Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 5, Issue 1, 2026 Chemistry of Goods

CHIGIT URUG‘LARINI LAZER BILAN ISHLOV BERISH: OPTIK FAOLLASHTIRISH BO‘YICHA ADABIY SHARH

Ibrohimjon Rahmonovich Asqarov
Andijon davlat universiteti, Kimyo kafedrasi professori, kimyo fanlari doktori, O‘zbekistonda xizmat ko‘rsatgan ixtirochi, O‘zbekiston TABOBAT Akademiyasi raisi
https://orcid.org/0000-0003-1625-0330

Shuhrat Qo'shaqboyevich Abdurahmonov
Andijon davlat universiteti, mustaqil tadqiqotchisi
https://orcid.org/0009-0005-6183-4265

Obidjon Shaxabidinovich Abdulloyev
Andijon davlat universiteti, Tabiiy birikmalar va oziq-ovqat kimyosi kafedrasi mudiri, dotsent, kimyo fanlari doktori (DSc), O'zbekiston Tabobat akademiyasi a'zosi
https://orcid.org/0000-0003-2289-1273

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

Kalit so'zlar:
chigit, lazer nurlantirish, optik oldindan faollashtirish, fotobiomodulyatsiya, energiya zichligi

Annotatsiya

Ushbu adabiy sharhda chigit urug‘larini lazer nurlari yordamida oldindan ishlov berish (optik oldindan faollashtirish) bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar izchil tahlil qilinadi. Paxtachilikda dalaga bir tekis va tez ko‘chat chiqishi (maydonning bir xil to‘lishi), erta rivojlanish va yakuniy hosildorlik ko‘p jihatdan urug‘ning fiziologik holati, saqlash sharoiti hamda ekish paytidagi stress omillariga bog‘liq. Lazer nurlantirish esa kimyoviy urug‘ dorilashiga nisbatan kam chiqindi hosil qiladigan, tez avtomatlashtiriladigan fizik usul sifatida ko‘rilmoqda. Sharhda chigitga oid asosiy optik ishlov ishlari (ko‘k spektrli diod lazer, turli yorug‘lik diodlari, ultrabinafsha diapazonidagi ishlovlar) hamda ularga yondosh mexanistik izohlar (fotoretseptorlar faollashuvi, reaktiv kislorod turlari muvozanati, membrana o‘tkazuvchanligi va zaxira moddalarning mobilizatsiyasi) jamlanadi. Spektroskopik dalillarga tayangan holda lazer dozasining “hormezis”ga xos chiziqsiz javobi: past dozalarda rag‘batlantirish, ortiqcha dozalarda esa tormozlanish tendensiyasi muqim muammo sifatida ko‘rsatib beriladi. Shuningdek, mavjud dalillarning kuchli va zaif jihatlari — eksperimental dizayn, takroriylik, urug‘ partiyalari (lot) farqi, dala sharoitida tashqi validlik, parametrlarni standartlashtirish va texnologiyani sanoat miqyosiga ko‘chirishdagi injenerlik cheklovlari — tanqidiy baholanadi. Yakunda mavzu bo‘yicha aniq tadqiqot bo‘shliqlari va kelgusi izlanishlar uchun minimal hisobot standarti, doza–javobni optimallashtirish va ko‘p hududli dala sinovlarini o‘z ichiga olgan amaliy kun tartibi taklif etiladi.

Havola uchun

Asqarov, I. R., Abdurahmonov, S. Q., & Abdulloyev, O. S. CHIGIT URUG‘LARINI LAZER BILAN ISHLOV BERISH: OPTIK FAOLLASHTIRISH BO‘YICHA ADABIY SHARH. Tovarlar Kimyosi Va Xalq Tabobati Jurnali, 5(1). https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

1. Kirish

Paxta (Gossypium hirsutum L.) ishlab chiqarish tizimida urug‘ sifati va ko‘chatlarning dastlabki rivojlanishi hosil shakllanishi uchun bazaviy omillardan biridir. Amaliyotda chigitning mexanik shikastlanishi (jinlash va delintlash jarayonlarida), saqlash paytida yog‘larning peroksidlanishi, shuningdek namlik–harorat rejimining buzilishi urug‘ vigorligini pasaytirib, dala sharoitida kechikkan va notekis unishga olib keladi. Natijada maydonning bir xil to‘lishi buziladi, qator ichida o‘simliklar raqobati

kuchayadi, begona o‘tlar bosimi ortadi va hosilning barqarorligi kamayadi. Chigitning sifat muammolari ayniqsa issiq va nam mavsumlar, sho‘rlanish hamda sovuqdan zararlanish xavfi yuqori bo‘lgan erta ekish muddatlarida keskinlashadi (Mylsamy et al., 2025).

Urug‘larni ekishdan oldin ishlov berish amaliyotda keng tarqalgan bo‘lib, kimyoviy dorilash, urug‘ni qoplash, gidrooldindan ishlov (namlab faollashtirish), osmotik oldindan ishlov va biologik oldindan ishlov kabi yondashuvlar mavjud. Biroq kimyoviy vositalar bilan ishlov berishda ekologik iz, operator xavfsizligi, rezistentlik va qoldiq moddalar (rezidyu) muammosi dolzarb bo‘lib qolmoqda. Shu kontekstda “urug‘ni fizik faollashtirish” turkumiga kiruvchi usullar, xususan elektromagnit maydonlar, ultratovush, plazma va yorug‘lik ta’siridan foydalanish istiqbolli yo‘nalish sifatida qaralmoqda (Araújo et al., 2016). Fizik usullar odatda tez, reagent talab qilmaydi va ishlab chiqarish liniyalariga integratsiyalashga mos bo‘lishi mumkin.

Lazer nurlantirish (past quvvatli lazer orqali urug‘ni ishlov berish) optik oldindan faollashtirishning eng muhokamali va amaliyotga yaqin shakllaridan biridir. Lazerning asosiy afzalligi — doza va spektrni aniq boshqarish, ya’ni to‘lqin uzunligi, quvvat zichligi (irradians), energiya zichligi (flyuens) va ekspozitsiya vaqtini takrorlanuvchan tarzda berish imkonidir. Shu bilan birga, lazer bilan ishlov berishning “universal” protokoli yo‘q: chigitning delint holati, urug‘ po‘sti qalinligi, pigmentlar, namlik va saqlash yoshi, hatto urug‘ning mikroflora yuklamasi ham optik javobni o‘zgartiradi. Shuning uchun lazer ishlovi ko‘pincha “hormezis”ga xos chiziqsiz javob beradi: past dozalarda rag‘batlantiruvchi, ortiqcha dozalarda esa tormozlovchi effekt kuzatiladi (Araújo et al., 2016).

Ushbu adabiy sharhning maqsadi chigit urug‘larini lazer bilan (va kengroq ma’noda optik usullar bilan) oldindan ishlov berish bo‘yicha mavjud ilmiy tadqiqotlarni izchil va tanqidiy tahlil qilishdan iborat. Sharhda (i) chigit bo‘yicha asosiy empirik natijalar; (ii) lazer dozasini belgilovchi texnik parametrlar va ularning hisobot standartlari; (iii) ehtimoliy mexanizmlar (fotoretseptorlar, reaktiv kislorod turlari muvozanati, membrana va metabolizm); (iv) metodologik cheklovlar va qayta ishlab chiqarish muammolari; (v) sanoatlashtirish va joriy etish talablari; hamda (vi) kelgusi tadqiqotlar uchun aniq bo‘shliqlar va amaliy kun tartibi bayon qilinadi.

Chigitga oid lazer nurlantirish bo‘yicha ishlar soni cheklangani sababli, ushbu sharh manbalarni ikki qatlamda tanladi. Birinchi qatlam — chigit urug‘lari uchun optik ishlovning laboratoriya va dala natijalarini bergan bevosita tadqiqotlar (masalan, optik faollashtirish bo‘yicha keng qamrovli tajribalar, hamda lazerning spektroskopik tahliliga asoslangan ishlar). Ikkinchi qatlam — fizik oldindan ishlov texnologiyalarini umumiy nuqtai nazardan muhokama qiladigan sharh va metodologik maqolalar hamda lazer stimulyatsiyasining umumiy mexanizmlarini yoritadigan boshqa ekinlardagi dalillar. Bunday yondashuv chigit bo‘yicha “kam ma’lumot” muammosini yumshatadi, biroq xulosalarni chiqarishda ehtiyotkorlikni talab qiladi, chunki turli ekinlarda urug‘ struktura va biokimyosi farqli.

Har bir empirik ish quyidagi bloklar bo‘yicha baholandi: (1) urug‘ materiali tavsifi — nav, delint turi, namlik foizi, saqlash yoshi va boshlang‘ich unish ko‘rsatkichlari; (2) optik qurilma parametrlari — to‘lqin uzunligi, quvvat, nur dog‘i maydoni, irradians (Vt/sm²), flyuens (J/sm²), ekspozitsiya vaqti, impuls/uzluksiz rejim, yoritish geometriyasi; (3) eksperimental dizayn — nazorat guruhlari, randomizatsiya, takrorlar soni, laboratoriya va dala bog‘lanishi; (4) natija ko‘rsatkichlari — unish foizi va tezligi, vigor indeksi, ko‘chat biometrik parametrlari, stress testlari, dala hosildorligi; (5) statistik ishlov va xulosalarning asoslanganligi. Tanqidiy tahlilda ayniqsa parametrlar ta’rifining to‘liqligi va qayta ishlab chiqarish imkoniyati (replikatsiya) markaziy mezon sifatida olindi.

