Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

Khalaf*a kol. Objavte aplikované vedy* https:// (2026) 8:798
doi.org/10.1007/s42452-026-09039-5

Objavte aplikované vedy

VÝSKUMNÝ ARCH Otvorený prístup

Vplyv neionizujúceho žiarenia na rast rastlín pšenice

Hyam Nazmy Badr Khalaf[1], Mona Moustafa[1], Mostafa MY Abdel-Moneim[1], A. Ašúr[2] a Rasha Kamal Helmey[3]

* Korešpondencia:
Hyam Nazmy Badr Khalaf
Hayamnazme@mu.edu.eg
[1]Katedra fyziky, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Minia, El-Minia 61519, Egypt
[2]Katedra fyziky, Prírodovedecká fakulta, Islamská univerzita v Medine, Medina 42351, Saudská Arábia
[3]Katedra botaniky a mikrobiológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Minia, El-Minia 61519, Egypt

Abstrakt
Použitie mikrovlnného žiarenia pri ošetrení semien ako fyzikálneho mutagénu je jednou zo sľubných technológií v šľachtení rastlín, ktorej cieľom je zvýšiť produktivitu rastlín a zlepšiť ich kvalitu. Pšenica (*Triticum aestivum*) zrná boli vystavené mikrovlnnému žiariču vo vzdialenosti 1 cm od mikrovlnného okna s frekvenciou 9,88 GHz a výkonom 4,6 mW, ktorý sa aplikuje počas 10, 20, 30, 40, 50 a 60 minút, aby sa dosiahli rôzne dávky ožiarenia. Pšeničné zrná boli rozdelené do dvoch skupín pre experimenty in vitro a in vivo. Percento vyklíčených zŕn, ako aj mitotický index sa zvýšili u semien vystavených mikrovlnnému žiareniu s krátkymi expozičnými dobami. Percento klíčivosti a hodnoty mitotického indexu sa však so zvyšujúcimi sa expozičnými dobami mikrovlnného žiarenia významne znížili. V skúmaných bunkách boli pozorované niektoré typy chromozómových abnormalít a najvyššie percento aberantných buniek bolo zaznamenané v zrnách ožiarených počas 60 minút. Rastové parametre, vrátane dĺžky koreňov a výhonkov, boli stimulované krátkodobou expozíciou, ale inhibované dlhodobou expozíciou.

Kľúčové slová Neionizujúce žiarenie, mikrovlnná rúra, pšenica, klíčenie, mitotický index

1 Úvod

V súčasnosti je jednou z najbezpečnejších a najsľubnejších metód na vyvolanie nových odrôd so zlepšenými vlastnosťami semien a rastu rastlín fyzikálne ošetrenie rôznymi technikami [8,10,26,34,40]. Fyzikálne ošetrenie sa tiež používa na dosiahnutie šetrnej biologickej zmeny rastlín bez ovplyvnenia ekosystému [8,10,11]. Elektromagnetické vlny vrátane mikrovlnného a ultrafialového žiarenia, ultrazvuku, laseru a ionizujúceho žiarenia sa považujú za fyzikálne mutagény, ktoré možno použiť na ošetrenie semien. Mikrovlny, ako neionizujúce žiarenie, sa považujú za preferovanú fyzioterapeutickú liečbu semien pred sejbou [5,10].

Niekoľko vedeckých štúdií v poslednej dobe informovalo o vplyve EM (elektromagnetického žiarenia), ako sú mikrovlny, na genetiku rastlín. Bunky môžu reagovať na vystavenie EM vznikom chromozómových aberácií alebo iných mutácií v génoch. Takéto zmeny možno pozorovať u dospelých rastlín počas ich vývoja z ožiarených semien, pretože inhibovaný proces mitotického delenia povedie k inhibícii rastu rastlín alebo následnému výskytu geneticky modifikovaných rastlín. Nízke vystavenie mikrovlnám

© Autor(i) 2026.**Otvorený prístup**Tento článok je licencovaný pod medzinárodnou licenciou Creative Commons Attribution 4.0, ktorá povoľuje používanie, zdieľanie, adaptáciu, distribúciu a reprodukciu v akomkoľvek médiu alebo formáte, pokiaľ uvediete príslušný zdroj pôvodného autora (autorov) a zdroj, poskytnete odkaz na licenciu Creative Commons a uvediete, či boli vykonané zmeny. Obrázky alebo iný materiál tretích strán v tomto článku sú zahrnuté v licencii Creative Commons k článku, pokiaľ nie je v odkaze na materiál uvedené inak. Ak materiál nie je zahrnutý v licencii Creative Commons k článku a vaše zamýšľané použitie nie je povolené zákonnými predpismi alebo presahuje povolené použitie, budete musieť získať povolenie priamo od držiteľa autorských práv. Ak si chcete zobraziť kópiu tejto licencie, navštívte stránkuhttp://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

spôsobuje prevažne netermálne účinky, pretože intenzita nie je dostatočne vysoká na to, aby významne zmenila teplotu tkaniva. Netermálne účinky sú dôsledkom priamych interakcií poľa s biologickými bunkami [27,31,32,34]. Tento typ expozície je veľmi významný, pretože najčastejšie expozície živých organizmov prebiehajú denne pri nízkych úrovniach. Biologické účinky vyvolané nízkymi úrovňami elektromagnetického žiarenia nie sú doteraz dobre pochopené a mechanizmy interakcie nie sú úplne opísané.

Mikrovlny (MW) sú neionizujúce elektromagnetické žiarenie s vlnovou dĺžkou od 0,001 do 1 m a širokým frekvenčným rozsahom od 0,3 do 30 GHz [47]. Charakteristiky elektromagnetického poľa sú opísané najmä jeho energetickým obsahom, ktorý súvisí s jeho frekvenciou,

$$\text{Energia (E)} = \text{h (Planckova konštanta)} \times \text{f (frekvencia)}$$

Všetky EM vlny pozostávajú z elektrických a magnetických zložiek poľa, ktoré vibrujú vo fáze a kolmo na smer šírenia. EM vlny sa líšia v závislosti od frekvencie alebo vlnovej dĺžky. Frekvencia alebo zodpovedajúca vlnová dĺžka definuje charakteristiky EM vlny. Frekvencia (f) a vlnová dĺžka (λ) sú spojené nasledujúcou rovnicou:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

kde c = 3×10^{10}cm s^{-1}je rýchlosť EM vlny v priestore.

Bežným spôsobom opisu absorpcie elektromagnetickej energie v hmote je výpočet špecifickej miery absorpcie (SAR). SAR je mierou absorpcie neionizujúceho elektromagnetického žiarenia živým tkanivom. Matematicky je definovaná ako

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}$$

kde σ je špecifická vodivosť (S/m) tela, E je intenzita elektrického poľa v tele (V/m) a ρ je hustota živého tkaniva (kg m^{-3}) [34,48].

