

Lucrarea 12

Eco-confort și modelarea regimului termic pentru un autobuz electric folosind programul Comsol Multiphysics

1. Scopul lucrării

Înțelegerea factorilor de mediu și a noțiunii de eco-confort care influențează confortul călătorilor din punct de vedere termic. Modelarea și simularea regimului termic dintr-un vehicul de transport public.

2. Regimul termic și confortul pasagerilor. Noțiunea de eco-confort

Energia necesară unui vehicul este utilizată pentru asigurarea necesarului de energie pentru deplasare (energia consumată de motoarele de tracțiune), și pentru alimentarea echipamentelor auxiliare.

Consumul de energie pentru un vehicul de transport pasageri depinde de traseu, de numărul de pasageri, de condițiile de mediu, de modul de conducere, în funcție de acestea putând varia până la de două ori față de specificațiile tehnice ale vehiculului. Consumul de energie pentru sistemele auxiliare poate ajunge până la 35% din consumul total de energie, în funcție de diverși parametri variabili precum numărul de opriri pe traseu, numărul de stații, în funcție de condițiile de mediu (temperatura exterioară, deplasare de zi sau de noapte).

Echipamentele de încălzire, ventilație și aer condiționat se regăsesc adeseori sub denumirea HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), și reprezintă consumatorii auxiliari cei mai importanți de pe vehicul. Îmbunătățirea eficienței sistemelor auxiliare ar putea duce la o reducere a consumului total de energie, ceea ce este foarte important pentru vehiculele cu autonomie limitată, precum autobuzele electrice. Autobuzele tradiționale utilizează sisteme de încălzire, ventilație și aer condiționat (HVAC) folosind de obicei încălzire prin rezistență-convecție, o parte din căldură fiind preluată de la motor pentru a utiliza căldura eliberată de acesta. Pentru autobuzele electrice, toată energia este asigurată de sursa de alimentare din vehicul (baterii), care este limitată. Sistemele auxiliare, alimentate de la această sursă proprie de energie electrică, pot duce la

o scădere rapidă a energiei disponibile și la o reducere semnificativă a autonomiei vehiculului, de până la 50%. De exemplu, pentru un autobuz electric de 12 metri, se estimează că puterea electrică medie pentru a menține interiorul vehiculului la 17°C într-o zi rece de iarnă este de aproximativ 24 kW. Astfel, sistemul de încălzire are o influență semnificativă asupra autonomiei vehiculului electric, reducând la jumătate sau chiar mai mult autonomia vehiculului electric pentru o temperatură exterioară a aerului de 0°C.

Consumul de energie estimat al sistemelor auxiliare descris ca procent din energia consumată este de până la 35% pentru încălzire, până la 30% pentru răcire, și 10% pentru alte sisteme. În valori absolute, pentru un autobuz electric uzual, puterea necesară pentru echipamentele auxiliare este de până la circa 24kW pentru încălzire, 10..16kW pentru aer condiționat, 1..1,5 kW pentru iluminat, 1..2kW pentru sistemele audio-video și de bilete, 3..6 kW pentru compresor.

Confortul pasagerilor și cerințele de energie

Deoarece sistemul HVAC este echipamentul auxiliar cu impactul cel mai mare în consumul de energie pe vehicul, analiza acestuia se impune ca fiind necesară, și deoarece este în legătură directă cu temperatura din vehicul, rezultă că energia consumată va depinde de confortul oferit pasagerilor.

Parametrul principal în aprecierea confortului călătoriei este temperatura de referință din cabina vehiculului electric. De obicei, temperatura de referință se dorește a fi menținută la o temperatură constantă, confortabilă pentru pasagerii din autobuz, dar „aspectul confortului” este unul foarte complex, deoarece ceea ce o persoană percepe ca fiind o temperatură confortabilă depinde de mulți parametri, cum ar fi:

- Umiditatea aerului: umiditatea face ca temperatura percepută de o persoană să fie amplificată. Aerul rece umed se simte mai rece decât aerul rece uscat la aceeași temperatură. De asemenea, aerul cald umed se simte mai cald decât aerul cald uscat.
- Viteza aerului: dacă există un flux de aer în jurul persoanei, transferul de energie termică dintre persoană și aerul ambiental crește. Aerul rece se simte mai rece, iar aerul cald se simte mai cald în fluxurile de aer cauzate, de exemplu, de statul lângă uși sau de ieșirea de ventilație.
- Radiația termică: aerul din cabină este încălzit de soare, iar o persoană aflată lângă geam poate simți și efectul direct al radiației soarelui, ceea

ce face ca acea persoană să simtă mai cald decât o mpersoană care se află în mijlocul vehiculului.

