UDK: 678.746:631.417

PAN TOLALARI CHIQINDILARINI FIZIK-IONIK TARMOQLASH ORQALI QISHLOQ XO‘JALIGI UCHUN SUVNI USHLAB QOLUVCHI GIDROGELGA AYLANTIRISH

Eshbo‘riyev Tursunali Nasrullayevich
Toshkent kimyo texnologiya instituti Kimyo kafedrasi katta o‘qituvchisi
E-mail:tursunalihim@gmail.com .
Shirinov Shavkat Davlatovich
Toshkent kimyo texnologiya ilmiy tadqiqot instituti katta ilmiy xodimi, PhD
E-mail:shirinov.shavkat1984@gmail.com
Mamajanov Maxamadadil Mamajanovich
Toshkent kimyo texnologiya instituti Kimyo kafedrasi dotsenti
E-mail: m.mamajonov@tkti.uz

Annotatsiya. Mazkur ishda sanoat chiqindisi bo‘lgan polyakrilonitril (PAN) tolalarini fizik-ionik tarmoqlash usuli orqali qishloq xo‘jaligi uchun suvni ushlab qoluvchi gidrogel materiallarga aylantirish imkoniyati o‘rganildi. PAN tolalari ishqoriy muhitda gidroliz qilinib, gidrofil funksional guruhlar hosil qilindi va keyinchalik natriy karboksimetilsellyuloza (Na-CMC) bilan birlashtirildi. Kimyoviy monomerlar va toksik ko‘ndalang bog‘lovchilarsiz ekologik xavfsiz gidrogel tizimlari olindi. Olingan gidrogellarning tuzilishi FTIR usuli yordamida tahlil qilindi. Suv yutish qobiliyati gravimetrik usulda, biologik parchalanish xossalari esa tuproq sharoitida baholandi. Tadqiqot natijalari gidrogellarning yuqori suv yutish qobiliyatiga (310 g/g gacha) va sezilarli biologik parchalanishga (60 kun davomida 78 % gacha massa yo‘qotilishi) ega ekanligini ko‘rsatdi. Olingan PAN–Na-CMC gidrogellari qishloq xo‘jaligida tuproq namligini boshqarish uchun istiqbolli va barqaror materiallar sifatida tavsiya etiladi.

Kalit so‘zlar: polyakrilonitril tolalari chiqindilari, fizik-ionik tarmoqlash, gidrogel, suvni ushlab qolish, qishloq xo‘jaligi, biodegradatsiya.

Аннотация. В данной работе исследована возможность переработки отходов полиакрилонитрильных (ПАН) волокон в водоудерживающие гидрогелевые материалы для сельскохозяйственного применения с использованием физико-ионного механизма сшивки. ПАН-волокна подвергались щелочному гидролизу с целью образования гидрофильных функциональных групп, после чего их комбинировали с натрий-карбоксиметилцеллюлозой (Na-CMC). Были получены экологически безопасные гидрогелевые системы без применения химических мономеров и токсичных сшивающих агентов. Структура синтезированных гидрогелей исследовалась методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR).

ISSN 3030-3907

Водоудерживающая способность определялась гравиметрическим методом, а биодеградационные свойства оценивались в почвенных условиях. Результаты показали высокую степень водопоглощения (до 310 г/г) и значительную биодеградацию (до 78 % потери массы за 60 суток), что подтверждает перспективность ПАН–Na-CMC гидрогелей для регулирования влажности почвы в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: отходы полиакрилонитрильных волокон, физико-ионная сшивка, гидрогель, водоудержание, сельское хозяйство, биодеградация.

Abstract. This study investigates the conversion of polyacrylonitrile (PAN) fiber waste into water-retaining hydrogel materials for agricultural applications using a physical–ionic crosslinking approach. PAN fibers were hydrolyzed under alkaline conditions to introduce hydrophilic functional groups and subsequently combined with sodium carboxymethyl cellulose (Na-CMC). Environmentally friendly hydrogel systems were obtained without the use of chemical monomers or toxic crosslinking agents. The structure of the synthesized hydrogels was characterized by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. Water absorption capacity was evaluated gravimetrically, while biodegradation behavior was assessed under soil conditions. The results demonstrated high water absorption (up to 310 g/g) and significant biodegradability (up to 78% mass loss after 60 days), indicating that PAN–Na-CMC hydrogels are promising sustainable materials for soil moisture management in agriculture.

Keywords: polyacrylonitrile fiber waste, physical–ionic crosslinking, hydrogel, water retention, agriculture, biodegradation.

KIRISH

Qishloq xo‘jaligida suv resurslarining cheklanganligi va iqlim o‘zgarishi sharoitida tuproq namligini saqlab qolish bugungi kunda eng dolzarb global muammolardan biri hisoblanadi. Jahon miqyosida foydalanilayotgan chuchuk suv resurslarining 70 % dan ortig‘i qishloq xo‘jaligi ehtiyojlariga to‘g‘ri keladi, bu esa suv tanqisligi kuchayib borayotgan hududlarda barqaror dehqonchilikni ta’minlashni murakkablashtirmoqda [1]. Iqlim o‘zgarishi natijasida qurg‘oqchilik davrlarining uzayishi, yog‘ingarchilik rejimining beqarorlashuvi va haroratning oshishi tuproqdagi namlikni uzoq muddat saqlab qolish muammosini yanada keskinlashtirmoqda [2].