2. Lazer va optik ishlov texnologiyasining ilmiy asoslari

Urug‘ va lazer nuri o‘zaro ta’sirining fizik asosida yutilish, sochilish va energiyaning (asosan kimyoviy bog‘lar yoki pigmentlar tomonidan) qabul qilinishi yotadi. Chigit urug‘ida urug‘ po‘sti qalin, yuzasi notekis va delint qoldiqlari bo‘lishi mumkin; bu esa nur qaytishi va sochilishini kuchaytirib, embrionga yetib boradigan foton oqimini kamaytiradi. Shu bois to‘lqin uzunligi tanlashda urug‘ po‘sti va ichki to‘qimalarning yutilish spektri, shuningdek fotoretseptorlarning sezgir diapazonlari hisobga olinishi

kerak. Ko‘k diapazon (taxminan 400–470 nm) kriptoxrom va fototropinlar tizimini, qizil diapazon (taxminan 630–660 nm) esa fitoxrom tizimini ko‘proq faollashtirishi kutiladi.

Past quvvatli lazer ishlovining maqsadi urug‘ni sezilarli qizdirmasdan fotobiologik signal yaratishdir. Biroq “past quvvat” nisbiy: juda kichik nur dog‘i yoki urug‘ga yaqin masofa sabab irradians yuqori bo‘lib ketishi mumkin. Shuning uchun issiqlik effekti nazorat qilinmasa, mexanizm fotobiomodulyatsiyadan ko‘ra termik stressga yaqinlashadi. Bundan tashqari, optik ishlovning natijasi ko‘pincha chiziqsiz bo‘lib, “optimal doza oynasi” mavjud: optimumdan past doza sezilarli o‘zgarish bermasligi, optimumdan yuqori doza esa oksidlovchi stress va membrana shikastlanishi orqali unishni pasaytirishi mumkin. Bu holat “hormezis” konsepsiyasi bilan izohlanadi va fizik ishlovlar adabiyotida keng muhokama qilingan (Araújo et al., 2016).

Texnologik nuqtai nazardan birinchi muammo — dozaning bir tekisligi (uniformligi). Urug‘lar oqimda harakatlanganda bir-birini soyab qiladi, ayrim urug‘lar nurga to‘g‘ridan-to‘g‘ri, ayrimlari esa diffuz sochilgan nurga duch keladi. Laboratoriya tajribalarida urug‘lar odatda yupqa qatlamda yoyiladi va bir xil masofada ushlanadi; zavod sharoitida esa doza taqsimotini ta’minlash uchun urug‘larni aylantirish, vibratsion oziqlantirgichlar, ko‘p manbali yoritish yoki optik diffuzorlar talab etiladi. Aks holda, bir partiyada “past doza” va “ortiqcha doza” olgan urug‘lar aralashib ketib, natijalar dispersiyasi oshadi va statistik aniqlik pasayadi.

Ikkinchi muammo — urug‘ning boshlang‘ich holati. Chigit namligi (masalan, 7% yoki 12%), saqlash yoshi, delint turi (mexanik, kislotali yoki gazli), urug‘ po‘stining shikastlanganlik darajasi va mikroflora yuklamasi optik ishlovga javobni keskin o‘zgartirishi mumkin (Mylsamy et al., 2025). Masalan, kislotali delint urug‘ yuzasini tozalab, nurning kirishini osonlashtirishi mumkin, ammo noto‘g‘ri bajarilsa, po‘stni zaiflashtirib, optik stressga sezgirlikni oshiradi. Shuning uchun lazer ishlovi “universal retsept” emas, balki urug‘ partiyasiga moslanadigan, aniq parametrlar va sifat nazorati bilan qo‘llanadigan texnologiya sifatida ko‘rilishi lozim.

Uchinchi muhim masala — natijani baholash ko‘rsatkichlari. Lazer ishlovi ko‘pincha unish foizidan ko‘ra unish tezligi, vigor indeksi, ko‘chat ildizining uzunligi yoki stress testlaridagi ustunlik orqali namoyon bo‘ladi. Shuning uchun faqat yakuniy unish foiziga tayanish lazer effektini “ko‘rmaslik”ka olib kelishi mumkin. Ilmiy dizaynda unish kinetikasini (masalan, 24–72 soat oralig‘ida unib chiqish tezligi), ko‘chat biometrik ko‘rsatkichlarini va dala sharoitida “maydonning to‘lishi” kabi ko‘rsatkichlarni birlashtirish muhim.

3. Chigit urug‘larida lazer va optik faollashtirish bo‘yicha empirik dalillar

Chigit bo‘yicha optik faollashtirish tadqiqotlari hozircha sanoqli bo‘lsa-da, ayrim ishlar laboratoriya ko‘rsatkichlari bilan birga dala natijalarini ham beradi. Atta et al. (2023) optik oldindan faollashtirishning bir nechta variantini (ko‘k va qizil spektrli yorug‘lik diodlari, diod lazer, ultrabinafsha-B va ultrabinafsha-C ishlovlari) taqqoslab, laboratoriyada unish va vigor ko‘rsatkichlarini, so‘ngra turli sharoitli dala sinovlarini hisobot qilgan. Mualliflar ayrim protokollar unish ko‘rsatkichlarini sezilarli oshirishi va dala hosildorligiga ijobiy ta’sir ko‘rsatishi mumkinligini ko‘rsatadi. Ushbu ishning kuchli tomoni — laboratoriya natijalarini dala sharoitida tekshirishga urinishidir, chunki optik ishlovning iqtisodiy va agronomik qiymati aynan dalada namoyon bo‘ladi.

Shu bilan birga, Atta et al. (2023) ishida parametrlar ko‘pligi sabab sabab–natija zanjirini ajratish qiyinlashadi. Bir nechta spektrlar, bir nechta vaqt diapazonlari va turli muhitlar bir dizayn ichida berilganida, qaysi omil asosiy rol o‘ynaganini aniq aytish qiyin. Bundan tashqari, optik ishlov protokollarida flyuens va irradiansni to‘liq standartlash va berish masalasi har doim ham bir xil aniqlikda ko‘rinmaydi. Bu esa boshqa laboratoriyalar uchun protokolni qayta ishlab chiqarish (replikatsiya) imkonini cheklaydi. Qayta ishlab chiqarish muammosi ayniqsa lazer ishlovida muhim, chunki kichik geometrik farqlar (masofa, nur dog‘i, urug‘ qatlam qalinligi) doza taqsimotini tubdan o‘zgartiradi.

Chigitda lazerning molekulyar ta’siriga yaqinroq yondashgan ish sifatida Ahmed va Marouf (2025) ko‘k diod lazer (405 nm) bilan ishlov berib, ultrabinafsha-ko‘rinadigan spektroskopiya va Furye o‘zgartirishli infraqizil spektroskopiya yordamida urug‘ tarkibidagi yutilish va vibratsion chiziqlardagi

o‘zgarishlarni tahlil qiladi. Mualliflar past flyuens diapazonida (taxminan 0.167–0.667 J/sm²) “optimal doza” mavjudligini va doza oshganda unish tormozlanishi mumkinligini ko‘rsatadi. Ushbu ishning ilmiy qiymati shundaki, u biologik natijani (unish) bevosita fizik-kimyoviy signallar (spektral o‘zgarishlar) bilan bog‘lashga urinadi. Biroq metodologik nuqtai nazardan, spektroskopik signallarni biologik mexanizmga “ko‘prik” qilish uchun qo‘shimcha biomarkerlar (masalan, oksidlovchi stress markerlari, ferment faolligi, suv shimilishi) zarur; aks holda, spektrdagi farqning biologik sababini qat’iy isbotlash qiyin.

Chigitga bevosita lazer emas, balki ultrabinafsha nurlari bilan optik faollashtirish bo‘yicha Jawdat et al. (2020) uzoq muddat saqlangan chigitda ultrabinafsha-A, -B va -C kombinatsiyasi bilan ishlov berganda unish foizi oshishi, sho‘rlanish (natriy xlorid) va osmotik stress (polietilenglikol) sharoitida ko‘chat o‘sishi yaxshilanishini bildiradi. Ular stressga javob beruvchi ayrim genlarning ekspressiyasi vaqtinchalik faollashishini ham ko‘rsatadi. Ushbu natija optik ishlovning faqat “energiya berish” emas, balki signal transduksiyasi orqali stressga moslanish mexanizmlarini qo‘zg‘atishi mumkinligiga ishora qiladi. Biroq ultrabinafsha ishlov lazerga nisbatan fotokimyoviy shikastlanish xavfi yuqoriroq bo‘lgani uchun, uni lazer nurlantirish bilan bir xil toifada umumlashtirish ehtiyotkorlik bilan bajarilishi kerak.

