

PAXTA LINTI ASOSIDA BIOPARCHALANUVCHI CHOKLANGAN POLIMER GIDROGELLARNI SINTEZ QILISH, XOSSALARINI O'RGANISH VA QISHLOQ XO'JALIGIDA QO'LLASH

Eshbo'riyev Tursunali Nasrullayevich

Toshkent kimyo texnologiya instituti Kimyo kafedrasida katta o'qituvchisi
E-mail: tursunalihim@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2437-3755>

Shirinov Shavkat Davlatovich

Toshkent kimyo texnologiya ilmiy tadqiqot instituti katta ilmiy xodimi, PhD
E-mail: shirinov.shavkat1984@gmail.com

Djalilov Abdulahat turobovich

Toshkent kimyo texnologiya ilmiy tadqiqot institute direktori, O'zR FA Akademik
E-mail: gup_tniixt@mail.ru

Azimov Abdug'ani Mutalovich

M.Auezov nomidagi Janubiy Qozog'iston universiteti
"Innovatsion suv tozalash tizimlari" ilmiy-tadqiqot laboratoriyasi rahbari, PhD
E-mail: azimov-78@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1316-5854>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18358484>

Annotatsiya: Suv tanqisligi va sug'orish rejimining beqarorligi, ayniqsa qurg'oqchil va yarim qurg'oqchil hududlarda, qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishining barqaror rivojlanishini cheklovchi asosiy omillardan biri hisoblanadi. Ushbu tadqiqotda paxta linti asosida bioparchalanuvchi gidrogellar qisman neytrallangan akril kislotasi asosida erkin radikal mexanizm orqali choklangan polimer gidrogel sifatida sintez qilindi. Initsiator sifatida ammoniy persulfat, ko'ndalang bog'lovchi modda sifatida esa N,N'-metilenbisakrilamid qo'llanilib, uch o'lchamli polimer tarmoq hosil qilindi.

Sintez qilingan gidrogellarning fizik-kimyoviy xossalari kompleks tarzda o'rganildi. Tadqiqot natijalari gidrogellarning distillangan suvda 450–800 g/g, sho'r muhitda esa 120–250 g/g gacha suv yutish qobiliyatiga ega ekanligini ko'rsatdi. Gel fraksiyasi va ko'ndalang bog'lanish darajasi barqaror polimer tarmoq hosil bo'lganligini tasdiqladi. Tuproq sharoitida olib borilgan bioparchalanish sinovlari natijasida gidrogellarning 180 kun davomida 70–85 % gacha parchalanishi aniqlandi.

Qishloq xo'jaligi sharoitida o'tkazilgan vegetatsion tajribalar gidrogellarni tuproqqa 1,0–2,0 g/kg miqdorda qo'llash tuproq namligini saqlash darajasini sezilarli oshirishini va sug'orish kamaytirilgan sharoitda o'simlik biomassa hosil bo'lishini 25–30 % ga yaxshilashini ko'rsatdi. Olingan natijalar paxta linti asosidagi bioparchalanuvchi gidrogellar suvdan samarali foydalanish va hosildorlikni oshirish uchun ekologik xavfsiz, iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq va istiqbolli material ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: Bioparchalanuvchi gidrogellar; Paxta linti; Choklangan polimer tarmoq; Akril kislotasi; Superabsorbent polimerlar; Tuproq namligini saqlash; Suv tanqisligi; Qishloq xo'jaligida qo'llanish

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND AGRICULTURAL APPLICATION OF BIODEGRADABLE CROSSLINKED POLYMER HYDROGELS BASED ON COTTON LINTER

Abstract: Water scarcity and irregular irrigation remain major constraints for sustainable agricultural production, especially in arid and semi-arid regions. In this study, biodegradable hydrogels based on cotton linter were synthesized via free-radical crosslinking of partially neutralized acrylic acid. Ammonium persulfate was used as an initiator and N,N'-methylenebisacrylamide as a crosslinking agent to obtain a three-dimensional polymer network.

The physicochemical properties of the synthesized hydrogels were systematically investigated. The results showed that the hydrogels exhibited high water absorption capacity, reaching 450–800 g/g in distilled water and 120–250 g/g in saline solution. Gel fraction and crosslinking density confirmed the formation of a stable polymer network, while soil burial tests demonstrated gradual biodegradation with up to 70–85% mass loss after 180 days.

Agricultural pot experiments revealed that the application of hydrogels (1.0–2.0 g/kg soil) significantly improved soil moisture retention and enhanced plant growth parameters, leading to a biomass increase of up to 25–30% compared to the control. The findings indicate that cotton linter-based biodegradable hydrogels are environmentally friendly, cost-effective, and promising materials for improving water use efficiency and crop productivity under water-limited conditions.

Keywords: Biodegradable hydrogels; Cotton linter; Crosslinked polymer network; Acrylic acid; Superabsorbent polymers; Soil moisture retention; Water scarcity; Agricultural application

KIRISH

So‘nggi o‘n yilliklarda global iqlim o‘zgarishi va suv resurslarining cheklanishi qishloq xo‘jaligi barqarorligiga jiddiy ta‘sir ko‘rsatmoqda. Tadqiqotlarga ko‘ra, qurg‘oqchil hududlarda suv tanqisligi hosildorlikning 20–50 % gacha pasayishiga olib kelmoqda [1]. Shu sababli suvni tuproqda ushlab qoluvchi va o‘simliklar tomonidan samarali o‘zlashtirilishini ta‘minlovchi materiallarni ishlab chiqish dolzarb ilmiy-amaliy masalaga aylandi.