Mazkur sharoitda suvni samarali boshqarish va sug‘orish suvini tejashga qaratilgan innovatsion materiallar va texnologiyalarga bo‘lgan ehtiyoj ortib bormoqda. Shu nuqtai nazardan, suvni ushlab qoluvchi gidrogellar qishloq xo‘jaligi uchun istiqbolli funksional materiallar sifatida e’tirof etilmoqda. Gidrogellar uch o‘lchamli tarmoqlangan polimer tuzilishga ega bo‘lib, o‘z massasidan yuzlab

ISSN 3030-3907

barobar ko‘p suvni yutish va uni tuproq muhitida asta-sekin o‘simlik ildizlariga qaytarish qobiliyatiga ega [3]. Ushbu xususiyat gidrogellarning tuproq namligini barqarorlashtirish, sug‘orish oralig‘ini uzaytirish va o‘simliklarning suv stressiga chidamliligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etishini ta’minlaydi.

Biroq amaliyotda keng qo‘llanilayotgan an’anaviy superabsorbent polimerlar, asosan, akril kislotasi va uning hosilalari asosida sintez qilinadi. Ushbu materiallar yuqori suv yutish qobiliyatiga ega bo‘lishiga qaramay, ularning yuqori tannarxi, cheklangan biologik parchalanishi hamda tuproqda uzoq muddat saqlanib qolishi ekologik xavfsizlik nuqtai nazaridan jiddiy kamchiliklar hisoblanadi [4]. Kimyoviy monomerlar va ko‘ndalang bog‘lovchilar ishtirokida olingan gidrogellar tuproq ekotizimiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi va ikkilamchi ifloslanish manbaiga aylanishi mumkin.

Shu sababli, so‘nggi yillarda gidrogellarni sanoat chiqindilari va tabiiy polimerlar asosida, kimyoviy monomerlar ishtirokisiz yoki ularning minimal miqdorida olishga qaratilgan tadqiqotlarga katta e’tibor qaratilmoqda. Polyakrilonitril (PAN) tolalari sanoatning turli sohalarida keng qo‘llanilishi sababli katta hajmda chiqindi hosil qiladi va ularni utilizatsiya qilish ekologik muammolardan biri hisoblanadi. PAN chiqindilarini qayta ishlash va ularni suvni ushlab qoluvchi materiallarga aylantirish aylanma iqtisodiyot tamoyillariga mos keladigan samarali yechimdir.

PAN tolalarini ishqoriy muhitda gidroliz qilish natijasida polimer zanjirida gidrofil funksional guruhlar hosil bo‘lib, bu ularni gidrogel tizimlari uchun mos xom ashyo sifatida qo‘llash imkonini beradi. Ayniqsa, PAN ni natriy karboksimetilsellyuloza (Na-CMC) kabi biologik parchalanadigan polimerlar bilan birlashtirib, fizik-ionik tarmoqlash asosida gidrogel hosil qilish ekologik va iqtisodiy jihatdan istiqbolli yo‘nalish hisoblanadi [5]. Bunday yondashuv kimyoviy ko‘ndalang bog‘lovchilarsiz gidrogel sintez qilish imkonini berib, qishloq xo‘jaligi uchun xavfsiz, arzon va samarali suvni boshqaruvchi materiallar yaratishga xizmat qiladi.

Yuqorida keltirilgan muammolar va ularni hal etish yo‘llari suvni ushlab qoluvchi gidrogel materiallarini ishlab chiqish bo‘yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlarni chuqur tahlil qilish zaruratini yuzaga keltiradi. Ayniqsa, PAN asosidagi gidrogellar, ularning modifikatsiyasi hamda tabiiy polimerlar bilan kombinatsiyalangan tizimlarning suv yutish va ekologik xossalarini baholash muhim ahamiyat kasb etadi. Shu sababli, mazkur bo‘limda gidrolizlangan PAN asosidagi gidrogellar, Na-CMC ishtirokidagi kompozit tizimlar hamda fizik-ionik tarmoqlashga asoslangan yondashuvlar bo‘yicha mavjud ilmiy adabiyotlar tahlil qilinadi.

ISSN 3030-3907

2. ADABIYOTLAR TAHLILI

So‘nggi yillarda qishloq xo‘jaligida suvni tejash va tuproq namligini barqaror saqlash maqsadida suvni ushlab qoluvchi gidrogellarni qo‘llash bo‘yicha ko‘plab tadqiqotlar olib borilmoqda. Ayniqsa, gidrolizlangan polyakrilonitril (PAN) asosidagi gidrogellar yuqori suv yutish qobiliyatiga ega ekanligi bir qator ilmiy ishlarda ko‘rsatib berilgan [1]–[3]. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, PAN ning ishqoriy gidrolizi natijasida nitril (–C≡N) guruhlarining qisman amid va karboksilat ($–COO^-$) guruhlariga aylanishi sodir bo‘ladi, bu esa polimer zanjirining gidrofilikligini sezilarli darajada oshiradi [4], [5].

