ҒТАМР 34.47.51 https://doi.org/10.26577/EJE208830926

Р.Р. Халматова*, Е.Р. Мамедова, А.В. Ловинская, Ш.М. Ыргынбаева, Т.М. Шалахметова, С.Ж. Колумбаева

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: renata.ren2003@gmail.com

ПЭТ МИКРОПЛАСТИГІНІҢ СҮЗІЛГЕН СУЛЫ СЫҒЫНДЫЛАРЫНЫҢ АРПА (*HORDEUM VULGARE L.*) ӨСІМДІГІНІҢ ЕРТЕ ӨНУ КЕЗЕҢДЕРІНЕ ФИТОТОКСИКАЛЫҚ ӘСЕРІ

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) микропластигі өсімдіктерге, әсіресе онтогенездің алғашқы кезеңдерінде, жағымсыз әсер етуі мүмкін ең көп таралған антропогендік қоршаған орта ластаушы заттарының бірі болып саналады. Бұл зерттеудің мақсаты – сығынды алу шарттарына, фракция мөлшеріне және микропластиктердің концентрациясына байланысты *Hordeum vulgare* L. тұқымдарының өнуіне ПЭТ әсерін бағалау. Экстракттар ПЭТ фракцияларынан <1 мм, 1–2 мм және 2–3 мм 0,1 және 1,0 г/л концентрациясында үш режимде дайындалды: «ыстық су», «салқын су», «салқын су + шейкер». Шартты уақыт өткеннен кейін үлгілер сүзіліп, алынған сығындылар арпа тұқымдарын өңдеу үшін пайдаланылды. Жұмыс барысында дәндердің өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі, сондай-ақ, сығындылардың pH мәні бағаланды. Тұқымдарға ең көп жағымсыз әсер ыстық су жағдайында алынған экстракттармен көрсетілетіні, ал шайқағышсыз салқын су жағдайында алынған экстракттар көп жағдайда теріс бақылаудан статистикалық тұрғыдан айтарлықтай ерекшеленбейтіні анықталды. Біржақты дисперсиялық талдауға сәйкес, өну дәрежесінде ($F = 14{,}46$; $p < 0{,}001$), өну жылдамдығында ($F = 16{,}46$; $p < 0{,}001$) және өну үйлесімділігінде ($F = 14{,}59$; $p < 0{,}001$) топтар аралық айырмашылықтар анықталды. Барлық зерттелген көрсеткіштер бойынша үш жақты дисперсиялық талдау экстракт дайындау түрінің, ПЭТ фракциясының мөлшерінің, сондай-ақ олардың өзара әрекеттесуінің статистикалық тұрғыдан маңызды әсер ететінін, ал экстракттардың концентрациясы өздігінен айтарлықтай әсер етпейтінін көрсетті. Корреляциялық талдау экстракттардың pH мәні мен өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі арасында статистикалық тұрғыдан маңызды теріс байланысты анықтады. Алынған нәтижелер ПЭТ-тің бұл жүйеге фитотоксикалық әсері, ең алдымен, сүзілген сулы сығындыны алу шарттарымен және микропластикалық фракцияның өлшемімен анықталатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: полиэтилентерефталат микропластигі, арпа тұқымдары, өну дәрежесі, өну жылдамдығы, өну үйлесімділігі.

R.R. Khalmatova*, E.R. Mamedova, A.V. Lovinskaya,
Sh.M. Yrgynbayeva, T.M. Shalakhmetova, S.Zh. Kolumbayeva
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: renata.ren2003@gmail.com

Phytotoxic effects of filtered aqueous extracts of pet microplastics on the early germination stages of barley (*Hordeum vulgare* l.)

Polyethylene terephthalate (PET) microplastic is regarded as one of the most widespread anthropogenic environmental pollutants capable of exerting adverse effects on plants, particularly at the early stages of ontogenesis. The aim of the present study was to assess the effects of PET on the germination of *Hordeum vulgare* L. seeds depending on the extraction conditions, particle size fraction, and microplastic concentration. Extracts were prepared from PET fractions of <1 mm, 1–2 mm, and 2–3 mm at concentrations of 0.1 and 1.0 g/L under three treatment conditions: “hot water,” “cold water,” and “cold water + shaker.” After incubation, the samples were filtered, and the resulting extracts were used to treat barley seeds. Germination percentage, germination rate, and germination uniformity were evaluated, along with the pH of the extracts. The extracts obtained under hot-water conditions were found to exert the most adverse effects on the seeds, whereas extracts prepared in cold water without shaking, in most cases, did not differ statistically significantly from the negative control. One-way analysis of variance revealed significant intergroup differences in germination percentage ($F = 14.46$; $p < 0.001$), germination rate ($F = 16.46$; $p < 0.001$), and germination uniformity ($F = 14.59$; $p < 0.001$). Three-way ANOVA showed that the method of extract preparation, PET fraction size, and their interaction had

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

statistically significant effects on all studied parameters, whereas extract concentration did not produce an independent significant effect. Correlation analysis revealed a statistically significant negative relationship between extract pH and germination percentage, germination rate, and germination uniformity. The obtained results indicate that the phytotoxic effect of PET in this system is determined primarily by the conditions under which the filtered aqueous extract is formed and by the size of the microplastic fraction.

Keywords: polyethylene terephthalate microplastic, barley seeds, germination percentage, germination rate, germination uniformity.

Р.Р. Халматова*, Е.Р. Мамедова, А.В. Ловинская,
Ш.М. Ыргынбаева, Т.М. Шалахметова, С.Ж. Колумбаева
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы Казахстан
*e-mail: renata.ren2003@gmail.com

Фитотоксическое действие фильтрованных водных вытяжек ПЭТ-микропластика на ранние этапы прорастания ячменя (*Hordeum vulgare L.*)

Микропластик полиэтилентерефталата (ПЭТ) рассматривается как один из наиболее распространённых антропогенных загрязнителей окружающей среды, способных оказывать неблагоприятное воздействие на растения, особенно на ранних этапах онтогенеза. Целью настоящего исследования была оценка влияния ПЭТ на прорастание семян *Hordeum vulgare* L. в зависимости от условий получения вытяжки, размера фракции и концентрации микропластика. Вытяжки готовили из ПЭТ-фракций <1 мм, 1–2 мм и 2–3 мм в концентрациях 0,1 и 1,0 г/л в трёх режимах: «горячая вода», «холодная вода», «холодная вода + шейкер». После выдерживания образцы фильтровали, и полученными вытяжками обрабатывали семена ячменя. Оценивали всхожесть, скорость и дружность прорастания, а также pH вытяжек. Установлено, что наиболее неблагоприятное действие на семена оказывали вытяжки, полученные в условиях горячей воды, тогда как вытяжки, полученные в условиях холодной воды без шейкера, в большинстве случаев статистически значимо не отличались от отрицательного контроля. По данным однофакторного дисперсионного анализа выявлены достоверные межгрупповые различия по всхожести ($F = 14{,}46$; $p < 0{,}001$), скорости прорастания ($F = 16{,}46$; $p < 0{,}001$) и дружности прорастания ($F = 14{,}59$; $p < 0{,}001$). Трёхфакторный дисперсионный анализ показал, что статистически значимое влияние на все исследованные показатели оказывали тип получения вытяжки и размер фракции ПЭТ, а также их взаимодействие, тогда как концентрация вытяжек не давала самостоятельного значимого эффекта. Корреляционный анализ выявил статистически значимую отрицательную связь pH вытяжек со всхожестью, скоростью и дружностью прорастания. Полученные результаты свидетельствуют о том, что фитотоксический эффект ПЭТ в данной системе определяется, прежде всего, условиями формирования фильтрованной водной вытяжки и размером фракции микропластика.

Ключевые слова: микропластик полиэтилентерефталата, семена ячменя, всхожесть, скорость прорастания, дружность прорастания.

Кіріспе

Қазіргі таңда қоршаған ортаның пластикалық қалдықтармен ластануы ең өзекті экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Пластик өндірісі мен тұтынылуы әлемдік деңгейде тұрақты өсімді көрсетіп, 2020 жылы 435 миллион тоннаға жетті, ал пластик өндірісі, пайдалануы және қалдықтардың пайда болуы 2040 жылға қарай шамамен 70%-ға артады деп болжануда (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2024). Пластикалық қалдықтардың қарқынды өсуі және тиімді жою жүйесінің болмауы – қоршаған ортада пластиктер мөлшерінің айтарлықтай артуына, уақыт өте келе олардың ыдырау нәтижесінде өлшемі 5 мм-ден кіші бөлшектердің – микропластиктердің пайда болуына әкеледі (Tang & Li, 2024).