Chigit bo‘yicha ishlar soni kamligi sababli, lazer nurlantirishning umumiy biologik naqshini tushunishda boshqa ekinlardagi dalillar muhim kontekst beradi. Masalan, Perveen et al. (2021) safflor urug‘larida geliy–neon lazer (632.8 nm) dozasini bosqichma-bosqich oshirib, unish va metabolitlar o‘zgarishida optimum doza mavjudligini ko‘rsatadi; mualliflar buni zaxira moddalarning parchalanishiga xizmat qiluvchi fermentlar faolligi bilan bog‘laydi. Klimek-Kopyra et al. (2022) soya urug‘larida ekishdan oldingi lazer stimulyatsiyasi hosil va urug‘ tarkibidagi oqsil hamda yog‘ fraksiyasiga ta’sir qilishi mumkinligini dala sharoitida ko‘rsatadi. Bu ishlar chigitga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirilmasa-da, lazerning “optimal doza oynasi” va agronomik natijaga chiqish ehtimoli borligini tasdiqlovchi umumiy dalil sifatida foydali.

4. Mexanizmlar: fotobiologik va biokimyoviy izohlar

Lazer nurlantirishning urug‘ unishiga ta’sirini tushuntirishda ikki asosiy, bir-birini to‘ldiruvchi konsepsiya mavjud: (i) fotoretseptorlar orqali signal uzatish; (ii) past darajadagi stress orqali moslanish (hormezis). Birinchi konsepsiyada ko‘k spektr kriptoxrom va fototropinlar, qizil spektr esa fitoxromlar tizimini faollashtirishi mumkin. Fotoretseptorlar orqali signal uzatilganda gormonlar balansi (gibberellin va abssiz kislota nisbatlari), hujayra devori yumshashi, endosperm/embrion o‘zaro aloqasi va gen ekspressiyasi kabi jarayonlar modulyatsiyalanadi. Urug‘ fiziologiyasida bu “oldindan signal berish” sifatida ko‘rilib, unish boshlanishi uchun kerakli metabolik yo‘llarni tezroq ishga tushirishi mumkin.

Ikkinchi konsepsiya — hormezis — lazerning past dozalari reaktiv kislorod turlarini mo‘‘tadil oshirib, antioksidant tizimni “tayyor holat”ga keltirishi mumkinligini ta’kidlaydi. Reaktiv kislorod turlari odatda zararlovchi omil sifatida qaralsa-da, past konsentratsiyalarda ular signal molekulalari vazifasini bajaradi. Optik ishlovdan keyin antioksidant fermentlar faollashsa, urug‘ ko‘chat bosqichida sovuq, sho‘rlanish yoki suv tanqisligi kabi stresslarga bardoshlilikni yaxshiroq namoyon qilishi mumkin. Jawdat et al. (2020) chigitda stressga javob genlarining vaqtinchalik faollashishini ko‘rsatgani ushbu konsepsiyaga mos keladi, biroq lazer bo‘yicha chigitda to‘liq antioksidant profili va oksidlovchi stress markerlari hali yetarli darajada o‘lchanmagan.

Spektroskopik dalillar mexanizmni tushuntirishda yordamchi bo‘lishi mumkin. Ahmed va Marouf (2025) lazer ishlovidan keyin UV-Vis va FTIR spektrlarda ayrim chiziqlarning siljishi va intensivligi o‘zgarishini ko‘rsatadi; mualliflar buni molekulyar qo‘zg‘alishlar va kimyoviy bog‘lar atrofida energiya qayta taqsimlanishi bilan izohlaydi. Biroq spektroskopik o‘zgarishning biologik “xulosaga” aylanishi uchun, masalan, membrana lipidlari oksidlanishi, oqsil konformatsiyasi, suv bilan bog‘lanish holati yoki ferment faolligi kabi ko‘rsatkichlar bilan bog‘lanish zanjiri qurilishi kerak. Aks holda, spektral signallar qiziqarli bo‘lsa-da, “qanday qilib” savoliga javob to‘liq bo‘lmay qoladi.

Adabiyotlar tahlili chigitda lazer nurlantirish bo‘yicha bir qator aniq bo‘shliqlarni ko‘rsatadi. Quyida ushbu bo‘shliqlar va ularni yopishga qaratilgan amaliy takliflar keltiriladi.

1) Parametrlar uchun minimal hisobot standarti yo‘q. Har bir tadqiqot kamida: to‘lqin uzunligi; quvvat; nur dog‘i maydoni; urug‘–manba masofasi; irradians; flyuens; ekspozitsiya vaqti; impuls/uzluksiz rejim; yoritish geometriyasi; urug‘ qatlam qalinligi; urug‘ning delint turi, namligi va saqlash yoshi; hamda boshlang‘ich unish ko‘rsatkichlarini standart formatda berishi zarur. Bu talab bajarilmasa, replikatsiya va meta-tahlil amalda mumkin bo‘lmaydi.

2) Doza–javob xaritalari yetarli emas. Ko‘pchilik ishlar 2–4 doza bilan cheklanadi; bu hormezis optimumini aniqlash uchun yetarli emas. Kelgusida javob sirt metodologiyasi asosida (masalan, irradians × vaqt × to‘lqin uzunligi) dizayn qurib, optimumni statistik modellashtirish va ishonch oralig‘i bilan berish kerak.

3) Urug‘ partiyasi va navlar bo‘yicha generalizatsiya cheklangan. Bir nav va bir partiyada topilgan optimum boshqasiga ko‘chmasligi mumkin. Shuning uchun kamida 3–5 xil partiya (turli saqlash yoshi va vigor darajasi) hamda kamida 2–3 navda tasdiqlovchi tajribalar talab etiladi. Shuningdek, delint usuli va qoplama mavjudligi omil sifatida dizaynga kiritilishi lozim.

4) Dala sinovlari ko‘p hududli va ko‘p yillik emas. Optik ishlovning amaliy qadri dala sharoitida, turli iqlim va agrofonlarda baholanadi. Atta et al. (2023) yo‘nalish bergan bo‘lsa-da, ko‘p yillik, ko‘p hududli sinovlar va standart agrotexnika protokollari bilan tasdiqlash hali kam.

5) Mexanistik biomarkerlar va sababiy zanjir yetishmaydi. Antioksidant fermentlar, lipid peroksidlanishi, suv shimilishi, gaz almashinuvi, gormonlar nisbatlari, zaxira moddalarning parchalanish kinetikasi kabi ko‘rsatkichlar lazer dozalari bilan birga tizimli o‘lchanishi zarur. Bu holda lazerning “signal” ta’siri va “stress” ta’sirini ajratish, optimumni biologik asoslash mumkin bo‘ladi.

6) Uzoq muddatli ta’sir va saqlash barqarorligi deyarli o‘rganilmagan. Lazer ishlovi ekishdan necha hafta yoki oy oldin berilganda ham samarali bo‘ladimi? Sovuq plazma bo‘yicha chigitda bunday uzoq muddatli effekt ko‘rsatilgan (de Groot et al., 2018); lazer uchun esa bu savol ochiq va sanoat joriy etish uchun juda muhim.

Kelgusi kun tartibi sifatida bosqichli yondashuv taklif etiladi: avval laboratoriyada to‘lqin uzunligi × flyuens × urug‘ namligi bo‘yicha optimum diapazon aniqlanadi; so‘ng asosiy biomarkerlar (oksidlovchi stress, antioksidantlar, suv shimilishi, fermentlar) o‘lchanadi; keyin ko‘p hududli dala sinovlari bilan barqarorlik tasdiqlanadi; va yakunda pilot oqim liniyasi uchun kalibrlash hamda iqtisodiy baholash bajariladi.

5. Xulosa

Chigit urug‘larini lazer nurlantirish orqali optik faollashtirish bo‘yicha hozirgi ilmiy dalillar texnologiyaning ijobiy potensialini ko‘rsatadi, biroq ilmiy bazaning parchalanishi va metodologik tafovutlar sabab umumiy “retsept” chiqarish erta. Dala natijalari mavjud bo‘lgan ishlar (masalan, Atta et al., 2023) texnologiyaning agronomik ahamiyatini ko‘rsatishga yaqinlashadi, spektral va molekulyar yondashuvlar (Ahmed & Marouf, 2025) esa doza–javob va mexanizmni tushunishga hissa qo‘shadi. Shunga qaramay, parametrlarni hisobot qilishdagi nomuvofiqlik, urug‘ partiyasi heterogenligi va replikatsiya yetishmasligi dalillarni umumlashtirishni cheklaydi.

Amaliy nuqtai nazardan lazer ishlovi ekologik jihatdan nisbatan toza va tez avtomatlashtiriladigan usul bo‘lishi mumkin, ammo sanoatlashtirishda uniform doza taqsimoti, xavfsizlik, integratsiya va iqtisodiy model masalalari hal qilinishi zarur. Ilmiy nuqtai nazardan esa asosiy vazifa — chigitning fotobiologik sezgirligi va hormezis optimumini aniqlash, ta’sirning sababiy mexanizmlarini biomarkerlar orqali ko‘rsatish hamda natijalarni ko‘p joyli, ko‘p yillik dala sinovlarida barqaror tasdiqlashdir. Shu shartlar bajarilgandagina lazer nurlantirish chigit urug‘larini ishlov berishning amaliy portfelida mustaqil va ishonchli texnologiya sifatida o‘rin egallashi mumkin.