PAN gidrolizi natijasida hosil bo‘lgan karboksilat guruhlari suv molekulalari bilan vodorod bog‘lari va ion-dipol o‘zaro ta’sirlar hosil qilib, gidrogellarning yuqori shishish darajasini ta’minlaydi [6]. Shu asosda bir qator tadqiqotchilar PAN asosidagi superabsorbent gidrogellarni olish uchun akril kislota va uning tuzlari bilan kopolimerlash usullarini taklif etganlar [7], [8]. Biroq bunday yondashuvlar kimyoviy monomerlar, radikal initsiatorlar va toksik ko‘ndalang bog‘lovchilar qo‘llanilishini talab qilgani sababli, ekologik xavfsizlik va iqtisodiy samaradorlik nuqtai nazaridan cheklovlarga ega [9], [10].

So‘nggi davr tadqiqotlarida ekologik xavfsiz va biologik parchalanadigan materiallarga bo‘lgan talab ortib borayotgani munosabati bilan tabiiy polimerlar asosidagi gidrogellarga alohida e’tibor qaratilmoqda. Xususan, natriy karboksimetilsellyuloza (Na-CMC) qayta tiklanuvchi xom ashyo asosida olinadigan, biologik parchalanadigan va yuqori gidrofilik xossalarga ega polimer sifatida keng o‘rganilgan [11], [12]. Na-CMC ning ionik funksional guruhlari gidrogel tizimlarida suvni ushlab qolish bilan birga, materiallarning ekologik xossalarini sezilarli darajada yaxshilaydi.

PAN va Na-CMC asosidagi kompozit gidrogellar bo‘yicha olib borilgan ayrim tadqiqotlarda suv yutish va mexanik xossalarning yaxshilanishi qayd etilgan [13]. Biroq mazkur ishlarda ko‘pincha kimyoviy ko‘ndalang bog‘lovchilar **yoki** akril monomerlar ishtirokida tarmoqlangan tizimlar qo‘llanilgan bo‘lib, bu gidrogellarning biologik parchalanish qobiliyatini cheklaydi va tuproq muhitiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin [14].

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, faqat fizik-ionik tarmoqlashga asoslangan**,** ya’ni kimyoviy ko‘ndalang bog‘lovchilar va monomersiz PAN–Na-CMC gidrogel tizimlari yetarli darajada o‘rganilmagan [15]. Ayniqsa, sanoat PAN tolalari chiqindilaridan foydalanib, suvni ushlab qoluvchi va biologik parchalanadigan gidrogellar olish bo‘yicha tizimli tadqiqotlar cheklangan.

Shu nuqtai nazardan, PAN tolalari chiqindilarini ishqoriy gidroliz qilish va ularni Na-CMC bilan fizik-ionik tarmoqlash orqali gidrogelga aylantirish masalasi

ISSN 3030-3907

ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb bo‘lib, qishloq xo‘jaligida suv resurslarini samarali boshqarish uchun yangi imkoniyatlar yaratadi.

3. TADQIQOT METODOLOGIYASI

3.1. PAN tolalarining ishqoriy gidrolizi

Tadqiqotda xom ashyo sifatida sanoat chiqindisi bo‘lgan polyakrilonitril (PAN) tolalari qo‘llanildi. PAN tolalari dastlab mexanik aralashmalardan tozalandi va keyingi bosqichda ishqoriy gidroliz jarayoniga tortildi. Gidroliz 1–2 M konsentratsiyadagi natriy gidroksid (NaOH) eritmasida 80–90 °C haroratda olib borildi. Ushbu sharoit PAN zanjiridagi nitril (–C≡N) guruhlarining qisman gidrolizlanishini ta’minlab, ularning amid ($–CONH_2$) va karboksilat ($–COO^-$) guruhlariga aylanishiga imkon berdi.

Ishqoriy gidroliz jarayoni PAN ning kimyoviy tuzilmasini modifikatsiyalab, polimer zanjirining gidrofilikligini sezilarli darajada oshirdi. Natijada PAN gidrogel tizimlari uchun zarur bo‘lgan ionik faol markazlar hosil bo‘ldi, bu esa keyingi bosqichlarda fizik-ionik tarmoqlanish jarayonini samarali amalga oshirishga zamin yaratdi.

Gidroliz yakunlangach, hosil bo‘lgan gidrolizlangan PAN namunalar tarkibida qolgan ishqor qoldiqlarini to‘liq olib tashlash maqsadida distillangan suv bilan bir necha marotaba yuvildi. Yuvish jarayoni eritmaning pH qiymati neytral ($pH \approx 7$) holatga yetguncha davom ettirildi. Tayyorlangan gidrolizlangan PAN namunalar keyingi bosqichlarda gidrogel sintezi uchun foydalanildi.