Mikrovlny pôsobia prostredníctvom absorpcie na molekulárnej úrovni, čo vedie k vibráciám energie alebo tepla, ako aj k biologickým účinkom. Podľa relevantných štúdií môžu mať mikrovlny aj iné spôsoby dlhodobé účinky na zdravie, [49,50]. Z pohľadu biofyzikálnych a technických vied prevládal až donedávna názor, že mikrovlnné polia nie sú schopné vyvolať biologické účinky inak ako prostredníctvom ohrevu [1,2,6,15, 36Keďže experimenty s mikrovlnným žiarením na ľuďoch sú zložité, rastliny by boli vhodnejšou voľbou na štúdium ich vplyvu na rast, produktivitu, biochemické a fyziologické parametre. Je to preto, že štúdie na rastlinách nevyžadujú špeciálne zariadenia a nemajú žiadne zákonné povinnosti. Rastliny sú tiež základnými zložkami zdravého ekosystému a zohrávajú dôležitú úlohu v živom svete ako hlavní primárni producenti potravy a kyslíka; preto by bolo prospešné preskúmať ich interakciu s dnešným zvýšeným vystavením rádiovým a mikrovlnným frekvenčným poliam [20,34,46].

Účinky mikrovlnného žiarenia závisia najmä od použitej frekvencie a trvania expozície. V prípade nízkej mikrovlnnej frekvencie sa po expozícii pozoruje dobrý vplyv na klíčenie semien. Dlhodobá expozícia však znižuje rast rastlín. Nedávno niekoľko štúdií pozorovalo, že mikrovlnné žiarenie má dobrý vplyv na klíčenie semien pri krátkych časoch expozície, ale dlhá expozícia poškodzuje klíčenie semien [1,23]. Okrem toho, štúdie od [2,4,10,17,28] zistil, že MW

možno použiť na podporu klíčenia semien papriky, pšenice, kukurice, fazule, sóje a šošovice. Boli vykonané niektoré štúdie o účinkoch mikrovlnného žiarenia na klíčenie semien u druhov, ako je pšenica, bengálsky gram, zelený gram a molový gram v mikrovlnných podmienkach. Dospelo sa k záveru, že prahová úroveň energie mikrovĺn a čas expozície môžu zvýšiť klíčenie semien a energiu sadeníc v rastlinách [28,42].

Aplikácia elektromagnetických vĺn ako prelom v zlepšení životaschopnosti semien, rastu sadeníc a skrátení doby dormancie semien [9,29]. Ako uvádza [9], predchádzajúce štúdie zistili, že vystavenie elektrickým, magnetickým a elektromagnetickým vlnám malo pozitívny alebo negatívny vplyv na mieru klíčenia, percento klíčenia, hmotnosť semien, výšku rastliny, obsah bielkovín, produktivitu, povrch listov, hmotnosť plodov a výnos. Frekvencia, trvanie, vlastnosti semien a druh rastliny ovplyvňujú výsledky výskumu.

Je dobre známe, že proliferácia buniek je citlivá na vnútorné aj vonkajšie vplyvy bez ohľadu na ich zdroj. Elektromagnetické žiarenie môže ovplyvniť bunkové jadro a spôsobiť chromozómové abnormality a následne genetické mutácie [12].

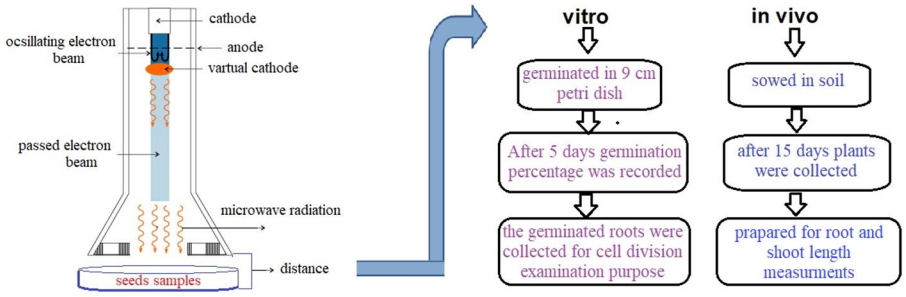
Napriek zdokumentovaným účinkom elektromagnetických polí zostáva značná medzera v určení optimálneho trvania expozície, pri ktorej mikrovlnné žiarenie s frekvenciou 9,88 GHz pôsobí ako prospešný fyzikálny mutagén oproti biologickému inhibítoru. V súčasnej literatúre chýbajú presné údaje o tom, ako rôzne dávky (10 až 60 min) pri nízkom výkone (4,6 mW) ovplyvňujú cytogenetickú stabilitu pšenice. Aby sa táto medzera vyplnila, táto štúdia skúma vplyv mikrovlnnej energie na rastliny pšenice pomocou cytologických testov. Skúmali sme, ako rôzne časy expozície ovplyvňujú klíčenie, mitotický index a rast rastlín (dĺžka koreňov a výhonkov) v porovnaní s kontrolnou skupinou, čím sme stanovili definitívny rámec závislosti dávky od reakcie pre netepelné ožarovanie.

2 Materiály a metódy

Zrná pšenice (Beni-swif 1) boli získané z výskumného centra pre semienka v Beni-swife v Egypte. Zrná boli vystavené mikrovlnnému žiariču (PASCO scientific - Model WA-9314B) s frekvenciou 9,88 GHz a výkonom 4,6 mW. Použili sa rôzne časy expozície: 10, 20, 30, 40, 50 a 60 minút vo vzdialenosti 1 cm od mikrovlnného okna. Informácie o ožiarení vzoriek (zŕn) sú uvedené v tabuľke.1ako vzorový kód, expozičný čas pre mikrovlnný žiarič s frekvenciou 9,88 GHz a výstupným výkonom 4,6 mW pri fixnej vzdialenosti 1 cm. Expozícia sa uskutočnila pri kontrolovanej izbovej teplote (25 ± 1 °C) a nízky výstupný výkon (4,6 mW) nespôsobil žiadne merateľné ohrev semien nad okolitú teplotu. Exponované zrná boli rozdelené do dvoch skupín pre experimenty in vitro a in vivo.