- Efecte sezoniere: confortul este legat și de diferențele de temperatură. Dacă temperatura exterioară iarna este de 0°C , o temperatură interioară de 17°C s-ar putea simți deja caldă. În schimb, vara, această valoare de referință ar putea fi prea scăzută.
- Metabolism: greutatea corporală, sexul și vârsta pot genera diferențe între persoane în ceea ce privește metabolismul ceea ce cauzează diferențe în confortul perceput la aceeași temperatură din vehicul.

Având în vedere aceste efecte combinate, nu este posibil să existe o valoare de referință a temperaturii care să facă toți pasagerii să se simtă confortabil. Temperatura internă normală a aerului din vehicul trebuie să fie de $20\text{-}21^{\circ}\text{C}$. Pentru a menține aceste limite, consumul de energie al climatizării depinde de diferența de temperatură dintre interiorul și exteriorul mașinii.

Prin urmare, o atenție specială trebuie acordată optimizării sistemului termic al vehiculelor electrice, funcționalitate denumită ECO-confort. Această funcționalitate este dată de:

1. Valoarea de referință dinamică a temperaturii: Luând în considerare diferitele aspecte ale confortului, se poate implementa un control al valorii de referință a temperaturii optimizat energetic. De exemplu, o valoare de referință a temperaturii poate varia pe parcursul zilei pentru a ține cont de schimbările de temperatură ambientală. În mod similar, aceeași metodă poate fi aplicată între condițiile de vară și cele de iarnă. Iarna, valori de referință mai mici pot fi acceptate la fel de confortabile ca vara. Acest lucru are ca rezultat un consum de energie mai mic al sistemului HVAC.

2. Precondiționare: Precondiționarea înseamnă că temperatura din cabină este deja controlată la temperatura dorită în timp ce vehiculul este conectat la stația de încărcare, fie în depou, fie pe traseu la stațiile terminale. În acest fel, vârful de energie inițial necesar pentru controlul temperaturii este preluat direct din rețea, nu din baterie, ceea ce îmbunătățește autonomia vehiculului.

Sistemul HVAC

Sistemul de încălzire, ventilație și aer condiționat (HVAC) este principalul sistem auxiliar consumator de energie într-un vehicul electric și necesită o atenție specială în utilizarea sa, încălzirea și aerul condiționat în vehiculele urbane fiind un mijloc esențial pentru îmbunătățirea confortului termic pentru pasageri.

Un sistem HVAC tipic pentru autobuzele urbane include o unitate de aer condiționat pe și convectoare pentru distribuția căldurii. Unitatea de aer condiționat (aflată de regulă pe acoperiș) are o mașină de refrigerare prin compresie și mai multe schimbătoare de căldură pentru răcirea și încălzirea aerului. Conductele de apă leagă unitatea de acoperiș și convectoarele la nivelul podelei de circuitul de apă de răcire al motorului, care este utilizat ca sursă de căldură, îmbunătățind eficiența energetică globală a vehiculului. În cazul încălzirii prin rezistență, necesarul de energie poate să dubleze sau chiar să tripleze consumul de energie al vehiculului. În plus sistemul asigură și încălzirea și degivrarea parbrizului.

Sistemul de aer condiționat este și el un consumator important pe perioada de vară, când, pentru o temperatură exterioară de 35°C se poate ajunge la un consum de 12..16kWh pentru menținerea unei temperaturi confortabile în interiorul vehiculului. Astfel, consumul de energie pe echipamentele auxiliare poate reduce semnificativ eficiența energetică a vehiculului și, pentru vehiculele electrice neautonome (autobuze electrice) va reduce semnificativ distanța parcursă între două reîncărcări ale bateriei de tracțiune.

3. Bilanțul termic pentru un autobuz electric

Consumul optim de energie și confortul termic interior pentru pasageri pot fi calculate și modelate utilizând teoria transferului de căldură, metoda bilanțului termic și valoarea U (transmitanța termică). Transferul de căldură în autobuzul electric este un proces complicat, datorită complexității vehiculului (geamuri, pereți din diferite straturi, podea) dar, pe baza teoriei transferului de căldură, se au în vedere cele trei mecanisme pentru transferul de căldură: conducție, convecție și radiație.

