

OPTIMIZAREA UNUI SISTEM DE MENTENANȚĂ INTEGRAT PENTRU AUTOVEHICULE

Colonel Ioan MUNTEANU

Colonel Florin Ioan CIOANCA

Divizia 4 Infanterie 4 „Gemina”, Cluj-Napoca

DOI: 10.55535/GMR.2025.3.39

Configuring military structures, regardless of their specialization, to act in military operations requires a “projection” adaptable to the modern combat environment, as well as to the challenges posed by adapting new technologies to the military environment and even the use of artificial intelligence. Flexibility in approaching calculation methods, mathematical modeling and optimization of the projections of maintenance structures and microstructures will lead to obtaining optimal configurations both as military structures and especially as specific activities.

These can be calculated, modeled and optimized so that their configuration responds to both the missions and objectives as well as the principles of employing military forces in military operations.

Keywords: maintenance; system; design; configuration; optimization;

INTRODUCERE

Unul dintre factorii esențiali în obținerea succesului într-o acțiune sau operație militară îl reprezintă existența și capacitatea unui sistem logistic care să asigure nevoile forțelor militare, atât ale celor de la contact, cât și ale celor aflate în alte situații. În ceea ce privește asigurarea logistică a forțelor militare aflate la contact, un element important îl constituie și existența, capacitatea și adaptabilitatea sistemului de mentenanță a echipamentelor militare utilizate, astfel încât forțele militare să aibă în permanență un coeficient de stare tehnică ridicat și care să le permită îndeplinirea misiunilor primite.

Puterea de luptă a unei forțe militare derivă, în principal, din potențialul de luptă al acesteia. *Potențialul de luptă* al unei forțe, conform literaturii militare de specialitate (Buța, Alexandrescu, Dumitru, 2004, p. 10) conține cel puțin două componente: *potențialul de luptă proiectat* și *potențialul de luptă disponibil*.

Potențialul de luptă proiectat (du Bois, Hughes jr., Low, 1998, p. 78) se referă la capacitatea latentă prognozată a unei forțe pentru a obține rezultate utile în luptă, aceasta fiind organizată, instruită, echipată, sprijinită, motivată și condusă corespunzător forței desemnate împotriva unei amenințări planificate. Practic, este acea stare de existență fizică a unei structuri militare rezultată din modul de organizare, dotare cu echipamente și sisteme militare, instruire și pregătire pentru luptă și întrebuițată conform principiilor și tacticilor stabilite prin doctrina militară.

În potențialul de luptă proiectat, componenta de sprijin logistic în care este inclus și sistemul de mentenanță al echipamentelor militare, prin proiectarea și configurarea optimă a acesteia, poate maximiza sau minimiza potențialul de luptă proiectat al structurii militare.

Potențialul de luptă disponibil (lb.) este capacitatea latentă a unei forțe de a obține rezultate optime în luptă prin existența organizării, instruirii, echipării, sprijinului, *inclusiv sprijinul logistic*, motivării și conducerii. Potențialul de luptă disponibil al unei structuri de nivel tactic reprezintă acea stare inițială a structurii militare, influențată de *factorii și variabilele* din spațiul de luptă, care, întrebuițată în luptă, poate produce efecte planificate/așteptate împotriva unui inamic.

Pentru a realiza o analiză, din punct de vedere matematic, a proiectării și configurării unui sistem de mentenanță flexibil și adaptabil, care să aibă un potențial disponibil necesar realizării reparațiilor autovehiculelor forțelor militare,

vom introduce și *integra factori, variabile si constante* care influențează dinamica sistemului de mentenanță autovehicule.

Proiectarea, configurarea și optimizarea unui sistem de mentenanță integrat de autovehicule pleacă de la îndeplinirea, cel puțin la nivel teroretic, a unei *condiții minime de echilibru a sistemului*, respectiv: *numărul de autovehicule operaționale la un moment dat trebuie să fie egal cu diferența dintre numărul de autovehicule cu care începe operația militară și diferența dintre numerele autovehiculelor scoase din luptă/acțiune și autovehicule reparate*. Această condiție minimă de echilibru, analizată, descompusă pe variabile și constante și, ulterior, optimizarea acestora ne vor oferi informațiile necesare configurării unui sistem de mentenanță integrat de autovehicule. Integrarea acestor variabile și constante se va realiza în concordanță cu principiile de întreținere a forțelor în operațiile militare.