Adabiyotlar

1. Ahmed, A., & Marouf, A. (2025). Photophysical mechanisms of low-level laser irradiation on cotton seeds: Spectroscopic insights into molecular excitations. Advanced Physical Research, 7(3), 189–202. https://doi.org/10.62476/apr.73189

2. Araújo, S. de S., Paparella, S., Dondi, D., Bentivoglio, A., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2016). Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. Frontiers in Plant Science, 7, 646. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646

3. Atta, B. M., Saleem, M., Abro, S., Rizwan, M., Sarwar, G., & Farooq, A. (2023). Enhancement of germination and yield of cotton through optical seed priming: Lab. and diverse environment studies. PLOS ONE, 18(7), e0288255. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288255

4. de Groot, G. J. J. B., Hundt, A., Murphy, A. B., Bange, M. P., & Mai-Prochnow, A. (2018). Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. Scientific Reports, 8(1), 14372. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32692-9

5. Jawdat, D., Abu Kassem, I., Saleh, A., Aljapawe, A., Ikhtiar, A., & Al-Safadi, B. (2020). Priming of long-term stored cotton seeds using combined UV-A, B and C radiation and its influence on germination. Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 16(4), 82–94.

6. Klimek-Kopyra, A., Neugschwandtner, R. V., Ślizowska, A., Kot, D., Dobrowolski, J. W., Pilch, Z., & Dacewicz, E. (2022). Pre-sowing laser light stimulation increases yield and protein and crude fat contents in soybean. Agriculture, 12(10), 1510. https://doi.org/10.3390/agriculture12101510

7. Mylsamy, P., Tamilmani, E., Venugopal, R., Murugaiyan, S., & Ranganathan, U. (2025). Cotton seed management: Traditional and emerging treatment approaches for enhanced productivity. Journal of Cotton Research, 8, 7. https://doi.org/10.1186/s42397-024-00209-7

8. Perveen, R., Ali, Q., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., Jamil, Y., & Raza, A. (2021). Quantitative determination of the effects of He–Ne laser irradiation on seed thermodynamics, germination attributes and metabolites of safflower (Carthamus tinctorius L.) in relation with the activities of potential germinating enzymes. Agronomy, 11(7), 1411. https://doi.org/10.3390/agronomy11071411

Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 5, Issue 1, 2026 Chemistry of Goods

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН ХЛОПЧАТНИКА: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

Ибрагим Рахманович Аскаров
Андижанский государственный университет, Профессор кафедры химии, доктор химических наук, заслуженный изобретатель Республики Узбекистан, председатель Академии ТАБОБАТ Республики Узбекистан
https://orcid.org/0000-0003-1625-0330

Шухрат Кушакбоевич Абдурахмонов
Андижанский государственный университет, независимый исследователь
https://orcid.org/0009-0005-6183-4265

Обиджон Шахабидинович Абдуллоев
Андижанский государственный университет, Заведующий кафедрой "Химия природных соединений и пищевых продуктов", доцент, доктор химических наук (DSc), член Академии Табобат Узбекистана
https://orcid.org/0000-0003-2289-1273

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

Ключевые слова:
семена хлопчатника, лазерное облучение, оптическая предпосевная активация, фотобиомодуляция, плотность энергии

Аннотация

В данном литературном обзоре последовательно анализируются научные исследования, посвящённые предпосевной обработке семян хлопчатника лазерным излучением (оптической предактивации). В хлопководстве равномерные и быстрые всходы (однородное заполнение поля), раннее развитие и конечная урожайность во многом зависят от физиологического состояния семян, условий их хранения, а также стрессовых факторов в период посева. Лазерное облучение рассматривается как физический метод, образующий меньше отходов по сравнению с химической обработкой семян и легко поддающийся автоматизации.В обзоре обобщены основные работы по оптической обработке семян хлопчатника (диодные лазеры синего спектра, различные светодиоды, обработки в ультрафиолетовом диапазоне), а также соответствующие механистические объяснения (активация фоторецепторов, баланс реактивных форм кислорода, проницаемость мембран и мобилизация запасных веществ). На основе спектроскопических данных показан нелинейный характер «hormezis» как тип ответа на дозу лазерного воздействия: стимулирующий эффект при низких дозах и ингибирующее действие при избыточных дозах рассматриваются как ключевая проблема.Кроме того, критически оцениваются сильные и слабые стороны имеющихся данных — экспериментальный дизайн, воспроизводимость, различия партий семян (лотов), внешняя валидность в полевых условиях, стандартизация параметров и инженерные ограничения при масштабировании технологии до промышленного уровня. В заключение предлагаются конкретные направления дальнейших исследований, включая минимальные стандарты отчётности, оптимизацию зависимости «доза–эффект» и проведение многофакторных полевых испытаний в различных агроэкологических зонах.

Как цитировать

Аскаров, И. Р., Абдурахмонов, Ш. К., & Абдуллоев, О. Ш. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН ХЛОПЧАТНИКА: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ. Журнал химии товаров и народной медицины, 5(1). https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

1. Введение

Хлопчатник (*Gossypium hirsutum* L.) в системе сельскохозяйственного производства характеризуется тем, что качество семян и начальное развитие всходов являются одними из ключевых факторов формирования урожая. На практике механические повреждения семян (в процессе джинирования и делинтирования), перекисное окисление липидов при хранении, а также нарушения режима влажности и температуры приводят к снижению энергии прорастания семян и вызывают запаздывающее и неравномерное прорастание в полевых условиях.В результате нарушается равномерность заполнения поля, усиливается внутривидовая конкуренция растений в рядках, возрастает давление сорных растений и снижается стабильность урожайности. Проблемы качества семян особенно обостряются в условиях жарких и влажных сезонов, засоления почв, а также при ранних сроках посева, сопряжённых с высоким риском повреждения холодом (Mylsamy et al., 2025).

Предпосевная обработка семян широко применяется на практике и включает такие подходы, как химическая обработка, инкрустация семян, гидропредпосевная обработка (увлажнение с активацией), осмотическая предпосевная обработка и биологическая предпосевная обработка. Однако при использовании химических средств остаются актуальными проблемы экологического следа, безопасности операторов, формирования резистентности и наличия остаточных веществ (резидуев). В этом контексте методы, относящиеся к «физической активации семян», в частности применение электромагнитных полей, ультразвука, плазмы и светового воздействия, рассматриваются как перспективное направление (Araújo et al., 2016). Физические методы, как правило, быстры, не требуют реагентов и могут быть интегрированы в производственные линии.

Лазерное облучение (обработка семян с использованием низкоинтенсивного лазера) является одной из наиболее обсуждаемых и приближённых к практике форм оптической предпосевной активации. Основное преимущество лазера заключается в возможности точного контроля дозы и спектра, то есть длины волны, плотности мощности (иррадиации), плотности энергии (флюенса) и времени экспозиции с высокой воспроизводимостью. Вместе с тем универсального протокола лазерной обработки не существует: степень делинтации семян, толщина семенной кожуры, наличие пигментов, влажность и возраст хранения, а также микрофлора семян могут существенно влиять на оптический ответ. Поэтому лазерная обработка часто демонстрирует нелинейный гормезисный тип ответа на дозу воздействия: при низких дозах наблюдается стимулирующий эффект, тогда как при избыточных дозах — ингибирующее действие (Araújo et al., 2016).

Целью данного литературного обзора является последовательный и критический анализ существующих научных исследований по предпосевной обработке семян хлопчатника лазером (а в более широком смысле — оптическими методами). В обзоре рассматриваются: (i) основные эмпирические результаты по семенам хлопчатника; (ii) технические параметры, определяющие дозу лазерного воздействия, и стандарты их представления; (iii) возможные механизмы (фоторецепторы, баланс реактивных форм кислорода, мембранные процессы и метаболизм); (iv) методологические ограничения и проблемы воспроизводимости; (v) требования к индустриализации и внедрению; а также (vi) конкретные исследовательские пробелы и практическая повестка для будущих работ.

Ввиду ограниченного количества исследований по лазерному облучению семян хлопчатника, в данном обзоре источники отбирались на двух уровнях. Первый уровень включает прямые исследования, посвящённые оптической обработке семян хлопчатника с получением лабораторных и полевых результатов (например, работы по оптической активации с широким экспериментальным охватом, а также исследования, основанные на спектроскопическом анализе лазерного воздействия). Второй уровень охватывает обзорные и методологические статьи, рассматривающие технологии физической предпосевной обработки в целом, а также данные по другим культурам, освещающие общие механизмы лазерной стимуляции. Такой подход позволяет частично компенсировать проблему ограниченности данных по хлопчатнику, однако требует

осторожности при формулировании выводов, поскольку структура семян и их биохимические особенности могут существенно различаться у разных культур.

Каждая эмпирическая работа оценивалась по следующим блокам:

(1) характеристика семенного материала — сорт, тип делинтирования, влажность (%), срок хранения и исходные показатели всхожести;

(2) параметры оптического устройства — длина волны, мощность, площадь светового пятна, иррадианс (Вт/см²), флюенс (Дж/см²), время экспозиции, импульсный/непрерывный режим, геометрия облучения;

(3) экспериментальный дизайн — контрольные группы, рандомизация, число повторностей, связь лабораторных и полевых исследований;

(4) показатели результатов — процент и скорость прорастания, индекс энергии биометрические параметры проростков, стресс-тесты, полевая урожайность;

(5) статистическая обработка и обоснованность выводов.

