University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

Cross-sectional fiber dimensions rather than fiber length distinguish fiber and drug types of *Cannabis sativa*

Najla Sharifi[1] | Seyed Alireza Salami[2,3] | Kambiz Pourtahmasi[4] | Reza Oladi[5*]

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: najlasharifi@ut.ac.ir
2. Department of Horticultural Science, Faculty of Agricultural Science and Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Emial: asalami@ut.ac.ir
3. Industrial and Medical Cannabis Research Institute (IMCRI), Tehran, Iran
4. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: pourtahmasi@ut.ac.ir
5. Corresponding author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: oladi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 30 June 2025
Revised: 12 August 2026
Accepted: 04 September 2026
Published online: 20 November 2026

Keywords:
Bast fibers,
Fiber biometry,
Industrial hemp,
Wood anatomy.

ABSTRACT

Introduction: Hemp (*Cannabis sativa* L.) is one of the most important non-wood fiber crops. In addition to its medicinal applications, it has attracted considerable attention in the textile, papermaking, bio-based composite, and other industries because of its high-quality bast fibers. Hemp is commonly classified based on cannabinoid composition, particularly the content and ratio of tetrahydrocannabinol (THC) and cannabidiol (CBD), and genetic and molecular approaches have been widely used to distinguish drug and fiber chemotypes. However, the role of anatomical and fiber biometric characteristics in differentiating these types has received far less attention. Because fiber biometric traits directly influence fiber quality and performance in various end products, understanding potential differences between drug and fiber types is important for evaluating their industrial value. Therefore, this study aimed to investigate and compare the biometric characteristics of bast and xylem fibers in type I and type III hemps and to identify the traits contributing to their differentiation.

Method: Ten *C. sativa* genotypes, including five Type I and five type III genotypes, were examined. Type I genotypes were THC-dominant and are generally associated with medicinal and psychoactive uses, whereas Type III genotypes were CBD-dominant and more closely resemble industrial fiber hemp in terms of cannabinoid composition. Three stems were sampled from each type. After separating the bark from the woody core, the samples were macerated using Franklin's method. Fiber biometric traits of bast and xylem fibers, including fiber length, fiber width, lumen width, and cell wall thickness, were measured. Stem height and bark thickness were also recorded. Data were analyzed using a linear mixed-effects model (LMM), independent *t*-tests, and Mann–Whitney tests. Principal component analysis (PCA) was used to investigate overall patterns of trait variation, linear discriminant analysis (LDA) was employed to assess the discriminatory power of the measured traits, and Pearson correlation analysis was conducted to evaluate relationships among variables. Comparisons between bast and xylem fibers were performed using paired *t*-tests.

Results: Among the ten examined traits, only bast fiber width and bast fiber wall thickness differed significantly between drug and fiber hemp types. In both cases, drug types exhibited higher values than fiber types. In contrast, no significant differences were observed in bast or xylem fiber length, xylem fiber width, lumen width, xylem fiber wall thickness, stem height, or bark thickness. Principal component analysis showed that the first two principal components explained more than 52% of the total variance, and the relative separation between the two groups was primarily associated with transverse fiber characteristics. Linear discriminant analysis further revealed that cell wall thickness, fiber width, and lumen width, particularly in xylem fibers, were the most important traits contributing to the differentiation of drug and fiber hemp types. Correlation analysis indicated that bast fiber traits and xylem fiber traits were more strongly correlated within their respective tissue systems than between them. Comparisons between bast and xylem fibers showed that bast fibers were significantly longer and had thicker cell walls in both groups, whereas xylem fibers, particularly in fiber hemp types, had larger lumens.

Conclusion: The results showed that although drug-type and fiber-type hemp can be distinguished based on certain anatomical characteristics, substantial overlap exists between them, and only a limited number of fiber biometric traits differ significantly. The most important finding of this study is that transverse fiber characteristics, particularly fiber width and cell wall thickness, play a greater role in differentiating drug and fiber hemp types than fiber length, which showed no significant difference between the two groups. Furthermore, the observed differences between bast and xylem fibers reflect their distinct functional roles within the hemp stem. These findings may contribute to breeding programs, the selection of suitable genotypes for industrial applications, and a better understanding of the relationship between fiber structure and performance in hemp.

Cite this article: Sharifi, N., Salami, S.A.R., Pourtahmasi, K., Oladi, R. (2026). Cross-sectional fiber dimensions rather than fiber length distinguish fiber and drug types of *Cannabis sativa*. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (3), 237-252. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.417612.1398

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.417612.1398

دانشگاه تهران

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

ابعاد عرضی الیاف، نه طول آنها: عامل تمایز تیپ‌های I و III شاهدانه (*Cannabis sativa*)

نجلا شریفی[۱] | سیدعلیرضا سلامی[۲،۳] | کامبیز پورطهماسی[۴] | رضا اولادی[۵*]

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: najlasharifi@ut.ac.ir

۲. گروه علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: asalami@ut.ac.ir

۳. موسسهٔ تحقیقات شاهدانهٔ صنعتی و دارویی، تهران، ایران.

۴. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: pourtahmasi@ut.ac.ir

۵. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: oladi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۹

کلیدواژه:
آناتومی چوب،
الیاف پوستی،
زیست‌سنجی الیاف،
کنف صنعتی.

چکیده

مقدمه: شاهدانه یکی از مهم‌ترین گیاهان غیرچوبی است که علاوه بر کاربردهای دارویی و غذایی، به‌دلیل تولید الیاف پوستی باکیفیت در صنایع نساجی، کاغذسازی، کامپوزیت‌های زیست‌پایه و سایر صنایع مورد توجه قرار گرفته است. طبقه‌بندی شاهدانه معمولاً براساس ترکیبات کانابینوئیدی، به‌ویژه نسبت و مقدار تتراهیدروکانابینول (THC) و کانابیدیول (CBD)، انجام می‌شود و مطالعات ژنتیکی و مولکولی نیز به‌طور گسترده برای تفکیک تیپ‌های دارویی و فیبری به‌کار گرفته شده‌اند. با این حال، نقش ویژگی‌های آناتومیکی و زیست‌سنجی الیاف در تمایز این تیپ‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف تأثیر مستقیمی بر کیفیت و عملکرد الیاف در محصولات مختلف دارند، شناخت تفاوت‌های احتمالی میان تیپ‌های دارویی و فیبری در ارزیابی ارزش صنعتی آنها اهمیت دارد. هدف این پژوهش بررسی و مقایسه ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف پوستی و چوبی در تیپ‌های I و III شاهدانه و تعیین صفات مؤثر در تمایز این دو گروه بود.

روش پژوهش: ده ژنوتیپ شاهدانه شامل پنج ژنوتیپ از تیپ I و پنج ژنوتیپ از تیپ III مورد بررسی قرار گرفتند. تیپ I شامل ژنوتیپ‌های غالب از نظر THC بود که عموماً برای مصارف دارویی و روان‌گردان شناخته می‌شوند، در حالی‌که تیپ III شامل ژنوتیپ‌های غالب از نظر CBD بود که از نظر ترکیب کانابینوئیدی به کنف صنعتی و فیبری شباهت بیشتری دارند. از هر ژنوتیپ، سه ساقه انتخاب شد و پس از جداسازی بخش پوست از چوب، نمونه‌ها با روش فرانکلین وابری شدند. ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف پوستی و چوبی شامل طول الیاف، پهنای الیاف، پهنای حفره و ضخامت دیوارهٔ سلولی اندازه‌گیری شد. طول ساقه‌ها و ضخامت پوست آنها نیز اندازه‌گیری شدند. تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل خطی آمیخته، آزمون‌های تی مستقل و من–ویتنی انجام شد. همچنین برای بررسی الگوهای کلی تغییرات صفات از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، برای تعیین قدرت تفکیک صفات از تحلیل افتراقی خطی، و برای ارزیابی روابط بین متغیرها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. مقایسهٔ بین الیاف پوستی و چوبی نیز با آزمون تی جفتی انجام گرفت.

یافته‌ها: از میان ده ویژگی مورد بررسی، تنها پهنای فیبر پوستی و ضخامت دیوارهٔ فیبر پوستی بین دو گروه تفاوت آماری معنی‌دار داشتند. در هر دو مورد، مقادیر شاهدانه‌های تیپ I بیشتر از شاهدانه‌های تیپ III بود. در مقابل، تفاوت معنی‌داری در طول الیاف پوستی و چوبی، پهنای فیبر چوبی، پهنای حفره و ضخامت دیوارهٔ الیاف چوبی، ارتفاع ساقه و ضخامت پوست مشاهده نشد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفهٔ اول در مجموع بیش از ۵۲ درصد از واریانس داده‌ها را توضیح می‌دهند و تمایز نسبی میان دو گروه عمدتاً تحت تأثیر صفات عرضی الیاف قرار دارد. نتایج تحلیل افتراقی خطی نیز نشان داد که ضخامت دیواره، پهنای الیاف و پهنای حفرهٔ الیاف، به‌ویژه در بخش چوبی ساقه، مهم‌ترین عوامل تفکیک‌کنندهٔ تیپ‌های I و III هستند. تحلیل همبستگی نشان داد که ویژگی‌های الیاف پوستی و چوبی عمدتاً در درون هر گروه با یکدیگر همبستگی دارند و ارتباط بین این دو سامانه بافتی محدودتر است. مقایسهٔ الیاف پوستی و چوبی نیز نشان داد که الیاف پوستی در هر دو گروه به‌طور معنی‌داری بلندتر و دارای دیوارهٔ ضخیم‌تر هستند، در حالی‌که الیاف چوبی، به‌ویژه در تیپ III، حفره‌های بزرگ‌تری دارند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه تیپ‌های I و III شاهدانه از نظر برخی ویژگی‌های آناتومی قابل تفکیک هستند، اما میزان همپوشانی میان آنها قابل توجه است و تنها تعداد محدودی از صفات زیست‌سنجی تفاوت معنی‌دار نشان می‌دهند. مهم‌ترین یافتهٔ پژوهش آن است که ویژگی‌های عرضی الیاف، شامل پهنای الیاف و ضخامت دیوارهٔ سلولی، نقش اصلی را در تمایز تیپ‌های I و III ایفا می‌کنند، در حالی‌که طول الیاف، برخلاف انتظار، تفاوت معنی‌داری بین دو گروه ندارد. همچنین تفاوت‌های مشاهده‌شده میان الیاف پوستی و چوبی بیانگر نقش‌های عملکردی متفاوت این دو نوع بافت در ساقهٔ شاهدانه است. این نتایج می‌تواند در برنامه‌های اصلاح نژاد، انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب برای کاربردهای صنعتی و درک بهتر ارتباط میان ساختار و عملکرد الیاف شاهدانه مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: شریفی؛ نجلا، سلامی؛ سیدعلیرضا، پورطهماسی؛ کامبیز، اولادی؛ رضا (۱۴۰۵). ابعاد عرضی الیاف، نه طول آنها: عامل تمایز تیپ‌های I و III شاهدانه (*Cannabis sativa*). *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۹ (۳)، ۲۵۲-۲۳۷. DOI: https://10.22059/jfwp.2026.417612.1398

