Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

plants

MDPI

Článok

Znížená fotosyntetická účinnosť Tilia (*Tilia tomentosa*) Vystavenie rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu (RF-EMF) – analýza JIP testom

Julian Keller a Uwe Geier *

Forschungsring eV, 64295 Darmstadt, Nemecko; keller@forschungsring.de
* Korešpondencia: geier@forschungsring.de

Abstrakt

Rastúce využívanie bezdrôtových technológií výrazne zvyšuje vystavenie všetkých živých organizmov rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMF). Fyziologické účinky RF-EMF na rastliny však ešte neboli dostatočne preskúmané. V tejto štúdii sme skúmali účinky žiarenia RF-EMF vo frekvenčných rozsahoch 1890 – 1900 MHz (DECT) a 2,4 GHz plus 5 GHz (Wi-Fi) na fotosyntetický výkon rastlín Tilia (*Tilia tomentosa*). Zaznamenané rýchle tranzienty fluorescencie chlorofylu boli použité na analýzu štruktúry a funkcie PSII pomocou JIP-testu. Analýza fluorescencie chlorofylu*a*ukázali, že RF-EMF narúša procesy transportu elektrónov počas fotosyntézy.*Lípa*Rastliny vystavené RF-EMF indukovali pokles fotosyntetickej účinnosti (F_V/F_M) a inaktivácia časti reakčných centier PSII (RC/CS_O). Pozorovania starnutia a dĺžky života listov počas 102 dní ukázali, že vystavenie RF-EMF *Lípa*rastliny vykazovali zrýchlené starnutie.

Kľúčové slová:*Tilia tomentosa*; fotosyntéza; starnutie; stres; rádiofrekvenčné elektromagnetické polia; $F_V/F_M$$RC/CS_0$

1. Úvod

Rastúce využívanie bezdrôtových telekomunikačných technológií v posledných desaťročiach viedlo k výraznému nárastu vystavenia umelo generovaným rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMF). Prirodzené elektromagnetické polia – vrátane kozmických mikrovĺn, infračerveného žiarenia, viditeľného svetla, UV žiarenia a gama žiarenia – sa výrazne líšia od antropogénne generovaných RF-EMF, čo sa týka intenzity, frekvenčného spektra a polarizačných vzorcov [1]. Vysoké úrovne vystavenia RF-EMF, ktorým v súčasnosti čelíme, sú v dejinách Zeme bezprecedentné. Zistilo sa, že kľúčové faktory, ako je frekvenčný rozsah, trvanie a hustota výkonu, majú rôzny vplyv na rast a vývoj rastlín [2]. Zatiaľ čo väčšina predchádzajúcich štúdií sa zamerala na zvieratá a ľudí, na rastlinách sa uskutočnilo pomerne málo výskumu. Rovnako ako iné organizmy, aj rastliny sú vo svojom prostredí vystavené rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam. Početné štúdie naznačujú, že rádiofrekvenčné elektromagnetické polia môžu mať za určitých podmienok nepriaznivý vplyv na rastliny [3V predchádzajúcej štúdii sme identifikovali predtým prehliadaný vplyv RF-EMF na stresové reakcie šalátu. Experimenty ukázali, že
V skleníkových podmienkach spôsobovalo RF-EMF len minimálny priamy stres, ale narúšalo prirodzené reakcie rastlín na svetelný stres, čím sa stali náchylnejšími na svetelný stres v poľných podmienkach. Štúdia vo vonkajšom prostredí preukázala významný a systematický pokles fotosyntetickej účinnosti a zrýchlený čas kvitnutia v porovnaní s kontrolnou skupinou.

Check for updates

Prijaté: 5. mája 2026
Revidované: 8. júna 2026
Schválené: 10. júna 2026
Publikované: 12. júna 2026

Autorské práva:© 2026 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, d. Švajčiarsko. Tento článok je článok s e otvoreným prístupom distribuovaný podľa podmienokLicencia Creative na Comm Attribution (CC BY).

skupiny. Analýza génovej expresie odhalila, že dva gény súvisiace so stresom, violaxantín deepoxidáza (VDE) a zeaxantín epoxidáza (ZEP), boli u rastlín vystavených RF-EMF významne znížené [4]. V inej štúdii naše výsledky naznačujú, že vystavenie RF-EMF oslabuje hormetické reakcie vyvolané suchom u rastlín šalátu, a to ako z hľadiska veľkosti reakcie, tak aj rozsahu [5]. Prehľady z rokov 2024 a 2021 identifikujú nárast reaktívnych foriem kyslíka (ROS) ako kľúčový mechanizmus, ktorým RF-EMF ovplyvňuje rastliny. To môže spôsobiť zmeny v génovej expresii a rôznych metabolických procesoch, čo môže následne zhoršiť rast a vývoj [2,6]. Štúdie skúmajúce účinky RF-EMF na stromy sú stále zriedkavé, hoci obmedzené dostupné dôkazy naznačujú potenciálne škodlivé účinky [7–9Štúdia [7] zdokumentované poškodenie stromov v radiačnom poli mobilných základňových staníc. Okrem toho jednostranné poškodenie koruny, začínajúce na strane otočenej k anténe, naznačuje možnú súvislosť medzi RF-EMF a poškodením stromov. Na molekulárnej úrovni sa vystavenie RF-EMF spája so zmenami v génovej expresii; napríklad v paradajkách (*Lycopersicon esculentum*), najmenej päť génov súvisiacich so stresom je upregulovaných v reakcii na vystavenie RF-EMF [10–13]. Expozícia žaburinky (*Spirodela polyrhiza*) na RF-EMF vedie k spomaleniu rastu a vývojovým abnormalitám [14]. Podobná inhibícia rastu indukovaná RF-EMF bola pozorovaná aj u mungo fazule (*Vigna radiata*), kríkové ruže (*Rosa hybrida*) a reďkovky (*Raphanus sativus*) [15–17]. Okrem toho bol zaznamenaný aj vplyv RF-EMP na rôzne procesy v rastlinách vrátane fotosyntézy, génovej expresie, produkcie bielkovín a sekundárneho metabolizmu [18 rokov–21Metaanalýza z roku 2016 ukázala, že 152 (89,9 %) z celkovo 169 štúdií publikovaných medzi rokmi 1995 a 2016 našlo dôkazy o fyziologických zmenách vyplývajúcich z RF-EMF, zatiaľ čo 17 štúdií (10,1 %) neuviedlo žiadne účinky [22]. Počet štúdií je stále príliš malý a skúmaných bolo len niekoľko druhov rastlín. Okrem toho sa frekvencie, trvanie expozície a intenzity RF-EMF v jednotlivých štúdiách značne líšia, čo sťažuje priame porovnávanie ich výsledkov. Treba tiež poznamenať, že veľká časť výskumu účinkov RF-EMF na rastliny sa uskutočnila za prísne kontrolovaných skleníkových podmienok a vo väčšine prípadov zahŕňala krátkodobú expozíciu. Dlhodobé štúdie alebo štúdie vykonané v poľných podmienkach sú v súčasnosti dostupné len v obmedzenej miere [6].

Cieľom tejto štúdie je preskúmať vplyv dlhodobého, kontinuálneho vystavenia RF-EMF na fotosyntetickú účinnosť a nástup starnutia u...*Tilia tomentosa*stromy v realistickom vonkajšom prostredí. V tejto súvislosti je analýza rýchlej kinetiky fluorescencie, najmä pomocou JIP-testu, cenným prístupom k identifikácii a charakterizácii stresových reakcií rastlín [23].

2. Výsledky a diskusia

2.1. Nepretržité vystavenie RF-EMF viedlo k zníženiu jednotlivých parametrov JIP-testu

Funkcia a štruktúra fotosyntetického aparátu boli skúmané pomocou JIP-testu počas dlhodobého vystavenia RF-EMF. V posledných rokoch sa JIP-test široko používa na hodnotenie výkonnosti rastlín v stresových podmienkach [24–26]. Na vyhodnotenie účinkov expozície RF-EMF na fotochemické procesy fotosyntézy boli analyzované všetky parametre JIPtestu s cieľom identifikovať, ktoré aspekty fotosyntézy boli ovplyvnené. Parametre ovplyvnené RF-EMF boli vybrané na základe nasledujúcich kritérií: (1) aspoň jeden štatisticky významný rozdiel v porovnaní s kontrolnými rastlinami počas expozičného obdobia, (2) konzistentný smer pozorovaných účinkov a (3) mierny až silný Spearmanov korelačný koeficient (ρ) medzi trvaním expozície a fotosyntetickou účinnosťou. Nasledujúcich päť parametrov spĺňajúcich výberové kritériá je uvedených tu, zatiaľ čo všetky ostatné parametre sú uvedené v doplnkovom materiáli.