2. Научные основы технологии лазерной и оптической обработки

Физической основой взаимодействия семян и лазерного излучения являются процессы поглощения, рассеяния и передачи энергии (преимущественно химическим связям или пигментам). У семян хлопчатника оболочка толстая, поверхность неровная, возможны остатки делинта, что усиливает отражение и рассеяние света и уменьшает поток фотонов, достигающих зародыша. Поэтому при выборе длины волны необходимо учитывать спектры поглощения семенной оболочки и внутренних тканей, а также диапазоны чувствительности фоторецепторов. Ожидается, что синий диапазон (примерно 400–470 нм) преимущественно активирует системы криптохромов и фототропинов, тогда как красный диапазон (примерно 630–660 нм) — систему фитохромов.

Цель обработки низкомощным лазером — создание фотобиологического сигнала без значительного нагревания семени. Однако понятие «низкая мощность» является относительным: при очень малом размере светового пятна или близком расстоянии до семени иррадианс может существенно возрасти. Поэтому при отсутствии контроля теплового эффекта механизм воздействия может смещаться от фотобиомодуляции к термическому стрессу. Кроме того, эффект оптической обработки часто носит нелинейный характер и характеризуется наличием «окна оптимальной дозы»: доза ниже оптимальной может не вызывать заметных изменений, тогда как превышение оптимума способно снижать всхожесть за счёт окислительного стресса и повреждения мембран. Это явление объясняется концепцией гормезиса и широко обсуждается в литературе по физическим методам обработки (Araújo et al., 2016).

С технологической точки зрения первой проблемой является равномерность дозы (однородность облучения). При движении семян в потоке они частично затеняют друг друга: одни подвергаются прямому воздействию излучения, другие — лишь диффузно рассеянному свету. В лабораторных условиях семена, как правило, размещаются тонким слоем и удерживаются на одинаковом расстоянии от источника излучения; в промышленных же условиях для обеспечения равномерного распределения дозы требуются вращение семян, вибрационные питатели, многоточечные источники света или оптические диффузоры. В противном случае в одной партии смешиваются семена, получившие «недостаточную» и «избыточную» дозу, что увеличивает дисперсию результатов и снижает статистическую достоверность.

Вторая проблема — исходное состояние семян. Влажность хлопковых семян (например, 7% или 12%), срок хранения, тип делинтирования (механическое, кислотное или газовое), степень повреждённости оболочки и уровень микрофлоры могут существенно влиять на отклик на оптическую обработку (Mylsamy et al., 2025). Например, кислотное делинтирование может очищать поверхность семени и облегчать проникновение излучения, однако при неправильном проведении оно способно ослабить оболочку и повысить чувствительность к оптическому стрессу. Следовательно, лазерная обработка не является «универсальным рецептом», а должна

рассматриваться как технология, адаптируемая к конкретной партии семян, с чётко заданными параметрами и строгим контролем качества.

Третьим ключевым вопросом являются критерии оценки эффективности. Воздействие лазерной обработки зачастую проявляется не в увеличении общего процента всхожести, а в ускорении прорастания, повышении жизнеспособности (vigor), увеличении длины корневой системы проростков и лучшей устойчивости в стрессовых условиях. В связи с этим использование только итогового показателя всхожести может привести к недооценке эффекта обработки.При построении научного эксперимента целесообразно применять комплексный подход, включающий анализ динамики прорастания (например, в промежутке 24–72 часов), оценку биометрических параметров проростков, а также полевые показатели, такие как равномерность и полнота всходов.

3. Эмпирические данные по лазерной и оптической активации семян хлопчатника

Исследования по оптической активации семян хлопчатника пока немногочисленны, однако ряд работ включает не только лабораторные показатели, но и полевые результаты. Так, Atta et al. (2023) сравнили несколько вариантов предпосевной оптической обработки (светодиоды синего и красного спектра, диодный лазер, а также обработки ультрафиолетом-B и ультрафиолетом-C), оценив лабораторные показатели всхожести и энергии прорастания, а затем представили результаты полевых испытаний в различных условиях. Авторы показали, что отдельные протоколы способны существенно повышать показатели прорастания и оказывать положительное влияние на урожайность. Сильной стороной данной работы является попытка верификации лабораторных данных в полевых условиях, поскольку именно в поле проявляется практическая агрономическая и экономическая значимость оптической обработки.

В то же время в работе Atta et al. (2023) из-за большого числа модифицируемых параметров затрудняется выделение чёткой причинно-следственной связи. Когда в рамках одного экспериментального дизайна используются различные спектры, диапазоны экспозиции и условия среды, становится сложно определить, какой именно фактор играет решающую роль. Кроме того, в описании протоколов оптической обработки не всегда с одинаковой точностью представлены и стандартизированы такие параметры, как флюенс и иррадианс. Это ограничивает возможности воспроизводимости (репликации) результатов в других лабораториях. Проблема воспроизводимости особенно актуальна для лазерной обработки, поскольку даже небольшие геометрические различия (расстояние до источника, размер светового пятна, толщина слоя семян) могут существенно изменить распределение дозы.

В качестве работы, более близко рассматривающей молекулярное действие лазера на семена хлопчатника, можно отметить исследование Ahmed и Marouf (2025), в котором применялся синий диодный лазер (405 нм). С использованием ультрафиолетово-видимой спектроскопии и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье авторы анализировали изменения в спектрах поглощения и вибрационных линиях компонентов семян. Показано, что в диапазоне низких значений флюенса (примерно 0,167–0,667 Дж/см²) существует «окно оптимальной дозы», тогда как при увеличении дозы может наблюдаться торможение прорастания. Научная значимость данной работы заключается в попытке напрямую связать биологический результат (всхожесть) с физико-химическими сигналами (спектральными изменениями). Однако с методологической точки зрения для установления «моста» между спектроскопическими сигналами и биологическими механизмами необходимы дополнительные биомаркеры (например, маркеры окислительного стресса, активность ферментов, водопоглощение); в противном случае трудно однозначно доказать биологическую природу наблюдаемых спектральных различий.

В исследованиях оптической активации семян хлопчатника с использованием не лазерного излучения, а ультрафиолетового света, Jawdat et al. (2020) показали, что обработка комбинацией ультрафиолета A, B и C повышает всхожесть длительно хранившихся семян, а также улучшает рост проростков в условиях солевого (хлорид натрия) и осмотического (полиэтиленгликоль) стресса. Авторы также продемонстрировали временную активацию экспрессии некоторых генов, связанных

со стресс-ответом. Эти результаты указывают на то, что оптическая обработка может действовать не только как источник энергии, но и как фактор, инициирующий механизмы адаптации к стрессу через сигнальные пути. Вместе с тем, учитывая более высокий риск фотохимического повреждения при ультрафиолетовом воздействии по сравнению с лазерным облучением, объединение этих подходов в одну категорию требует осторожности.

Из-за ограниченного числа исследований по хлопчатнику важный контекст для понимания общих биологических закономерностей лазерного облучения дают данные по другим сельскохозяйственным культурам. Так, Perveen et al. (2021), поэтапно увеличивая дозу гелий–неонового лазера (632,8 нм) при обработке семян сафлора, показали наличие оптимальной дозы, при которой наблюдаются наилучшие показатели прорастания и изменения метаболитов; авторы связывают этот эффект с активацией ферментов, участвующих в мобилизации запасных веществ.

Klimek-Kopyra et al. (2022) в полевых условиях продемонстрировали, что предпосевная лазерная стимуляция семян сои может влиять как на урожайность, так и на состав семян, включая белковую и жировую фракции. Хотя эти результаты не могут быть напрямую экстраполированы на хлопчатник, они служат важным подтверждением существования «окна оптимальной дозы» лазерного воздействия и его потенциального выхода на агрономически значимые эффекты.

4. Механизмы: фотобиологические и биохимические объяснения

Для объяснения влияния лазерного облучения на прорастание семян рассматриваются две основные, взаимодополняющие концепции:

(1) передача сигналов через фоторецепторы;

(2) адаптация через низкоинтенсивный стресс (hormezis). В рамках первой концепции предполагается, что излучение синего спектра активирует системы криптохромов и фототропинов, тогда как красный спектр воздействует на фитохромную систему. Активация фоторецепторов приводит к запуску сигнальных каскадов, в результате чего модулируются такие процессы, как гормональный баланс (соотношение гиббереллинов и абсцизовой кислоты), размягчение клеточной стенки, взаимодействие эндосперма и зародыша, а также экспрессия генов. В физиологии семян это можно рассматривать как «предварительную сигнализацию», способствующую более быстрому запуску метаболических путей, необходимых для начала прорастания.

