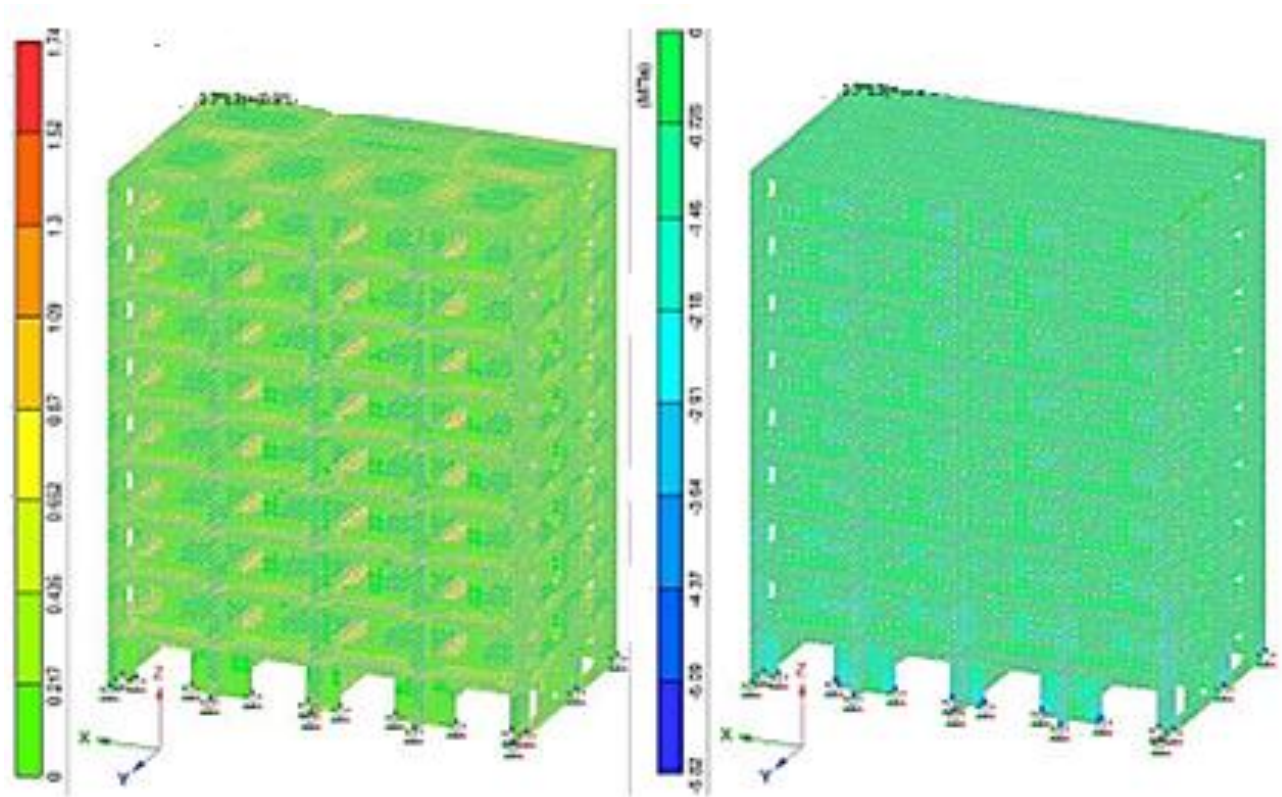


Рисунок 3.7 – Кольорова схема відображення еквівалентних напружень  $\sigma_S$  і  $\sigma_E$  під час статичного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

Найбільше напружена нижня частина діафрагми жорсткості, поздовжні зусилля в якій становлять:  $N_x = -1,1$  МПа,  $N_y = -2,5$  МПа. Найбільші моменти виникають у верхній частині діафрагми жорсткості і становлять  $M_{xy} = -0,51$  (кН\*м)/м. Еквівалентні напруження  $\sigma_E$  та  $\sigma_S$  становлять 2,3 МПа і -5,7 МПа відповідно, за нормативного значення опору вигину 9,38 МПа і нормативного значення міцності на стиск уздовж волокон 15 МПа.

### 3.3 Розрахунок на сейсмічні впливи лінійно-спектральним методом

Спочатку для отримання загального уявлення про властивості несучої системи багатоповерхової будівлі і схеми конструктивно-планувального рішення будівлі було виконано розрахунок просторової скінченно-елементної моделі на власні коливання

(модальний аналіз).

Для визначення частот і форм власних коливань використовується блоковий алгоритм Ланцоша. Реалізований у Ліра 10.12 алгоритм оснащений механізмом підрахунку відсотка врахованої модальної маси.

Під час виконання модального аналізу враховували 20 форм власних коливань.

Отримані результати для перших 20-ти форм подано в таблиці 3.5 і на рисунку 3.8, у вигляді перших трьох форм власних коливань.

Таблиця 3.5 – Періоди коливань

Завантаження	Форма	Частота		Періоди	Форма	Частота		Періоди
		Рад/сек	Гц			с	Рад/сек	
Модальний аналіз	1	6,175	0,982	1,018	11	49,440	7,868	7,868
	2	8,319	1,324	0,755	12	58,341	9,284	0,108
	3	17,599	2,801	0,357	13	63,355	10,082	0,099
	4	26,074	4,149	0,241	14	68,369	10,880	0,092
	5	31,144	4,956	0,202	15	73,382	11,678	0,086
	6	39,963	6,360	0,157	16	78,396	12,476	0,080
	7	41,385	6,586	0,152	17	83,410	13,274	0,075
	8	41,726	6,640	0,151	18	88,424	14,072	0,071
	9	45,821	7,292	0,137	19	93,438	14,870	0,067
	10	49,440	7,868	0,127	20	98,452	15,668	0,064