Tabuľka 1Kód vzorky, čas expozície (min), frekvencia mikrovlnného žiariča (Hz), výstupný výkon (mW) a vzdialenosť od žiariča k vzorke (cm)

Vzorka	Čas expozície (min)	Frekvencia (GHz)	Výkon (mW)	Vzdialenosť medzi vzorka a žiarič (cm)
Ovládanie	0	0	0	–
S10	10	9,88	4.6	1
S20	20			
S30	30			
S40	40			
S50	50			
S60	60			



Obr. 1 Mikrovlnné ožarovanie semien a postupy merania vlastností semien

Tabuľka 2 Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie testovaných pšeničných zŕn

Expozičný čas (minúty)	Klíčivosť %
Ovládanie	80
10	80
20	100
30	100
40	80
50	80
60	40

V prvej skupine: 10 zŕn pre každé ošetrenie bolo naklíčených v Petriho miske s priemerom 9 cm. Po 5 dňoch bolo zaznamenané percento klíčenia a naklíčené korene boli zozbierané na účely vyšetrenia bunkového delenia. Druhá skupina bola zasiata do pôdy. Po 15 dňoch boli rastliny zozbierané a potom bola zaznamenaná dĺžka koreňov a výhonkov. Podrobnosti experimentálnej práce sú uvedené na obr.1.

3 Stanovenie mitotického indexu a chromozomálnych abnormalít

Zozbierané korene (1–2) cm boli fixované cez noc v roztoku kyseliny octovej/alkoholu v pomere 1:3. Hydrolyzované končeky koreňov boli roztlačené v acetokarmínovom farbive s použitím (1 N) HCl pri teplote 60 °C počas 15–20 minút. Mitotické bunkové delenie bolo skúmané na približne 3000 bunkách z troch sklíčok na vzorku. Mitotický index (MI) bol vypočítaný ako počet buniek v mitóze delený celkovým počtom buniek x100. Boli hodnotené typy chromozomálnych abnormalít a index abnormality (AI) bol chápaný ako počet aberantných buniek k celkovému počtu analyzovaných buniek x100.

3.1 Štatistická analýza

Získané údaje boli štatisticky analyzované pomocou programu SPSS (ver. 16) na určenie stupňa významnosti rozdielov medzi liečbami a kontrolnou skupinou. Priemery boli porovnané pomocou jednofaktorovej ANOVA s LSD testom pri$P$<0,05 úrovne.

4 Výsledky a diskusia

4.1 Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie

Počet vyklíčených zŕn sa počas experimentu kontroloval denne po zasiatí, maximálny počet vyklíčených zŕn sa zaznamenal po 5 dňoch. Na základe získaných výsledkov uvedených v tabuľke2, percento klíčenia bolo 80 % v kontrolných vzorkách pšenice. Najvyššie percento klíčenia, 100 %, bolo zaznamenané v exponovaných zrnách.

pri 20 a 30 minútach, avšak najnižšie percento 40 % bolo pozorované u ožiarených zŕn počas 60 minút.

Percento klíčenia v rôznych časových intervaloch sa zvýšilo krátkym vystavením mikrovlnnému žiareniu; avšak dlhé trvanie expozície spôsobilo významný pokles klíčivosti. To je v súlade s [1], ktorí uviedli, že percento vyklíčených semien jačmeňa sa zvýšilo po krátkych obdobiach vystavenia mikrovlnnému žiareniu, pričom sa zaznamenala 100 % klíčivosť.

Vplyv mikrovĺn na klíčenie by mohol byť spôsobený tepelným účinkom mikrovĺn. Tieto účinky možno vysvetliť absorbovanou energiou, vyšším výstupným výkonom žiarenia, ako aj dlhším časom expozície, čo vedie k absorpcii väčšieho množstva energie objektom. Vyššie energie spôsobujú zahrievanie [1]. Zrýchlené klíčenie a zlepšená klíčiaca energia niektorých rastlín by mohli byť spôsobené prípadným narušením semenného obalu vplyvom mikrovlnného žiarenia, čo uľahčilo prenikanie vody do semien a začiatok počiatočných vývojových štádií [43].

Vyššia energia absorbovaná molekulami pri vyššej úrovni výstupného výkonu a dlhší čas expozície môže mať škodlivý vplyv na bunkové funkcie [38Štúdia [22] odhalili, že zhoršenie životaschopnosti semien pšenice v dôsledku mikrovlnného ošetrenia nepopierateľne súviselo so znížením obsahu vlhkosti v semenách.

4.2 Mitotická analýza

Zmeny a/alebo inhibícia mitotických aktivít sa vo všeobecnosti používajú na meranie cytotoxicity rastlín za rôznych podmienok. Údaje získané z cytologickej analýzy koreňových špičiek z exponovaných vzoriek sú zhrnuté v tabuľke3.

V bunkách pšenice bol zaznamenaný významný nárast mitotického indexu v bunkách zŕn pri expozičnom čase 20, 30, 40 a 50 minút, ktorý dosiahol 14,37 % v porovnaní s 9,28 % v kontrole. Zatiaľ čo predĺžený expozičný čas 60 minút znížil mitotický index na 8,04 %. Mitotický index je znázornený na obr.2ako funkcia času expozície.

Ako je uvedené v tabuľke3Obr.3, percento chromozómových abnormalít 0,18 a 0,31 bolo významné v bunkách vystavených mikrovlnnému žiareniu počas 50 a 60 minút v porovnaní s 0,05 v kontrole. Typy chromozómových abnormalít sa detegujú ako lepkavosť, oneskorené bunky, mostíky a mikronukley (obr.4).

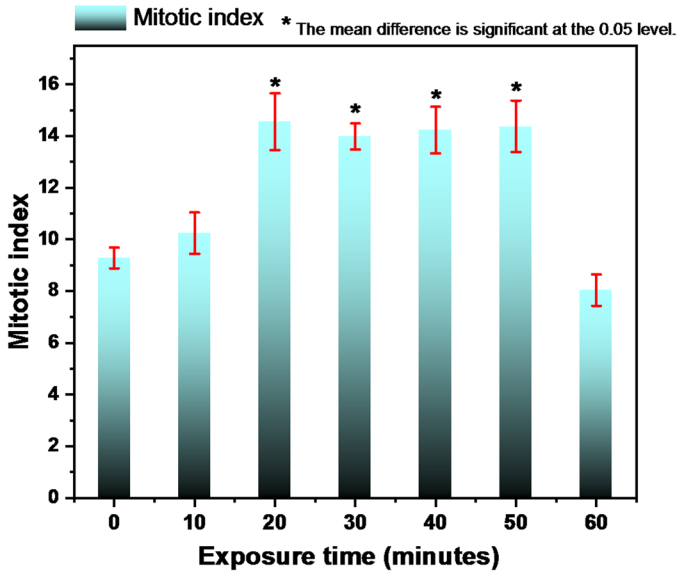
Mitóza sa bežne používa na skúmanie genotoxických látok pomocou testu chromozómových aberácií.