Микропластиктер өнеркәсіпте арнайы өндірілетін бастапқы бөлшектер (мысалы, микрогранулалар) немесе физикалық және химиялық факторлардың, атап айтқанда ультракүлгін сәулелену мен тотығудың әсерінен ірі пластикалық өнімдердің фрагментациясы нәтижесінде пайда болуы мүмкін. Ластаушы зат ретінде микропластиктер қоршаған ортаның әртүрлі компоненттерінде: су көздерінде, атмосфералық ауада және топырақта кездеседі және олардың микробөлшектері мөлшері мен массасына қарай айтарлықтай қашықтыққа тасымалдануы мүмкін. Микропластиктер біркелкі ластаушы емес, олардың шығу тегі, өлшемі, пішіні және химиялық

құрамы әртүрлі: полиэтилен, полипропилен, полистирол және полиэтилентерефталат сияқты полимерлердің күрделі және алуан түрлі заттар класы. Сонымен қатар, пластик қалдықтарының құрамында көбінесе пластификаторлар, түрақтандырғыштар және бояғыштар сияқты әртүрлі қоспалар болады, олар ауыр металдар мен тұрақты органикалық қосылыстар сияқты қоршаған ортаның ластаушы заттарын адсорбциялау қабілетіне ие (Rochman et al., 2019; Zhao et al., 2025). Қазіргі уақытта микропластиктердің тірі организмдерге улы әсерін көрсететін айтарлықтай деректер көптеп кездеседі.

Микропластиктің әсер ету дәрежесін анықтайтын негізгі факторлардың бірі – бөлшектердің мөлшері. Кішірек полиэтилен бөлшектерінің (1–50 мкм) үлкен бөлшектермен салыстырғанда тотығу стрессін жоғарылатуы, ДНҚ зақымдануы және апоптоздық процестердің белсендірілуі сияқты айқын уытты әсері мен өсуді тежейтін қасиеті көрсетілген. Сонымен қатар, ұсақ бөлшектерде жоғары ену қабілеті мен жоғары реактивті бетінің болуы – олардың тіндерге ену қабілетін жоғарылатады. Ірі бөлшектер, керісінше, негізінен беткі құрылымдарда жинақталады (Bobori et al., 2022; Xu et al., 2026).

Микропластиктердің топырақта жинақталуы және олардың шаруашылық маңызы бар өсімдіктерге, жалпы экожүйенің жұмысына ықтимал әсері ерекше алаңдаушылық тудырады. Микропластиктердің өсімдіктерге теріс әсері – өсу жылдамдығын төмендетумен, тұқымның өнуін тежеумен, тотығу стрессінің индукциясымен және тамыр жүйесінің жұмысының механикалық бұзылуымен сипатталатындығы анықталған (Tang, 2020). Сонымен қатар, микропластиктердің өсімдіктерге әсері хлорофилл мөлшерінің, липидтік құрамының, фотосинтездік тиімділіктің және балдырлардың өсу қарқынының өзгеруіне әкелуі мүмкін (Daniel Tang, 2024; Iheanacho et al., 2020).

Микропластиктердің ішінде полиэтилентерефталат (ПЭТ) тамақ өнімдерімен жанасатын қаптама материалдарын өндіруде кеңінен қолданылады. Қоршаған орта жағдайында ПЭТ экожүйелерге еніп, өсімдіктермен әрекеттесіп, олардың физиологиялық күйіне әсер ете алады. Жоғары тығыздықты полиэтилен және полиэстер сияқты басқа да полимерлермен салыстырғанда ПЭТ микропластиктерінің өсімдіктерге әсері онша айқын емес екені көрсетілген. Фотосинтездік пигменттердің жалпы мөлшерінің төмендетуіне және тотығу стресс деңгейінің жоғарылатуына қарамастан, ПЭТ өсімдік биіктігі, жапырақ саны және биомассасы сияқты морфологиялық және физиологиялық параметрлерінде онша маңызды өзгерістер тудырмайды, бұл салыстырмалы түрде әлсіз фитотоксикалық әсерді көрсетеді (Ahmad и др., 2025). Фотосинтездейтін микроорганизмдерде де осындай әсерлер байқалады: ПЭТ микробалдырлардың өсуін тежеуге, хлорофилл мөлшерінің өзгеруіне және реактивті оттегі түрлерінің әлсіз түзілуіне әсер етіп қана қоймай, сондай-ақ жасушалардың бетіне адсорбцияланып, механикалық зақым келтіруге қабілетті (Pencik et al., 2023).

Қысқа мерзімді тәжірибелер көрсеткендей (7 күн бойы 0,1 г/л), *Raphanus sativus* және *Daucus carota* өсімдіктерінде биомасса мен қоректік заттардың сіңуінде айтарлықтай өзгерістер байқалмаған. Дегенмен, хлорофилл мөлшерінің төмендеуі және малон диальдегид деңгейінің жоғарылауы сияқты стресстің физиологиялық белгілері байқалған, бұл тіпті айқын морфологиялық өзгерістер болмаса да тотығу стрессінің дамуын көрсетеді (Shorobi & Park, 2025).

ПЭТ микропластигінің әсері туралы қосымша деректер су өсімдіктеріндегі ұзақ мерзімді тәжірибелер барысында алынды. Қысқа мерзімді әсер ету кезінде (3 тәулік) фотосинтездің ең көп тежелуі ұсақ ПЭТ бөлшектерінің (<200 мкм) әсерінен байқалатыны, ал ұзақ мерзімді әсер ету кезінде (10 үрпаққа дейін) ірі ПЭТ бөлшектері (300-500 мкм) өсу мен фотосинтездік белсенділіктің неғұрлым айқын басылуын тудыратыны көрсетілген. Бұл ретте осы түрдегі микропластиктің созылмалы әсері хлоропластардың таралуының бұзылуына және *Lemna minor* өсімдігіндегі физиологиялық процестердің түрақты тежелуіне әкеледі, бұл токсикалық әсердің кумулятивті және өлшемге тәуелді сипатын көрсетеді (Cui et al., 2023).

Сондай-ақ, полиэтилентерефталат микропластигінің фитотоксикалық әсерінің мөлшерге тәуелді сипаты бар екені көрсетілген. ПЭТ микробөлшектері концентрациясының артуы (50-1000 мг/л) *Cicer arietinum* тұқымдарының өнгіштігін айтарлықтай төмендетті, бұл тотығу стресінің күшеюімен қатар жүрді. Бұл ретте биохимиялық көрсеткіштердің өзгеруі сызықтық емес сипатқа ие болды: пигменттер мен көмірсулардың мөлшері белгілі бір әсер ету деңгейіне дейін өсті, ал концентрацияның одан әрі артуы айқын стресстік әсерлерге әкелді. Әсіресе, ПЭТ-микропластиктің жоғары дозаларында *Allium cepa* тамыр жасушаларында цитогенетикалық

бұзылулар, оның ішінде хромосомалық аберрациялар анықталған, бұл осы түрдегі микропластиктің ықтимал генотоксикалығын көрсетеді (Mondal et al., 2022).

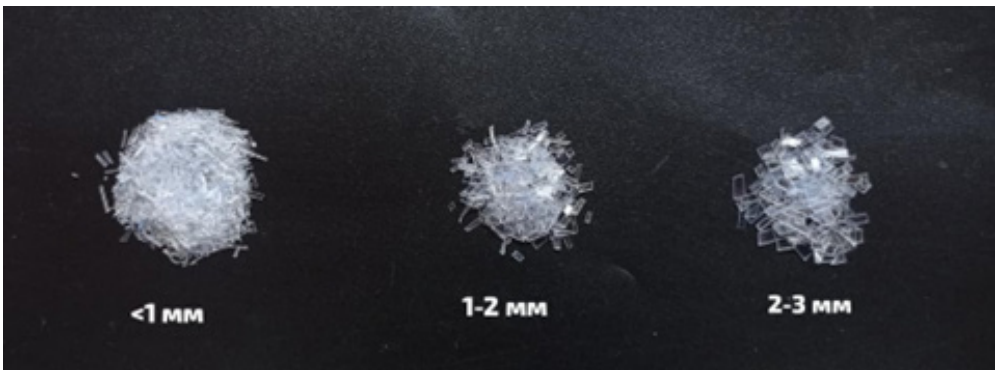
Сонымен қатар, микропластиктің әсер етуінің молекулярлық механизмдерін зерттеу ПЭТ-тің тотығу стресін дамытуын және соның салдарынан ДНҚ зақымдануын индукциялауға қабілетті екенін көрсетеді (Alzaben et al., 2023; Wang et al., 2025). ПЭТ бөлшектері организмде жиналып, қабыну реакцияларын тудыруы мүмкін екендігі, ал ұзақ уақыт әсер еткенде, генотоксикалық өзгерістер мен канцерогенезге байланысты процестердің белсендірілуін тудыратыны көрсетілген (Gutiérrez-García et al., 2025; Kim et al., 2025).