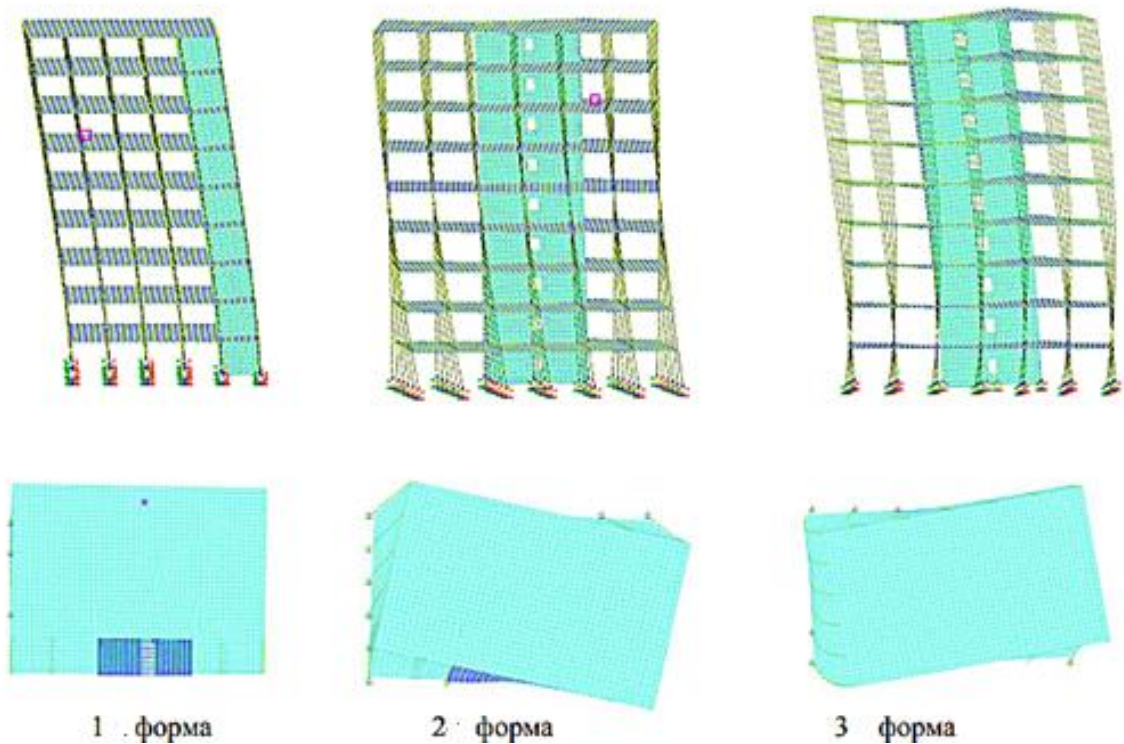


Рисунок 3.8 – Нижчі форми власних коливань

Як видно з отриманих результатів, у першій формі власних коливань переважає вигин, друга - згинальна, а третя форма є крутильною. При цьому період основного тону коливань становив 0,53 с.

З аналізу періоду і виду першої форми власних коливань випливає, що динамічні характеристики розглянутої будівлі близькі до результатів, наведених у роботах із розрахунку залізобетонних багатоповерхових будівель. Там же вказується, що за раціонального конструктивного рішення багатоповерхового будинку 1-ша форма коливань є згинальною.

За своєю конструктивною схемою 9-ти поверхова будівля, що розглядається, належить до простих, але через те, що в 1-й формі власних коливань виникає крутіння, то вона підпадає під категорію складних, тобто будівлю можна віднести і до складних. Відповідно до вищевикладеного, під час розрахунку на сейсмічні впливи було обрано розрахункову ситуацію, що відповідає рівню розрахункового землетрусу.

У програмі Ліра 10.12 розрахунок на сейсмічні впливи виконується методом

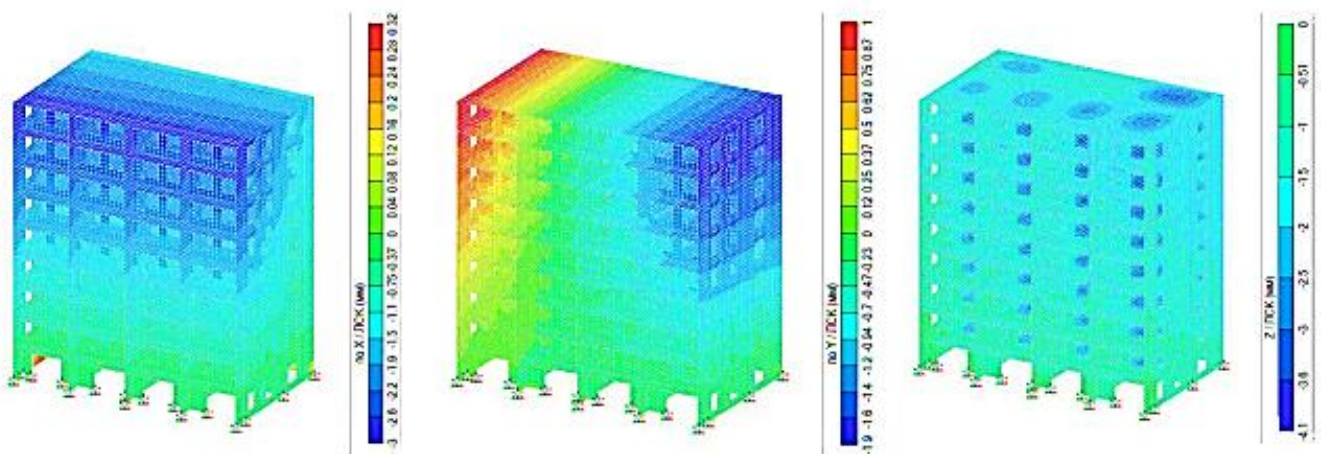
розкладання рішення за формами власних коливань.

Для зіставлення результатів розрахунків за нормами і впливу акселерограми землетрусу в Ель-Сентро вихідні дані для розрахунку за нормативним методом обирали згідно з даними сейсмічного районування, наведених у нормах.

Розрахунки на дію акселерограм виконували з урахуванням загасання коливань (завданням коефіцієнта дисипації  $\varphi=0,1$ ).

Отримані результати розрахунків на дію сейсмічних навантажень у вигляді ізополів переміщень, зусиль і напружень в елементах несучої системи будівлі показано на рисунку 3.9.

Комбінація завантажень  $\epsilon$  для всіх розрахунків  $\epsilon$  є єдиною, змінюється тільки інтенсивність сейсмічного навантаження



Переміщення по x

Переміщення по y

Переміщення по z

Рисунок 3.9 – Лінійні переміщення багатоповерхової будівлі під час статичного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

Як видно з рисунка 3.23, найбільші переміщення будівлі, як і в статичному розрахунку, виникають у верхній частині будівлі і становлять 4,1 мм.

Отримані переміщення не перевищують нормативне значення для цієї будівлі, що становить 59,4 мм.

Далі на рисунках 3.10-3.12 представлено колірні схеми відображення зусиль і напружень в елементах будівлі (CLT панелях).

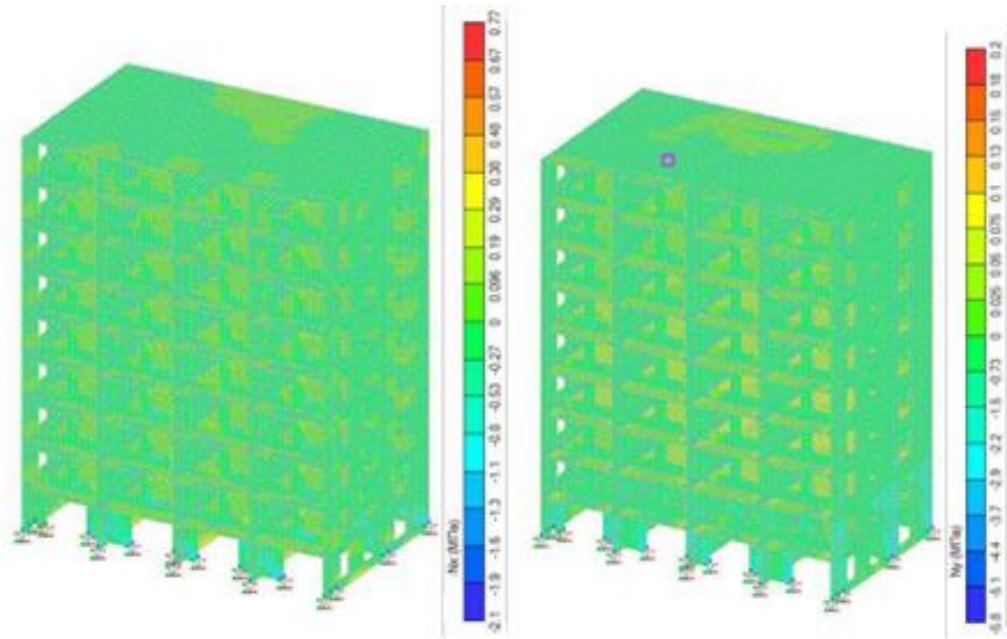


Рисунок 3.10 – Колірна схема відображення зусиль  $N_{xy}$  під час сейсмічного розрахунку в разі комбінації завантажень СЗ

