

## INFLUENȚA RADIAȚIEI SPAȚIALE ASUPRA SENZORILOR AGRICOLI

**Adriana URSU**

Departamentul Informatică și Ingineria Sistemelor, Facultatea Calculatoare Informatică și Microelectronică,  
Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Moldova

Autorul corespondent: Adriana URSU, e-mail: [ursu.adriana@iis.utm.md](mailto:ursu.adriana@iis.utm.md)

Coordonatorul științific **Nicolae SECRIERU**, Conf. univ., dr.

**Rezumat.** În era tehnologiei avansate și a schimbărilor climatice, studiul impactului radiației spațiale capătă o importanță crescândă în agricultură. Pe măsură ce dependența de tehnologii moderne și de datele senzorilor crește, înțelegerea efectelor radiației devine vitală pentru securitatea alimentară și optimizarea producției. Radiația spațială include diverse particule și unde, ale căror efecte asupra senzorilor agricoli necesită studii detaliate pentru evaluarea impactului pe termen lung.

Senzorii agricoli, esențiali în monitorizarea condițiilor ambientale, sunt direct influențați de radiație, afectând astfel precizia măsurătorilor. Analiza cum radiația spațială afectează senzorii de lumină, umiditate și vânt este importantă pentru a înțelege limitările tehnologiei actuale și pentru a îmbunătăți fiabilitatea datelor. Studiul evidențiază importanța adaptării agriculturii la condițiile spațiale, cu implicații majore pentru dezvoltarea durabilă a sectorului agricol și orientarea viitoarelor cercetări în acest domeniu.

**Cuvinte cheie:** radiație spațială, senzori agricoli, lumină, umiditate, vânt, temperatură.

### Introducere

Inovarea tehnologică, inclusiv utilizarea senzorilor IoT și a dronelor, revoluționează agricultura de înaltă precizie, permițând fermierilor să monitorizeze și să optimizeze condițiile de creștere a culturilor cu o acuratețe fără precedent [1]. Senzorii agricoli avansează monitorizarea solului în timp real, permițând evaluări detaliate ale pH-ului, umidității, temperaturii și a altor variabile critice pentru sănătatea plantelor [2].

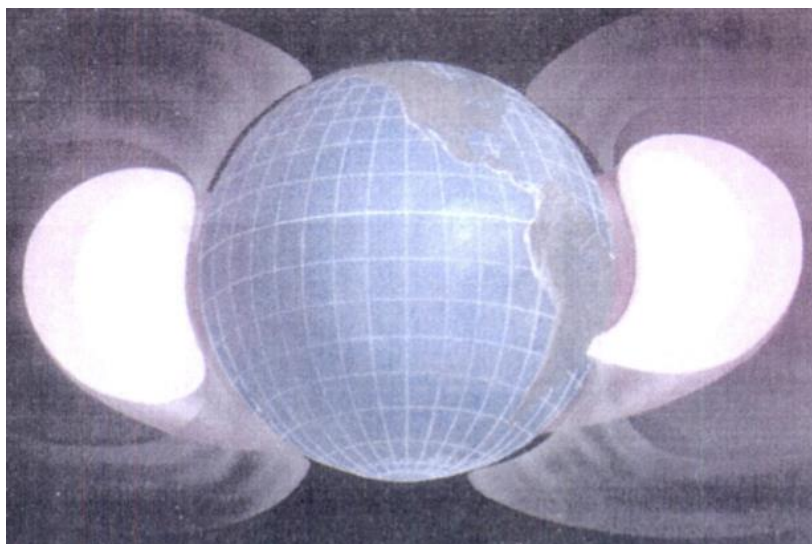
Având în vedere că fermierii se bazează tot mai mult pe date precise furnizate de senzori pentru a lua decizii informate privind gestionarea culturilor și resurselor, este esențial să înțelegem cum variațiile radiației spațiale pot afecta fiabilitatea datelor colectate.

