

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

БРОДЗЬ ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ

Допускається до захисту:

завідувач кафедри біофізики і фізіології,
кандидат хім. наук, доцент

_____ О. І. Доценко

« _____ » _____ 20__ р.

**КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ЖИЛКУВАННЯ ЛИСТКІВ CARPINUS
BETULUS L. З ВИКОРИСТАННЯМ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ
МЕРЕЖІ U-NET**

Спеціальність 101 Екологія

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Науковий керівник:

А. М. Міщенко,

кандидат біологічних наук,

старший викладач кафедри

біофізики і фізіології

Оцінка: _____ / _____ /

Голова ЕК: _____

Вінниця 2025

АНОТАЦІЯ

Бродзь О. С. Кількісний аналіз жилкування листків *Carpinus betulus* L. з використанням згорткової нейронної мережі U-Net. Спеціальність 101 «Екологія», Освітня програма «Екологія». Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2025.

У бакалаврській роботі досліджуються морфометричні особливості листя *Carpinus betulus* L. та його жилок. Описується процес навчання згорткової нейронної мережі U-Net для поліпшення знаходження нею жилок на відсканованих листках. Проводимо морфометричний аналіз, зокрема, вимірюємо довжину жилок та площу листової пластинки, вимірюємо кути між жилками. Наводимо описову статистику отриманих параметрів.

Ключові слова: жилки, листки, *Carpinus betulus* L., морфометричний аналіз, згорткова нейромережа, алгоритми глибокого навчання.

62 с., 59 рис., 21 джерело.

ABSTRACT

Brodz O. S. Quantitative analysis of *Carpinus betulus* L. leaf venation patterns using U-Net convolutional neural network. Specialty 101 "Ecology", Educational program "Ecology". Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2025.

The bachelor's thesis investigates the morphometric features of the leaves of *Carpinus betulus* L. and its veins. We describe the process of training a convolutional neural network U-Net to improve its ability to detect veins on scanned leaves. We perform morphometric analysis, in particular, measure the length of the veins and the area of the leaf blade, and measure the angles between the veins. We provide descriptive statistics of the obtained parameters.

Keywords: veins, leaves, *Carpinus betulus* L., morphometric analysis, convolutional neural network, deep learning algorithms.

62 p., 59 Fig., 21 Bibliography items.

ЗМІСТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ	1
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1. Загальні відомості про жилкування листка.....	7
1.2. Загальна будова жилкування листка, порядки жилок.....	8
1.3. Довжина основних жилок на одиницю площі («щільність основних жилок»).....	10
1.4. Пластичність, еволюція та поєднання ознак жилок листків у різних формах росту, середовищах та біомах.....	11
1.5. Закон фрактального розподілу жилок та розподіл жилок за принципом золотого перетину	13
1.6. Розташування бічних жилок не пов'язане	14
з філотаксисом листка на рівні стебла.....	14
1.7. Звуження радіусів жилок відповідає закону Мюррея.....	15
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	19
2.1. Збір матеріалів та сканування листків	19
2.2. Сегментація на основі глибокого навчання	20
2.3. Відновлення пошкоджень сегментованих вен.....	21
на основі глибокого навчання.....	21
2.4. Післяобробка відремонтованих прогнозованих масок	21
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	23
3.1. База даних для вивчення листя <i>Carpinus betulus</i> L.	23
3.2. Отримання вхідних зображень для U-Net CNN.....	24
3.3. Глибоке навчання нейромережі U-Net CNN	25
3.4. Результати післяобробки відремонтованих прогнозованих масок.....	26
3.5. Оцінка параметрів жилкування та форми листя.....	28
(морфометричні показники жилкування та форми листя)	28
3.6. Описова статистика параметрів листка та його жилкування	34
3.7. Алометричне співвідношення між щільністю жилок та площею листової пластини	48
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

ВСТУП

Структура та функція жилкування листя важливі для продуктивності рослин, що має ключові наслідки для розподілу та продуктивності екосистем.

У межах видів та між ними листя надзвичайно різноманітне за архітектурою жилкування та має великі перспективи для вивчення.

Актуальність теми: У біології та екології рослин зростає визнання важливості жилкування листя. Також знання про особливості жилкування листя набуває все більшого застосування в палеоекології та палеокліматології, сільському господарстві, міській екології, дизайні та технологіях.

В рамках попередніх курсових та дипломних робіт, що виконувались на кафедрі біофізики та фізіології була розроблена згорткова нейромережа здатна здійснювати сегментацію жилок листя граба.

Вона розділяє жилки на два класи: центральну та бічні, які представлені на виході як єдина карта ймовірностей.

Однак для морфометричного аналізу необхідно, щоб бічні жилки були чітко відокремлені. Нейромережа іноді помиляється: близько розташовані жилки можуть з'єднуватися або мати розриви, особливо через низьку якість вхідного зображення. Це ускладнює подальшу ідентифікацію та аналіз окремих жилок.

Для виправлення цих помилок можна використати додаткову нейромережу, яка закриватиме розриви та видалятиме помилкові з'єднання, що ми і зробили.

Створення високоякісних анотованих баз даних для роботи з нейромережами є цінним внеском у наукову спільноту і може слугувати основою для подальших досліджень. Розроблена методологія може бути масштабована та адаптована для аналізу жилкування листя інших видів рослин. Це може стати основою для створення універсальних інструментів для ботанічних досліджень.

Мета роботи: Здійснити морфометричний аналіз форми листя та жилкування листків *Carpinus betulus* L. з використанням згорткової нейронної

мережі U-Net навченої для семантичної сегментації основних жилок листків цього виду.

Новизна теми: Застосування нейронної мережі U-Net для детального кількісного аналізу жилкування листа є відносно новим і малодослідженим напрямком у ботаніці та екології (наприклад, біоіндикація видів, морфологія). Раніше ця нейромережа переважно використовувалася для сегментації зображень у інших галузях науки, зокрема медицині. Ми вперше створимо базу даних для вивчення листа *Carpinus betulus* L.

Завдання дослідження:

1. Створити набір даних та навчити нейромережу заповнювати пропуски на зображеннях сегментованих ділянок (хибно негативні пікселі), а також видаляти пікселі, що не належать жилкам (хибно позитивні пікселі).
2. Використати нейромережу для автоматичної сегментації жилок, а також нейромережу для відновлення сегментованих ділянок, отримати «цільові маски» для відсканованих зображень листків граба.
3. На отриманих цільових масках ідентифікувати окремі жилки, представити їх у вигляді «графа», підібрати оптимальні параметри обробки цільових масок.
4. Оцінити параметри жилкування та форми листа.
5. Навести описову статистику отриманих параметрів.
6. Провести алометричне співвідношення між щільністю жилок та площею листової пластини.

Об'єкт дослідження – листки *Carpinus betulus* L., зокрема, основні та бічні жилки.

Предмет дослідження – морфометричні показники жилкування та форми листка.

Методи дослідження: алгоритми глибокого навчання, методи цифрової обробки зображень, методи описової статистики.

Структура та обсяг роботи. Загальний обсяг роботи становить 62 сторінки. Робота складається з вступу, 3 розділів, висновків та списку використаних джерел., 59 рисунків та 21 джерело.



РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Загальні відомості про жилкування листка

Жилки (іноді їх називають нервами чи венами) є однією з найбільш помітних рис листя. Жилки в листку представляють судинну структуру органу, що простягається в листок через черешок і забезпечує транспортування води та поживних речовин між листком і стеблом, і відіграють вирішальну роль у підтримці водного статусу листка та фотосинтетичної здатності. Вони також відіграють роль у механічній підтримці листка. Хоча деякі судинні рослини мають лише одну жилку, у більшості ця судинна мережа зазвичай розділяється (розгалужується) за різними візерунками (жилкування) та утворює циліндричні пучки, зазвичай розташовані в серединній площині мезофілу (основна внутрішня тканина листка), між двома шарами епідермісу [8].



Рис. 1.1. – Основні типи жилкування листка [4]

Жилкування листка покритонасінних - це диво розвитку, сумарна довжина жилок на квадратний сантиметр листка може сягати 2 м, вони розташовані у вигляді регулярної мережі. Жилки листка забезпечують механічну підтримку листка, що дозволяє йому повертатися до світла, і утворюють ксилему, яка транспортує живильні речовини і воду для фотосинтезу і транспірації, та флоему, яка транспортує продукти фотосинтезу і сигнальні молекули з мезофілу до решти частин рослин [11].

1.2. Загальна будова жилкування листка, порядки жилок

Жилки складаються з клітин ксилеми і флоєми, занурених у паренхіму, іноді склеренхіму, і оточених клітинами пучкової оболонки. Жилкова ксилема транспортує воду від черешка по всьому пластинчастому мезофілу, а флоєма транспортує цукри з листка до решти рослини. Системи жилкування листків сильно різняться між основними лініями рослин, причому багато ранніх груп мали дихотомічно розгалужену, відкриту систему, але часто розвивалася сітчаста система. Покритонасінні мають найбільшу різноманітність у будові жилок, але поділяють ключові архітектурні елементи, тобто ієрархію порядків жилок, що утворюють сітчасту.

Зазвичай існує три порядки вен нижчого порядку, відомих як «головні вени», часто ребристі зі склеренхімою. Одна або кілька жилок першого порядку проходять від черешка до верхівки листка, з проміжками між ними розгалужуються жилки другого порядку, а між ними - жилки третього порядку.

Головні жилки можна відрізнити від другорядних жилок, які зазвичай присутні лише у покритонасінних, і які включають до чотирьох додаткових порядків менших, сітчастих жилок вищого порядку. Головні і другорядні жилки можна відрізнити за часом формування, а також за відмінностями в експресії генів під час розвитку, розмірами і розгалуженням у зрілому листі та анатомічною будовою на поперечному зрізі. Для деяких родів, особливо однодольних, характерне сітчасте «смугасте» жилкування, що включає кілька порядків поздовжніх жилок різного розміру, з невеликими поперечними жилками, що з'єднують їх.

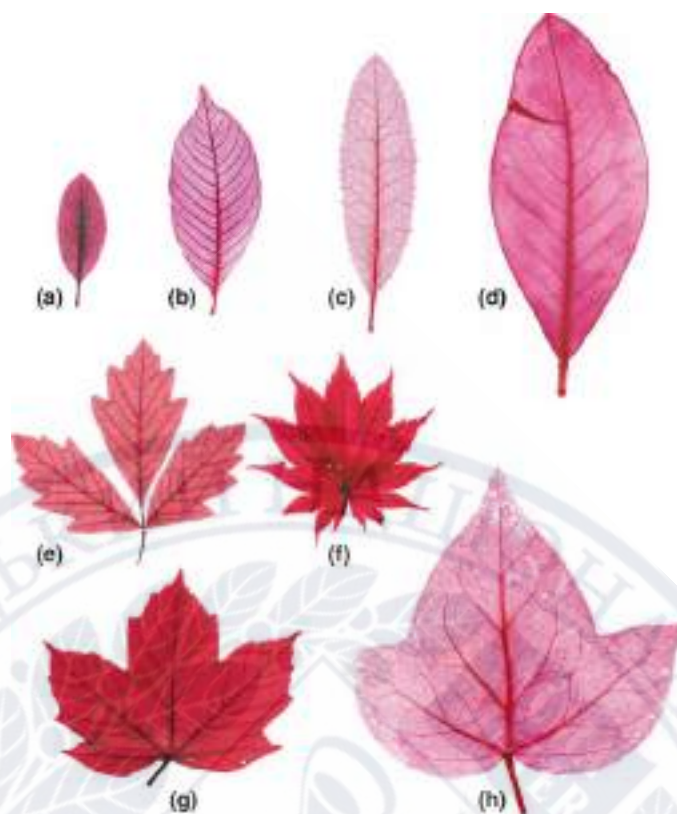


Рис. 1.2. – Різноманітність систем жилкування листя покритонасінних рослин, помітна на хімічно очищеному листі, що підкреслює звуження жилок листка, довжину основної жилки на одиницю площі, топологію жилок та розмір листка.

(a) *Comarostaphylis diversifolia*: простий перистий листок з брохідодромними вторинними (другого порядку) жилками.

(b) *Trichilia elegans*: простий перистий листок з евкамптодромними жилками другого порядку.

(c) *Heteromeles arbutifolia*: простий перистий листок з брохідодромними жилками другого порядку.

(d) *Magnolia grandiflora*: простий перистий листок з брохідодромними жилками другого порядку.

(e) *Acer griseum*: складний перистий листок з краспедодромними жилками другого порядку.

(f) *Acer japonicum*: простий пальчастий листок з креспедодромними жилками другого порядку.

(g) *Acer diabolicum*: простий пальчастий листок з креспедодромними жилками другого порядку.

(h) *Hedera canariensis*: простий пальчастий листок з брохідодромними жилками другого порядку.

У (a–d) зверніть увагу, що у видів з більшим листям головні жилки розташовані далі одна від одної, а довжина головних жилок на одиницю площі зменшується [1].

1.3. Довжина основних жилок на одиницю площі («щільність основних жилок»)

Довжина основної жилки на ділянку має кілька ключових функцій. За інших рівних умов висока основна довжина жилок на одиницю площі (основна ДЖП) може сприяти: вищому вмісту калію в листку та газообміну; стійкості системи жилок листка до пошкоджень, посухи та, потенційно, емболії заморожування-відтавання; вирівнюванню водного потенціалу по всьому листку; та біомеханічній підтримці. Однак, основні жилки також пов'язані зі значними будівельними витратами на інвестиції у вуглець та поживні речовини.

Ці функції високої кількості основних жилок були б вигідними для видів з пальчастим жилкуванням порівняно з видами з перистим жилкуванням, тобто тими, які мають кілька жилок першого порядку, що відгалужуються від основи листка. Гідравлічний та механічний захист, що забезпечується надмірністю основних жилок, був би дуже важливим для тонших і більших листків, які ще не захищені. Дійсно, види з пальчастим жилкуванням частіше зустрічаються в помірних, ніж у тропічних флорах, і частіше зустрічаються у великих листках з тонкими пластинками (і низькою масою листка на одиницю площі).

Менше листя, як правило, має вищу основну ДЖП в результаті свого розвитку. Посухостійкість та захист, що забезпечуються вищою основною ДЖП у меншого листя, пояснюють більшу кількість меншого листя в сухіших та більш відкритих середовищах існування [1].

1. 4. Пластичність, еволюція та поєднання ознак жилок листків у різних формах росту, середовищах та біомах

Ознаки жилок, як і інші ознаки листка, включаючи розмір листка і щільність прорихів, визначаються сигналами до і під час розвитку листка. Багато досліджень продемонстрували пластичність ознак жилкування в межах крони і для рослин певного виду в різних середовищах. Теоретично, листя, акліматизоване до вищого рівня освітлення, температури та надходження поживних речовин, повинно мати ознаки жилкування, пов'язані з більшою площею листка та швидкістю газообміну. Однак, листя, акліматизовані до меншого водопостачання, також часто мають ознаки жилок, пов'язані з більшою площею листової пластинки і швидкістю газообміну, а також з більшою стійкістю до посухи. Такі листки можуть краще «пристосовуватися» до вищої функції, коли вода доступна, і «пристосовуватися» із закриттям прорихів та/або спокоєм у періоди тривалого дефіциту води.

Адаптація видів до різних оселищ призводить до значних змін ознак жилок на листках. Адаптація відбувається за тими ж закономірностями, що описані для пластичності в різних середовищах в узагальненні досліджень варіацій ознак жилок у різних середовищах існування, для видів в межах однієї лінії та між лініями.

У межах певних біомів і життєвих форм листяні види мали вищу довжину жилок на одиницю площі (ДЖП), ніж вічнозелені. Крім того, в межах біомів середня ДЖП зростала від трав'янистих рослин до чагарників і дерев. У межах біомів та форм росту види, адаптовані до сонця, мали вищу ДЖП, ніж види, адаптовані до тіні. У всіх біомах існувала сильна кореляція ДЖП з

посушливістю. ДЖП позитивно корелює із середньорічною температурою і негативно із середньорічною кількістю опадів. ДЖП також зменшується з індексом тіньостійкості виду.

Хоча види сильно відрізняються за механізмами адаптації до посушливості, дуже поширеним механізмом є здійснення більшої кількості фотосинтезу під час імпульсів високої доступності. Ця тенденція не означає, що лісові види не можуть мати високу ДЖП. Дійсно, піонерні види вологих тропічних лісів часто мають високу ДЖП. Однак, у багатьох тропічних вологих лісових пологах переважають види, які приживаються як тіньовитривалі підліски, і їхня помірна щільність жилок зберігається навіть після досягнення пологу, що знижує середнє значення біома.

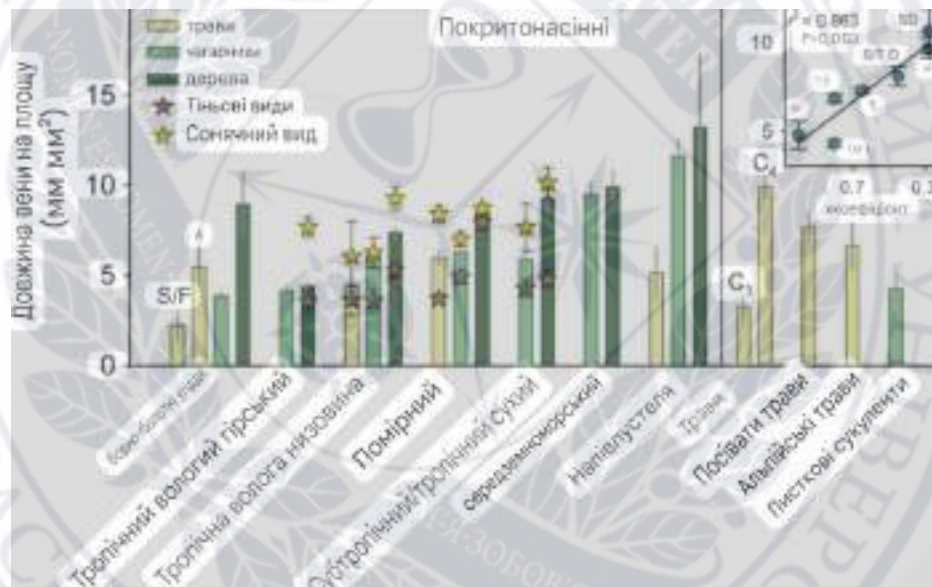


Рис. 1.3. – Мета-аналіз різноманітності довжини жилок на одиницю площі для різних форм росту, середовищ існування та біомів [1]

1.5. Закон фрактального розподілу жилок та розподіл жилок за принципом золотого перетину

Листя дерев зазвичай утворене двома компонентами: мезофілами (асиміляційна тканина листка, складається зі стовпчастої та губчастої паренхіми, знаходиться під епідермісом) та жилками. Закон фрактального розподілу жилок серед мезофілів викликав величезну цікавість у вчених.