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

https://doi.org/10.22059/jfwp.2026.417612.1398

۱. مقدمه

شاهدانه گیاهی یک سالهٔ دولپه‌ای با نام علمی (*Cannabis sativa* L.) از خانوادهٔ Cannabaceae است. این گیاه عمدتاً به‌خاطر مواد شیمیایی موجود در گل آن در کاربردهای دارویی زیادی مورد توجه واقع شده است. بااین‌حال، علاوه بر کاربردهای دارویی و روانگردان، یکی از مهم‌ترین منابع الیاف پوستی محسوب می‌شود. ترکیبات کانابینوئیدی موجود در این گیاه، به‌ویژه تتراهیدروکانابینول (THC) و کانابیدیول (CBD)، مبنای اصلی طبقه‌بندی آن از نظر کاربرد هستند [۱]. از این منظر، شاهدانه به سه گروه عمدهٔ روانگردان، دارویی و فیبری (صنعتی) تقسیم می‌شود. شاهدانهٔ دارویی معمولاً دارای محتوای THC بالاتر از ۰/۳ درصد است. شاهدانهٔ فیبری (صنعتی) که برای تولید الیاف یا روغن کشت می‌شود، THC کمتر از ۰/۲ تا ۰/۳ درصد دارند و شاهدانهٔ روانگردان مقادیر بسیار بالاتری از THC را داراست [۲]. اصولاً از نظر قانونی به گیاه *Cannabis sativa* با کمتر از ۰/۳ درصد محتوای THC، نام کنف صنعتی[1] اطلاق شده و کشت و زراعت آن در بسیاری از مناطق دنیا مجاز است. گیاهانی با درصد بالاتر از THC، ماری‌جوآنا[2] نامیده شده و در کشورهای مختلف، وضعیت قانونی آن متفاوت بوده و در برخی مناطق برای مصارف دارویی یا تفریحی مجاز است [۳].

یکی از روش‌های مهم طبقه‌بندی شاهدانه، استفاده از شیمی‌تیپ‌ها[3] است که براساس نوع و غلظت کانابینوئیدهای اصلی گیاه تعریف می‌شوند [۴]. شیمی‌تیپ‌های مختلف براساس نسبت کانابینوئیدهای اصلی مانند THC و CBD در گروه‌های مختلف قرار می‌گیرند. شیمی‌تیپ، طبقه‌بندی ژنوتیپ‌ها یا رقم‌های شاهدانه براساس الگوی تولید کانابینوئیدها است و در برنامه‌های اصلاح نباتات و انتخاب ژنوتیپ‌های مطلوب کاربرد گسترده‌ای دارد. در این طبقه‌بندی، شیمی‌تیپ I به شاهدانه‌های غالب از نظر THC و شیمی‌تیپ III به شاهدانه‌های غالب از نظر CBD اطلاق می‌شود؛ در حالی‌که شیمی‌تیپ II دارای مقادیر نسبتاً متعادل THC و CBD است. ژنوتیپ‌ها با میزان THC بالا اثر روان‌گردان بیشتری دارند و در مصارف تفریحی یا برخی کاربردهای پزشکی که اثر مخدر و ضددرد مطلوب است، استفاده می‌شوند. در مقابل، ژنوتیپ‌ها با CBD بالا معمولاً فاقد اثر روان‌گردانی هستند. به‌همین دلیل، در محصولات سلامت‌محور و مصارف صنعتی استفاده می‌شوند. از نظر تولید کشاورزی نیز، شاهدانه‌های تیپ III معمولاً سازگاری بیشتری با تولید کنف صنعتی دارند، زیرا کنف صنعتی به‌طور معمول با محتوای بسیار پایین THC تعریف می‌شود [۵، ۶]. شاهدانهٔ فیبری یا کنف صنعتی به‌منظور تولید الیاف و سایر محصولات صنعتی کشت می‌شود. به‌طور خلاصه، تیپ I اغلب به‌عنوان شاهدانه‌های نوع دارویی[4] شناخته می‌شوند درحالی‌که تیپ III معمولاً با شاهدانه‌های صنعتی یا فیبری[5] مرتبط هستند [۷]. الیاف پوستی[6]، گروهی از الیاف طبیعی هستند که از پوست داخلی ساقهٔ گیاهان دولپه‌ای مانند کتان، کنف، شاهدانه، جوت و کنف هندی استخراج می‌شوند. این الیاف به‌دلیل طول زیاد، استحکام کششی بالا و درصد سلولز قابل‌توجه (حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد)، در بسیاری از کاربردها عملکرد بهتری نسبت به الیاف چوبی دارند [۸]. امروزه الیاف پوستی علاوه بر صنایع نساجی، به‌طور گسترده در ساخت مواد کامپوزیتی، صنایع خودروسازی و ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند و به‌دلیل قابلیت برداشت سالانه و تجزیه‌پذیری زیستی، از دیدگاه توسعهٔ پایدار نیز اهمیت فراوانی دارند [۹، ۱۰].

الیاف گیاه شاهدانه شامل الیاف بلند پوستی در ناحیهٔ آبکش و الیاف کوتاه‌تر موجود در بخش چوبی ساقه هستند. طول سلول‌های فیبری شاهدانه بین ۵ تا ۵۵ میلی‌متر و قطر آنها بین ۰/۰۱۶ تا ۰/۰۵ میلی‌متر گزارش شده است [۱۱]. همچنین سهم پوست ساقه بسته به ژنوتیپ و شرایط رشد می‌تواند بین ۱۴ تا ۴۸ درصد متغیر باشد [۱۲]. به‌دلیل رشد سریع، نیاز اندک به نهاده‌های شیمیایی و کاربردهای گسترده در صنایع نساجی، ساختمان، خودرو، کاغذسازی و تولید مواد زیست‌تخریب‌پذیر، شاهدانه به‌عنوان یکی از پایدارترین منابع الیاف طبیعی شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، الیاف پوستی شاهدانه، به‌دلیل قابلیت استفاده چند منظوره، چرخهٔ تولید کوتاه، تقاضای سرمایهٔ پایین در کشت و جذب کربن مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. شاهدانه سابقهٔ طولانی کشت در ایران دارد. ایران از

[1] Hemp
[2] Marijuana
[3] Chemotypes
[4] Drug-type
[5] Industrial- or fiber-type
[6] Bast fibers

نظر تاریخچهٔ تکاملی این گونه، جایگاه ویژه‌ای دارد و شمال ایران به‌عنوان یکی از محتمل‌ترین مراکز منشأ طبیعی شاهدانه مطرح شده است [۱۴]. این جمعیت‌های بومی در طی زمان و در مواجهه با شرایط محیطی متنوع کشور، سازگاری یافته و در نتیجه، تنوع فنوتیپی و ژنتیکی چشمگیری در آنها ایجاد شده است [۱۵]. پراکنش شاهدانه در ایران گسترده است؛ به‌گونه‌ای که مطالعات مختلف، نمونه‌های گیاهی را از ۲۰ تا ۲۵ منطقهٔ جغرافیایی متمایز در سراسر کشور جمع‌آوری کرده‌اند [۱۶، ۱۷]. تنوع گستردهٔ مشاهده‌شده در این جمعیت‌های بومی ایران، از سوی پژوهشگران به‌عنوان منبعی ارزشمند و دارای ظرفیت بالا برای برنامه‌های اصلاح نژادی معرفی شده است [۱۵]. در سال‌های اخیر ژنوتیپ‌ها و ارقام جدیدی از آن توسط پژوهشگران ایرانی معرفی و تجاری‌سازی شده‌اند [۲]. برخی از این شاهدانه‌های جدید در نوع دارویی و برخی در دستهٔ فیبری قرار گرفتند. با وجود اهمیت روزافزون این گیاه، طبقه‌بندی شاهدانه‌های فیبری و دارویی همچنان عمدتاً بر پایهٔ ترکیبات شیمیایی [۱۸]، ویژگی‌های ژنتیکی و مولکولی [۱۹، ۲۰] یا خصوصیات بذر [۱] انجام می‌شود. در مقابل، ویژگی‌های آناتومی و زیست‌سنجی الیاف[1]، به‌ویژه در مقایسهٔ میان تیپ‌های فیبری و دارویی، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از معدود گزارش‌ها نشان داده است که ارقام فیبری معمولاً ساقه‌های توخالی‌تر و سهم بیشتری از بافت‌های فیبری نسبت به ارقام دارویی دارند [۲۱]. ارزیابی دقیق ویژگی‌های الیاف برای درک پتانسیل صنعتی ژنوتیپ‌ها و ارقام فیبری ضروری است [۲۲]؛ بااین‌حال، تاکنون پژوهشی که ویژگی‌ها و کیفیت الیاف شاهدانه‌هایی که در دسته‌های دارویی و فیبری قرار گرفته‌اند را با هم مقایسه کند، انجام نشده است. پژوهش جاری از این جهت مهم است که هر یک از این ژنوتیپ‌ها، حسب کاربرد ممکن است دو منظوره باشند؛ یعنی تیپ I در عین اینکه برای مصارف دارویی و پزشکی تولید می‌شود، الیاف مناسبی داشته باید یا از نظر دانه و روغن نیز مناسب صنعت باشند؛ یا برعکس، تیپ III که مواد روانگردان کمتری دارد و بیشتر صنعتی محسوب می‌شود، الیاف مناسبی نداشته باشد ولی پژوهش‌هایی که کیفیت الیاف این تیپ‌ها را بررسی و مقایسه کنند، نادراند.

ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف، از جمله طول، پهنا و ضخامت دیوارهٔ سلولی، از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کنندهٔ کیفیت و عملکرد الیاف در محصولات مختلف لیگنوسلولزی به‌شمار می‌روند [۲۳]. طول الیاف نقش اساسی در ایجاد اتصالات بین‌لیفی داشته و معمولاً با افزایش مقاومت کششی، مقاومت پارگی و استحکام کلی محصولات کاغذی و کامپوزیتی همراه است. در مقابل، ویژگی‌های عرضی الیاف، به‌ویژه پهنا، قطر حفره و ضخامت دیوارهٔ سلولی، بر میزان انعطاف‌پذیری و قابلیت پهن‌شدگی (کلاپس) الیاف اثر می‌گذارند. الیاف نازک‌دیواره و انعطاف‌پذیرتر، سطح تماس بیشتری با الیاف مجاور ایجاد کرده و در نتیجه پیوندهای بین‌لیفی قوی‌تر، چگالی بیشتر و سطوح صاف‌تر را در کاغذ و فرآورده‌های الیافی فراهم می‌کنند. در مقابل، الیاف ضخیم‌دیواره مقاومت بیشتری در برابر پهن‌شدگی داشته و معمولاً موجب افزایش حجم ویژه و سختی محصول می‌شوند [۲۴]. همچنین در صنایع کامپوزیت، نسبت طول به قطر الیاف و ضخامت دیوارهٔ سلولی از عوامل مؤثر بر انتقال تنش، استحکام مکانیکی و دوام مواد مرکب هستند. به‌طورکلی، زیست‌سنجی الیاف نه‌تنها شاخصی مهم برای ارزیابی کیفیت مواد اولیه محسوب می‌شود، بلکه در پیش‌بینی عملکرد نهایی محصولات کاغذی، تخته‌های الیافی و کامپوزیت‌های زیست‌پایه نیز نقش کلیدی دارد. بنابراین، هدف این پژوهش بررسی و مقایسهٔ ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف پوستی و چوبی در تیپ‌های مختلف شاهدانه است. فرض بر این است که تیپ‌های مختلف شاهدانه از نظر ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف تفاوت معنی‌داری دارند و تیپ‌های I و III براساس این ویژگی‌ها در دو گروه متمایز قرار می‌گیرند، به‌گونه‌ای که شاهدانه‌های تیپ III دارای ویژگی‌های مطلوب‌تری برای تولیدات صنعتی در صنایع سلولزی باشند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. نمونه‌برداری و تفکیک پوست از چوب

دراین پژوهش، ده ژنوتیپ شاهدانه بررسی شدند که پنج ژنوتیپ از نوع شیمی‌تیپ I و پنج ژنوتیپ از نوع شیمی‌تیپ III بودند. این ژنوتیپ‌ها پیش‌تر توسط Mostafaei Dehnavi و همکاران (۲۰۲۲) با کمک آزمون کروماتوگرافی مایع[2] و براساس میزان THC و CBD، در این دو شیمی‌تیپ طبقه‌بندی شده بودند [۱۶]. ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در گلخانهٔ دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی

[1]Fiber biometry
[2]High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

دانشگاه تهران پرورش داده شدند (شکل ۱). از هر ژنوتیپ، سه ساقه انتخاب، قطع و خشک شدند. با استفاده از اره، از پایین هر ساقه، دیسکی به ضخامت یک سانتی‌متری تهیه شد. برای تفکیک پوست از چوب، دیسک‌ها به‌مدت ۷۲ ساعت در آب قرار گرفت. این‌کار به شل شدن اتصال پوست به چوب کمک می‌کند. آنگاه به شکل مکانیکی با دست، بخش پوست از چوب جدا شد. ضخامت پوست‌ها با استفاده از کولیس و در سه نقطه اندازه‌گیری شد (t). همچنین طول ساقه با خط‌کش نواری اندازه‌گیری و ثبت شد (h).



شکل ۱. ژنوتیپ‌های مختلف شاهدانه، پرورش یافته در گلخانه دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (راست) و نمایی نزدیک‌تر از ساقه یک شاهدانه (چپ)

۲-۲. وابری الیاف

بخش پوست و بخش چوب به شکل جداگانه با شیوهٔ فرانکلین [۲۵] وابری شدند. تکه‌های کوچکی از پوست و چوب در لولهٔ آزمایش قرار داده شده و به اندازهٔ مساوی استیک اسید و پروکسید هیدروژن به آن اضافه شد تا به‌طور کامل در محلول غوطه‌ور شوند. سپس، لولهٔ آزمایش به‌مدت ۲۴ ساعت در اجاق با دمای تقریبی ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از این مدت، خلال‌ها سفید شده و محلول جداسازی به آرامی خارج گشت سپس مقداری آب مقطر به لوله اضافه شد. این کار ۳ تا ۴ بار تکرار شد تا محلول باقیمانده شسته شود. در نهایت، با اضافه کردن مقداری آب مقطر و تکان دادن لولهٔ آزمایش، نمونهٔ چوبی به شکل سوسپانسیونی از تودهٔ الیاف وابری شده درآمد. به هر لولهٔ آزمایش، یک قطره سافرانین ۱ درصد افزوده شد تا الیاف رنگ بگیرند.

۲-۳. اندازه‌گیری زیست‌سنجی الیاف پوستی و چوبی

با قطره‌چکان، چند قطره از سوسپانسیون حاوی الیاف رنگ شده روی لام ریخته و لامل روی آن قرار گرفت. سپس لام‌ها داخل اجاق قرار گرفته تا خشک شوند [۲۶]. به‌دلیل طویل بودن برخی الیاف پوستی، عکس‌برداری از این الیاف در زیر استریومیکروسکوپ Leica مدل EZ4 انجام شد. الیاف چوبی نیز زیر میکروسکوپ نوری زمینه‌روشن BEL Fluo3 متصل به دوربین عکسبرداری شدند. پس از انتقال عکس‌ها به نرم‌افزار ImageJ [۲۷]، با استفاده از این نرم‌افزار ویژگی‌های طول الیاف پوستی (LB)، پهنای کلی الیاف پوستی (WB)، ضخامت دیوارهٔ الیاف پوستی (TB) و پهنای حفرهٔ الیاف پوستی (AB) و طول الیاف چوبی (LX)، پهنای کلی الیاف چوبی

(WX)، ضخامت دیوارهٔ الیاف چوبی (TX) و پهنای حفرهٔ الیاف چوبی (AX) اندازه‌گیری شد. در این پژوهش، ۱۰ ژنوتیپ، از هر ژنوتیپ، سه ساقه و از هر ساقه، حداقل ۱۰۰ فیبر از بخش چوبی ساقه و ۱۰۰ فیبر از بخش پوست همان ساقه بررسی شدند: حدود ۳۰۰ فیبر چوبی و ۳۰۰ فیبر پوستی برای هر ژنوتیپ و درمجموع ۶۲۱۶ فیبر مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفتند [۲۸].

۲-۴. آزمون مدل خطی آمیخته[1]

برای مقایسهٔ ویژگی‌های شاهدانه‌های تیپ I و III، از مدل خطی آمیخته استفاده شد. این مدل به‌دلیل ساختار سلسله‌مراتبی داده‌ها انتخاب شد. در این پژوهش، سه ساقه از هر ژنوتیپ مورد بررسی قرار گرفت و ژنوتیپ‌ها نیز درون دو گروه اصلی تیپ I و III قرار داشتند. بنابراین، این مدل امکان بررسی اثر ثابت گروه را فراهم می‌آورد، در حالی‌که واریانس تصادفی ناشی از تفاوت بین ژنوتیپ‌ها را به عنوان اثر تصادفی در نظر می‌گیرد. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Rstudio انجام شد. بسته‌های آماری lme4 (برای برآورد مدل) و ggplot2 (برای ترسیم نمودارها) به‌کار گرفته شدند. علاوه بر این، برای مقایسهٔ تکمیلی میانگین دو گروه از آزمون t مستقل و آزمون غیرپارامتری یومان–ویتنی (Mann-Whitney U) استفاده شد. سطح معنی‌داری در تمام آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. داده‌ها پیش از تحلیل از نظر وجود مقادیر پرت و توزیع نرمال بررسی شدند. درنهایت نمودارهای جعبه‌ای[2] همراه با نقاط خام هر مشاهده برای نمایش توزیع داده‌ها ترسیم شد.

۲-۵. تحلیل مؤلفه‌های اصلی[3]

برای بررسی الگوی کلی روابط بین ویژگی‌های مورد مطالعه و شناسایی ابعاد اصلی تنوع داده‌ها، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. این تحلیل روی ۱۰ ویژگی شامل ارتفاع ساقه (h)، ضخامت پوست (t)، طول و پهنای فیبر پوستی (LB, WB)، طول و پهنای فیبر چوبی (WX, LX)، پهنای حفرهٔ فیبر پوستی و چوبی (AX, AB) و ضخامت دیوارهٔ فیبر پوستی و چوبی (TX, TB) انجام شد. داده‌ها قبل از تحلیل استانداردسازی شدند تا اثر واحدهای متفاوت متغیرها حذف شود. تحلیل PCA با استفاده از بسته FactoMineR در نرم‌افزار Rstudio اجرا شد. برای نمایش نتایج، نمودار جعبه‌ای رسم شد که در آن هم موقعیت نمونه‌ها (ساقه‌ها) و هم بارگذاری[4] متغیرها بر روی دو مؤلفهٔ اول نشان داده شده است. این تحلیل به‌منظور شناسایی الگوهای کلی صفات و میزان تمایز بین دو تیپ I و III به کار گرفته شد.