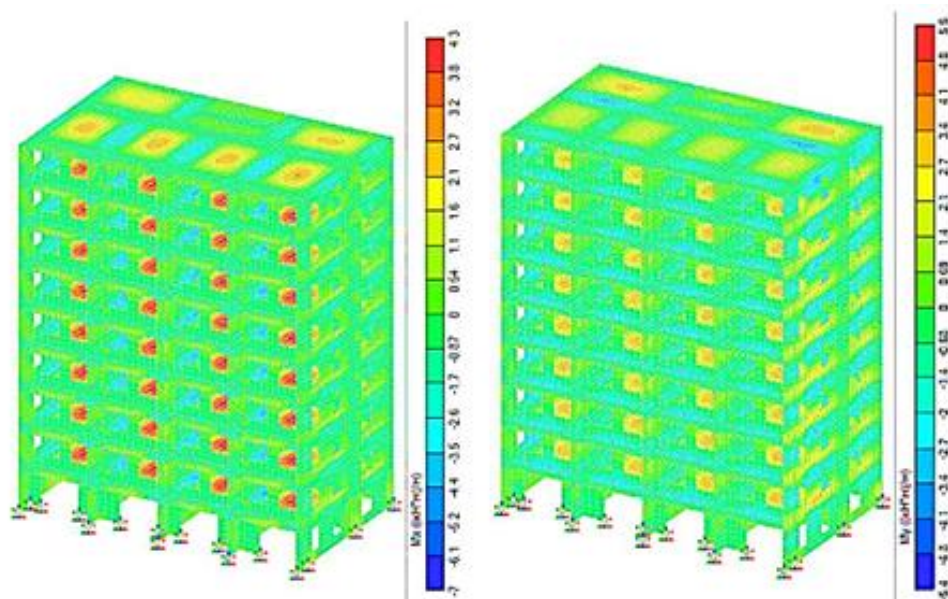


Рисунок 3.11 – Кольорова схема відображення зусиль  $M_x, M_y$  під час сейсмічного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

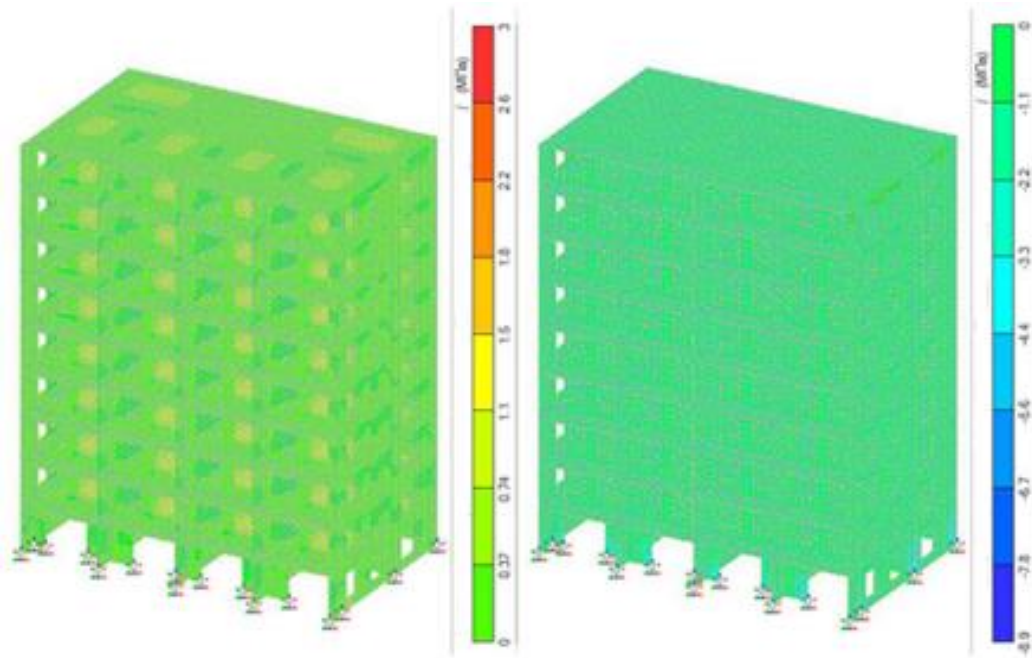


Рисунок 3.12 – Колірна схема відображення еквівалентних напружень  $\sigma_s$  і  $\sigma_E$  під час сейсмічного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

Найбільш напружена нижня частина діафрагми жорсткості, поздовжні зусилля в якій становлять:  $N_x = -2,1$  МПа,  $N_y = -4,6$  МПа. Найбільші моменти виникають у верхній частині діафрагми жорсткості і становлять  $M_{xy} = -0,84$  (кН\*м)/м. Еквівалентні напруження  $\sigma_E$  та  $\sigma_s$  становлять 4 МПа та -11 МПа відповідно, за нормативного значення опору вигину 9,38 МПа та нормативного значення міцності на стиснення вздовж волокон 15 МПа.

### 3.4 Розрахунок на дію акселерограм

Для цього розрахункову схему було навантажено тими самими навантаженнями, що й під час розрахунку на сейсмічні впливи за нормами і замість самого сейсмічного навантаження було прикладено акселерограму землетрусу в Ель-Сентро 1940 р.

Цей розрахунок допоможе нам зрозуміти, які напруження можуть виникнути в

будівлі під час реального землетрусу, і які напруження могли б виникнути в цієї будівлі з наявними конструктивними елементами в умовах будівництва району м. Ель-Сентро.