V tejto práci sa pozoruje významný nárast mitotického indexu so zvyšujúcim sa expozičným časom, a to na 40 a 50 minút pre pšeničné zrná. Zatiaľ čo expozičný čas 60 minút mal znižujúci účinok na mitotický index. Zvýšenie mitotického indexu podľa

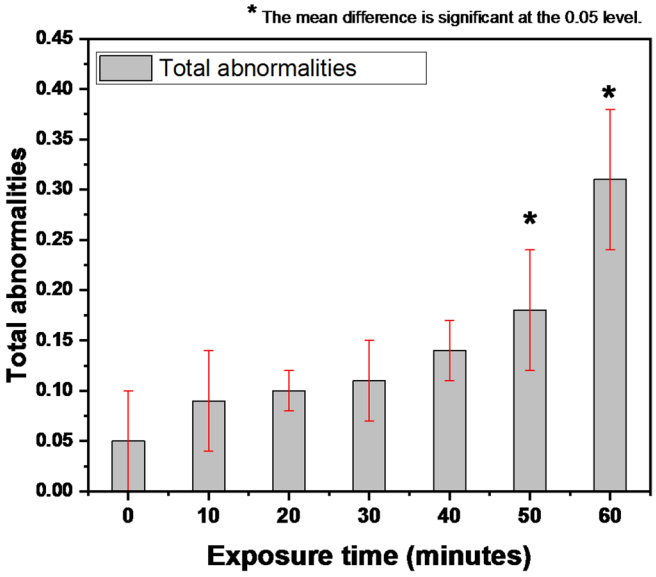
Tabuľka 3 Mitotický index a celkové chromozómové abnormality v bunkách koreňových špičiek pšeničných zŕn vystavených mikrovlnnému žiareniu

Expozičný čas (minúty)	Mitotický index (priemer ± SE)	Celkové abnormality (priemer ± SE)
Ovládanie	9,28 ± 0,4	0,05 ± 0,05
10	10,24 ± 0,8	0,09 ± 0,05
20	14,55 ± 1,1*	0,10 ± 0,02
30	13,98 ± 0,5*	0,11 ± 0,04
40	14,23 ± 0,9*	0,14 ± 0,03
50	14,37 ± 1,0*	0,18 ± 0,06*
60	8,04 ± 0,6	0,31 ± 0,07*

* Priemerný rozdiel je významný na úrovni 0,05



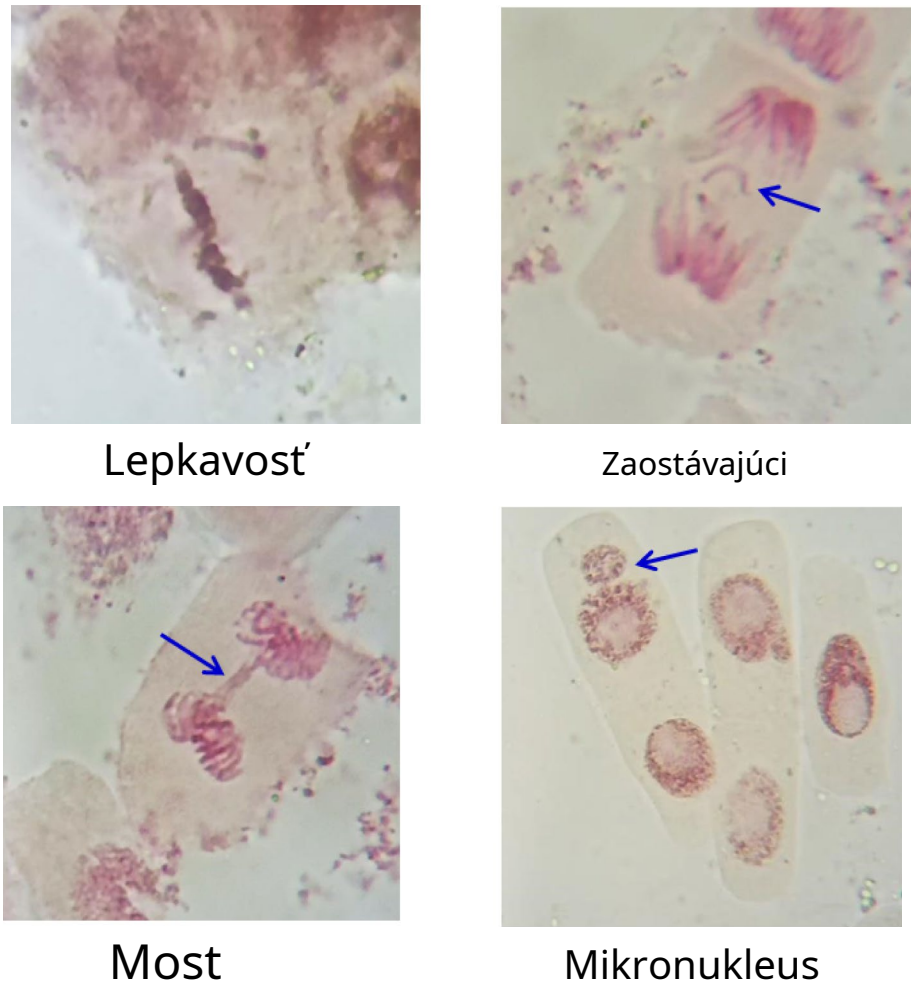
Obr. 2 Mitotický index v bunkách koreňových špičiek pšeničných zŕn vystavených mikrovlnnému žiareniu



Obr. 3 Celkové chromozómové abnormality v bunkách koreňových špičiek pšeničných zŕn vystavených mikrovlnnému žiareniu

Jayasree a kol. [18 rokov] často vychádza z promontórneho účinku látok na bunkový cyklus, čo vedie k zvýšenej syntéze DNA [18 rokov]. Vo všeobecnosti krátke expozície stimulujú a dlhé expozície brzdia.

Získané výsledky ukázali, že vystavenie mikrovlnnému žiareniu stimuluje indukciu rôznych typov chromozómových aberácií, ktoré vykazujú významné percento v bunkách vystavených mikrovlnnému žiareniu počas 60 minút v porovnaní s kontrolnou skupinou. S tým súhlasí aj Mihaela [12], ktorí uviedli, že vystavenie semien rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou 900 MHz počas rôznych časových intervalov, medzi 1,0 a 36,0 hodinami, ktoré bolo aplikované na semená pred procesom klíčenia, spôsobilo zvýšenie mitotického indexu a frekvencie chromozómových aberácií [32].