۲-۶. بررسی همبستگی بین متغیرها

برای بررسی روابط خطی بین ویژگی‌های ریخت‌شناختی و میکروسکوپی ساقهٔ شاهدانه، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این تحلیل در دو سطح جداگانه انجام شد: ۱- گروه شاهدانهٔ تیپ I؛ ۲- گروه شاهدانهٔ تیپ III. متغیرهای وارد شده در تحلیل شامل ۱۰ ویژگی h، t، LB، LX، WB، WX، AB، AX، TB و TX بودند. همبستگی‌ها با استفاده از تابع cor در نرم‌افزار RStudio محاسبه و با بسته corrplot به‌صورت نقشهٔ حرارتی نمایش داده شدند. سطح معنی‌داری برای تفسیر همبستگی‌ها ۰/۰۵در نظر گرفته شد. قبل از تحلیل، پیش‌فرض‌های همبستگی پیرسون (توزیع نرمال داده‌ها) به‌صورت بصری بررسی شد.

۲-۷. تحلیل افتراقی خطی[5]

برای تعیین قدرت تفکیک دو تیپ I و III براساس ویژگی‌های مورد مطالعه و شناسایی صفاتی که بیشترین سهم را در تمایز این دو گروه دارند، از تحلیل افتراقی خطی (LDA) استفاده شد. این روش یک تکنیک نظارت‌شده است که بهترین ترکیب خطی از متغیرها را برای حداکثر کردن جداسازی بین گروه‌ها پیدا می‌کند. تحلیل LDA روی ۱۰ ویژگی (h, t, LB, LX, WB, WX, AB, AX, TB, TX) انجام شد. قبل از تحلیل، داده‌ها استانداردسازی شدند. LDA با استفاده از بستهٔ MASS در نرم‌افزار

[1]Linear Mixed-Effects Model - LMM
[2]Boxplot
[3]Principal Component Analysis - PCA
[4]Loadings
[5]Linear Discriminant Analysis - LDA

Rstudio اجرا شد. نتایج به‌صورت نمودار توزیع امتیازات مؤلفهٔ تشخیص خطی اول (LD1) و همچنین ضرایب بارگذاری هر متغیر نمایش داده شد. این تحلیل به‌منظور ارزیابی قابلیت تفکیک دو گروه و تعیین ویژگی‌های کلیدی تمایزگر انجام گرفت.

۲-۸. مقایسهٔ ویژگی‌های الیاف پوستی و چوبی

برای مقایسهٔ ویژگی‌های الیاف پوستی و چوبی، از آزمون t-test جفتی استفاده شد. این آزمون به‌دلیل وابسته بودن مشاهدات (اندازه‌گیری هر دو نوع فیبر روی همان ساقه) انتخاب شد. تحلیل‌ها به‌صورت جداگانه برای دو تیپ I و III انجام شد. سطح معنی‌داری در تمام آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. نمودارهای جعبه‌ای برای نمایش توزیع داده‌ها و مقایسهٔ بصری بین الیاف پوستی و چوبی ترسیم شدند.

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. مقایسهٔ ویژگی‌های تیپ‌های I و III شاهدانه

نتایج مدل خطی آمیخته (LLM) نشان داد که بین دو تیپ I و III، تنها در دو ویژگی تفاوت آماری معنی‌دار وجود داشت (شکل ۲). طبق مدل LMM و آزمون‌های تکمیلی، پهنای فیبر پوستی (WB) و ضخامت دیوارهٔ فیبر پوستی (TB) در تیپ I به‌طور معنی‌داری بالاتر از تیپ III بود (به‌ترتیب $p = ۰۰۵/۰$ و $p = ۰۳۴/۰$). میانگین WB در تیپ I برابر ۴۹/۵ میکرومتر و در تیپ III برابر ۳۱/۴ میکرومتر بود. همچنین میانگین TB در تیپ I، ۹/۱۴ میکرومتر و در تیپ III، ۷/۸۶ میکرومتر محاسبه شد. در سایر ویژگی‌ها شامل ارتفاع ساقه (h)، ضخامت پوست (t)، طول فیبر پوستی (LB) و چوبی (LX)، پهنای فیبر چوبی (WX)، پهنای حفرهٔ فیبر پوستی (AB) و چوبی (AX) و ضخامت دیوارهٔ فیبر چوبی (TX) تفاوت معنی‌داری بین دو گروه مشاهده نشد.

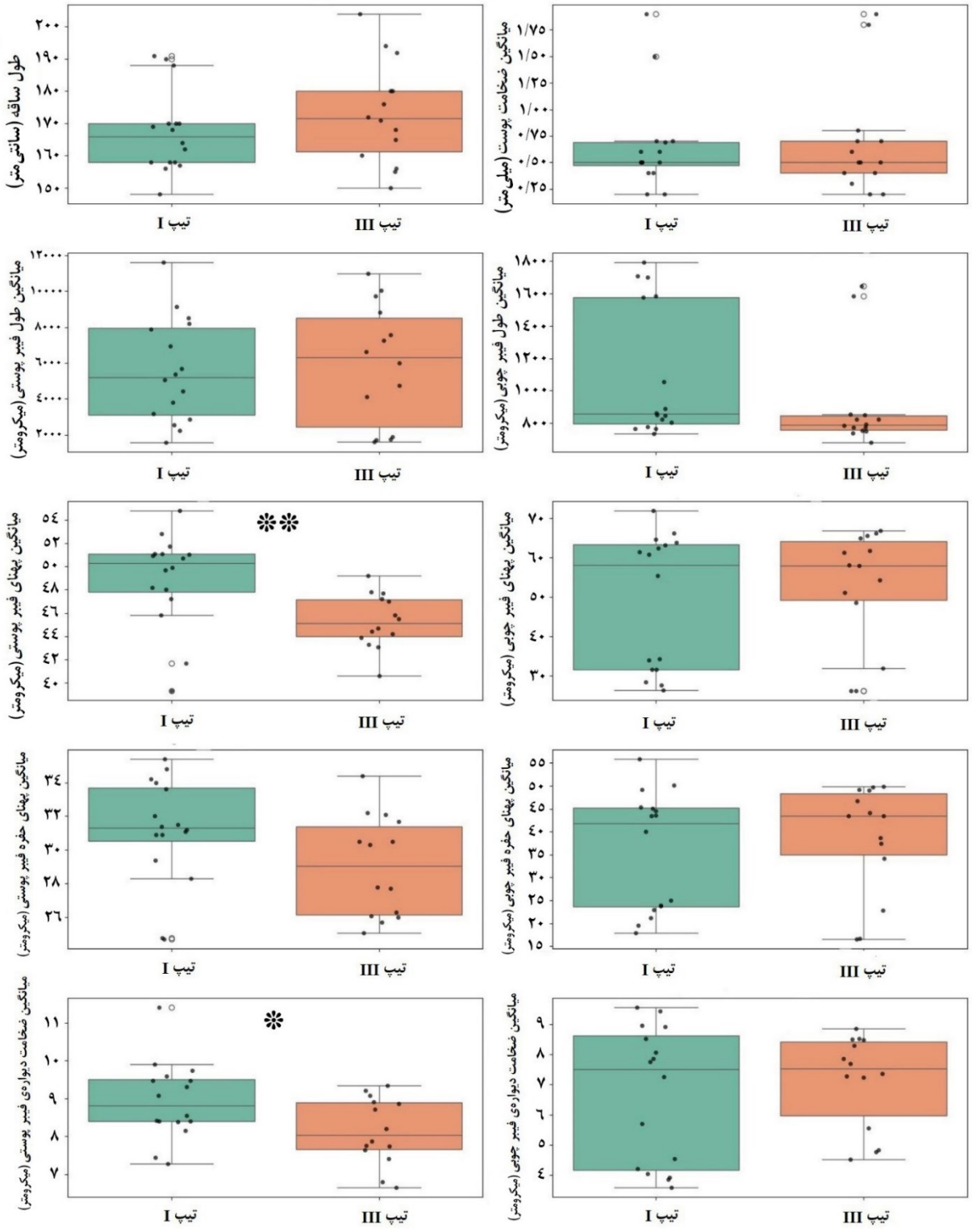
۳-۲. تحلیل مؤلفه‌های اصلی صفات در تیپ‌های I و III شاهدانه

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو مؤلفهٔ اول به ترتیب ۳۲/۷ و ۱۹/۹ درصد از واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهند (در مجموع ۵۲/۶ درصد). مؤلفه اول (PC1) عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های فیبر چوبی شامل پهنای فیبر چوبی (WX)، پهنای حفرهٔ فیبر چوبی (AX) و ضخامت دیوارهٔ فیبر چوبی (TX) قرار داشت. مؤلفهٔ دوم (PC2) بیشتر با ویژگی‌های فیبر پوستی، به‌ویژه پهنای فیبر پوستی (WB) و پهنای حفرهٔ فیبر پوستی (AB) مرتبط بود. نمودار بای‌پلات (شکل ۳) نشان می‌دهد که گروه‌های شاهدانهٔ دارویی و فیبری تا حدی از یکدیگر متمایز هستند؛ به‌طوری که نمونه‌های دارویی عمدتاً در سمت راست و پایین نمودار و نمونه‌های فیبری بیشتر در سمت چپ و بالا قرار گرفته‌اند. با این حال، همپوشانی قابل‌توجهی بین دو گروه مشاهده می‌شود که حاکی از وجود تنوع زیاد درون‌گروهی درعین تفاوت نسبی بین دو گروه است. این یافته با نتایج مدل خطی آمیخته که تنها تفاوت معنی‌دار را در ویژگی‌های WB و TB نشان داد، همخوانی دارد. با توجه به اینکه دو مؤلفهٔ اول حدود ۵۳ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند، نتایج PCA صرفاً به‌عنوان یک تحلیل اکتشافی برای نمایش الگوی کلی داده‌ها تفسیر شده و مبنای اصلی نتیجه‌گیری دربارهٔ تفکیک دو تیپ قرار نگرفته است.