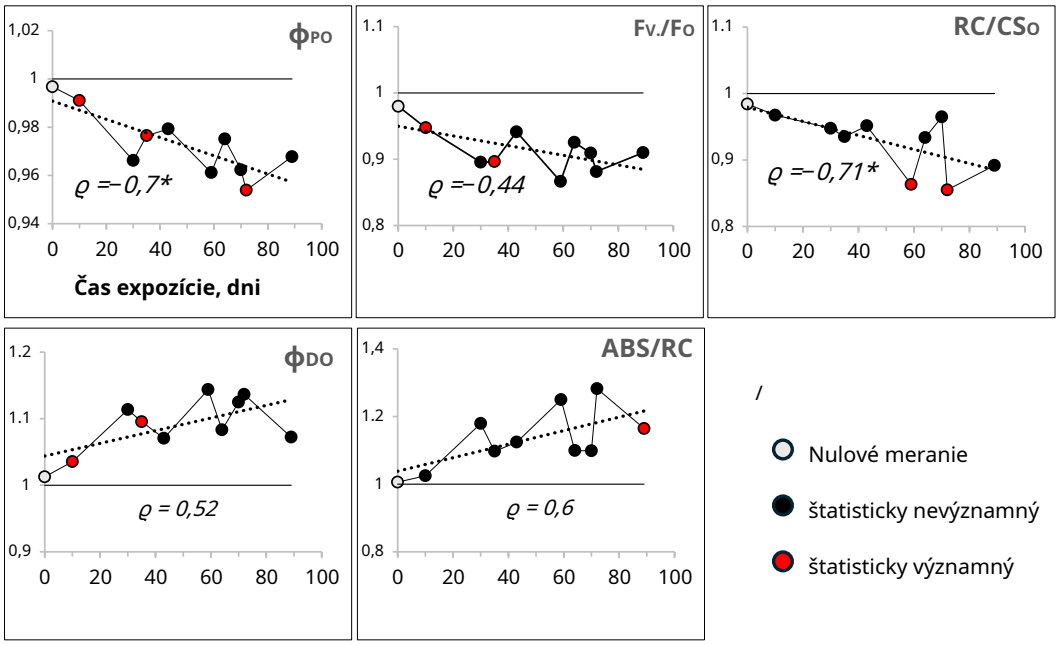
- φ_{PO}(tiež označované ako F_V/F_M) – odráža maximálny kvantový výťažok primárnej fotochemickej reakcie [26].

- Fv./Fo—je citlivým indikátorom funkčného stavu PSII, silne reaguje na štrukturálne alebo stresom vyvolané zmeny a je úmerný aktivite komplexu štiepiaceho vodu [27, 28].
- φDO(tiež označované ako Fo/Fm) – kvantový výťažok rozptylu energie [29].
- ABS/RC – Absorbovaný tok energie v chlorofyloch antény na reakčné centrum PSII; efektívna veľkosť antény [30].
- RC/CSo—hustota aktívnych reakčných centier na prierez, odvodená z delenia absorpčného toku na prierez (ABS/CSo, [31]) systémom ABS/RC.

Pre každý časový bod merania sa vypočíta pomer jednej ošetrenej skupiny k kontrolnej skupine takto:

$$Ošetrenél pomer kontroly = \frac{Priemerná\ hodnota\ zo\ všetkých\ meraní\ exponovaných\ rastlín}{Priemerná\ hodnota\ zo\ všetkých\ meraní\ kontrolných\ rastlín}$$

Pomer ošetrení ku kontrole menší ako jeden svedčí o nižšej fotosyntetickej výkonnosti ako u kontrolných skupín, s výnimkou φ.Robiťa ABS/RC, kde je opak pravdou. Obrázok1 zobrazuje pomery medzi ošetrenou a kontrolnou skupinou počas celého expozičného obdobia a či sú štatisticky významné. Na výpočet korelácie medzi trvaním expozície a účinnosťou fotosyntézy sa použil Spearmanov koeficient korelácie poradia rho ρ, ako sa to predtým urobilo v [4]. Vo všetkých piatich parametroch JIP testu sa pozorovala konzistentná stredne silná až silná korelácia medzi trvaním expozície a relatívnym zhoršením fotosyntetického výkonu. Tento monotónny pokles – analyzovaný pomocou Spearmanových koeficientov korelácie poradia Rho – naznačuje, že poškodenie fotochemického aparátu sa s postupujúcou dobou expozície výrazne zintenzívnilo.



Obrázok 1. Priebeh (deň 0 až deň 89) pomeru medzi liečenou a kontrolnou skupinou v časových bodoch merania pre parametre OJIP: φPO= (Fv./Fm), Fv/Fo, φDO= (Fo/Fm), ABS/RC a RC/CSoMedzi liečenou a kontrolnou skupinou nie sú žiadne štatisticky významné rozdiely v žiadnych nulových meraniach (biele bodky). Čierne bodky označujú štatisticky nevýznamné rozdiely medzi liečenou a kontrolnou skupinou; červené bodky – štatisticky významné rozdiely medzi liečenou a kontrolnou skupinou. Zobrazené sú aj Spearmanove koeficienty korelácie poradia Rho ρ medzi časom expozície a pomermi liečená/kontrolná skupina. Interpretácia ρ: −0,2 < ρ < 0,2: žiadna korelácia; −0,4 < ρ < −0,2 a 0,2 < ρ < 0,4: slabá korelácia; −0,6 < ρ < −0,4 a 0,4 < ρ < 0,6: mierna korelácia; −1,0 < ρ < −0,6 a 0,6 < ρ < 1,0: silná korelácia (ako bolo uvedené v [4]). Hviezdičky (*) za niektorými hodnotami ρ označujú štatistickú významnosť Spearmanovej korelačnej analýzy (p<0,05).

Pozorované klesajúce trendy vo viacerých ukazovateľoch výkonnosti fotosyntézy sledujú charakteristický vzorec typickej stresovej reakcie rastlín. φ_{PO}je jedným z najstabilnejších parametrov JIPtestu, pretože je zriedkavo ovplyvnený rastovými podmienkami a len okrajovo ovplyvnený miernym stresom [32–35]. Zníženie φ_{PO}zvyčajne naznačuje skôr chronické stresové poškodenie než dočasnú aklimatizáciu [36,37Rastliny sa často prispôsobujú stresu deaktiváciou funkčných reakčných centier PSII a ich premenou na „chladiče“, ktoré rozptyľujú prebytočnú energiu. Tento ochranný mechanizmus priamo znižuje počet aktívnych reakčných centier PSII (RC/CS_O) a vedie k zodpovedajúcemu poklesu F_V./F_O, ako aj zvýšenie absorpcie na reakčné centrum (ABS/RC) a kvantový výťažok disipácie energie φ_{DO}[38–41].

2.2. Analýza diferenčných kriviek v určitých krokoch indukčnej krivky (IC) ukazuje, že fotosyntetické procesy sú ovplyvnené dlhodobým vystavením RF-EMF

Diferenčné krivky (DC) umožňujú podrobnú porovnávaciu analýzu tvaru indukčnej krivky. Odčítaním hodnôt fluorescencie kontrolných rastlín od hodnôt exponovaných rastlín sa stanú zrejmými špecifické kinetické odchýlky. Výskyt pozitívnych alebo negatívnych pásov (t. j. lokalizovaných kinetických odchýlok) v týchto krivkách odráža posuny v energetickom toku a celkovom fotochemickom výkone, čo umožňuje presné vyhodnotenie zmien fotosyntetickej účinnosti vyvolaných expozíciou [26,39,42].