Існує багато природних об'єктів, що володіють фрактальними властивостями, наприклад, морські зірки, кровоносна система і бронхи людей і тварин. В неживій природі: сніжинки, кристали, гірські хребти [3].

Жилки формують подібну на самих себе (фрактальну) мережу, де кожен рівень розгалуження повторює попередній у зменшеному масштабі. Це забезпечує рівномірний транспорт води та поживних речовин до всіх клітин мезофіла. Та максимальне покриття площі листа при мінімальній витраті матеріалів.



Рис. 1.4. – Відстані між першими двома бічними жилками демонструють співвідношення золотого перетину і це явище широко спостерігається у різних листках овальної форми.

Фрактальна структура підвищує стійкість листа до: розривів при сильному вітрі, втрати води при високій температурі, пошкодження травоядними тваринами [9].

1.6. Розташування бічних жилок не пов'язане з філотаксисом листка на рівні стебла

Положення листя вздовж стебла зазвичай відповідає генетично визначеному, видовому шаблону, відомому як філотаксис листка.

Філотаксис листка (від грец. *phyllon* – листок і *taxis* – розташування, порядок) – це закономірний порядок розташування листків на стеблі рослини. Це стосується просторової організації листків уздовж пагона (наприклад, супротивно, чергово, мутовчасто, спірально).

Ми досліджували, чи розташування бічних вторинних жилок вздовж первинних середніх жилок відповідає видовому шаблону, який нагадує чергування або протилежне філотаксис. Ми проаналізували жилкування дводольних видів помірного поясу з різних таксономічних груп і вибрали 18 деревних та 12 трав'янистих видів, які мають сітчасте жилкування листка. Розташування бічних жилок не було ні чергуванням, ні протилежним для жодного з видів.

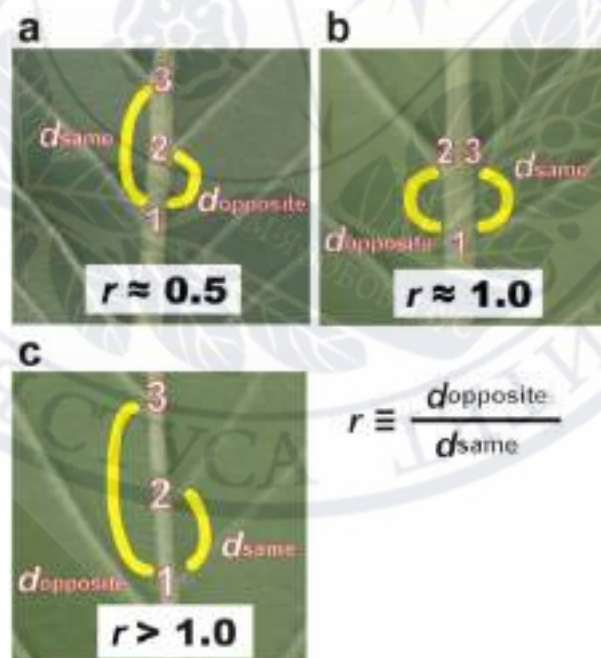


Рис. 1.5. – Розташування бічних вторинних жилок вздовж середньої жилки листя *Ulmus* (В'яз)

На панелі (a) d_{same} – це відстань між першою бічною жилкою (1) та наступною бічною жилкою (2) на протилежному боці центральної жилки, а $d_{opposite}$ – відстань між першою бічною жилкою (1) та наступною бічною жилкою (3) на тому ж боці центральної жилки. Для кожної бічної жилки співвідношення (r) розраховується як d_{same} , поділене на $d_{opposite}$.

(a) $r \approx 0,5$ вказує на те, що бічна жилка на одному боці листкової пластинки виникла приблизно посередині між двома точками початку бічних жилок на протилежному боці. (b) $r \approx 0$ або $r \approx 1$ вказує на те, що бічна жилка на одному боці листкової пластинки виникла приблизно в тій самій точці, що й інша бічна жилка на протилежному боці. (c) Ми також спостерігали кілька випадків, коли дві послідовні бічні жилки знаходилися на одному боці листкової пластинки. Цей нерегулярний візерунок виражається як $r > 1$. (Фотографії Кохея Коями).

Розташування бічних жилок було сумішшю симетричних та асиметричних шаблонів. Наші результати показують, що розташування бічних жилок не пов'язане ні з філотаксисом листка на рівні стебла (чергування проти протилежного), ні з формою життя (дерев'яниста проти трав'яниста). Тому наші результати загалом узгоджуються з гіпотезою каналізації, згідно з якою розташування бічних жилок не повністю визначено генетично до формування листка [7].

1.7. Звуження радіусів жилок відповідає закону Мюррея

Закон Мюррея описує оптимальне розгалуження судинних мереж (наприклад, жилок листків або кровоносних судин) для мінімізації енергетичних витрат на транспортування рідини. Він стверджує, що куб радіуса материнської судини дорівнює сумі кубів радіусів її дочірніх гілок [5].

Розподіл значень α по всіх місцях з'єднання жилок та по всьому листю має сильну праву асиметрію, і хоча він не проходить тест на нормальність (тест Колмогорова-Смірнова є відомою чутливістю), візуальний огляд рисунку

показує, що розподіл досить добре апроксимується нормальною кривою в логарифмічному просторі (з основою 10). Медіанне неперетворене значення для α становить 2,96 (закон Мюррея передбачає 3), а середнє значення в логарифмічному просторі становить 0,52 (закон Мюррея передбачає $\log_{10}(3) \approx 0,48$), таким чином, розподіл значень α , а отже, і співвідношення радіусів жилок, загалом узгоджуються із законом Мюррея. Цей розподіл значною мірою зважений числовим домінуванням менших порядків жилок.

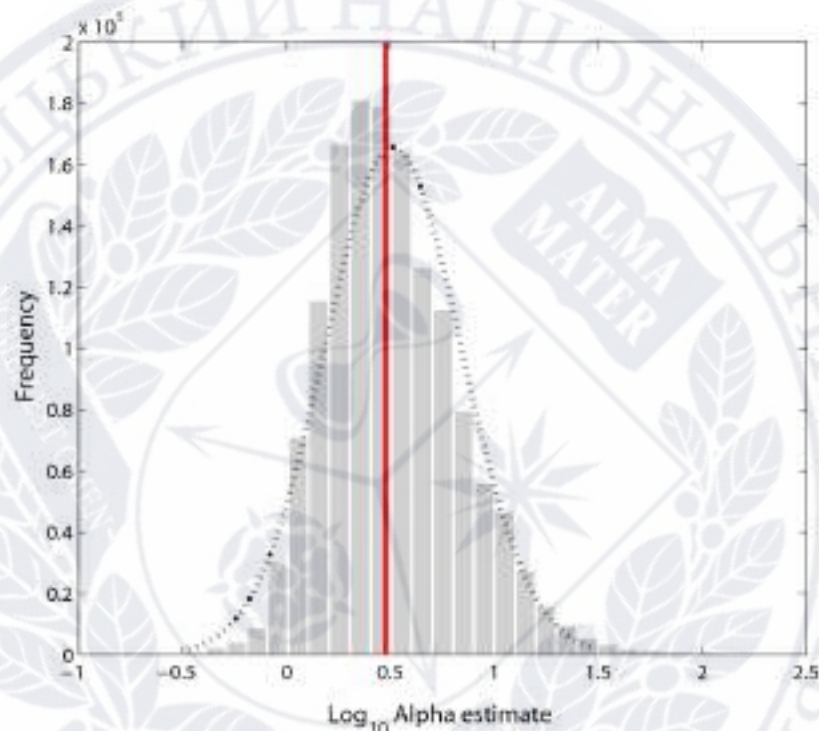


Рис. 1.6. – Розподіл частот для значення α , апроксимованого розв'язанням формули $r_0\alpha = r_1\alpha + r_2\alpha$, для α для 1 514 771 окремих місць з'єднання жилок на всіх 349 листках.

Зауважте, що хоча розподіл не проходить тест на нормальність, він добре апроксимується нормальною кривою (штрихована лінія) та сильно перекривається з математичним очікуванням закону Мюррея, $\log_{10}(3) = 0,49$ (червона вертикальна лінія), із середнім значенням 0,52. Таким чином, розподіл оцінених значень α сильно узгоджується з математичним очікуванням закону Мюррея [6].

1.8. Архітектура жилок листя як ключ до розуміння екологічних закономірностей

Розмір листя та жилкування демонструють значну різноманітність у дводольних рослин і є ключовими детермінантами адаптації рослин в екосистемах минулого та сьогодення. Тут ми представляємо глобальні масштабні зв'язки ознак жилкування з розміром листка.

У різних видів жилкування листків демонструє величезне структурне різноманіття, що ще більше вражає з огляду на їхній спільний розвиток і функції. Функціональне значення жилкування листків викликає все більший інтерес у різних галузях науки, оскільки особливості жилкування, включаючи діаметр і щільність жилок, а також розмір листка, є ключовими факторами, що визначають продуктивність рослин і навіть зміни в генетичних лініях, які домінували у рослинному світі впродовж тривалого часу.

Незважаючи на різноманітність структури судин, листки покритонасінних мають спільну структурну основу та алгоритм розвитку. Дводольні рослини, як правило, мають ретикулярну, яка базується на діаметрі та розгалуженні жилок, і яка рано розвинулась у покритонасінних і забезпечує високу транспортну здатність відносно затрат на її побудову. Як правило, «головні жилки» ('major veins') включають одну або кілька жилок першого порядку (1°), що йдуть від черешка до верхівки листка, жилки другого порядку (2°), що розгалужуються через певні проміжки, жилки третього порядку (3°) і до п'яти додаткових порядків менших «другорядних жилок» ('minor veins'), що утворюють сітчасту систему між жилками 1° і 2° [12, 13, 14, 15, 16].

Загальні співвідношення масштабу судинної архітектури з розміром листка можуть мати важливе значення для біогеографії, еволюції та глобальної екології. Однак, незважаючи на велику потенційну важливість таких закономірностей, дотепер не отримано жодних переконливих доказів взаємозв'язку між масштабуванням жилок та розміром листка у різних видів. Дані досліджень, в яких було залучено десять або менше видів, показали

негативну залежність (a negative scaling) щільності основних (major) жилок від розміру листка, а щільність другорядних (minor) жилок не залежала від розміру листка. Подальше дослідження з використанням автоматизованого аналізу зображень низької роздільної здатності показало, що щільність жилок не залежить від розміру листка у 339 видів; однак, у цьому дослідженні вимірювали лише частину жилкової системи і не розрізняли порядки жилок, що не дозволило зробити остаточний висновок про загальну залежність ознак жилок від розміру листка.

Щільність жилок зменшується зі збільшенням розміру листка, що відображає алометричні закономірності збільшення та порушення функціональних характеристик рослин.

Висока щільність жилок у малих листках сприяє швидкому фотосинтезу в посушливих середовищах, тоді як низька щільність у великих листках оптимальна для вологих, затінених екосистем.

Архітектура житлового листя пояснює глобальні екологічні закономірності, такі як продуктивність екосистем і кругообіг вуглецю, залежно від кліматичних умов.

Розуміння масштабування житлової мережі дозволяє прогнозувати, як рослини реагують на зміни клімату, включаючи посуху та підвищення температури.

Аналіз житлової архітектури сотень видів рослин у поєднанні з алометричним моделюванням розкриває зв'язок між структурою листка та екологічними функціями [17, 18, 19, 20, 21].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В рамках попередніх курсових та дипломних робіт, що проводились що виконувались на кафедрі біофізики та фізіології була розроблена згорткова нейромережа здатна здійснювати сегментацію жилок листа граба.

Ця нейромережа здатна сегментувати основні жилки листа. Жилки вона розділяє на два класи: центральна жилка та бічні жилки що від неї відгалужуються. Всі бічні жилки вона представляє як один клас тобто на виході нейромережі вони всі представлені на одній спрогнозованій карті імовірностей. Для морфометричного аналізу жилки мають бути відокремлені одна від одної.

Хоча бічні жилки є окремими графічними об'єктами іноді нейромережа робить помилки в результаті яких деякі, що розташовані близько одна до одної можуть бути з'єднані або жилка має розрив. Як правило такі помилки нейромережі пов'язані з поганою якістю відповідних ділянок вхідного зображення. Все це створює перешкоди для послідууючої ідентифікації окремих жилок і їх морфометричного аналізу.

Одним з можливих методів усунення помилок згаданої нейромережі є створення додаткової нейромережі яка буде усувати помилки першої, тобто закривати наявні розриви жилок і видаляти помилкові з'єднання.

Про ці та інші етапи роботи детальніше написано в цій методиці.

2.1. Збір матеріалів та сканування листків

Листя збирали влітку в різних місцях міста Вінниця. У кожному з обраних місць листя збирали приблизно з 6-8 дерев. Листя збирали з гілок дерев, що ростуть приблизно на одному рівні, за приблизно однакових умов освітлення, з дерев з приблизно однаковою товщиною стовбура. Перед скануванням листя мили та висушували.

2.2. Сегментація на основі глибокого навчання

Для автоматичної сегментації жилок листя було використано модифіковану згорткову нейронну мережу (CNN) U-Net.

U-Net — це згорткова нейронна мережа, яка була розроблена для сегментації біомедичних зображень на факультеті комп'ютерних наук університету Фрайбурга, Німеччина. Мережа базується на повністю згортковій мережі (не плутайте з повнозв'язною мережею), архітектура якої була модифікована і розширена так, щоб працювати з меншою кількістю зображень для навчання і давати більш точні та швидкі результати сегментації.

Основна ідея полягає в тому, щоб доповнити звичайну мережу послідовних шарів, де операції пулінга (зменшення розмірності) об'єктів замінюються операторами збільшення розмірності. Отже, ці шари збільшують роздільну здатність виходу. Більш того, наступний згортковий шар може навчитися будувати точний вихід на основі цієї інформації.

Однією з важливих змін у U-Net є те, що в частині, в якій відбувається збільшення розмірності, існує велика кількість каналів ознак, які дозволяють мережі поширювати контекстну інформацію на шари більшої роздільної здатності. Як наслідок, частина в якій відбувається розширення є більш-менш симетричною до частини звуження, це дає U-подібну архітектуру [10].

CNN U-Net була створена та навчена в рамках попередньої дипломної роботи. CNN подається на основі зображень листя у градаціях сірого розміру 512x512. Для отримання вхідних зображень для CNN, скановані зображення листя пройшли етапи попередньої обробки: - Перетворення кольорових зображень на зображення у градаціях сірого - Покращення контрастності - Зміна розміру 275сканованого зображення листя після попередньої обробки до нового розміру 512x512.

2.3. Відновлення пошкоджень сегментованих вен на основі глибокого навчання

Іноді прожилки на передбачуваних масках мають прогалини (хибно позитивний результат), або CNN помилково класифікує пікселі, які не належать до прожилки, як пікселі прожилок (істинно позитивний результат). Як правило, такі помилки пов'язані з низькою якістю відповідних областей зображення листка. Була створена нова CNN та навчена автоматично виправляти такі дефекти. CNN також мала архітектуру U-Net. Для навчання цієї CNN використовувався набір масок базової істинності, створених для навчання CNN, яка виконує сегментацію прожилок. Ці маски також використовувалися як маски базової істинності для нової CNN. Ті ж маски також подавалися на вхід CNN, але зі штучно створеними пошкодженнями.

Набір даних містить загалом 300 прикладів.

2.4. Післяобробка відремонтованих прогнозованих масок

Як описувалося вище, отримані в результаті автоматичної сегментації та відновлення цільової маски малого розміру $512 \times 512 \times 3$. Три канали представляють картини ймовірності того, що піксель належить одному з трьох класів, а саме: бічні жилки, центральна жилка та інші частини вхідного зображення, що не належить першим двом класам. На наступному етапі мережа жилок представлялася у вигляді ненаправленого мультиграфа. Краї цього графа представляють окремі жилки, вузли графа представляють або кінцеві точки жилок або точки розгалуження. Тому бічні жилки на відповідній масці представлені як єдина сукупність для створення графу. Їх потрібно відокремити одну від одної. Жилка на масці ідентифікується як безперервний ізольований об'єкт. Застосування відновлювального CNN є причиною до усунення наявних розривів у жилках, що робить з них безперервний об'єкт (кожний піксель об'єкта якого має по сусідству інший піксель). З іншого боку, сусідні ділянки на масі, об'єднані між собою гібно позитивними пікселями, відновлювальна нейромережа може їх роз'єднати, що робить з ними ізольовані

об'єкти, які не мають найближчих сусідніх пікселів. Але не дивлячись на те, що відновлюючи нейромережею усуваємо багато помилок, іноді на масці залишаються невеликі ізольовані об'єкти, які складаються з кількох пікселів (хибно позитивні пікселі). Для того, щоб вони не були ідентифіковані як жилка, їх потрібно видалити з маски. Для цього обчислювалися площі всіх наявних на масі ізольованих об'єктів. І об'єкти, площа яких є менша за певне порогове значення (мінімально можливе значення площі бічної жилки) видалялися з маски. Описана проблема стосувалася перш за все самих бічних жилок, для центральної жилки такого роду помилки практично не зустрічалися. Це пов'язано з тим, що зображення центральної жилки є надзвичайно контрастним. Натомість окремі ділянки бічних жилок на деяких відсканованих зображеннях можуть проглядатися нечітко. Перед ідентифікацією жилок всі наявні об'єкти на масці скелетозувалися, після цього їх товщина дорівнювала один піксель.

Після жилок ми також визначали контур листової пластинки. Для цього використовувалися відскановані зображення листка. Для знаходження контуру необхідно відокремити пікселі, що належать листку від пікселів фону (сегментація листка зображення), для цього потрібно підібрати відповідне порогове значення яскравості.

Перед скануванням листків на деяких з них була присутня ніжка, а на деяких була видалена майже до основи листка. Наявність ніжки на зображенні буде впливати на розмір площі листової пластинки, а також довжини середньої жилки, яка буде визначатись автоматичними методами, тому на зображенні листків, де присутня ніжка вона виділялася, а також виділялася частина сегментованої середньої жилки, яка відповідає ніжці, а також виділялася частина контуру листка, що відповідає ніжці. Для знаходження і вирізання ніжки використовувалися морфологічні операції (видалення всього, що не відповідає шаблону), які потребують визначення розміру ядра, яке має приблизно відповідати можливому розміру та орієнтації ніжки на зображеннях.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати проведеного дослідження, спрямованого на кількісний аналіз житлового листка *Carpinus betulus* L. з використанням згорткової нейронної мережі U-Net, надають важливу інформацію щодо морфометричних характеристик листів та їхньої залежності від архітектури житла. У цьому розділі обговорюються ключові висновки, їх наявність з наявними літературними даними, а також деякі обмеження та перспективи подальших досліджень.