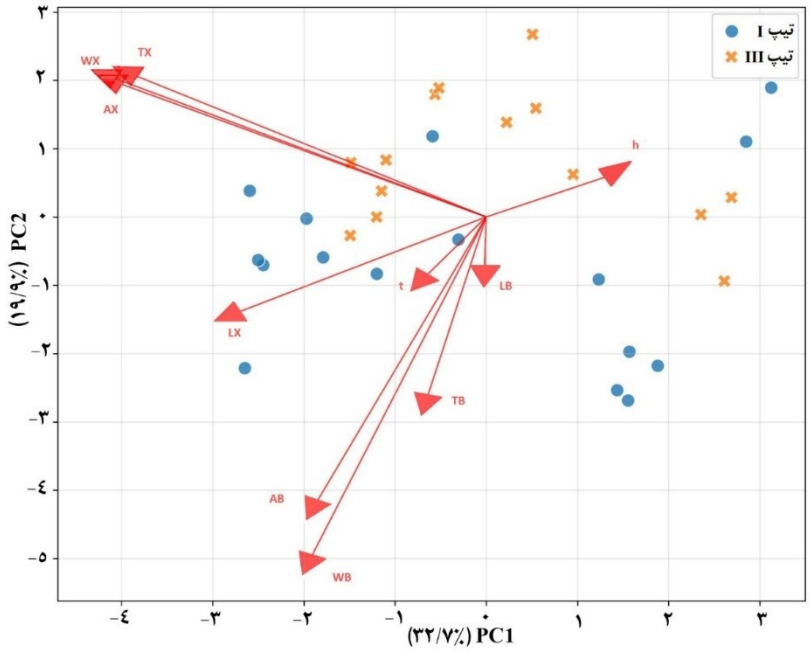
۳-۳. همبستگی بین ویژگی‌های آناتومی شاهدانه

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون در شکل ۴ نشان داد که قوی‌ترین روابط، بین ویژگی‌های درون هر نوع گروه از الیاف (پوستی و چوبی) وجود دارد. در گروه شاهدانه‌های تیپ I، قوی‌ترین ارتباطات بین پهنای کلی، پهنای حفره‌سلولی و ضخامت دیوارهٔ الیاف مشاهده شد. طول الیاف چوبی شاهدانه‌های تیپ I با هرسه ویژگی پهنای کلی، پهنای حفره‌سلولی و ضخامت دیوارهٔ الیاف، همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد. طول الیاف پوستی ولی همبستگی معنی‌داری با متغیرهای دیگر نشان نداد. ارتفاع ساقه با برخی ویژگی‌های فیبر چوبی همبستگی منفی ضعیف و با طول الیاف پوستی، رابطهٔ مستقیم نشان داد. در گروه شاهدانه‌های تیپ III، همبستگی‌ها تا حدی ضعیف‌تر و پراکنده‌تر از تیپ I بودند. با این حال، همبستگی‌های قوی درون فیبر چوبی همچنان حفظ شده بود. ضخامت پوست در این گروه با ارتفاع ساقه همبستگی مثبت نسبتاً قوی نشان داد. ارتفاع ساقه مانند گروه شاهدانهٔ تیپ

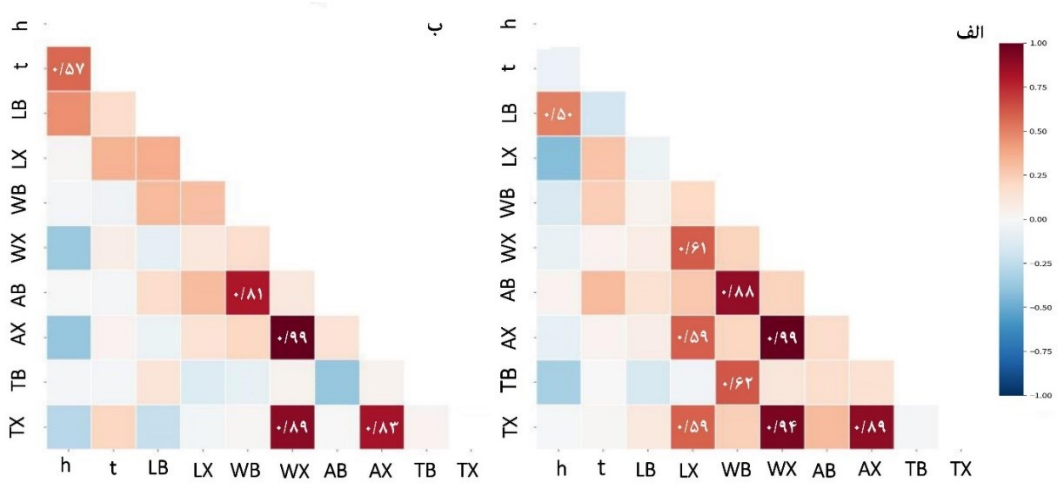
I، همبستگی معکوسی با طول الیاف پوستی داشت. به‌طور کلی، ویژگی‌های فیبر پوستی و چوبی بیشتر با خود همبستگی بالایی داشتند تا با یکدیگر، که این امر نشان‌دهندهٔ استقلال نسبی این دو نوع بافت از یکدیگر است.



شکل ۲. مقایسهٔ ویژگی‌های مورد بررسی بین ژنوتیپ‌های شاهدانه از نوع تیپ‌های I و III. نقاط سیاه، مقادیر اندازه‌گیری شده هر ساقه‌ها هستند.
* نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و ** نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۱است.



شکل ۳. نمودار بای‌پلات از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) براساس ۱۰ ویژگی ریخت‌شناختی و میکروسکوپی ساقه‌های شاهدانه. نقاط آبی و نارنجی به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ نمونه‌های تیپ I و III هستند. فلش‌ها بارگذاری متغیرها بر روی دو مؤلفهٔ اول را نمایش می‌دهند.



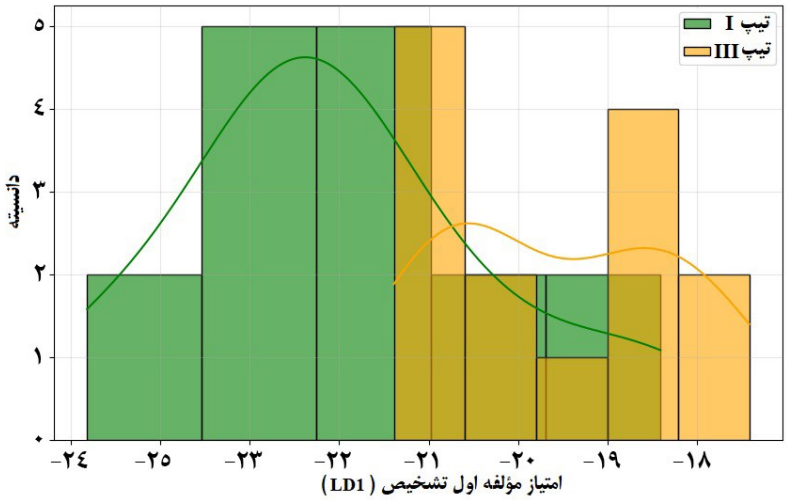
شکل ٤. همبستگی پیرسون بین طول، ضخامت پوست و ویژگی‌های الیاف در تیپ‌های مورد بررسی شاهدانه به تفکیک شاهدانه‌های تیپ I (الف) و تیپ III (ب). فقط ضرایب همبستگی معنی‌دار ($P<۰/۰۵$) به‌صورت عدد در شکل نمایش داده شده‌اند و خانه‌های فاقد عدد بیانگر همبستگی‌های غیرمعنی‌دار هستند.

۳-۴. تحلیل افتراقی خطی برای تمایز شاهدانه تیپ I از تیپ III

نتایج تحلیل تشخیص خطی برای تمایز (LDA) نشان داد که دو گروه شاهدانهٔ تیپ I و III، تا حدی براساس ویژگی‌های مورد مطالعه قابل تفکیک هستند، هرچند همپوشانی قابل‌توجهی نیز بین آنها وجود دارد (شکل ۵). مؤلفهٔ تشخیص خطی اول (LD1) عمدتاً توسط ویژگی‌های فیبر چوبی تعیین می‌شود. طبق ضرایب LDA، مهم‌ترین صفات تفکیک‌کننده به‌ترتیب عبارتند از: ضخامت دیوارهٔ فیبر چوبی؛ پهنای فیبر چوبی؛ پهنای حفرهٔ فیبر چوبی؛ ضخامت دیوارهٔ فیبر پوستی و پهنای فیبر پوستی. این یافته با نتایج تحلیل PCA و مدل LMM همخوانی دارد و تأکید می‌کند که تفاوت اصلی بین دو گروه بیشتر در ویژگی‌های میکروسکوپی عرضی فیبر (به‌ویژه فیبر چوبی) متمرکز است (جدول ۱) و نه در طول الیاف و ویژگی‌های ماکروسکوپی مانند ارتفاع ساقه.

جدول ۱. ضرایب استاندارد شده و رتبه‌بندی متغیرها در تابع تشخیص خطی براساس تحلیل افتراقی خطی (LDA).
این ضرایب نشان‌دهندهٔ سهم هر ویژگی در تفکیک تیپ‌های I و III شاهدانه از هم هستند. مقادیر با قدر مطلق بالاتر، تأثیر بیشتری در تمایز دو گروه دارند.