Prin analiza datelor cercetarea oferă o perspectivă cuprinzătoare asupra modului în care radiația spațială poate influența implementarea tehnologiilor avansate în agricultură, evidențiind provocările și oportunitățile asociate cu adaptarea la aceste condiții. În concluzie, identificarea și înțelegerea influenței radiației spațiale asupra senzorilor agricoli sunt esențiale pentru dezvoltarea unor strategii eficiente pentru asigurarea unei agriculturi de precizie.

### Radiația spațială

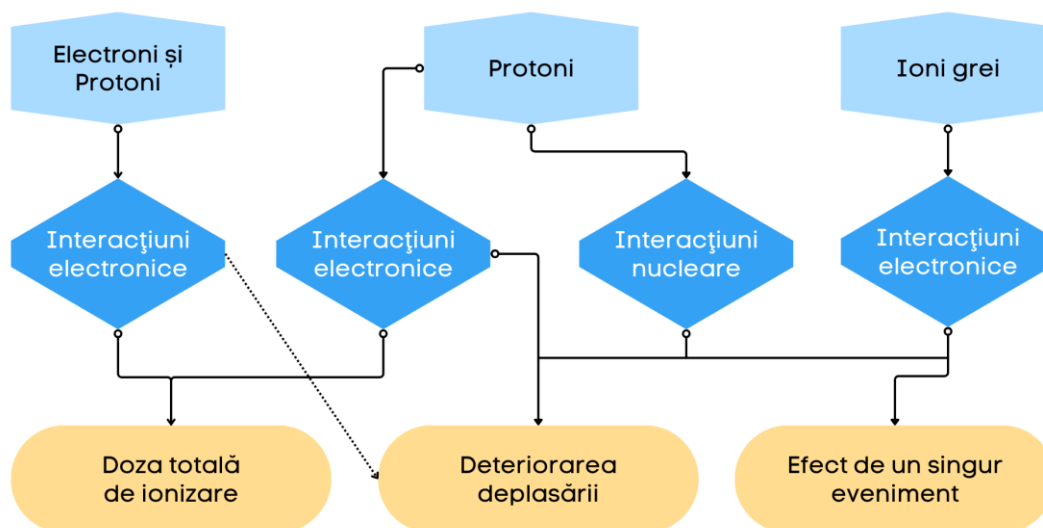
Radiația spațială este compusă din particule și unde electromagnetice care provin din spațiul cosmic și pot influența mediul din jurul Pământului și alte corpuri cerești. Această radiație provine dintr-o varietate de surse, inclusiv radiația solară și radiația cosmică reprezentată în *Figura 1*.

Radiația poate cauza erori de măsurare, deteriorarea componentelor electronice, interferențe electromagnetice și pierderea sau coruperea datelor în senzorii agricoli, influențând astfel precizia, performanța și fiabilitatea acestora.



**Figura 1. Reprezentarea radiației din jurul pământului [3]**

Figura 2 prezintă o diagramă a mediului radiației și efectele sale asupra sistemelor electronice. Fluxul este de la mediul radiației (sus) la interacțiunile care au loc (mijloc) la efectele pe care aceste interacțiuni le duc la capăt (jos).



**Figura 2. Diagrama efectelor radiației asupra sistemelor electronice**

Secțiunea de mijloc a Figurii 2 arată două interacțiuni. Deși sunt arătate patru cutii, electronică și nucleară sunt singurele interacțiuni. În interacțiunile electronice, radiația incidentă interacționează cu încărcătura înconjurătoare a atomului (adică electronii).

Efectul acestui tip de interacțiune este de a transfera energie de la radiație la atom. Energia nou dobândită ridică starea de energie a atomului la un nivel mai înalt și provoacă excitarea sau ionizarea electronilor din interiorul atomului. Pentru materialele electronice, un număr crescut de electroni (și ion pozitiv asociat) devin disponibili pentru conducție sau alte efecte în cadrul structurii cristaline a semiconductorului.

Prin urmare, pe lângă legătura cu efectele evenimentelor unice care depind de încărcătura tranzitorie generată, se face o legătură directă între interacțiunile electronice ale ionilor grei și cutia deteriorării deplasării [3].