Bu borada superabsorbent polimerlar (SAP), ayniqsa bioparchalanuvchi gidrogellar, suvni yuqori miqdorda yutish va uni asta-sekinlik bilan o‘simlik ildiz zonasiga berish xususiyati bilan alohida ahamiyat kasb etmoqda [2,3]. An‘anaviy poliakrilat asosidagi gidrogellar yuqori samaradorlikka ega bo‘lsa-da, ularning tuproqda uzoq muddat saqlanib qolishi ekologik xavf tug‘dirishi adabiyotlarda qayd etilgan [4]. Shu sababli so‘nggi tadqiqotlar tabiiy polimerlar asosidagi bioparchalanuvchi gidrogellarga yo‘naltirilmoqda.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR TAHLILI

Gidrogellar — bu ko‘ndalang bog‘langan uch o‘lchamli polimer tarmoqlari bo‘lib, suvli muhitda shishish qobiliyatiga ega materiallardir. Peppas va hammualliflar gidrogellarni suv yutish darajasi, mexanik mustahkamligi va biologik moslashuvchanligi asosida tasniflagan [5]. Bioparchalanuvchi gidrogellar esa tuproq mikroorganizmlari, fermentlar va namlik ta‘sirida past molekulyar birikmalarga parchalanishi bilan ajralib turadi [6].

Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, tabiiy polimerlar asosida sintez qilingan gidrogellar tuproqning suvni ushlab qolish qobiliyatini sezilarli darajada oshiradi va o‘simliklar uchun qulay mikroiklim yaratadi [7].

Sellyuloza va uning hosilalari (Na-KMS, HEC, CMC) bioparchalanuvchi gidrogellar olishda eng ko‘p o‘rganilgan xomashyolar sirasiga kiradi [8]. Sellyulozaning yuqori gidroksil guruhlariga egaligi uni graft-polimerlanish jarayonlari uchun qulay substratga aylantiradi.

Paxta linti sellulozaning yuqori tozalangan shakli bo‘lib, arzonligi va qayta tiklanuvchanligi bilan ajralib turadi. Zhou va boshqalar paxta tolasi asosida olingan gidrogellar yuqori suv yutish va yaxshi mexanik barqarorlikka ega ekanligini ko‘rsatgan [9]. Shuningdek, paxta lintiga akril monomerlarni graflash orqali olingan gidrogellar qishloq xo‘jaligida istiqbolli material sifatida baholanmoqda [10].

Akril kislota va uning tuzlari gidrofilligi yuqori bo‘lgani sababli superabsorbent gidrogellar sintezida keng qo‘llaniladi. Erkin radikal polimerlanish mexanizmi yordamida akril kislota tabiiy polimer zanjiriga graflanib, yuqori suv yutuvchi uch o‘lchamli tarmoq hosil qiladi [11].

Adabiyotlarga ko‘ra, ko‘ndalang bog‘lovchi miqdori oshishi bilan gidrogelning mexanik mustahkamligi ortadi, biroq suv yutish darajasi optimal qiymatdan keyin pasayadi [12]. Bu holat qishloq xo‘jaligi uchun gidrogellarni loyihalashda muhim ahamiyatga ega.

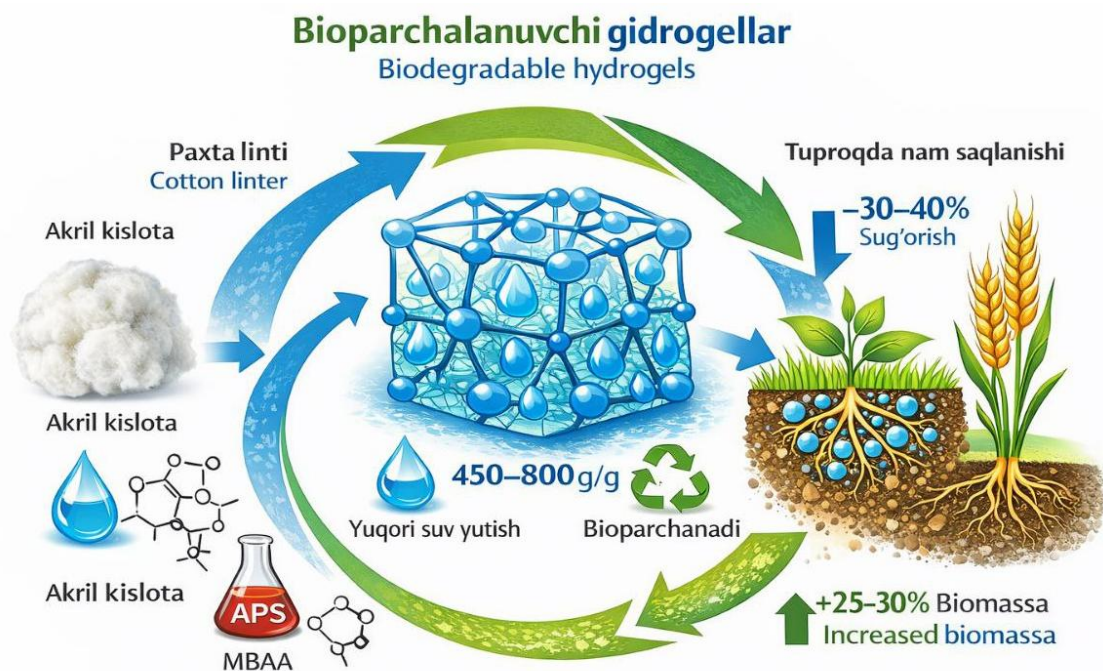
Ko'plab dala va laboratoriya tajribalari bioparchalanuvchi gidrogellarni tuproqqa qo'llash sug'orish suv sarfini 30–50 % gacha kamaytirishini ko'rsatgan [13]. Islam va boshqalar gidrogellar yordamida makkajo'xori va bug'doy hosildorligi 20–30 % ga oshganini aniqlagan [14].