Вторая концепция — *hormezis* — предполагает, что низкие дозы лазерного воздействия могут умеренно повышать уровень активных форм кислорода, переводя антиоксидантную систему в «подготовленное» состояние. Хотя активные формы кислорода традиционно рассматриваются как повреждающий фактор, при низких концентрациях они выполняют функцию сигнальных молекул. При активации антиоксидантных ферментов после оптической обработки проростки могут проявлять повышенную устойчивость к стрессам, таким как холод, засоление или дефицит влаги. Результаты Jawdat et al. (2020), показавшие временную активацию генов стресс-ответа у хлопчатника, согласуются с данной концепцией, однако для лазерной обработки семян хлопчатника полный профиль антиоксидантной системы и маркеры окислительного стресса пока изучены недостаточно. Спектроскопические данные могут служить вспомогательным инструментом для интерпретации механизмов. Ahmed и Marouf (2025) показали, что после лазерной обработки в спектрах UV-Vis и FTIR наблюдаются сдвиги отдельных полос и изменения их интенсивности; авторы объясняют это молекулярными возбуждениями и перераспределением энергии в области химических связей. Однако для того чтобы спектроскопические изменения можно было интерпретировать в биологическом контексте, необходимо выстроить причинно-следственную связь с такими показателями, как окисление мембранных липидов, конформационные изменения белков, состояние гидратации или активность ферментов. В противном случае, несмотря на информативность спектральных сигналов, ответ на вопрос «каким образом» остаётся неполным.

Анализ литературы выявляет ряд существенных пробелов в исследованиях лазерного облучения семян хлопчатника. Ниже представлены эти пробелы и практические предложения, направленные на их устранение.

1) Отсутствует минимальный стандарт отчётности параметров. В каждом исследовании необходимо в унифицированном формате указывать как минимум: длину волны; мощность; площадь светового пятна; расстояние «источник–семя»; иррадианс; флюенс; время экспозиции; импульсный или непрерывный режим; геометрию облучения; толщину слоя семян; тип делинтирования, влажность и срок хранения семян; а также исходные показатели всхожести. При невыполнении этих требований воспроизводимость (репликация) и проведение метаанализа фактически становятся невозможными.

2) Недостаточность данных по зависимости «доза–эффект». Большинство исследований ограничивается 2–4 уровнями дозы, что недостаточно для выявления оптимума в рамках гормезиса. В дальнейшем следует использовать дизайн на основе методологии поверхности отклика (например, иррадианс × время × длина волны), с последующим статистическим моделированием оптимальных условий и представлением результатов с доверительными интервалами.

3) Ограниченная обобщаемость по партиям и сортам семян. Оптимальные параметры, полученные для одного сорта и одной партии, могут не воспроизводиться в других условиях. Поэтому необходимы подтверждающие эксперименты как минимум на 3–5 различных партиях (с разным сроком хранения и уровнем жизнеспособности), а также на 2–3 сортах. Кроме того, в экспериментальный дизайн следует включать такие факторы, как способ делинтирования и наличие защитного покрытия семян.

4) Полевые испытания недостаточно представлены в многоцентровом и многолетнем формате. Практическая ценность оптической обработки оценивается именно в полевых условиях, при различных климатических и агрофоновых характеристиках. Хотя работа Atta et al. (2023) задала определённое направление, подтверждение результатов в виде многолетних и многоцентровых испытаний с использованием стандартизированных агротехнических протоколов остаётся ограниченным.

5) Недостаток механистических биомаркеров и причинно-следственных связей. Необходимо систематически измерять такие показатели, как активность антиоксидантных ферментов, уровень перекисного окисления липидов, водопоглощение, газообмен, соотношение гормонов, кинетика мобилизации запасных веществ — в привязке к различным дозам лазерного воздействия. Это позволит разделить сигнальный и стрессовый эффекты лазера, а также биологически обосновать оптимальные режимы обработки.

6) Долговременные эффекты и стабильность при хранении практически не изучены. Остаётся открытым вопрос: сохраняется ли эффект лазерной обработки, если она проводится за несколько недель или месяцев до посева? Для холодной плазмы подобный длительный эффект у семян хлопчатника уже показан (de Groot et al., 2018), однако для лазерного воздействия этот аспект остаётся недостаточно исследованным и имеет ключевое значение для промышленного внедрения.

В качестве перспективной повестки предлагается поэтапный подход: на первом этапе в лабораторных условиях определяется оптимальный диапазон параметров (длина волны × флюенс × влажность семян); затем оцениваются ключевые биомаркеры (окислительный стресс, антиоксидантная система, водопоглощение, ферментативная активность); далее проводится валидация в многоцентровых полевых испытаниях; и, наконец, осуществляется калибровка пилотной технологической линии с последующей экономической оценкой.

5. Заключение (альтернативный вариант)

Совокупность имеющихся данных по лазерной оптической активации семян хлопчатника указывает на перспективность данного подхода, однако текущий уровень доказательной базы остаётся недостаточно консолидированным для выработки универсальных технологических рекомендаций. Исследования, включающие полевые испытания (например, Atta et al., 2023), демонстрируют потенциальную агрономическую значимость метода, тогда как спектрально-молекулярные работы (Ahmed & Marouf, 2025) углубляют понимание механизмов действия и

закономерностей «доза–эффект». В то же время различия в методологии, отсутствие стандартизации параметров и ограниченная воспроизводимость существенно затрудняют сопоставление и интеграцию результатов.

С прикладной точки зрения лазерная обработка представляет интерес как экологически безопасная и технологически гибкая альтернатива, пригодная для автоматизации. Однако её промышленное внедрение требует решения ряда ключевых задач, включая обеспечение однородности дозирования, разработку безопасных и интегрируемых технологических решений, а также экономическое обоснование эффективности.

С научной стороны приоритетными направлениями остаются уточнение фотобиологической чувствительности семян, выявление оптимальных доз в рамках концепции гормезиса, а также установление чётких причинно-следственных связей на основе биомаркеров. Критически важным этапом является подтверждение полученных эффектов в многофакторных, многоцентровых и многолетних полевых исследованиях. Лишь при комплексном решении указанных задач лазерная технология сможет занять устойчивое и обоснованное место в системе предпосевной обработки семян хлопчатника.

Список литературы

1. Ahmed, A., & Marouf, A. (2025). Photophysical mechanisms of low-level laser irradiation on cotton seeds: Spectroscopic insights into molecular excitations. Advanced Physical Research, 7(3), 189–202. https://doi.org/10.62476/apr.73189

2. Araújo, S. de S., Paparella, S., Dondi, D., Bentivoglio, A., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2016). Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. Frontiers in Plant Science, 7, 646. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646

3. Atta, B. M., Saleem, M., Abro, S., Rizwan, M., Sarwar, G., & Farooq, A. (2023). Enhancement of germination and yield of cotton through optical seed priming: Lab. and diverse environment studies. PLOS ONE, 18(7), e0288255. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288255

4. de Groot, G. J. J. B., Hundt, A., Murphy, A. B., Bange, M. P., & Mai-Prochnow, A. (2018). Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. Scientific Reports, 8(1), 14372. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32692-9

5. Jawdat, D., Abu Kassem, I., Saleh, A., Aljapawe, A., Ikhtiar, A., & Al-Safadi, B. (2020). Priming of long-term stored cotton seeds using combined UV-A, B and C radiation and its influence on germination. Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 16(4), 82–94.

6. Klimek-Kopyra, A., Neugschwandtner, R. V., Ślizowska, A., Kot, D., Dobrowolski, J. W., Pilch, Z., & Dacewicz, E. (2022). Pre-sowing laser light stimulation increases yield and protein and crude fat contents in soybean. Agriculture, 12(10), 1510. https://doi.org/10.3390/agriculture12101510

7. Mylsamy, P., Tamilmani, E., Venugopal, R., Murugaiyan, S., & Ranganathan, U. (2025). Cotton seed management: Traditional and emerging treatment approaches for enhanced productivity. Journal of Cotton Research, 8, 7. https://doi.org/10.1186/s42397-024-00209-7

8. Perveen, R., Ali, Q., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., Jamil, Y., & Raza, A. (2021). Quantitative determination of the effects of He–Ne laser irradiation on seed thermodynamics, germination attributes and metabolites of safflower (Carthamus tinctorius L.) in relation with the activities of potential germinating enzymes. Agronomy, 11(7), 1411. https://doi.org/10.3390/agronomy11071411

Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 5, Issue 1, 2026 Chemistry of Goods

LASER TREATMENT OF COTTON SEEDS: A LITERATURE REVIEW ON OPTICAL ACTIVATION

Ibragim R. Askarov
Andijan State University, Professor of the Department of Chemistry, Doctor of Chemical Sciences, Honored Inventor of the Republic of Uzbekistan, Chairman of the TABOBAT Academy of Uzbekistan
https://orcid.org/0000-0003-1625-0330

Shuhrat K. Abdurahmonov
Andijan State University, Independent researcher
https://orcid.org/0009-0005-6183-4265

Obidjon Sh. Abdulloev
Andijan State University, Head of the Department of Chemistry of Natural Compounds and Food Products, Associate Professor, Doctor of Chemical Sciences (DSc), Member of the Tabobat Academy of Uzbekistan
https://orcid.org/0000-0003-2289-1273

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

Keywords:
cotton seeds, laser irradiation, optical pre-activation, photobiomodulation, energy density

Abstract

This literature review consistently analyzes scientific studies on pretreatment of cotton seeds with laser light (optical preactivation). In cotton, uniform and rapid emergence of seedlings (uniform field coverage), early development and final yield largely depend on the physiological state of the seed, storage conditions and stress factors at the time of sowing. Laser irradiation is considered a physical method that produces less waste than chemical seed treatment, and is rapidly automated. The review summarizes the main optical treatments for seeds (blue-spectrum diode laser, various light-emitting diodes, ultraviolet treatments) and their associated mechanistic explanations (activation of photoreceptors, balance of reactive oxygen species, membrane permeability and mobilization of reserve substances). Based on spectroscopic evidence, the nonlinear response of laser dose to “hormesis” is highlighted as a persistent problem: a tendency to stimulate at low doses and inhibit at higher doses. The strengths and weaknesses of the available evidence—experimental design, repeatability, seed lot (lot) variation, external validity in field conditions, parameter standardization, and engineering limitations in transferring the technology to industrial scale—are also critically assessed. Finally, specific research gaps on the topic are identified and a practical agenda for future research is proposed, including a minimum reporting standard, dose–response optimization, and multisite field trials.