### Efectele radiației asupra senzorilor

Influența radiației asupra senzorilor agricoli se referă la impactul pe care radiația, fie ea de origine solară sau cosmică, îl are asupra performanței, preciziei și fiabilității senzorilor folosiți în agricultură.

Radiația poate afecta funcționarea senzorilor agricoli prin:

- Erori de măsurare;
- Deteriorarea componentelor electronice;
- Interferențe electromagnetice;
- Redresarea sau pierderea datelor.

### Metode de evaluare a influenței radiației spațiale

Există mai multe metode utilizate pentru evaluarea influenței radiației spațiale asupra diferitelor sisteme și tehnologii, inclusiv asupra senzorilor agricoli.

- *Experimente de laborator*, aceste simulări pot implica utilizarea de surse radioactive sau acceleratoare de particule pentru a reproduce efectele radiației.
- *Studii în teren*, o perspectivă reală asupra influenței radiației spațiale asupra senzorilor agricoli în condiții naturale și pot evidenția modul în care aceștia se comportă în medii reale.
- *Monitorizare în timp real*, pot include sisteme de telemetrie și senzori specializați care pot înregistra și transmite datele în timp real către cercetători pentru analiză.
- *Modelare și simulare*, sunt folosite pentru a anticipa comportamentul senzorilor în diferite condiții de expunere la radiație și pot oferi informații utile pentru dezvoltarea și testarea de noi tehnologii sau strategii de protecție.

Aceste metode de evaluare oferă instrumentele necesare pentru a înțelege mai bine influența radiației spațiale asupra senzorilor agricoli și pentru a dezvolta strategii eficiente de protejare și gestionare a acestor influențe.

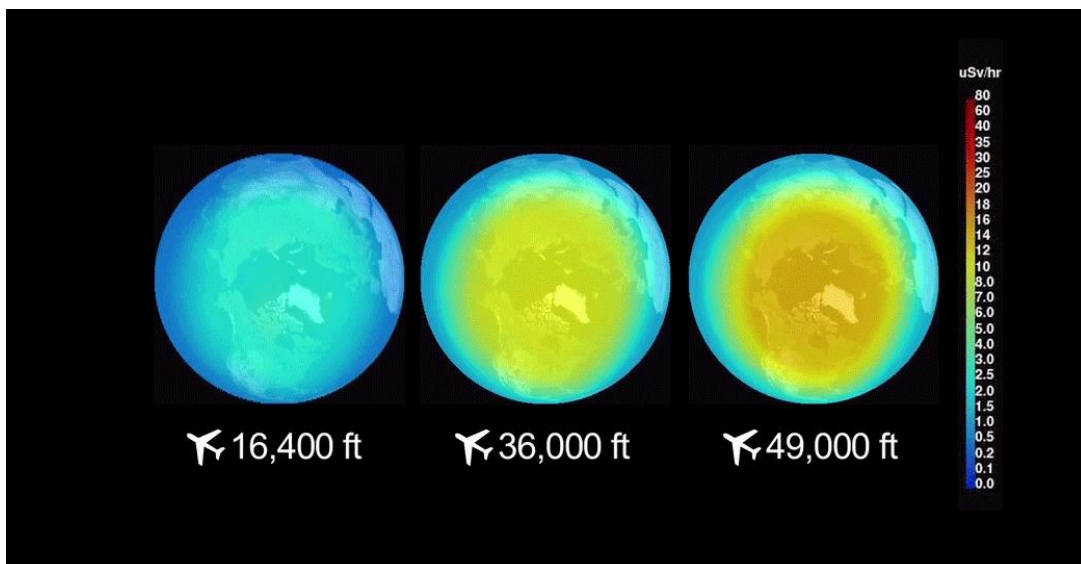


Figura 3. Diagrama efectelor radiației asupra sistemelor electronice [4]

Experimentul NASA cu dozimetria radiației, cunoscut sub numele de RaD-X, a efectuat studii pentru a măsura radiația cosmică la diverse altitudini în atmosfera noastră. Această cercetare este semnificativă pentru îmbunătățirea monitorizării în timp real a radiației pentru industria aviației, deoarece atât echipajul cât și pasagerii pot fi expuși la niveluri mai ridicate de radiație în timpul zborului.