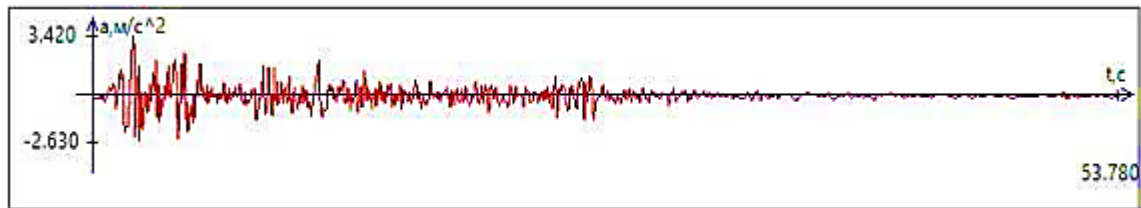


Рисунок 3.13 – Радіальна складова акселерограми землетрусу Ель-Сентро



Рисунок 3.14 – Вертикальна складова акселерограми землетрусу Ель-Сентро

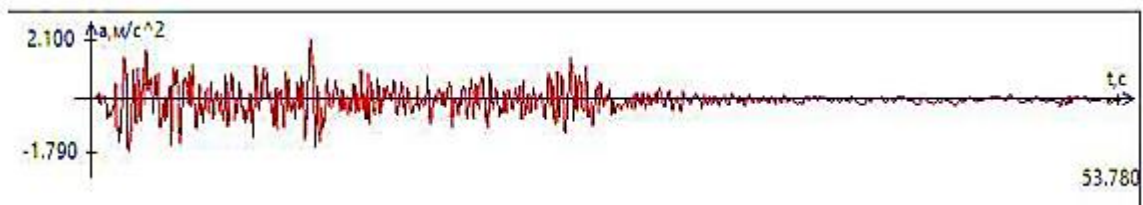
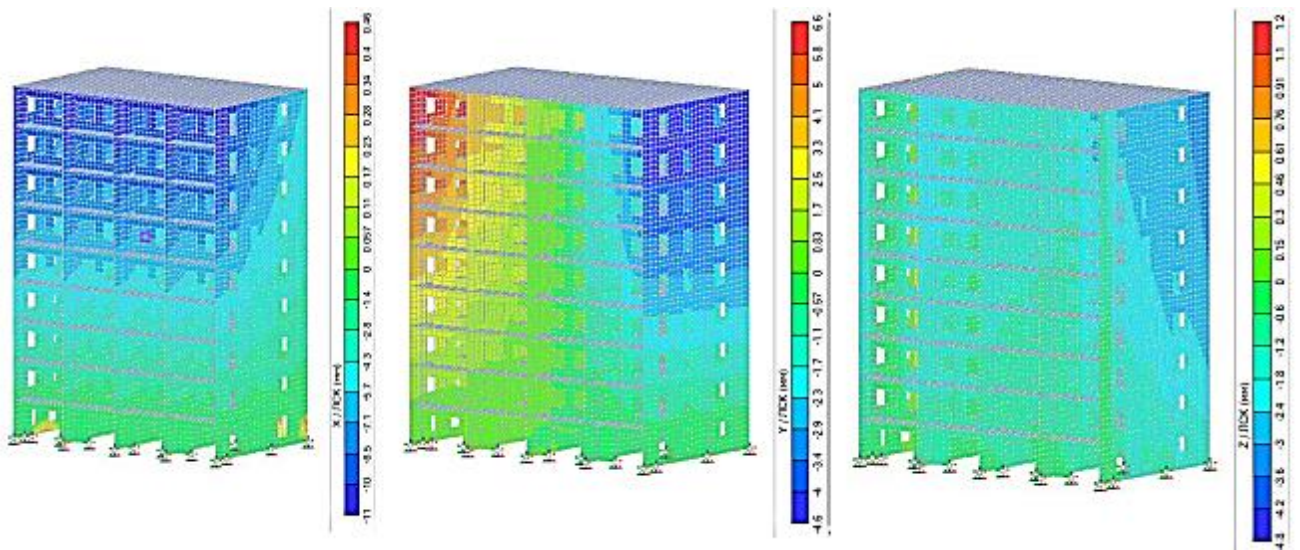


Рисунок 3.15 – Тангенціальна складова акселерограми землетрусу Ель-Сентро





Переміщення по x

Переміщення по y

Переміщення по z

Рисунок 3.16 – Лінійні переміщення багатоповерхової будівлі під час статичного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

Як видно з рисунка 3.16, найбільші переміщення будівлі, як і в статичному розрахунку, виникають за віссю X і становлять -11 мм.

Отримані переміщення не перевищують нормативне значення для цієї будівлі, що становить 59,4 мм.

Далі на рисунках 3.17-3.19 представлено колірні схеми відображення зусиль і напружень в елементах будівлі (CLT панелях).

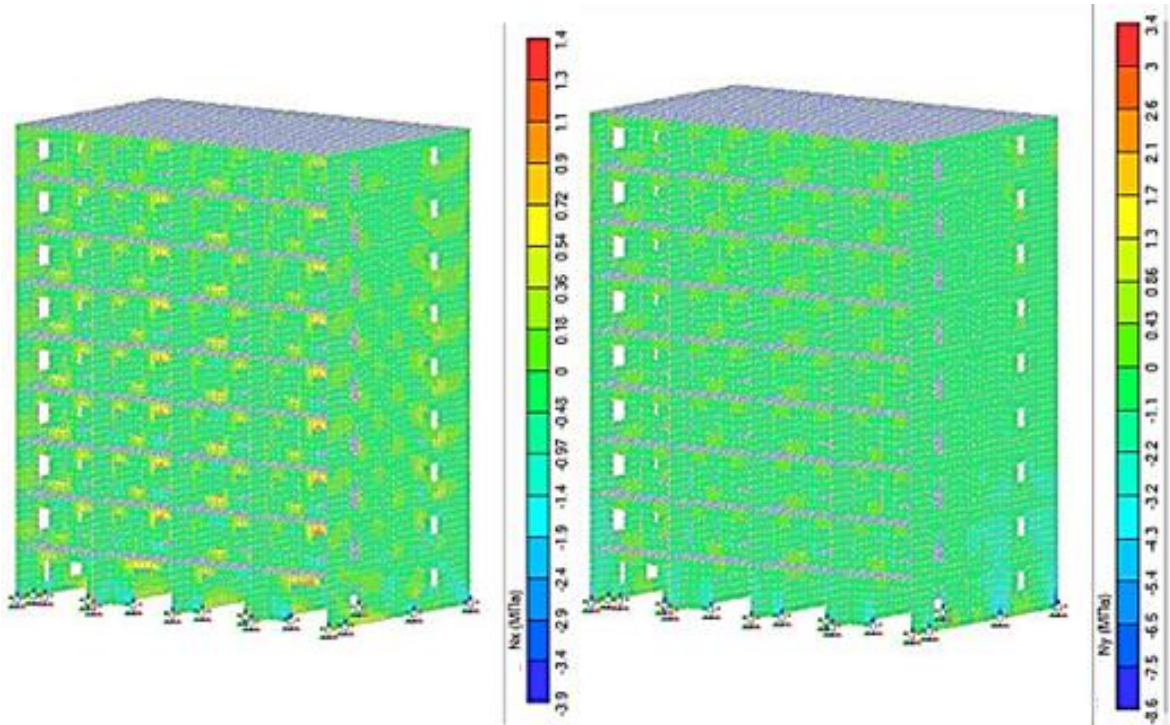


Рисунок 3.17 – Колірна схема відображення зусиль  $N_x$   $N_y$  під час сейсмічного розрахунку в разі комбінації завантажень СЗ