Matematic, expresia care poate asigura echilibrul sistemului de mentenanță se poate formula astfel:

$$N(t+1) = N(t) - (R_l - R_r)$$

unde,

- **$N(t)$** - Numărul de vehicule operaționale la momentul începerii luptei t (prima zi de luptă);
- **$N(t+1)$** - Numărul de vehicule operaționale după prima zi de luptă;
- **R_l** - Rata autovehiculelor scoase din luptă;
- **R_r** - Rata autovehiculelor reparable.

Pentru analiza și dezvoltarea expresiei matematice care să definească condiția de echilibru a sistemului de mentenanță integrat de autovehicule, stabilim factori, variabile și constant esențiale:

- **$I(t)$** : Numărul de vehicule avariate, imobilizate, dar reparable la momentul t . Acest număr depinde de capacitatea maximă a sistemului de a repara autovehicule într-o zi;
- **C** : Capacitatea maximă a sistemului de mentenanță de a repara autovehicule pe zi.
- **r** : Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor. Acesta se atribuie pe baza datelor istorice sau chiar de către planificatorii militari în funcție de de intensitatea acțiunilor/operațiilor militare. ($0.01 < r < 0.9$);
- **P** : Coeficientul de pierdere irecuperabilă/iremediabilă este numărul de autovehicule avariate care sunt distruse iremediabil. $0 < P < 1$ (îl atribuim în funcție de tipul acțiunii militare, 0,3 pentru apărare și 0,9 pentru ofensivă ca un exemplu).
- **R_l** - Rata autovehiculelor scoase din luptă.

Rata cu care autovehiculele sunt avariate sau distruse într-o zi depinde de numărul total de autovehicule operaționale la începutul acelei zile. Cu cât sunt mai multe autovehicule în luptă, cu atât probabilitatea de a suferi pierderi este mai mare.

Exprimată matematic, expresia este:

$$R_i = r \cdot N(t),$$

unde:

- R_i - este numărul de autovehicule scoase din luptă într-o zi;
- r - este un coeficient de pierdere zilnică (ex: 0.01-0.15, adică 1-15% din flotă pentru apărare);
- $N(t)$ - este numărul de autovehicule operaționale la începutul zilei/acțiunii militare.
- R_i - Rata de pierderi iremediabile

Datorită acțiunilor militare din spațiul de luptă din numărul total de vehicule scoase din luptă R_i , o parte P este distrusă iremediabil.

$$R_i = P \cdot R_i = P \cdot r \cdot N(t)$$

- R_r - Rata autovehiculelor reparabile

Aici intervine capacitatea sistemului de mentenanță autovehicule de a repara autovehicule pe baza organizării, dotării și funcționării optime a acestuia. Numărul de autovehicule care pot fi reparate este diferența dintre cele scoase din luptă și cele distruse iremediabil, respectiv $(1-P)$.

Introducând datele în relație matematică, rezultă expresia:

$$R_r = R_i - R_i$$

Înlocuind termenii, obținem:

$$R_r = r \cdot N(t) - P \cdot r \cdot N(t)$$

Pentru o simplificare a calculelor, considerăm, pentru început, un singur tip de avarie.

- R_{rep} - Rata de reparații a sistemului de mentenanță integrat de autovehicule SMAI

Aceasta este capacitatea constantă a sistemului nostru, C . Capacitatea de reparație reală la un moment dat este limitată fie de capacitatea maximă de reparații a SMIA, fie de numărul de vehicule avariate disponibile pentru reparație.

$$R_{rep} = \min(C, I(t)),$$

unde $I(t)$ este diferența dintre autovehiculele scoase din luptă și reparabile și capacitatea de reparație a sistemului de mentenanță integrat de autovehicule.