How to Cite

Askarov, I. R., Abdurahmonov, S. K., & Abdulloev, O. S. LASER TREATMENT OF COTTON SEEDS: A LITERATURE REVIEW ON OPTICAL ACTIVATION. Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine, 5(1). https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

1. Introduction

In cotton (Gossypium hirsutum L.) production systems, seed quality and early seedling development are fundamental factors for crop formation. In practice, mechanical damage to seeds (during ginning and delinting processes), oil peroxidation during storage, as well as disturbances in the moisture-temperature regime reduce seed vigor, leading to delayed and uneven germination in the field. As a result, uniform field coverage is disrupted, competition between plants within rows increases, weed pressure increases, and crop

stability decreases. Seed quality problems are especially acute during hot and humid seasons, early sowing periods, when the risk of salinity and frost damage is high (Mylsamy et al., 2025).

Pre-sowing seed treatment is widespread in practice, and there are approaches such as chemical treatment, seed coating, hydropretreatment (wet activation), osmotic pretreatment, and biological pretreatment. However, the environmental footprint, operator safety, resistance and residues of chemical treatments remain a pressing issue. In this context, methods that fall under the category of "physical seed activation", such as the use of electromagnetic fields, ultrasound, plasma and light, are considered promising (Araújo et al., 2016). Physical methods are generally rapid, do not require reagents and may be suitable for integration into production lines.

Laser irradiation (low-power laser seed treatment) is one of the most discussed and practical forms of optical pre-treatment. The main advantage of laser is the ability to precisely control the dose and spectrum, i.e. wavelength, power density (irradiance), energy density (fluence) and exposure time in a reproducible manner. However, there is no "universal" protocol for laser treatment: the state of the seed delinquent, the thickness of the seed coat, pigments, humidity and storage age, and even the microflora load of the seed all modify the optical response. Therefore, laser treatment often exhibits a nonlinear response, characteristic of "hormesis": at low doses, a stimulating effect is observed, and at higher doses, an inhibitory effect (Araújo et al., 2016).

The aim of this literature review is to provide a consistent and critical analysis of the available scientific research on laser (and, more broadly, optical) pre-treatment of seed. The review outlines (i) key empirical findings on the seed; (ii) technical parameters determining laser dose and their reporting standards; (iii) possible mechanisms (photoreceptors, reactive oxygen species balance, membrane, and metabolism); (iv) methodological limitations and reproducibility issues; (v) requirements for industrialization and implementation; and (vi) specific gaps and practical agendas for future research.

Due to the limited number of studies on laser irradiation of seeds, this review selected sources in two layers. The first layer is direct studies that provide laboratory and field results of optical pretreatment for seeds of cereals (for example, extensive experiments on optical activation, and works based on spectroscopic analysis of lasers). The second layer is review and methodological articles that discuss physical pretreatment technologies in general terms, and evidence from other crops that shed light on the general mechanisms of laser stimulation. This approach mitigates the problem of "poor knowledge" on seeds, but requires caution in drawing conclusions, since the structure and biochemistry of seeds in different crops differ.

Each empirical study was assessed according to the following blocks: (1) description of the seed material—variety, type of delint, percentage of moisture, storage age, and initial germination rates; (2) optical device parameters — wavelength, power, spot area, irradiance (W/cm²), fluence (J/cm²), exposure time, pulse/continuous mode, illumination geometry; (3) experimental design — control groups, randomization, number of replicates, laboratory and field linkage; (4) outcome measures — germination percentage and rate, vigor index, seedling biometric parameters, stress tests, field yield; (5) statistical processing and validity of conclusions. In the critical analysis, the completeness of the parameter definition and the possibility of reproducibility (replication) were taken as central criteria.

2. Scientific basis of laser and optical processing technology

The physical basis of the interaction between seeds and laser light is the absorption, scattering and reception of energy (mainly by chemical bonds or pigments). In the case of seeds, the seed coat may be thick, the surface may be uneven and there may be remnants of delinquent matter; this increases the reflection and scattering of light, reducing the photon flux reaching the embryo. Therefore, when choosing a wavelength, the absorption spectrum of the seed coat and internal tissues, as well as the sensitive ranges of photoreceptors, should be taken into account. The blue range (approximately 400–470 nm) is expected to activate the cryptochrome and phototropin systems more, and the red range (approximately 630–660 nm) is expected to activate the phytochrome system more.

The goal of low-power laser processing is to generate a photobiological signal without significantly heating the seed. However, “low power” is relative: the irradiance can be high due to a very small light spot or close distance to the seed. Therefore, if the thermal effect is not controlled, the mechanism is closer to thermal stress than to photobiomodulation. Furthermore, the outcome of optical treatments is often nonlinear and there is an “optimal dose window”: doses below the optimum do not produce significant changes, while doses above the optimum do may reduce germination through oxidative stress and membrane damage. This is explained by the concept of “hormesis” and has been widely discussed in the literature on physical treatments (Araújo et al., 2016).

From a technological perspective, the first problem is dose uniformity. Seeds shade each other as they move through the flow, with some seeds exposed to direct light and others to diffusely scattered light. In laboratory experiments, seeds are usually spread in a thin layer and held at a uniform distance; in a factory setting, seed turning, vibrating feeders, multi-source lighting, or optical diffusers are required to ensure dose distribution. Otherwise, “under- and over-dosed” seeds in the same batch will be mixed, increasing the dispersion of results and reducing statistical precision. The second problem is the initial state of the seed. Seed moisture (e.g., 7% or 12%), storage age, type of delinting (mechanical, acidic, or gaseous), degree of seed coat damage, and microflora load can dramatically change the response to optical treatment (Mylsamy et al., 2025). For example, acid delint can clean the seed surface and facilitate the penetration of light, but if done incorrectly, it can weaken the skin and increase sensitivity to optical stress. Therefore, laser treatment should not be seen as a “universal recipe”, but as a technology that can be adapted to the seed lot, with precise parameters and quality control.

From a technological perspective, the first problem is dose uniformity. Seeds shade each other as they move through the flow, with some seeds exposed to direct light and others to diffusely scattered light. In laboratory experiments, seeds are usually spread in a thin layer and held at a uniform distance; in a factory setting, seed turning, vibrating feeders, multi-source lighting, or optical diffusers are required to ensure dose distribution. Otherwise, “under- and over-dosed” seeds in the same batch will be mixed, increasing the dispersion of results and reducing statistical precision. The second problem is the initial state of the seed. Seed moisture (e.g., 7% or 12%), storage age, type of delinting (mechanical, acidic, or gaseous), degree of seed coat damage, and microflora load can dramatically change the response to optical treatment (Mylsamy et al., 2025). For example, acid delint can clean the seed surface and facilitate the penetration of light, but if done incorrectly, it can weaken the skin and increase sensitivity to optical stress. Therefore, laser treatment should not be seen as a “universal recipe”, but as a technology that can be adapted to the seed lot, with precise parameters and quality control.

The third important issue concerns outcome assessment metrics. The effects of laser treatment are often more evident in germination rate, vigor index, seedling root length, or performance under stress conditions, rather than in final germination percentage alone. Consequently, reliance solely on final germination rates may lead to underestimation of laser effects. A robust scientific design should integrate germination kinetics (e.g., emergence rates within 24–72 hours), seedling biometric parameters, and field-level indicators such as stand establishment (field uniformity).

3. Empirical evidence on laser and optical activation in seed germination

Although optical activation studies in seeds are still limited, some studies provide field results in addition to laboratory data. Atta et al. (2023) compared several optical pre-activation options (blue and redlight diodes, diode laser, UV-B and UV-C treatments) and reported germination and vigor performance in the laboratory, followed by field trials under different conditions. The authors show that some protocols can significantly increase germination performance and have a positive impact on field yield. The strength of this work is its attempt to validate laboratory results in the field, since the economic and agronomic value of optical treatment is evident in the field.

However, the large number of parameters in Atta et al. (2023) makes it difficult to disentangle the cause-effect chain. When multiple spectra, multiple time ranges, and different environments are given within a single design, it is difficult to say with certainty which factor played the dominant role.

Furthermore, the issue of completely standardizing and reporting fluence and irradiance in optical processing protocols is not always addressed with the same precision. This limits the ability of other laboratories to reproduce the protocol. The problem of reproducibility is particularly important in laser processing, since small geometric differences (distance, beam spot, seed layer thickness) can radically change the dose distribution.