Metoda Bilanțului Termic este o metodă comună pentru calcularea sarcinilor de încălzire și răcire într-un spațiu sau o zonă. Pe baza acestei teorii, toate sarcinile de încălzire pot fi scrise într-o ecuație cuprinzătoare. Se pot presupune patru procese distincte pentru bilanțul termic într-un autobuz electric:

- Bilanțul termic al suprafeței exterioare;
- Bilanțul termic al suprafeței interioare;
- Conducția pereților;
- Bilanțul termic al aerului în zona interioară.

Pentru o proiectare optimă a sistemului de încălzire din interiorul autobuzului, este crucial să se determine cu precizie sarcinile de încălzire, deoarece subestimarea acestora poate duce la probleme de confort termic, în timp ce o proiectare excesivă poate crește costurile de fabricație și de operare ale vehiculului [18].

Trebuie luate în considerare diverse sarcini termice, dar există o serie de componente termice principale care trebuie estimate în modelarea și calculul bilanțului termic al cabinei unui vehicul [8, 18-20], (Figura 1):

- Sarcina termică dată de metabolismul pasagerilor, Q_{met} ;
- Sarcina termică dată de radiația solară, cu trei componente, Q_{sun} :
 - Radiația directă de la soare,
 - Radiația difuză dată de dispersia în atmosferă,
 - Radiația reflectată de către sol și suprafețele înconjurătoare.
- Sarcina termică datorată motoarelor electrice de tracțiune, Q_{mot} .
- Sarcina termică datorată bateriilor de tracțiune, Q_{bat} .
- Sarcina termică a aerului proaspăt furnizat de sistemul de ventilație pentru nevoile pasagerilor, Q_{ven} ;
- Fluxul de căldură schimbat cu mediul din cauza gradientului de temperatură dintre structura autobuzului (ferestre, pereți, podea, acoperiș, uși) și mediul exterior, Q_{amb} ;
- Sarcina termică schimbată cu mediul din cauza ușilor deschise în timpul opririlor în stații, Q_{door} ;
- Sarcina termică generată de sistemul de încălzire din vehicul pentru a asigura confortul termic pentru pasageri, Q_{hsyst} .

Pe baza componentelor de mai sus. Modelul termic pentru interiorul vehiculului este dat de relația:

$$Q_{total} = Q_{met} + Q_{sun} + Q_{mot} + Q_{bat} + Q_{ven} + Q_{amb} + Q_{doors} + Q_{hsyst}. \quad (4)$$

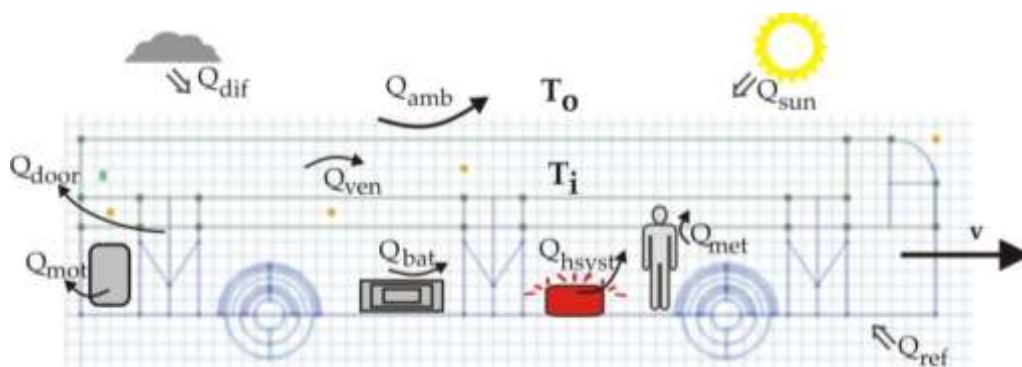


Figura 1. Reprezentare a modelului termic din interiorul unui autobuz electric.

4. Proiectarea geometriei interioare a autobuzului electric

Pentru a studia transferul de căldură și optimizarea termică pentru confortul pasagerilor în autobuzul electric, se utilizează aplicația Comsol Multiphysics, bazată pe Analiza Elementelor Finite/Metoda Elementelor Finite (MEF). Software-ul are o aplicație specială pe aspectele termice, și anume Modulul de Transfer de Căldură, împreună cu un Modul AC/DC și o Bibliotecă extinsă de Materiale.