Începând cu momentul $t+1$, la numărul autovehiculelor avariate/imobilizate $I(t)$ se adaugă și numărul de autovehicule ce rămân nereparate din ziua anterioară.

Acestea nu se pot repara datorită limitării impuse de capacitatea zilnică de reparație a sistemului. Acestea sunt autovehiculele reparabile, avariate/imobilizate aflate deja în sistem/așteptare. Practic, sunt autovehiculele avariate/imobilizate care depășesc capacitatea de reparații a SMIA și pentru care trebuie inițiată o acțiune. Pentru prima zi de acțiuni militare, $I(t)$ este egal cu R_r .

Vom utiliza modelarea matematică și optimizarea pentru evaluarea importanței fiecărui factor, variabilă și constantă care pot reflecta condiția de echilibru a sistemului de mentenanță integrat de autovehicule.

În termeni generali, „*modelul reprezintă o interpretare explicită a înțelegerii unei situații sau cel puțin o idee despre această situație. El poate fi exprimat matematic, prin simboluri sau cuvinte, esențială fiind descrierea entităților și a relațiilor dintre acestea. Modelul poate fi descriptiv sau ilustrativ, dar, mai presus de toate, trebuie să fie util.*” (Dulău, Oltean, 2008, p. 9).

Optimizarea reprezintă „*un ansamblu de metode și tehnici care determină găsirea soluției celei mai bune (soluție optimă) pentru o problemă dată.*” (Buneci, 2008, p. 7)“.

RELAȚIA MATEMATICĂ PENTRU DINAMICA SISTEMULUI

După definirea variabilelor și constantelor privind echilibrul sistemului, putem formula relația matematică ce descrie transformarea/modificarea flotei de autovehicule operaționale de la o zi la alta:

$$N(t+1) = N(t) + R_{rep} - R_i$$

sau extinsă:

$$N(t+1) = N(t) + \min(C, I(t)) - r \cdot N(t)$$

Înlocuind unii termeni, obținem o formă în care avem variabilele enunțate mai sus:

$$N(t+1) = N(t) - R_i + (R_{rep} - R_r)$$

Eliminând parantezele, avem relația matematică finală:

$$N(t+1) = N(t) - R_i + R_{rep} - R_r$$

Explicat, modelul matematic arată că, pentru următoarea zi de luptă, numărul autovehiculelor operaționale ale flotei este egal cu diferența dintre numărul de autovehicule cu care a început acțiunea sau operația militară din care scădem numărul de autovehicule distruse iremediabil și adăugăm numărul de autovehicule care pot fi reparate din numărul autovehiculelor reparabile existente.

Iar, pentru a ține evidența autovehiculelor avariate/imobilizate care sunt reparabile, rezultă expresia matematică:

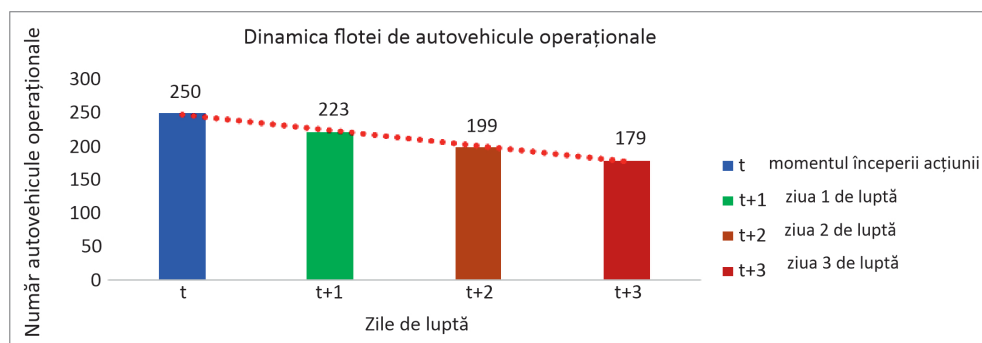
$$I(t+1) = R_i(t) - C + I(t)$$

Pentru prima zi de acțiuni militare, $I(t)$ este egal cu R_r , respectiv numărul de autovehicule avariate/imobilizate și reparabile existente la sfârșitul zilei.

