

DEZVOLTAREA ȘI APLICAREA SUPERCONDENSATOARELOR TEXTILE – O SOLUȚIE PENTRU ALIMENTAREA CU ENERGIE ELECTRICĂ A DISPOZITIVELOR FLEXIBILE

Dr. ing. Ion-Răzvan RĂDULESCU¹, Ing. Marius-Alexandru-Cezar LUPESCU¹,
Chim. Elena PERDUM¹, Fiz. Laurențiu-Christian DINCĂ¹, Dr. ing. Rodica NEGROIU²,
Dr. ing. mat. Carmen MIHAI¹, Dr. ing. Emilia VISILEANU¹

¹ Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Textile și Pielărie (INCDTP), București

² UNST Politehnica București – Facultatea Electronică / CETTI

REZUMAT. Studiul funcționalizării materialelor textile pentru aplicații moderne precum supercapacitorii flexibili, contribuie la realizarea de produse cu valoare adăugată mare. Supercapacitorii permit stocarea energiei electrice, iar proprietatea de flexibilitate permite integrarea în articole purtabile de tip e-textiles. Studiul de față abordează producerea unor electroliți pentru supercondensatoare flexibile, obținute din substanțe prietenoase cu mediul. S-a realizat o investigație a masei specifice și conductivității electrice, cât și a structurii morfologice, pentru a selecta varianta cu proprietăți optime, în baza unei metode statistice.

Cuvinte cheie: supercondensatoare, flexibilitate, materiale textile, aplicații.

ABSTRACT. The study of textile materials functionalization for modern applications such as flexible supercapacitors, renders products with high added-value. Supercapacitors store electric energy and flexibility enables integration into wearables and e-textiles. This paper tackles the manufacturing of electrolytes for flexible supercapacitors, based on environmentally friendly raw materials. An investigation of the specific mass and electric conductivity, as well as of the morphologic structure was conducted, in order to select the optimal variant, based on a statistical method.

Keywords: supercapacitors, flexibility, textile materials, applications.

1. INTRODUCERE

INCD Textile-Pielărie București este activ implicat în cercetarea aplicativă pentru domeniul textil și domeniile conexe. În acest sens, INCDTP este preocupat să ofere noi soluții tehnologice industriei textile din România, să instruiască prin formare profesională tinerii specialiști, să ofere servicii de consultanță și investigație a materialelor textile. O direcție prioritară a activității este alinierea la cele mai noi tendințe de cercetare în domeniul textil, care să promoveze pe piață produse cu valoare adăugată mare și un grad înalt de competitivitate, ecologice și prietenoase cu mediul.

Una dintre tendințele actuale în domeniul textil sunt așa-numitele e-textiles, respectiv produsele textile care încorporează elemente electronice (baterii, senzori, microcontrolere etc.). Progresul înregistrat în domeniul procesării firelor metalice cât și miniaturizarea componentelor electronice, a făcut posibilă dezvoltarea acestui nou domeniu al e-textiles. Asigurarea caracterului ecologic al noilor produse, este realizată

prin utilizarea unor materii prime biodegradabile, a unui eco-design adecvat și a potențialului de reciclare a produselor uzate.

Produsele e-textile sunt rezultatul unui demers de cercetare inter-disciplinar, respectiv între disciplina textilă și disciplina electrotehnică. Astfel, INCDTP – București a reușit să ofere diferite soluții de produse inovative e-textiles mediului industrial din România [1]. Stadiul actual de cercetare este în plină evoluție și are ca obiective dezvoltarea de noi idei de afaceri și de soluții tehnologice.

Supercondensatoarele sunt componente electrice de înmagazinare a energiei electrice, care se află din punct de vedere al proprietăților electrice între condensatoare și baterii. Ele prezintă o densitate de putere mare, un timp de încărcare scurt, cât și o bună fiabilitate la cicluri repetate de încărcare-descărcare. Totodată, pot asigura, pentru intervale scurte, o tensiune la valori înalte și pot funcționa într-un interval de temperatură mai larg decât bateriile. Supercondensatoarele pot funcționa în baza a două principii electro-chimice distincte și anume:

DEZVOLTAREA ȘI APLICAREA SUPERCAPACITATORILOR TEXTILE – O SOLUȚIE...

- Capacitatea formată din două straturi cu stocarea electrostatică a energiei electrice, asigurate prin separarea sarcinii în stratul dublu Helmholtz;

- Pseudocapacitatea, stocarea electro-chimică a energiei electrice, asigurată prin reacții redox cu transfer de sarcină.

În Figura 1 este exemplificată o clasificare a tipurilor de supercondensatoare în funcție de principiul de funcționare (Figura 1).

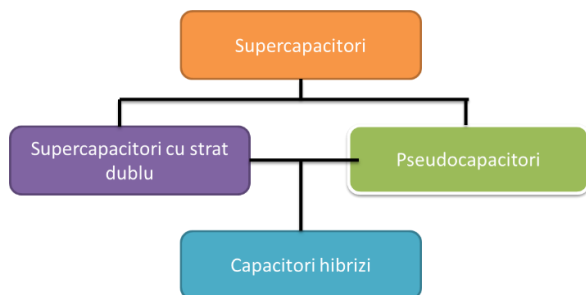


Fig. 1. Tipuri de supercapacitori în funcție de principiul de funcționare.