Pentru a simula procesul termic din interiorul autobuzului, trebuie urmați următorii pași:

a) Modelare geometrică. Modelul 1D, 2D sau 3D va fi stabilit pornind de la datele geometrice reale și parametri reali ai autobuzului (dimensiuni, tipul și proprietățile fizice ale materialelor, poziția diferitelor elemente în autobuz, cum ar fi scaunele, geamurile, ușa, încălzitoarele, cabina șoferului etc.). Înainte de a începe modelarea geometrică, vor fi indicate unele dintre constante și variabile.

b) Setări fizice. Meniul de fizică al software-ului are două setări, care sunt setări de subdomeniu și setări de limită.

i. Setările subdomeniilor sunt pentru setarea proprietății materialului și a condițiilor inițiale ale fiecărui domeniu (capacitatea termică specifică, conductivitatea termică, densitatea, temperatura inițială în interiorul și exteriorul vehiculului).

ii. Setările limită sunt pentru setarea condițiilor limită în două aspecte: setarea condițiilor limită la interfața diferitelor materiale și setarea condițiilor limită la interfața dintre material și mediu.

c) Rezolvare. După finalizarea tuturor setărilor menționate mai sus, problema poate fi rezolvată. Rezolvatorul software poate fi selectat pentru a trata diferite probleme. Acesta poate selecta rezolvatorul adecvat în funcție de problemă sau poate utiliza setările implicite. Referitor la această analiză, se va utiliza setările implicite pentru a rezolva problemele de transfer de căldură.

d) Rezultate. După rezolvare, rezultatele vor fi afișate în grafice 3D și 2D, iar rezultatele pentru punctele selectate din interiorul magistralei vor fi analizate, comparate cu măsurătorile din date reale, și se pot lua decizii cu privire la noi simulări cu parametri modificați.

Geometria autobuzului electric este construită ca o geometrie de bază și este compusă din:

- cabină pentru pasageri;
- cabină șofer;
- pereți autobuz;
- parbriz;
- geamuri;
- podea;
- acoperiș;
- uși;
- scaune pentru pasageri;
- unități electrice de încălzire a aerului în interiorul cabinei pasagerilor;
- bloc de încălzire în interiorul cabinei șoferului.

Dimensiunile autobuzului electric sunt proiectate în modelul geometric în funcție de dimensiunile reale ale unui vehiculului real. Acesta este un vehicul cu podea joasă, cu o capacitate de 100 de pasageri, cu un motor electric de 150 kW, cu patru unități de încălzire în interiorul cabinei pasagerilor. Componentele vehiculului descrise mai sus sunt, de asemenea, proiectate pe modelul geometric, luând în considerare dimensiunile lor reale pe autobuzul electric. Astfel, modelul și rezultatele simulării vor fi apropiate de realitate.

Primul pas pentru construirea modelului geometric al autobuzului electric este proiectarea cabinei pasagerilor și a cabinei șoferului. Pentru modelare și simulări, aceste zone vor fi considerate umplute cu aer.

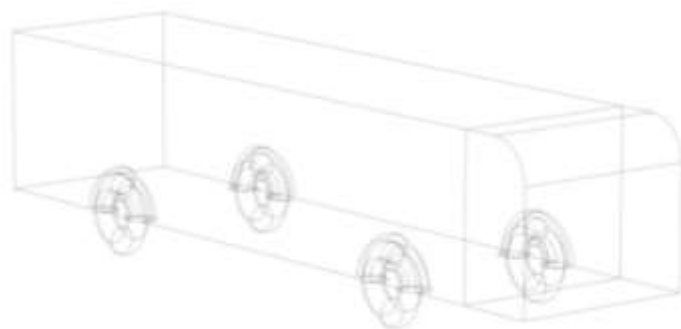


Figura 2. Geometria vehiculului proiectat în Comsol Mutiphysics.
Reprezentare wireframe.

Al doilea pas în proiectarea modelului geometric este proiectarea componentelor exterioare, cum ar fi peretele frontal, peretele posterior, pereții laterali, geamurile față (parbriz), luneta, geamurile laterale și ușile. Pentru aceasta, s-a utilizat o reprezentare 2D (Figura 2), ca plan de lucru și proiectare a geometriei plane. Pentru fiecare dintre aceste componente, coordonatele pentru dimensiune, formă și poziție sunt transferate în modelul geometric.