În continuare, vom introduce date în relația matematică pentru a observa și analiza rezultatele obținute și vom calcula, pentru o operație de apărare la nivel tactic, pentru primele trei zile de luptă, mărind pentru fiecare iterație capacitatea de reparație a sistemului de mentenanță integrat de autovehicule cu 10 autovehicule pe zi.

Primul calcul:

- Flota totală inițială $N(t)$: 250 de vehicule;
- Capacitatea zilnică de reparații a SMIA, C : 10 autovehicule/zi;
- Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor r : 15% (0.15);
- Coeficientul de pierdere irecuperabilă P : 30% (0.30).



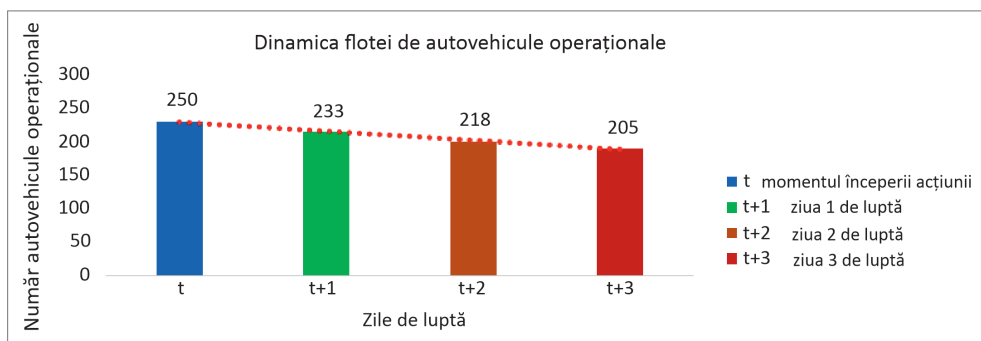
Graficul 1: Calculul dinamicii flotei pentru primele trei zile de acțiuni cu capacitatea de reparație de 10 autovehicule pe zi (concepția autorilor)

Al doilea calcul:

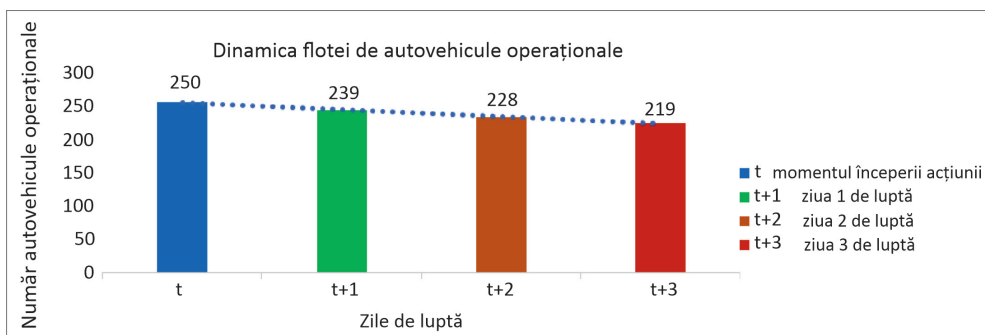
- Flota totală inițială $N(t)$: 250 de vehicule;
- Capacitatea zilnică de reparații a SMIA, C : 20 de autovehicule/zi;
- Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor r : 15% (0.15);
- Coeficientul de pierdere irecuperabilă P : 30% (0.30).

Al treilea calcul:

- Flota totală inițială $N(t)$: 250 de vehicule;
- Capacitatea zilnică de reparații a SMIA, C : 30 de autovehicule/zi;
- Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor r : 15% (0.15);
- Coeficientul de pierdere irecuperabilă P : 30% (0.30).