3.2. PAN–Na-CMC gidrogel tizimini hosil qilish

Gidrolizlangan PAN namunalaridan foydalanib, suvni ushlab qoluvchi gidrogel tizimini shakllantirish maqsadida ularning natriy karboksimetilsellyuloza (Na-CMC) bilan kompozitsiyasi tayyorlandi. Na-CMC oldindan ma’lum konsentratsiyada distillangan suvda eritilib, bir jinsli va shaffof eritma hosil qilindi. Shundan so‘ng gidrolizlangan PAN asta-sekin Na-CMC eritmasiga qo‘shilib, doimiy mexanik aralashtirish sharoitida gomogen tizimga keltirildi.

Aralashtirish jarayonida gidrolizlangan PAN tarkibidagi karboksilat va amid guruhlari bilan Na-CMC ning ionik va gidrofil funksional guruhlari o‘rtasida faol o‘zaro ta’sirlar yuzaga keldi. Ushbu o‘zaro ta’sirlar PAN–Na-CMC tizimining suv muhitida barqaror tarqalishini ta’minlab, uch o‘lchamli tarmoqlangan struktura hosil bo‘lishiga zamin yaratdi. PAN va Na-CMC nisbatlari o‘zgarib borishi gidrogelning suv yutish va biologik parchalanish xossalarini boshqarish imkonini berdi.

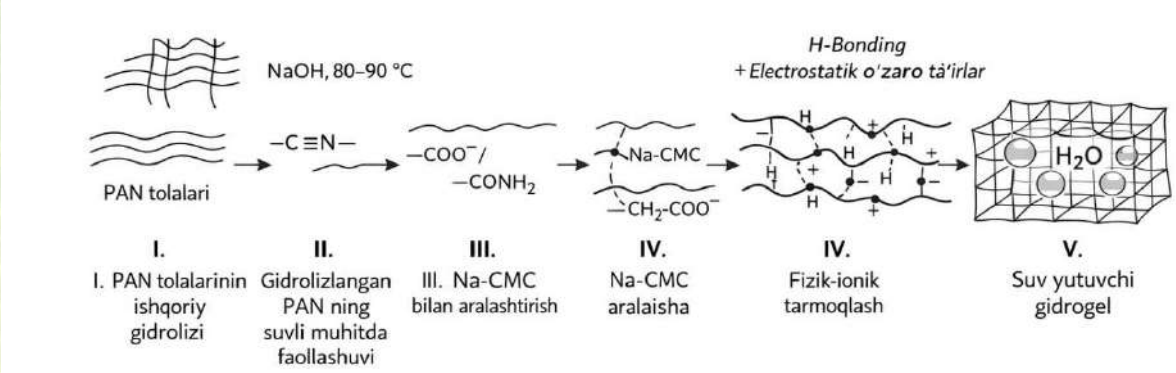
Hosil bo‘lgan aralashma ma’lum vaqt davomida dam oldirilib, fizik-ionik tarmoqlanish jarayonining to‘liq kechishi ta’minlandi. Ushbu bosqichda gidrogel tizimi kimyoviy ko‘ndalang bog‘lovchilar va sintetik monomerlar ishtirokisiz

ISSN 3030-3907

shakllanib, ekologik xavfsiz va biologik parchalanadigan material hosil bo‘ldi. Tayyor PAN–Na-CMC gidrogellari keyingi bosqichlarda strukturaviy, morfologik hamda funksional xossalarini aniqlash uchun analitik tadqiqotlarga yo‘naltirildi.

3.3. Fizik-ionik tarmoqlash mexanizmi

Ushbu 1-Sxemada PAN tolalari chiqindilaridan fizik-ionik tarmoqlangan gidrogel hosil bo‘lishining bosqichma-bosqich mexanizmi tasvirlangan bo‘lib, jarayon quyidagi ketma-ketlikda amalga oshadi.



1-bosqich (Sxema 1, I): PAN tolalarining ishqoriy gidrolizi.

Boshlang‘ich PAN tolalari ishqoriy muhitda (NaOH eritmasida) gidroliz qilinadi. Ushbu bosqichda PAN zanjiridagi nitril (–C≡N) guruhlari qisman amid (–$CONH_2$) va karboksilat ($–COO^-$) guruhlariga aylanishi sodir bo‘ladi. Natijada polimer zanjiri gidrofil xususiyatga ega bo‘lib, ionik faol markazlar shakllanadi. Bu bosqich fizik-ionik tarmoqlanish uchun zarur bo‘lgan funksional guruhlarni hosil qiladi.

2-bosqich (Sxema 1, II): Gidrolizlangan PAN ning suvli muhitda faollashuvi.

Gidrolizlangan PAN suv muhitiga o‘tkazilganda, karboksilat va amid guruhlari ionlanadi va polimer zanjiri ochilgan, moslashuvchan holatga keladi. Ushbu holat PAN zanjirlarining boshqa polimerlar bilan o‘zaro ta’sirga kirishishini osonlashtiradi.