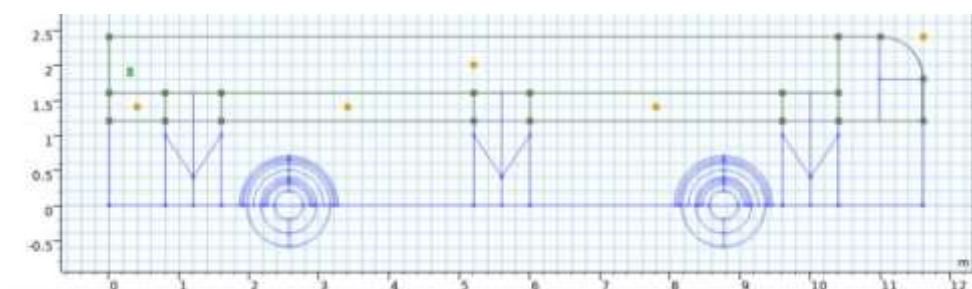


Figura 3. Modelul 2D al autobuzului.

Dimensiunea modelului geometric al autobuzului electric este în conformitate cu dimensiunile reale ale autobuzului. De asemenea, alte componente ale vehiculului sunt proiectate având corespondența cu componentele reale ale vehiculului.

Având structura principală a modelului geometric, încălzitoarele pot fi proiectate în interiorul cabinelor. Cabina pasagerilor este proiectată cu patru încălzitoare, iar cabina șoferului cu o singură încălzitoare (Figura 4). Astfel, în cabina pasagerilor, prima încălzitoare este plasată pe partea dreaptă a vehiculului, lângă a treia ușă, o a doua încălzitoare este plasată pe partea stângă a vehiculului, în zona din mijloc, a treia încălzitoare este plasată pe partea dreaptă, după a doua

ușă, iar a patra încălzitoare este plasată în fața cabinei, lângă peretele despărțitor vitrat care separă cabina șoferului de habitacul (Figura 4).

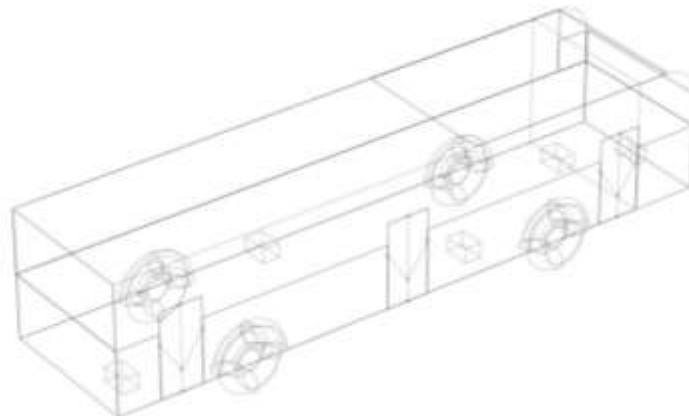


Figura 4. Poziția radiatoarelor termice în interiorul vehiculului.

O vedere netransparentă poate fi utilizată pentru o mai bună identificare a unora dintre componente, ca în Figura 4, unde ușa din față este selectată pentru a-i accentua poziția, dimensiunile și proprietățile. De asemenea, poate fi afișată o grilă 3D pentru a estima distribuția spațială a componentelor.

Discretizare (meshing)

Mesh este o discretizare a unui domeniu într-un set de elemente. Rețeaua va fi constituită din elemente solide tetraedrice (figura 5). În model, dimensiunea rețelei va fi luată în considerare pentru dimensiunea Normală, care oferă punctele necesare pentru modelare fără o structură foarte complexă. Astfel, timpul de calcul va fi scurt, iar precizia va fi mare. Aceleași proprietăți ale rețelei vor fi utilizate pentru întregul model geometric.

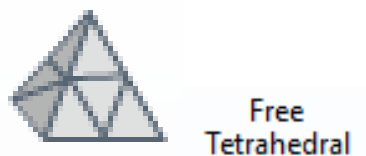


Figura 5. Element mesh.

În figura 6 este reprezentată rețeaua (Mesh) pentru întregul model geometric cu selectarea unei componente din structură (peretele frontal din partea dreapta a autobuzului).