Sunt prezentate în continuare elementele de structură ale unui supercondensator (Figura 2):

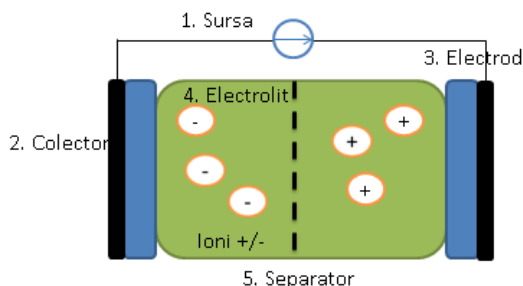


Fig. 2. Principiul de funcționare.

1: Sursă de curent electric: pentru alimentarea cu energie electrică;

2: Colector de curent: materialul de contact pentru conectarea la diverse echipamente de testare sau în diverse sisteme în care acesta este înglobat;

3: Electrode polarizate: material conductiv electric pentru menținerea câmpului electrostatic;

4: Electrolit cu ioni pozitivi și negativi: sursă de ioni pozitivi și negativi, care sunt polarizați în momentul în care supercondensatorul este încărcat/descărcat;

5: Separator: material fin de separare, cele mai utilizate fiind poliolefinele, necesar evitării contactului electric între cei doi electrozi.

2. APLICAȚII ALE SUPERCAPACITORILOR TEXTILI

Supercondensatoarele textile reprezintă o clasă emergentă de componente de stocare, care combină o densitate mare de putere cu o bună flexibilitate

mecanică. Aceste proprietăți fac din supercondensatoare componente adecvate pentru o serie largă de aplicații, în mod special acolo unde supercondensatoarele rigide tradiționale și bateriile sunt mai puțin eficiente. Următoarele domenii tehnologice integrează aplicații ale supercapacitorilor:

1. Articole de îmbrăcăminte care integrează componente electronice

Supercondensatoarele flexibile sunt componente ideale pentru articolele de îmbrăcăminte care integrează componente electronice, datorită proprietății acestora de a se adapta siluetei corpului uman. Aplicațiile pot cuprinde:

- textile inteligente cu integrarea în material a senzorilor de putere, LED-urilor și altor componente electronice;

- dispozitive de fitness pentru monitorizarea funcțiilor vitale, prin alimentarea cu energie electrică a componentelor care necesită flexibilitate pentru asigurarea unei integrări adecvate cu articolul de îmbrăcăminte;

- dispozitive medicale portabile pentru asigurarea unei alimentări continue cu energie electrică a sistemelor de monitorizare, fără a compromite flexibilitatea.

2. Sisteme pentru generarea de energie

Supercondensatoarele flexibile pot înmagazina energia electrică generată din diferite surse, precum celulele foto-voltaice și sursele cinetice, datorită proprietăților acestora de a:

- Integra celule foto-voltaice flexibile, pentru obținerea unor sisteme portabile cu auto-alimentare din energia solară;

- Combina generatoare piezo-electrice și tribo-electrice pentru generarea de energie electrică din mișcare și vibrații.

3. Echipamente individuale de protecție

Supercondensatoarele flexibile reprezintă surse robuste și fiabile de alimentare cu energie electrică în situații de urgență și scenarii militare:

- Sisteme de alimentare cu energie electrică portabile și mobile pentru echipamente medicale sau alte sisteme critice în teatrele de operații.

- Suplimentarea funcționalităților echipamentelor militare și de protecție cu surse de alimentare integrate.

3. MATERIALE ȘI METODE

În cadrul INCDTP – București s-au studiat componentele de realizare ale supercondensatoarelor flexibile din materiale textile, respectiv electrozi și electroliți.

Electrozii au fost dezvoltați pe bază de depuneri de carbon activ pe structuri textile din fire de 100% bumbac (BBC) și fire de argint în urzeală și bătătură și au fost prezentate pe larg în contribuția [2]. Totodată, stadiul actual al cercetării pe domeniu, integrează o serie de soluții noi atât pentru electrozi, cât și pentru electroliți [3-8].

Acest articol științific se focalizează pe dezvoltarea de electroliți pentru supercondensatoare flexibile.

Electroliții pentru supercondensatoare flexibile trebuie să îndeplinească anumite proprietăți ale structurilor textile, dar și proprietăți mecanice, chimice și electrice specifice care sunt aparent opuse. De aceea proprietățile trebuie ajustate și reglate pentru următoarele considerente:

- Vâscozitatea materialului pentru electroliți trebuie să fie mică pentru a permite circulația ionilor pozitivi și negativi, însă suficient de ridicată pentru a nu curge din suport;

- Conductivitatea ionică trebuie să fie cât mai ridicată și rezistența internă redusă, pentru a permite o circulație bună a ionilor sub efectul câmpului electric;

- Se impune utilizarea unor materii prime prietenoase cu mediul, care să poată fi ușor reciclate;

- Tensiunea maximă (limitată de tensiunea de străpungere) să fie cât mai ridicată, iar costul produsului cât mai redus.

Astfel, în cadrul INCDTP au fost utilizate mai multe amestecuri de substanțe, prezentate în tab. 1, în vederea obținerii unor electroliți flexibili pentru supercondensatoare. Materiile prime utilizate sunt: alcoolul polivinilic (PVA), glicerina (GIOH), acidul citric (AC), aluminosilicatul numit halloysite (Hal) și dioxidul de titan (TiO₂).

GIOH este un solvent organic compatibil cu foarte multe substanțe. Vâscozitatea sa mare facilitează dispersarea multor compuși anorganici care nu pot fi dizolvați decât în substanțe periculoase, precum acidul sulfuric.