Paxta ekinida esa gidrogellar ildiz zonasida namlikni uzoq saqlab, qurg'oqchilik stressini kamaytirishi qayd etilgan [15]. Shu bilan birga, bioparchalanuvchi gidrogellar tuproq ekologiyasiga salbiy ta'sir ko'rsatmasligi bilan ustunlikka ega [16].

Tahlil qilingan adabiyotlar shuni ko'rsatadiki, bioparchalanuvchi gidrogellar suv tanqisligi sharoitida qishloq xo'jaligi samaradorligini oshirish uchun istiqbolli material hisoblanadi. Biroq paxta linti kabi **mahalliy va arzon xomashyo asosida** gidrogellar yaratish va ularni real agroiklim sharoitida baholash masalalari yetarlicha o'rganilmagan. Ushbu ish aynan shu ilmiy bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan.

TADQIQOT METADOLOGIYASI

Mazkur tadqiqotda bioparchalanuvchi gidrogellarni sintez qilish uchun tabiiy va sintetik komponentlardan foydalanildi. Asosiy tabiiy xomashyo sifatida yuqori tozalangan paxta linti (α -sellyuloza miqdori 95 % dan kam bo'lmagan) tanlandi. Sintetik komponent sifatida akril kislota monomeri ishlatildi. Akril kislotani qisman neytrallashtirish uchun natriy gidroksid, erkin radikal jarayonni boshlash uchun ammoniy persulfat initsiatori hamda uch o'lchamli polimer tarmoq hosil qilish uchun N,N'-metilenbisakrilamid ko'ndalang bog'lovchi modda sifatida qo'llanildi. Barcha sintez va tahlil jarayonlarida distillangan suv ishlatildi.

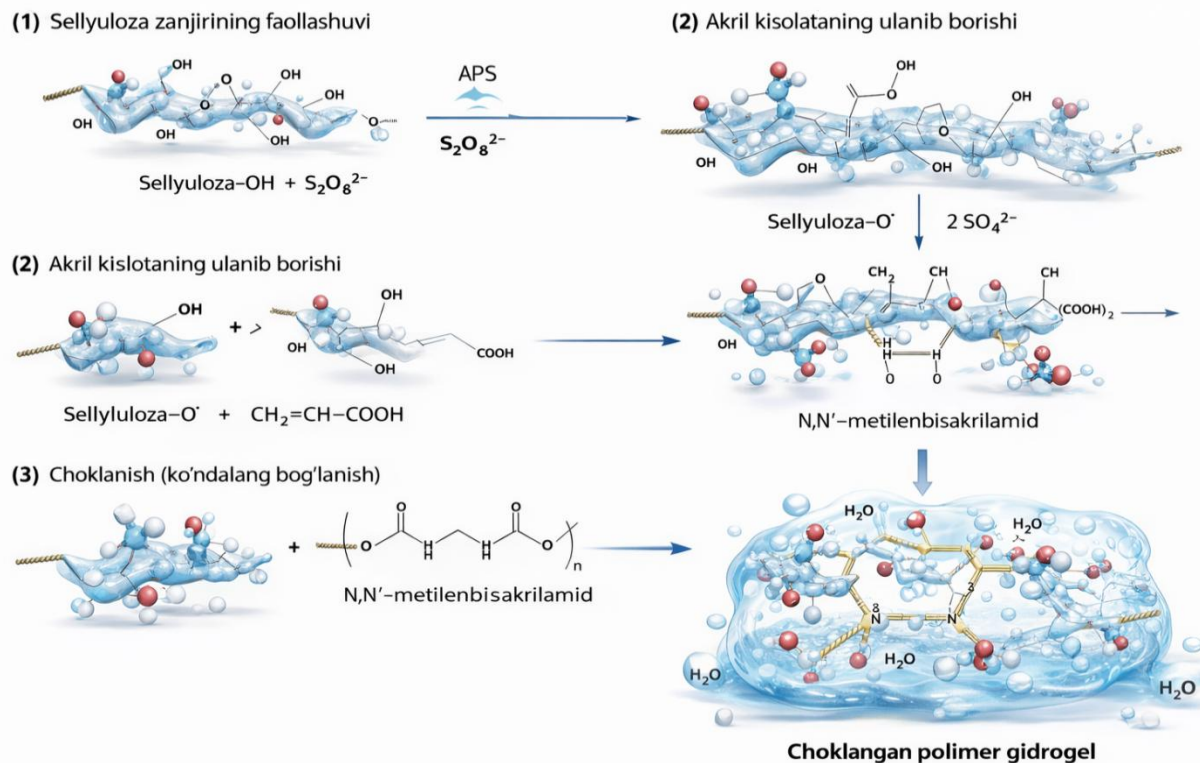


Paxta linti asosida bioparchalanuvchi gidrogellarni erkin radikal asosidagi choklangan polimer hosil bo'lishi orqali sintez qilish va ularning qishloq xo'jaligida qo'llanishini, tuproq namligini saqlash, sug'orishni kamaytirish hamda o'simlik o'sishini yaxshilash jihatlarini aks ettiradi.