Experimentul RaD-X a folosit un balon umplut cu heliu pentru a transporta instrumente în stratosferă, măsurând radiația cosmică provenind de la soare și spațiul interstelar. Astfel de

măsurători sunt vitale deoarece oferă date despre expunerea la particule de înaltă energie, cunoscute sub numele de raze cosmice, care pot influența atât oamenii cât și echipamentele electronice. În *Figura 3* sunt reprezentate rezultatele pentru 3 altitudini: 6,400 feet - cu 4.99 km, 36,000 feet - cu 10.97 km și 49,000 feet -14.94 km.

Un alt test efectuat de NASA, TID evaluează efectele pe termen lung ale radiației asupra dispozitivelor electronice, cauzate în principal de electroni și protoni. Aceste teste sunt importante pentru misiunile spațiale și pentru electronica utilizată în astfel de medii, unde particulele solare energice și anomalii magnetosferice, cum ar fi Anomalia Atlanticului de Sud, pot cauza daune cumulative.

*Tabelul 1.*

**Exemplu de testare electrică dintr-un test de calificare TID.**

#	Electrical Parameters	Spec Limit			Initial	TDE	TDE	Anneal	TDE	Anneal
		Units	Min	Max		1 krad	2 krad	24h / 28°C	3 krad	24h / 28°C
1	Icc_ttl	mA	0	2	0,8	2,9	7,6	7,0	6,2	6,4
2	Icch_cmos	mA	0	0,4	0,2	3,1	5,7	4,5	5,7	5,9
3	lih_CLK	μA	- 1	1	- 0,3	0	0	- 0,3	- 0,1	- 0,2
4	Iil_CLK	μA	- 1	1	- 0,2	- 0,2	- 0,1	- 0,1	- 0,2	- 0,2
5	Iih_CLR	μA	- 1	1	0,1	0	- 0,1	- 0,2	- 0,1	- 0,2
6	IiI_CLR	μA	- 1	1	- 0,4	- 0,4	- 0,3	- 0,2	- 0,2	- 0,2
7	PSSR_A	%	- 0,001	0,001	0	0	- 0,002	- 0,001	- 0,003	- 0,003
8	GSFE_A	lsb	- 0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
9	TE_A	lsb	- 0,5	0,5	0,1	0,2	0	- 0,3	- 0,2	- 0,2
10	DNL_A	lsb	- 1	1	0,2	0,1	0,5	0,2	0,5	0,5

Pentru a determina fiabilitatea unei piese în acest mediu radiației, este necesar un set detaliat de date de test.

*Tabelul 1* arată date tipice de la un test TID: parametrii piesei, specificațiile din fișa tehnică și efectele asupra acestor parametri ca funcție de expunerea la doza totală (TDE) și etapele de anelare. Cuvântul anelare, aici, este un termen impropriu. Nu se implică nicio îmbunătățire; este pur și simplu un tratament de temperatură pe o durată fără influența mediului radiației.

Datele prezentate în *Tabelul 1* sunt pentru o singură piesă și arată doar 10 parametri electrici și rezultatele lor. De fapt, această piesă a avut 53 de parametri testați pentru fiecare dintre condițiile menționate [3].

### Funcționarea senzorilor agricoli în zonele cu nivel ridicat de radiație

Senzorii au un rol important în optimizarea proceselor agricole prin monitorizarea condițiilor de sol și de mediu, chiar și în zone cu radiații spațiale mai ridicate.

- Monitorizarea umidității solului și nevoile de irigare pentru a reduce consumul de apă.
- Detecta nivelurile nutrienților și a contaminanților pentru a ghida fertilizarea precisă și a minimiza utilizarea îngrășămintelor.
- Supravegherea condițiile climatice pentru a optimiza perioadele de plantare și recoltare.
- Evidențierea variațiilor ale parametrilor de creștere, oferind date pentru a îmbunătăți practicile de cultivare.
- În zone cu radiații ridicate, pot fi folosiți senzori specializați care sunt rezistenți la radiații sau se pot implementa protocoale de calibrare pentru a corecta erorile cauzate de radiație.