Ғылыми әдебиеттерге жүргізілген талдаулар негізінде, микропластиктер бөлшектердің мөлшеріне, олардың концентрациясына, химиялық табиғатына және әсер ету ұзақтығына байланысты ағзаға түрліше әсер ететін күрделі әрі көпфакторлы ластаушы зат деп қорытындылауға болады. Бірқатар жағдайларда полиэтилентерефталат басқа полимерлермен салыстырғанда фитотоксикалық әсерінің азырақ байқалуымен сипатталғанымен, оның тотығу стресін және физиологиялық бұзылуларды тудыру қабілеті ағзалар үшін ықтимал қауіптілікті көрсетеді. Сонымен бірге, микропластиктердің фитотоксикалық қасиетін зерттеуге арналған жұмыстардың көптігіне қарамастан, әртүрлі экстракция жағдайларында қалыптасатын ПЭТ-тің сүзілген сулы сығындыларының әсері жеткіліксіз зерттелген. Осыған байланысты, тұқымдардың токсиндерге биологиялық жауабын қалыптастыруда сығынды алу тәсілінің, фракция мөлшерінің және ПЭТ концентрациясының рөлін бағалау ерекше қызығушылық тудырады. Осы зерттеудің мақсаты – экологиялық мониторингте кеңінен қолданылатын тест-объект – арпа тұқымының өнуінің бастапқы кезеңдерінде полиэтилентерефталат микропластигінің фитотоксикалық әсерін зерттеу болып табылды.

Материалдар мен әдістер

Сынақ нысаны ретінде арпа тұқымдары (*Hordeum vulgare* L.) пайдаланылды, олар ПЭТ микропластиктерінің сүзілген сығындыларымен өңделді. Үш бөлшек өлшемінің фракциялары үшін (<1 мм, 1–2 мм, 2–3 мм) ПЭТ микропластиктерінің фитотоксикалық әсері 0,1 және 1,0 г/л концентрацияларында бағаланды (1-сурет).

1-сурет
ПЭТ микропластиктерінің пайдаланылған фракциялары



Экстракттар үш режимде дайындалды:

1) «ыстық су» – зерттелетін фракциялар мен концентрациялардағы микропластиктерге ыстық (100°C) дистилденген су құйылып, бөлме температурасында күн астында 30 күн тұрғызылды;

2) «салқын су» – зерттелетін фракциялар мен концентрациялардағы микропластиктерге дистилденген су құйылып, бөлме температурасында күн астында 30 күн тұрғызылды;

3) «салқын су + шейкер» – зерттелетін фракциялар мен концентрациялардағы микропластиктерге дистилденген су құйылып, микропластигі бар колбалар 25°C температурада 30 күн бойы 100 айн/мин жылдамдықпен үздіксіз араластыра отырып, термошайқағышқа салынды.

30 күннен кейін барлық суспензия нүсқалары дәке арқылы сүзіліп, алынған сығындылар тәжірибеде қолданылды. Арпа тұқымдары 4 сағат бойы әртүрлі ПЭТ микропластикалық экстракттарымен өңделді, содан кейін тұқымдар Петри ыдыстарына отырғызылып, 25°C температурада өну үшін термостатқа орналастырылды. ПЭТ микропластиктерінің сүзілген сулы сығындыларының фитотоксикалық әсері келесі параметрлер бойынша бағаланды: өну дәрежесі, өну жылдамдығы, өну үйлесімділігі. Өну дәрежесі отырғызылған тұқымдардың жалпы санынан өнген тұқымдардың пайыздық үлесі ретінде анықталды. Өнген тұқымдар өну басталғаннан кейінгі алғашқы үш күн ішінде күн сайын есептелді. Өну жылдамдығы алғашқы үш күнде күн сайын өнетін тұқымдардың орташа санының қосындысы ретінде анықталды. Өну үйлесімділігі алғашқы 24 сағатта өнген тұқымдар санын соңғы бақылау кезеңіне (72 сағат) өнген тұқымдардың жалпы санына бөлу арқылы есептелді.

Теріс бақылау ретінде дистильденген су, ал оң бақылау ретінде 20 мг/л концентрациясындағы $CuSO_4$ ерітіндісі пайдаланылды (Singh et al., 2007).

Алынған тәжірибелік нәтижелерді статистикалық өңдеу үшін келесі бағдарламалық жиынтық пайдаланылды: Microsoft Excel («Деректерді талдау» қосымшасы), StatPlus және WinPepi. Әрбір эксперименттік топта зерттелген көрсеткіштердің орташа арифметикалық мәндері, сондай-ақ орташа мәннің стандартты қателіктері (SEM) анықталды. Әрбір эксперименттік зерттеудегі топтар арасындағы айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығы тәуелсіз үлгілер үшін Уэлчтің t-тестін пайдаланып, көптік салыстыру қателігін бақылау үшін Холм түзетуімен бағаланды. Айырмашылықтар $p \leq 0,05$ маңыздылық деңгейінде статистикалық тұрғыдан маңызды деп саналды. Тартылыстың, ПЭТ фракциясының өлшемінің, ПЭТ концентрациясының және олардың өзара әрекеттесуінің әсерін бағалау үшін үш жақты дисперсиялық талдау (ANOVA type II) қолданылды. Өсу көрсеткіштері мен pH арасындағы байланысты анықтау үшін Пирсон корреляция коэффициентін (r) есептеу арқылы корреляциялық талдау жүргізілді.

Нәтижелер және оларды талқылау

Зерттеуде әртүрлі экстракция жағдайларында алынған ПЭТ микропластигінің сүзілген сулы сығындыларының арпа тұқымдарының өну жылдамдығына әсері зерттелді (1-кесте). Жалпы алғанда, өну мәндері 36,45-тен 97,31%-ға дейінгі аралықта болды, бұл – биологиялық әсердің сығынды алу жағдайларына, ПЭТ бөлшектерінің мөлшеріне және концентрациясына айқын тәуелділігін көрсетеді.

1-кесте

ПЭТ микропластиктерінің әртүрлі сүзілген сулы сығындыларының арпа тұқымдарының өнуіне әсері

Микропластик түрі	Тәжірибелік нүсқа/үлгі дайындау тәртібі	pH	Өну дәрежесі	Өну жылдамдығы	Өну үйлесімділігі
	Теріс бақылау (dH_2O)	5,0	71,33 ± 6,43	34,33 ± 2,73	94,62 ± 7,16
	Оң бақылау ($CuSO_4$, 20 мг/л)	3,3	67,33 ± 8,33	30,72 ± 5,44	85,32 ± 19,76
ПЭТ, <1 мм, 0,1 г/л	Ыстық су	5,4	36,67 ± 7,57	14,50 ± 2,78*•	58,73 ± 7,65
	Салқын су	5,4	61,33 ± 4,62	29,39 ± 3,43	91,96 ± 9,06
	Салқын су + шайқағыш	5,2	97,31 ± 3,05	44,56 ± 1,40	86,82 ± 0,71
ПЭТ, <1 мм, 1,0 г/л	Ыстық су	5,4	45,14 ± 5,53	16,67 ± 2,77*	55,24 ± 0,96
	Салқын су	4,9	57,33 ± 2,31	27,67 ± 2,52	92,86 ± 12,37
	Салқын су + шайқағыш	5,0	84,60 ± 6,02	36,94 ± 3,71	76,72 ± 6,55