3.1. База даних для вивчення листя *Carpinus betulus* L.



Рис. 3.1. – Приклад відсканованого зображення листя без попередньої обробки

Створення бази даних із 300 прикладів відсканованих зображень листків *Carpinus betulus* L. стало невід’ємним кроком для забезпечення надійного навчання нейронної мережі. Використання однакових умов збору матеріалу (рівень висоти гілок, освітлення, товщина стовбура) сприяло мінімалізації впливу зовнішніх факторів на морфометричні показники. Попередня обробка зображення, що включає перетворення в градації сірого та

підвищення контрастності, дозволила підвищити якість сегмента. Різна якість відсканованих зображень могла вплинути на точність виявлення дрібних жилок, особливо у верхніх зонах, де контрастність нижча, що потребує подальшого вдосконалення методів обробки.

3.2. Отримання вхідних зображень для U-Net CNN



Рис. 3.2. – Оброблене зображення листка граба

Застосування модифікованої U-Net для сегментації центральних та бічних жилок продемонструвало високу ефективність, що підтверджується якісними цільовими масками. Додаткове навчання U-Net для виправлення дефектів (розривів і помилкових з'єднань) значно підвищило точність аналізу, усуваючи хибно позитивні та хибно негативні пікселі. Проте навіть після виправлення використовують додаткові фільтри для усунення шумів, особливо для бічних жилок із низькою контрастністю.

3.3. Глибоке навчання неймережі U-Net CNN

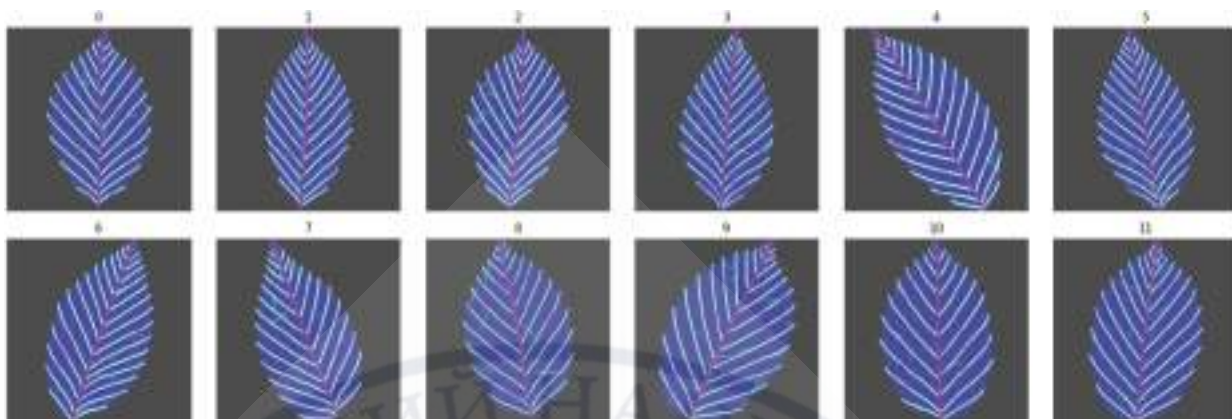


Рис. 3.3. – Приклади вхідних масок з набору даних для навчання U-Net CNN для відновлення пошкоджених прожилок.



Рис. 3.4. – Приклад вхідних даних та маски наземних даних з набору даних для навчання U-Net CNN для відновлення пошкоджених вен

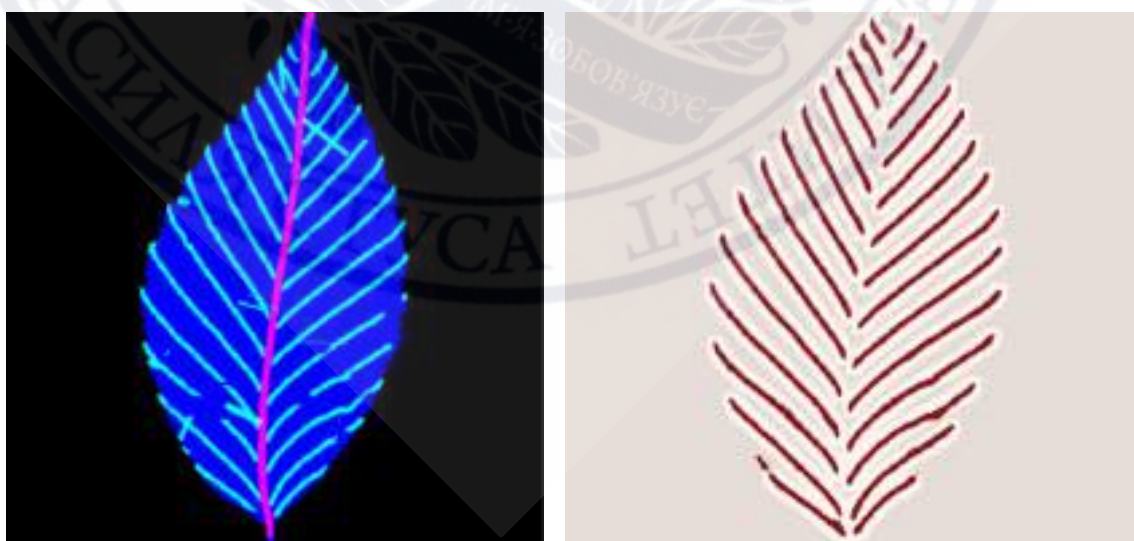


Рис. 3.5. – Приклад вхідної (ліворуч) та вихідної (праворуч) масок CNN для відновлення пошкоджених жилок.

Перетворення мережевих жилок у граф із чітко відокремленими краями і вузлами (точками розгалуження чи кінцями) дозволило ефективно аналізувати топологію жилок. Скелетонізація та видалення об'єктів із площею нижче порогу забезпечило якісну ізоляцію жилок. Однак можлива недооцінка дрібних жилок у верхніх частинах листка через їхню низьку роздільну здатність на зображенні може бути включена на повноту графа, що потребує подальшої перевірки з використанням високоякісних сканерів.

3.4. Результати післяобробки відремонтованих прогнозованих масок

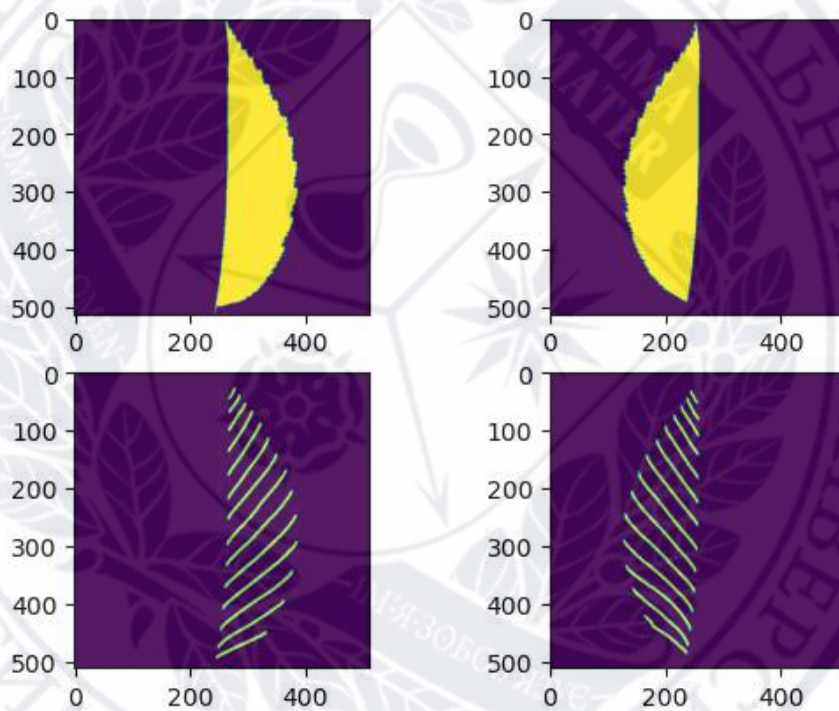


Рис. 3.6.— Відокремлення правих та лівих бічних жилок



Рис. 3.7. — Відрізання фрагмента на центральній жилці,
що відповідає ніжці листа

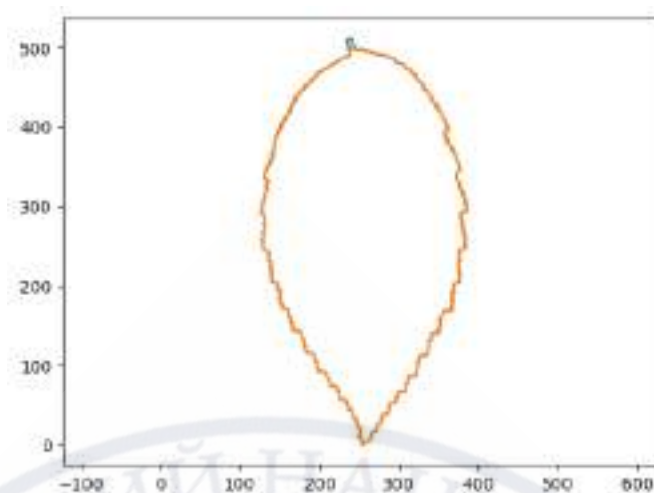


Рис. 3.8. – Відрізання фрагмента контуру листа, що відповідає ніжці
листа



Рис. 3.9. – Ідентифікація окремих ділянок на очищеному зображенні з
ізолюваними жилками, які не мають розривів

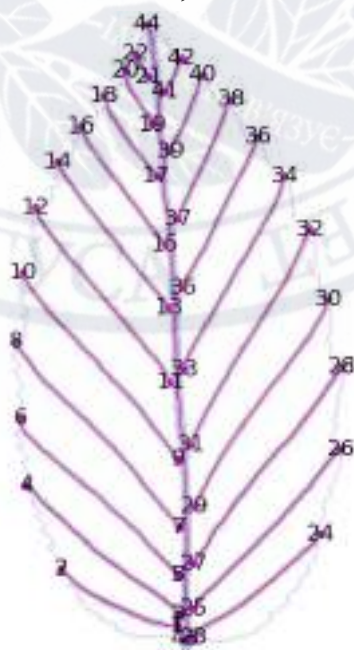


Рис. 3.10. – Представлення мережі жилок у вигляді графа

Виміряні параметри, такі як периметр, площа листової пластинки, довжина жилок і кути нахилу, дають детальну картину морфології листків *Carpinus betulus* L. Використано метод найменших квадратів для апроксимації кутів, виявлено певну похибку, особливо для перших бічних жилок, що може бути пов'язано з їхньою нелінійною формою. Аналіз площі верхньої та нижньої половини листка при різних відсотках довжини центральної жилки (25%, 50%, 75%) показав асиметрію в розподілі маси листової пластинки, що може бути пов'язано з адаптацією до механічного навантаження чи світлового градієнта.

3.5. Оцінка параметрів жилкування та форми листа (морфометричні показники жилкування та форми листа)

На малюнках наочно представлені результати вимірювань морфометричних показників жилок та форми для одного з листків, які не належать до навчального набору даних.

Морфометричні показники жилок листа рослин – це числові характеристики, що описують форму, розмір, щільність та інші особливості жилкування листової пластинки.

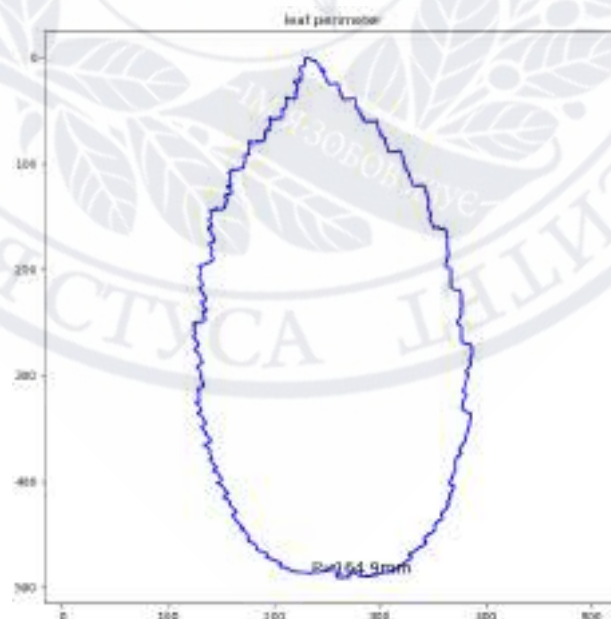


Рис. 3.11. – Периметр листової пластини в міліметрах. Показаний контур листової пластини.

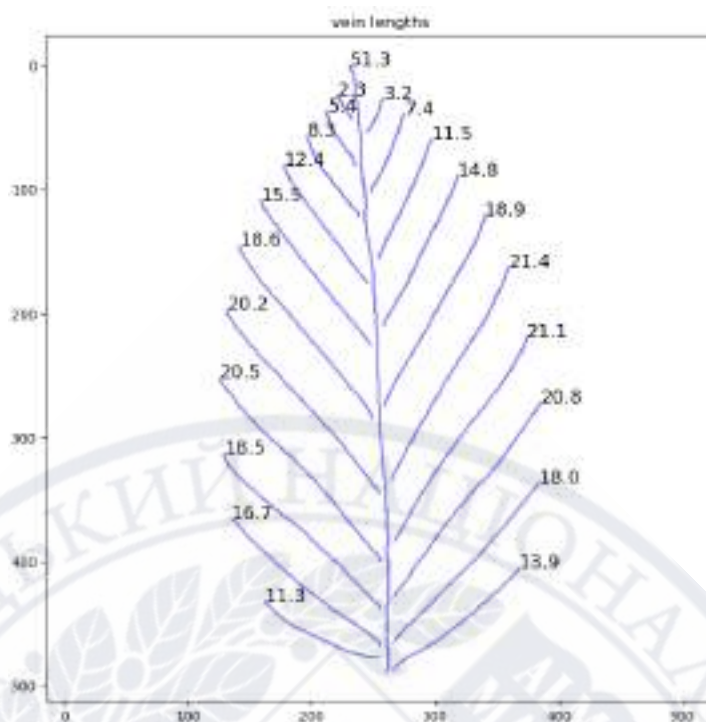


Рис. 3.12. – Довжина жилок в міліметрах

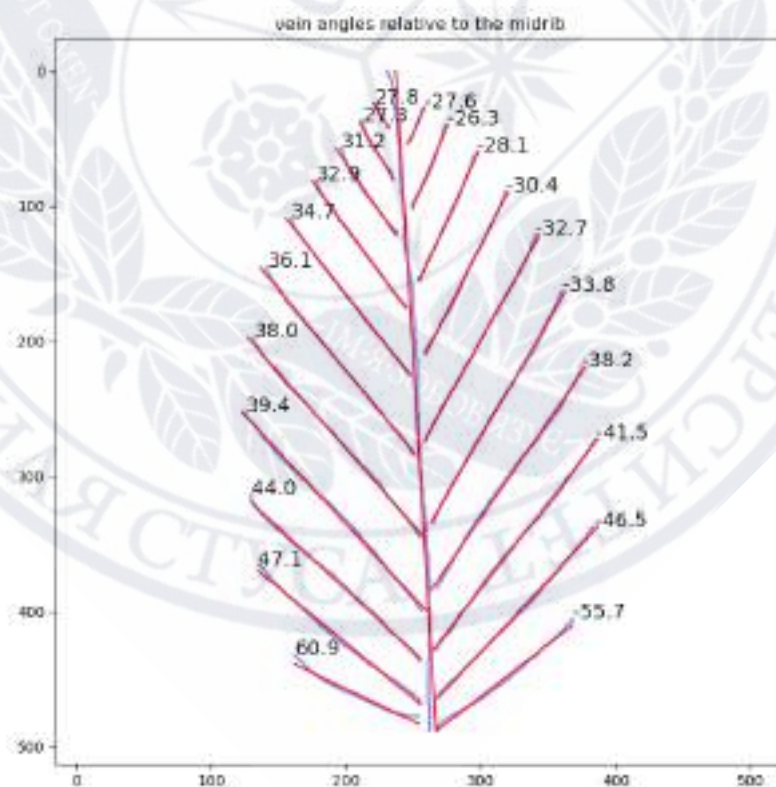


Рис. 3.13. – Кути нахилу бічних жилок відносно центральної жилки в градусах.

Для отримання кутів жилки допасовувались прямими лініями з використанням методу найменших квадратів. Кути визначались як кути між відповідними допасованими лініями. Синім показані скелетонізовані бічні та центральна жилка, червоним показані лінії, що були до них допасовані.

На рисунку показані кути нахилу бічних будинків окремо центральної жилки в градусах. Для отримання кутів жилки допасовувались прямими лініями з використанням методу найменших квадратів. Кути визначались як кути між відповідними допасованими лініями. Як можна побачити з рисунку останні жилки не є ідеально прямими лініями, тому цей метод може дати певну похибку. Особливо це помітно щодо перших жилок, де відхилення є найбільшими.

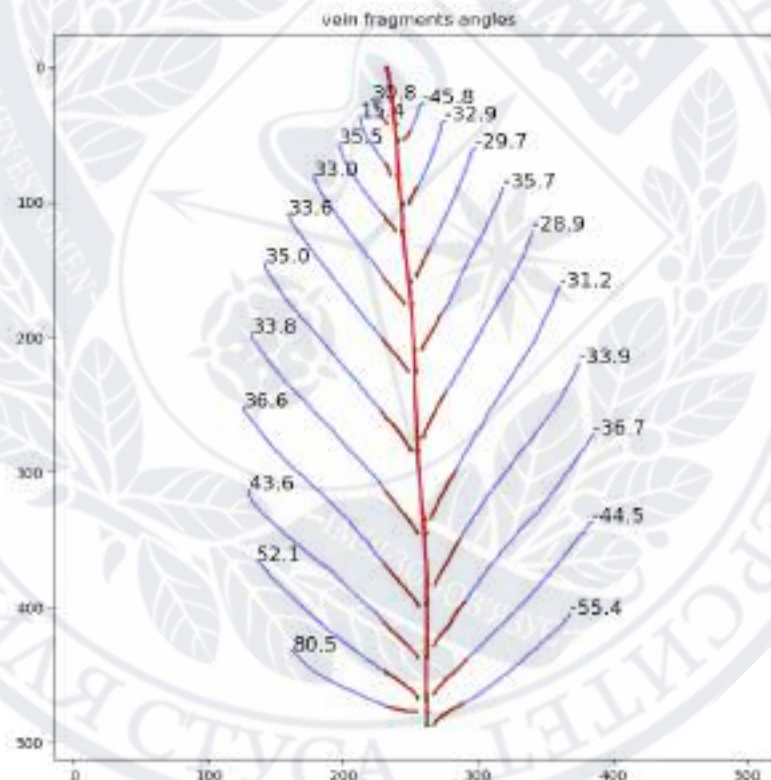


Рис. 3.14. – Кути нахилу фрагментів бічних жилок відносно центральної жилки в градусах.