PVA face parte din categoria polimerilor biodegradabili și biocompatibili. Odată dizolvat în apă sau în alt solvent potrivit, proprietățile sale adezive sunt valorificate.

AC este un acid organic natural și un agent de reticulare folosit des în obținerea peliculelor și a hidrogelurilor pe bază de biopolimeri ce conțin grupări hidroxil (-OH) în structura lor [9].

Hal este o varietate naturală de caolin și se prezintă sub formă de nanotuburi. Este recunoscută pentru suprafața specifică mare, porozitate și proprietățile mecanice. În prezent este studiată posibilitatea de a stoca energia utilizând acest mineral în matrici polimerice și în combinație cu alte substanțe [10, 11].

TiO₂ este un oxid natural ce prezintă stabilitate chimică ridicată și activitate fotocatalitică. De asemenea, nu poluează, iar costul său este scăzut.

Calitatea sa de semiconductor a fost evidențiată în cercetările efectuate în ultimii zeci de ani [12].

Rețetele utilizate pentru fabricarea electroliților sunt prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1. Rețetele electroliților

Codul rețetei	Cantitatea de substanță utilizată				
	GIOH	PVA	AC	Hal	TiO ₂
A050	15 g	3 g	0,5 g		
B050	15 g	3 g	0,5 g	1 g	
C050	15 g	3 g	0,5 g	1 g	0,1 g
A100	15 g	3 g	1 g		
B100	15 g	3 g	1 g	1 g	
C100	15 g	3 g	1 g	1 g	0,1 g
A150	15 g	3 g	1,5 g		
B150	15 g	3 g	1,5 g	1 g	
C150	15 g	3 g	1,5 g	1 g	0,1 g

Procedura de realizare a electroliților cuprinde următoarele faze:

- dizolvarea PVA în GIOH (glicerina) la 130°C;
- adăugarea mineralelor (Hal și TiO₂, după caz) în soluția polimerică, la aceeași temperatură;
- omogenizarea amestecului final;
- menținerea amestecului la 100°C, timp de 3 ore, astfel încât reacția dintre PVA și AC să aibă loc;
- spălarea electroliților obținuți cu apă ultrapură, pentru a îndepărta excesul de GIOH.

Materialele astfel obținute sunt prezentate mai jos (Figura 3).

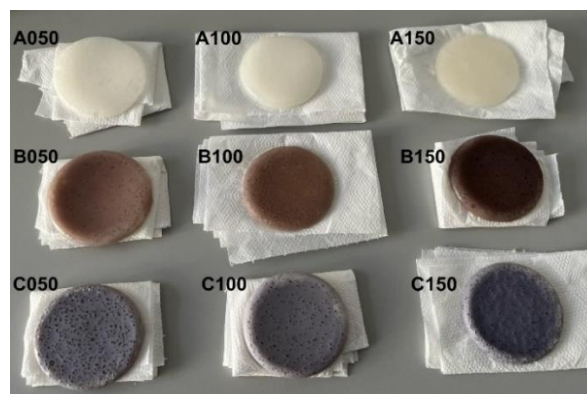


Fig. 3. Imaginea electroliților și codul aferent fiecărei combinații de materiale conform tabelului 1.

4. REZULTATE ȘI INTERPRETĂRI

S-a realizat o investigație a proprietăților fizico-mecanice și electrice ale electroliților obținuți, pentru a verifica comparativ fiabilitatea acestora pentru utilizarea în componența supercapacitorilor flexibili. Electroliții obținuți prezintă următoarele proprietăți fizico-mecanice (tabelul 2):

Tabelul 2. Proprietățile fizico-mecanice ale electroliților

Codul rețetei	Aria, A [cm ²]	Grosimea, δ [mm]	Diametrul, d [cm]	Masa specifică, m [g/cm ²]
A050	38,48	4	7	0,38
B050	33,18	4	6,5	0,47
C050	33,18	4	6,5	0,43
A100	28,27	4	6	0,47
B100	33,18	4	6,5	0,41
C100	33,18	4	6,5	0,47
A150	33,18	4	6,5	0,37
B150	33,18	4	6,5	0,45
C150	33,18	4	6,5	0,46

Din determinarea masei specifice a electroliților, se poate observa faptul că electroliții ce au în componență numai Carbon activ (AC), au o masă specifică mai redusă față de celelalte variante (Figura 4). Conform proprietăților electroliților, se va căuta proba cu masă specifică minimă.

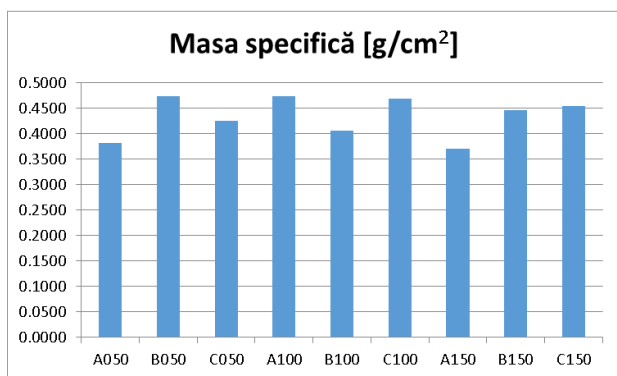


Fig. 4. Masele specifice ale electroliților.

Parametrii utilizați pentru calculul conductivității electrice sunt prezentați în tabelul 3.