Кестенің жалғасы

Микропластик түрі	Тәжірибелік нұсқа/үлгі дайындау тәртібі	pH	Өну дәрежесі	Өну жылдамдығы	Өну үйлесімділігі
ПЭТ, 1-2 мм, 0,1 г/л	Ыстық су	5,1	50,88 ± 2,96	19,50 ± 2,75*	49,81 ± 4,70*
	Салқын су	4,9	82,67 ± 6,43	36,17 ± 3,56*	79,87 ± 4,81
	Салқын су + шайқағыш	5,2	46,34 ± 1,44	15,44 ± 2,90	39,13 ± 23,01
ПЭТ, 1-2 мм, 1,0 г/л	Ыстық су	5,3	52,80 ± 5,33	19,50 ± 5,45	44,44 ± 12,56
	Салқын су	4,7	67,53 ± 1,00	32,56 ± 1,95	90,48 ± 10,03
	Салқын су + шайқағыш	5,2	58,16 ± 6,03	21,50 ± 1,53	45,10 ± 11,80
ПЭТ, 2-3 мм, 0,1 г/л	Ыстық су	5,1	41,20 ± 11,04	15,00 ± 4,21	48,49 ± 4,46*
	Салқын су	4,8	68,26 ± 13,64	32,33 ± 6,74	91,02 ± 3,79
	Салқын су + шайқағыш	5,2	45,66 ± 16,26	15,94 ± 6,69	42,74 ± 6,10*
ПЭТ, 2-3 мм, 1,0 г/л	Ыстық су	5,2	52,14 ± 3,61	19,58 ± 1,65*	47,70 ± 3,13*
	Салқын су	4,6	63,33 ± 12,70	29,39 ± 7,54	87,58 ± 10,94
	Салқын су + шайқағыш	5,8	36,45 ± 1,66	12,78 ± 1,69*	38,16 ± 8,16*

*Ескерту: * $p<0,05$ – сумен салыстырғанда*
• $p<0,05$ – CuSO4-пен салыстырғанда

Концентрациясы 0,1 г/л болатын <1 мм ПЭТ нұсқасы үшін ең қолайсыз нәтижелер «ыстық су» режимінде алынды. Бұл жағдайда өу дәрежесі теріс бақылауға қарағанда 1,95 есеге, ал оң бақылаумен салыстырғанда 1,84 есеге төмен болды, алайда айырмашылық статистикалық түрғыдан маңызды болмады. Өну жылдамдығы дистилденген судан 2,37 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 2,12 есеге ($p<0,05$) төмен болды. Өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 1,61 есеге, ал оң бақылаудан 1,45 есеге төмен болды, алайда бұл айырмашылық статистикалық түрғыдан маңызды болмады. «Салқын су» режимінде көрсеткіштер аралық орынды алды. Өну дәрежесі судан 1,16 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,10 есеге төмен болды; өну жылдамдығы – судан 1,17 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,05 есеге төмен, ал өні үйлесімділігі іс жүзінде бақылауға сәйкес келіп, судан тек 1,03 есеге ерекшеленді, ал $CuSO_4$-тен 1,08 есеге асып түсті; статистикалық маңызды айырмашылықтар табылған жоқ. Керісінше, барлық зерттелген нұсқалардың ішінде ең маңызды нәтижелер «салқын су+шейкер» режимінде көрсетілді: өну дәрежесі судан 1,36 есеге және $CuSO_4$-тен 1,45 есеге жоғары болды; өну жылдамдығы судан 1,30 есеге және $CuSO_4$-тен 1,45 есеге жоғары болды; өну үйлесімділігі судан 1,09 есеге төмен, бірақ $CuSO_4$-тен 1,02 есеге жоғары болды. Алайда, барлық үш көрсеткіш бойынша бақылаулардан статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады. Осылайша, <1,0 мм ПЭТ және 0,1 г/л концентрация үшін ең токсикалық әсер «ыстық су» режимінде, ал ең қолайлы әсер «салқын су+шейкер» режимінде анықталды.

Бөлшектерінің мөлшері <1 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ нұсқасы үшін жалпы тенденция сақталды. «Ыстық су» режимінде өнгіштік судан 1,58 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,49 есеге төмен болды, статистикалық маңыздылық анықталмады. Өну жылдамдығы теріс бақылаудан 2,06 есеге ($p<0,05$) төмен және оң бақылаудан 1,84 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі судан 1,71 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,54 есеге төмен болды, бұл да статистикалық түрғыдан маңызды емес. «Салқын су» режимінде өну дәрежесі судан 1,24 есеге, ал $CuSO_4$-тен 1,17 есеге төмен, өну жылдамдығы судан 1,24

есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,11 есеге төмен болды, ал өну үйлесімділігі іс жүзінде теріс бақылауға сәйкес келіп, оң бақылаудан 1,09 есеге асып түсті. «Салқын су+шейкер» режимінде көрсеткіштер айтарлықтай жақсарды: өну дәрежесі судан 1,19 есеге жоғары және $CuSO_4$-тен 1,26 есеге жоғары болды; өну жылдамдығы судан 1,08 есеге жоғары және $CuSO_4$-тен 1,20 есеге жоғары болды; өну үйлесімділігі, керісінше, бақылаулардан біршама төмендеп, судан 1,23 есеге, ал $CuSO_4$-тен 1,11 есеге төмен болды. Барлық көрсеткіш бойынша бақылаулармен статистикалық маңызды айырмашылықтар орнатылмады. Бұл жағдайда да статистикалық маңызды тежеуші әсер тек ыстық экстракция кезіндегі өну жылдамдығы бойынша тіркелді.

Бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм және концентрациясы 0,1 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін әртүрлі режимде дайындалған сығындылардың әсері қарама-қайшы болды. «Ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,40 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,32 есеге төмен болды, статистикалық маңыздылық анықталмады. Өну жылдамдығы судан 1,76 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 1,58 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі судан 1,90 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 1,71 есеге төмен болды. «Салқын су» режимінде өну дәрежесі судан 1,16 есеге, ал $CuSO_4$-тен 1,23 есеге жоғары болды; өну жылдамдығы судан 1,05 есеге және $CuSO_4$-тен 1,18 есеге жоғары болды; өну үйлесімділігі судан 1,18 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,07 есеге төмен болды. Өзгерістердің қолайлы бағыттылығына қарамастан, осы нүсқада бақылаулардан статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады. «Салқын су+шейкер» режимінде көрсеткіштер біркелкі болмады: өну дәрежесі судан 1,54 есеге төмен, өну жылдамдығы судан 2,22 есеге ($p<0,05$) төмен, өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 2,42 есеге төмен болды. Демек, бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм ПЭТ үшін 0,1 г/л концентрациясында «ыстық су» және «салқын су+шейкер» режимдері физиологиялық параметрлердің тежелуімен қатар жүрді.

Бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін «ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,35 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,28 есеге төмен болды. Өну жылдамдығы судан 1,76 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,58 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 2,13 есеге, ал оң бақылаудан 1,92 есеге төмен болды. Айқын сандық төмендеуге қарамастан, барлық көрсеткіштер бойынша статистикалық маңызды айырмашылықтар орнатылмады. «Салқын су» режимінде көрсеткіштердің толық дерлік қалыпқа келуі байқалды: барлық үш көрсеткіш су нүсқасының көрсеткіштеріне жақын болды және статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталған жоқ. «Салқын су+шейкер» режимінде сумен салыстырғанда өну дәрежесі бойынша 1,23 есеге, өну жылдамдығы бойынша 1,60 есеге және өну үйлесімділігі бойынша 2,10 есеге төмен болды. Алайда, барлық көрсеткіштер бойынша статистикалық маңызды айырмашылықтар орнатылмады. Осылайша, бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ үшін жағымсыз әсер орташа болды және ол негізінен «ыстық су» және «салқын су+шейкер» режимдері нүсқаларында көрінді, ал «салқын су» режимінде оның әсері жойылды.

Бөлшектерінің мөлшері 2-3 мм және концентрациясы 0,1 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін «ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,73 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,63 есеге төмен болды. Өну жылдамдығы судан 2,29 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 2,05 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 1,95 есеге ($p<0,05$) төмен, ал оң бақылаудан 1,76 есеге төмен болды. «Салқын су» режимінде көрсеткіштер айтарлықтай жақсарып, бақылауларға жақын болды, статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады. «Салқын су+шейкер» режимінде көрсеткіштер төмен болды және сумен салыстырғанда өну дәрежесі бойынша 1,56 есеге, өну жылдамдығы бойынша 2,15 есеге және өну үйлесімділігі бойынша 2,21 есеге ($p<0,05$) төмендегені анықталды. Осылайша, төмен концентрациядағы 2-3 мм ірі ПЭТ фракциясы үшін негізгі сезімтал көрсеткіш – өну үйлесімділігі болды, оның көрсеткіші «ыстық су» және «салқын су + шейкер» режимдерінде күрт төмендеді.