Obr. 4 Typy chromozómových abnormalít v bunkách koreňových špičiek semien pšenice vystavených mikrovlnnému žiareniu

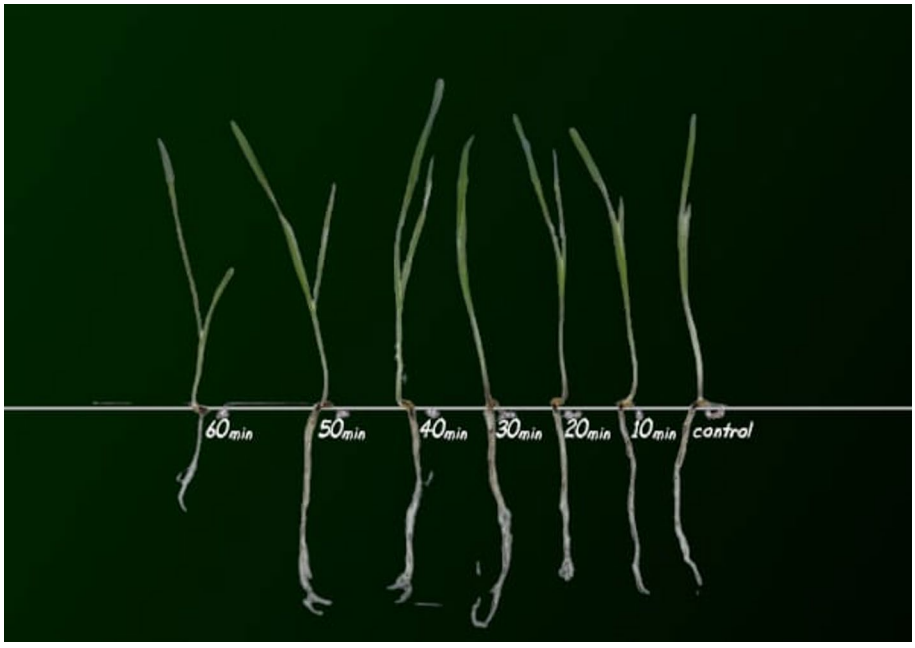
V rovnakom duchu Tkalec a kol. [44] uviedol, že miera klíčenia a dĺžka koreňov sa po vystavení elektromagnetickému poľu s frekvenciou 900 MHz významne nezmenili, ale modulované pole s dobou expozície 4 hodiny významne zvýšilo mitotický index v porovnaní s príslušnými kontrolami v*Allium cepa*prípad semien [44Percento mitotických abnormalít sa zvyšovalo s danými poľnými podmienkami.

Podobné výsledky získali Kumar a kol. [24], ktorí informovali o cytogenetických dôsledkoch žiarenia elektromagnetického poľa s frekvenciou 900 MHz a 1800 MHz s použitím*Allium cepa* meristematické bunky koreňa [24].

Zmenená mitotická rýchlosť rastliny vystavenej EMR sa pripisuje najmä interferencii v normálnych krokoch mitózy a tvorby vretienka, zlyhaniu replikácie DNA a syntézy bielkovín, produkcii, funkcii a regulácii enzýmov a nízkej úrovni tvorby ATP v dôsledku zníženej oxidačnej fotofosforylácie [30].

Už dlho je známe, že žiarenie má škodlivé účinky na rastliny. Je známe, že spôsobuje chromozomálne abnormality, poškodenie DNA, potlačenie klíčenia semien a poškodzuje exponované tkanivá. Mikrovlnné žiarenie tiež ovplyvňuje aktivitu enzýmov. Je známe, že narúša funkciu enzýmov, čo vedie k poruche funkcie buniek a ich smrti [3].

Ako je znázornené na obr.5, aberantné bunky vykazujú rôzne typy chromozómových abnormalít vrátane lepkavosti, mostíkov, zaostávajúcich chromozómov a mikronukleov. Pozorované



Obr. 5 Vplyv mikrovlnného žiarenia na dĺžku koreňov a výhonkov rastlín pšenice

Mitotické abnormality možno vysvetliť poškodením mitotického vretienka spôsobeným aplikáciou elektromagnetických polí.

Podobné chromozómové aberácie pozoroval Răcuciu [32] ktorí uviedli, že mikronukley, interchromatínové mostíky, retardované chromozómy a chromozómové fragmenty boli indukované v*Zea mays*semená vystavené rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou 900 MHz počas rôznych časových intervalov, medzi 1,0 a 36,0 hodinami [32].

V rovnakej súvislosti Qureshi a kol. [30] uviedli, že rádiofrekvenčné žiarenie vyvoláva genotoxické a karcinogénne účinky na bunky koreňových špičiek cíceru.

Souguir a kol. [37] uviedli, že lepkavosť je známa ako nezvratná chromozómová abnormalita, indikátor toxicity a v konečnom dôsledku príčina bunkovej smrti [37]. Táto anomália sa považuje za aberáciu chromatidového typu a pripisuje sa mnohým faktorom, ako je prepletenie interchromozomálnych chromatínových vlákien, degradácia alebo depolymerizácia chromozomálnej DNA a kondenzácia DNA. Iní ju však považujú za dôsledok poruchy deliaceho vretienka [21]. Mosty vznikajú z dicentrických chromozómov spôsobených neúspešnými opravami dvojvláknových zlomov DNA alebo fúziou koncov telomér. Zaostávajúce chromozómy boli s najväčšou pravdepodobnosťou výsledkom zlyhania v organizácii vretienkového aparátu [39,45]. Khanna a Sharma [21] zistili, že mikronukley sa môžu objaviť v dôsledku vývoja izolovaného chromozómu z nerovnomerného rozdelenia genetického materiálu [21]. Mikronukley indukované gama žiarením môžu pochádzať z acentrických fragmentov po zlomení chromozómov alebo z celých zaostávajúcich chromozómov v dôsledku dysfunkcie mitotického aparátu [19].

Ako uvádza Bigolin Teixeira et al. [7], stres spôsobuje nadprodukciu reaktívnych foriem kyslíka (ROS) a táto nepravidelnosť v ROS spôsobuje pozoruhodné oneskorenie prechodu z profázy do prometafázy, čo ovplyvňuje separáciu chromozómov v anafáze, vývoj chromozómov a jadrovú dynamiku [7].

Tabuľka 4 Vplyv mikrovlnného žiarenia na dĺžku koreňov a výhonkov rastlín pšenice

Doba vystavenia (minúty)	Dĺžka koreňa (Priemer ± SE)	Dĺžka streľby (Priemer ± SE)
Ovládanie	11,8 ± 0,1	17,1 ± 0,2
10	11,6 ± 0,4	17,6 ± 0,1
20	13,9 ± 0,2*	18 ± 0,12*
30	16,7 ± 0,6*	17,6 ± 0,18
40	13,4 ± 0,3*	18,8 ± 0,4*
50	12,7 ± 0,40	17,8 ± 0,08*
60	10,5 ± 0,24*	16,2 ± 0,12*

* Priemerný rozdiel je významný na úrovni 0,05

4.3 Dĺžka koreňa a výhonku

Výsledky získané v tejto štúdii ukázali pozoruhodnú stimuláciu rastu rastlín v zrnách vystavených mikrovlnnému žiareniu po krátku dobu (nízka dávka), čo sa zaznamenalo z hľadiska dĺžky koreňov a výhonkov. Po 15 dňoch siatia (3 opakovania pre každú vzorku) boli rastliny zozbierané. Bola zmeraná dĺžka koreňov a výhonkov (ako je znázornené na obr.5). Ako je uvedené v tabuľke4, dĺžka koreňov a výhonku bola u kontrolných rastlín zaznamenaná ako 11,8 a 17,1 cm. Zvýšená dĺžka koreňov a výhonku 13,9 a 18 cm bola zaznamenaná v ožiarených vzorkách po 20 minútach. Najvyššia hodnota dĺžky koreňov 16,7 cm bola pozorovaná v ožiarených vzorkách po 30 minútach, zatiaľ čo najvyššia hodnota dĺžky výhonku 18,8 cm bola zaznamenaná vo vzorkách exponovaných 40 minút. Dlhodobá expozícia (60 minút) znížila dĺžku koreňov a výhonku na 10,5 a 16,2 cm.