Konkrétne tieto odchýlky charakterizujú štyri primárne pásy: pásmo L (medzi O a 300µs), pásmo K (medzi O a J), pásmo H (medzi J a I) a pásmo G (medzi I a P) [42]. Spomedzi nich sú obzvlášť dôležité pásy L a K, pretože slúžia ako citlivé presymptomatické markery, ktoré sa objavujú ešte predtým, ako sa objavia akékoľvek viditeľné príznaky stresu [43].

Porovnali sme indukčnú kinetiku liečebnej a kontrolnej skupiny v časovom bode východiskového (deň 0) a konečného (deň 89) merania. Na začiatku neboli medzi skupinami zistené žiadne štatisticky významné rozdiely. Pri konečnom meraní sa však objavili zreteľné odchýlky: zatiaľ čo v pásmach H a G neboli pozorované žiadne významné abnormality, pásma L a K vykazovali štatisticky významné pozitívne posuny.

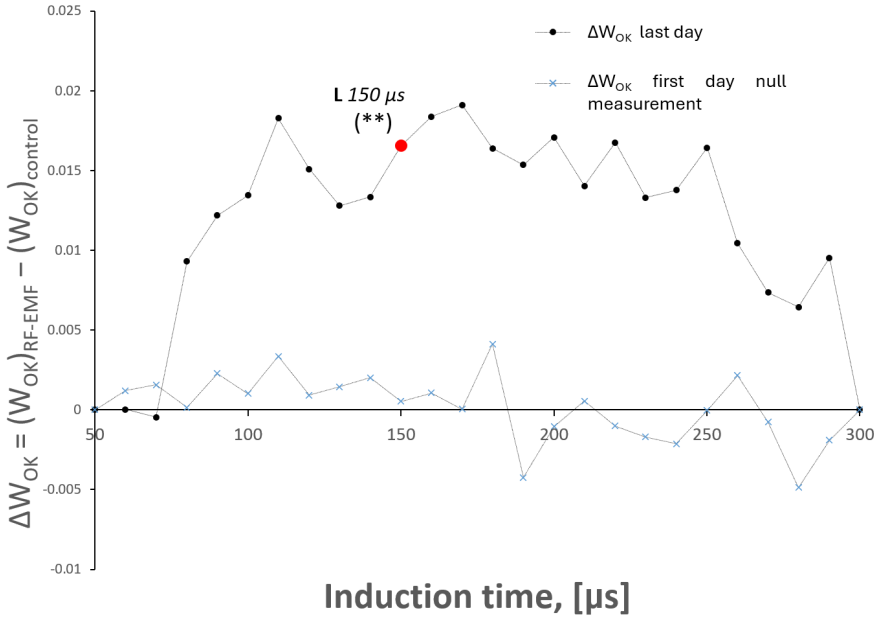
L-pásmo

Časť integrovaných obvodov medzi 50 a 300µs je dvojito normalizované pomocou $W_{V\ poriadku} = (F_t - F_o)/(F_K - F_o)$. Odčítaním hodnôt IC kontrolných rastlín od rastlín vystavených RF-EMF ($\Delta Z_{V\ poriadku} = (W_{V\ poriadku})_{RF\text{-}EMF} - (Z_{V\ poriadku})_{kontrola}$) poskytuje L-pásmo. Funkčná integrita PSII – konkrétne veľkosť antény a energetická konektivita medzi reakčnými centrami – je vysoko závislá od hustoty usporiadania proteínov vo fotosyntetickom aparáte [44]. L-pásmo najmä odráža štrukturálne usporiadanie alebo „zoskupenie“ jednotiek PSII v membráne tylakoidných grana, ako aj prepojenie medzi komplexmi zachytávajúcimi svetlo (LHCII) a reakčnými centrami [39,44,45].

Vznik pozitívneho L-pásu pri 150µv tejto štúdii (obrázok2) naznačuje potenciálne rozskupenie anténnych komplexov v dôsledku dlhodobého vystavenia RF-EMF [31].

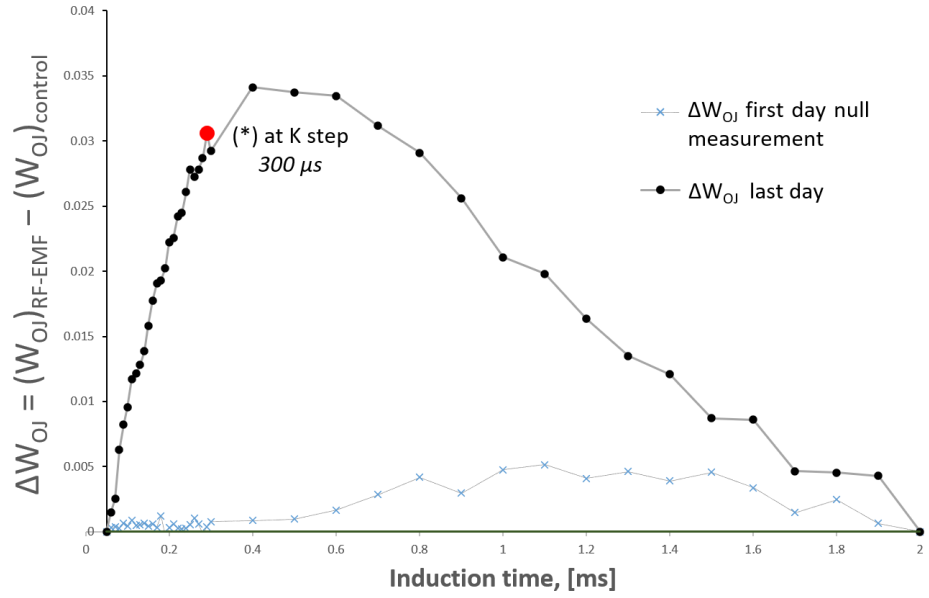
K-pásmo

Aby sme preskúmali priesečník IC medzi O (50µs) a J (2 ms), IC sú dvojito normalizované pomocou $W_{Ú.\ v.} = (F_t - F_O)/(F_J - F_O)$). DC sa vypočítal pomocou$\Delta Z_{Ú.\ v.} = (W_{Ú.\ v.})_{RF\text{-}EMF} - (Z_{Ú.\ v.})_{kontrola}$a zobrazuje K-pásmo. K-pásmo je vnútorne spojené so stabilitou komplexu uvoľňujúceho kyslík (OEC) na donorovej strane PSII. Vznik pozitívneho K-pásma typicky odráža kinetickú nerovnováhu, kde rýchlosť toku elektrónov z OEC do reakčných centier nie je dostatočná na uspokojenie dopytu akceptorovej strany [39,46, 47]. Tento jav je vo všeobecnosti vyvolaný čiastočnou inaktiváciou OEC [30] a/alebo zvýšenie funkčnosti antény PSII [48].



Obrázok 2. Kinetika rozdielov (ΔZv poriadku), vypočítané akoΔZv poriadku= (Wv poriadku)RF-EMF −(Zv poriadku)kontrola, čo ilustruje kinetické rozdiely medzi vzorkami vystavenými RF-EMF a kontrolnými vzorkami. Každá krivka predstavuje rozdiel medzi vystavenými a kontrolnými rastlinami v konkrétnom časovom bode (deň 1: základné meranie bez expozície; deň 89: posledný deň experimentu). V rámci L-pásu červená bodka označuje charakteristický bod približne na 150µs. ** vysoko významné (p<0,01) (Mann-Whitneyov U test).

V našej štúdii bol štatisticky významný pozitívny K-pás pozorovaný pri 300µs do konca expozičného obdobia. Toto bolo sprevádzané výrazne vyššou efektívnou veľkosťou antény (ABS/RC) v skupine vystavenej RF-EMF (časť2.1). Tieto zistenia naznačujú, že zväčšenie funkčnej veľkosti antény – spôsobené deaktiváciou reakčných centier – pravdepodobne vyvolalo spomínanú kinetickú nerovnováhu, ktorá sa prejavuje ako pozitívne K-pásmo (obrázok3).