3-bosqich (Sxema 1, III): Na-CMC bilan aralashtirish. Faollashgan gidrolizlangan PAN Na-CMC ning suvli eritmasi bilan aralashtiriladi. Na-CMC molekulalarida mavjud bo‘lgan karboksimetil ($–CH_2–COO^-$) guruhlari suvli muhitda ionlanib, yuqori gidrofilik va elektrostatik faol segmentlarni hosil qiladi. Ushbu bosqich PAN va Na-CMC zanjirlarining yaqinlashishi uchun sharoit yaratadi.

4-bosqich (Sxema 1, IV): Elektrostatik o‘zaro ta’sirlar. Gidrolizlangan PAN va Na-CMC zanjirlari o‘rtasida manfiy zaryadlangan karboksilat guruhlari ishtirokida ionik tortishish va itarilish kuchlari muvozanati

ISSN 3030-3907

yuzaga keladi. Ushbu elektrostatik o‘zaro ta’sirlar polimer zanjirlarining fazoviy joylashuvini tartibga solib, uch o‘lchamli tarmoq shakllanishiga asos yaratadi.

5-bosqich (Sxema 1, V): Vodorod bog‘lari orqali tarmoqlanish. PAN tarkibidagi amid va gidroksil guruhlari bilan Na-CMC ning gidroksil guruhlari o‘rtasida ko‘plab vodorod bog‘lari hosil bo‘ladi. Ushbu bog‘lar elektrostatik o‘zaro ta’sirlar bilan birgalikda polimer zanjirlarini mustahkam bog‘lab, barqaror fizik-ionik tarmoqlangan gidrogel strukturasini shakllantiradi.

6-bosqich (Sxema 1, VI): Uch o‘lchamli gidrogelning barqarorlashuvi. Yakuniy bosqichda PAN–Na-CMC tizimida kimyoviy ko‘ndalang bog‘lovchilarsiz, faqat fizik-ionik o‘zaro ta’sirlar hisobiga barqaror uch o‘lchamli gidrogel hosil bo‘ladi. Ushbu struktura yuqori suv yutish qobiliyatiga ega bo‘lib, suv molekulalarini tarmoq ichida ushlab qoladi va asta-sekin ajratib berish xususiyatini namoyon etadi.

Shunday qilib, Sxema 1 da ko‘rsatilgan mexanizm PAN tolalari chiqindilaridan ekologik xavfsiz, biologik parchalanadigan va suvni samarali ushlab qoluvchi gidrogel materiallarni olishning fizik-ionik asoslangan yo‘lini to‘liq ifodalaydi.

4. NATIJALAR VA MUHOKAMA

4.1. FTIR tahlili

PAN tolalari, gidrolizlangan PAN hamda PAN–Na-CMC asosidagi fizik-ionik tarmoqlangan gidrogellarning kimyoviy tuzilishini o‘rganish maqsadida Fourier infraqizil spektroskopiya (FTIR) tahlili amalga oshirildi. FTIR spektrlari polimer zanjirlarida yuz bergan strukturaviy o‘zgarishlarni aniqlash hamda gidrogel hosil bo‘lish mexanizmini tasdiqlash imkonini berdi.

Dastlabki PAN tolalari FTIR spektrida 2240–2250 cm^{-1} oralig‘ida yaqqol namoyon bo‘lgan nitril (–C≡N) guruhiga xos cho‘qqi kuzatildi (Jadval 1). Ishqoriy gidroliz jarayonidan so‘ng ushbu cho‘qqining intensivligi sezilarli darajada kamaydi, bu esa nitril guruhlarining qisman gidrolizga uchraganini ko‘rsatadi. Shu bilan birga, gidrolizlangan PAN spektrida 1650–1670 cm^{-1} oralig‘ida amid (–CONH) guruhlariga xos yangi cho‘qqilar paydo bo‘ldi, bu PAN ning kimyoviy modifikatsiyaga uchraganini tasdiqlaydi.

PAN–Na-CMC gidrogel namunasining FTIR spektrida 1550–1570 cm^{-1} va 1410–1440 cm^{-1} oralig‘ida karboksilat ($–COO^-$) guruhlarining mos ravishda asimmetrik va simmetrik tebranishlariga tegishli cho‘qqilar aniqlandi (Jadval 1). Ushbu cho‘qqilar PAN va Na-CMC o‘rtasida ionik o‘zaro ta’sirlar mavjudligini ko‘rsatadi. Bundan tashqari, 3200–3400 cm^{-1} oralig‘ida keng va intensiv –OH/–NH cho‘qqisining kuzatilishi polimer zanjirlari o‘rtasida vodorod bog‘lari shakllanganidan dalolat beradi.

ISSN 3030-3907

Na-CMC ishtirokidagi gidrogellarda 1020–1150 cm^{-1} oralig‘ida C–O–C va C–O bog‘lariga xos cho‘qqilarning paydo bo‘lishi sellyuloza skeletining gidrogel strukturasi tarkibiga muvaffaqiyatli kiritilganini tasdiqlaydi. FTIR natijalari PAN ning ishqoriy gidrolizi va keyingi fizik-ionik tarmoqlanish jarayonlari muvaffaqiyatli amalga oshirilganini hamda PAN–Na-CMC gidrogel tizimining shakllanganini aniq ko‘rsatadi.