Graficul 2: Calculul dinamicii flotei pentru primele trei zile de acțiune cu capacitatea de reparație de 20 de autovehicule pe zi (concepția autorilor)



Graficul 3: Calculul dinamicii flotei pentru primele trei zile de acțiune cu capacitatea de reparație de 30 de autovehicule pe zi (concepția autorilor)

În efectuarea calculelor din cele trei grafice de mai sus, am mărit capacitatea de reparație a sistemului de mentenanță integrat de autovehicule de la 10 autovehicule pe zi la 30 de autovehicule pe zi, pentru a analiza modul în care aceasta influențează echilibrul sistemului prin mărirea sau micșorarea numărului de autovehicule operaționale ale flotei. Se poate observa că, odată cu mărirea capacității de reparație, diminuarea numărului de autovehicule ale flotei se reduce considerabil, ceea ce are ca rezultat mai multe autovehicule operaționale și, implicit, un nivel mai ridicat al capacității de luptă a structurii militare.

Evaluarea modelului

Acest model matematic, chiar și în forma sa empirică, ne permite să facem estimări teoretice importante:

❖ Dacă valoarea $R_{rep} < R_r$, numărul de vehicule operaționale $N(t)$ va scădea drastic. Se va crea un „lot de autovehicule reparabile în așteptare”, în care vehiculele avariate așteaptă repararea, acestea neputând fi reparate decât în limita capacității

de reparație zilnică, fapt ceva conduce la o scădere constantă și rapidă a capacității de luptă. Se poate observa în *graficul 1* că, după trei zile de acțiuni militare, numărul de autovehicule ale flotei este de 179, un număr mic pentru ca structura militară să poată obține rezultatele planificate. În această situație, numărul de autovehicule avariate/imobilizate $I(t)$ crește rapid, fapt ce conduce la un dezechilibru al sistemului de mentenanță și, implicit, asupra potențialului disponibil.

❖ Dacă valoarea $R_{rep} > R_r$, numărul de vehicule operaționale $N(t)$ ale flotei va avea o diminuare acceptabilă pentru ca acțiunile structurii militare să aibă succes. În același timp, numărul de vehicule avariate/imobilizate $I(t)$ va scădea din cauza capacității de reparație ridicate și, implicit, vor putea fi reparate toate zilnic. În această situație, sistemul de mentenanță este capabil să facă față ritmului conflictului.

❖ Putem asigura echilibrul sistemului de mentenanță integrat de autovehicule prin modelarea capacității de reparație a sistemului de mentenanță, respectiv majorarea sau micșorarea acesteia. Utilă este menținerea capacității de reacție mai mare decât necesarul de reparație pentru a putea avea și o rezervă operațională de reparații autovehicule, exact cum există rezerve de forțe și mijloace pentru o acțiune sau operație militară.

❖ Analizând cu atenție acest model matematic, se constată că, pentru a realiza echilibrul sistemului de mentenanță integrat de autovehicule, respectiv, la sfârșitul zilei, structura militară să aibă același număr de autovehicule operaționale sau un număr minim, care să îi asigure un nivel minim al potențialului disponibil și a capacității de luptă, *este necesară introducerea în cadrul relației matematice a unui nou coeficient*, care va reprezenta un stoc sau o rezervă de autovehicule care să înlocuiască autovehiculele distruse iremediabil.

Modelul de SMIA va fi proiectat/configurat și optimizat pentru a asigura că, în majoritatea scenariilor, capacitatea de reparație/**rata de reparații R_{rep} să fie mai mare sau cel puțin gală cu rata autovehiculelor reparabile R_r** , menținând, astfel, un număr optim de autovehicule operaționale necesare continuării acțiunii militare.

Pentru a ne apropia de realitatea din spațiul de luptă, vom introduce în cadrul modelului matematic un **coeficient de înlocuire** a autovehiculelor distruse iremediabil, coeficient denumit în continuare **S**, un stoc sau o rezervă aflate la o distanță optimă pentru a putea fi introduse oportun în luptă. Practic, sistemul de mentenanță integrat de autovehicule al forțelor de la contact va fi integrat în liniile logistice de la eșaloanele superioare. Aceste autovehicule pot fi noi sau reparate în cadrul sistemelor de mentenanță ale liniilor logistice ale eșaloanelor superioare.