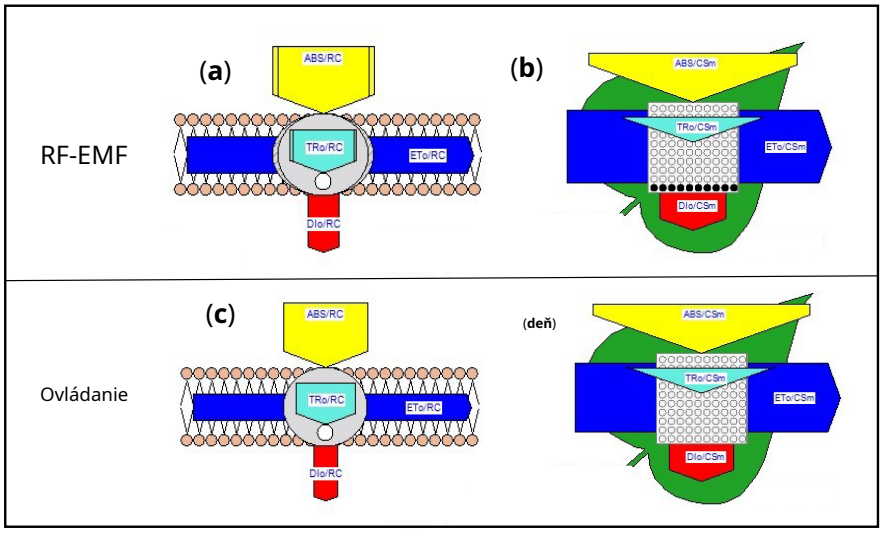


Obrázok 3. Kinetika rozdielov (ΔZú. v.), vypočítané akoΔZú. v.= (Wú. v.)RF-EMF −(Zú. v.)kontrola, čo ilustruje kinetické rozdiely medzi vzorkami vystavenými RF-EMF a kontrolnými vzorkami. Každá krivka predstavuje rozdiel medzi vystavenými a kontrolnými rastlinami v konkrétnom časovom bode (deň 1: základné meranie bez expozície; deň 89: posledný deň experimentu). V rámci K-pásma červená bodka označuje charakteristický bod približne na 300µs. * Štatisticky významné (p<0,05).

2.3. Analýza membránových a listových modelov energetických tokov odhaľuje, že fotosyntetické procesy sú ovplyvnené RF-EMF

V poslednom časovom bode merania (89. deň) sme aplikovali membránové a listové modely energetických tokov na porovnanie rastlín vystavených RF-EMP a kontrolných rastlín. Tieto modely poskytujú grafické znázornenie vzťahu medzi energetickými tokmi absorpcie svetelnej energie (ABS), zachytávania excitačnej energie (TRo) a nevyužitá strata energie (DI)o), a to ako na základe jedného RC, tak aj na základe excitovaného prierezu (CSm). Taktiež poskytuje hustotu aktívnych (QA-redukujúcich) RC a podiel tichých RC. Tieto tiché, neaktívne RC nie sú schopné premeniť svetelnú energiu na fotochemické reakcie a túto excitačnú energiu emitujú ako teplo [30,48,49].

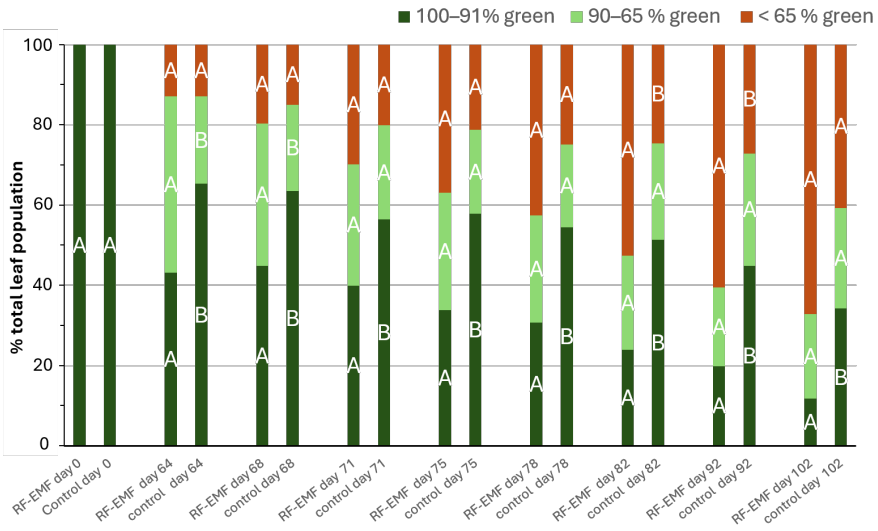
Pri konečnom meraní (89. deň) vykazovali rastliny vystavené RF-EMF výrazne vyššie špecifické energetické toky na reakčné centrum, konkrétne pre ABS/RC (p=0,02), TRo/RC (p= 0,01) a DIo/RC (p=0,05). Okrem toho modely listov kvantifikovali 10 % podiel tichého RC (znázorneného ako čierne kruhy) v exponovanej skupine (obrázok4).



Obrázok 4. Membránové modely vľavo (**a**,**c**) zobrazujú špecifické toky energie na RC. Modely listov vpravo (**b**,**deň**) predstavujú fenomenologické toky energie na excitovaný prierez CSmRelatívna veľkosť jednotlivých tokov je označená šírkou zodpovedajúcej šípky. Ovál okolo TRo/RC v membránovom modeli ukazuje hustotu aktívnych RC (RC/CSm), zatiaľ čo šrafovaná oblasť okolo oválu TRo/RC označuje tiché RC. V modeli listu biele kruhy označujú aktívne RC (RC znižujúce QA) a čierne kruhy neaktívne RC, nazývané aj chladiče alebo tiché RC [49Tieto tiché RC nie sú schopné premeniť svetelnú energiu na fotochemické procesy a všetku túto excitačnú energiu emitujú ako teplo [48]. ABS/RC = tok absorpcie svetla na reakčné centrum (zdanlivá veľkosť antény); tok zachytenej energie na reakčné centrum; ETo/RC tok elektrónového transportu na reakčné centrum; DIo/RC disipačná energia na reakčné centrum; Modely sú vykreslené pomocou softvéru Biolyzer verzie 4.0.30.03.02.

2.4. Dlhodobé vystavenie RF-EMF viedlo k zrýchlenému starnutiu

Na preskúmanie vplyvu kontinuálnej expozície RF-EMF na starnutie listov bol začiatok starnutia monitorovaný u ošetrených aj kontrolných rastlín. Rastliny vystavené RF-EMF vykazovali skoršie starnutie, čoho dôkazom bolo zníženie plochy zelených listov a zvýšenie plochy sfarbených listov. Obrázok5zobrazuje percentuálny pomer listov, ktoré začali počas ožarovania meniť farbu. Pokračujúce ožarovanie viedlo k rýchlejšiemu nástupu starnutia. Podiel listov so 100 – 91 % zelenej plochy bol po dlhodobom ožarovaní významne vyšší v kontrolnej skupine. Skorší nástup starnutia bol pozorovaný aj u*Trifolium arvense*rastliny vystavené RF-EMF [3].



Obrázok 5. Relatívne rozloženie stavu listov u rastlín vystavených RF-EMP a kontrolných rastlín. Na začiatku pozorovacieho obdobia boli všetky listy úplne zelené (100 %). Postupom času bol tento počiatočný stav klasifikovaný do troch kategórií: tmavozelená (91 – 100 % zelenej listovej plochy), svetlozelená (65 – 90 %) a hnedá (< 65 %). Obrázok teda znázorňuje časovú zmenu v podiele každej kategórie stavu listov v pomere k celkovej populácii listov. Rôzne písmená (A a B) označujú štatisticky významné rozdiely medzi skupinami (p<0,05).

3. Zhrnutie a závery

Naša hĺbková analýza JIP testom odhaľuje, že dlhodobé vystavenie RF-EMF vedie k trvalému zhoršovaniu fotosyntetického aparátu. To sa odráža v klesajúcich trendoch φ_{PO}, F_V/F_O, RC/CSOako aj rastúce trendy φ_{Robit}a ABS/RC v pomeroch ošetrených a kontrolných skupín v priebehu experimentu. Okrem toho, pri konečnom meraní, rastliny vystavené RF-EMP vykazovali vyššie energetické toky na aktívne reakčné centrum a 10 % reakčných centier bolo inaktivovaných (prevedených na tiché centrá).