رتبه	ویژگی	ضریب بارگذاری LDA	تفسیر
۱	TX	−۱۲/۱۸۲	قوی‌ترین متغیر (ضخامت دیوارهٔ فیبر چوبی)
۲	WX	+۶/۰۹۴	بسیار مهم (پهنای فیبر چوبی)
۳	AX	−۶/۰۲۳	بسیار مهم (پهنای حفره فیبر چوبی)
۴	TB	+۴/۳۷۱	مهم (ضخامت دیوارهٔ فیبر پوستی)
۵	WB	−۲/۸۵۱	مهم (پهنای فیبر پوستی)
۶	AB	+۲/۵۳۴	مهم (پهنای حفرهٔ فیبر پوستی)



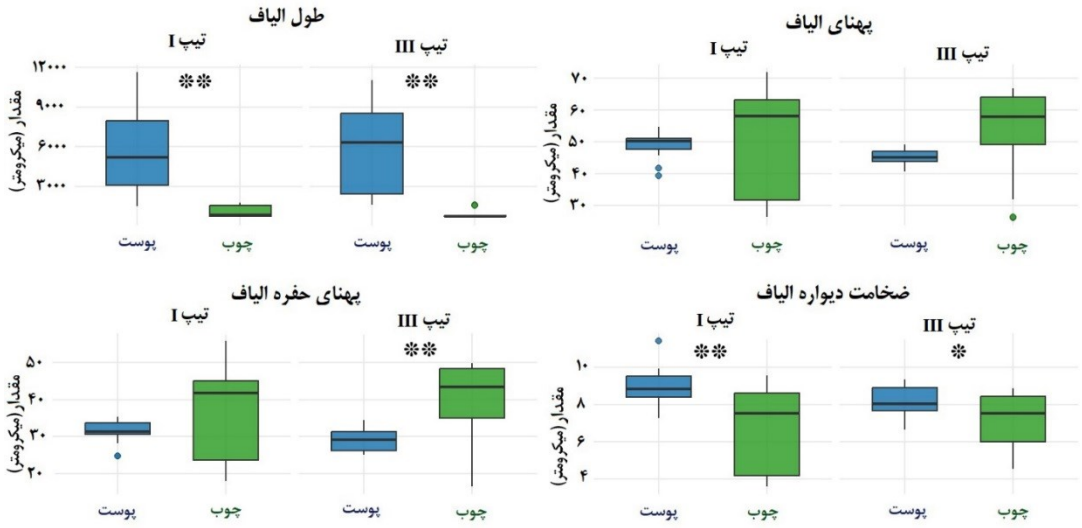
شکل ۵. تحلیل تشخیص خطی (LDA) توزیع امتیازات مؤلفهٔ اول تشخیص (LD1) برای گروه‌های شاهدانهٔ تیپ I (سبز) و III (نارنجی). منحنی‌های چگالی، جدایی بین دو گروه را براساس ترکیب خطی بهینهٔ ۱۰ صفت ریخت‌شناختی و فیبری نمایش می‌دهند. هرچه جداسازی بیشتر باشد، قدرت تمایز گروه‌ها بالاتر است.

۳-۵. مقایسهٔ ویژگی‌های الیاف پوستی و چوبی

نتایج مقایسهٔ ویژگی‌های الیاف پوستی و چوبی در جدول ۲ و شکل ۶ خلاصه شده است. طبق آزمون t-test، طول فیبر پوستی در هر دو تیپ I و III به‌طور معنی‌دار بلندتر از طول فیبر چوبی بود. همچنین، ضخامت دیوارهٔ فیبر پوستی در هر دو گروه به‌طور معنی دار بیشتر از ضخامت دیوارهٔ فیبر چوبی بود. در مقابل، پهنای حفرهٔ فیبر چوبی در ژنوتیپ‌های تیپ III به‌طور معنی‌دار بزرگتر از پهنای حفرهٔ فیبر پوستی بود. تفاوت پهنای الیاف بین پوست و چوب در هیچ یک از گروه‌ها معنی‌دار نبود.

جدول ۲. نتایج مقایسهٔ آماری بین ویژگی‌های الیاف پوستی و چوبی در شاهدانه‌های تیپ I و III با استفاده از آزمون تی جفتی

ویژگی	تیپ	چوب (میکرون)	پوست (میکرون)	p-value	نتیجه
طول فیبر	I	۱۰۹۷/۰	۵۵۶۰/۷	<۰/۰۰۰۱	الیاف پوستی خیلی بلندتر
طول فیبر	III	۹۰۲/۶	۵۹۱۸/۶	۰/۰۰۰۱	الیاف پوستی خیلی بلندتر
پهنای فیبر	I	۴۹/۰۲	۴۸/۹۹	۰/۹۹۵۳	تقریباً برابر
پهنای فیبر	III	۵۲/۹۵	۴۵/۳۱	۰/۰۶۸۴	الیاف چوبی کمی پهن‌تر (نزدیک به معنی‌دار)
پهنای حفره	I	۳۵/۷۴	۳۱/۱۴	۰/۱۷۲۰	تفاوت معنی‌دار نیست
پهنای حفره	III	۳۸/۷۰	۲۹/۰۳	۰/۰۰۹۵	الیاف چوبی پهن‌تر
ضخامت دیواره	I	۶/۶۴	۸/۹۴	۰/۰۰۲۳	الیاف پوستی ضخیم‌تر
ضخامت دیواره	III	۷/۱۳	۸/۱۶	۰/۰۴۶۶	الیاف پوستی ضخیم‌تر



شکل ٦. مقایسهٔ ویژگی‌های الیاف پوستی و چوبی در شاهدانه‌های تیپ I و III با نمودارهای جعبه‌ای.
رنگ آبی نشان‌دهندهٔ الیاف پوستی و رنگ سبز نشان‌دهندهٔ الیاف چوبی است.
* نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و ** نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ است.

۴. بحث

۴-۱. مقایسهٔ ویژگی‌های تیپ‌های I و III شاهدانه

چندین معیار برای جدا کردن شاهدانه دارویی و فیبری وجود دارد. سهم THC (معمولاً آستانه ۰/۳ درصد) و نسبت CBD/THC معیار اصلی هستند [۲۹]. در سطح ژنتیکی، الگوهای خاص ژن‌های THCAS و CBDAS و سایر مارکرهای DNA امکان پیش‌بینی نوع دارویی یا فیبری را حتی در بذر و گیاه نابالغ فراهم می‌کنند [۲۰]. ترکیب روش‌های ژنتیکی و شیمیایی، دقیق‌ترین و قابل‌اعتمادترین تفکیک را ارائه می‌دهد بااین حال، در مطالعات تفکیک شاهدانهٔ دارویی و فیبری (صنعتی)، تمرکز تقریباً کامل روی ترکیب کانابینوئیدی و ژن‌های مربوطه است و ویژگی‌های خودِ الیاف (خواص ساختاری یا فیزیکی-مکانیکی) بسیار کم‌تر به‌عنوان معیار تفکیک بررسی شده‌اند و نقش حاشیه‌ای دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که از میان ۱۰ صفت بررسی‌شده، تنها پهنای فیبر پوستی (WB) و ضخامت دیوارهٔ فیبر پوستی (TB) بین دو تیپ I و III اختلاف معنی‌دار داشتند و در هر دو مورد، مقادیر تیپ I بیشتر بود. این الگو نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت‌های شناخته شده میان شاهدانه‌های دارویی و فیبری از نظر اهداف اصلاحی و کاربرد نهایی، بسیاری از ویژگی‌های ساختاری ساقه در هر دو گروه همچنان مشابه باقی مانده‌اند. مطالعات ژنتیکی و ریخت‌شناختی نیز نشان داده‌اند که جدایی بین شاهدانه‌های دارویی و فیبری بیشتر در ویژگی‌هایی نظیر میزان کانابینوئیدها، الگوی شاخه‌دهی، نسبت گل به ساقه و معماری گیاه مشاهده می‌شود تا در صفات پایهٔ آناتومیکی ساقه و بسیاری از ژنوتیپ‌های شاهدانه دارای ویژگی‌های حد واسط بوده و مرز کاملاً مشخصی میان تیپ‌های دارویی و فیبری وجود ندارد [۳۰]. بااین‌حال، در این پژوهش مشخص شد که برخی از ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف بین این دو تیپ شاهدانه‌ها متفاوت است. همچنین نتایج آزمون‌های آماری تکمیلی همین برداشت را تقویت می‌کنند. در LDA صفات دیواره‌ای و عرضی الیاف، بیشترین نقش را در تفکیک دو گروه داشتند. چنین الگویی نشان می‌دهد که بخش مهمی از تنوع بین دو گروه در سازمان میکروسکوپی بافت‌های پوست و چوب نهفته است؛ بااین حال، همپوشانی دو گروه در آزمون‌های PCA و LDA نشان می‌دهد که این واگرایی هنوز کامل نشده و بخش بزرگی از زمینهٔ آناتومی مشترک باقی مانده است. یافته مهم دیگر پژوهش این است که طول الیاف؛ به‌عنوان تاثیرگذارترین ویژگی زیست‌سنجی بر کیفیت محصول [۱۱]؛ بین دو گروه تفاوت معنی‌داری ندارد. پهن‌تر بودن الیاف پوستی و ضخیم‌تر بودن دیوارهٔ آنها در تیپ I احتمالاً با نیاز بیشتر این گیاهان به پشتیبانی مکانیکی مرتبط است. تیپ I و ارقام دارویی معمولاً دارای شاخه‌دهی بیشتر و گل‌آذین‌های سنگین‌تر هستند و در نتیجه تنش‌های مکانیکی بیشتری را تحمل می‌کنند.

افزایش ضخامت دیوارهٔ سلولی می‌تواند مقاومت خمشی و استحکام ساقه را افزایش دهد و از خوابیدگی یا شکستگی گیاه جلوگیری کند [۳۱]. فیتوکانابینوئیدها، به‌ویژه CBD و THC، ارزش دارویی گیاه را تعیین می‌کنند، اما این ترکیبات در ساختارهای ترشحی و نه در فیبرها ساخته می‌شوند؛ بنابراین، تفاوت‌های آناتومی ساقه احتمالاً پیامد غیرمستقیم تفاوت در راهبرد رشد و تخصیص منابع در این دو تیپ است [۳۲].