Бөлшектерінің мөлшері 2-3 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін қолайсыз әсер айқын көрінді. «Ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,37 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,29 есеге төмен болды. Өну жылдамдығы теріс бақылаудан 1,75 есеге ($p<0,05$) және оң бақылаудан 1,57 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі судан 1,98 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 1,79 есеге төмен болды. «Салқын су» режимінде көрсеткіштер айтарлықтай жақсарды және олар бақылау мәндеріне жақын болды, статистикалық маңызды айырма-

шылықтар анықталмады. «Салқын су+шейкер» режимі бүкіл зерттеу нұсқалары үшін ең қолайсыз әсерлердің бірі болды: өну дәрежесі судан 1,96 есеге төмен; өну жылдамдығы судан 2,69 есеге ($p<0,05$) төмен; өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 2,48 есеге ($p<0,05$) төмен болды. Осылайша, бөлшектерінің мөлшері 2-3 мм және концентрациясы 1,0 г/л ПЭТ үшін «ыстық су» және әсіресе, «салқын су+шейкер» режимдерінде ең айқын тежеуші әсер байқалды, ал «салқын су» режимінде көрсеткіштер бақылаумен салыстырмалы деңгейде біркелкі болды.

Жалпы алғанда, әрбір ПЭТ нұсқасы бойынша талдау микропластиктің сулы сығындыларының әсер етуі кезіндегі ең төмен көрсеткіштер өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігіне тән болғанын көрсетеді, ал өну дәрежесі бірқатар жағдайларда азырақ сезімтал болып қалды. Ең қолайсыз әсерлер көбінесе «ыстық су» режимінде байқалды, ал ірі фракциялар үшін, әсіресе 2-3 мм, айқын тежелу «салқын су+шейкер» режимінде де жиі сақталды. Керісінше, «салқын су» режимінде ПЭТ нұсқаларының көрсеткіштері статистикалық маңызды айырмашылықтарсыз, теріс бақылауға жақын мәндерді көрсетті. Демек, бұл арпаның өнуіне арналған тестте фитотоксикалық әсердің көрініу дәрежесін бөлшектердің мөлшері мен ПЭТ концентрациясы ғана емес, сонымен қатар, сулы сығындыны дайындау тәсілі де анықтайтынын көрсетеді.

Сығындыларды дайындау тәсілінің әсерін жалпылама бағалау үшін бір факторлы дисперсиялық талдау (one-way ANOVA) жүргізілді, онда үш эксперименттік сызба салыстырылды: ыстық су, салқын су+шейкер және салқын су. Талдау өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі үшін жеке орындалды.

Сығындыны дайындау түрі барлық зерттелген параметрлерге статистикалық маңызды әсер ететіні көрсетілді. Өну дәрежесі үшін эксперименттер арасында сенімді айырмашылықтар анықталды ($F = 8,15$; $p <0,001$). Орташа мәндер «ыстық су» (46,77%) < «салқын су+шейкер» (61,42%) < «салқын су» (66,74%) реттілігімен өсті. Post-hoc талдауы «ыстық су» сериясы «салқын су + шейкер» ($p <0,05$) және «салқын су» ($p <0,001$) режимдерінен статистикалық түрғыдан маңызды ерекшеленетінін көрсетті, ал екі салқын режим арасында статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталған жоқ.

Өну жылдамдығы үшін топ аралық айырмашылықтар одан да айқын болды: $F = 13,33$ ($p<0,001$). Орташа мәндер «ыстық су» режиміндегі 17,57-ден «салқын су+шейкер» режимінде 24,53-ке дейін және «салқын су» режимінде 31,25-ке дейін біртіндеп өсті. Барлық үш тәжірибелік сызба бір-бірінен статистикалық түрғыдан маңызды ерекшеліктерімен сипатталды: «ыстық су» «салқын су+шейкерден» ($p<0,05$) және «салқын судан» ($p<0,001$), ал шейкер – салқын судан ($p <0,05$) ерекшеленді.

Ең айқын топ аралық айырмашылықтар өну үйлесімділігі үшін тіркелді: $F = 39,11$ ($p<0,001$). Өну үйлесімділігінің орташа мәндері «ыстық су» сериясы үшін 50,58%-ды, «салқын су+шейкер» сериясы үшін 54,78%-ды және «салқын су» сериясы үшін 88,96%-ды құрады. Post-hoc талдауы сынама дайындаудың «салқын су» режимі «ыстық су» нұсқасынан да, «салқын су + шейкер» нұсқасынан да (екі жағдайда да $p < 0,001$) статистикалық түрғыдан маңызды ерекшеленетінін көрсетті, ал «ыстық су» мен «салқын су+шейкер» арасында статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады.

Демек, бір факторлы дисперсиялық талдау зерттелген үш нұсқаның ішінде ең қолайсызы «ыстық су» режимі болғанын, аралық орынды «салқын су+шейкер» режимі, ал бейтарап орынды – «салқын су» режимі алғанын көрсетеді.

Өну көрсеткіштерінің құбылмалылығына жекелеген тәжірибелік факторлардың үлесін бағалау үшін үш факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) жүргізілді. Талдауға тек ПЭТ-нұсқалары енгізілді. Факторлар ретінде мыналар қарастырылды: сығынды алу түрі («ыстық су», «салқын су», «салқын су+шейкер» режимдері), микропластик фракциясының мөлшері (<1 мм, 1–2 мм, 2–3 мм) және концентрация (0,1 және 1,0 г/л). Талдау барлық үш көрсеткіш үшін сығынды алу түрі мен фракция мөлшері ең үлкен маңызға ие болғанын, ал концентрация дербес фактор ретінде статистикалық маңызды әсер етпегенін анықтады. Өну дәрежесі үшін сығынды түрі ($F(2,37) = 34,24$; $p<0,001$), фракция мөлшері ($F(2,37) = 12,64$; $p<0,001$), сығынды түрі × фракция өзара әрекеттесуі ($F(4,37) = 35,45$; $p<0,001$), сондай-ақ сығынды түрі × концентрация өзара әрекеттесуі ($F(2,37) = 5,08$; $p<0,05$) және үш факторлы өзара әрекеттесу ($F(4,37) = 3,12$; $p<0,05$) статистикалық маңызды болды. Бұл өну дәрежесінің неғұрлым күрделі факторлық құрылымын көрсетеді, мұнда концентрация өзін тек басқа факторлармен байланыста ғана көрсетеді.

Өну жылдамдығы үшін сығынды түрі ($F(2,37) = 54,50$; $p<0,001$), фракция мөлшері ($F(2,37) = 15,70$; $p<0,001$) және олардың өзара әрекеттесуі ($F(4,37) = 33,74$; $p<0,001$) статистикалық түрғыдан маңызды болды. Концентрацияның және оның қатысуымен болатын өзара әрекеттесулердің әсері статистикалық маңызды болған жоқ.

Өну үйлесімділігі үшін де сығынды түрі ($F(2,37) = 93,25$; $p<0,001$), фракция мөлшері ($F(2,37) = 23,60$; $p<0,001$) және сығынды түрі × фракция өзара әрекеттесуі ($F(4,37) = 8,90$; $p<0,001$) маңызды болып шықты. Концентрация негізгі фактор ретінде де, өзара әрекеттесулер құрамында да статистикалық маңызды үлес көрсетпеді.

Жалпы алғанда, үш факторлы ANOVA ПЭТ-тің қатысуымен жүргізілген тәжірибелерде арпаның өнуі ең алдымен сулы сығындыны алу жағдайларымен және микропластик фракциясының мөлшерімен анықталатынын, ал 0,1-1 г/л диапазонындағы концентрация екінші дәрежелі рөл атқаратынын көрсетті. Ең күрделі факторлық құрылым өну дәрежесіне тән болды, ал өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі үшін негізгі маңызға сығынды түрі, фракция және олардың өзара әрекеттесуі ие болды.

ПЭТ сулы сығындыларының pH мәні мен арпаның өну көрсеткіштері арасындағы байланысты бағалау үшін корреляциялық талдау жүргізілді. Талдау сығынды алудың үш түрін, микропластиктің үш фракциясын және екі концентрацияны қамтитын 18 ПЭТ-нұсқасы бойынша орындалды. pH барлық үш биологиялық көрсеткішпен: өну дәрежесімен ($r = -0.500$; $p < 0,05$), өну жылдамдығымен ($r = -0.558$; $p < 0,05$) және өну үйлесімділігімен ($r = -0.616$; $p < 0,01$) статистикалық түрғыдан маңызды теріс корреляцияланғаны анықталды. Зерттеу нәтижелері бойынша, ең айқын байланыс pH пен өну үйлесімділігі арасында байқалды.