Tabelul 3. Proprietățile electrice ale electroliților

Codul rețetei	Rezistența medie, R _i [Ω]	Grosimea, δ [m]	Conduct. electrică, σ [mS/m]
A050	5,36·10 ⁵	4·10 ⁻³	0,467
B050	2,12·10 ⁵	4·10 ⁻³	1,18
C050	2,07·10 ⁶	4·10 ⁻³	0,121
A100	1,39·10 ⁶	4·10 ⁻³	0,179
B100	1,37·10 ⁶	4·10 ⁻³	0,183
C100	1,16·10 ⁶	4·10 ⁻³	0,215
A150	1,64·10 ⁶	4·10 ⁻³	0,153
B150	1,26·10 ⁶	4·10 ⁻³	0,199
C150	9,24·10 ⁵	4·10 ⁻³	0,271

Rezistența electrică, R_i, a fost măsurată cu multimetrul și apoi a fost determinată conductivitatea electrică (1), unde s-a considerat lățimea și lungimea probei ca fiind egale.

$$\sigma = 1/(R_i \cdot \delta) \quad (1)$$

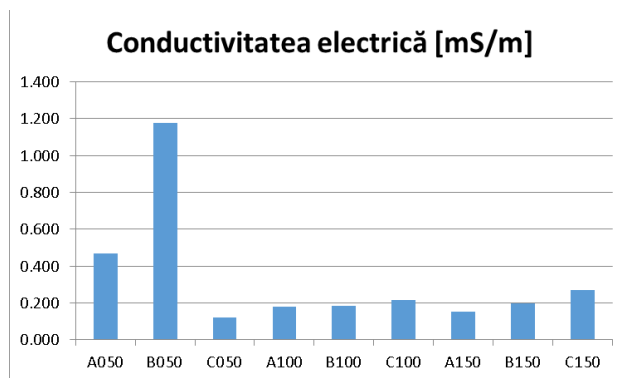


Fig. 5. Valorile conductivității electroliților.

Așa cum se poate observa din determinările experimentale, proba B050 cu 1 g de halloysite are conductivitatea electrică optimă. Pentru a corespunde proprietăților optime ale electroliților, se urmărește identificarea probei cu masa specifică cea mai redusă și conductivitatea electrică cea mai pronunțată. Ne aflăm astfel în fața unei probleme statistice de optimizare pentru două variabile rezultat (masă, conductivitate), în funcție de trei variabile de intrare (concentrație de carbon activ, halloysite și dioxid de titan). Această problemă statistică este de tip Multi-Objective-Optimization sau Multi-Response Optimization [13-17], fiind necesară optimizarea după două criterii, aici unul minim (masa) și unul maxim (conductivitatea).

4. CALCUL STATISTIC

Pentru a putea realiza aceasta optimizare, s-au realizat în matricea experimentală câteva estimări pentru valorile parametrilor de intrare, astfel încât să rezulte o matrice codificată pentru o ecuație de regresie de gradul doi. Matricea experimentală ajustată față de cea reală este prezentată în tabelul 4. În tabelul 4 s-au marcat cu galben valorile estimate ale parametrilor de intrare, pentru obținerea matricii codificate (Tabelul 5).

Tabelul 4. Matricea experimentală pentru optimizare

Codul rețetei	Cantitatea de substanță utilizată			Variabile rezultat	
	AC [g]	Hal [g]	TiO ₂ [g]	Masă [g/cm ²]	Cond. [mS/m]
A050	0,5	0	0	0,38	0,467
B050	0,5	1	0,05	0,47	1,18
C050	0,5	2	0,1	0,43	0,121
A100	1	0	0	0,47	0,179
B100	1	1	0,05	0,41	0,183
C100	1	2	0,1	0,47	0,215
A150	1,5	0	0	0,37	0,153
B150	1,5	1	0,05	0,45	0,199
C150	1,5	2	0,1	0,46	0,271

Tabelul 5. Matricea experimentală codificată

Nr. încercare	Variabile de intrare codate								Variabile rezultat normate	
	X1	X2	X3	X1^2	X2^2	X3^2	X1*X2	X1*X3	Y1	Y2
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0.290	0.341
2	-1	0	0	1	0	0	0	0	0.359	0.862
3	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.329	0.088
4	0	-1	-1	0	1	1	0	0	0.359	0.131
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.313	0.134
6	0	1	1	0	1	1	0	0	0.359	0.157
7	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	0.283	0.112
8	1	0	0	1	0	0	0	0	0.344	0.145
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0.352	0.198

Valorile cod ale parametrilor de intrare din tabelul 5, s-au obținut prin relația generală:

$$X = \frac{V - V_m}{\Delta} \quad (2)$$

Unde s-au notat cu V_m valoarea medie și cu Δ intervalul de variație al parametrilor de intrare. Pentru a putea realiza optimizarea pe cele două variabile de rezultat cu unități de măsură diferite, s-a realizat normarea vectorilor de rezultat, conform relației [14]:

$$N_{i_norm} = \frac{N_i}{\sqrt{N_1^2 + \dots + N_n^2}} \quad (3)$$

Prin funcția de regresie din Excel, s-au determinat coeficienții ecuațiilor de regresie de gradul doi, pentru masă și conductivitate normalată și variabilele de intrare, respectiv ecuațiile (4) și (5):

$$Y_1 = 0,35 + 0,017X_2 - 0,017X_1^2 - 0,01X_2^2 + 0,007X_1X_2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 0,27 - 0,13X_1 - 0,02X_2 + 0,15X_1^2 - 0,2X_2^2 + 0,08X_1X_2 \quad (5)$$