Tieto tendencie sú *fenomenologicky* podobné zavedeným ochranným mechanizmom rastlín proti fotooxidačnému poškodeniu [40,50,51]. Takéto stresové podmienky často vedú k tvorbe reaktívnych foriem kyslíka (ROS), ktoré môžu spôsobiť priame fotooxidačné poškodenie proteínu D1 a mangánového klastra komplexu uvoľňujúceho kyslík (OEC). V tejto súvislosti premena aktívnych centier na „tepelné chloridy" pomáha riadiť nadmernú excitačnú energiu a slúži ako ochrana pred nadmernou excitáciou a nadmernou redukciou v reťazci transportu elektrónov [49,52–54].

Podobnosť medzi expozíciou RF-EMF a fotooxidačným stresom je ďalej podporená analýzou starnutia, keďže vystavené rastliny vykazovali výrazne skoršie starnutie listov. Je dobre známe, že nezvratné poškodenie fotosyntetického aparátu spôsobené chronickou fotoinhibíciou a akumuláciou ROS môže skrátiť funkčnú životnosť listov [55,56].

V našej predchádzajúcej štúdii o šaláte bola expozícia RF-EMF spojená so zníženou reguláciou VDE a ZEP – dvoch enzýmov nevyhnutných pre xantofylový cyklus, ktorý chráni rastliny pred fotooxidačným poškodením. Narušenie tohto cyklu ohrozuje schopnosť rastliny bezpečne rozptyľovať prebytočnú svetelnú energiu, čím zvyšuje jej zraniteľnosť voči fotoinhibícii. Predtým sme zistili, že svetelný stres v kombinácii s expozíciou RF-EMF viedol k významnému zníženiu maximálneho fotochemického kvantového výťažku F_V/F_M fotosystému II a nefotochemického zhášania (NPQ) v porovnaní s kontrolnou skupinou [4].

Predpokladáme, že dlhodobé vystavenie RF-EMF tiež oslabuje *Tilia tomentosa* reakcia na fotooxidačný stres, čo v konečnom dôsledku vyvoláva pozorované príznaky podobné stresu.

Uvedomujeme si, že v tejto fáze zostáva táto hypotéza len hypotézou; vzhľadom na povahu súčasnej literatúry a inherentnú komplexnosť environmentálnych štúdií in situ je tento postulát skôr interpretáciou fyziologických podpisov než definitívnou demonštráciou kauzality. Okrem toho, vzhľadom na to, že viaceré abiotické stresory často produkujú prekrývajúce sa fyziologické podpisy, nemožno vylúčiť, že k týmto pozorovaným účinkom prispeli alebo ich zosilnili aj iné vonkajšie faktory prostredníctvom synergických interakcií.

Napriek tomu paralela medzi našimi zisteniami a známymi fotoinhibičnými dráhami v kombinácii s potenciálom RF-EMF interferovať so základnými ochrannými mechanizmami, ako je xantofylový cyklus, podčiarkuje naliehavú potrebu cieleného výskumu. Keďže bezdrôtové technológie a extrémne poveternostné podmienky sa naďalej zintenzívňujú, pochopenie toho, či RF-EMP funguje ako stresor – či už samostatne, alebo znížením odolnosti rastlín voči iným environmentálnym tlakom – je kritickou oblasťou pre budúci výskum. Pochopenie týchto účinkov je nevyhnutné pre zabezpečenie odolnosti mestských ekosystémov v čoraz digitalizovanejšom a klimaticky nestabilnom svete.

4. Materiál a metódy

4.1. Pestovanie rastlín a vystavenie RF-EMF

Experiment sa uskutočnil na experimentálnom poli Forschungsring eV v Darmstadte v Nemecku (49°49′57,4″S, 8°34′22.2″E). Mladý *Tilia tomentosa* Stromy boli pestované v kvetináčoch na experimentálnom poli s použitím substrátu F.-E. Typ SoMi Appel (Hawita, Vechta, Nemecko), ktorý už obsahoval hnojivo DCM ECO-Xtra1 dodané výrobcom.

Experiment sa uskutočnil počas prechodného obdobia z leta na jeseň, od 28. júna do 19. septembra 2022. Podrobné časové mikrometeorologické údaje sú uvedené v doplnkových materiáloch. Na začiatku experimentu boli dvojročné rastliny rozdelené do dvoch skupín po 10 stromoch. Stromy boli vysadené v samostatných kvetináčoch. Jedna skupina bola vystavená RF-EMP, zatiaľ čo druhá slúžila ako kontrolná skupina. Kontrolné rastliny, umiestnené vedľa oblasti vystavenej RF-EMP, boli tienené pred blízkymi žiaričmi RF-EMP jemným kovovým plotom (veľkosť ôk: štvorcové otvory 13 mm; výška: 120 cm) a slúžili ako referenčná skupina. Rastliny vystavené RF-EMP boli umiestnené okolo zariadení emitujúcich RF-EMP v rovnakej vzdialenosti približne 1,5 m, aby sa zabezpečila rovnomerná expozícia. Medzi skupinou vystavenou RF-EMP a tienenou kontrolnou skupinou sa nevyskytli žiadne mikroklimatické odchýlky. Aby sa zabezpečila absolútna rovnocennosť podmienok prostredia, obe skupiny boli umiestnené približne 10 m od seba na rovnom, jednotnom, otvorenom poli s minimálnymi okolitými prekážkami alebo štrukturálnym tieňovaním. Okrem toho, kovový plot nebol postavený ako ohrada okolo kontrolnej skupiny; skôr bol nainštalovaný ako jedna voľne stojaca vertikálna bočná bariéra umiestnená v strede medzi týmito dvoma skupinami.

Vzhľadom na nedostatok literatúry o vplyve vysokofrekvenčného žiarenia na trvalky dreviny neboli k dispozícii dostatočné základné údaje na určenie, ktorá frekvencia by mala najvýznamnejší fyziologický účinok. V modernom mestskom a prímestskom prostredí je vegetácia neustále vystavená komplexnej zmesi simultánnych okolitých signálov zo zdrojov, ako sú inteligentné rozbočovače DECT a dvojpásmové siete Wi-Fi 2,4/5 GHz. Cieľom je vyhodnotiť, ako zmesi signálov z reálneho sveta ovplyvňujú mestské stromy v korunách stromov, ako napríklad... *Tilia tomentosa*, simulovali sme realistický scenár antropogénneho RF-EMF s vysokou hustotou s frekvenčnými rozsahmi 1880 – 1900 MHz (DECT) a 2,4 a 5 GHz (Wi-Fi). Expozíciu RF-EMF zabezpečovali dva Wi-Fi systémy (FritzBox 7530; AVM, Berlín, Nemecko) v kombinácii so základňovou stanicou DECT a dvoma DECT telefónmi (Motorola t412+, Motorola, Chicago, IL, USA; eko režim vypnutý). DECT telefóny boli udržiavané v nepretržitej komunikácii s ďalším terminálom. Úrovne žiarenia RF-EMF boli merané pomocou dvoch širokopásmových RF analyzátorov (Gigahertz Solutions, Langenzenn, Nemecko). Špičkové hustoty výkonového toku v

rozsah 1880–1900 MHz a 2,4 GHz, meraný analyzátorom HF59B (Gigahertz Solutions, Langenzenn, Nemecko) (700 MHz – 2,7 GHz) na rastlinách, bol 800µW/m2V pásme Wi-Fi 5 GHz, meranom analyzátorom HFW35C (Gigahertz Solutions, Langenzenn, Nemecko) (2,4 – 6 GHz), aj na rastlinách, boli hodnoty 400µW/m2boli zaznamenané. Naproti tomu merania RF-EMF okolitého pozadia aj tienených kontrolných rastlín priniesli hodnoty < 8µ W/m2pre rozsah 1880–1900 MHz/2,4 GHz a <4µW/m2pre pásmo 5 GHz, čo je menej ako 1 % zaznamenaných intenzít a pod spoľahlivým kvantifikačným prahom meracích zariadení.

Rýchla kinetika fluorescencie chlorofylu bola meraná a štatisticky analyzovaná po 48 hodinách aklimatizácie, aby sa zabezpečila porovnateľnosť medzi experimentálnymi skupinami. Potom boli aktivované žiariče RF-EMF a merania boli vykonávané v diskrétnych intervaloch.