Алынған нәтижелер осы тәжірибелік жүйеде ПЭТ-тің фитотоксикалық әсері тұқымдардың микропластик бөлшектерімен тікелей жанасуымен емес, ең алдымен сүзілген сулы сығындының құрамымен анықталатынын көрсетеді. Тұқымдарды өңдеу алдында сығындылар дәке арқылы сүзілгендіктен, өну дәрежесі, өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігінде байқалатын өзгерістер негізінен, ПЭТ-тен сулы фазаға өткен еритін компоненттердің әсер етуінің және осыған байланысты ортаның химиялық қасиеттеріндегі өзгерістердің нәтижесі ретінде түсіндірілуі керек. Бұл өсімдіктер үшін микропластиктің уыттылығы тек бөлшектерге ғана емес, сонымен қатар сүзінділерге – шайылатын заттарға, оның ішінде пластик қоспаларға және құрамындағы қосылыстарға байланысты болуы мүмкіндігін көрсететін заманауи шолулармен жақсы үйлеседі (Y. Li et al., 2024; Qiu et al., 2024).

Біздің жұмысымыздағы ең айқын тежеуші әсер сынама дайындаудың «ыстық су» режиміне тән болды. Дәл осы топта теріс бақылаумен (дистилденген сумен) салыстырғанда өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі, ал бірқатар нұсқаларда өну дәрежесінің де төмендеуі жиі байқалды. ПЭТ-ті суда қыздыру төмен молекулалық қосылыстардың, синтездің қалдық реагенттерінің және полимердің ескіру өнімдерінің ерітіндіге өтуін біршама күшейтеді. Демек, дәл осы сүзіндінің химиялық құрамы биологиялық әсердің негізгі көзі болуы мүмкін (Y. Li et al., 2024; Qiu et al., 2024).

Нәтиженің маңыздылығы, «ыстық су» режимінде өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігінің пластик ерітінділерінің әсерінен тежелуі, ал өну дәрежесінің онша сезімтал болмауы. Бұл өнудің ерте кинетикалық параметрлері өнген тұқымдардың соңғы пайызына қарағанда сублетальды стресстің сезімтал көрсеткіштері деген жалпы түсінікке сәйкес келеді. Өсімдіктерге микро- және нанопластиктердің әсері туралы шолуларда микропластиктер және олармен байланысты химиялық компоненттер тұқымдардың бөртіп ісінуін, ферменттік жүйелердің белсенділігін және ұрықтың ерте өсуін тежей алатыны, бұл ең алдымен өну қарқыны мен синхрондылығының төмендеуінен көрініс табатыны атап өтіледі (Khan et al., 2024; Y. Li et al., 2024).

«Салқын су + шайқағыш» үлгісін дайындау режимі аралық орынды иеленді, бірақ нәтижелері біртекті болмады. Нұсқалардың бір бөлігі, әсіресе фракция мөлшері <1 мм және концентрациясы 0,1 г/л ПЭТ үшін, өңделмеген бақылау тұқымдарына қарағанда өну дәрежесі мен өну жылдамдығының жоғары мәндері байқалды, ал үлкен фракциялар үшін жеке көрсеткіштердің статистикалық түрғыдан айтарлықтай нашарлауы тіркелді. Бұл көп бағыттылық әдебиетте сипатталған өсімдіктердің микропластиктерге контекст-тәуелді және сызықтық емес реакциясына жақсы сәйкес келеді, мұнда әсер полимердің, бөлшектер мөлшерінің, концентрацияның және экспозиция жағдайларының үйлесіміне

байланысты болады, ал төмен дозаларда кейде бейтарап немесе әлсіз ынталандырушы әсерлер болуы мүмкін (Lozano et al., 2022; Wong & Taylor, 2025; Železnikar et al., 2025).

Бейтарап нәтижелер сынама дайындаудың «салқын су» режимінде алынды, мұнда барлық ПЭТ-нұсқалары өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі бойынша теріс бақылаудан статистикалық маңызды ерекшеленбеді. Бұл – араластырусыз салқын экстракция кезінде ПЭТ суға биологиялық белсенді заттарды айтарлықтай аз бөлгенін, немесе осы заттардың құрамы арпа тұқымдары үшін азырақ уытты болғанын болжауға мүмкіндік береді. Әсер ету сүзілген сығынды арқылы жүргендіктен, сығынды дайындау шарттары полимер компоненттерінің белсенді шайылуына ықпал етпесе, ПЭТ-тің өзі міндетті түрде айқын фитотоксикалық реакция тудырмайдыдеп болжауға болады. Бұл болжам әдебиет деректерімен сәйкес келеді, онда әсердің экспозициялық ортаға және тест жүйелерін дайындау әдістемесіне қатты тәуелділігі атап өтіледі. (Pu & Seifert, 2026; Qiu et al., 2024).

Үш факторлы дисперсиялық талдау сығынды түрінен (сынама дайындау режимі) басқа, барлық үш биологиялық көрсеткіш үшін статистикалық маңызды фактор ПЭТ фракциясының мөлшері мен «сығынды түрі × фракция» өзара әрекеттесуі болғанын көрсетті. Кішігірім бөлшектердің меншікті беткі ауданы үлкенірек, сондықтан, үлкен фрагменттерге қарағанда қосылыстардың бөліну кинетикасына басқаша әсер етуі мүмкін. Демек, бөлшектердің мөлшерін өсімдіктердің биологиялық жауабының негізгі модификаторларының бірі ретінде қарастыруға болады (X. Li et al., 2023; Y. Li et al., 2024; Y. Zhang et al., 2025).

0,1-1,0 г/л диапазонындағы ПЭТ концентрациясы сығынды түрі мен фракциямен салыстырғанда, өну жылдамдығына да, өну үйлесімділігіне де дербес статистикалық маңызды әсер көрсетпеді, ал өну дәрежесі үшін әсері тек өзара әрекеттесулер құрамында ғана көрінді. Мұны таңдалған доза диапазонында нұсқалар арасындағы айырмашылықтар ПЭТ мөлшерімен емес, температураның, араластырудың және фракция мөлшерінің берілген үйлесімінде түзілген сүзінді түрімен анықталғанын көрсететін шама ретінде түсіндіруге болады. Өсімдіктерге микропластиктердің әсерін зерттеу бойынша жасалған жұмыстарда дозалық әсер көбінесе, бейсызық болатыны, ал концентрациялар арасындағы айырмашылықтар пластик түрінің, бөлшектер мөлшерінің немесе әсер ету жағдайларының ықпалынан әлсізірек болуы мүмкін екендігі атап көрсетіледі (Wong & Taylor, 2025; M. Zhang et al., 2025; Y. Zhang et al., 2025).

Корреляциялық талдау бұл көріністі толықтырады: өсу көрсеткіштері мен pH арасында теріс корреляциялық байланыс статистикалық маңызды мәнге ие болды. Мұнда pH қоршаған орта құрамындағы өзгерістерді көрсететін химиялық өзгерістердің интегралды көрсеткіші ретінде әрекет етуі ықтимал. Микропластиктердің фитотоксикалық әсерлеріне шолулар, қоршаған ортаның қасиеттері мен шайылатын заттардың құрамы өну мен өсудің алғашқы сатыларын айтарлықтай өзгерте алатынын да атап өтеді (Khan et al., 2024; Qiu et al., 2024).

ПЭТ-нұсқаларын $CuSO_4$ оң бақылауымен салыстыру сығындылардың бір бөлігі, әсіресе «ыстық су» режимінде, классикалық уытты заттың әсеріне ұқсас немесе одан да айқын әсерлер тудыратыны анықталды. Бұл әдістемелік тұрғыдан маңызды, өйткені, сүзілген ПЭТ сығындыларын алдын-ала әлсіз стрессор ретінде қарастыруға болмайтынын көрсетеді. Белгілі бір экстракция жағдайларында олар айқын биологиялық жауап қалыптастыруға қабілетті. Бұл пластик шайындылардың уыттылығы туралы заманауи деректерге сәйкес келеді және бөлшектердің уытты әсерін немесе фильтраттың уыттылығын бірге қарастыру қажеттілігін көрсетеді (Y. Li et al., 2024; Macan et al., 2024).