Pentru a obține o ecuație comună de optimizare, s-au aplicat ponderi egale pentru masă (-0,5) și conductivitate (+0,5). Pentru ca masa să fie minimă, s-a aplicat semnul minus, iar pentru conductivitatea maximă, s-a aplicat semnul plus. Ecuația de regresie ponderată pentru cei trei parametri de intrare comuni X1, X2 și X3, este exprimată în (6-7) [15]:

$$F_{optim} = -0,5Y_1 + 0,5Y_2 \quad (6)$$

$$F_{optim} = -0,04 - 0,065X_1 - 0,018X_2 + 0,078X_1^2 - 0,095X_2^2 + 0,036X_1X_2 \quad (7)$$

S-au calculat derivatele parțiale pentru F_{optim} , pentru valoarea maximă a funcției și s-au determinat următoarele valori pentru X1 și X2:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = 0,419 \end{array} \right. \quad (8)$$

$$X_2 = -0,018 \quad (9)$$

Aceste rezultate semnifică simultan o masă minimă și o conductivitate maximă. Valorile din ecuațiile (8) și (9) au fost introduse în ecuațiile (4) respectiv (5), pentru a determina masa și conductivitatea optime normate:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{1_min} = 0,346 \end{array} \right. \quad (10)$$

$$Y_{2_max} = 0,245 \quad (11)$$

Aceste valori rezultat normate se denormează, prin multiplicarea cu factorul $\sqrt{N_1^2 + \dots + N_n^2}$. Se obțin variabilele de rezultat optime, respectiv:

$$\left\{ \begin{array}{l} Masa_{min} = 0,45 \end{array} \right. \quad (12)$$

$$Conduct_{max} = 0,33 \quad (13)$$

Se decodează variabilele de intrare, cu operațiile corespunzătoare ecuației (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} AC = 0,5X_1 + 1 = 1,2 \text{ g} \end{array} \right. \quad (14)$$

$$Hal = X_2 + 1 = 0,98 \text{ g} \quad (15)$$

Rezultă imediat că pentru valorile parametrilor de intrare din ecuațiile (14-15) există valori optime pentru variabilele rezultat, exprimate prin ecuațiile (12-13).

Pentru a determina proba experimentală cea mai apropiată de aceste valori optime obținute prin regresie, se calculează diferența celor mai mici pătrate față de valorile experimentale normate, cu relația [13]:

$$Dist_{min} = \sqrt{(Y_{1_norm} - Y_{1_min})^2 + (Y_{2_norm} - Y_{2_max})^2} \quad (16)$$

Din aceste calcule rezultă probele experimentale optime pentru masă minimă și conductivitate maximă: C150, C100 și B150, ceea ce înseamnă ca este important conținutul de dioxid de titan pentru

proprietățile fizice și electrice ale electrolitului. Trebuie ținut cont și de faptul că s-a pornit de la o matrice experimentală ipotetică, care să permită codarea pentru o ecuație de regresie de gradul doi. Această metodă de optimizare pentru două variabile rezultat, a fost prelucrată și adaptată din literatura științifică de specialitate [13-17].

5. CARACTERIZAREA MORFOLOGICĂ

Electrolizii reprezentativi pentru fiecare din cele trei rețete (A150, B150, C150) au fost caracterizați morfologic prin microscopia electronică de baleiaj (SEM) din punctul de vedere al dimensiunii porilor (Figurile 7, 8).

Acest tip de investigare s-a realizat pentru evidențierea compușilor chimici și a caracterului ecologic al acestora. Echipamentul utilizat a fost microscopul electronic FEI Quanta 200, iar Scandium, softul pentru măsurători de dimensiuni.

Proba A150 prezintă o porozitate cu dimensiunea medie de 3.29 μm și deviația standard de 1.30 μm , la

proba B150 media este 2.86 μm și deviația standard 1.43 μm , iar proba C150 prezintă porozitatea medie de 1.68 μm și deviația standard de 0.38 μm . Parametrii statistici menționați au fost determinați pe baza a 10 măsurători efectuate pentru fiecare probă în parte. Porozitatea medie cuprinsă în intervalul 1.5÷3.5 μm asigură migrarea ionilor pozitivi și negativi între electrozi prin interiorul electrolitului.

Analiza chimică elementară pentru A150, B150 și C150 a fost realizată prin spectrometrie de raze X cu dispersie în energie (X-EDS), prin utilizarea modului de detecție EDAX Ametek Element conectat la microscopul electronic. Peak-urile corespunzătoare speciilor atomice din compoziția probelor sunt evidențiate în următoarele spectre (Figurile 9, 10, 11). Electrolitul PVA-CA-GlOH 150 (A150) are în compoziție 53.4% carbon și 46.6% oxigen (concentrații atomice), PVA-CA-Hal-GlOH 150 (B150) conține 51.3% carbon, 46.2% oxigen, 1.4% aluminiu și 1.1% siliciu, în timp ce PVA-CA-Hal-TiO₂-GlOH 150 (C150) are un conținut de 53.2% carbon, 44.7% oxigen, 1.0% aluminiu, 0.8% siliciu și 0.3% titan.

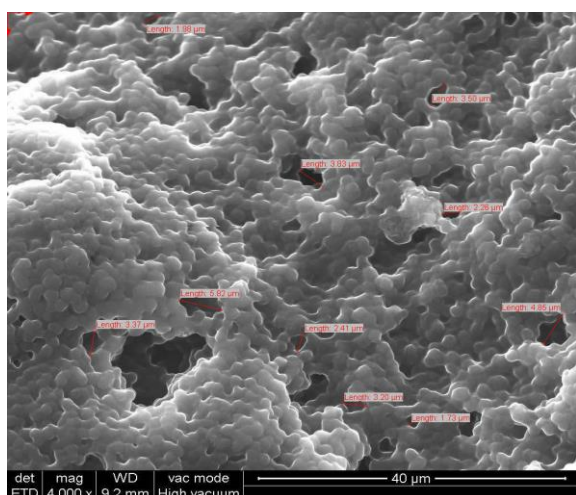


Fig. 7. Imaginea SEM a electrolitului A150 (magnificare de 4000x).