### Rezultatele cercetării influenței radiației asupra dispozitivelor electronice

ESA SEU Monitor se referă la un dispozitiv sau sistem de monitorizare utilizat de Agenția Spațială Europeană pentru a detecta și măsura evenimentele de tip Single Event Upset în componente electronice.

Evenimentele SEU sunt perturbații tranzitorii în funcționarea dispozitivelor electronice cauzate de particule de înaltă energie, cum ar fi protonii sau neutronii, care lovesc circuitul integrat. Aceste evenimente pot conduce la schimbări ale stărilor logice în circuitele electronice, potențial ducând la erori de funcționare.

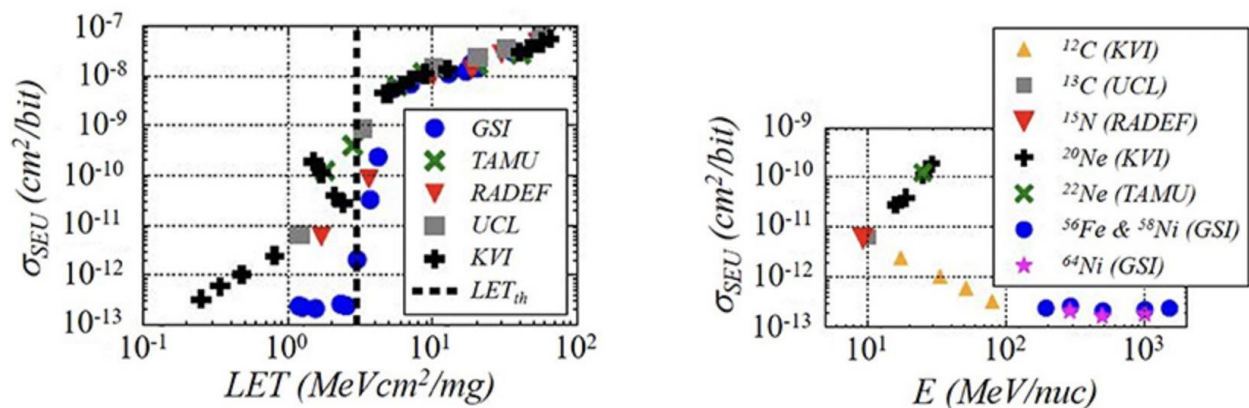
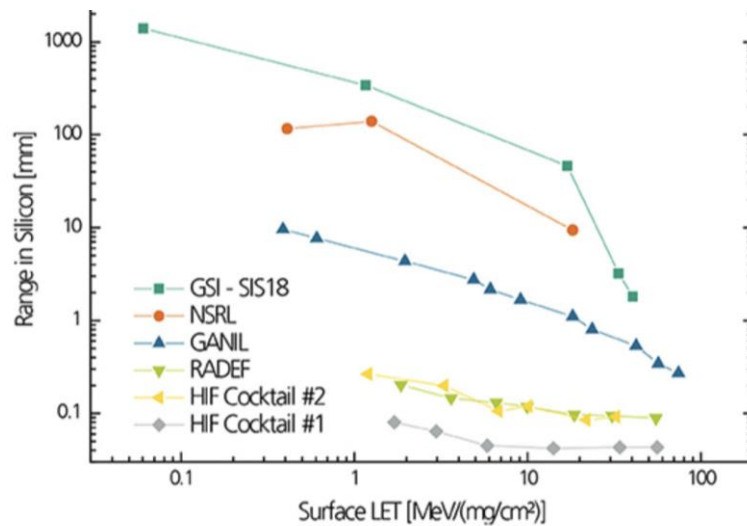


Figura 4. Rezumatul iradierilor cu ioni grei ale monitorului ESA SEU în funcție de LET (stânga) și energie (dreapta) [5]

Figura 4 prezintă o sinteză a iradierilor cu ioni grei asupra Monitorului ESA SEU, reprezentată ca funcție de LET pe partea stângă și ca funcție de energia ionului pe partea dreaptă. Această figură oferă o perspectivă valoroasă asupra dependenței secțiunii transversale pentru evenimente unice sub pragul LET față de energia ionului. În mod particular, pe partea dreaptă a figurii, reprezentarea este revelatoare, deoarece LET-ul ionului primar nu este o cantitate relevantă pentru efectele bazate pe reacții nucleare, așa cum este cazul în evenimentele unice sub pragul LET.