Біздің зерттеуімізде ең сезімтал көрсеткіш – өну үйлесімділігі болғаны ерекше назар аударуға тұрарлық. Дисперсиялық талдауда F-критерийінің максималды мәндері, ал pH-пен корреляциялық талдауда – ең тығыз теріс байланыс дәл осы көрсеткіш үшін алынды. Бұл сүзілген ПЭТ сығындылары ең алдымен, өнудің негізінде жатқан физиологиялық процестердің синхрондылығын, содан кейін тұқымдардың түпкілікті өміршеңдігін бұзғанын көрсетеді. Өсімдіктер мен микропластиктер бойынша жүргізілген жұмыстар дамудың ерте кезеңдері, соның ішінде, өну кинетикасы мен бастапқы өну жылдамдығы көбінесе, пластмассалар мен олардың шайылып кететін компоненттерінен туындайтын химиялық стресске ең сезімтал екенін көрсетеді (Khan et al., 2024; X. Li et al., 2023; Lozano et al., 2022).

Жалпы алғанда, біздің зерттеуіміздің нәтижелері «ПЭТ-су-арпа тұқымы» жүйесіндегі ше-

шуші фактор жай ғана микропластиктің болуы емес, сүзілген сулы сығындыны қалыптастыру режимі екенін көрсетеді. Ең қолайсыз әсерлер ыстық экстракция кезінде, аралық әсерлер – шейкердегі салқын су кезінде, ал ең жеңіл әсерлер – араластырусыз салқын су кезінде байқалды. Бұл ПЭТ-тің фитотоксикалық әсерін бағалау кезінде полимердің өзіндік сипаттамаларын ғана емес, сонымен қатар сығынды алу жағдайларын да ескеру қажет екенін білдіреді, өйткені, тұқымдарға әсер ететін ерітіндінің химиялық профилін дәл солар қалыптастырады.

Қорытынды

Осы зерттеуде ПЭТ-микропластиктің сүзілген сулы сығындыларының *Hordeum vulgare* L. өсімдігінің ерте өну кезеңдеріне әсерінің кешенді бағалауы жүргізілді. Тұқымдардың микропластикалық бөлшектермен тікелей жанасуын зерттейтін зерттеулерден айырмашылығы, бұл тәжірибелік жүйеде тұқымдар сүзілген сулы сығындымен өңделді, бұл негізінен, ПЭТ-тен сулы фазаға ауысқан еритін компоненттердің әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер биологиялық әсердің айқындығы – ең алдымен, сығындыны алу жағдайларымен анықталатынын көрсетті. Арпа тұқымдарына «ыстық су» режимінде алынған сығындылар ең қолайсыз әсер етті, ал араластырусыз салқын су жағдайында дайындалған сығындылар ең жеңіл әсермен сипатталды. Сынама дайындаудың «салқын су+шейкер» режимі аралық орынды алды және әсерге жауаптың жоғары құбылмалылығымен ерекшеленді, бұл механикалық араластыру кезіндегі ПЭТ-сығындылар әсерінің күрделі әрі біржақты емес сипатын көрсетеді. Барлық зерттелген биологиялық көрсеткіштер (өну дәрежесі, өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі) үшін негізгі факторлар сығынды алу түрі, ПЭТ фракциясының мөлшері, сондай-ақ олардың өзара әрекеттесуі болды. Бұл арпаның биологиялық жауабы тек микропластиктің болуымен ғана емес, сонымен қатар, температураға, араластыруға және бөлшектердің беткі ауданына байланысты сүзілген сулы фазаның қандай химиялық құрамға ие болатындығымен анықталатынын дәлелдейді. ПЭТ-сығындылардың әсеріне өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі жоғары сезімталдық көрсететіні анықталды, ал жалпы өну дәрежесі бірқатар жағдайларда азырақ сезімтал болып қалды. Бұл микропластиктердің сулы сығындыларының фитотоксикалық әсерін бағалау кезінде өнудің кинетикалық параметрлерін ақпараттық критерийлер ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Практикалық тұрғыдан бұл өте маңызды, себебі, жалпы өну дәрежесінің орташа өзгеруі өну синхрондылығының бұзылуына, біркелкі өскіндердің қалыптасуына кері әсерін тигізуі мүмкін.

Қаржыландыру көзі

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыратын AP26100125 «In vivo сынақ жүйелерінде микропластиктердің потенциалды генотоксикалық және мутагенділігін зерттеу» (2025–2027 жж., ғылыми жетекші – А.В. Ловинская) жобасы аясында жүргізілді.

Мүдделер қақтығысы

Барлық авторлар мақаланы оқып шықты, мазмұнымен таныс, мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың үлесі

Халматова Р.Р. – зерттеу жүргізу, әдіснама, валидация. Мамедова Е.Р. – зерттеу жүргізу, әдіснама, валидация. Ловинская А.В. – тұжырымдаманы әзірлеу, әдіснама, зерттеу жүргізу, ғылыми жетекшілік, мәтінді жазу (бастапқы нұсқа). Ыргынбаева Ш.М. –мәтінді жазу (бастапқы нұсқа). Шалахметова Т.М. – мәтінді жазу (рецензиялау және редакциялау). Колумбаева С.Ж. – тұжырымдаманы әзірлеу, мәтінді жазу (рецензиялау және редакциялау).

Әдебиеттер

Ahmad, Z., Najaf, D., Atif, S., Chaudhry, H., Aslam, F., Bhatti, S. G., Alsaiari, N. S., Al-Buriahi, M. S., & Sesay, M. (2025). Assessment of physiological stress on plants grown in soil contaminated with microplastics. *Scientific Reports*, *15*, 35551. https://doi.org/10.1038/s41598-025-19610-6

Alzaben, M., Burve, R., Loeschner, K., Møller, P., & Roursgaard, M. (2023). Nanoplastics from ground polyethylene terephthalate food containers: Genotoxicity in human lung epithelial A549 cells. *Mutation Research. Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *892*, 503705. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503705

Bobori, D. C., Dimitriadi, A., Feidantsis, K., Samiotaki, A., Fafouti, D., Sampsonidis, I., Kalogiannis, S., Kastrinaki, G., Lambropoulou, D. A., Kyzas, G. Z., Koumoundouros, G., Bikiaris, D. N., & Kaloyianni, M. (2022). Differentiation in the expression of toxic effects of polyethylene-microplastics on two freshwater fish species: Size matters. *Science of The Total Environment*, *830*, 154603. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154603

Cui, R., Kwak, J. I., & An, Y.-J. (2023). Multigenerational effects of microplastic fragments derived from polyethylene terephthalate bottles on duckweed Lemna minor: Size-dependent effects of microplastics on photosynthesis. *Science of The Total Environment*, *872*, 162159. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162159

Daniel Tang, K. H. (2024). A review of the toxic effects of microplastics based on studies on mammals and mammalian cell lines. *Environmental Science: Advances*, *3*(12), 1669–1678. https://doi.org/10.1039/D4VA00227J

Gutiérrez-García, J., Egea, R., Barguilla, I., Nymark, P., García-Rodríguez, A., Guyot, B., Maguer-Satta, V., Marcos, R., Rubio, L., & Hernández, A. (2025). Long-Term Exposure to Real-Life Polyethylene Terephthalate Nanoplastics Induces Carcinogenesis In Vitro. *Environmental Science & Technology*, *59*(22), 10891–10904. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c01628

Iheanacho, S. C., Igberi, C., Amadi-Eke, A., Chinonyerem, D., Iheanacho, A., & Avwemoya, F. (2020). Biomarkers of neurotoxicity, oxidative stress, hepatotoxicity and lipid peroxidation in Clarias gariepinus exposed to melamine and polyvinyl chloride. *Biomarkers*, *25*(7), 603–610. https://doi.org/10.1080/1354750X.2020.1821777

Khan, A. R., Ulhassan, Z., Li, G., Lou, J., Iqbal, B., Salam, A., Azhar, W., Batool, S., Zhao, T., Li, K., Zhang, Q., Zhao, X., & Du, D. (2024). Micro/nanoplastics: Critical review of their impacts on plants, interactions with other contaminants (antibiotics, heavy metals, and polycyclic aromatic hydrocarbons), and management strategies. *Science of The Total Environment*, *912*, 169420. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169420

Kim, D., Kim, D., Kim, H.-K., Jeon, E., Sung, M., Sung, S.-E., Choi, J.-H., Lee, Y., Kang, K.-K., Lee, S., & Lee, S. (2025). Organ-specific accumulation and toxicity analysis of orally administered polyethylene terephthalate microplastics. *Scientific Reports*, *15*, 6616. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91170-1