Для отримання кутів, прямими лініями з використанням методу найменших квадратів, допасовувались початкові фрагменти кожної бічної жилки та фрагмент центральної жилки, починаючи від точки відгалуження даної бічної жилки. У цьому прикладі довжини фрагментів дорівнювали 20%

від довжини жилки. Кути визначались як кути між відповідними допасованими лініями. Синім показані скелетонізовані бічні та центральна жилка, червоним показані лінії, які допасовані до їх фрагментів.

Кути між центральною і бічними жилками також можна вимірювати за допомогою допасування лінії не всієї жилки та відповідних фрагментів. Наприклад, можна використовувати початкові фрагменти бічних жилок (фрагменти, які починаються від точки відгалуження бічної жилки від центральної жилки), а також відповідні їм фрагменти центральної жилки. На центральній жилці можна брати фрагмент, що починається від точки відгалуження бічної жилки. Довжина фрагментів може бути фіксованою або визначатись у відсотках від загальної довжини кожної жилки.

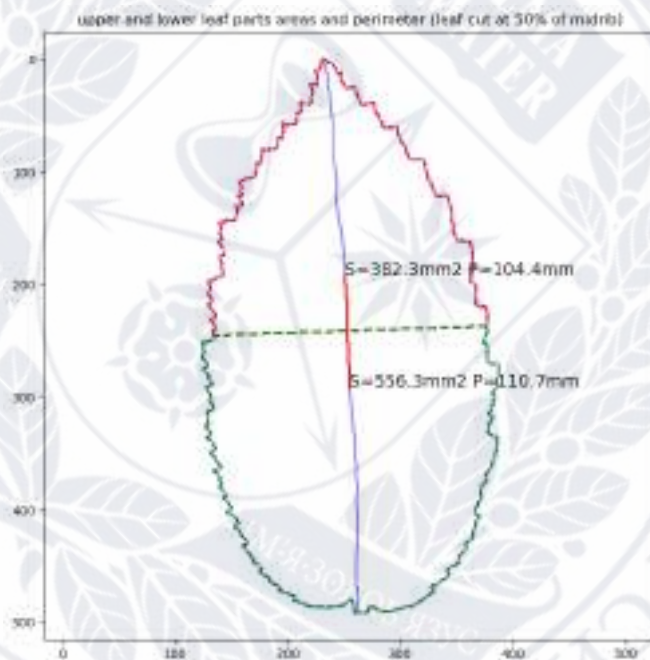


Рис. 3.15. – Площа двох частин листа, що розміщується при його перерізанні перпендикуляром, проведеним до центральної жилки на певній її довжині.

В даному випадку довжина склала 50% від повної довжини центральної жилки. Для проведення перпендикулярного фрагмента центральної жилки навколо точки, з якої виходить перпендикуляр апроксимувалася прямою лінією з використанням методу найменших квадратів. Перпендикуляр проводився до цієї лінії.

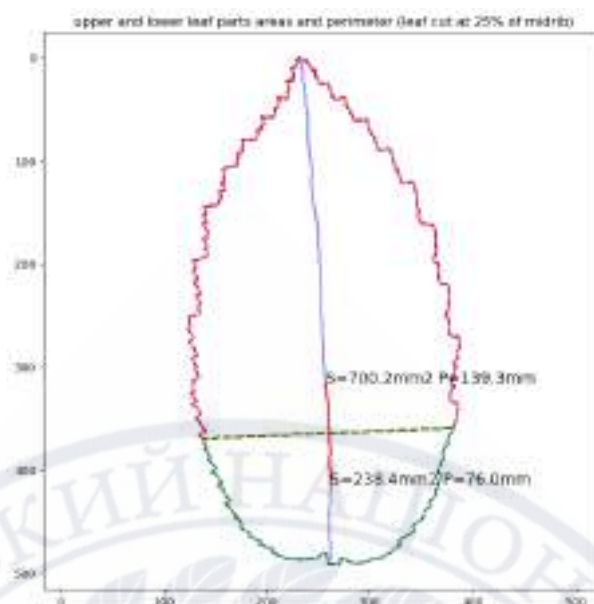


Рис. 3.16. – Площа двох частин листа, що розміщується при його перерізанні перпендикуляром, проведеним до центральної жилки на певній її довжині.

В даному випадку довжина склала 25% від повної довжини центральної жилки.

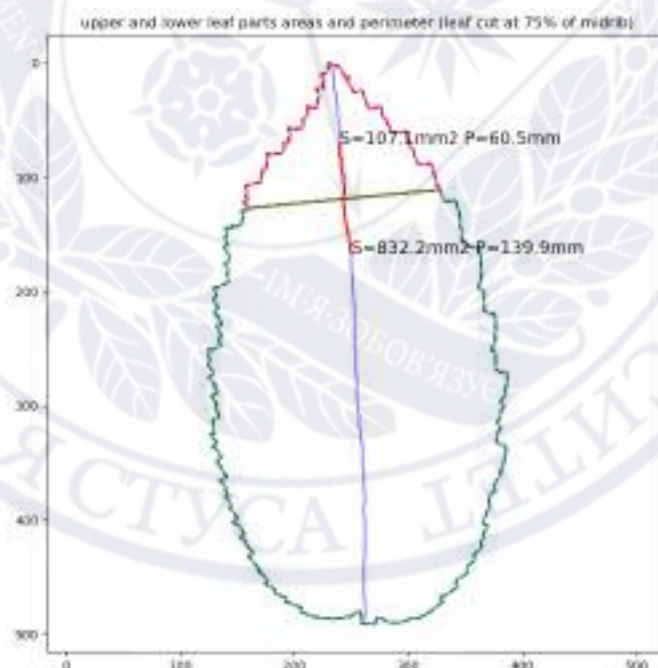
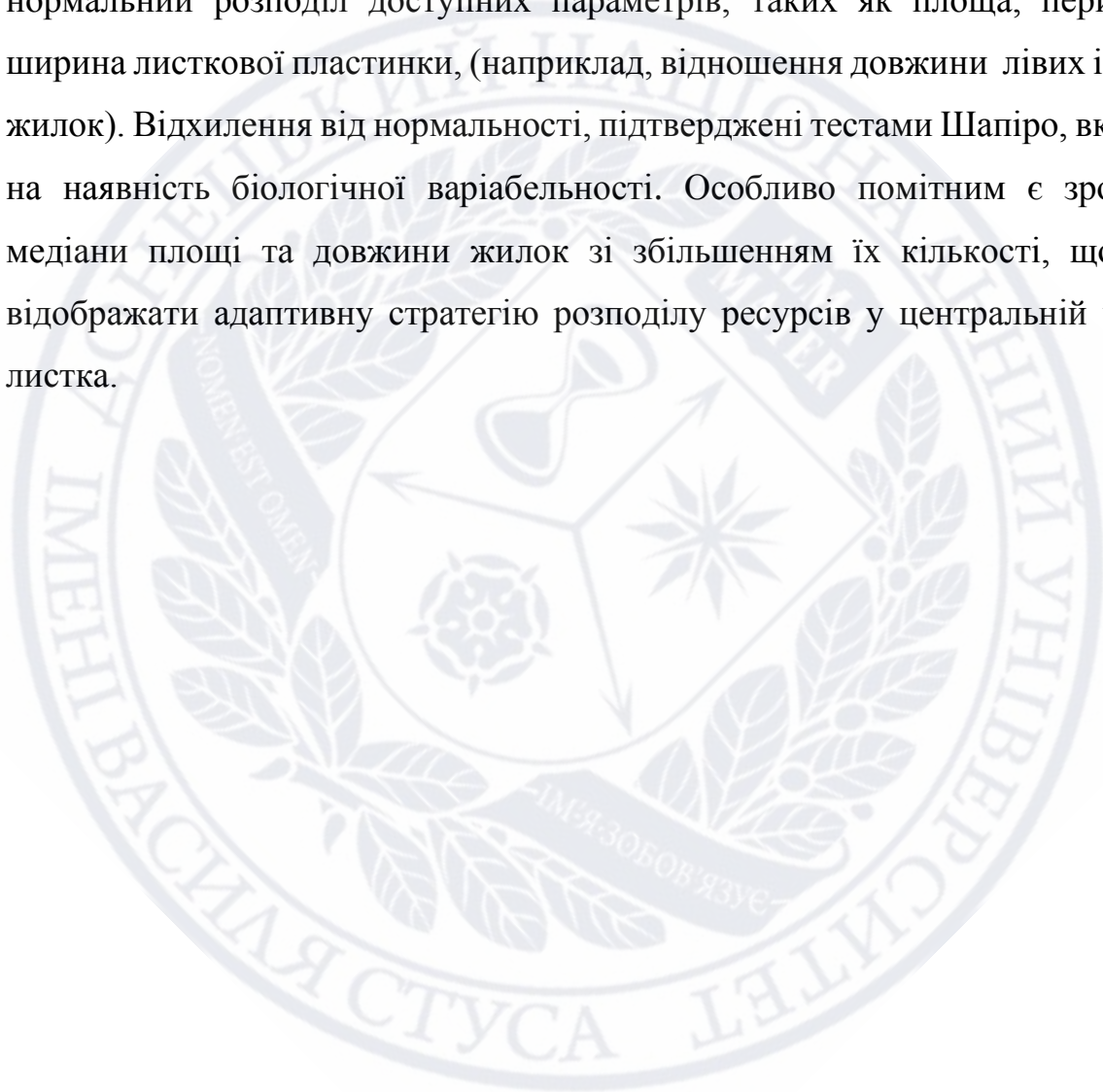


Рис. 3.17. – Площа двох частин листа, що розміщується при його перерізанні перпендикуляром, проведеним до центральної жилки на певній її довжині.

В даному випадку довжина склала 75% від повної довжини центральної жилки. Для проведення перпендикулярного фрагмента центральної жилки навколо точки, з якої виходить перпендикуляр апроксимувалася прямою лінією з використанням методу найменших квадратів. Перпендикуляр проводився до цієї лінії.

Гістограми та ядрові оцінки розподілу густини демонстрували нормальний розподіл доступних параметрів, таких як площа, периметр і ширина листкової пластинки, (наприклад, відношення довжини лівих і правих жилок). Відхилення від нормальності, підтверджені тестами Шапіро, вказують на наявність біологічної варіабельності. Особливо помітним є зростання медіани площі та довжини жилок зі збільшенням їх кількості, що може відображати адаптивну стратегію розподілу ресурсів у центральній частині листка.



3.6. Описова статистика параметрів листка та його жилкування

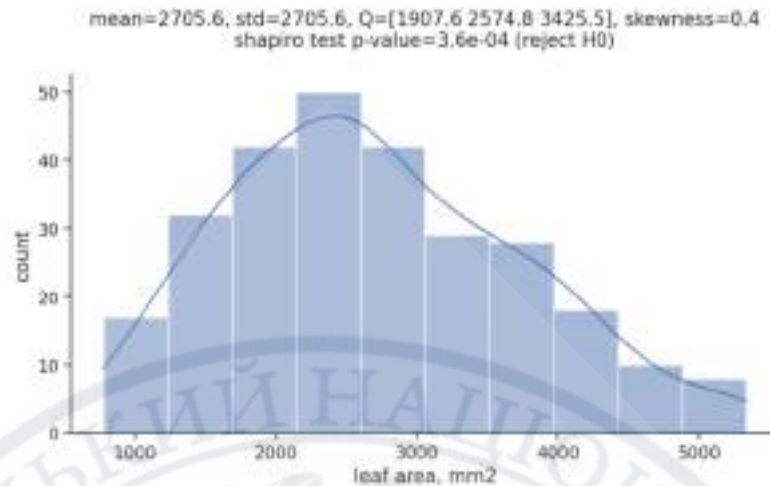


Рис. 3.18. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин

Розподіл демонструє нормальний характер із піком у середній частині площі, що показує типову варіабельність розмірів листків у виборі.

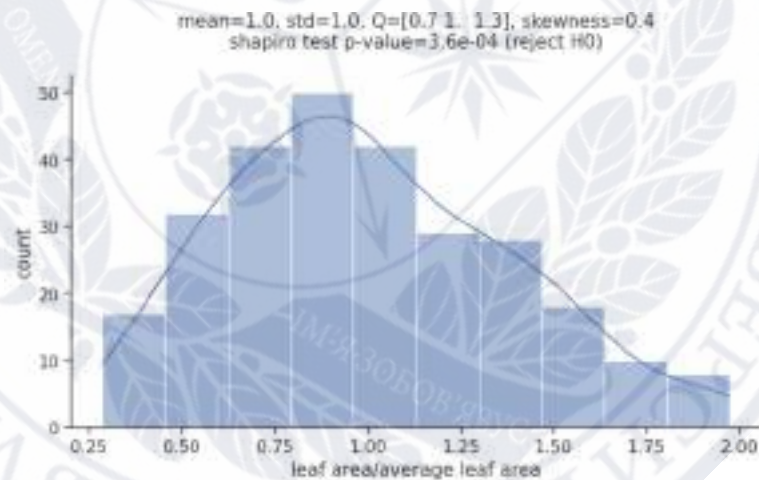


Рис. 3.19. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин відношення площі листової пластини до середньої площі всіх листових пластин

Розподіл зосереджених навколо одиниці, з легкою асиметрією, що вказує на незначні відхилення від середнього значення.

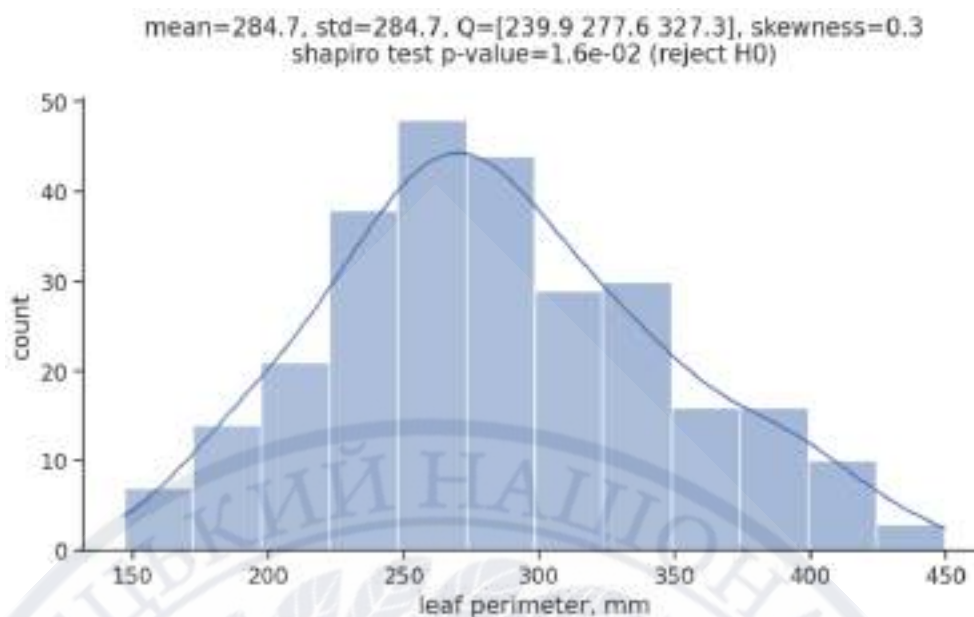


Рис. 3.20. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин периметру листової пластини.

Пік розподілу відповідає середньому значенню периметра, із розтягнутим хвостом, що має наявність листків із вираженими контурами.

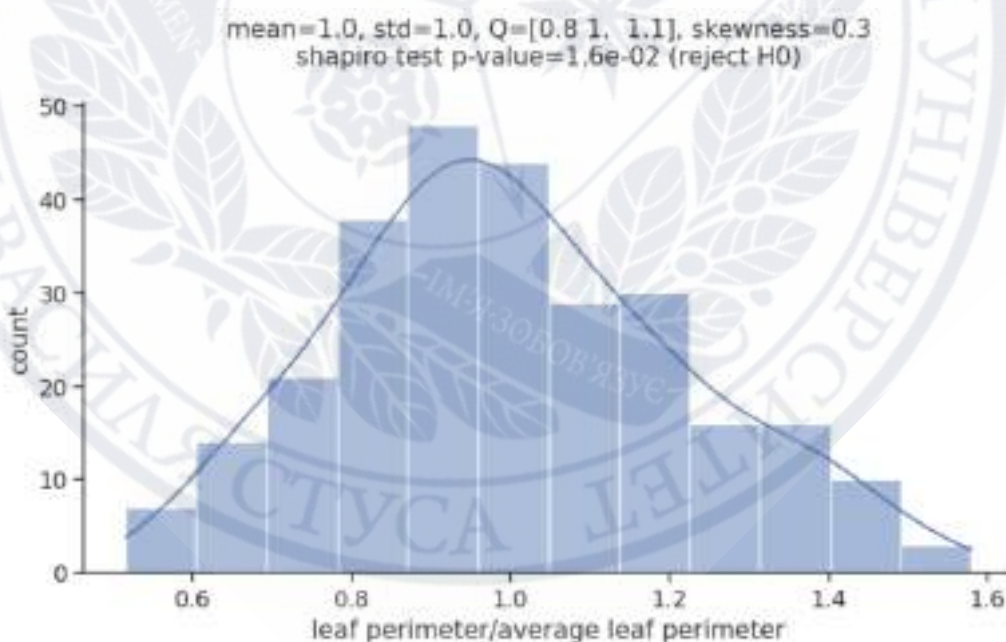


Рис. 3.21. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин відношення периметрів листових пластин до середнього периметру всіх листових пластин

Розподіл симетричний із піком біля одиниці, що показує відносну однорідність форм листків.