Tanlangan materiallar va reagentlar ilmiy adabiyotlarda bioparchalanuvchi gidrogellar sintezida keng qo'llanilishi va yuqori samaradorlik ko'rsatishi bilan asoslanadi.

Paxta linti gidrojel sintezidan oldin uning reaksiyaga kirishishini oshirish maqsadida oldindan ishlov berildi. Buning uchun paxta linti mexanik ravishda maydalanib, ishqoriy muhitda ishlovdan o'tkazildi. Ishqoriy ishlov selluloza tolalaridagi gidroksil guruhlarning faollashuviga olib kelib, keyingi erkin radikal asosidagi choklanish jarayonining samarali kechishini ta'minlaydi. Ishlovdan so'ng paxta linti suv bilan yuvilib, neytral muhitga keltirildi va quritildi.

Bioparchalanuvchi gidrogellar paxta linti asosida akril kislotasi monomerini choklash orqali erkin radikal polimerlanish usulida sintez qilindi. Sintez jarayonida akril kislotasi qisman neytrallanib, gidrofil xususiyatlari kuchaytirildi. Initsiator sifatida ammoniy persulfat qo'llanildi, u yuqori haroratda erkin radikallar hosil qilib, polimerlanish jarayonini boshlab beradi. Ko'ndalang bog'lovchi modda yordamida uch o'lchamli polimer tarmoq shakllantirildi.



1-rasm. Paxta linti (sellyuloza) va akril kislotasi asosida bioparchalanuvchi choklangan polimer gidrogel hosil bo'lish mexanizmi.

Sellyuloza zanjirining faollashuvi. Paxta lintidan tashkil topgan sellyuloza zanjiri ammoniy persulfat ($S_2O_8^{2-}$) ta'sirida faollashadi. Persulfat ionlari parchalanishi natijasida sellyuloza molekulasiidagi gidroksil ($-OH$) guruhlardan vodorod ajralib chiqadi va **sellyuloza radikali (Sell-O \cdot)** hosil bo'ladi.

Akril kislotaning polimer zanjir hosil qilish bosqichi. Hosil bo'lgan sellyuloza radikali akril kislotaning qo'sh bog'iga hujum qiladi. Natijada akril kislotasi zanjirlari sellyuloza skeletiga ulanib, sellyuloza asosida polimer zanjir hosil bo'ladi.

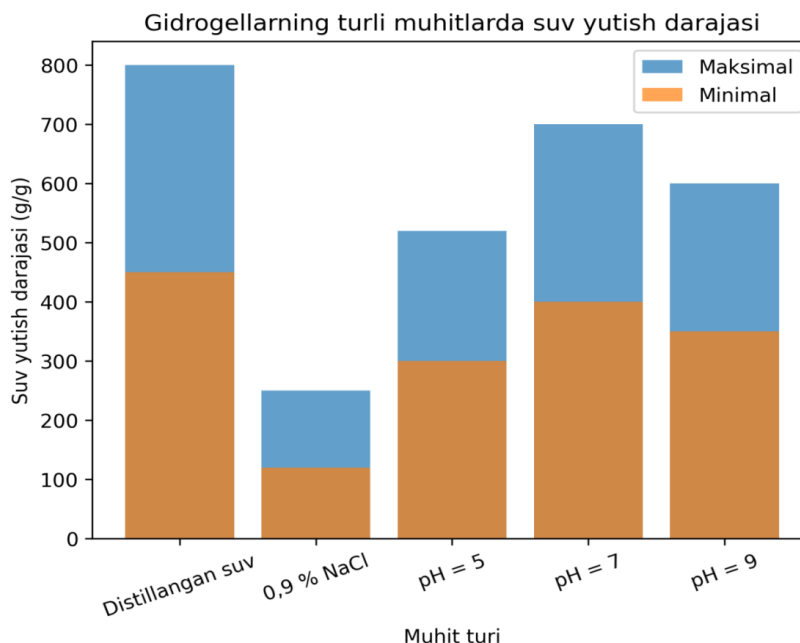
Choklanish (ko'ndalang bog'lanish) jarayoni. N,N'-metilenbisakrilamid ko'ndalang bog'lovchi sifatida ishtirok etib, hosil bo'lgan polimer zanjirlarini o'zaro bog'laydi. Natijada uch o'lchamli choklangan polimer tarmoq shakllanadi.

Hosil bo'lgan tuzilma suvni yuqori miqdorda yuta oladigan, elastik va bioparchalanuvchi choklangan polimer gidrogel hisoblanadi.