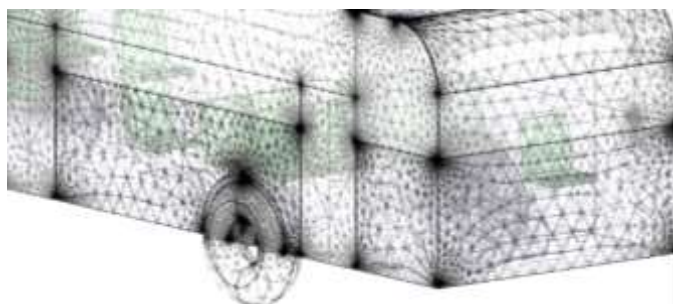


Figura 6. Structura Mesh.

Materiale utilizate pentru modelul de autobuz electric

Materialele utilizate pentru model sunt similare cu materialele utilizate la autobuzul electric real. Astfel, fierul, sticla, plasticul acrilic, fibra de sticlă și PMMA - polimetacrilat de metil sunt luate în considerare pentru componentele autobuzului. Volumul interior al autobuzului este modelat ca fiind umplut cu aer. Parametrii materialelor sunt prezentați în Tabelul 1.

Tabelul 1. Alegerea materialelor pentru structura autobuzului.

Material	Selection
Iron (mat1)	Domains 1–6, 8, 11, 14, 16, 23, 36–37, 43, 45–46, 50, 53, 55, 68–69, 77, 79, 84
Air (mat3)	Domains 12, 80
PMMA - Polymethy...	Domains 24–27, 32–33, 60–65
Glass (quartz) (mat5)	Domains 7, 9–10, 15, 19, 22, 51–52, 76, 78, 82–83, 85, 87
Acrylic plastic (mat6)	Domains 13, 17–18, 20–21, 28–31, 34–35, 38–42, 44, 47–49, 54, 56–59, 66–67, 70–75, 81
glass fiber blanket [...]	Domain 86

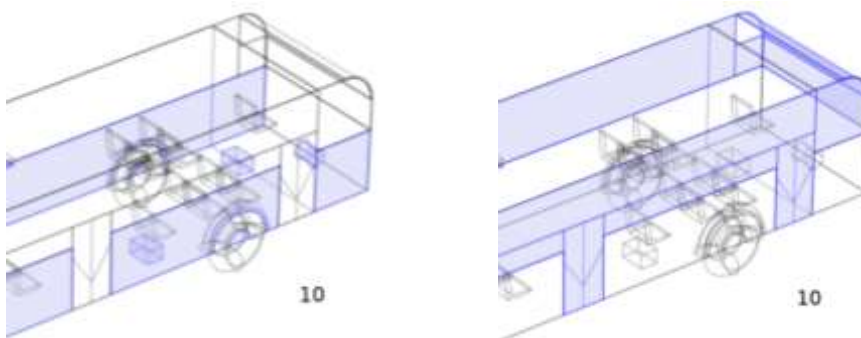


Figura 7. Reprezentarea zonelor cu materiale specifice.

5. Fizica modelului termic pentru autobuz electric

Pentru a modela evoluția termică din interiorul autobuzului, se utilizează Modulul de Transfer de Căldură. Se vor seta parametrii, variabilele, valorile inițiale, fluxul de căldură și temperatura. Componentele structurii autobuzului sunt considerate solide. Presiunea pentru domeniul aerului este considerată de la 1 [atm].

Conductivitatea termică, densitatea și capacitatea termică vor fi luate în considerare din proprietățile materialelor. Fluxul de căldură va fi considerat în tot domeniul, cu excepția roților și a domeniului extrem al sistemului de colectare a energiei. Astfel, căldura va fi transmisă în toate materialele și domeniile principale ale vehiculului.

Se vor lua în considerare temperaturile pentru încălzitoare:

- Temperatura T_1 [°C], pentru încălzitoarele din interiorul cabinei pasagerilor;
- Temperatura T_2 [°C], pentru încălzitorul din interiorul cabinei șoferului.

Astfel, se vor putea lua în considerare valori de intrare diferite pentru cele două cabine, permițând simularea diferitelor condiții. Transferul de căldură conductiv este considerat pentru solide, iar transferul de căldură convectiv este considerat pentru zonele aer/solid, conform ecuațiilor specifice teoriei transferului de căldură.