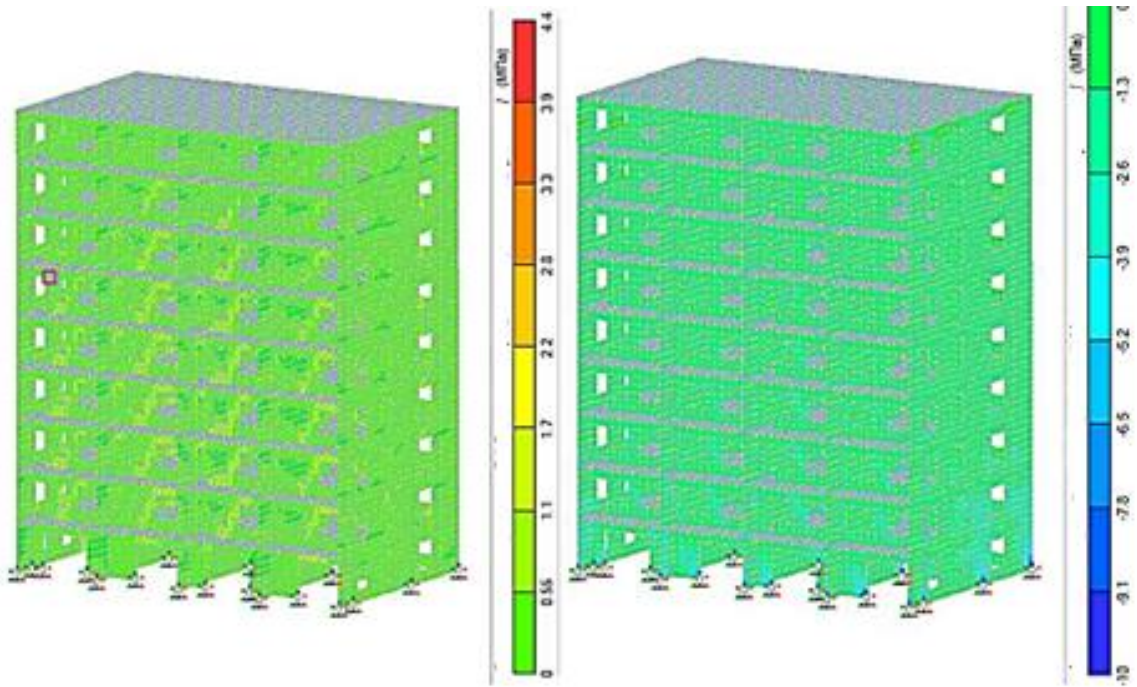


Рисунок 3.18 – Кольорова схема відображення зусиль  $M_x$   $M_y$  у сейсмічному розрахунку в разі комбінації завантажень СЗ

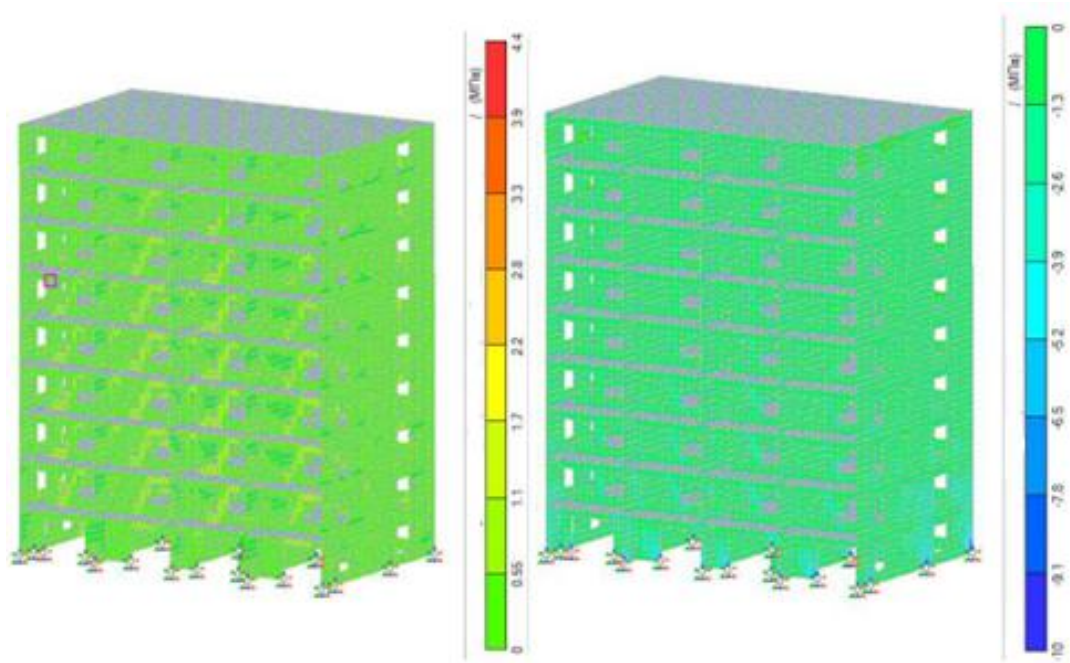


Рисунок 3.19 – Колірна схема відображення еквівалентних напружень  $\sigma_E$  і  $\sigma_S$  під час сейсмічного розрахунку за комбінації завантажень СЗ

Найбільш напружена нижня частина діафрагми жорсткості, поздовжні зусилля в якій становлять:  $N_x = -2,6$  МПа,  $N_y = -5,7$  МПа. Найбільші моменти виникають у середній частині діафрагми жорсткості і становлять  $M_{xy} = -1,2$  (кН\*м)/м. Еквівалентні напруження  $\sigma_E$  та  $\sigma_S$  становлять 5,7 МПа і -12 МПа відповідно, за нормативного значення опору вигину 9,38 МПа і нормативного значення міцності на стиск уздовж волокон 15 МПа.

Відмінності між результатами розрахунків за нормами від розрахунку на дію акселерограми землетрусу Ель-Центро:

Між розрахунком лінійно-спектральним методом за нормами будівництво в сейсмічних районах, за інтенсивності 8 балів, і розрахунком на дію акселерограми землетрусу Ель-Сентро в максимальних значеннях переміщень будівлі, зусиль, еквівалентних напруг різниця становить приблизно 1,5 рази.

### 3.5 Висновки за розділом

За результатами проведених розрахунків багатоповерхової будівлі з CLT панелей, зроблено такі висновки:

Несуча здатність і жорсткість прийнятої конструктивної схеми забезпечена під час дії сейсмічного навантаження, заданого лінійно-спектральним методом і дією акселерограми землетрусу в м. Ель-Сентро. Запас міцності несучих стінових CLT панелей склав близько 15%.

Під час розрахунку було виявлено найбільш напружені елементи будівлі: несучі стінові панелі 1 поверху, у зоні закріплення з фундаментом будівлі.

Порівнюючи зусилля в панелях перекриття, можна зробити висновок: найвищі напруги виявлено в панелях перекриття 1-го поверху.

Аналізуючи повні лінійні переміщення в будівлі, можна виявити зони максимальних переміщень: максимальні переміщення в плитах перекриття і стінових панелях були досягнуті у верхній частині будівлі.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Охорона праці

##### 4.1.1 Організація охорони праці працівників на підприємстві

З метою забезпечення сприятливих для здоров'я умов праці, високого рівня працездатності, профілактики травматизму і професійних захворювань, отруєнь та відвернення іншої можливої шкоди для здоров'я на підприємствах, в установах і організаціях різних форм власності повинні встановлюватися єдині санітарно-гігієнічні вимоги до організації виробничих процесів, пов'язаних з діяльністю людей, а також до якості машин, обладнання, будівель та інших об'єктів, які можуть мати шкідливий вплив на здоров'я. Всі державні стандарти, технічні умови і промислові зразки обов'язково погоджуються з органами охорони здоров'я в порядку, встановленому законодавством. Власники і керівники підприємств, установ та організацій зобов'язані забезпечити в їхній діяльності виконання правил техніки безпеки, виробничої санітарії та інших вимог щодо охорони здоров'я, передбачених законодавством, не допускати шкідливого впливу на здоров'я людей (ст. 28 Основ законодавства України про охорону здоров'я).

Власник зобов'язаний створити в кожному структурному підрозділі й на робочому місці умови праці відповідно до вимог нормативних актів, а також забезпечити дотримання прав працівників, гарантованих чинним законодавством.