Comparația dintre raza de acțiune în siliciu și LET-ul efectiv pentru mai mulți acceleratori de ioni grei este reprezentată în Figura 5. Această figură demonstrează capacitatea diferitelor facilități de a oferi fascicule de ioni grei care să acopere un spectru larg de LET-uri, necesare pentru testarea efectelor radiațiilor asupra dispozitivelor electrice spațiale.



**Figura 5. Gama de siliciu vs. LET eficient pentru mai multe acceleratoare europene de ioni grei. Laboratorul de radiații spațiale NASA de la Laboratorul Național Brookhaven [5]**

Investigațiile privind efectele radiațiilor cosmice asupra dispozitivelor electrice spațiale, efectuate prin campanii de testare cu ioni grei au evidențiat unele rezultate neașteptate care nu pot fi pe deplin explicate prin simulări.

Testele au inclus măsurători cu Monitorul ESA SEU, un dispozitiv vechi dar bine caracterizat în diferite facilități acceleratoare. Aceste teste sugerează necesitatea continuării cercetărilor privind efectele energetice asupra dispozitivelor pe bază de siliciu, inclusiv utilizarea ionilor la energii și mai mari pentru calificarea adecvată a dispozitivelor în condiții realiste de radiații cosmice.

Este subliniată importanța îmbunătățirii codurilor de simulare pentru a reflecta mai precis interacțiunile complexe dintre radiații și materialele semiconductorilor, precum și explorarea efectelor radiațiilor asupra noilor materiale și tehnologii emergente în electronica spațială [5].

### Strategii de gestionare a influenței radiației spațiale

Gestionarea influenței radiației spațiale asupra senzorilor agricoli este importantă pentru asigurarea funcționării corespunzătoare și a fiabilității acestora. Strategii eficiente pentru gestionarea acestei influențe:

- *Utilizarea materialelor și componentelor rezistente la radiație.* Aceste materiale și componente pot fi proiectate pentru a reduce deteriorarea și degradarea cauzate de expunerea la radiație, contribuind astfel la prelungirea duratei de viață a senzorilor. Pentru a preveni efectele radiației spațiale asupra aparatelor electronice, se utilizează materiale de blindaj, cum ar fi aluminiu sau plumb, pentru a reduce expunerea. De asemenea, se pot selecta componente electronice rezistente la radiații sau se pot aplica strategii de proiectare redundante pentru a asigura funcționarea corectă chiar și în cazul deteriorării unor componente.
- *Utilizarea codurilor de corecție a erorilor poate ajuta,* la minimizarea efectelor erorilor induse de radiație asupra datelor transmise.
- *Calibrare și ajustare periodică.* Prin monitorizarea și recalibrarea regulată a senzorilor, se poate menține precizia măsurătorilor în ciuda influențelor externe, cum ar fi radiația spațială.
- *Implementarea sistemelor de protecție și izolare.* Aceste sisteme pot include carcase sau încăperi special concepute pentru a reduce expunerea senzorilor la radiație, precum și ecrane sau materiale absorbante pentru a atenua efectele radiației.

- *Monitorizarea continuă a performanței.* Utilizarea tehnologiilor de monitorizare în timp real pentru a detecta și a remedia rapid eventualele probleme sau erori cauzate de influența radiației.
- *Dezvoltarea de tehnologii avansate.* Aceste tehnologii pot include senzori cu tehnologie de ultimă generație și sisteme de procesare a datelor adaptate pentru a gestiona și a compensa influențele radiației spațiale.

Prin aplicarea acestor strategii de gestionare, se poate minimiza impactul negativ al radiației spațiale asupra senzorilor agricoli și se poate asigura funcționarea eficientă a acestora în mediile cu niveluri ridicate de radiație.