Výsledky odhalili stimuláciu dĺžky koreňov a výhonkov ako dôsledok krátkodobej expozície (od 10 do 50 minút) mikrovlnnému žiareniu s frekvenciou 9,88 GHz, ako aj dlhodobej expozície (60 minút) dĺžky odumretých koreňov a výhonkov. Je to v súlade s Abu-Elsaoudom a Qari [1], ktorí skúmali semená jačmeňa vystavené ôsmim rôznym expozičným periódam mikrovlnného žiarenia od 0 do 600 s s frekvenciou 2,45 GHz. Uviedli, že predĺžené vystavenie mikrovlnám viedlo k významnému poklesu výhonkov, koreňov, výšky rastlín a rastlinnej biomasy u rastlín jačmeňa. Môžeme to teda zjednodušene povedať, že proliferácia koreňov a výhonkov je krátkodobá a redukcia dlhodobá.

V rovnakej súvislosti Kumari a kol. [25] uviedli, že stimulačný účinok mikrovlnného žiarenia s frekvenciou 9,3 GHz na rast a vývoj rastlín paradajok bol preukázaný šírením signálnych podnetov a kódovaním informácií, ktoré ovplyvňujú a manipulujú so signálnym systémom rastlín. Abu-elsaoud [2] podporili možný stimulačný účinok mikrovlnného žiarenia na rast a klíčenie šiestich rôznych genotypov egyptskej pšenice s použitím rôznych expozičných období, ktorý je závislý od dávky.

Zistenia v tejto práci sú v rozpore s predtým publikovanými údajmi, kde environmentálne žiarenie na sadenice sóje znížilo rast rastlín, čo zdôrazňuje, že netepelné úrovne expozície žiareniu s frekvenciou 900 MHz neboli pre rast rastlín prospešné [13].

Bolo hlásené, že vystavenie mikrovlnnému žiareniu spôsobilo zvýšenie dĺžky koreňov, dĺžky výhonkov a percenta klíčenia odrody ryže MR 219 na 100 % pri ošetrení frekvenciou 2450 MHz počas 10 hodín [41]. Toto bolo vysvetlené skutočnosťou, že množstvo energie uvoľnenej mikrovlnami zvýšilo pohyb molekúl vody a zvýšilo absorpciu vody embryami semien ryže MR 219 [16Na druhej strane, inhibičný účinok na klíčenie semien bol spôsobený vyšším výkonom a dlhšou expozíciou.

čas spôsobujúci, že semená absorbujú viac energie, čo má za následok zhoršenú funkciu buniek a životaschopnosť semien [35].

Vo všeobecnosti mikrovlnné ožarovanie urýchľuje chemické reakcie a ovplyvnená molekula sa neustále prispôsobuje meniacemu sa poľu média, čo spôsobuje premenu elektromagnetickej energie na tepelnú energiu. V dôsledku toho môže mať škodlivé alebo smrteľné účinky na bunky bez ohľadu na chemické väzby, ktoré ovplyvňujú nabité častice, čo vedie k dipólovej molekulárnej orientácii alebo zahŕňa zmeny napätia v bunkovej membráne [14,33].

5 Závery

Rastliny sú mimoriadne zložité tvory, ktoré reagujú odlišne na mnohé stresy v rôznych environmentálnych situáciách. Keď niektorí výskumníci skúmali vplyv takéhoto žiarenia na rastliny, výsledky boli zmiešané. Vzhľadom na to naša štúdia predpokladá vplyv mikrovĺn na klíčenie semien, delenie buniek a rast pšenice ako komerčnej plodiny. Získané výsledky ukázali, že predsiatie vystavenia zŕn mikrovlnnému žiareniu s frekvenciou 9,88 GHz a výkonom 4,6 mW v časových intervaloch 10, 20, 30, 40 a 50 minút ovplyvnilo klíčenie a mitotické delenie buniek testovaných rastlín. Doba expozície 60 minút však znížila proliferáciu buniek a indukovala aberantné bunky. Môžeme teda konštatovať, že mikrovlnné žiarenie môže mať dobrý účinok reguláciou dávkovania a minimalizáciou času vystavenia semien žiareniu.

Príspevky autorov

Dohľad HK, MM M a RH, experimentálna práca a analýza; diskusia HK a RH; zdroje MY a AA a pripravené obrázky; HK, MM a RH napísali hlavný text rukopisu. Všetci autori recenzovali rukopis.

Financovanie

Financovanie s otvoreným prístupom poskytla agentúra The Science, Technology & Innovation Funding Authority (STDF) v spolupráci s Egyptskou znalostnou bankou (EKB). Tento výskum nezískal žiadne externé financovanie.

Dostupnosť údajov

Všetky údaje, ktoré podporujú túto štúdiu, sú zahrnuté v predloženom rukopise.

Vyhlásenia

Schválenie etickej problematiky a súhlas s účasťou

Neuplatňuje sa.

Súhlas so zverejnením

Neuplatňuje sa.

Protirečiace záujmy

Autori vyhlasujú, že nemajú žiadne konkurenčné záujmy.