Li, X., Wang, R., Dai, W., Luan, Y., & Li, J. (2023). Impacts of Micro(nano)plastics on Terrestrial Plants: Germination, Growth, and Litter. *Plants*, *12*(20), 3554. https://doi.org/10.3390/plants12203554

Li, Y., Yang, G., Yu, C., Lei, X., Xing, X., Ma, X., & Sun, Y. (2024). The Impact of Microplastic Concentration and Particle Size on the Germination and Seedling Growth of Pisum sativum L. *Agronomy*, *14*(5), 923. https://doi.org/10.3390/agronomy14050923

Lozano, Y. M., Caesaria, P. U., & Rillig, M. C. (2022). Microplastics of different shapes increase seed germination synchrony while only films and fibers affect seed germination velocity. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 1017349. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1017349

Macan, G. P. F., Munhoz, D. R., Willems, L. A. J., Monkley, C., Lloyd, C. E. M., Hageman, J., Geissen, V., Landa, B. B., & Harkes, P. (2024). Macro- and microplastics leachates: Characterization and impact on seed germination. *Journal of Hazardous Materials*, *480*, 136013. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136013

Mondal, N. K., Kundu, S., Debnath, P., Mondal, A., & Sen, K. (2022). Effects of polyethylene terephthalate microplastic on germination, biochemistry and phytotoxicity of *Cicer arietinum* L. and cytotoxicity study on *Allium cepa* L. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, *94*, 103908. https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103908

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). Policy scenarios for eliminating plastic pollution by 2040. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/76400890-en

Pencik, O., Molnarova, K., Durdakova, M., Kolackova, M., Klofac, D., Kucsera, A., Capal, P., Svec, P., Bytesnikova, Z., Richtera, L., Brtnický, M., Adam, V., & Huska, D. (2023). Not so dangerous? PET microplastics toxicity on freshwater microalgae and cyanobacteria. *Environmental Pollution*, *329*, 121628. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121628

Pu, H., & Seifert, A. (2026). Studying plant responses to micro- and nanoplastics: A review of experimental design and analytical methods. *Microplastics and Nanoplastics*, *6*(1), 23. https://doi.org/10.1186/s43591-026-00182-9

Qiu, G., Wang, Q., Wang, T., Zhang, S., Song, N., Yang, X., Zeng, Y., Sun, Z., Wu, G., & Yu, H. (2024). Microplastic risk assessment and toxicity in plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *22*(1), 209–226. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01665-4

Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., & Et., A. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental Toxicology and Chemistry*. https://doi.org/10.1002/etc.4371

Shorobi, F. M., & Park, J. H. (2025). Effect of polyethylene terephthalate (PET) microplastics on radish and carrot growth, nutrient uptake, and physiological stress responses. *Applied Biological Chemistry*, *68*(1), 66. https://doi.org/10.1186/s13765-025-01039-0

Singh, D., Nath, K., & Sharma, Y.-K. (2007). Toxicological effect of copper on growth and metabolism of barley (Hordeum vulgare L). *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*, *7*(1–2), 9–16.

Tang, K. H. D. (2020). Effects of Microplastics on Agriculture: A Mini-review. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 1–9. https://doi.org/10.9734/ajee/2020/v13i130170

Tang, K. H. D., & Li, R. (2024). Aged Microplastics and Antibiotic Resistance Genes: A Review of Aging Effects on Their Interactions. *Antibiotics*, *13*(10), 941. https://doi.org/10.3390/antibiotics13100941

Wang, L., Cao, L., Wang, X., Liu, Y., Zhang, W., Gou, Y., He, J., Huo, J., Li, X., & Chen, J. (2025). Genotoxicity mode of action exploration of polyethylene glycol terephthalate (PET) acetic acid migration solution under repeated-dose exposure in rats. *Mutation Research. Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *907*, 503886. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2025.503886

Wong, A. E., & Taylor, G. (2025). Plants and microplastics: Growing impacts in the terrestrial environment. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1666047. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1666047

Xu, Y., Chen, X., Xu, Y., Liu, J., Yang, W., Wei, W., Zheng, B., & Li, C. (2026). Mechanistic insights into the size-dependent bioaccumulation and phytotoxicity of polyethylene microplastics in tomato seedlings. *Frontiers in Plant Science*, *17*. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1786469

Železnikar, Š., Kacjan Maršić, N., & Pintar, M. (2025). Sowing in Plastic Contaminated Soils: How (Micro)plastics Impact Seed Germination and Growth of White Mustard (Sinapis alba L.). *Applied Sciences*, *15*(12), 6801. https://doi.org/10.3390/app15126801

Zhang, M., Li, W., Li, Q., Younas, A., Shaaban, M., Li, Y., Liu, J., Wang, Y., Ma, Z., Shi, Z., Shen, H., & Liu, L. (2025). Effects of microplastics on farmland soils and plants: A review. *Plant, Soil and Environment*, *71*(12), 829–848. https://doi.org/10.17221/180/2025-PSE

Zhang, Y., Wang, X., Li, J., Yang, Y., Gao, Y., & Wang, P. (2025). Polyethylene microplastic: Impacts on ryegrass seed germination and seedling development. *BMC Plant Biology*, *25*(1), 876. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06891-2

Zhao, S., Kvale, K. F., Zhu, L., Zettler, E. R., Egger, M., Mincer, T. J., Amaral-Zettler, L. A., Lebreton, L., Niemann, H., Nakajima, R., Thiel, M., Bos, R. P., Galgani, L., & Stubbins, A. (2025). The distribution of subsurface microplastics in the ocean. *Nature*, *641*(8061), 51–61. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08818-1

Авторлар туралы мәлімет:

Рената Халматова – «7М05105 – Генетика» білім беру бағдарламасының 1-курс магистранты, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, стажер-зерттеуші, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: renata.ren2003@gmail.com).

Екатерина Мамедова – кіші ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: katya24.04.97@mail.ru).

Анна Ловинская – PhD, жоба жетекшісі (PI), молекулалық биология және генетика кафедрасының доценті, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, жетекші ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: anna.lovinskaya@kaznu.edu.kz).

Шынар Ырғынбаева – молекулалық биология және генетика кафедрасының аға оқытушысы, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, аға ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: Shynar.Yrgynbayeva@kaznu.edu.kz).

Тамара Шалахметова – зоология, гистология және цитология кафедрасының профессоры, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, бас ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: t_shalakhmetova@mail.ru).

Сауле Колумбаева – молекулалық биология және генетика кафедрасының профессоры, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, бас ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: s_kolumb@mail.ru).

Information about the authors:

Renata Khalmatova – 1st-year Master's student in the Educational Program "7M05105 – Genetics", Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Research Intern, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: renata.ren2003@gmail.com).

Ekaterina Mamedova – Junior Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: katya24.04.97@mail.ru).

Anna Lovinskaya – PhD, Project Leader (PI), Associate Professor of the Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Leading Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: anna.lovinskaya@kaznu.edu.kz).

Shynar Yrgynbayeva – Senior Lecturer of the Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Senior Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: Shynar.Yrgynbayeva@kaznu.edu.kz).

Tamara Shalakhmetova – Professor of the Department of Zoology, Histology and Cytology, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Chief Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: t_shalakhmetova@mail.ru).

Saule Kolumbayeva – Professor of the Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Chief Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: s_kolumb@mail.ru).

Сведения об авторах:

Рената Халматова – магистрант 1 курса ОП «7М05105 – Генетика», факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, стажер-исследователь, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: renata.ren2003@gmail.com).

Екатерина Мамедова – младший научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: katya24.04.97@mail.ru).

Анна Ловинская – PhD, руководитель проекта (PI), доцент кафедры молекулярной биологии и генетики, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, ведущий научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: anna.lovinskaya@kaznu.edu.kz).

Шынар Ыргынбаева – старший преподаватель кафедры молекулярной биологии и генетики, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, старший научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: Shynar.Yrgynbayeva@kaznu.edu.kz).

Тамара Шалахметова – профессор кафедры зоологии, гистологии и цитологии, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, главный научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: t_shalakhmetova@mail.ru).

Сауле Колумбаева – профессор кафедры молекулярной биологии и генетики, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, главный научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: s_kolumb@mail.ru).

Келіп түсті: 04 сәуір 2026 жыл
Қабылданды: 25 қыркүйек 2026 жыл

3-бөлім

БИОЛОГИЯЛЫҚ АЛУАНТҮРЛІЛІКТІ САҚТАУДЫҢ ӨЗЕКТІ МӘСЕЛЕЛЕРІ

Section 3

ACTUAL PROBLEMS OF BIODIVERSITY CONSERVATION

Раздел 3

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