A study that approaches the **molecular effects of laser treatment on cotton seeds** is that of Ahmed and Marouf (2025), who applied a blue diode laser (405 nm) and analyzed changes in absorption and vibrational bands of seed components using ultraviolet–visible (UV–Vis) spectroscopy and Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. The authors identified the presence of an "optimal dose" within a low fluence range (approximately 0.167–0.667 J/cm²), beyond which germination may be inhibited. The scientific value of this work lies in its attempt to directly link biological outcomes (germination) with physicochemical signals (spectral changes). However, from a methodological perspective, bridging spectroscopic signals to biological mechanisms requires additional biomarkers (e.g., oxidative stress markers, enzyme activity, water uptake); otherwise, it is difficult to definitively establish the biological basis of the observed spectral differences.

In studies focusing on optical pre-activation using ultraviolet radiation rather than laser irradiation, Jawdat et al. (2020) reported that treatment of long-stored cotton seeds with a combination of ultraviolet-A, -B, and -C radiation increased germination rates and improved seedling growth under salinity (sodium chloride) and osmotic stress (polyethylene glycol) conditions. They also demonstrated transient activation of certain stress-responsive genes. These findings suggest that optical treatment may not only provide energy input but also trigger adaptive mechanisms to stress via signal transduction pathways. However, since ultraviolet treatment carries a higher risk of photochemical damage compared to laser irradiation, it should be cautiously interpreted and not directly generalized as equivalent to laser-based treatments.

Due to the limited number of studies specifically on cotton seeds, evidence from other crops provides important context for understanding the general biological patterns of laser irradiation. For example, Perveen et al. (2021), in experiments on safflower seeds, gradually increased the dose of a helium–neon laser (632.8 nm) and demonstrated the existence of an optimal dose associated with changes in germination and metabolite profiles; the authors linked this effect to enzyme activity involved in the mobilization of reserve substances. Similarly, Klimek-Kopyra et al. (2022) showed under field conditions that pre-sowing laser stimulation of soybean seeds can influence yield as well as the protein and oil fractions of the seeds. Although these findings cannot be directly extrapolated to cotton, they provide useful general evidence supporting the existence of an "optimal dose window" and the potential for translating laser treatment into agronomic benefits.

4. Mechanisms: Photobiological and Biochemical Explanations

Two main, complementary concepts are proposed to explain the effects of laser irradiation on seed germination: (i) signal transduction via photoreceptors and (ii) adaptation through low-level stress (hormesis). In the first concept, blue-spectrum light may activate cryptochromes and phototropins, while red-spectrum light activates the phytochrome system. Through photoreceptor-mediated signaling, processes such as hormonal balance (e.g., the ratio of gibberellins to abscisic acid), cell wall loosening, endosperm–embryo interaction, and gene expression are modulated. In seed physiology, this can be interpreted as a form of "pre-signaling," which may accelerate the activation of metabolic pathways required for the initiation of germination.

The second concept—hormesis—suggests that low doses of laser irradiation may moderately increase reactive oxygen species (ROS), thereby priming the antioxidant system. Although ROS are typically considered damaging agents, at low concentrations they function as signaling molecules. If antioxidant enzymes are activated following optical treatment, seeds may exhibit improved tolerance to stresses such as cold, salinity, or water deficit during the seedling stage. The findings of Jawdat et al. (2020), demonstrating transient activation of stress-responsive genes in cotton seeds, are consistent with this

concept. However, for laser-treated cotton seeds, comprehensive profiling of antioxidant systems and oxidative stress markers remains insufficiently explored.

Spectroscopic evidence can serve as a supportive tool in explaining the underlying mechanisms. Ahmed and Marouf (2025) demonstrated shifts and intensity changes in specific bands of UV–Vis and FTIR spectra following laser treatment; the authors attributed these changes to molecular excitations and redistribution of energy around chemical bonds. However, for spectroscopic changes to be translated into biological conclusions, it is necessary to establish a causal chain linking them with indicators such as membrane lipid oxidation, protein conformation, water-binding states, or enzyme activity. Otherwise, although spectral signals may be informative, they do not fully answer the question of "how" the biological effect occurs.

The literature review reveals several clear gaps in studies on laser irradiation of cotton seeds. The following gaps and corresponding practical recommendations are identified:

1. Lack of a minimum reporting standard for parameters. Each study should, at a minimum, report wavelength, power, beam spot area, seed-to-source distance, irradiance, fluence, exposure time, pulsed/continuous mode, illumination geometry, seed layer thickness, seed delinting type, moisture content, storage duration, and initial germination показатели in a standardized format. Without this, replication and meta-analysis are not feasible.

2. Insufficient dose–response mapping. Most studies are limited to 2–4 dose levels, which is inadequate to identify the hormetic optimum. Future studies should employ response surface methodology (e.g., irradiance × time × wavelength), enabling statistical modeling of optimal conditions with confidence intervals.

3. Limited generalizability across seed lots and cultivars. An optimum identified for one cultivar or seed lot may not be transferable to others. Therefore, validation experiments should include at least 3–5 different seed lots (varying in storage duration and vigor) and 2–3 cultivars. Factors such as delinting method and seed coating should also be incorporated into experimental design.

4. Lack of multi-location and multi-year field trials. The practical value of optical treatment must be assessed under diverse environmental and agronomic conditions. Although Atta et al. (2023) provide initial direction, comprehensive multi-year, multi-location trials using standardized agronomic protocols remain limited.

5. Insufficient mechanistic biomarkers and causal linkage. Parameters such as antioxidant enzyme activity, lipid peroxidation, water uptake, gas exchange, hormonal balance, and kinetics of reserve mobilization should be systematically measured alongside laser dose. This would allow differentiation between signaling and stress effects and provide a biological basis for optimal dosing.

6. Limited evidence on long-term effects and storage stability. It remains unclear whether laser treatment remains effective when applied weeks or months before sowing. For example, long-term effects have been demonstrated for cold plasma treatment in cotton seeds (de Groot et al., 2018), but this question remains open for laser irradiation and is critically important for industrial application.

5. Conclusion

Current scientific evidence on optical activation of seed by laser irradiation shows the positive potential of the technology, but it is premature to issue a general "prescription" due to the fragmentation of the scientific base and methodological differences. Field studies (e.g. Atta et al., 2023) are coming close to demonstrating the agronomic value of the technology, while spectral and molecular approaches (Ahmed & Marouf, 2025) contribute to understanding the dose-response and mechanism. However, inconsistencies in reporting parameters, seed lot heterogeneity and lack of replication limit the generalizability of the evidence.

From a practical perspective, laser treatment can be a relatively environmentally friendly and rapidly automated method, but issues of uniform dose distribution, safety, integration and economic model need to be addressed for industrialization. From a scientific point of view, the main task is to determine the photobiological sensitivity and hormesis optimum of seeds, to demonstrate the causal mechanisms of the

effect through biomarkers, and to consistently confirm the results in multi-site, multi-year field trials. Only when these conditions are met can laser irradiation take its place as an independent and reliable technology in the practical portfolio of seed treatment.

References:

1. Ahmed, A., & Marouf, A. (2025). Photophysical mechanisms of low-level laser irradiation on cotton seeds: Spectroscopic insights into molecular excitations. Advanced Physical Research, 7(3), 189–202. https://doi.org/10.62476/apr.73189

2. Araújo, S. de S., Paparella, S., Dondi, D., Bentivoglio, A., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2016). Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. Frontiers in Plant Science, 7, 646. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646

3. Atta, B. M., Saleem, M., Abro, S., Rizwan, M., Sarwar, G., & Farooq, A. (2023). Enhancement of germination and yield of cotton through optical seed priming: Lab. and diverse environment studies. PLOS ONE, 18(7), e0288255. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288255

4. de Groot, G. J. J. B., Hundt, A., Murphy, A. B., Bange, M. P., & Mai-Prochnow, A. (2018). Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. Scientific Reports, 8(1), 14372. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32692-9

5. Jawdat, D., Abu Kassem, I., Saleh, A., Aljapawe, A., Ikhtiar, A., & Al-Safadi, B. (2020). Priming of long-term stored cotton seeds using combined UV-A, B and C radiation and its influence on germination. Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 16(4), 82–94.

6. Klimek-Kopyra, A., Neugschwandtner, R. V., Ślizowska, A., Kot, D., Dobrowolski, J. W., Pilch, Z., & Dacewicz, E. (2022). Pre-sowing laser light stimulation increases yield and protein and crude fat contents in soybean. Agriculture, 12(10), 1510. https://doi.org/10.3390/agriculture12101510

7. Mylsamy, P., Tamilmani, E., Venugopal, R., Murugaiyan, S., & Ranganathan, U. (2025). Cotton seed management: Traditional and emerging treatment approaches for enhanced productivity. Journal of Cotton Research, 8, 7. https://doi.org/10.1186/s42397-024-00209-7

8. Perveen, R., Ali, Q., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., Jamil, Y., & Raza, A. (2021). Quantitative determination of the effects of He–Ne laser irradiation on seed thermodynamics, germination attributes and metabolites of safflower (Carthamus tinctorius L.) in relation with the activities of potential germinating enzymes. Agronomy, 11(7), 1411. https://doi.org/10.3390/agronomy11071411