4.2. Merania kinetiky rýchlej fluorescencie chlorofylu

Kinetika rýchlej fluorescencie chlorofylu v listoch bola meraná pomocou zariadenia Pocket PEA (Hansatech Instruments, King's Lynn, Spojené kráľovstvo). Meranie trvalo 1 s a intenzita saturačného svetla bola 3500µmol m−2s−1bol aplikovaný. Merania sa uskutočnili najmenej 2 hodiny po západe slnka, aby sa umožnila prirodzená aklimatizácia na tmu.

Pred experimentom boli náhodne vybrané listy rovnakého veku a označené na longitudinálne monitorovanie (dva na každom strome). Počas každého intervalu zaznamenávania sa vykonalo jedno meranie na list. Avšak akonáhle sa na počiatočnej sade vzoriek objavili viditeľné známky starnutia (43. deň), protokol sa upravil tak, že sa všetky merania presunuli na mladšie listy na ďalšej nodálnej úrovni naprieč všetkými rastlinami, aby sa zachovala fyziologická porovnateľnosť.

Parametre JIP-testu boli vypočítané pomocou softvéru PEA Plus (verzia 1.13, Hansatech, King's Lynn, Spojené kráľovstvo). Výsledky boli spriemerované zo všetkých jednotlivých meraní z tej istej skupiny.

4.3. Analýza starnutia listov

Starnutie listov bolo hodnotené vizuálnou fenotypovou klasifikáciou na základe progresívneho sfarbenia listov. Na začiatku experimentu (deň 0) boli všetky listy overené ako úplne zdravé a zelené, čo predstavuje 100 % zelenej listovej plochy.

Počas celého expozičného obdobia boli listy dynamicky monitorované a klasifikované do troch odlišných fyziologických kategórií na základe vizuálnej kontroly chromatických posunov a nekrotickej povrchovej plochy:

- Tmavozelená: 91 – 100 % zelenej listovej plochy (zdravé listy)
- Svetlozelená: 65 – 90 % plochy zelených listov (skorý rozklad chlorofylu)
- Hnedá: <65 % listov je zelených (pokročilé starnutie a nezvratné odumieranie tkaniva).

Jednotlivé listy boli hodnotené podľa týchto vizuálnych kritérií a zaradené do príslušných kategórií.

4.4. Štatistická analýza

Vzhľadom na nenormálne rozdelenie údajov bol na porovnanie liečenej a kontrolnej skupiny použitý neparametrický Mann-Whitneyov U test. Štatistická významnosť bola definovaná ako $p<0,05$. Všetky štatistické analýzy boli vykonané pomocou programu Jamovi (verzia 1.6.23).

Monotónny vzťah – kde premenné majú tendenciu meniť sa konzistentným smerom, ale nie nevyhnutne konštantnou rýchlosťou – medzi trvaním expozície a fotosyntetickým výkonom bol hodnotený pomocou Spearmanových koeficientov korelácie Rho. Korelačná analýza bola vykonaná v programe Microsoft Excel pomocou doplnku Real Statistics Resource Pack.

Doplnkové materiály: Nasledujúce podporné informácie si môžete stiahnuť na adrese:https: //www.mdpi.com/article/10.3390/plants15121824/s1Súbor S1: Porovnanie parametrov JIP-testu medzi rastlinami Tilia tomentosa vystavenými RF-EMF a kontrolnými rastlinami v 10 časových bodoch merania; Súbor S2: Radarové grafy zobrazujúce multiparametrické profily JIP-testu *Tilia tomentosa*pri vystavení RF-EMF počas 10 časových bodov merania; Súbor S3: Meteorologické podmienky počas experimentálneho obdobia.

Príspevky autorov: Konceptualizácia: UG; vykonanie experimentov: UG a JK; analýza údajov JK; písanie – príprava pôvodného návrhu, JK; písanie – kontrola a editácia, JK a UG Všetci autori si prečítali a súhlasia s publikovanou verziou rukopisu.

Financovanie: Tento výskum bol financovaný z grantu Software AG Stiftung (Darmstadt) číslo RA-P 13878.

Vyhlásenie o dostupnosti údajov:Pôvodné príspevky prezentované v tejto štúdii sú zahrnuté v článku/doplnkových materiáloch. Ďalšie otázky môžete adresovať príslušnému autorovi.

Poďakovanie: Chceli by sme vyjadriť našu vďaku nadácii Software AG Stiftung (Darmstadt) za financovanie tohto projektu. Sme vďační aj Nam Trung Tranovi za jeho usmerňujúce komentáre. Počas procesu písania boli použité nástroje Google Gemini (Google DeepMind, Mountain View, CA, USA; Gemini 1.5 Flash, bezplatná verzia) a ChatGPT (OpenAI, San Francisco, CA, USA; GPT-4o s GPT-4o mini fallback, bezplatná verzia) výlučne na zlepšenie jazykovej čitateľnosti a plynulosti rukopisu. Konečný text bol pred odoslaním manuálne skontrolovaný, overený a schválený ľudskými autormi.

Konflikty záujmov: Autori vyhlasujú, že nemajú žiadny konflikt záujmov.

Referencie

1. Panagopoulos, DJ; Johansson, O.; Carlo, GL Polarizácia: Kľúčový rozdiel medzi umelými a prírodnými elektromagnetickými poľami z hľadiska biologickej aktivity. *Vedecký zástupca.***2015**, *5*, 14914. [CrossRef] [ ]PubMed]
2. Panda, DK; Das, DP; Behera, SK; Dhal, NK Prehľad vplyvu žiarenia z mobilných telefónov na zelené rastliny. *Životné prostredie. Monitorovanie. Posudzovanie.***2024**, *196*, 565. [CrossRef]
3. Czerwiński, M.; Vian, A.; Woodcock, BA; Goliński, P.; Recuero Virto, L.; Januszkiewicz, Ł. Ovplyvňujú elektromagnetické polia používané v telekomunikáciách divo rastúce druhy rastlín? Štúdia kontrolného vplyvu vykonaná v teréne. *Ekol. Indic.***2023**, *150*, 110267. [CrossRef]
4. Tran, NT; Jokic, L.; Keller, J.; Geier, JU; Kaldenhoff, R. Vplyvy rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa (RF-EMF) na šalát (*Lactuca sativa*) – Dôkazy o interferencii RF-EMF s reakciami rastlín na stres. *Rastliny***2023**, *12*, 1082. [CrossRef]
5. Keller, J.; Geier, U.; Tran, NT Hĺbková analýza kinetiky nárastu fluorescencie chlorofylu odhaľuje interferenčné účinky rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa (RF-EMF) na hormonálne reakcie rastlín na stres zo sucha. *Medzinárodný časopis mol. vedy.***2025**, *26*, 7038. [CrossRef]
6. Kaur, S.; Vian, A.; Chandel, S.; Singh, HP; Batish, DR; Kohli, RK Citlivosť rastlín na vysokofrekvenčné elektromagnetické žiarenie: Bunkové mechanizmy a morfologické zmeny. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.***2021**, *20*, 55–74. [CrossRef]
7. Waldmann-Selsam, C.; La Balmori-de Puente, A.; Breunig, H.; Balmori, A. Rádiofrekvenčné žiarenie poškodzuje stromy v okolí základňových staníc mobilných telefónov. *Veda. Celkové životné prostredie.***2016**, *572*, 554–569. [CrossRef]
8. Schorpp, V. Poškodenie stromov chronickým vystavením vysokým frekvenciám: Vplyv elektromagnetického žiarenia na stromy. In Zborník z prvého sympózia o elektromagnetickom žiarení a stromoch, Baan, Holandsko, 18. februára 2011. Dostupné online: http://www.puls-schlag.org/download/Schorpp-2011-02-18.pdf(prístup 22. apríla 2026).
9. Haggerty, K. Nepriaznivý vplyv rádiofrekvenčného pozadia na chvejúce sa sadenice osiky: Predbežné pozorovania. *Medzinárodný časopis pre výskum.***2010**, *2010*, 836278. [CrossRef]
10. Beaubois, E.; Girard, S.; Lallechere, S.; Davies, E.; Paladian, F.; Bonnet, P.; Ledoigt, G.; Vian, A. Medzibunková komunikácia v rastlinách: Dôkaz o dvoch rýchlo prenášaných systémových signáloch generovaných v reakcii na stimuláciu elektromagnetickým poľom v paradajke. *Prostredie rastlinných buniek.***2007**, *30*, 834–844. [CrossRef]
11. Roux, D.; Vian, A.; Girard, S.; Bonnet, P.; Paladian, F.; Davies, E.; Ledoigt, G. Elektromagnetické polia (900 MHz) vyvolávajú konzistentné molekulárne reakcie v rastlinách rajčiaka. *Fyziológia rastlín.***2006**, *128*, 283–288. [CrossRef]
12. Vian, A.; Roux, D.; Girard, S.; Bonnet, P.; Paladian, F.; Davies, E.; Ledoigt, G. Mikrovlnné ožarovanie ovplyvňuje génovú expresiu v rastlinách. *Signál rastlín. Správanie.***2006**, *1*, 67–69. [CrossRef] [ ]PubMed]
13. Roux, D.; Vian, A.; Girard, S.; Bonnet, P.; Paladian, F.; Davies, E.; Ledoigt, G. Vysoká frekvencia (900 MHz) nízka amplitúda (5 V m^{-1}) elektromagnetické pole: Skutočný environmentálny stimul, ktorý ovplyvňuje transkripciu, transláciu, vápnik a energetický náboj v paradajke. *Planta***2008**, *227*, 883–891. [CrossRef]