З цією метою власник забезпечує функціонування системи управління охороною здоров'я, для чого створює на підприємстві підрозділи, які традиційно іменуються службою охорони праці. Типове положення про службу охорони праці затверджене наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 15 листопада 2004 р. № 255. Служба охорони праці створюється на підприємствах з кількістю працюючих 50 і більше осіб. На підприємстві з кількістю працюючих менше 50 осіб функції служби охорони праці можуть виконувати у порядку сумісництва

(суміщення) особи, які мають відповідну підготовку. На підприємстві з кількістю працюючих менше 20 осіб для виконання функцій служби охорони праці можуть залучатися сторонні спеціалісти на договірних засадах, які мають виробничий стаж роботи не менше трьох років і пройшли навчання з охорони праці. Служба охорони праці підпорядковується безпосередньо роботодавцю. Ліквідація служби охорони праці допускається тільки у разі ліквідації підприємства чи припинення використання найманої праці фізичною особою.

На службу охорони праці покладено виконання таких завдань. У разі відсутності впровадженої системи якості відповідно до ISO 9001, опрацювання ефективної системи управління охороною праці на підприємстві та сприяння удосконаленню діяльності у цьому напрямку кожного структурного підрозділу і кожного працівника; забезпечення фахової підтримки рішень роботодавця з цих питань; організація проведення профілактичних заходів, спрямованих на усунення шкідливих і небезпечних виробничих факторів, запобігання нещасним випадкам на виробництві, професійним захворюванням та іншим випадкам загрози життю або здоров'ю працівників; вивчення та сприяння впровадженню у виробництво досягнень науки і техніки, прогресивних і безпечних технологій, сучасних засобів колективного та індивідуального захисту працівників; контроль за дотриманням працівниками вимог законів та інших нормативно-правових актів з охорони праці, положень (у разі наявності) галузевої угоди, розділу "Охорона праці", колективного договору та актів з охорони праці, що діють у межах підприємства; інформування та надання роз'яснень працівникам підприємства з питань охорони праці.

#### **4.1.2 Правила поведінки під час виконання робіт з монтажу будівельних конструкцій**

Під час монтажу будівельних конструкцій, крім погодженого і затвердженого у встановленому порядку ПВР, необхідно виконувати вимоги дійсного документа, ДБН

"Техніка безпеки в будівництві", ДНАОП 0.00-1.03-93 "Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів, а також інших державних і відомчих нормативних актів і документів з урахуванням змін, які публікуються у журналі "Охорона праці"

Під час монтажу будівельних конструкцій основними шкідливими виробничими факторами слід вважати:

- машини і механізми, що рухаються і працюють, включаючи вантажопідіймальні;

- переміщення при підйомі і установці в проектне положення конструктивних елементів будівельних конструкцій, а також укрупнених блоків будинків і споруд;

- втрату стійкості монтуємих чи змонтованих будівельних майданчиків;

- розташування робочого місця на висоті від поверхні землі, підлоги, міжповерхових перекриттів і робочих чи монтажних площадок;

- недостатню освітленість робочої зони;

- дію вітру на вантажопідіймальні крани, а також на окремо змонтовані будівельні конструкції чи частини будинків і споруд;

- фізичні перевантаження при перенесенні вантажів вручну;

- підвищену чи знижену температуру повітря робочої зони;

- небезпечну і шкідливу дію на людей електричного струму, електричної дуги, електромагнітного випромінювання і статичної електрики;

- вплив підвищеного рівня ультрафіолетового і інфрачервоного випромінювань при виконанні електрозварювальних робіт, а також іонізуючих випромінювань при контролі якості зварених швів;

- токсичний і дратівний вплив на дихальні шляхи газів і аерозолів, що утворюються при зварювальних роботах;

- токсичний і дратівний вплив лакофарбових матеріалів, а також пари від

них на дихальні шляхи людини при виконанні антикорозійних робіт;

- використання порохового монтажного інструмента.
- Попередження чи зниження впливу на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів, повинно забезпечуватися при:
  - пересуванні і роботі машин, механізмів і літальних апаратів - шляхом позначення знаками безпеки небезпечних зон, інженерної підготовки шляхів їх переміщення, а також дотримання правил безпечної їх експлуатації;
  - переміщенні конструктивних елементів будівельних конструкцій, а також при втраті стійкості монтуємих чи змонтованих будівельних конструкцій - шляхом дотримання технології виконання робіт, а також прийняття в необхідних випадках інженерно-технічних рішень, що забезпечують несучу здатність цих конструктивних елементів;
  - розташуванні робочого місця на висоті від поверхні землі, підлоги, міжповерхових перекриттів і робочих чи монтажних площадок - шляхом прийняття відповідних інженерно-технічних рішень, використання прогресивних засобів підмашування: автомобільних гідравлічних підйомників (АГП), телескопічних підйомників, колисок, навішених на гак вантажопідіймальних кранів, і т.д., а також застосуванням страхувальних пристроїв і пристосувань;
  - недостатній освітленості робочої зони - забезпеченням освітленості площадок складування, будмайданчиків, монтажних площадок і робочих місць за спеціально розробленим проектом;
  - дії вітру на вантажопідіймальні механізми, а також на окремо змонтовані будівельні конструкції (ферми, колони і ін.), частини будинків і споруд - шляхом прийняття відповідних інженерно-технічних рішень на підставі перевірочних розрахунків на вітрові навантаження: для вантажів, що піднімаються кранами. Навантаження "вітрове" і для окремо змонтованих конструкцій, частин будинків і споруд відповідно до розділу 6 ДБН "Навантаження і впливи", з урахуванням вітрової пульсаційної складової;



- фізичних перевантаженнях - шляхом максимальної механізації ручної праці і дотримання допустимих норм навантажень при підйомі і переміщенні одиночних вантажів вручну, які не повинні перевищувати для жінок 10 кг при сумісництві з іншою роботою і 7 кг постійно на протязі робочої зміни; для чоловіків - максимум 50 кг;
- підвищеній чи зниженій температурі повітря робочої зони - використанням спецодягу, а також дотриманням тривалості робочого дня і перерв у роботі відповідно до діючих нормативних документів;
- дії електричного струму (у всіх його проявах) на організм людини - дотриманням вимог ПУЕ, ПТЕ і ПТБ;
- впливі підвищеного рівня ультрафіолетового і інфрачервоного випромінювань, а також газів і аерозолів, що утворюються при виконанні зварювальних роботах і роботах, що їх супроводжують,
- дотриманням нормативних актів і документів, що діють в країні.

#### **4.1.3 Висновки до підрозділу 4.1**

Дотримання вимог, перелічених у даному розділі, забезпечить безпечні умови праці, позбавить травматизму, профзахворювань та виникнення небезпечних факторів, аварій. Покращатся умови праці та виробниче середовище.

У разі порушення норм і правил охорони праці, невиконання колективного договору, наказів роботодавця або розпоряджень органів нагляду за станом охорони праці, внаслідок чого трапилися нещасні випадки, виникли професійні захворювання або інші важкі наслідки настає кримінальна відповідальність.

При виконанні будівельних робіт порушення нормативних і правових актів, а також правил експлуатації будівельних механізмів, якщо це завдало шкоди здоров'ю людей або могло спричинити людські жертви та інші тяжкі наслідки карається позбавленням волі на строк до одного року або виправними роботами на той самий

термін, або грошовим стягненням до 20 мінімальних неоподаткованих розмірів заробітної плати.