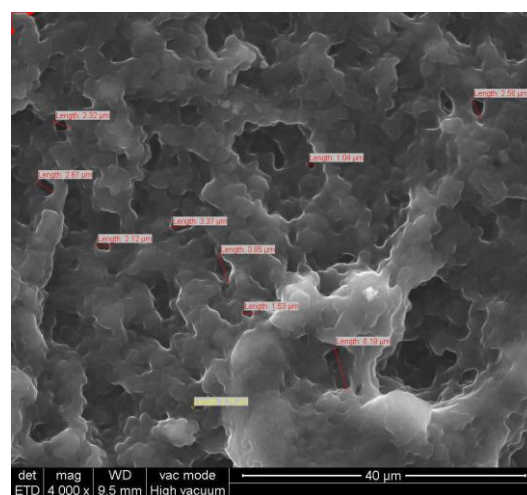


Fig. 8. Imaginea SEM a electrolitului B150 (magnificare de 4000x).

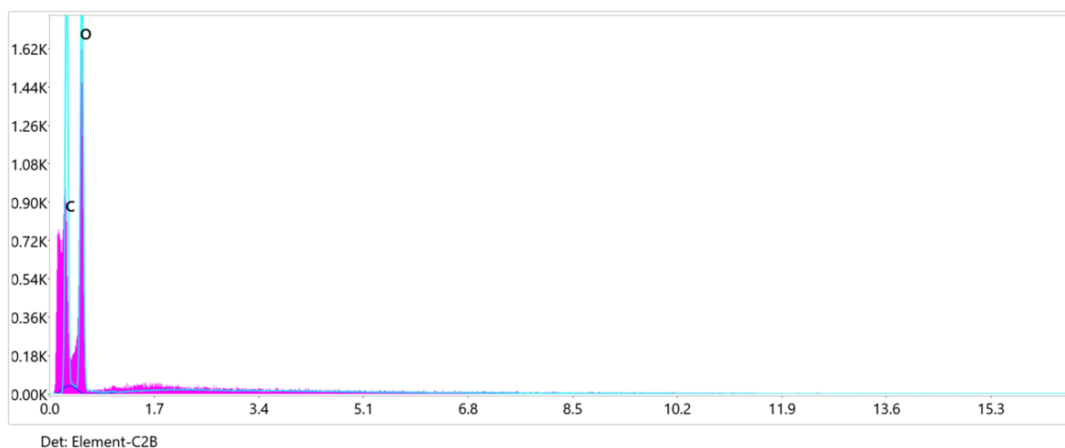


Fig. 9. Spectrul EDAX pentru A150.

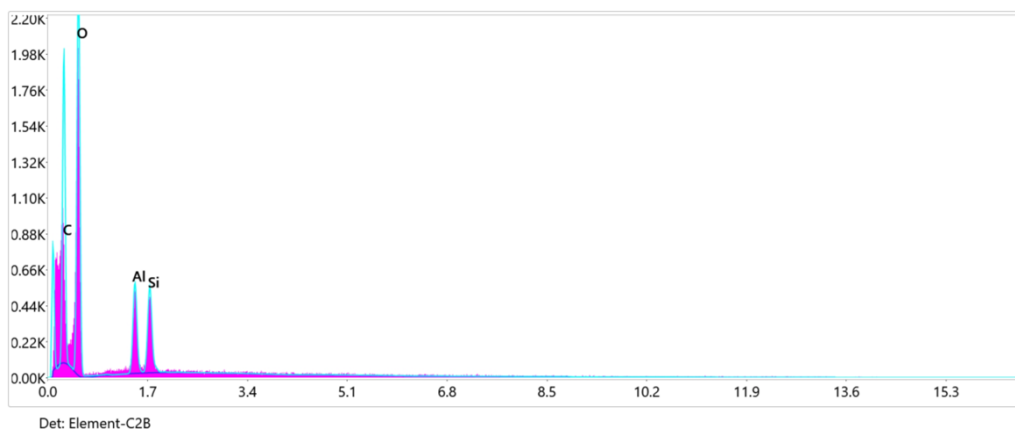


Fig. 10. Spectrul EDAX pentru B150.

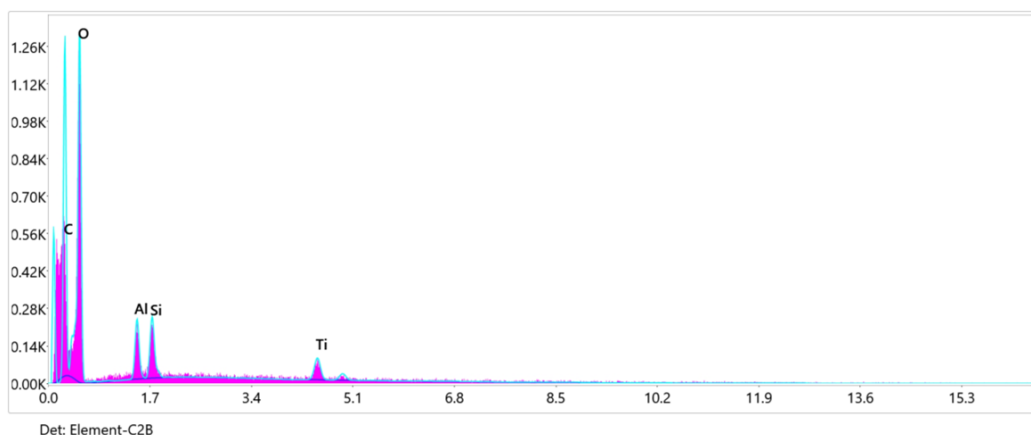


Fig. 11. Spectrul EDAX pentru C150.