OLINGAN NATIJALAR VA ULARNING TAHLILI

Gidrogellarning suv yutish xossalari

Sintez qilingan bioparchalanuvchi gidrogellarning asosiy funksional xossasi — suvni yuqori miqdorda yutish va uni uzoq vaqt davomida ushlab turish qobiliyatidir. O'tkazilgan tajribalar shuni ko'rsatdiki, paxta linti asosida choklangan polimer gidrogellar distillangan suvda yuqori darajada shishadi.

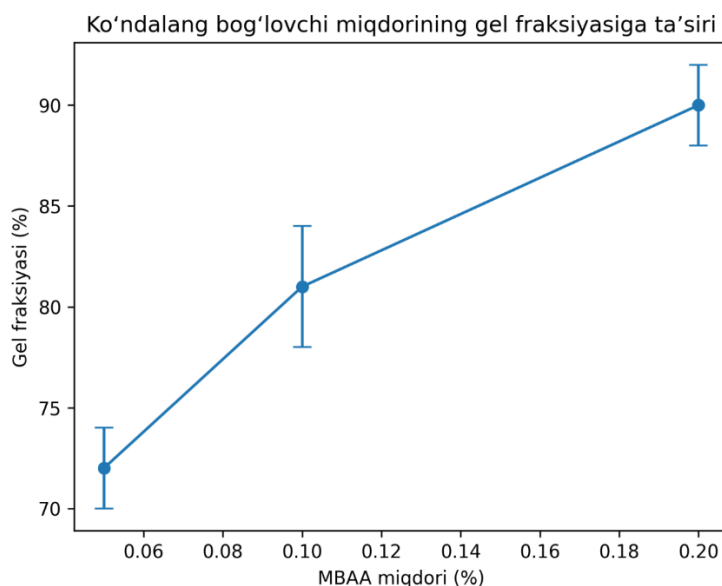


1-Grafik. Gidrogellarning turli muhitlarda suv yutish darajasi.

Grafikdan ko‘rinadiki, gidrogellar distillangan suvda eng yuqori suv yutish qobiliyatini namoyon etadi (450–800 g/g). Sho‘r muhitda (0,9 % NaCl eritmasi) suv yutish darajasi sezilarli darajada kamayadi, pH = 5–9 oralig‘ida esa suv yutish muhit reaksiyasiga bog‘liq holda o‘zgaradi. Bu holat gidrogelning ion kuchi va pH ga sezgirligini tasdiqlaydi.

Natijalardan ko‘rinadiki, gidrogellarning suv yutish darajasi distillangan suvda eng yuqori bo‘lib, sho‘r muhitda kamayadi. Bu holat eritmadagi ionlarning polimer tarmog‘idagi osmotik bosimni pasaytirishi bilan izohlanadi. Neytral va zaif ishqoriy muhitlarda suv yutish yuqori bo‘lishi gidrogelning qishloq xo‘jaligi tuproqlari uchun mos ekanligini tasdiqlaydi.

Ko‘ndalang bog‘lanish darajasi va gel fraksiyasi. Gidrogellarning tuzilish barqarorligi gel fraksiyasi orqali baholandi. Ko‘ndalang bog‘lovchi modda miqdorining ortishi bilan gel fraksiyasi ham oshishi kuzatildi.

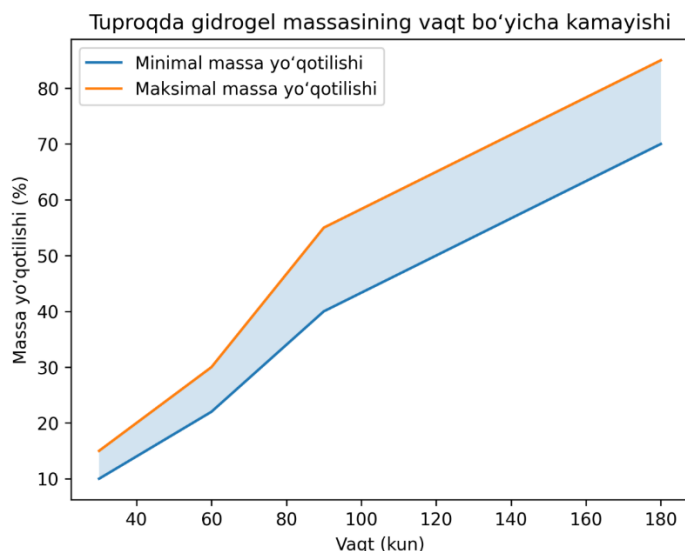


2-Grafik. Ko‘ndalang bog‘lovchi (MBAA) miqdorining gel fraksiyasiga ta’siri.

Grafikdan ko‘rinadiki, MBAA miqdorining 0,05 % dan 0,20 % gacha oshishi gel fraksiyasining 72 % dan 90 % gacha ortishiga olib keladi. Xatolik chegaralari (\pm) ko‘ndalang bog‘lanish darajasi oshishi bilan polimer tarmog‘ining barqarorlashishini tasdiqlaydi.

Gel fraksiyasining oshishi gidrogel tarmog'ining mustahkamligini bildiradi. Biroq adabiyotlar bilan mos ravishda, juda yuqori ko'ndalang bog'lanish suv yutish darajasining pasayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli o'rta miqdordagi ko'ndalang bog'lovchi optimal deb baholanadi.