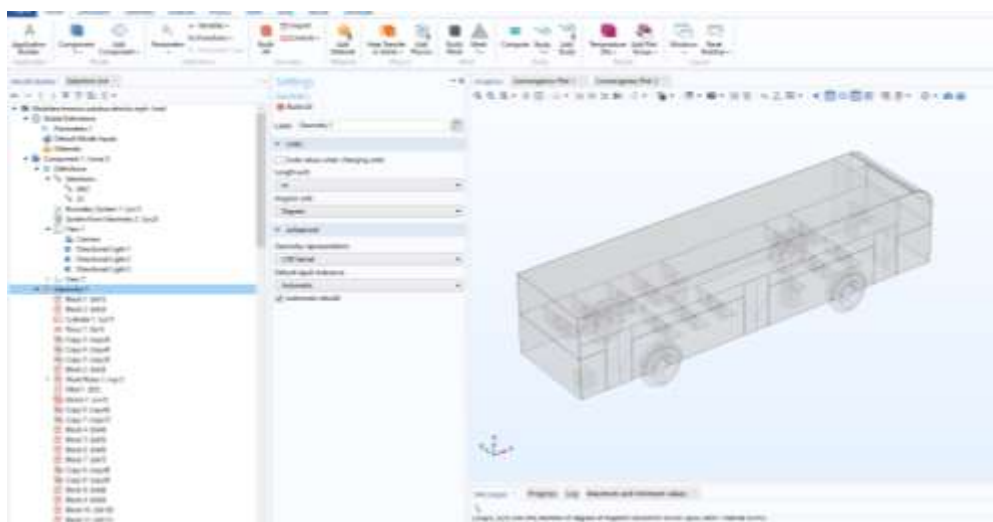


Figura 8. Interfața Comsol Multiphysics.

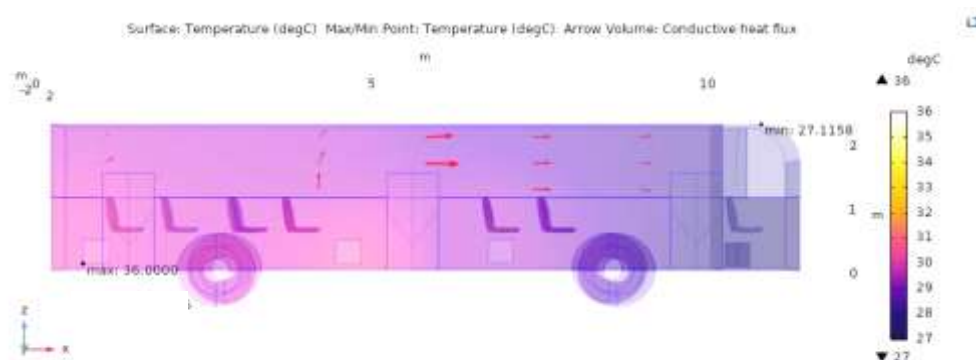


Figura 9. Temperaturile în interiorul vehiculului estimate cu modelul termic.

Bibliografie

1. <https://www.comsol.com>
2. Chiriac G., Lucache D.D., Nițucă C., Dragomir A., Ramakrishna S. *Electric Bus Indoor Heat Balance in Cold Weather*. Applied Sciences. 2021; 11(24):11761.
3. Costică Nițucă, Gabriel Chiriac, Ilie Nucă, Vadim Cazac, Marcel Burduniuc, Geometry Design And Analysis Of An Electric Bus For The Interior Ther-Mal Modelling , Journal of Energy Technology: Vol. 14 No. 2 (2021).
4. Lajunen, A.; Yang, Y.; Emadi, A. Review of Cabin Thermal Management for Electrified Passenger Vehicles. IEEE Trans. Veh.Technol. 2020, 69, 6025–6040.

Mersul lucrării și conținutul referatului

1. Se va analiza conceptul de eco-confort și regimul termic necesar pentru pasageri.
2. În aplicația Comsol Multiphysics se va realiza modelul geometric al vehiculului.
3. În aplicația Comsol Multiphysics se va dezvolta modelul termic al interiorului vehiculului.
4. Pentru diverse valori de temperatură impuse se vor determina temperaturile rezultate din modelarea regimului termic al vehiculului și se vor compara cu valorile date de regimul de eco-confort.