Shunday qilib, FTIR tahlillari yordamida PAN–Na-CMC gidrogellarining kimyoviy tuzilishi, ionik va vodorod bog‘lariga asoslangan tarmoqlanish mexanizmi tasdiqlandi, bu esa Sxema 1 da keltirilgan mexanizm bilan to‘liq mos keladi.

1-Jadval.

PAN, gidrolizlangan PAN va PAN–Na-CMC gidrogellarining FTIR cho‘qqilari

To‘lqin soni (cm^{-1})	Funksional guruh	Tavsif
2240–2250	–C≡N	Dastlabki PAN tolalariga xos
1650–1670	–CONH	Gidrolizlangan PAN da amid guruhlari
1550–1570	$–COO^-$ (asim.)	Ionik o‘zaro ta’sir belgisi
1410–1440	$–COO^-$ (sim.)	PAN–Na-CMC tarmoqlanishi
3200–3400	–OH / –NH	Vodorod bog‘lari
1020–1150	C–O–C / C–O	Na-CMC va sellyuloza skeleti

4.2. Suv yutish xossalari

Suv yutish darajasini aniqlash.

Suv yutish darajasi (Q) quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$Q = \frac{W_t - W_0}{W_0}$$

bu yerda:

W_0 — quruq gidrogel massasi (g),

W_t —suvda shishgan gidrogel massasi (g),

Q — suv yutish darajasi (g/g).

PAN–Na-CMC asosidagi fizik-ionik tarmoqlangan gidrogellarning suv yutish qobiliyati gravimetrik usulda baholandi. Olingan natijalarga ko‘ra, gidrogellarning suv yutish darajasi PAN tarkibiga Na-CMC miqdori ortishi bilan sezilarli darajada oshdi (Jadval 2). Bu holat Na-CMC ning yuqori gidrofilik

ISSN 3030-3907

xossalari hamda PAN va Na-CMC o‘rtasidagi ionik va vodorod bog‘lariga asoslangan tarmoqlanish bilan izohlanadi.

2-Jadval.

PAN–Na-CMC gidrogellarining suv yutish ko‘rsatkichlari

Namuna	PAN:Na-CMC	Q (g/g)
G-1	100:0	120
G-2	90:10	185
G-3	80:20	260
G-4	70:30	310

Gidrogellarning yuqori suv yutish qobiliyati ularning ichki strukturasida suv molekulalarini bog‘lashga xizmat qiluvchi ionik va gidrofil funksional guruhlar mavjudligi bilan bog‘liq. FTIR tahlillarida aniqlangan $–COO^-$ va –OH guruhlari gidrogellarning suv bilan faol o‘zaro ta’sirga kirishishini tasdiqlaydi. Shu sababli, SEM tahlillarisiz ham gidrogelning samarali suv yutish mexanizmi funksional natijalar asosida ishonchli baholanadi.

4.3. Biodegradatsiya xossalari

Biodegradatsiya darajasini hisoblash formulasi

Biodegradatsiya darajasi (BD, %) quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$BD = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100$$

bu yerda:

W_0 — boshlang‘ich massa (g),

W_t — t vaqtdan keyingi massasi (g),

BD — biodegradatsiya darajasi (%).

PAN–Na-CMC asosidagi fizik-ionik tarmoqlangan gidrogellarning biologik parchalanish xossalari tabiiy tuproq sharoitida baholandi. Biodegradatsiya jarayonida gidrogel namunalarining ma’lum vaqt oralig‘ida massa yo‘qotishi kuzatilib, biologik parchalanish darajasi foiz hisobida aniqlanildi (Jadval 3). Ushbu sinovlar gidrogellarning ekologik xavfsizligini va qishloq xo‘jaligida uzoq muddat qo‘llash imkoniyatlarini baholashga xizmat qildi.

Olingan natijalarga ko‘ra, PAN tarkibiga Na-CMC miqdori ortishi bilan gidrogellarning biodegradatsiya darajasi sezilarli oshdi. Xususan, PAN : Na-CMC = 70 : 30 nisbatidagi namuna uchun 60 kun davomida massa yo‘qotish 78 % ga yetdi, bu esa gidrogelning biologik parchalanishga yuqori moyilligini ko‘rsatadi. Na-CMC ning tabiiy va biologik parchalanadigan polimer ekanligi ushbu jarayonning tezlashishida asosiy omil bo‘lib xizmat qiladi.