Prijaté: 13. januára 2026 / Schválené: 15. júna 2026

Published online: 06 July 2026

Referencie

1. Abu-elsaoud AM, Qari SH. Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie, rast sadeníc a únik elektrolytu jačmeňa (Hordeum vulgare L). CATRINA. 2017;16(1):11–24.
2. Abu-elsaoud AM. Vplyv mikrovlnnej elektromagnetickej rádiofrekvencie na klíčenie a rast sadeníc, dôsledky šiestich kultivarov pšenice Triticum aestivum, pokroky v environmentálnej biológii, vplyv mikrovlnnej elektromagnetickej rádiofrekvencie na klíčenie a rast sadeníc. Adv Environ Biol. 2015;9(24): 270-280.
3. Aisha K, Saba B, Sameera A. Účinky mikrovlnného žiarenia na morfologické a biochemické aspekty niektorých hospodársky dôležitých bylín. Am Sci Res J Eng Technol Sci. 2019; 51(1)156–65.
4. Amirnia R. Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie a rast sadeníc semien sóje (Glycine max). Adv Environ Biology. 2014;8(24):311–4.
5. Araújo SDS, Paparella S, Dondi D, Bentivoglio A, Carbonera D, Balestrazzi A. Fyzikálne metódy na posilnenie semien: Výhody a výzvy v technológii semien. Front Plant Sci. 2016;7(máj):1–12.https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646.
6. Balmori A. Možné účinky elektromagnetických polí z telefónnych stožiarov na populáciu bociana bieleho (Ciconia ciconia). Electromagn Biol Med. 2005;24:109–19.https://doi.org/10.1080/15368370500205472.

7. Bigolin Teixeira S, Nunes Pires S, Espinel Ávila G, da Silva Moura D, Peter R, Bobrowski L, V., Deuner S. Cytogenetická aktivita koreňových meristémov ryže v reakcii na podmieňovanie v mrkvovom extrakte a slanosť. J Experimental Agric Int. 2018;24(5):1–12.https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/42487SE-Pôvodný výskumný článok.
8. Omidvari M, Abbaszadeh-Dahaji P, Hatami M, Kariman K. Kapitola 2 – Biokontrola: nová ekologická stratégia zmierňovania chorôb rastlín. In Ghorbanpour M, Adnan Shahid MBT-PSM, editori. Academic Press; 2023. s. 27–56.https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89871-3.00020-3.
9. Đukić V, Miladinov Z, Dozet G, Cvijanović M. Pulzné elektromagnetické pole – pestovateľský postup používaný na zvýšenie klíčivosti a výnosu sójových semien. Zemdirbyste-Agriculture. 2017;104(4):345–52.https://doi.org/10.13080/za.2017.104.044.
10. Fisayomi OO, Adeyinka A, Oluwatosin J, Oyindamola F. Účinky nízkeho a stredného mikrovlnného žiarenia na klíčenie sadeníc fazule a kukurice. Int J Acad Multidisciplinary Res. 2021;5(9):197–206.
11. Govindaraj M, Masilamani P, Albert VA, Bhaskaran M. Vplyv fyzikálneho ošetrenia semien na výnos a kvalitu plodín: Prehľad. Agricultural Reviews. 2017;38(1):1–14.https://doi.org/10.18805/ag.v0iOF.7304.
12. Haela R, Cuc. Účinky rádiofrekvenčného žiarenia na bunky koreňových hrotov Zea mays. Roumanian Biotechnol Lett. 2009;4(3):4365–9.https://api.semanticscholar.org/CorpusID:36524877.
13. Halgamuge MN, Yak SK, Eberhardt JL. Znížený rast sadeníc sóje po vystavení slabému mikrovlnnému žiareniu z mobilného telefónu a základňovej stanice GSM 900. Bioelektromagnetics. 2015;36(2):87–95.https://doi.org/10.1002/BEM.21890 .
14. Halmagyi A, Surducan E, Surducan V. Vplyv nízko- a vysokovýkonného mikrovlnného žiarenia na rastliny sekvojovca pestované in vitro a ich zotavenie po kryoskladovaní. J Biol Phys. 2017;43(3):367–79.https://doi.org/10.1007/s10867-017-9457-4.
15. Hutter HP, Moshammer H, Wallner P, Kundi M. Subjektívne symptómy, problémy so spánkom a kognitívny výkon u osôb žijúcich v blízkosti základňových staníc mobilných telefónov. Occup Environ Med. 2006;63:307–13.
16. Jakubowski T. Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie hľúz Solanum tuberosum L. Bangladesh J Bot. 2016;45(5):1253–5.
17. Jakubowski T. Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie hľúz Solanum tuberosum L. Bangladesh J Bot. 2016;45(5):1253–5.
18. Jayasree S, Jishma KB, Princy TV, Shahina Beegum PP, Sharfuneesa KA, Sheeba NR a kol. Štúdie predikcie toxicity rôznych pôdnych vzoriek mitotickou aktivitou a chromozomálnym správaním v koreňových meristémoch Allium cepa L. J global Biosci. 2014;3(7):1046–52.
19. Juchimiuk-Kwasniewska J, Brodziak L, Maluszynska J. FISH v analýze tvorby mikronukleov indukovaných gama žiarením v jačmeni. J Appl Genet. 2011;52(1):23–9.https://doi.org/10.1007/s13353-010-0017-x.
20. Kanwal S, Tariq M, Dawar S. Vplyv mikrovlnného žiarenia na rastliny infikované patogénmi koreňovej hniloby. Pak J Bot. 2018;50(6):2389–93.
21. Khanna N, Sharma S. Test chromozomálnych aberácií koreňa Allium Cepa: Prehľad. Indian J Pharm Biol Res. 2013;1(3):105–19.
22. Knox OGG, McHugh MJ, Fountaine JM, Havis ND. Účinky mikrovĺn na hubové patogény pšeničných semien. Crop Prot. 2013;50:12–6.https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.03.009.
23. Kretova Y, Tsirulnichenko L, Naumenko N, Popova N, Kalinina I. Aplikácia mikrovlnného ošetrenia na zníženie kontaminácie jačmeňa. Agron Res. 2018;16(5):2079–87.
24. Kumar A, Kaur S, Chandel S, Singh HP, Batish DR, Kohli RK. Porovnávacia cyto- a genotoxicita elektromagnetického poľa s frekvenciou 900 MHz a 1800 MHz v koreňových meristémoch Allium cepa. Ecotoxicol Environ Saf. 2020;188:109786.https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109786.
25. Kumari N, Verma S, Sharma V. Manipulácia elektrického signalizačného systému rastlín rajčiaka pomocou mikrovlnného žiarenia na zvýšenie produktivity a nutričnej hodnoty plodín. Comput Electron Agric. 2018;154:330–40.https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.020
26. Li Y, Narayanan M, Shi X, Chen X, Li Z, Ma Y. Tvorba biofilmov v baktériách podporujúcich rast rastlín na zmiernenie agroenvironmentálneho stresu. Sci Total Environ. 2024;907:167774.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167774.
27. Mishra T, Kushwah P, Dholiya K, Kothari V. Vplyv nízkovýkonného mikrovlnného žiarenia na mikroorganizmy a iné formy života. Adv Microw Wirel Technol. 2013;1(1):4–11.https://doi.org/10.12966/amwt.05.02.2013.
28. Mohsenkhah M, Mahzoon M, Talei D. Mikrovlnné žiarenie, klíčenie semien a rast sadeníc u papriky (Capsicum annuum L.). Hortic Int J. 2018;2(6):332–6.https://doi.org/10.15406/hij.2018.02.00072.
29. Ortiz J, Suarez D, Puentes A, Velasquez P, Santis Navarro A. Porovnanie účinkov magnetických, elektrických a elektromagnetických polí na klíčenie a rast semien kukurice (Zea Mays L.). Chem Eng Trans. 2015;43:169–74. https://doi.org/10.3303/CET1543029. Články o výskume SE.
30. Qureshi ST, Memon SA, Abassi AR, Sial MA, Bughio FA. Rádiofrekvenčné žiarenie vyvolalo genotoxické a karcinogénne účinky na bunky koreňových špičiek cíceru (Cicer arietinum L.). Saudi J Biol Sci. 2017;24(4):883–91.https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016 . 02.011.
31. Răcuciu M, Iftode C, Miclăuş S. Vplyv žiarenia s frekvenciou 1 GHz pri nízkej špecifickej absorpcii energie na proces mitotického delenia rastlín. Int J Environ Sci Technol. 2017;15:1233–42.https://doi.org/10.1007/s13762-017-1490-0.
32. Răcuciu M. Účinky rádiofrekvenčného žiarenia na bunky koreňových hrotov Zea mays. Roumanian Biotechnol Lett. 2009;14(3):4365–9.
33. Radzevičius A, Sakalauskienė S, Dagys M, Simniškis R, Karklelienė R, Juškevičienė D, et al. Diferenciálna fyziologická odozva a antioxidačná aktivita vo vzťahu k vysokovýkonnému ožiareniu mikrovlnnými vlnami a teplote klíčkov paradajok. Poľnohospodárstvo. 2022.https://doi.org/10.3390/agriculture12030422.
34. Ragha L, Mishra S, Ramachandran V, Bhatia MS. Vplyv nízkovýkonných mikrovlnných polí na klíčenie semien a rýchlosť rastu. J Electromagn Anal Appl. 2011;3(január):165–71.https://doi.org/10.4236/jemaa.2011.35027.
35. Rifna EJ, Ramanan R, K., Mahendran R. Nové technologické aplikácie na zlepšenie klíčenia semien. Trends Food Sci Technol. 2019;86:95–108.https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029.
36. Santinirl R, Santini P, Ruz P, Le, Danze JM, Seignel M. Prieskumná štúdia ľudí žijúcich v blízkosti základňových staníc mobilných telefónov. ELECTRON IAGNETIC BIOLOGY Med. 2003;22(1):41–9.
37. Souguir D, Abd-Alla HI, Hörmann G, Hachicha M. Chromozomálne a jadrové zmeny v bunkách koreňových špičiek Vicia faba vyvolané chloridom sodným. Výskum Water Environ: Publikácia Res Water Environ Federation. 2018;90(2):164–71. https://doi.org/10.2175/106143017X14902968254827.