Bioparchalanish sinovlari gidrogellarning ekologik xavfsizligini baholash imkonini berdi. Tuproq sharoitida olib borilgan tajribalar gidrogellarning vaqt o'tishi bilan asta-sekin parchalanishini ko'rsatdi.

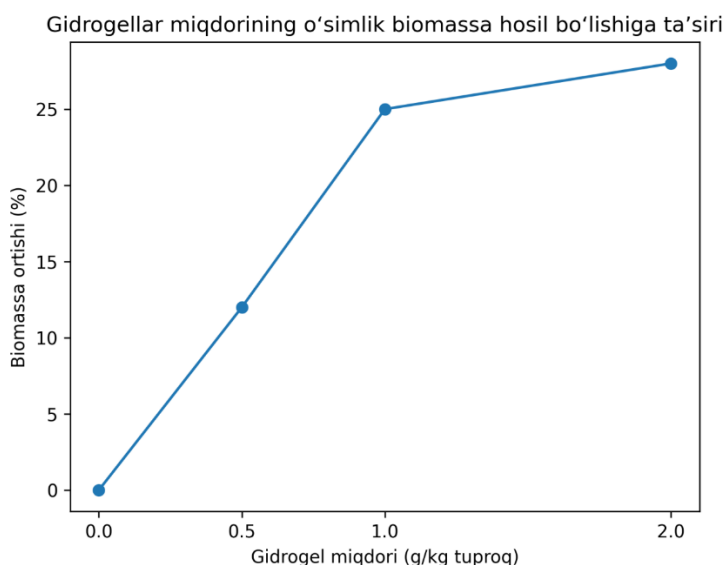


3-grafik. Tuproq sharoitida bioparchalanuvchi gidrogel massasining vaqt bo'yicha kamayishi.

Grafikda 30–180 kun davomida gidrogel massasining 10–15 % dan 70–85 % gacha kamayishi kuzatiladi. Minimal va maksimal qiymatlar oralig'i soyalangan hudud bilan ko'rsatilgan bo'lib, gidrogelning tuproqda bosqichma-bosqich parchalanishini tasdiqlaydi.

Olingan natijalar gidrogellarning 6 oy davomida sezilarli darajada parchalanishini ko'rsatdi. Bu holat ularning uzoq muddatli ekologik salbiy ta'sir ko'rsatmasligini tasdiqlaydi va qishloq xo'jaligida qo'llash uchun muhim afzallik hisoblanadi.

Qishloq xo'jaligi tajribasi natijalari. Gidrogellarning agrobiologik samaradorligi pot tajribalari orqali baholandi. Gidrogellar qo'llanilgan variantlarda o'simliklarning o'sish ko'rsatkichlari sezilarli darajada yaxshilandi.

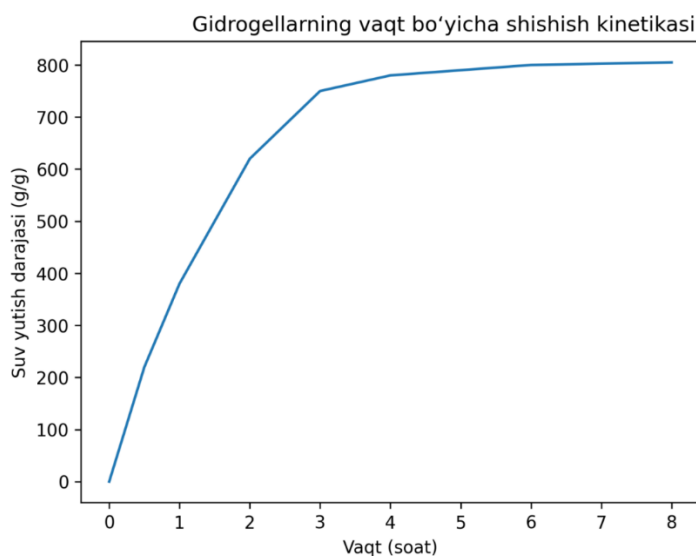


4-Grafik. Gidrogellar miqdorining o'simlik biomassa hosil bo'lishiga ta'siri.

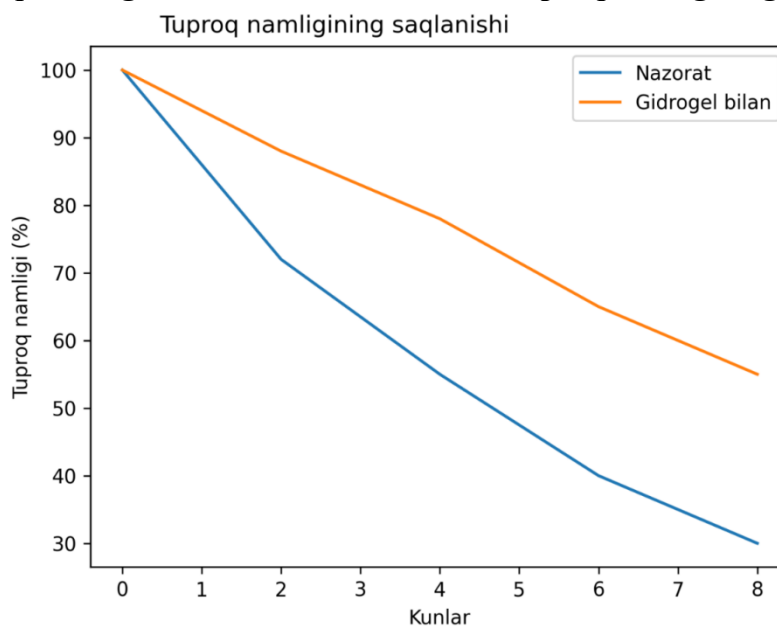
Grafikdan ko‘rinadiki, gidrogel qo‘llanilmagan nazorat variantiga nisbatan gidrogel miqdori oshishi bilan biomassa hosil bo‘lishi sezilarli darajada ortadi. 1,0–2,0 g/kg tuproq oralig‘ida gidrogel qo‘llash eng yuqori samaradorlikni ko‘rsatib, biomassa hosil bo‘lishini 25–28 % ga oshiradi.