۴-۲. روابط درونی بین ویژگی‌های الیاف و همبستگی‌ها

تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که قوی‌ترین روابط عمدتاً درون فیبرهای پوستی و درون فیبرهای چوبی رخ می‌دهند و همبستگی‌های بین این دو سامانه کمتر و پراکنده‌تر هستند. پیش‌تر نیز نشان داده شده بود که شاخص‌های ریخت‌شناختی پوست شاهدانه همبستگی قوی با هم داشته ولی الگوی متفاوتی با ترکیب کل ساقه (شامل چوب) نشان می‌دهند [۳۳]. این یافته با منشأ تکوینی متفاوت این دو نوع فیبر سازگار است زیرا فیبرهای پوستی و چوبی در گیاهان دولپه‌ای مانند شاهدانه و کتان تحت کنترل مسیرهای رشدی متمایز قرار دارند [۳۱، ۳۴]. در ساقهٔ شاهدانه، بافت آبکش-پوستی و بافت چوبی دو ماژول توسعه‌ای نسبتاً مستقل را تشکیل می‌دهند که هر یک نقش خاصی در پشتیبانی مکانیکی و سازمان ساقه دارند [۱۱، ۳۵]. فیبرهای پوستی عمدتاً برای کشش و انعطاف ساقه و فیبر چوبی برای تحمل فشار و پشتیبانی کلی عمل می‌کنند [۳۶، ۳۷]. انتخاب طبیعی و اصلاح نژاد می‌توانند موجب هم‌تغییری و تثبیت صفات مرتبط در هر ماژول شوند و در نتیجه، همبستگی‌های درون‌گروهی میان این صفات را تقویت کنند؛ برای مثال، میان ضخامت دیواره، نسبت پوست به چوب و ویژگی‌های مکانیکی الیاف پوستی، بدون آنکه لزوماً ویژگی‌های چوبی نیز همان الگوی تغییر را نشان دهند [۳۳، ۳۵]. این نتایج برای برنامه‌های اصلاح نژاد اهمیت مستقیم دارند. زمانی که صفات یک ماژول با یکدیگر همبسته‌اند، انتخاب برای یک ویژگی می‌تواند به‌طور ناخواسته صفات دیگر را نیز تغییر دهد. به‌عنوان مثال، اگر ضخامت دیواره و پهنای حفره در یک مجموعه صفات به‌هم وابسته باشند [۳۸]، انتخاب برای دیوارهٔ ضخیم‌تر می‌تواند بر تخلخل و حتی خواص فرآوری اثر بگذارد. در تیپ‌های دارویی، چنین روابطی ممکن است به‌عنوان شاخص‌های جانبی برای پایداری رشدی یا الگوی تخصیص منابع سودمند باشند، در حالی‌که در تیپ‌های فیبری، این روابط باید در راستای بهبود استحکام، یکنواختی و قابلیت تبدیل به الیاف صنعتی استفاده شوند [۱۱]. از این رو، داده‌های همبستگی نه فقط برای تفسیر زیستی، بلکه برای طراحی برنامه‌های گزینش نیز ارزشمندند.

همچنین در این پژوهش مشاهده شد که ارتفاع ساقه همبستگی محدودی با بیشتر ویژگی‌های فیبری دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع گیاه لزوماً با تغییر متناسب در ابعاد سلولی فیبرها همراه نیست. مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند که ویژگی‌های ماکروسکوپی ساقه و صفات میکروسکوپی الیاف شاهدانه می‌توانند تحت کنترل مجموعه‌های متفاوتی از عوامل ژنتیکی و محیطی قرار داشته باشند [۳۹].

۴-۳. مقایسهٔ ویژگی‌های الیاف پوستی با الیاف چوبی

نتایج این پژوهش تفاوت‌های آشکاری میان الیاف پوستی و چوبی نشان داد. مهم‌ترین تفاوت، طول بسیار بیشتر الیاف پوستی نسبت به الیاف چوبی بود. طول متوسط الیاف پوستی حدود پنج تا شش برابر بیشتر از الیاف چوبی اندازه‌گیری شد که با گزارش‌های پیشین کاملاً مطابقت دارد [۳۴، ۴۰، ۴۱]. این تفاوت را می‌توان با نحوهٔ رشد این دو نوع سلول توضیح داد. الیاف پوستی پس از انشقاق از لایه کامبیوم، از طریق رشد نفوذی[1] شدید، توسعه می‌یابند و می‌توانند به طول چندین سانتی‌متر برسند، در حالی‌که رشد نفوذی الیاف چوبی به‌مراتب کمتر بوده و طول نهایی بسیار کمتری خواهند داشت [۳۱]. طول زیاد الیاف پوستی یکی از مهم‌ترین دلایل ارزش صنعتی بالای آنها در صنایع نساجی، کاغذسازی و مواد کامپوزیتی است [۱۱، ۴۲].

علاوه بر این، ضخامت دیوارهٔ الیاف پوستی در هر دو تیپ I و III به‌طور معنی‌داری بیشتر از الیاف چوبی بود. این یافته با ساختار ویژهٔ دیوارهٔ این الیاف سازگار است. این دیوارهٔ ضخیم و حفرهٔ باریک درکنار درصد بالاتر سلولز و زاویهٔ مایکروفیبریلی کوچک‌تر در دیوارهٔ دومین سلولی، دلیل اصلی مقاومت کششی بالای الیاف پوستی است [۳۵]. در مقابل، پهنای حفره در الیاف

[1] Intrusive growt

چوبی، به‌ویژه در تیپ III، بیشتر بود. این ویژگی می‌تواند بر چگالی الیاف، قابلیت فشرده‌شدن، رفتار الیاف در خمیرسازی و کیفیت کاغذ اثر بگذارد. در صنایع خمیر و کاغذ، نسبت دیواره به حفره از عوامل مهم تعیین‌کنندهٔ انعطاف‌پذیری، چسبندگی بین لیفی و مقاومت نهایی ورق است. به‌همین دلیل، الیاف چوبی با حفرهٔ سلولی بزرگ‌تر ممکن است برای خمیرکاغذ و ترکیب در فرمولاسیون‌های خاص مناسب‌تر باشند، در حالی‌که الیاف پوستی به‌دلیل طول بیشتر و دیوارهٔ ضخیم‌تر، برای کاربردهای نیازمند استحکام مکانیکی برتری دارند [۱۱، ۲۸]. درمجموع، داده‌های حاضر تأیید می‌کنند که بخش پوستی و چوبی ساقه را باید به‌عنوان دو منبع عملکردی متفاوت برای بهره‌برداری صنعتی در نظر گرفت.

۵. نتیجه‌گیری

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که تفاوت میان تیپ‌های I و III شاهدانه، اگرچه از نظر آماری قابل تشخیص است، اما عمدتاً به چند صفت کلیدیِ مرتبط به بافت پوست محدود می‌شود و در سطح کلی ساقه، همپوشانی قابل‌توجهی میان دو گروه وجود دارد. صفات دیواره‌ای و عرضی الیاف (و نه طول آنها) مهم‌ترین عوامل تمایز هستند. در مقابل، تفاوت‌های بین الیاف پوستی و چوبی بسیار بارزتر و بنیادی‌تر بودند. الیاف پوستی طول بیشتر و دیوارهٔ ضخیم‌تر داشتند، در حالی‌که الیاف چوبی دارای حفره‌های بزرگ‌تر بودند. این تفاوت‌ها منعکس‌کنندهٔ نقش‌های عملکردی متفاوت این دو نوع بافت در ساقهٔ شاهدانه است. همزمان، همبستگی‌های درون‌ماژولی در فیبرهای پوستی و چوبی نشان می‌دهند که این دو سامانهٔ بافتی تا حد زیادی به‌طور مستقل سازمان یافته‌اند، اما در عین حال می‌توانند در چارچوب یک الگوی رشدی مشترک عمل کنند. با وجود این، چند محدودیت باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. نخست آنکه مواد گیاهی در شرایط گلخانه‌ای بررسی شده‌اند و بنابراین اثرات محیطی مزرعه، تنش‌های اقلیمی و تفاوت‌های مدیریتی در این مطالعه بازتاب کامل ندارند. دوم، تعداد ژنوتیپ‌ها محدود بوده و ممکن است دامنهٔ کامل تنوع ژنتیکی شاهدانه را پوشش ندهد. سوم، این پژوهش عمدتاً بر داده‌های آناتومی و ریختی استوار است و اطلاعات مستقیم دربارهٔ خواص مکانیکی الیاف یا پروفایل فیتوکانابینوئیدی در دست نیست؛ بنابراین پیوند میان ساختار و عملکرد نهایی باید در مطالعات بعدی آزمون شود. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تحلیل‌های آناتومی با داده‌های مکانیکی، شیمیایی و مولکولی تلفیق شوند. برای ژنوتیپ‌های تیپ I، سنجش هم‌زمان متابولیت‌های ثانویه و صفات ساقه می‌تواند روشن کند که آیا الگوی ساختاری مشاهده‌شده با مسیرهای زیستی مرتبط با تولید فیتوکانابینوئیدها همبستگی دارد یا خیر. برای ژنوتیپ‌های تیپ III نیز ترکیب داده‌های فیبرشناسی، ترکیب شیمیایی دیوارهٔ سلولی، آزمون‌های کشش و ارزیابی‌های کاغذ یا کامپوزیت حاصل می‌تواند ارزش کاربردی ویژگی‌های زیست‌سنجی الیاف را بهتر نشان دهد. در نهایت، چنین رویکرد تلفیقی می‌تواند به انتخاب دقیق‌تر تیپ‌ها برای اهداف دارویی و صنعتی منجر شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت از این پژوهش از طرف دانشگاه تهران، دانشکدهٔ منابع طبیعی در قالب پژوهانهٔ پایان‌نامهٔ دانشجویی انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجو، تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، مشارکت در نگارش پیش‌نویس مقاله

نویسنده دوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله
نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله
نویسنده چهارم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، بررسی و کنترل نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسنده مسئول برای کدهای دستوری تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار Rstudio از ChatGPT استفاده کرد. همچنین برای مرور منابع علمی از Scopus AI و consensus استفاده شد. پس از استفاده از این ابزار، نویسنده مسئول مطالب را بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرد.