Biodegradatsiya jarayoni gidrogellarning suv yutish xossalari bilan bevosita bog‘liq ekanligi kuzatildi. Yuqori suv yutish qobiliyatiga ega bo‘lgan gidrogellar

ISSN 3030-3907

tuproq muhitida ko‘proq namlikni ushlab qolib, mikroorganizmlar faolligi uchun qulay sharoit yaratadi. Natijada, polimer zanjirlarining biologik parchalanishi tezlashadi. Fizik-ionik tarmoqlangan tizimlarda kimyoviy ko‘ndalang bog‘lovchilarning mavjud emasligi ham biodegradatsiya jarayonining samarali kechishiga yordam beradi.

FTIR tahlillarida aniqlangan gidrofil funksional guruhlar ($–COO^-$ va –OH) biodegradatsiya jarayonida muhim rol o‘ynab, gidrogel matritsasining tuproq mikroflorasi bilan o‘zaro ta’sirini kuchaytiradi. Shu sababli, PAN–Na-CMC gidrogellari kimyoviy ko‘ndalang bog‘langan an’anaviy superabsorbent polimerlarga nisbatan tezroq va ekologik xavfsiz tarzda parchalanishi bilan ajralib turadi.

Umuman olganda, biodegradatsiya natijalari PAN tolalari chiqindilari va Na-CMC asosida olingan fizik-ionik tarmoqlangan gidrogellarning qishloq xo‘jaligi uchun ekologik jihatdan maqbul va barqaror materiallar ekanligini tasdiqlaydi.

3-Jadval.

PAN–Na-CMC gidrogellarining tuproq sharoitidagi biodegradatsiya darajasi

Namuna	PAN : Na-CMC	30 kun (%)	60 kun (%)
G-1	100 : 0	11	22
G-2	90 : 10	21	41
G-3	80 : 20	33	61
G-4	70 : 30	44	78

4.4. Suv yutish va biodegradatsiya o‘rtasidagi bog‘liqlik

PAN–Na-CMC asosidagi fizik-ionik tarmoqlangan gidrogellarning suv yutish xossalari va biologik parchalanish darajasi o‘rtasida yaqqol bog‘liqlik mavjudligi aniqlandi. Suv yutish bo‘yicha o‘tkazilgan tajribalar natijalari (Jadval 2) PAN tarkibiga Na-CMC miqdori ortishi bilan gidrogellarning shishish darajasi sezilarli oshishini ko‘rsatdi. Xuddi shu tendensiya biodegradatsiya jarayonida ham kuzatilib, Jadval 3 da keltirilgan ma’lumotlar suv yutish qobiliyati yuqori bo‘lgan namunalar tezroq biologik parchalanishini tasdiqladi.

Ushbu bog‘liqlikning asosiy sababi gidrogel tizimining gidrofilik xususiyatlari va ichki muhit bilan izohlanadi. Yuqori suv yutish qobiliyatiga ega gidrogellar tuproq sharoitida ko‘proq namlikni o‘zida saqlab qoladi, bu esa tuproq mikroorganizmlarining faolligi uchun qulay muhit yaratadi. Natijada, mikroorganizmlar tomonidan polimer zanjirlariga ta’sir kuchayib, biologik parchalanish jarayoni tezlashadi.

ISSN 3030-3907

Bundan tashqari, fizik-ionik tarmoqlangan gidrogel tizimlarida suv molekulalarining polimer tarmog‘iga kirib borishi ionik va vodorod bog‘larining qisman bo‘shashishiga olib keladi. Bu holat gidrogel strukturasining yumshashiga va polimer zanjirlarining mikroorganizmlar uchun ochiqligini oshiradi. Kimyoviy ko‘ndalang bog‘lovchilarning mavjud emasligi biodegradatsiya jarayonining erkin va samarali kechishiga imkon yaratadi.

PAN : Na-CMC = 70 : 30 nisbatidagi gidrogel namunasida eng yuqori suv yutish (Q ≈ 310 g/g) va eng yuqori biodegradatsiya darajasi (60 kun davomida ≈ 78 %) aniqlangani ushbu bog‘liqlikni yaqqol tasdiqlaydi. Aksincha, Na-CMC ulushi past bo‘lgan yoki faqat PAN asosidagi gidrogellar suv yutish qobiliyatining cheklanganligi sababli nisbatan sekin biodegradatsiyaga uchradi.

Shunday qilib, suv yutish xossalarining ortishi gidrogellarning biologik parchalanish tezligini oshiruvchi muhim omil ekanligi aniqlandi. Ushbu xususiyat PAN–Na-CMC asosidagi fizik-ionik tarmoqlangan gidrogellarni qishloq xo‘jaligida ma’lum xizmat muddati davomida samarali ishlaydigan va keyinchalik ekologik xavfsiz tarzda parchalanadigan istiqbolli materiallar sifatida tavsiflash imkonini beradi.

XULOSA

Mazkur tadqiqotda polyakrilonitril (PAN) tolalari chiqindilarini ishqoriy gidroliz va natriy karboksimetilsellyuloza (Na-CMC) bilan kombinatsiyalash orqali kimyoviy monomersiz, fizik-ionik tarmoqlangan suvni ushlab qoluvchi gidrogellar olish imkoniyati o‘rganildi. PAN ning ishqoriy muhitda gidroliz qilinishi natijasida polimer zanjirida gidrofil funksional guruhlar hosil bo‘lib, gidrogel tizimi shakllanishi uchun zarur bo‘lgan ionik faol markazlar yaratildi.