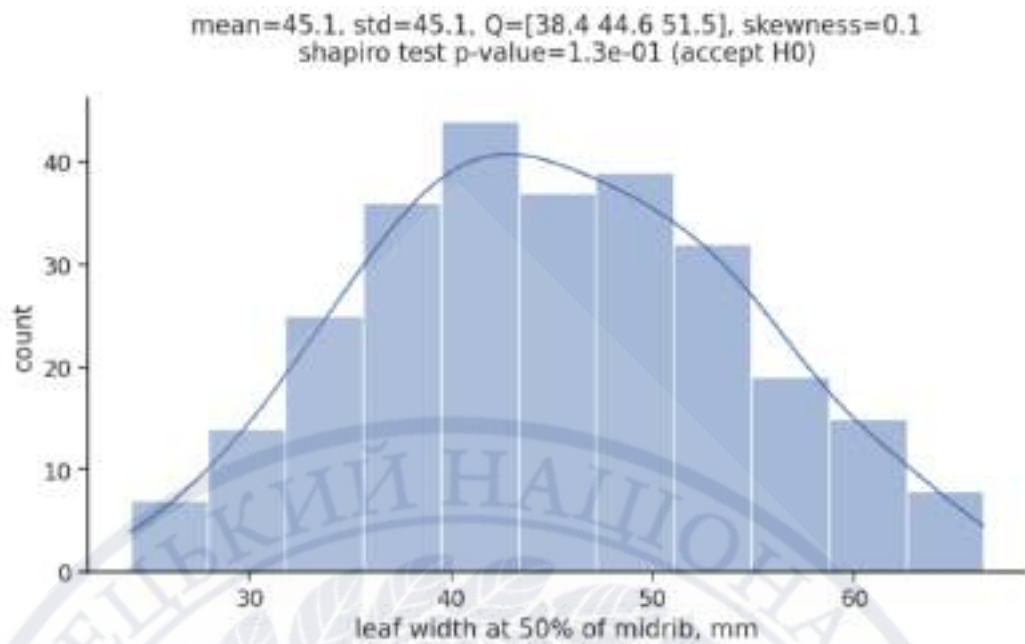


Рис. 3.22. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин ширини листових пластин на 50% висоти середньої жилки

Розподіл має нормальний характер із чітко вираженим максимумом, що показує стабільність ширини в середній частині листка.

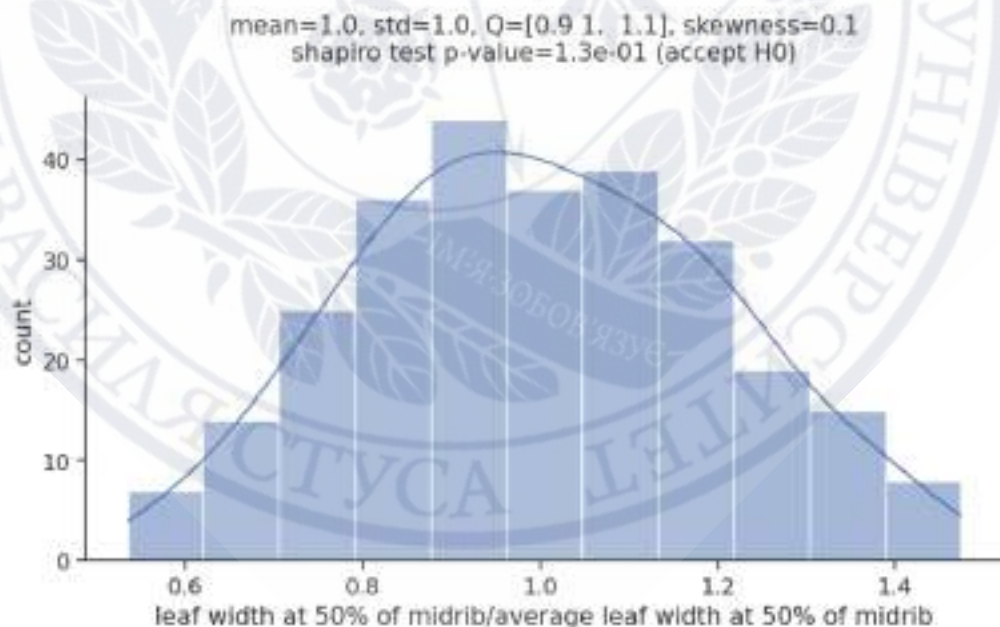


Рис. 3.23. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин відношення ширини листових пластин на 50% висоти середньої жилки до їх середнього значення по всій вибірці.

Розподіл зосереджених навколо одиниці з незначними відхиленнями, що підтверджує узгодженість даних.

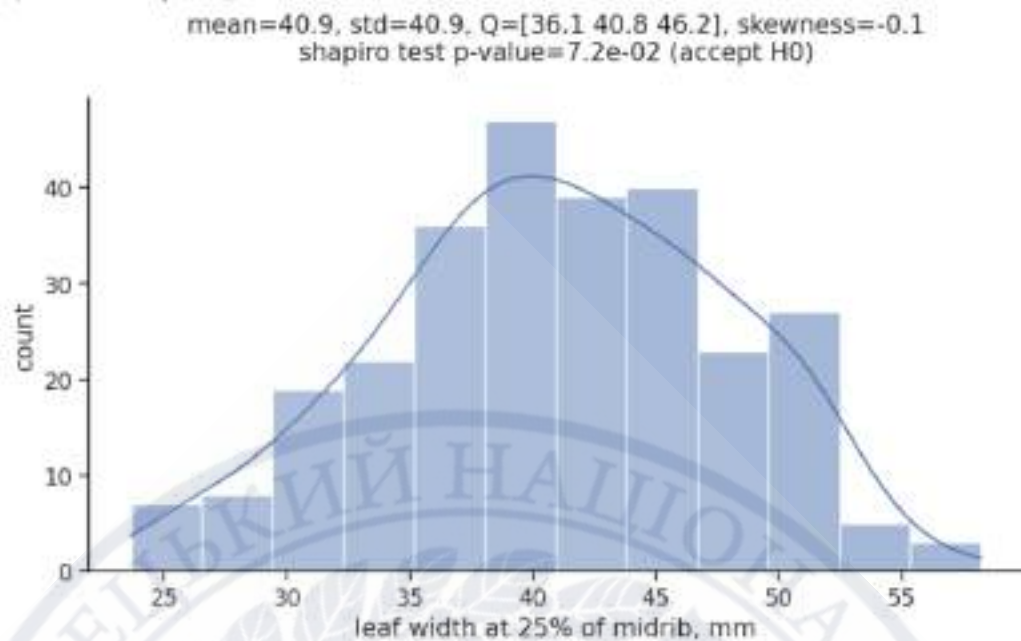


Рис. 3.24. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин ширини листових пластин на 25% висоти середньої жилки

Розподіл демонструє більшу частину значення, що може бути пов'язано з асиметрією верхньої частини листка.

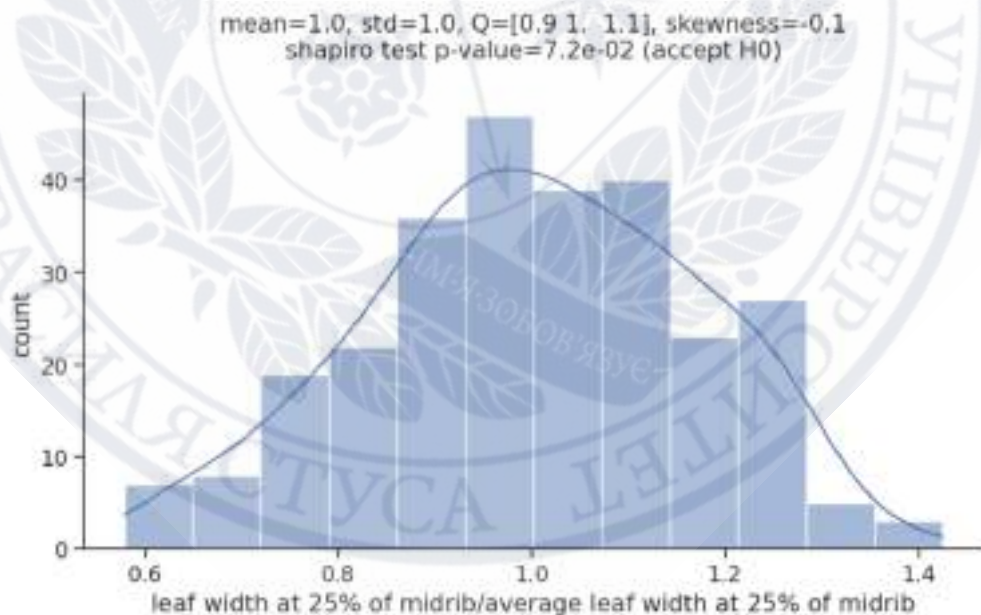


Рис. 3.25. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин відношення ширини листових пластин на 50% висоти середньої жилки до їх середнього значення по всій вибірці.

Асиметрія розподілу вказує на варіабельність форми верхівки листка.

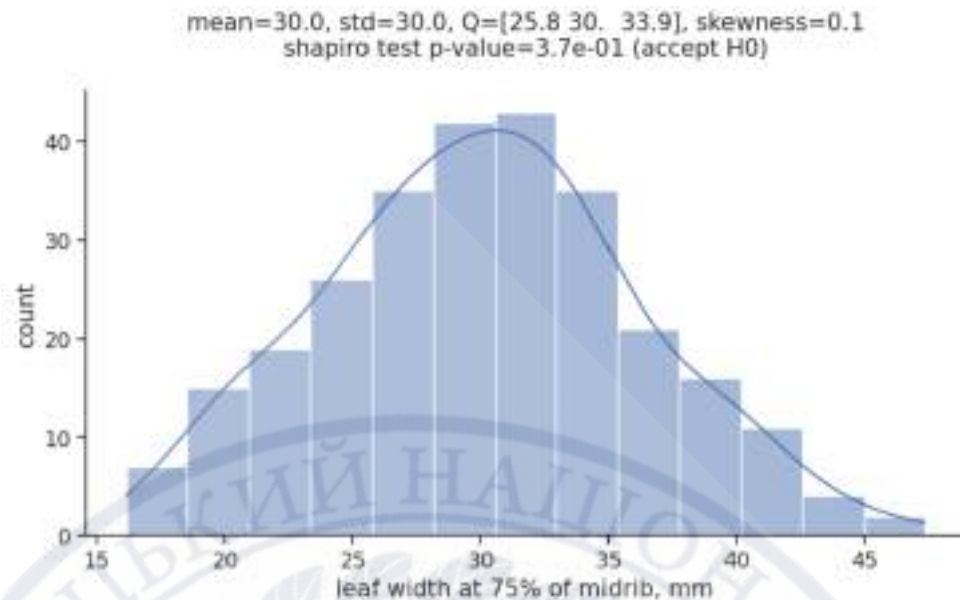


Рис. 3.26. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин ширини листових пластин на 75% висоти середньої жилки.

Розподіл має нормальний характер із менш вираженим піком, що демонструє поступове звуження листка до основи.

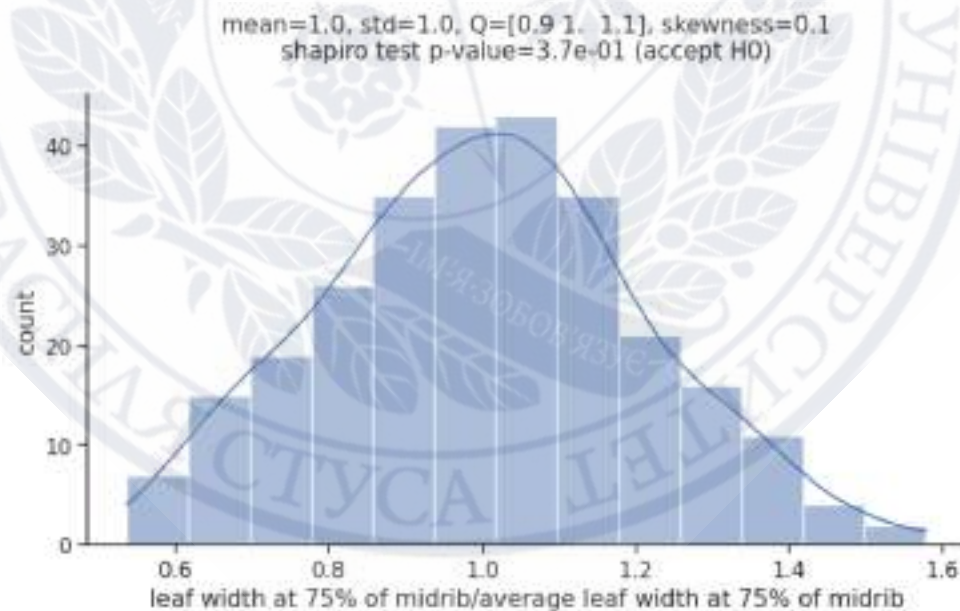


Рис. 3.27. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин відношення ширини листових пластин на 75% висоти середньої жилки до їх середнього значення по всій вибірці

Симетричний розподіл із піком біля одиниці показників про стабільність форми в нижній частині листка.

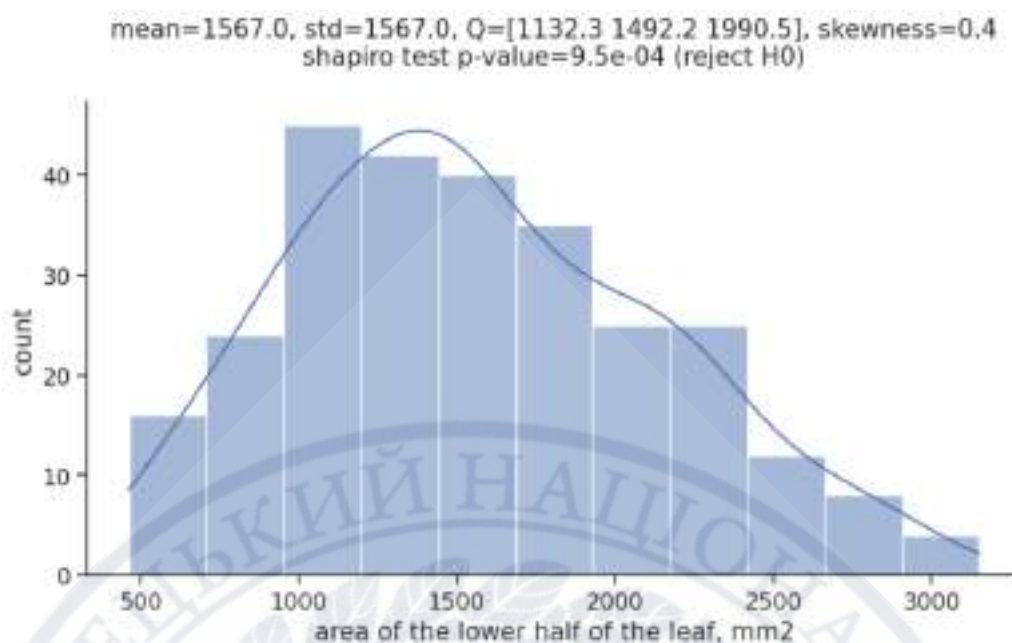


Рис. 3.28. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин площі нижньої половини листової пластинки.

Розподіл демонструє нормальність із піком у середньому розділі, що демонструє рівномірний розвиток нижньої частини листка.

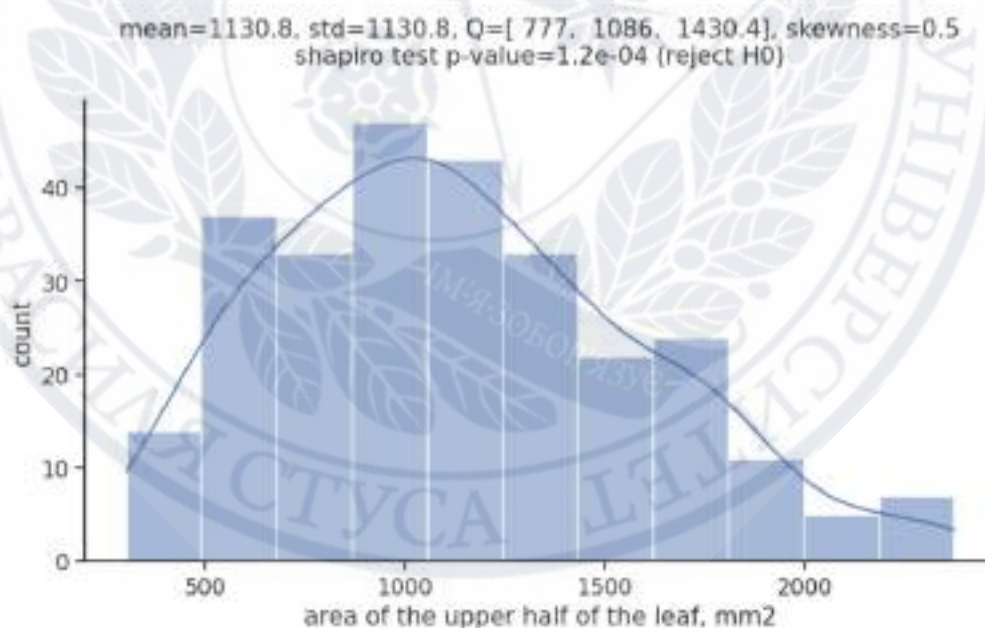


Рис. 3.29. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластин площі верхньої половини листової пластинки

Розподіл із вираженим хвостом вказує на більшу варіабельність верхівкової частини, пов'язану з формою листка.

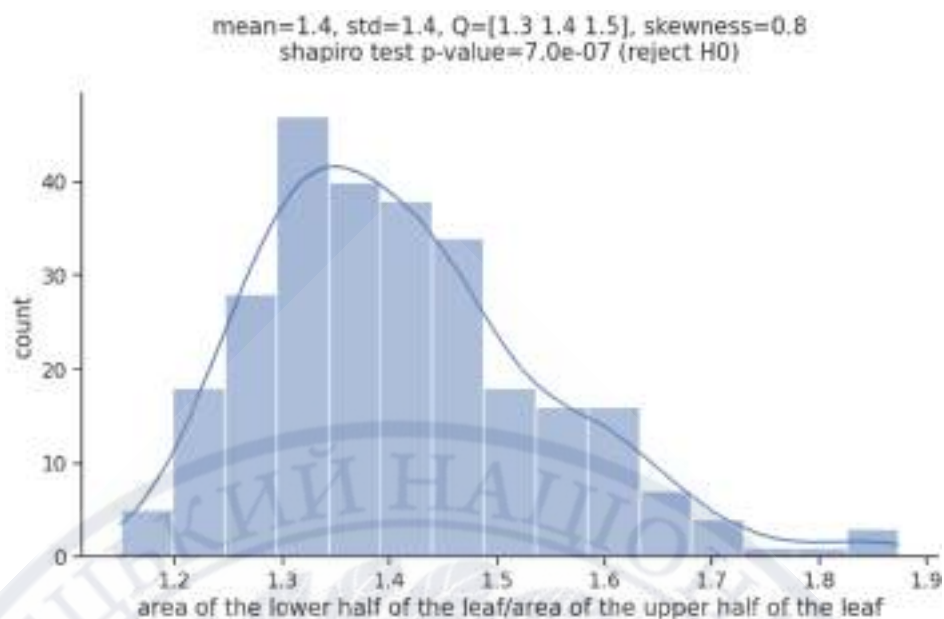


Рис. 3.30. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластинок відношення площі нижньої листової пластинки до площі верхньої половини листової пластинки

Розподіл із піком біля одиниці, але з асиметрією, дозволяє про незначну асиметрію в розподілі маси листка.