Gidrogellar tuproqda namlikni uzoq saqlab turishi hisobiga o‘simlik ildiz zonasida qulay muhit hosil qildi. 1,0–2,0 g/kg diapazonida gidrogel qo‘llash eng samarali natijalarni berdi. Bundan yuqori miqdorlar esa iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq emasligi kuzatildi.

Gidrogellarning vaqt bo‘yicha shishish kinetikasi. Ushbu grafikda paxta linti asosida sintez qilingan bioparchalanuvchi gidrogellarning vaqtga bog‘liq holda suv yutish xatti-harakati ko‘rsatilgan. Grafikdan ko‘rinadiki, shishish jarayonining dastlabki 2–3 soatida suv yutish tezligi yuqori bo‘lib, bu gidrogel tarmog‘idagi gidrofil guruhlarning tez faollashuvi bilan izohlanadi. Keyingi bosqichda suv yutish tezligi sekinlashib, gidrogel muvozanat holatiga o‘tadi, bu esa polimer tarmog‘ining to‘liq shishganligini bildiradi.



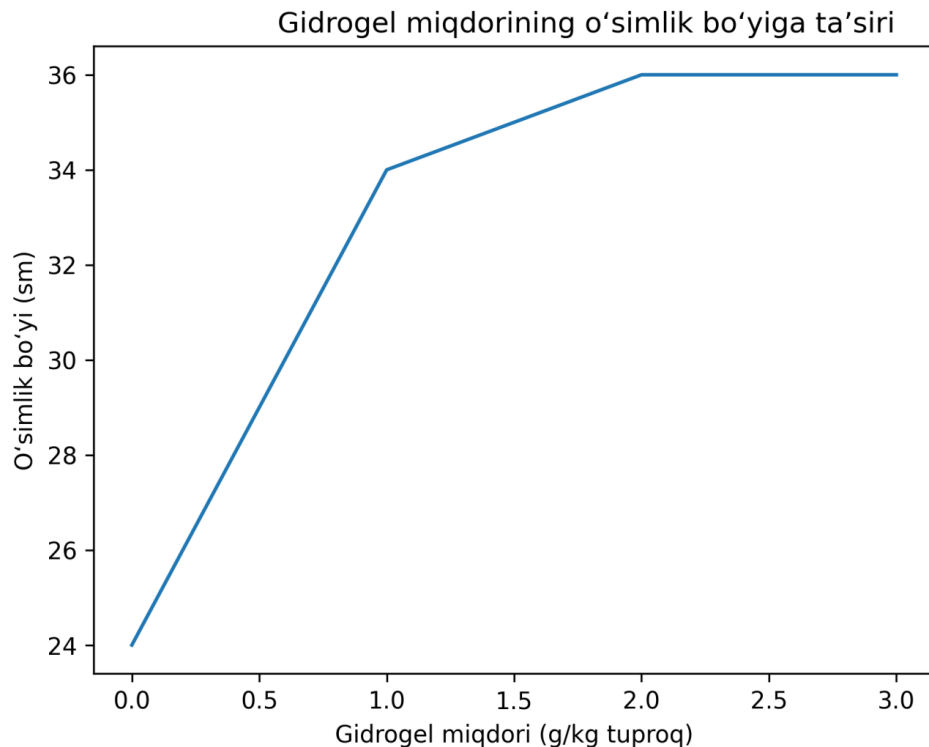
5-Grafik. Gidrogellarning vaqt bo‘yicha shishish kinetikasi
Gidrogel qo‘llanilgan va nazorat variantlarda tuproq namligining saqlanishi



6-Grafik. Gidrogel qo‘llanilgan va nazorat variantlarda tuproq namligining saqlanishi

Grafikda gidrogel qo'llanilgan tuproq va nazorat variantlarda tuproq namligining vaqt bo'yicha o'zgarishi taqqoslangan. Natijalarga ko'ra, gidrogel qo'llanilgan tuproqda namlik darajasi uzoq vaqt davomida yuqori bo'lib saqlanib, nazorat variantiga nisbatan 30–40 % ga ko'proq namlikni ushlab qolgan. Bu holat gidrogellarning suvni yutish va uni asta-sekin ildiz zonasiga berish xususiyati bilan bog'liq.

O'simlik bo'yining gidrogel miqdoriga bog'liqligi



7-Grafik. O'simlik bo'yining gidrogel miqdoriga bog'liqligi.