### **Culturile agricole în spațiu**

Sistemului de creștere a plantelor „Veggie” din *Figura 6* pe Stația Spațială Internațională este o inițiativă pentru a testa posibilitatea de a crește alimente proaspete în spațiu. Sistemul Veggie, dezvoltat de Orbital Technologies Corp. (ORBITEC) și testat la Centrul Spațial Kennedy al NASA, a fost livrat pe ISS cu misiunea SpaceX-3 și instalat în modulul Columbus de către inginerii de zbor Steve Swanson și Rick Mastracchio. Proiectul include creșterea de semințe de salată romaine roșie „Outredgeous”, cu scopul de a explora producția de alimente bioregenerative pentru misiuni de lungă durată și beneficiile psihologice ale creșterii plantelor în spațiu. Sistemul folosește lumini LED pentru a stimula creșterea plantelor și un mediu special de creștere.

Cercetătorii de pe Pământ efectuează experimente paralele pentru a compara rezultatele. Obiectivele includ verificarea funcționării hardware-ului Veggie și asigurarea că salata este sigură pentru consum. Veggie urmează să rămână pe ISS ca platformă de cercetare permanentă, marcând un pas important spre autosuficiența pe termen lung în explorarea spațială [7].

Plantele cultivate în spațiu necesită tehnologii avansate pentru protecție și creștere, cum ar fi hidroponia, care permite cultivarea fără sol și folosirea eficientă a resurselor. Această metodă ajută la gestionarea condițiilor precum temperatura, umiditatea, lumina și concentrația de CO<sub>2</sub>, esențiale pentru creșterea optimă a plantelor în absența gravitației și pentru protejarea lor împotriva radiațiilor cosmice și altor condiții extreme din spațiu [6].



**Figura 6. Sistemul de creștere a plantelor Veggie [7]**

În ceea ce privește protecția plantelor și a experimentelor științifice față de radiația cosmică pe ISS, aceasta se bazează pe tehnologiile și materialele de construcție ale stației însăși, care sunt concepute pentru a minimiza expunerea la radiații.

Proiectul Veggie pentru combaterea radiației, există câteva abordări generale utilizate pe ISS pentru protecția împotriva radiațiilor:

- *Materiale de protecție*, stația folosește materiale speciale în construcția sa care pot ajuta la absorbția unei părți din radiația cosmică, reducând astfel expunerea ocupanților și a experimentelor științifice la radiații.
- *Poziționarea strategică*, echipamentele și experimentele sensibile la radiații pot fi plasate în zone ale stației care beneficiază de o protecție naturală mai bună, cum ar fi zonele mai apropiate de centrul masei al stației, unde materialele și structura oferă o protecție suplimentară.
- *Monitorizarea radiațiilor*, stația este echipată cu instrumente pentru monitorizarea nivelurilor de radiație.
- *Cercetări științifice*, pe ISS se desfășoară constant cercetări legate de efectele radiației asupra materiilor vii, inclusiv plante, microorganisme și țesuturi umane.

În ciuda acestor măsuri, lupta împotriva radiației cosmice rămâne o provocare majoră pentru misiunile spațiale de lungă durată și pentru viitoarele călătorii în spațiu profund, cum ar fi misiunile către Marte. Cercetările și experimentele precum Veggie sunt pași esențiali în înțelegerea cum să trăim și lucrăm în spațiu.

### Concluzii

Este evident că evaluarea influenței radiației spațiale asupra senzorilor agricoli și a altor dispozitive electronice este decisivă pentru asigurarea funcționării corecte și fiabile a acestora în medii cu niveluri ridicate de radiație. Pentru a aborda această problemă, este necesar să se efectueze mai multe cercetări și experimente. De asemenea, este important să se investigheze posibilele influențe ale ionilor asupra altor materiale utilizate în afara microelectronicii digitale, precum SiC() și GaN(), și să se analizeze impactul reacțiilor asupra carcaselor dispozitivelor și circuitelor.