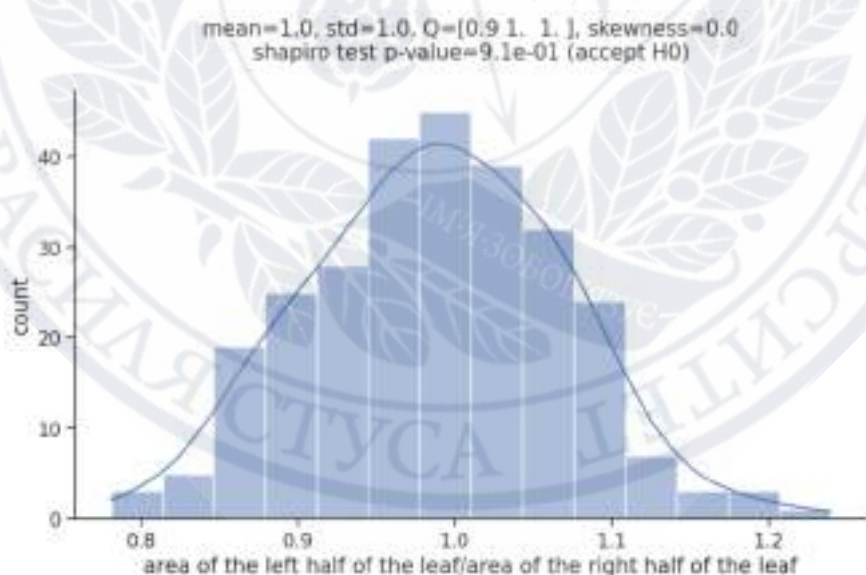


Рис. 3.31. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу площі листових пластинок відношення площі лівої половини листової пластинки до площі правої половини листової пластинки

Розподіл зосереджених навколо одиниці з легкими відхиленнями, що вказує на слабку асиметрію листка.

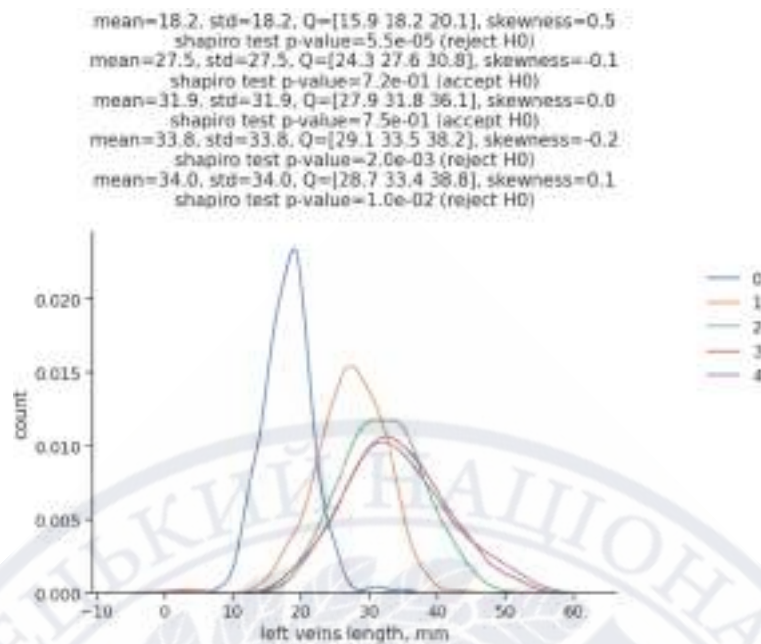


Рис. 3.32. – Ядрова оцінка густини розподілу довжин перших п'яти
 лівих бічних жилок

Розподіл має нормальний характер із піком у середньому сегменті
 довжини, що відображає тип довжини бічних жилок.

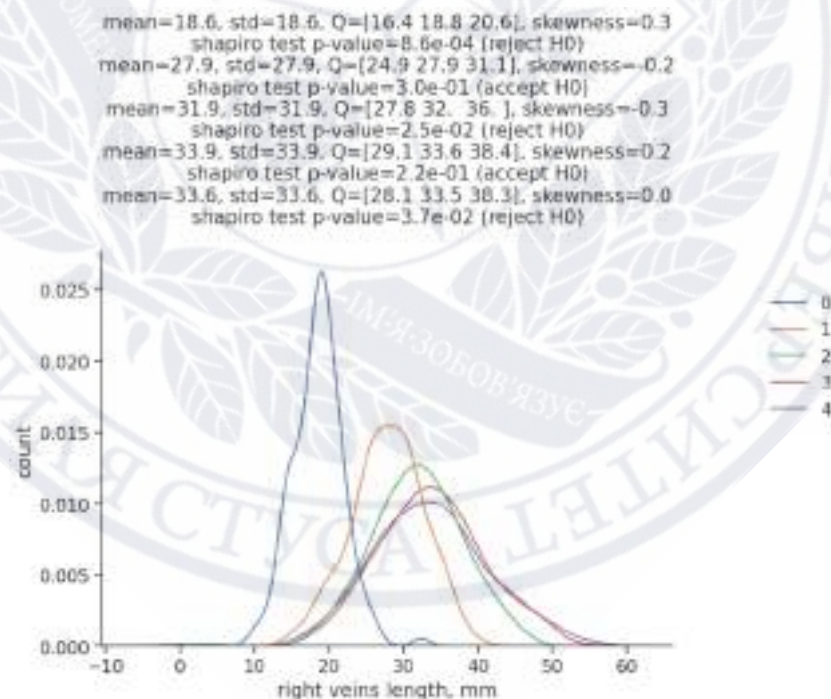


Рис. 3.33. – Ядрова оцінка густини розподілу довжин перших п'яти
 правих бічних жилок

Розподіл аналогічний до лівих жилок, із незначними відхиленнями, що
 вказує на симетрію у розвитку.

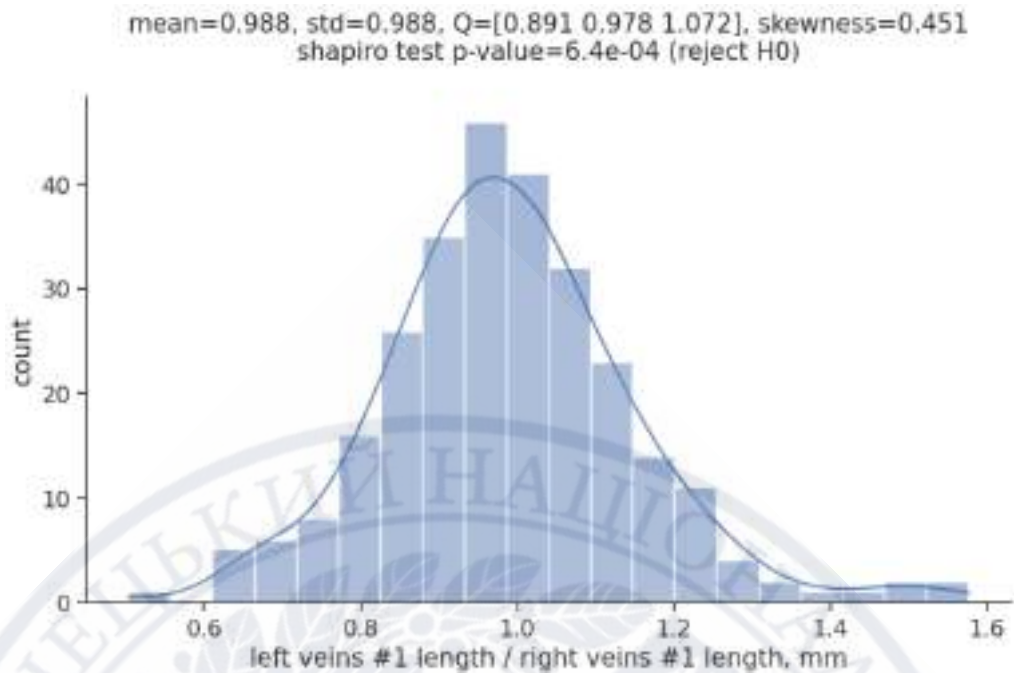


Рис. 3.34. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу відношення довжин першої лівої жилки та першої правої жилки

Розподіл із піком біля одиниці говорить про симетрію довжин перших парних жилок.

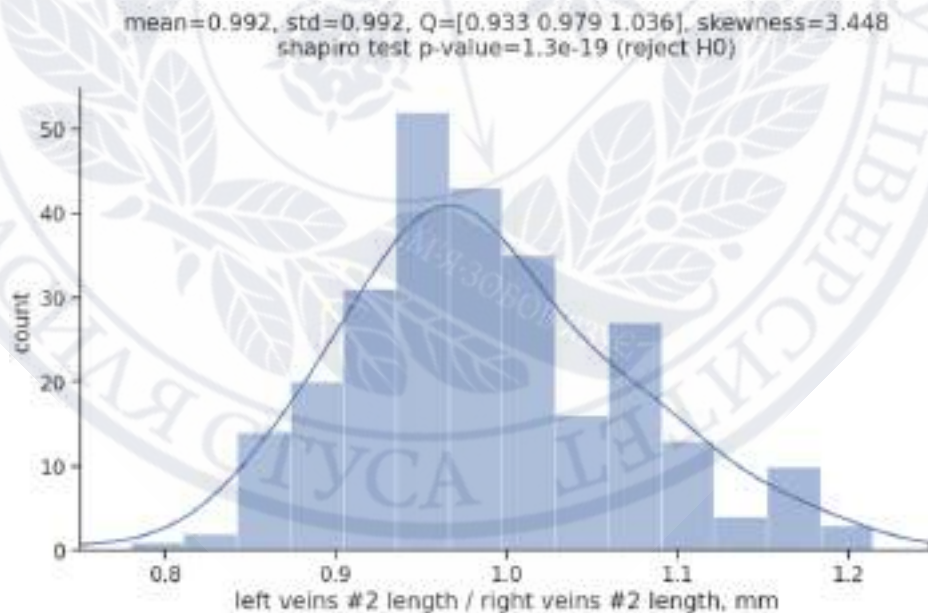


Рис. 3.35. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу відношення довжин другої лівої жилки та другої правої жилки

Розподіл із легкою асиметрією вказує на можливість відмінності в розвитку другої пари жилок.

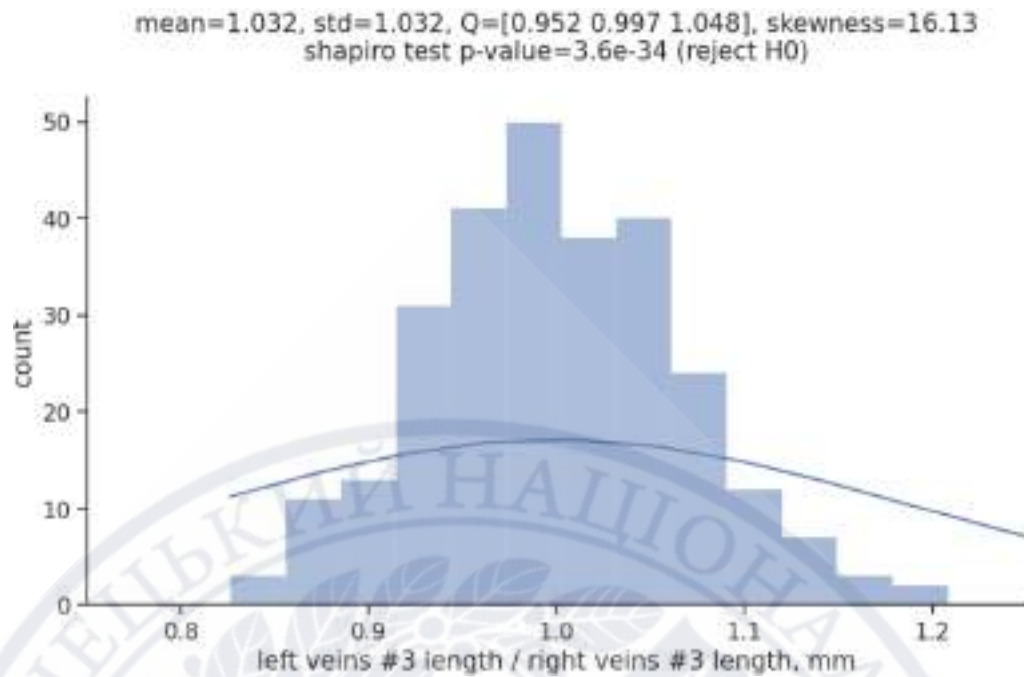


Рис. 3.36. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу відношення довжин третьої лівої жилки та третьої правої жилки

Симетричний розподіл із піком біля одиниці підтверджує узгодженість розвитку третьої пари.

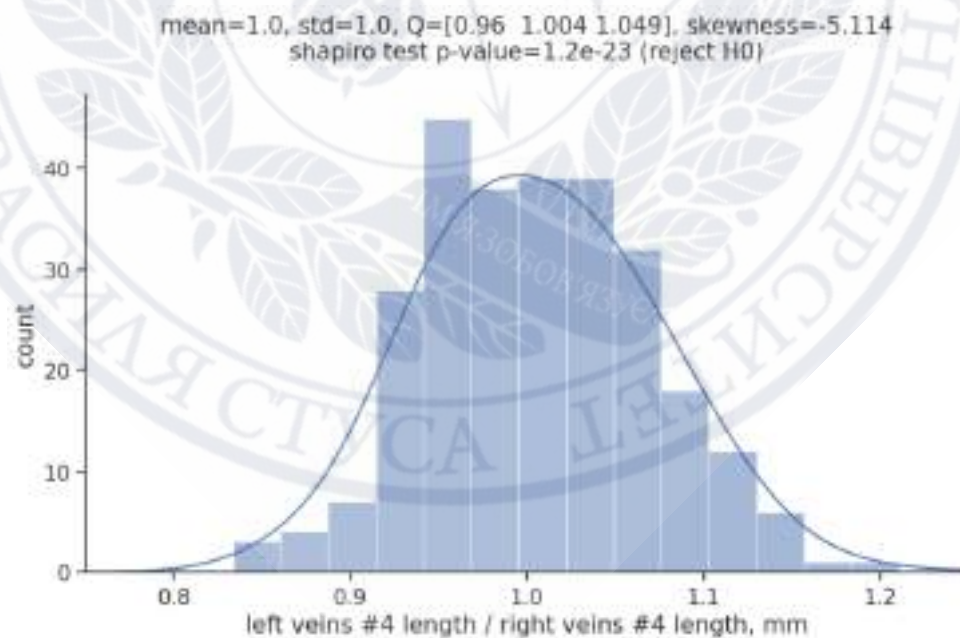


Рис. 3.37. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу відношення довжин четвертої лівої жилки та четвертої правої жилки

Розподіл із невеликими відхиленнями від одиниці вказує на варіабельність у розвитку.

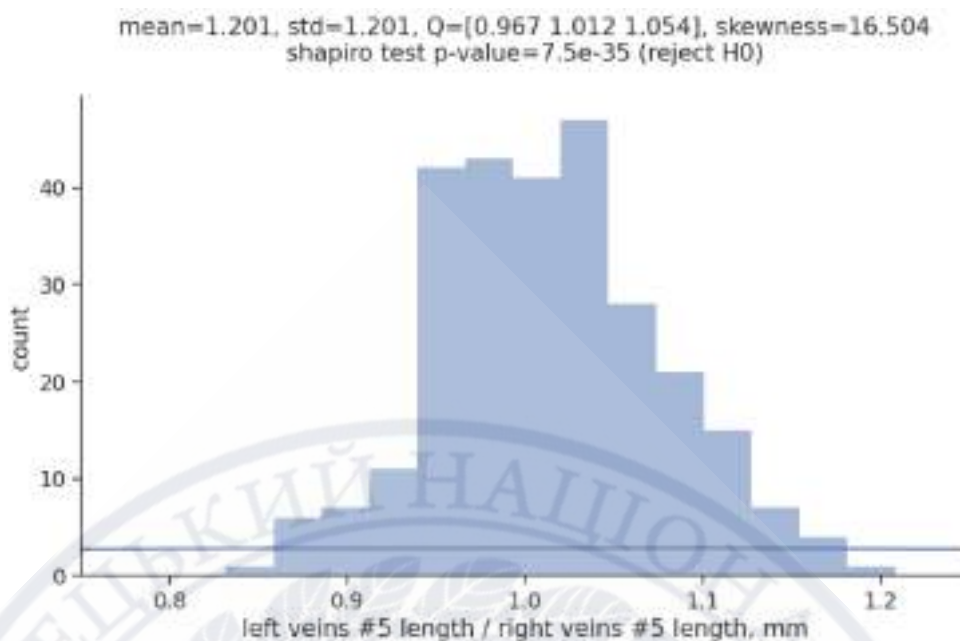


Рис. 3.38. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу відношення довжин п'ятої лівої жилки та п'ятої правої жилки
Асиметрія розподілу може бути пов'язана з меншою чіткістю верхніх жилок.

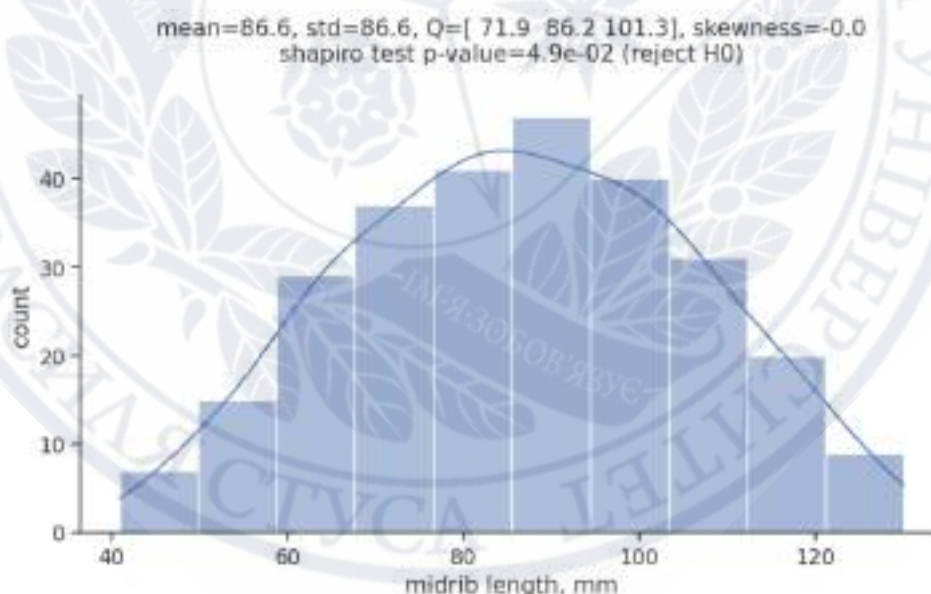


Рис. 3.39. – Гістограма та ядрова оцінка густини розподілу довжин центральної жилки

Нормальний розподіл із чітким пікселем відображає стабільність довжини центральної жилки в межах вибору.