14. Magone, I. Vplyv elektromagnetického žiarenia z rádiolokačnej stanice Skrunda na *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleidenove kultúry. *Veda. Celkové životné prostredie.* **1996**, *180*, 75–80. [CrossRef]
15. Scialabba, A.; Tamburello, C. Vplyv mikrovlnnej rúry na klíčenie a rast reďkovky (*Raphanus sativus* L.) sadenice. *Acta Bot. Gall.* **2002**, *149*, 113–123. [CrossRef]
16. Grémiaux, A.; Girard, S.; Guérin, V.; Lothier, J.; Baluška, F.; Davies, E.; Bonnet, P.; Vian, A. Vystavenie elektromagnetickému poľu s nízkou amplitúdou a vysokou frekvenciou spôsobuje oneskorený a znížený rast u *Rosa hybrida*. *J. Plant Physiol.* **2016**, *190*, 44–53. [CrossRef] [ ]PubMed]
17. Sharma, VP; Singh, HP; Kohli, RK; Batish, DR Žiarenie z mobilných telefónov inhibuje *Vigna radiata* (rast koreňov mungo fazule) vyvolaním oxidačného stresu. *Veda. Celkové životné prostredie.* **2009**, *407*, 5543–5547. [CrossRef]
18. Lung, I.; Soran, M.-L.; Opriš, O.; Truşcă,MRC; Niinemets, Ü.; Copolovici, L. Indukcia stresových prchavých látok a zmeny obsahu a zloženia esenciálnych olejov po vystavení aromatickej rastline mikrovlnnému žiareniu *Bazalka (Ocimum basilicum). Veda. Celkové životné prostredie.* **2016**, *569 – 570*, 489–495. [CrossRef]
19. Soran, M.-L.; Stan, M.; Niinemets, Ü.; Copolovici, L. Vplyv elektromagnetického žiarenia mikrovlnnej frekvencie na emisiu a obsah terpénov v aromatických rastlinách. *J. Plant Physiol.* **2014**, *171*, 1436 – 1443. [CrossRef]
20. Engelmann, JC; Deeken, R.; Müller, T.; Nimtz, G.; Roelfsema, MRG; Hedrich, R. Je génová aktivita v rastlinných bunkách ovplyvnená ožiarením UMTS? Celogenómový prístup. *Pokročilá aplikovaná bioinformácia. Chem.* **2008**, *1*, 71–83. [CrossRef]
21. Mildažienė, V.; Aleknavičiūtė, V.; Žūkienė, R.; Paužaitė, G.; Naučienė, Z.; Filátová, I.; Lyushkevich, V.; Haimi, P.; Tamošiūnė, I.; Baniulis, D. Liečba slnečnice obyčajnej (*slnečnica annus* L.) Semená s rádiofrekvenčným elektromagnetickým poľom a studenou plazmou indukujú zmeny v rovnováhe fytohormónov semien, vývoji sadeníc a expresii listových proteínov. *Vedecký zástupca.* **2019**, *9*, 6437. [CrossRef]
22. Halgamuge, MN Prehľad: Slabé vystavenie rastlinám rádiofrekvenčnému žiareniu z mobilných telefónov. *Elektromagnetická biológia a medicína* **2017**, *36*, 213–235. [CrossRef] [ ]PubMed]
23. Tran, NT Detekcia anomálií s využitím klasifikácie jednej triedy – prístup strojového učenia pre analýzu kinetiky rýchlej fluorescencie rastlín. *Stresy* **2024**, *4*, 773–786. [CrossRef]
24. Stirbet, A.; Lazár, D.; Kromdijk, J.; Govindjee, G. Indukcia fluorescencie chlorofylu a: Dá sa na kvantifikáciu reakcií na abiotický stres použiť iba jednosekundové meranie? *Fotosyntetické* **2018**, *56*, 86–104. [CrossRef]
25. Kalaji, HM; Jajoo, A.; Oukarroum, A.; Brestic, M.; Zivcak, M.; Samborska, IA; Cetner, MD; Łukasik, I.; Goltsev, V.; Ladle, RJ Fluorescencia chlorofylu ako nástroj na monitorovanie fyziologického stavu rastlín v podmienkach abiotického stresu. *Acta Physiol. Plant* **2016**, *38*, 23. [CrossRef]
26. Paunov, M.; Koleva, L.; Vassilev, A.; Vangronsveld, J.; Goltsev, V. Vplyv rôznych kovov na fotosyntézu: Kadmium a zinok ovplyvňujú fluorescenciu chlorofylu v tvrdej pšenici. *Medzinárodný časopis mol. vedy.* **2018**, *19*, 787. [CrossRef] [ ]PubMed]
27. Li, M.; Qi, XF; Wang, XH; Li, YY; Ma, LJ; Li, XM; Wang, LL Účinky CD_{2+}Stres na fungovanie fotosystému II ryže (*ORYZA SATIVA* L.) Listy pri zvýšenom CO_2 Úroveň. *Aplik. Ekol. Env. Výs.* **2021**, *19*, 739–750. [CrossRef]
28. Kalaji, HM; Govindjee; Bosa, K.; Kościelniak, J.; Żuk-Gołaszewska, K. Účinky soľného stresu na účinnosť fotosystému II a CO_2 asimilácia dvoch sýrskych krajových odrôd jačmeňa. *Životné prostredie. Exp. Bot.* **2011**, *73*, 64–72. [CrossRef]
29. Zou, Q.-Q.; Liu, D.-H.; Sang, M.; Jiang, C.-D. Štruktúra listov slnečnice ovplyvňuje kinetiku indukcie fluorescencie chlorofylu a in vivo. *Medzinárodný časopis mol. vedy.* **2022**, *23*, 14996. [CrossRef]
30. Strasser, RJ; Tsimilli-Michael, M.; Srivastava, A. Analýza prechodného javu fluorescencie chlorofylu a. In *Fluorescencia chlorofylu a* ; Govindjee, Papageorgiou, GC, Eds.; Springer: Dordrecht, Holandsko, 2004; s. 321–362, ISBN 978-1-4020-3217-2.
31. Tsimilli-Michael, M.; Strasser, RJ Teória energetického toku o 35 rokov neskôr: Formulácie a aplikácie. *Fotosyntéza. Výskum.* **2013**, *117*, 289–320. [CrossRef]
32. Bolhar-Nordenkampf, HR; Long, SP; Baker, NR; Oquist, G.; Schreiber, U.; Lechner, EG Fluorescencia chlorofylu ako sonda fotosyntetickej kompetencie listov v teréne: Prehľad súčasného inštrumentálneho vybavenia. *Funk. Ekol.* **1989**, *3*, 497. [CrossRef]
33. Schreiber, U.; Bilger, W.; Neubauer, C. *Fluorescencia chlorofylu ako neintruzívny indikátor pre rýchle hodnotenie fotosyntézy in vivo* Springer: Berlín/Heidelberg, Nemecko, 1995.
34. Stirbet, A.; Govindjee. O vzťahu medzi Kautského efektom (indukcia fluorescencie chlorofylu a) a fotosystémom II: Základy a aplikácie fluorescenčného tranzientu OJIP. *J. Photochem. Photobiol. B* **2011**, *104*, 236–257. [CrossRef]
35. Kramer, DM; Johnson, G.; Kiirats, O.; Edwards, GE Nové parametre fluorescencie na stanovenie redoxného stavu QA a tokov excitačnej energie. *Fotosyntéza. Výskum.* **2004**, *79*, 209–218. [CrossRef]
36. Baker, NR Fluorescencia chlorofylu: Sonda fotosyntézy in vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.* **2008**, *59*, 89–113. [CrossRef]
37. Araújo, SAdC; Deminicis, BB Fotoinibicão Fotosíntese. *Reverend Bras. Biociências* **2009**, *7*, 463–472.
38. Umar, M.; Uddin, Z.; Siddiqui, ZS Reakcie fotosyntetického aparátu u kultivarov slnečnice na kombinovaný stres zo sucha a soli. *Fotosyntetické* **2019**, *57*, 627–639. [CrossRef]