Grafikdan ko'rinadiki, gidrogellarni optimal miqdorda tuproqqa qo'llash o'simlik bo'yining barqaror oshishiga olib keladi. Juda kam miqdorda gidrogel qo'llanganda ta'sir sezilarli bo'lmaydi, haddan tashqari yuqori miqdorlarda esa o'sish sur'ati barqarorlashadi. Bu holat gidrogelning optimal dozasi mavjudligini tasdiqlaydi.

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, paxta linti asosida sintez qilingan bioparchalanuvchi gidrogellar yuqori suv yutish qobiliyatiga, yetarli mexanik barqarorlikka va tuproq sharoitida yaxshi parchalanish xususiyatiga ega. Qishloq xo'jaligi tajribalari gidrogellarning suv tanqisligi sharoitida o'simliklarning o'sishi va biomassa hosil bo'lishini sezilarli darajada yaxshilashini tasdiqladi. Bu esa mazkur materiallarning qurg'oqchil hududlarda qo'llash uchun istiqbolli ekanligini tasdiqlaydi.

XULOSA

Mazkur tadqiqotda paxta linti asosida bioparchalanuvchi gidrogellarni sintez qilish, ularning fizik-kimyoviy xossalarni o'rganish hamda qishloq xo'jaligi ekinlariga tatbiq qilish imkoniyatlari kompleks tarzda tadqiq etildi. Olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi asosiy xulosalarga kelindi:

Paxta linti asosida akril kislota monomeri ishtirokida **erkin radikal asosida choklangan polimer gidrogellar** yuqori suv yutish qobiliyatiga ega bo'lib, distillangan suvda 450–800 g/g gacha shishish xususiyatini namoyon etdi. Bu ko'rsatkich ularning qishloq xo'jaligida suvni tejoychi material sifatida istiqbolliligini tasdiqlaydi.

Ko'ndalang bog'lovchi modda miqdori gidrogelning tuzilish barqarorligi va suv yutish xossalari ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. O'rtacha ko'ndalang bog'lanish darajasi

gidrogelning ham mexanik mustahkamligini, ham yuqori shishish xususiyatini ta'minlashi ma'lum bo'ldi.

Bioparchalanish sinovlari gidrogellarning tuproq sharoitida asta-sekin parchalanishini va 6 oy davomida sezilarli massa yo'qotishini ko'rsatdi. Bu holat ularning tuproq ekologiyasiga uzoq muddatli salbiy ta'sir ko'rsatmasligini tasdiqlaydi.

Vegetatsion tajribalar gidrogellar qo'llanilgan tuproqlarda namlikning uzoqroq saqlanishini va o'simliklarning o'sish ko'rsatkichlari, xususan biomassa hosil bo'lishining 20–30 % gacha oshishini ko'rsatdi.

Olingan natijalar paxta linti kabi mahalliy, qayta tiklanuvchi va arzon xomashyo asosida ekologik xavfsiz bioparchalanuvchi gidrogellar olish mumkinligini hamda ularni suv tanqisligi sharoitida qishloq xo'jaligida samarali qo'llash mumkinligini ilmiy jihatdan asoslab berdi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. FAO. Water scarcity in agriculture. <https://www.fao.org>
2. Ahmed, E. M. *Hydrogel: Preparation, characterization, and applications*. J. Adv. Res., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
3. Guilherme, M. R. et al. *Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides*. Eur. Polym. J., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.02.032>
4. Montesano, F. F. et al. *Biodegradable superabsorbent hydrogel*. Agric. Water Manag., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.010>
5. Peppas, N. A. et al. *Hydrogels in biology and medicine*. Adv. Mater., 2006. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
6. Rudzinski, W. E. et al. *Biodegradable polymers*. Polym. Degrad. Stab., 2002. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00208-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00208-3)
7. Sannino, A. et al. *Water retention properties of hydrogels*. Polymer, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.02.024>
8. Thakur, V. K. et al. *Cellulose-based hydrogels*. Carbohydr. Polym., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.051>
9. Zhou, Y. et al. *Cotton-based superabsorbent hydrogels*. Ind. Crops Prod., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111530>
10. Li, A. et al. *Graft polymerization on cotton cellulose*. J. Appl. Polym. Sci., 2017. <https://doi.org/10.1002/app.45123>
11. Zohuriaan-Mehr, M. J., Kabiri, K. *Superabsorbent polymer materials*. Iran. Polym. J., 2008. <https://doi.org/10.1007/s13726-008-0001-1>
12. Rashidzadeh, A. et al. *Crosslinker effect on swelling*. Polym. Adv. Technol., 2014. <https://doi.org/10.1002/pat.3215>
13. Dorraji, S. S. et al. *Superabsorbent hydrogels in agriculture*. Clean Soil Air Water, 2010. <https://doi.org/10.1002/clen.200900204>
14. Islam, M. R. et al. *Hydrogel application in crop production*. Agric. Water Manag., 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.003>
15. Abobatta, W. F. *Hydrogel effect on cotton growth*. J. Plant Nutr., 2018. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1431674>
16. Эшбуриев Т.Н., Мамажонов М.М., Азимов А.М. Физико-химические свойства биоразлагаемых гидрогелей на основе гидролизованного полиакрилонитрила и карбоксиметилцеллюлозы // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2025. 11(137). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/21136>