Гістограми та ядрові оцінки густини розподілу площі листових пластин (рис. 3.18) демонструють нормальний розподіл із піком у середньому розділі, що показує типову варіабельність розмірів листків *Carpinus betulus* L. у вибірці. Ця однорідність може бути результатом генетичної стабільності в умовах порівняльного клімату.

Розподіл відношення площі листової пластини до середньої площі (Рис. 3.19) із піком біля одиниці та легкою асиметрією вказує на незначні відхилення, які можуть бути пов'язані з локальними екологічними факторами, такими як доступність світла чи обґрунтованої вологи, що впливає на жилки листової пластинки.

Аналіз периметра листової пластини (рис. 3.20) із розтягнутим хвостом у бік більшого значення має наявність листків з асиметричними або вигнутими контурами, що може бути адаптовано до механічного захисту від вітру.

Симетричний розподіл відношення периметрів до середнього значення (рис. 3.21) із піком біля одиниці підтверджує відносну стандартизованість форм листків, що відображає еволюційну оптимізацію для фотосинтетичної ефективності в умовах помірного поясу.

Нормальний розподіл ширини листових пластин на 50% висоти середньої жилки (рис. 3.22) із чітким максимумом показує на стабільність середньої частини листка, що може бути пов'язано з концентрацією механічної підтримки в цій зоні.

Розподіл відношення ширини на 50% висоти до середнього значення (рис. 3.23) із незначними відхиленнями від одиниці демонструє високу узгодженість даних, що підкреслює генетично детермінований контроль форми листка.

Широкий розділ із значенням ширини на 25% висоти середньої жилки (рис. 3.24) може відображати варіабельність верхівкової частини, пов'язану з адаптацією до різного рівня освітленості.

Асиметрія в розподілі відношення ширини на 25% висоти (рис. 3.25) вказує на більшу гнучкість у формуванні верхівки листка, що може бути стратегічною адаптацією до захоплення розсіяного світла в тіні.

Менш виражений пік у розподілі ширини на 75% висоти (рис. 3.26) показує поступове звуження листка до основи, що узгоджується з анатомічною будовою, де ніжка забезпечує додаткову підтримку.

Симетричний розподіл відношення ширини на 75% висоти (рис. 3.27) із піком біля одиниці забезпечує стабільність нижньої частини листка, що може бути пов'язано з оптимальним розподілом ресурсів у базальній зоні.

Нормальний розподіл площі нижньої половини листової пластинки (рис. 3.28) із піком у середньому розділі вказує на рівномірний розвиток нижньої частини, що забезпечує баланс між фотосинтезом і механічною міцністю.

Виражений хвіст у розподілі площі верхньої половини (рис. 3.29) показує більшу варіабельність верхівки, яка може бути адаптована до змінених умов освітлення.

Розподіл відношення площі нижньої до верхньої половини (рис. 3.30) із піком біля одиниці та асиметрією вказує на незначну нерівномірність у розподілі маси, що може бути пов'язано з гравітаційним впливом на жилки листка.

Розподіл відношення площі лівої до правої половини (рис. 3.31) із легкими відхиленнями від одиниці пропуску про слабку асиметрію, яка може бути результатом мікроекологічних відмінностей у кроні дерева.

Розподіл відношення довжини першої лівої та правої жилок (рис. 3.34) із піком біля одиниці вказує на високу симетрію перших парних вен, що може бути генетично детермінованим.

Легка асиметрія в розподілі відношення довжини другої пари жилок (рис. 3.35) може відображати варіабельність у розвитку, пов'язаному з локальними умовами росту.

Симетричний розподіл для третьої пари (рис. 3.36) із піком біля одиниці підтверджує стабільність у середній частині жилкової системи.

Невеликі відхилення від одиниці для четвертої пари (рис. 3.37) вказують на поступове зростання варіабельності в міру віддалення від основи.

Асиметрія для п'ятої пари (рис. 3.38) може бути пов'язана з меншою чіткістю верхніх жилок, що впливає на точність вимірювань.

Нормальний розподіл довжини центральної жилки (рис. 3.39) із чітким піком показує стабільність її розвитку, що є ключовим для гідравлічної опорної листки.

3.7. Алометричне співвідношення між щільністю жилок та площею листової пластини

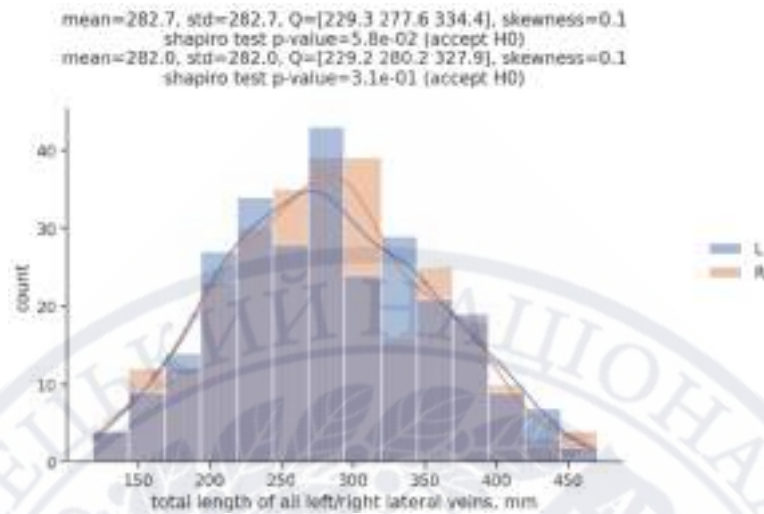


Рис. 3.40. Гістограма розподілу загальної довжини бічних жилок (мм) для лівої (L, синій) і правої (R, помаранчевий) половини листка.

Розподіл демонструє нормальність із піком близько 280 мм, що вказує на узгодженість довжини жилок у лівій і правій частинах.

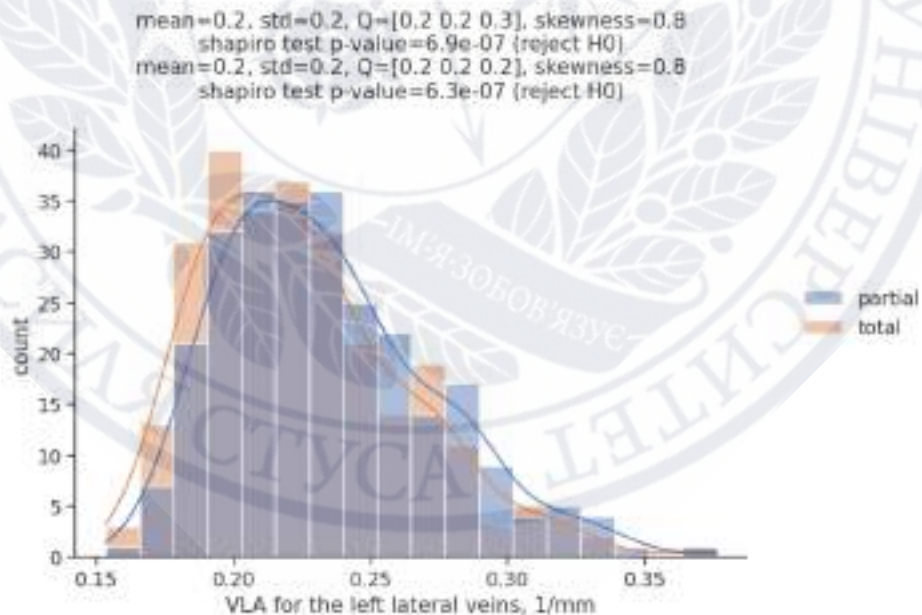


Рис. 3.41. Гістограма розподілу значення ДЖП (довжина жилок на одиницю площі, 1/мм) для лівих бічних жилок листків

Розподіл із піком біля 0,25-0,3 1/мм показує тип щільності жилок у виборі.

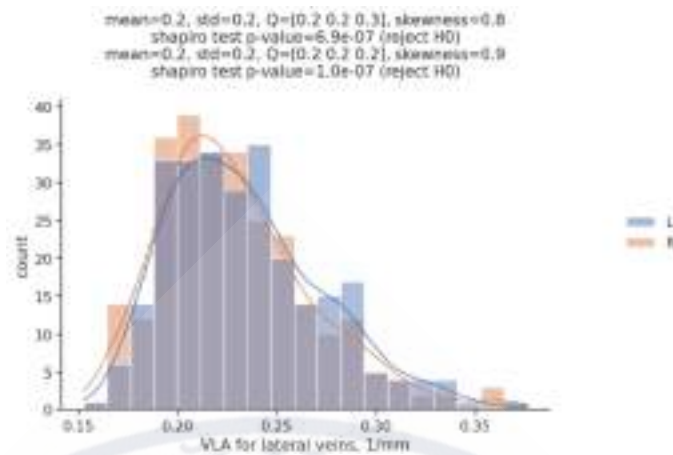


Рис. 3.42. Гістограма розподілу значення ДЖП для бічних жилок листків для лівої (L, синій) і правої (R, помаранчевий) половини листка

Симетричний розподіл із піком біля 0,25 1/мм підтверджується однаковою щільністю в обох половинах.

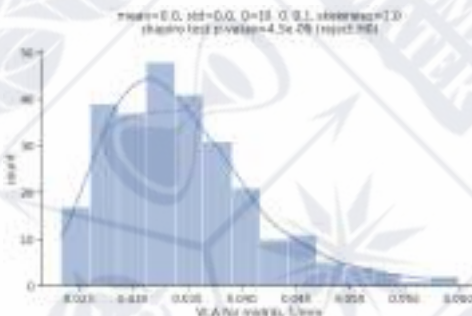


Рис. 3.43. Гістограма розподілу значення ДЖП для середньої жилки листків

Розподіл із піком біля 0,35-0,40 1/мм вказує на вищу щільність у центральній частині листка.

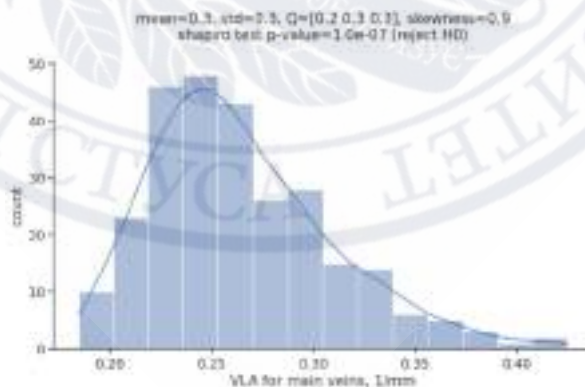


Рис. 3.44. Гістограма розподілу значення ДЖП для основних жилок листків

Пік розподілу біля 0,30-0,35 1/мм показує середню щільність у всій жилковій системі.

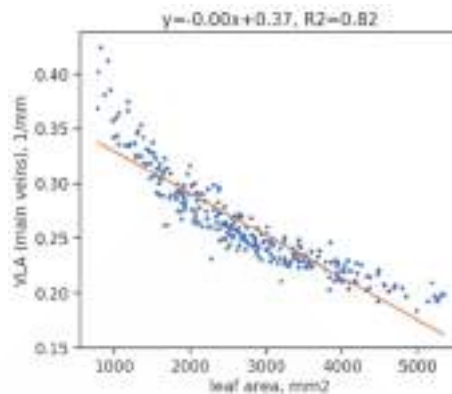


Рис. 3.45. Розсіювання та лінійна регресія залежно від ДЖП від площі листка

Рівняння регресії: $y = -0,00x + 0,37$, $R^2 = 0,82$, що вказує на сильну негативну кореляцію між VLA та площею листка.

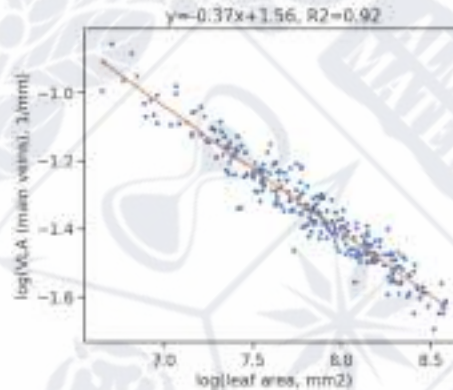


Рис. 3.46. Лінійна регресія відносин $\log$ (ДЖП(довжина основних жилок на одиницю площі, 1/мм) від $\log$ (площа листка, мм²)

Рівняння регресії: $y = -0,371x + 1,56$, $R^2 = 0,92$, що підтверджує сильну негативну залежність між ДЖП та площею листка.

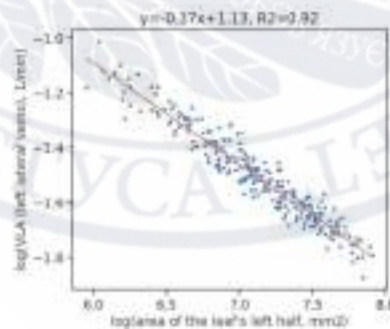


Рис. 3.47. Лінійна регресія залежності $\log$ (ДЖП(довжина лівих бічних будинків на одиницю площі, 1/мм) від $\log$ (площа лівої половини листка, мм²)

Рівняння регресії: $y = -0,37x + 1,13$, $R^2 = 0,92$, що впливає на сильну негативну залежність між VLA та площею лівої половини листка.

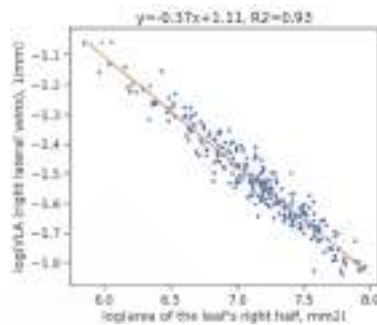


Рис. 3.48. Лінійна регресія залежності $\log$ (ДЖП(довжина правих бічних жилок на одиницю площі, 1/мм) від $\log$ (площа правої половини листка, мм^2).

Рівняння регресії: $y = -0,37x + 1,11$, $R^2 = 0,93$, що вказує на сильну негативну залежність між ДЖП та площею правої половини листка.

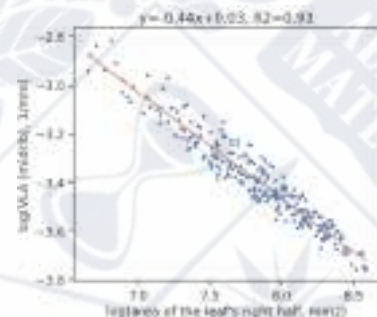


Рис. 3.49. Лінійна регресія залежності $\log$ (ДЖП (довжина серединної жилки на одиницю площі, 1/мм) від $\log$ (площа правої половини листка, мм^2).

Рівняння регресії: $y = -0,44x + 0,03$, $R^2 = 0,93$, що підтверджує сильну негативну залежність між ДЖП серединної жилки та площею правої половини листка.

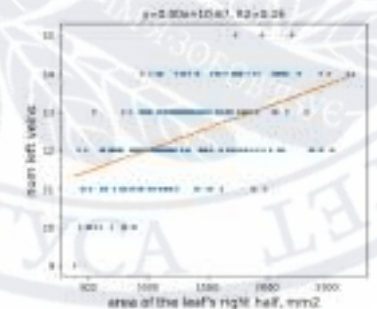


Рис. 3.50. Лінійна регресія незалежності лівих бічних жилок від площі правої половини листка (мм^2).

Рівняння регресії: $y = 0,00x + 10,87$, $R^2 = 0,26$, що вказує на слабку позитивну залежність між деякими лівими бічними жилками та площею правої половини листка.

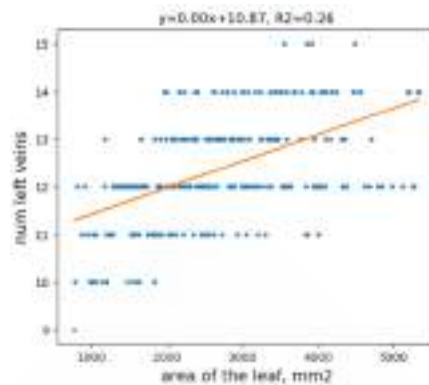


Рис. 3.51. Лінійна регресія незалежності лівих бічних будинків від загальної площі листка (мм²) для листків.

Рівняння регресії: $y = 0,00x + 10,87$, $R^2 = 0,26$, що працює про Religion: слабка позитивна залежність між кількістю лівих бічних будинків та площею листка.

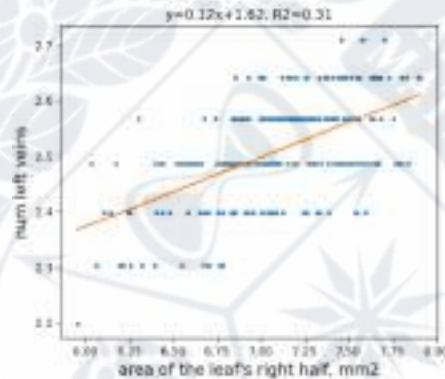


Рис. 3.52. Лінійна регресія незалежності лівих бічних жилок від площі правої половини листка (мм²)

Рівняння регресії: $y = 0,12x + 1,62$, $R^2 = 0,31$, що вказує на слабку позитивну залежність між деякими лівими бічними жилками та площею правої половини листка.

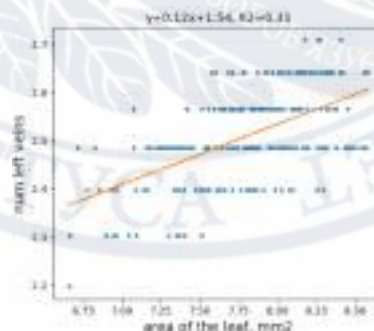


Рис. 3.53. Лінійна регресія незалежності лівих бічних будинків від загальної площі листка (мм²)

Рівняння регресії: $y = 0,12x + 1,54$, $R^2 = 0,31$, що вказує на слабку позитивну залежність між деякими лівими бічними жилками та площею листка.

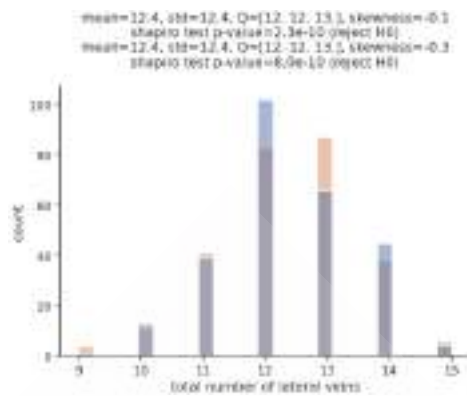


Рис. 3.54. Гістограма розподілу загальної кількості бічних жилок листків для лівої (L, синій) і правої (R, помаранчевий) половини листка Пік розподілу біля 12-13 будинків вказує на типову кількість у виборі.