References

[1] Piluzza, G., Delogu, G., Cabras, A., Marceddu, S. & Bullitta, S. (2013). Differentiation between fiber and drug types of hemp (*Cannabis sativa* L.) from a collection of wild and domesticated accessions. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 60, 2331-2342. https://doi.org/10.1007/s10722-013-0001-5

[2] Salami, S. A., Martinelli, F., Giovino, A., Bachari, A., Arad, N. & Mantri, N. (2020). It is our turn to get *cannabis* high: Put cannabinoids in food and health baskets. *Molecules*, 25(18), Article 4036. https://doi.org/10.3390/molecules25184036

[3] Roman, M.G. & Houston, R. (2020). Investigation of chloroplast regions rps16 and clpP for determination of *Cannabis sativa* crop type and biogeographical origin. *Legal Medicine*, 47, Article 101759. https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2020.101759

[4] Welling, M.T., Liu, L., Shapter, T., Raymond, C.A. & King, G.J. (2016). Characterisation of cannabinoid composition in a diverse *Cannabis sativa* L. germplasm collection. *Euphytica*, 208, 463-475. https://doi.org/10.1007/s10681-015-1585-y

[5] Hartsel, J. A., Eades, J., Hickory, B., & Makriyannis, A. (2016). *Cannabis sativa* and hemp. In R. C. Gupta (Ed.), *Nutraceuticals: Efficacy, safety and toxicity* (pp. 735-754). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802147-7.00053-X

[6] Avoseh, F.T., Mtunzi, F.M., Avoseh, O.N. & Takaidza, S. (2025). *Cannabis sativa*; ethnobotanicals, classifications, pharmacology, and phytochemistry. *Natural Product Communications*, 20(6), 1934578X251334244. https://doi.org/10.1177/1934578X251334244

[7] Kojoma, M., Seki, H., Yoshida, S., & Muranaka, T. (2006). DNA polymorphisms in the tetrahydrocannabinolic acid (THCA) synthase gene in “drug-type” and “fiber-type” *Cannabis sativa* L. *Forensic Science International*, 159(2-3), 132-140. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2005.07.005

[8] Yu, Y., Wang, Q. & Wang, P. (2019). Bioprocessing of bast fibers. In M. A. H. M. Ali & M. J. A. M. M. (Eds.), *Advances in textile biotechnology* (pp. 1-19). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102632-8.00001-3

[9] Mokhena, T.C., Mtibe, A., Mokhothu, T.H., Mochane, M.J. & John, M.J. (2023). A review on bast-fibre-reinforced hybrid composites and their applications. *Polymers*, 15(16), 3414. https://doi.org/10.3390/polym15163414

[10] Santos, C. M., Santos, T. F., Aquino, M. S., Rangappa, S. M., Siengchin, S. & Suyambulingam, I. (2024). Era of bast fibers-based polymer composites for replacement of man-made fibers. *Heliyon*, 10(8), Article e29761. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29761

[11] Zimniewska, M. (2022). Hemp fibre properties and processing target textile: A review. *Materials*, 15(5), Article 1901. https://doi.org/10.3390/ma15051901

[12] Van der Werf, H.M.G., Van Der Veen, J.H., Bouma, A.T.M. & Ten Cate, M. (1994). Quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) stems as a raw material for paper. *Industrial Crops and Products*, 2(3), 219-227. https://doi.org/10.1016/0926-6690(94)90039-6

[13] Ahmed, A., Islam, M.Z., Mahmud, M.S., Sarker, M.E. & Islam, M.R. (2022). Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review. *Heliyon*, 8(1), Article e08753. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08753

[14] Ross, I. A. (2023). The history of *Cannabis*. In *Plant-based therapeutics, Volume 1: Cannabis sativa* (pp. 1-9). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35155-6_1

[15] Babaei, M., Nemati, H., Arouiee, H. & Torkamaneh, D. (2024). Characterization of indigenous populations of *Cannabis* in Iran: a morphological and phenological study. *BMC Plant Biology*, 24(1), Article 151. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04841-y

[16] Mostafaei Dehnavi, M., Ebadi, A., Peirovi, A., Taylor, G. & Salami, S. A. (2022). THC and CBD fingerprinting of an elite *Cannabis* collection from Iran: Quantifying diversity to underpin future Cannabis breeding. *Plants*, 11(1), Article 129. https://doi.org/10.3390/plants11010129

[17] Babaei, M. & Torkamaneh, D. (2026). Genetic architecture of phenological, morphological, and phytochemical traits in *Cannabis* landraces. *The Plant Genome*, 19(2), Article e70243. https://doi.org/10.1002/tpg2.70243

[18] Malabadi, R.B., Kolkar, K.P. & Chalannavar, R.K. (2023). *Cannabis sativa*: Ethnobotany and phytochemistry. *International Journal of Innovation Scientific Research and Review*, 5(2), 3990-3998

[19] Cascini, F., Farcomeni, A., Migliorini, D., Baldassarri, L., Boschi, I., Martello, S., Amaducci, S., Lucini, L. & Bernardi, J. (2019). Highly predictive genetic markers distinguish drug-type from fiber-type *Cannabis sativa* L. *Plants,* 8(11), 496. https://doi.org/10.3390/plants8110496

[20] Cheng, Y.C. & Houston, R. (2024). The development of a next-generation sequencing panel targeting cannabinoid synthase genes to distinguish between marijuana and hemp. *Electrophoresis*, 45(9-10), 948-957. https://doi.org/10.1002/elps.202300233

[21] Small, E. (2015). Evolution and classification of *Cannabis sativa* (marijuana, hemp) in relation to human utilization. *The Botanical Review*, 81, 189-294. https://doi.org/10.1007/s12229-015-9157-3

[22] Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G. & Cosentino, S.L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial crops and products*, 68, 2-16. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041

[23] Ashori, A. & Nourbakhsh, A. (2009). Studies on Iranian cultivated paulownia–a potential source of fibrous raw material for paper industry. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(3), 323-327. https://doi.org/10.1007/s00107-009-0326-0

[24] Ferdous, T., Ni, Y., Quaiyyum, M.A., Uddin, M.N. & Jahan, M.S. (2021). Non-wood fibers: Relationships of fiber properties with pulp properties. *ACS Omega*, 6(33), 21613-21622. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02933

[25] Franklin, G.L. (1945). Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature*, 155(3924), 51. https://doi.org/10.1038/155051a0

[26] Romero, E., Olson, M., Segovia-Rivas, A., Pittermann, J. & Jupa, R. (2026). Providing maceration protocols for xylem and phloem research. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1740174. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1740174

[27] Schneider, C.A., Rasband, W.S. & Eliceiri, K.W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

[28] Oladi, R., Aliverdikhani, R., & Abdi, E. (2025). Linking root xylem anatomy to tensile strength: Insights from four broadleaved tree species in the Hyrcanian forests. *Plant and Soil*, 512(1), 1311-1326. https://doi.org/10.1007/s11104-024-07148-x

[29] Salehi, A., Puchalski, K., Shokoohinia, Y., Zolfaghari, B. & Asgary, S. (2022). Differentiating *Cannabis* products: Drugs, food, and supplements. *Frontiers in Pharmacology*, 13, Article 906038. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.906038

[30] Salentijn, E. M. J., Zhang, Q., Amaducci, S., Yang, M. & Trindade, L.M. (2015). New developments in fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) breeding. *Industrial Crops and Products*, 68, 32-41. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.011

[31] Behr, M., Legay, S., Žižková, E., Motyka, V., Dobrev, P.I., Hausman, J.F. & Guerriero, G. (2016). Studying secondary growth and bast fiber development: The hemp hypocotyl peeks behind the wall. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 1733. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01733

[32] Blebea, N.M., Pricopie, A.I., Vlad, R.-A. & Hancu, G. (2024). Phytocannabinoids: Exploring pharmacological profiles and their impact on therapeutical use. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(8), 4204. https://doi.org/10.3390/ijms25084204

[33] Petit, J., Gulisano, A., Dechesne, A. & Trindade, L. (2019). Phenotypic variation of cell wall composition and stem morphology in hemp (*Cannabis sativa* L.): Optimization of methods. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 959. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00959

[34] Goudenhooft, C., Bourmaud, A. & Baley, C. (2019). Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibers for composite reinforcement: Exploring the link between plant growth, cell walls development, and fiber properties. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 411. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00411

[35] Amarasinghe, P., Pierre, C., Moussavi, M., Geremew, A., Woldesenbet, S. & Weerasooriya, A. (2022). The morphological and anatomical variability of the stems of an industrial hemp collection and the properties of its fibres. *Heliyon*, 8(4), Article e09276. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09276

[36] Petit, J., Salentijn, E., Paulo, M., Thouminot, C., Van Dinter, B.J., Magagnini, G., Gusovius, H., Tang, K., Amaducci, S., Wang, S., Uhrlaub, B., Müssig, J. & Trindade, L. (2020). Genetic variability of morphological, flowering, and biomass quality traits in hemp (*Cannabis sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 102. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00102

[37] Mediavilla, V., Leupin, M. & Keller, A. (2001). Influence of the growth stage of industrial hemp on the yield formation in relation to certain fibre quality traits. *Industrial Crops and Products*, 13(1), 49-56. https://doi.org/10.1016/S0926-6690(00)00052-2

[38] Oladi, R., Yavarian, H., Sadeghzadeh Hallaj, M. & Pourtahmasi, K. (2021). Comparing growth rate, wood fiber biometry, and adaptability of different tamarisk (*Tamarix aphylla* L.) populations planted in Garmsar. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 36(1), 26-39. https://doi.org/10.22092/ijwpr.2021.351954.1637

[39] Amaducci, S. & Gusovius, H.J. (2010). Hemp — Cultivation, extraction and processing. In A. Musio & M. Müssig (Eds.), *Industrial applications of natural fibres: Structure, properties and technical applications* (pp. 109-134). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470660324.ch5

[40] Saadati, A., Pourtahmasi, K., Salami, S.A. & Oladi, R. (2015). Xylem and bast fiber properties of six Iranian hemp populations. *Forest and Wood Products*, 68(1), 121-132 [In Persian]

[41] Réquilé, S., Le Duigou, A., Bourmaud, A. & Baley, C. (2018). Peeling experiments for hemp retting characterization targeting biocomposites. *Industrial Crops and Products*, 123, 573-580. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.012

[42] Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites—A review. *Journal of Composite Materials*, 46(8), 973-986. https://doi.org/10.1177/0021998311413623