38. Szopi D, Dorna H. Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie a zdravie semien mrkvy (Daucus carota L.). Agronomy. 2021;11(2571):1–14.
39. Tabur S, Demir K. Cytogenetická odpoveď 24-epibrassinolidu na bunky koreňového meristému semien jačmeňa v zasolení. Plant Growth Regul. 2009;58(1):119–23.https://doi.org/10.1007/s10725-008-9357-5.
40. Taha R, El-Samad A, Youness HM, Nazmy M, H., Mustafa M. Vplyv vystavenia mikrovlnnému žiareniu na klíčenie a vývoj sadeníc rastlín pšenice. J Sci Res Sci. 2025;42(2):36–68.https://doi.org/10.21608/jsrs.202 5.360333.1147.
41. Talei D, Valdiani A, Maziah M, Mohsenkhah M. Reakcia klíčenia odrody ryže MR 219 na rôzne časy a obdobia expozície mikrovlnnej frekvencie 2450 MHz. TheScientificWorldJournal. 2013;2013:408026.https://doi.org/10.1155/2013/4 08026.
42. Talei D, Yusop MK, Kadir MA, Valdiani A, Puad M. Reakcia sadeníc horkého dreva (Andrographis paniculata Nees.) na stres zo slanosti presahujúci prah tolerancie soli. AJCS. 2012;6(6):1059–67.
43. Iuliana C, Giancarla V, Sorina R, Maric S, Lončaric Z. Vplyv mikrovlnného žiarenia na klíčenie semien jačmeňa. *(Hordeum Vulgare L.).*48. Hrvatski i 8. Međunarodni Simpozij Agronoma, Dubrovník, Hrvatska, 17.-22. Veljač 2013. Zbornik Radova. januára.
44. Tkalec M, Malarić K, Pavlica M, Pevalek-Kozlina B, Vidaković-Cifrek Z. Vplyv rádiofrekvenčných elektromagnetických polí na klíčenie semien a meristematické bunky koreňov Allium cepa L. Mutat Res. 2009;672(2):76–81.https://doi.org/10.1016/j.mr gentox.2008.09.022.
45. Utani K, Kohno Y, Okamoto A, Shimizu N. Vznik mikronukleov a ich vplyv na osud buniek v replikačnom strese. PLoS ONE. 2010;5(4):e10089.https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010089.
46. Vashisth A, Nagarajan S. Vystavenie semien statickému magnetickému poľu zvyšuje klíčivosť a skoré rastové charakteristiky cíceru (Cicer arietinum L). Bioelektromagnetics. 2008;29(7):571–8.https://doi.org/10.1002/bem.20426.
47. Wang S, Wang J, Guo Y. Mikrovlnné ožarovanie zvyšuje rýchlosť klíčenia pohánky tatárskej a obsah niektorých zlúčenín v jej klíčkoch. Pol J Food Nutr Sci. 2018;68(3):195–205.https://doi.org/10.1515/pjfns-2017-0025.
48. Winkler SA, Picot PA, Thornton MM, Rutt BK. Priame mapovanie SAR pomocou termoakustického zobrazovania: Štúdia uskutočniteľnosti. Magn Reson Med. 2017;78(4):1599–606.https://doi.org/10.1002/mrm.26517.
49. Yakymenko I., Sidorik E., Kyrylenko S., Chekhun V. Dlhodobé vystavenie mikrovlnnému žiareniu vyvoláva rast rakoviny: dôkazy z radarov a mobilných komunikačných systémov. Exp Oncol. 2011;33(2):62–70.
50. Zhi W, Wang L, Hu X. Nedávny pokrok v účinkoch mikrovlnného žiarenia na mozog. Military Med Res. 2017;4(29):1–14. https://doi.org/10.1186/s40779-017-0139-0.

Poznámka vydavateľa

Springer Nature zostáva neutrálny, pokiaľ ide o jurisdikčné nároky na publikovaných mapách a inštitucionálne príslušnosti.