Prin aceste tipuri de cercetări, putem asigura ca senzorii agricoli și alte dispozitive electronice să-și păstreze fiabilitatea chiar și în fața condițiilor extreme din spațiu sau din alte medii cu radiație intensă.

Analiza evidențiază importanța înțelegerii și gestionării efectelor radiației spațiale asupra senzorilor agricoli și a tehnologiilor utilizate în agricultură. Având în vedere creșterea dependenței de date precise pentru monitorizarea și optimizarea condițiilor de creștere a culturilor, este importantă să se evalueze și să se minimizeze potențialul impact negativ al radiației spațiale.

Cercetările și experimentele prezentate în articol subliniază complexitatea provocărilor întâmpinate, dar și oportunitățile de a îmbunătăți fiabilitatea și performanța senzorilor prin utilizarea materialelor rezistente la radiații, strategii de corecție a erorilor și monitorizare continuă. Pe măsură ce explorăm noi frontiere în agricultura spațială și pe Pământ, adaptarea la condițiile de radiație și dezvoltarea tehnologiilor capabile să funcționeze eficient în aceste medii devin esențiale pentru succesul pe termen lung.

### Abrevieri:

IoT	Internet of Things
SEU	Single Event Upset
GSI	Gauge Symmetry Inflation
RADEF	Cosmic Microwave Background Radiation
UCL	Light Conversion Unit
LET	Linear Energy Transfer
HIF	High Intensity Facility
ESA	European Space Agency
Icc_ttl	Curent consumat de CI în tehnologia TTL



Icch_cmos	Curent consumat în starea "high" de un circuit CMOS
Iih_CLK	Curentul de intrare "high"
Iil_CLK	"low" pentru semnalul de ceas
Iih_CLR	"low" pentru semnalul de resetare/clar
PSSR_A	Raportul de respingere a alimentării pentru analog.
GSFE_A	Performanța Circuitului
TE_A	Eroarea totală pentru aplicații analogice.
DNL_A	Non-linearitate diferențială pentru analog
SiC	Carbură de Siliciu
GaN	Nitrat de Galiu
ISS	Stația Spațială Internațională

**Mulțumiri.** Doresc să-mi exprim recunoștința profundă către coordonatorul meu, domnul Secieru Nicolae, pentru îndrumarea și suportul acordat. De asemenea, mulțumiri domnului Cărbune Viorel și doamnei Mașnic Alisa pentru sfaturile valoroase și asistența oferită. Prețuiesc profund contribuția tuturor la realizarea acestui articol.

#### Surse bibliografice:

- [1] A. Barabas, *Senzorii IoT revoluționează agricultura de înaltă precizie*, 2020. <https://teraseya.com/ro/senzorii-iot-revolutioneaza-agricultura-de-inalta-precizie/>
- [2] Agrimasat, *Senzorii agricoli & Inginer Agronom*. <https://agrimasat.ro/senzori-agricoli-inginer-agronom/>
- [3] J.W. Howard, Jr. Computer Sciences Corporation, Huntsville, Alabama D.M. Hardage Marshall Space Flight Center, Marshall Space Flight Center, Alabama, *Spacecraft Environments Interactions: Space Radiation and Its Effects on Electronic Systems* <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990116210/downloads/19990116210.pdf>
- [4] *NASA studies cosmic radiation to protect high-altitude travelers* <https://www.eurekalert.org/news-releases/905660>
- [5] Stefan K. Höeffgen, Stefan Metzger, Michael Steffens, *Investigating the Effects of Cosmic Rays on Space Electronics*, 18 septembrie 2020, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2020.00318/full>
- [6] *Creșterea plantelor în spațiu: inovații și perspective pentru viitor*, 13 iulie 2023. <https://hy-farm.com/cresterea-plantelor-in-spatiu-inovatii-si-perspective-pentru-agricultura-viitorului/>
- [7] Linda Herridge, *Sistemul de creștere a plantelor vegetale a fost activat pe Stația Spațială Internațională*, 8 mai 2024. <https://www.nasa.gov/missions/station/veggie-plant-growth-system-activated-on-international-space-station/>