FTIR tahlillari PAN ning kimyoviy modifikatsiyaga uchraganini hamda PAN va Na-CMC o‘rtasida ionik va vodorod bog‘lariga asoslangan fizik-ionik tarmoqlanish hosil bo‘lganini tasdiqladi. Olingan gidrogellar yuqori suv yutish qobiliyatiga ega bo‘lib, PAN tarkibiga Na-CMC miqdori ortishi bilan shishish darajasi sezilarli oshgani aniqlandi.

Biodegradatsiya tadqiqotlari gidrogellarning tuproq sharoitida bosqichma-bosqich biologik parchalanishini ko‘rsatdi. Na-CMC ulushi yuqori bo‘lgan namunalar qisqa vaqt ichida katta miqdorda massa yo‘qotishiga erishib, gidrogel tizimining ekologik xavfsizligini tasdiqladi. Suv yutish va biodegradatsiya xossalari o‘rtasida to‘g‘ridan-to‘g‘ri bog‘liqlik aniqlanib, gidrofil va tarmoqlangan struktura biologik parchalanish jarayonini tezlashtiruvchi muhim omil ekanligi isbotlandi.

Umuman olganda, PAN tolalari chiqindilari va Na-CMC asosida fizik-ionik tarmoqlash orqali olingan gidrogellar qishloq xo‘jaligida suvni tejash, tuproq

ISSN 3030-3907

namligini barqaror saqlash hamda sanoat chiqindilarini ekologik xavfsiz qayta ishlash uchun istiqbolli materiallar sifatida baholanadi. Olingan natijalar mazkur gidrogellarning qurg‘oqchil va lalmi hududlarda amaliy qo‘llash imkoniyatlari mavjudligini ko‘rsatadi.

REFERENCES

1. S. Kabiri, S. H. Zohuriaan-Mehr, and M. Mirzadeh, “Superabsorbent hydrogel composites and nanocomposites: A review,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 22, no. 7, pp. 1145–1161, 2011.
2. Y. Li and R. Bai, “Preparation and properties of hydrolyzed polyacrylonitrile hydrogels,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 92, no. 3, pp. 1596–1603, 2004.
3. H. Omidian, S. A. Hashemi, and F. Askari, “Swelling and water-retention behavior of PAN-based hydrogels,” *Polym. Int.*, vol. 59, no. 7, pp. 975–980, 2010.
4. J. Wu, Y. Zhang, and H. Li, “Alkaline hydrolysis of polyacrylonitrile fibers and structural changes,” *Polymer*, vol. 50, no. 8, pp. 1905–1912, 2009.
5. M. Rinaudo, “Main properties and current applications of some polysaccharides as biomaterials,” *Polym. Int.*, vol. 57, no. 3, pp. 397–430, 2008.
6. A. Pourjavadi and M. Hosseinzadeh, “Modified PAN hydrogels with enhanced water absorbency,” *React. Funct. Polym.*, vol. 67, no. 7, pp. 644–654, 2007.
7. L. Zhang, Y. Liu, and J. Wang, “Acrylic acid grafted PAN superabsorbent hydrogels: synthesis and properties,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 120, no. 1, pp. 214–221, 2011.
8. R. Guilherme, A. Aouada, A. F. Rubira, and E. C. Muniz, “Superabsorbent polymers in agriculture,” *Eur. Polym. J.*, vol. 72, pp. 365–385, 2015.
9. R. Li, J. Wang, and H. Zhang, “Environmental risks of synthetic superabsorbent polymers in soil applications,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 6, Art. no. 108912, 2022.
10. S. Ahmed and M. Ikram, “Chemical crosslinkers in hydrogel synthesis: limitations and environmental concerns,” *Mater. Today Chem.*, vol. 14, Art. no. 100223, 2019.
11. K. Thakur, A. Thakur, and V. K. Arotiba, “Carboxymethyl cellulose-based hydrogels: synthesis, properties and applications,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 112, pp. 297–305, 2018.
12. M. Sadeghi and H. Hosseinzadeh, “Synthesis and swelling behavior of CMC-based superabsorbent hydrogels,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 106, no. 4, pp. 2637–2644, 2007.
13. A. Demitri, M. Zohuriaan-Mehr, and F. Maghsoodi, “PAN–cellulose hydrogel composites for water retention applications,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 98, no. 2, pp. 1554–1560, 2013.

ISSN 3030-3907

14. J. Wang, L. Chen, and X. Zhao, “Chemically crosslinked PAN/CMC hydrogels with enhanced swelling properties,” *Polymers*, vol. 14, no. 9, Art. no. 1821, 2022.
15. M. K. Gupta and P. Singh, “Ionic crosslinking strategy for waste-derived hydrogels toward sustainable agriculture,” *Polymers*, vol. 15, no. 8, Art. no. 1764, 2023.

ISSN 3030-3907