5. CONCLUZII

Supercondensatoarele flexibile sunt componente utile în alimentarea cu energie electrică a dispozitivelor electronice integrate în e-textile. Realizarea acestora presupune adaptarea și optimizarea unor proprietăți aparent opuse: în acest articol s-a studiat corelarea între conductivitatea electrică și densitatea specifică a variantelor de electroliți obținute. Variantele cu dioxid de titan au prezentat rezultatele optime conform calculului statistic, respectiv C150, C100 și B150. Aceste variante vor fi utilizate în continuare pentru integrarea în componentele supercapacitorilor flexibili. S-au studiat totodată morfologia suprafeței electroliților obținuți și substanțele componente, pentru evidențierea caracterului prietenos cu mediul și corelarea cu performanțele electrice ale produselor. Se are astfel în vedere realizarea de articole vestimentare purtabile e-textile cu o valoare adăugată mare, care să confere avantaje competitive companiilor din industria textilă.

6. ACKNOWLEDGEMENT

Această lucrare a fost finanțată prin Programul Nucleu din Planul Național de C&D&I 2022-2027,

susținut cu sprijinul MCID, număr proiect 6N/2023, PN 23 26 01 03, proiect 3D-WearIoT. Publicarea lucrării științifice a fost finanțată de către MCID prin Programul 1 – Dezvoltarea sistemului național de C&D, Subprogramul 1.2 – Performanță instituțională – proiecte de finanțare a excelenței în C&D&I, contract nr. 4PFE/2021.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Rădulescu, I. R., Visileanu, E., Scarlat, R., Mitu, B., Stancu, C., Morari, C., Mancasi, I., *Plan de afaceri pentru implementarea într-o companie textilă a unor ecrane electromagnetice flexibile*. Buletinul AGIR, **4**, 2022, București, România.
- [2] Lupescu, M. A. C., Perdum, E., Rădulescu, I. R., Dincă, L. C., *A comparison between several textile-based electrodes for flexible supercapacitor applications*. Annals of the University of Oradea, Fascicle of Textiles, Leatherwork, **25**, 2024, Oradea, România.
- [3] Aileni, R. M., Rădulescu, I. R., *Experimental design for wearable textile supercapacitors*. TEXTEH11 Proceedings, 2023.
- [4] Sundriyal, P., Bhattacharya, S., *Textile-based supercapacitors for flexible and wearable electronic applications*. Scientific Reports, **10**, 2020.
- [5] Peng, C., Yan, X., Wang, R., Lang, J., Ou, Y., Xue, Q., *Promising activated carbons derived from waste tea-leaves*

- and their application in high performance supercapacitors electrodes. *Electrochimica Acta*, **87**, 2013.
- [6] Shieh, J. Y., Tsai, S. Y., Li, B., Yu, B. H., *High-performance flexible supercapacitors based on porous array electrodes*. *Materials Chemistry and Physics*, **195**, 2017.
- [7] Piñeiro-Prado, I., Salinas-Torres, D., Ruiz-Rosas, R., Morallón, E., Cazorla-Amorós, D., *Design of Activated Carbon/Activated Carbon Asymmetric Capacitors*. *Frontiers in Materials*, **3**, 2016.
- [8] Salleh, N. A., Kheawhom, S., Mohamad, A. A., *Chitosan as biopolymer binder for graphene in supercapacitor electrode*. *Results in Physics*, **25**, 2021.
- [9] Sharmin, N., Rosnes, J. T., Prabhu, L., Böcker, U., Sivertsvik, M., *Effect of Citric Acid Cross Linking on the Mechanical, Rheological and Barrier Properties of Chitosan*. *Molecules*, **27**, 2022.
- [10] Fahimizadeh, M., Wong, L. W., Baifa, Z., Sadjadi, S., Auckloo, S. A. B., Palaniandy, K., Pasbakhsh, P., Tan, J. B. L., Singh, R. K. R., Yuan, P., *Halloysite clay nanotubes: Innovative applications by smart systems*. *Applied Clay Science*, **251**, 2024.
- [11] Lin, Y., Wang, X., Liu, J., Miller, J. D., *Natural halloysite nano-clay electrolyte for advanced all-solid-state lithium-sulfur batteries*. *Nano Energy*, **31**, 2017.
- [12] Morozova, M., Krysa, J., Vesely, M., Dzik, P., Solcova, O., *Electrochemical properties of TiO₂ electrode prepared by various methods*. *Procedia Engineering*, **42**, 2012.
- [13] Gunantara, N., A review of multi-objective optimization: Methods and its applications, *Gunantara, Cogent Engineering* (2018), 5: 1502242 <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242>
- [14] Raissi, S., Eslami Farsani R., *Statistical Process Optimization Through Multi-Response Surface Methodology*, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:3 2009-03-25
- [15] Juneja S. et al., *Multiresponse optimisation and process capability analysis of chemical vapour jet machining for the acrylonitrile butadiene styrene polymer: Unveiling the morphology*, *Open Physics* 2024; 22: 20230203, <https://doi.org/10.1515/phys-2023-0203>
- [16] Candioti L-V., María De Zan M., Cámara M-S, Goicoechea H-C., *Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development*, *Talanta* 124 (2014) 123–138, <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2014.01.034>
- [17] C. Tarcolea, A. Paris, A. Demetrescu-Tarcolea, *Statistical methods applied for materials selection*, *Applied Sciences*, Vol.11, 2009, pp. 145-150.