## **4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях**

### **4.2.1 Заходи при землетрусі**

Землетруси починаються раптово і охоплюють значні території. Руйнування будівель, зсуви і обвали крутих схилів є головними причинами людських жертв і великих матеріальних збитків при сильних землетрусах. Сейсмічними вважають райони, де зареєстровані або теоретично очікувані землетруси у 6 балів та вище. Основні вимоги до будівництва у сейсмічних районах зведено до вжиття таких заходів:

1. Вибір ділянки для будівництва.
2. Вибір конструктивного рішення (КР) та об'ємно-планувального рішення (ОПР).
3. Забезпечення високої якості будівництва.
4. Поділ будівель і споруд антисейсмічними швами.

Будівельні майданчики під населені пункти і споруди обираються з урахуванням геологічних даних, якнайдалі від можливих або явних розривних порушень, далеко від крутих схилів, що загрожують обвалами і зсувами. Неприятливими для будівництва вважають пухкі ґрунти і тріщинуваті породи. При виборі ділянки для забудови враховують такі поняття як сейсмостійкість будівельних об'єктів та сейсмічність будівельного майданчика. Сейсмостійкістю називають здатність ґрунтів, будівель і споруд протистояти сейсмічним впливам. Заходи з підвищення сейсмостійкості будівель застосовуються у районах із сейсмічністю у 7 балів і вище. Нормативне обґрунтування цих заходів здійснюється за «ДБН В.1.112:2006. Будівництво у сейсмічних районах України». За сейсмічності більше 9 балів зведення капітальних будівель заборонено.

#### 4.2.2 Заходи щодо підвищення стійкості об'єкта

Одне з основних завдань в області цивільного захисту ЦЗ - проведення заходів, спрямованих на підвищення стійкості роботи об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій мирного і воєнного часу. Під стійкістю функціонування будівельного об'єкта розуміють здатність його в надзвичайних ситуацій виконувати покладену на нього функцію, а при отриманні слабких і середніх руйнувань або порушенні зв'язків з постачання, відновлювати виконання покладеної функції в мінімальні терміни.

Розглянутий об'єкт будівництва є нестійким до дії ударних хвиль, тому що розглянуті мною безкаркасні арочні ангари мають невелику товщину стінки і власну вагу, що не забезпечує належної стійкості будівлі, отже, необхідно розробляти низку заходів щодо підвищення його стійкості.

Для цього необхідно зробити наступне:

1. Підвищити стійкість промислової споруди шляхом встановлення більш міцного металевого каркасу, встановлення більш міцних рам для дверей і вікон, зменшення прольоту несучих конструкцій, а також зміцнення стін будівлі більш міцними матеріалами.

2. Для підвищення стійкості кранів та кранового обладнання до впливу ударної хвилі доцільно забезпечити їх жорстку фіксацію на міцному фундаменті, розташовувати устаткування за міцними елементами будівлі і споруд на ймовірному напрямку дії ударної хвилі, забезпечити додаткові точки фіксації і кріплення. Також необхідно встановлювати контрфорси, що підвищують стійкість обладнання до дії швидкісного напору ударної хвилі.

3. Для підвищення стійкості кабельних наземних ліній слід помістити їх під землю, також можливе їх зміцнення за рахунок укладання їх всередину, а також за рахунок застосування броньованих кабелів.

### 4.2.3 Системи сейсмозахисту будівель і споруд

Загальна класифікація систем сейсмозахисту споруд представлена на рис. 4.1. Вона складається з традиційних методів забезпечення сейсмостійкості та спеціальних засобів сейсмозахисту.

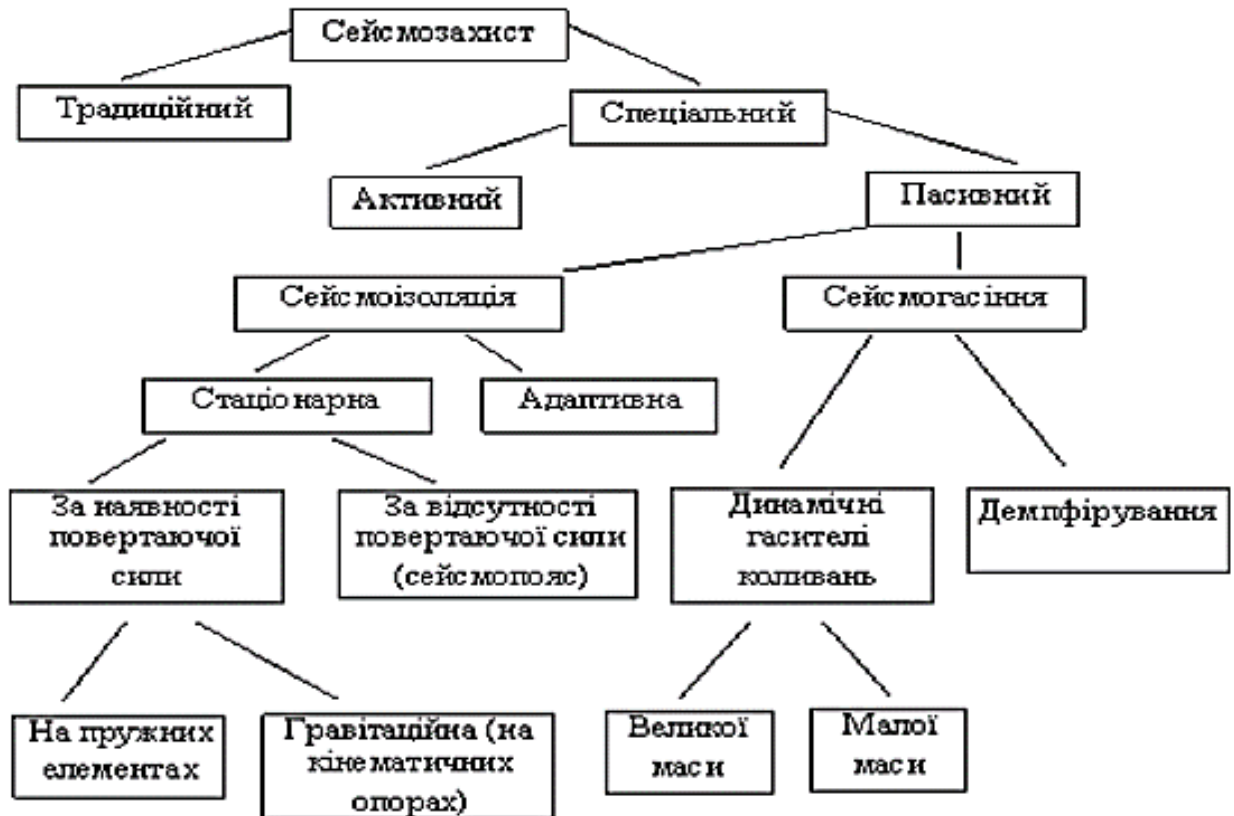


Рисунок 4.1 - Загальна класифікація систем сейсмозахисту споруд

### 4.2.4 Висновки до підрозділу 4.2

У цьому розділі було розглянуто безпеку в надзвичайних ситуаціях з фокусом на землетруси. Оскільки, землетруси є однією з найбільш небезпечних природних катастроф, які можуть призвести до значних матеріальних збитків та загибелі людей. Однак, певні заходи можуть бути прийняті, щоб зменшити ризик втрати життя та матеріальних збитків.

Було розглянуто заходи, які можуть бути прийняті в разі землетрусу. Вони включають в себе пошук безпечного місця, прикриття голови та шиї твердим предметом, уникнення ліфтів та швидкого виходу з будівлі.