39. Zagorchev, L.; Atanasová, A.; Albanova, I.; Traianova, A.; Mladenov, P.; Kouzmanová, M.; Goltsev, V.; Kalaji, HM; Teofanova, D. Funkčná charakteristika fotosyntetického zariadenia v Smicronix Galls na parazitickej rastline Cuscuta campestris pomocou JIP-testu. *Bunky***2021**, *10*, 1399. [CrossRef]
40. Swain, SS; Tripathy, T.; Mohapatra, PK; Chand, PK Fotosyntetické a transpiračné reakcie regenerovaných in vitro *Solanum nigrum* Rastliny L. na adaptáciu ex vitro. *Vitr. Bunka. Vývoj. Biológia rastlín* **2010**, *46*, 134–141. [CrossRef]
41. Šrajer Gajdošik, M.; Vicić, A.; Gvozdić, V.; Galić, V.; Begović, L.; Mlinarić, S. Vplyv predĺženej fotoperiódy na fotosyntetické reakcie v kanabise závislé od svetla. *Medzinárodný časopis mol. vedy.* **2022**, *23*, 9702. [CrossRef] [ ]PubMed]
42. Dimitrová, S.; Paunov, M.; Pavlová, B.; Dankov, K.; Kouzmanová, M.; Veliková, V.; Tsonev, T.; Kalaji, HM; Goltsev, V. Špeciálne vydanie na počesť prof. Reta J. Strassera – Fotosyntetická účinnosť dvoch *Platan východný* Ekotypy L. vystavené mierne vysokej teplote – analýza JIP testom. *Fotosyntetické* **2020**, *58*, 657–670. [CrossRef]
43. Meng, LL; Song, JF; Wen, J.; Zhang, J.; Wei, JH Vplyv stresu zo sucha na fluorescenčné charakteristiky fotosystému II v listoch *Plectranthus scutellarioides*. *Fotosyntetické* **2016**, *54*, 414–421. [CrossRef]
44. Stirbet, A. Excitónová konektivita medzi jednotkami fotosystému II: Čo to je a ako to merať? *Fotosyntéza. Výskum.* **2013**, *116*, 189–214. [CrossRef] [ ]PubMed]
45. Strasser, RJ; Stirbet, AD Odhad energetickej prepojenosti centier PS II v rastlinách pomocou nárastu fluorescencie O–J–I–P. *Matematika. Počítačová technika. Simulácia.* **2001**, *56*, 451–462. [CrossRef]
46. Srivastava, A.; Guissé, B.; Greppin, H.; Strasser, RJ Regulácia štruktúry antény a transportu elektrónov vo fotosystéme II druhu Pisum sativum pri zvýšenej teplote skúmaná rýchlym polyfázickým fluorescenčným tranzientom chlorofylu a: OKJIP. *Biochim. Biofyzika. Acta (BBA) Bioenergia.* **1997**, *1320*, 95–106. [CrossRef]
47. Liang, H.-Z.; Zhu, F.; Wang, R.-J.; Huang, X.-H.; Chu, J.-J. Fotosystém II druhu Ligustrum lucidum v reakcii na rôzne úrovne expozície mangánu. *Vedecký zástupca.* **2019**, *9*, 12568. [CrossRef]
48. Yusuf, MA; Kumar, D.; Rajwanshi, R.; Strasser, RJ; Tsimilli-Michael, M.; Govindjee; Sarin, NB Nadmerná expresia génu gamatokoferolmetyltransferázy v transgénnych organizmoch *Brassica juncea* Rastliny zmierňujú abiotický stres: Fyziologické merania a merania fluorescencie chlorofylu a. *Biochim. Biofyzika. Acta Bioenerg.* **2010**, *1797*, 1428–1438. [CrossRef] [ ]PubMed]
49. Tsimilli-Michael, M.; Strasser, RJ *Hodnotenie vplyvu stresu na vitalitu rastlín in vivo: Aplikácie pri detekcii a hodnotení priaznivej úlohy mykorízy na hostiteľských rastlinách* Springer: Berlín/Heidelberg, Nemecko, 2008.
50. Martins, JPR; Schimildt, ER; Alexandre, RS; Falqueto, AR; Otoni, WC Chlorofyl a fluorescencia a rast *Neoregélia* concentrica (Bromeliaceae) počas aklimatizácie v reakcii na úroveň svetla. *Vitr. Bunka. Vývoj. Biológia rastlín* **2015**, *51*, 471–481. [CrossRef]
51. Kalaji, HM; Oukarroum, A.; Alexandrov, V.; Kouzmanová, M.; Brestic, M.; Živčák, M.; Samborska, IA; MUDr. Cetner; Allakhverdiev, SI; Goltsev, V. Identifikácia nedostatku živín v rastlinách kukurice a paradajok in vivo meraním fluorescencie chlorofylu a. *Fyziológia rastlín. Biochemia.* **2014**, *81*, 16–25. [CrossRef]
52. Chen, S.; Strasser, RJ; Qiang, S. In vivo hodnotenie účinku fytotoxínu kyseliny tenuazónovej na reakčné centrá PSII. *Fyziológia rastlín. Biochemia.* **2014**, *84*, 10–21. [CrossRef]
53. Xiao, W.; Wang, H.; Liu, W.; Wang, X.; Guo, Y.; Strasser, RJ; Qiang, S.; Chen, S.; Hu, Z. Špeciálne vydanie na počesť prof. Reta J. Strasser – Účinok alameticínu vo fotosystéme II skúmaný kinetikou rýchleho nárastu fluorescencie chlorofylu a JIP-testom. *Fotosyntetické* **2020**, *58*, 358–368. [CrossRef]
54. Giorio, P.; Sellami, MH Polyfázický OKJIP Chlorofyl, fluorescenčný prechodník v pôvodnej odrode a komerčnom kultivare sladkej papriky (*Paprika ročná*, L.) pri dlhodobom strese zo soli. *Rastliny* **2021**, *10*, 887. [CrossRef]
55. Dias, DP; Marenco, RA Fotoinhibícia fotosyntézy v *Minquartia guianensis* a *Swietenia macrophylla* odvodené monitorovaním počiatočnej fluorescencie. *Fotosyntetické* **2006**, *44*, 235–240. [CrossRef]
56. Palliotti, A.; Silvestroni, O.; Petoumenou, D. Fotosyntetické a fotoinhibičné správanie dvoch poľných odrôd viniča hroznorodého za podmienok viacerých letných stresov. *Am. J. Enol. Vitic.* **2009**, *60*, 189–198. [CrossRef]

Vyhlásenie/Poznámka vydavateľa: Vyhlásenia, názory a údaje obsiahnuté vo všetkých publikáciách sú výlučne názormi jednotlivých autorov a prispievateľov a nie názormi MDPI a/alebo redaktora/editorov. MDPI a/alebo redaktor/editori sa zriekajú zodpovednosti za akékoľvek zranenie osôb alebo ujmu na majetku vyplývajúcu z akýchkoľvek nápadov, metód, pokynov alebo produktov uvedených v obsahu.