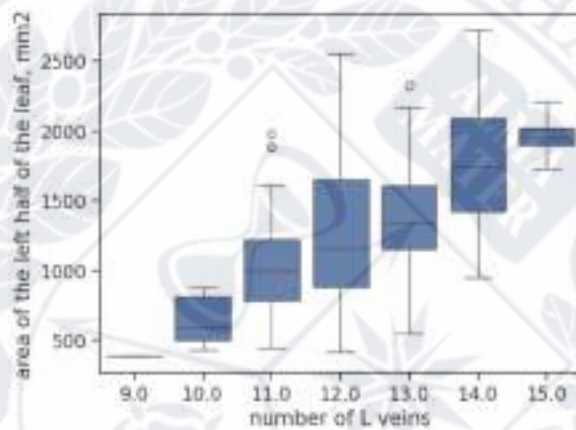


Рис. 3.55. Коробчаста діаграма площі лівої половини листової пластинки для листків з різною кількістю лівих бічних жилок Медіана зростає зі збільшенням кількості жилок, що вказує на позитивну кореляцію.

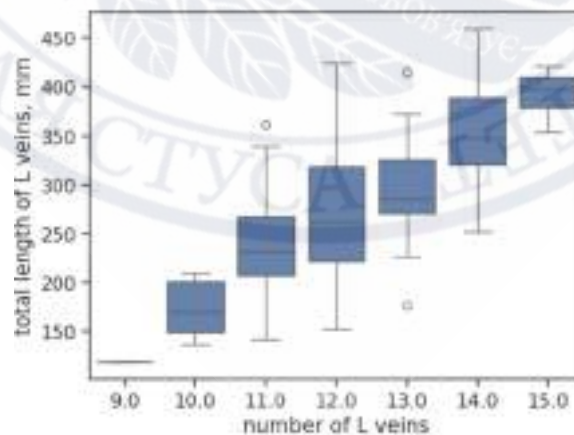


Рис. 3.56. Коробчаста діаграма загальної довжини лівих бічних жилок в мм для листків з різною кількістю лівих бічних жилок Зростання медіани підтверджує залежність тривалості від кількості.

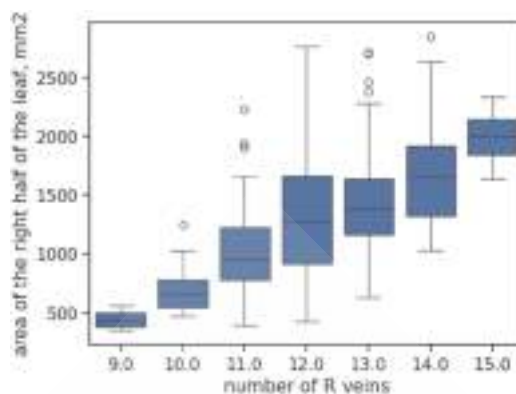


Рис. 3.57. Коробчаста діаграма площі правої половини листової пластинки для листків з різною кількістю лівих бічних жилок. Аналогічна тенденція до зростання медіани зі збільшенням кількості.

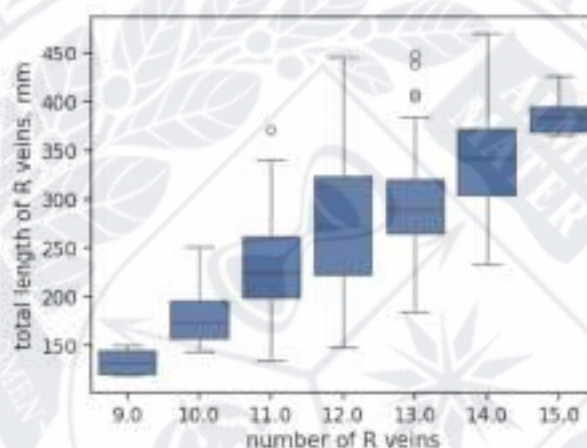


Рис. 3.58. Коробчаста діаграма загальної довжини правих бічних жилок в мм для листків з різною кількістю лівих бічних жилок. Зростання медіани відображає симетрію в розвитку.

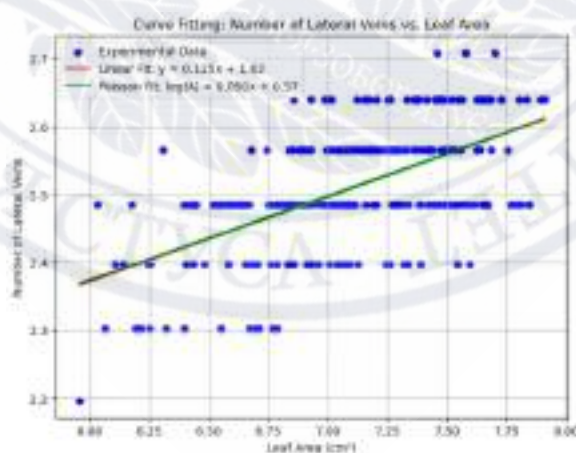


Рис. 3.59. Апроксимація кривої: кількість бічних жилок у порівнянні з площею листка

Було вивчено взаємозв'язок між площею листка та довжиною жилки на одиницю площі (ДЖП), що визначається як загальна довжина жилки, поділена на площу листка, для основних жилок (жилок першого та другого порядку, включаючи середню та бічні жилки) у листках *Carpinus betulus* L. Для обробки експериментальних даних використовували логарифмічну лінійну регресійну модель: $\log(\text{ДЖП}) = a \cdot \log(\text{площа листка}) + \log(b)$, яка дала наступні результати:

- Для ДЖП всіх лівих бічних жилок відносно площі лівої половини листка (розрізаного вздовж середньої жилки, в мм², параметри регресії склали ($a = -0.37$, $b = 1.131$), при значенні $R^2 = 0.924$.
- Для ДЖП всіх правих бічних жилок відносно площі правої половини листка параметри становили $a = -0.369$, $b = 1.108$, при значенні $R^2 = 0.925$.
- Для ДЖП середньої жилки відносно площі правої половини листка параметри склали $a = -0.437$, $b = 0.027$, при $R^2 = 0.925$.
- Для ДЖП всіх основних жилок (середня жилка плюс бічні жилки) по відношенню до загальної площі листка параметри становили $a = -0.371$, $b = 1.558$, при $R^2 = 0.924$.

Ці результати вказують на наявність стійкої негативної аллометричної залежності, де ДЖП зменшується зі збільшенням площі листової поверхні. Ця тенденція найбільш виражена для середньої жилки ($a = -0.437$), що свідчить про більш різке зниження щільності жилок зі збільшенням площі порівняно з бічними жилками. Високі значення R^2 (всі > 0.92) відображають сильну відповідність логарифмічної моделі даним. Спостережуване зменшення ДЖП зі збільшенням площі листка можна пояснити кількома біологічними факторами: (1) довжина жилки збільшується значно повільніше, ніж площа листка в онтогенезі, (2) основні жилки, особливо серединні, проходять переважно лінійні траєкторії без значного розгалуження, і (3) кількість основних жилок залишається відносно стабільною під час росту

листка, причому будь-які нові жилки зазвичай формуються у вузькій апікальній області, роблячи мінімальний внесок у загальну довжину жилки.

Подальший аналіз за допомогою коробкових діаграм дозволив отримати додаткову інформацію про взаємозв'язок між площею листка, кількістю жилок і загальною довжиною головної жилки. Порівняння медіанних значень у групах листків, класифікованих за кількістю жилок, показало, що листки з більшою площею мають більшу кількість бічних жилок, а листки з більшою кількістю жилок демонструють більшу загальну довжину головної жилки. Медіани як площі листка, так і довжини жилок збільшуються приблизно лінійно зі збільшенням кількості жилок. Таке збільшення довжини жилок, ймовірно, зумовлене подовженням жилок у центральній частині листової пластинки, яка має найбільшу ширину, а не додаванням нових жилок у вузькій апікальній області. Проте точність виявлення жилок, особливо в апікальній ділянці, може бути обмежена через малий розмір і низьку контрастність цих жилок, що потенційно може призвести до їх недооцінки нейронною мережею, яка використовується для аналізу зображень.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи досягнуто поставленої мети та виконано всі завдання, які сприяли отриманню нових даних щодо морфометричних характеристик листків *Carpinus betulus* L. та їхньої архітектури. Нижче наведено детальні висновки для кожного з завдань.

У результаті виконання бакалаврської роботи досягнуто поставленої мети та виконано всі завдання, які сприяли отриманню нових даних щодо морфометричних характеристик листків *Carpinus betulus* L. та їхньої архітектури. Нижче наведено детальні висновки для кожного з завдань.

1. Створено навчальний набір даних та успішно навчено нейронну мережу U-Net заповнювати пропуски та видаляти помилкові пікселі на прогнозованих масках, що підвищило точність сегментації.

2. Нейронну мережу для автоматичної сегментації жилок, а також нейронну мережу для відновлення сегментованих жилок було застосовано до набору із 300 відсканованих зображень листків *Carpinus betulus* L. які не використовувались при навчанні даних нейромереж. З отриманих масок якості необхідну для наступної стадії аналізу мали 270 масок. Незадовільна якість решти масок була пов'язана з поганою якістю вхідних зображень.

3. Проведено оптимізацію параметрів операцій постобробки прогнозованих масок, таких як видалення артефактів, сегментація центральної жилки та черешка, а також фільтрація об'єктів за площею. На отриманих прогнозованих масках проведена ідентифікація окремих жилок. Ідентифіковані жилки були представлені у вигляді графа, що дозволило кількісно оцінити морфологічні характеристики: довжини центральної та бічних жилок, кути їх відходження, ширину листка на певних висотах, площу листка та міжжилкових ділянок.

4. Проведено детальний морфометричний аналіз, який включав вимірювання периметра, площі листової пластинки, довжини жилок та кутів нахилу. Метод найменших квадратів застосовано для апроксимації кутів, однак виявлено певну похибку, особливо для перших бічних жилок через їхню

нелінійну форму. Аналіз площі верхньої та нижньої половини листка при різних відсотках довжини центральної жилки (25%, 50%, 75%) виявив асиметрію в розподілі маси, що може бути пов'язано з адаптацією до механічного навантаження чи світлового градієнта. Ці дані розширюють розуміння морфологічної пластичності листків *Carpinus betulus* L. і потребують подальшого вивчення впливу екологічних факторів.

5. Побудовано гістограми та ядрові оцінки густини розподілу. Більшість були асиметричними, нормальний розподіл мали лише окремі параметри (ширина листової пластинки на різних рівнях висоти вздовж центральної жилки). Коефіцієнт асиметрії розподілів відношення параметрів пов'язаних з правою та лівою частинами листка (наприклад площа правої та лівої половини, довжини бічних жилок) може бути використаний для кількісної характеристики асиметрії форми листової пластини.

6. Виявлено достовірну негативну алометричну залежність, за якої довжина жилки на одиницю площі (ДЖП) зменшується із збільшенням площі листка. Ця тенденція найбільш виражена для середньої жилки ($a = -0,437$) що свідчить про більш різке зниження щільності жилок із збільшенням площі порівняно з бічними жилками. Високі значення R^2 (всі $> 0,92$) відображають сильну відповідність логарифмічної моделі даним. Спостережуване зменшення ДЖП із збільшенням площі листа може бути пов'язане з кількома біологічними факторами: (1) довжина жилок збільшується значно повільніше, ніж площа листа під час онтогенезу, (2) основні жилки, особливо середня жилка, мають переважно лінійну траєкторію без значного розгалуження, і (3) кількість основних жилок залишається відносно стабільною під час росту листа, а нові жилки зазвичай утворюються у вузькій апікальній ділянці, що мінімально впливає на загальну довжину жилок.

7. Отримані результати підтверджують ефективність використання U-Net для кількісного аналізу жилкування *Carpinus betulus* L., розширюючи можливості автоматизації ботанічних досліджень. Розроблена методологія є масштабною та може бути адаптована для аналізу інших видів рослин,

сприяючи створенню універсальних інструментів для екології та ботаніки. Обмеження, пов'язані з якістю зображення, підкреслюють важливість інтеграції передових технологій візуалізації в майбутніх роботах, що дозволяє поглибити розуміння адаптивних стратегій рослин у змінних екологічних умовах.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. McCulloh K. A., Sperry J. S., Adler F. R. Murray's law and the hydraulic vs mechanical functioning of wood // *New Phytologist*. — 2013. — Vol. 198, № 3. — P. 828–837. — DOI: 10.1111/nph.12253.
2. Wheeler J. K., Sperry J. S., Hacke U. G., Hoang N. Inter-vessel pitting and cavitation in woody Rosaceae and other vesselled plants: a basis for a safety versus efficiency trade-off in xylem transport // *American Journal of Botany*. — 2010. — Vol. 97, № 10. — P. 1711–1721. — DOI: 10.3732/ajb.1000154.
3. Мандельброт Б. Б. Фрактальна геометрія природи / Б. Б. Мандельброт; Онов. і допов. вид. — Нью-Йорк : W. H. Freeman, 1983. — 468 с. — Режим доступу: <https://archive.org/details/fractalgeometry00beno> (дата звернення: 25.05.2025).
4. Листок: будова і функції // Мій Клас. — URL: <https://www.miyklas.com.ua/p/biologiya/7-klas/riznomanitnist-roslin-471903/listok-budova-i-funktcii-472090/re-4ff63c35-f8e7-4db4-ab01-bbf8cba9dfa1> (дата звернення: 25.05.2025).
5. Murray's Law // NCpedia. — URL: <https://www.ncpedia.org/glossary/murray%27s-law> (дата звернення: 25.05.2025).
6. Price C. A., Symonova O., Mileyko Y., Hilley G., Weitz J. S. Leaf vein segmentation using level set methods // *PLoS ONE*. — 2014. — Vol. 9, № 1. — e85420. — DOI: 10.1371/journal.pone.0085420.
7. Ronellenfitch H., Lasser J., Daly D. C., Katifori E. Topological phenotyping of leaf venation networks // *Scientific Reports*. — 2018. — Vol. 8, № 1. — 16194. — DOI: 10.1038/s41598-018-34772-2.
8. Мезофіли // Горох: тлумачний словник. — URL: <https://goroh.pp.ua/тлумачення/мезофіли> (дата звернення: 25.05.2025).
9. Durham T. The Golden Ratio in Nature // Taylor Durham Projects. — URL: <http://taylordurham.com/projects/naturestudy/golden.html> (дата звернення: 25.05.2025).
10. Роннебергер О., Фішер Ф., Брокс Т. U-Net: згорткові мережі для сегментації біомедичних зображень // *arXiv*. — 2015. — arXiv:1411.4038. — Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1411.4038> (дата звернення: 25.05.2025).
11. Niklas K. J. A mechanical perspective on foliage leaf form and function. *New Phytologist*. 1999. Vol. 143, Iss. 1. P. 19–31. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1999.00441.x.
12. Suzuki M., Takahashi S., Kondo T., Dohra H., Ito Y., Kiriiwa Y., Hayashi M., Kamiya S., Kato M., Fujiwara M., Fukao Y., Kobayashi M., Nagata N., Motohashi

K. Mice produced by mitotic reprogramming of sperm injected into haploid parthenogenotes. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7, Art. 12676. DOI: 10.1038/ncomms12676.

13. Klein A.-M., Vaissière B. E., Cane J. H., Steffan-Dewenter I., Cunningham S. A., Kremen C., Tscharntke T. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2007. Vol. 274, Iss. 1608. P. 303–313. DOI: 10.1098/rspb.2006.3721.

14. Ashman T.-L., Knight T. M., Steets J. A., Amarasekare P., Burd M., Campbell D. R., Dudash M. R., Johnston M. O., Mazer S. J., Mitchell R. J., Morgan M. T., Wilson W. G. Pollen limitation of plant reproduction: ecological and evolutionary causes and consequences. *Ecology*. 2004. Vol. 85, Iss. 6. P. 1479–1485. DOI: 10.1890/03-0430.

15. Boyes D. C., Nam J., Dangl J. L. The *Arabidopsis thaliana* RPM1 disease resistance gene product is a peripheral plasma membrane protein that is degraded coincident with the hypersensitive response. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1998. Vol. 95, Iss. 26. P. 15849–15854. DOI: 10.1073/pnas.1014456108.

16. Wright S. I., Kalisz S., Slotte T. Evolutionary consequences of self-fertilization in plants. *International Journal of Plant Sciences*. 2010. Vol. 171, Iss. 6. P. 547–558. DOI: 10.1086/650721.

17. Ni Z., Kim E.-D., Ha M., Lackey E., Liu J., Zhang Y., Sun Q., Chen Z. J. Altered circadian rhythms regulate growth vigour in hybrids and allopolyploids. *Plant Physiology*. 2011. Vol. 156, Iss. 2. P. 832–843. DOI: 10.1104/pp.111.173708.

18. Franks P. J., Beerling D. J. Maximum leaf conductance driven by CO₂ effects on stomatal size and density over geologic time. *Nature*. 2010. Vol. 464, Iss. 7288. P. 495–496. DOI: 10.1038/464495a.

19. Charlesworth D., Wright S. I. Breeding systems and genome evolution. *International Journal of Plant Sciences*. 2009. Vol. 170, Iss. 7. P. 871–880. DOI: 10.1086/593111.

20. Cardinale B. J., Wright J. P., Cadotte M. W., Carroll I. T., Hector A., Srivastava D. S., Loreau M., Weis J. J. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007. Vol. 104, Iss. 46. P. 18123–18128. DOI: 10.1073/pnas.0709069104.

21. Sack L., Cowan P. D., Jaikumar N., Holbrook N. M. The ‘hydrology’ of leaves: co-ordination of structure and function in temperate woody species. *Nature*. 2003. Vol. 424, Iss. 6947. P. 421–424. DOI: 10.1038/nature02403.

Бродзь Олексій Сергійович

Факультет хімії, біології і біотехнологій

101 Екологія

Екологія

ДЕКЛАРАЦІЯ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ

Усвідомлюючи свою відповідальність за надання неправдивої інформації, стверджую, що подана кваліфікаційна (бакалаврська) робота на тему: «КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ЖИЛКУВАННЯ ЛИСТКІВ CARPINUS BETULUS L. З ВИКОРИСТАННЯМ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ U-NET» є написано мною особисто.

- Одночасно заявляю, що ця робота:
- Не передавалась іншим особам і подається до захисту вперше;
- Не порушує авторських та суміжних прав, закріплених статтями 21-25 Закону України «Про авторське право та суміжні права»;
- Не отримувалась іншими особами, а також дані та інформація не отримувались у недозволений спосіб.

Я усвідомлюю, що у разі порушення цього порядку моя кваліфікаційна робота буде відхилена без права її захисту, або під час захисту за неї буде поставлена оцінка «незадовільно».

«_____» _____ 2025 р.