Було також розглянуто заходи підвищення стійкості будівлі при землетрусі. Вони включають в себе правильне планування будівель, використання стійких матеріалів, які можуть поглинати енергію землетрусу, та використання підсилюючих конструкцій для підвищення стійкості будівлі.

Нарешті, було розглянуто системи сейсмозахисту будівель, які можуть допомогти зменшити ризик матеріальних збитків та загибелі людей. Ці системи включають в себе ізолятори, амортизатори та інші системи, які можуть допомогти зменшити вібрації та поглинати енергію землетрусу.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконаного огляду досліджень напружено-деформованого стану багатоповерхових каркасів будівель із CLT панелей, було виявлено зростання популярності будівництва багатоповерхових будівель і споруд із перехресно-клеєної деревини. Також було проаналізовано зарубіжний досвід проектування багатоповерхових будівель з клеєної деревини, досвід розрахунку CLT панелей з урахуванням ортотропної моделі матеріалу. Виконано порівняльний аналіз розрахунків CLT панелей з урахуванням перехресно-клеєної конструкції панелі, ортотропної моделі матеріалу, ізотропної моделі матеріалу на різних розмірах сітки скінченних елементів. Розрахунок проводили в ПК Ansys і ПК Ліра 10.12. За результатами розрахунку стало видно, що врахування ортотропної моделі матеріалу CLT панелі ефективніше за несучою здатністю в середньому на 15%.

Були вирішені завдання мінімізації маси шаруватих елементів конструкцій з урахуванням ортотропних властивостей матеріалу, за обмежень на напружено-деформований стан, за допомогою інструменту топологічної оптимізації в ПК Ansys. Запропоновано варіант ребристої плити перекриття з CLT із заповненням пустот з натурального деревного утеплювача.

Було проведено розрахунок багатоповерхової будівлі з CLT панелей з урахуванням ортотропної моделі матеріалу конструктивної стінової схеми, розрахунок було зроблено на статичне навантаження, а також на сейсмічний вплив двома методами - лінійно-спектральним аналізом і розрахунком на дію акселерограм м. Ель-Сентро. Розрахунок показав, що міцність і жорсткість будівлі забезпечені під час дії сейсмічного навантаження у 8 балів, із запасом міцності у 15%.

Ефективність роботи під час сейсмічних впливів різного частотного складу можна істотно підвищити за умови влаштування у фундаментній частині спеціальних засобів сейсмозахисту у вигляді сейсмоізоляції та сейсмогасіння.

## 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. Barczi, J. F., Kretschmann, D. E., & Yelle, R. B. (2016). Mechanical properties of cross-laminated timber: a review and an extension of knowledge. *Wood and Fiber Science*, 48(1), 28-43.
3. Falk, R. H., & Simonson, C. J. (2017). Performance of Cross-Laminated Timber Shear Walls. *Journal of Structural Engineering*, 143(5), 04016205. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001734
4. Franke, S., & Dietsch, P. (2015). Design of Cross-Laminated Timber Columns for Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 141(11), 04015028. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001231
5. Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., & Malekmohammadi, I. (2018). Review on structural performance of cross-laminated timber buildings. *Structures*, 16, 430-441.
6. Isaksson, J., Natterer, J., & Salmen, L. (2015). The influence of panel lay-up on bending strength of cross-laminated timber. *Wood Science and Technology*, 49(2), 353-367.
7. McGinnis, M. J., & Falk, R. H. (2017). Static and Cyclic Behavior of Hybrid Cross-Laminated Timber Shear Walls with Steel Coupling Beams. *Journal of Structural Engineering*, 143(10), 04017111. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001867
8. Natterer, J., & Serrano, E. (2015). Cross-Laminated Timber: A Primer. *The Structural Engineer*, 93(2), 34-39.
9. <https://www.floornature.com/r2k-architectes-groupe-scolaire-pasteur-limeil-brevannes-12480/>
10. Helandersson, S., & Serrano, E. (2017). Influence of moisture and in-plane shear on the tensile strength of cross-laminated timber. *Wood Science and Technology*, 51(2), 409-422.

11. <https://www.moelven.com/mjostarnet/>
12. <https://www.moelven.com/mjostarnet/>
13. <https://www.ctbuh.org/>
14. Zhang, J., & Yu, W. (2018). Experimental study on the seismic behavior of cross-laminated timber shear walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(2), 367-385.
15. C. Sandhaas, *Mechanical Behaviour of Timber Joints with Slotted-In Steel Plates*, Karlsruhe, 2012
16. J. Van de Kuilen & A. Leijten, "Schuifsterkte bepaling van zeven houtsoorten voor de toepassing in verkeersbruggen," *Sectie Staal- & Houtconstructies*, Delft, 2001.
17. M. Grosse, "Zur numerischen Simulation des physikalisch nichtlinearen Kurzzeittragverhaltens von Nadelholz am Beispiel von Holz-Beton Verbundkonstruktionen.
18. Wei, J., Zhou, Y., Wang, X., & Li, Y. (2020). An experimental study on the mechanical properties of cross-laminated timber using full-sized specimens. *Journal of Building Engineering*, 31, 101385.
19. Wu, Q., & Ahn, K. (2018). Full-scale testing and analysis of a hybrid cross-laminated timber-concrete floor system. *Engineering Structures*, 170, 446-457.
20. Zhu, X., Chen, Y., & He, S. (2019). Mechanical properties and inelastic analysis of cross-laminated timber panels: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 497-513.
21. *Canadian CLT Handbook ,2019 EDITION*. Edited by: Erol Karacabeyli, Sylvain Gagnon © 2019 FPInnovations. All rights reserved.
22. Yasniy, Petro, Yuriy Pyndus, and Mykhailo Hud. "Methodology for the experimental research of reinforced cylindrical shell forced oscillations." *Вісник Тернопільського національного технічного університету* 86.2 (2017): 7-13.
23. Yasniy, P. V., Mykhailyshyn, M. S., Pyndus, Y. I., & Hud, M. I. (2020). Numerical Analysis of Natural Vibrations of Cylindrical Shells Made of Aluminum Alloy. *Materials Science*, 55, 502-508.
24. Hud, M. (2022). Simulation of the stress-strain state of a cylindrical tank under



the action of forced oscillations. *Procedia Structural Integrity*, 36, 79-86.

25. E. Saavedra Flores, K. Saavedra, J. Hinojosa, Y. Chandra and R. Das, "Multi-scale modeling of rolling shear failure in cross-laminated timber structures by homogenisation and cohesive zone models," *International Journal of Solids and Structures*, no. 81, pp. 219-232, 2016.

26. Mykhailo Hud, Natalia Chornomaz, Roman Grytseliak, Denys Baran, Study of the joint work of the foundations and the spatial tower under the action of dynamic loads, *Procedia Structural Integrity*, Volume 36, 2022, Pages 87-91, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.007>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321622000075>)

27. Yasniy, Petro, Yuriy Pyndus, and Mykhailo Hud. "Analysis of natural frequencies and shapes of stringer-stiffened cylindrical shells." *Scientific journal of the Ternopil national technical university* 3 (2016): 83.

28. Yasniy, Petro, Yuriy Pyndus, and Mykhailo Hud. "Experimental study of forced oscillations affinity-shaped reinforced thin-walled cylinder model." *Вісник Тернопільського національного технічного університету* 4.100 (2020): 127-134.

29. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво в сейсмічних районах України

30. 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.

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