Despre autori

CSII, dr. ing. **Ion Răzvan RĂDULESCU**

INCDTP București, România

A obținut titlul de doctor în științe inginerești (2018) cu tema modelării atenuării electromagnetice prin structuri textile neconvenționale. Deține expertiză în domeniul textilelor conductive electrice (e-textiles) și în domeniul sustenabilității și impactului materialelor textile asupra mediului prin evaluarea ciclului de viață – LCA (SimaPro). Are totodată expertiză în domeniul procesării statistice a datelor experimentale (MATLAB, MODDE) și în programarea diferitelor aplicații web pentru domeniul textil (PHP/MySQL). Este administrator certificat Moodle și a realizat numeroase instrumente de e-learning. Deține abilități în managementul proiectelor prin coordonarea a cinci proiecte de parteneriat strategic Erasmus+ și a unui proiect ERA-NET Manunet. A publicat peste 30 de articole cu factor de impact. Este președintele SIT-AGIR din anul 2018.

CSI, dr. ing. **Emilia VISILEANU**

INCDTP București, România

Cercetător științific gr.I, dr.ing., la INCDTP-București, absolventă a Institutului Politehnic „Gh. Asachi”, Iași – Facultatea de Industrie Ușoară cu peste 50 ani experiență în participarea și coordonarea de proiecte de cercetare, derulate în programele naționale și internaționale de CDI și peste 20 ani în managementul organizațional și al activității de cercetare - dezvoltare. Recunoașterea științifică s-a materializat prin publicarea a 16 cărți în calitate de autor și coautor, 56 lucrări științifice publicate în reviste sau proceeding-uri ale unor conferințe, 15 brevete de invenții și peste 95 de premii și medalii ale saloanelor de invenții și inovații. Președinte de onoare al SIT-AGIR, președinte CT-103 ASRO, vicepreședinte ASRO.

ACS, ing. **Marius Alexandru Cezar LUPESCU**

INCDTP București, România

Asistent de cercetare la INCDTP – București. Deține licență în știința și ingineria polimerilor, prin absolvirea Facultății de Inginerie în Limbi Străine (FILS) - UPB. Cercetările sale actuale se îndreaptă către studiul polimerilor și materialelor pe bază de polimeri cu proprietăți electrice și aplicarea acestora în dispozitive electronice portabile.

CSIII, chim. **Elena PERDUM**

INCDTP București, România

Cercetător științific la INCDTP – București. Deține licență în Chimia Mediului și un Masterat în Chimie Analitică, prin absolvirea Facultății de Chimie a Universității București. Activitatea de cercetare s-a concretizat în peste 10 proiecte naționale și internaționale (EUREKA, PED, Nucleu etc.) atât ca responsabil de proiect cât și ca membru în echipe interdisciplinare. Cercetările actuale se îndreaptă către funcționalizarea materialelor textile cu nano-particule,

EDUCAȚIE. CERCETARE. PROGRES TEHNOLOGIC

studiul compușilor toxici din materialele textile și totodată determinarea conținutului de formaldehidă și amine aromatice din textile.

CSIII, drd. fiz. **Laurențiu-Christian DINCĂ**

INCDTP București, România

Cercetător științific la INCDTP – București. Deține licență în fizică și un masterat în Interacțiuni Atomice și Nucleare, ca absolvent al Facultății de Fizică – Universitatea din București. Cercetările actuale se îndreaptă spre știința materialelor și abordează tratamente și analiză fizico-chimice de suprafață, procese de sinteză și creștere de suspensii carbonice, tratamente și investigări morfologice la microscopul SEM.

Dr. ing. **Rodica NEGROIU**

INCDTP București, România

Șef de lucrări în cadrul Universității Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București, Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației. A obținut diploma de inginer cu specializarea Inginerie economică în domeniul electric, electronic și energetic în 2014. Titlul tezei de doctorat (2021): „Cercetare asupra parametrilor electrici ai supercondensatoarelor”. Ca parte a doctoratului și a cercetării aplicative în cadrul acestuia și nu numai, ea a dezvoltat mai multe studii care s-au concretizat prin publicarea a 30 articole științifice. A fost membră a echipei de implementare a mai multor proiecte naționale și internaționale. Ea este advisor al IEEE Nanotechnology Student Branch Chapter, Politehnica București din 2022, unde promovează colaborarea între studenți și conduce proiecte de succes.

CSI, dr. ing. Mat. **Carmen MIHAI**

INCDTP București, România

Cercetător de prestigiu în cadrul INCDTP – București, cu numeroase rezultate științifice în domeniul produselor tehnice țesute. Absolventă a Facultății de Textile-Pielărie și Management Industrial al UT Iași și al Facultății de Matematică a Universității București. Deține un portofoliu de 20 brevete de invenție, peste 30 de articole științifice cu factor de impact, cât și un număr de 50 premii și medalii la saloane internaționale de invenție. Este director sau responsabil de proiect pentru peste 20 de proiecte pe plan național și european.