MODEL MATEMATIC CU COEFICIENT DE ÎNLOCUIRE

Vom păstra coeficientul de pierdere irecuperabilă **P** definit la început și vom adăuga noul coeficient **S** pentru înlocuirea autovehiculelor avariate/distruse iremediabil.

Definim termenii modelului matematic:

- **N(t)**: Numărul de vehicule operaționale;
- **r**: Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor;
- **P**: Coeficientul de pierdere irecuperabilă (o parte din vehiculele avariate);
- **C**: Capacitatea zilnică de reparații a SMIA;
- **S**: Coeficientul de înlocuire a autovehiculelor avariate/distruse iremediabil (din stoc sau rezervă) reprezentând capacitatea de a reintroduce în luptă un număr de autovehicule operaționale pe zi.

Relația matematică extinsă

Dinamica numărului de autovehicule operaționale ale flotei de la o zi la alta $N(t+1)$ va fi influențată de trei factori:

- Pierderi irecuperabile: Autovehiculele avariate/distruse complet, care reduc permanent flota;
- Reparații: Autovehiculele reparate de SMIA și reintroduse în luptă;
- Înlocuiri: Autovehiculele operaționale vor fi aduse din stoc sau din rezervă și vor fi utilizate pentru a compensa pierderile.

Introducând variabilele și factorii în modelul nostru, vom avea:

$N(t+1) = N(t) - (\text{pierderi irecuperabile}) + (\text{vehicule reparate}) + (\text{vehicule înlocuite})$
Și, în termeni matematici:

$$N(t+1) = N(t) - P \cdot r \cdot N(t) + C + S.$$

- **$P \cdot r \cdot N(t)$** reprezintă numărul de vehicule distruse irecuperabil în acea zi;
- **C** reprezintă autovehiculele reparate de SMIA și pe care le reintroduce în luptă;
- **S** reprezintă numărul de autovehicule din stoc sau din rezervă care înlocuiesc autovehiculele distruse iremediabil.

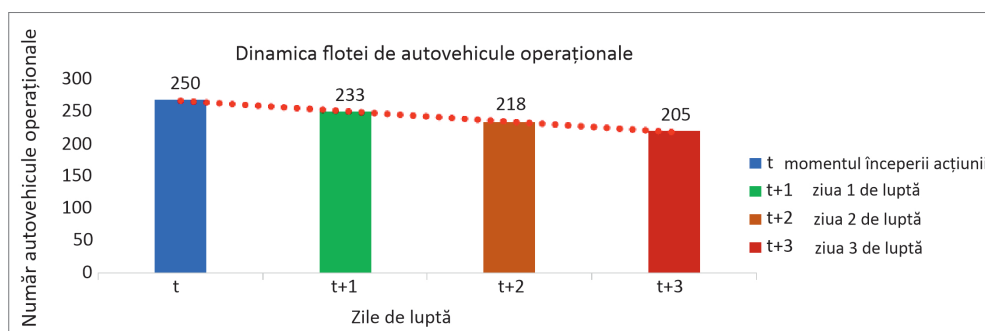
Exemplu practic cu coeficient de înlocuire

Să presupunem că există un număr de autovehicule disponibile într-un stoc sau o rezervă complet reparate și testate la nivelul liniilor superioare și pot fi trimise un număr de 10 autovehicule pe zi pentru a înlocui rapid avariile. Valorile lui **S** pot fi atribuite în funcție de numărul de autovehicule existent la momentul respectiv.

Vom reface calculul, folosind aceleași cifre, la care adăugăm coeficientul de înlocuire **S**. Vom calcula pentru trei iterații, crescând capacitatea de reparație cu câte 10 autovehicule pentru fiecare dintre acestea și adăugând coeficientul de înlocuire **S**.

Primul calcul:

- Flota totală inițială, $N(t)$: 250 de vehicule;
- Capacitatea zilnică de reparații a SMIA, **C**: 10 vehicule/zi;
- Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor, **r**: 15% (0.15);
- Coeficientul de pierdere irecuperabilă, **P**: 30% (0.30);
- **Coeficient de înlocuire, S**: 10 autovehicule pe zi.



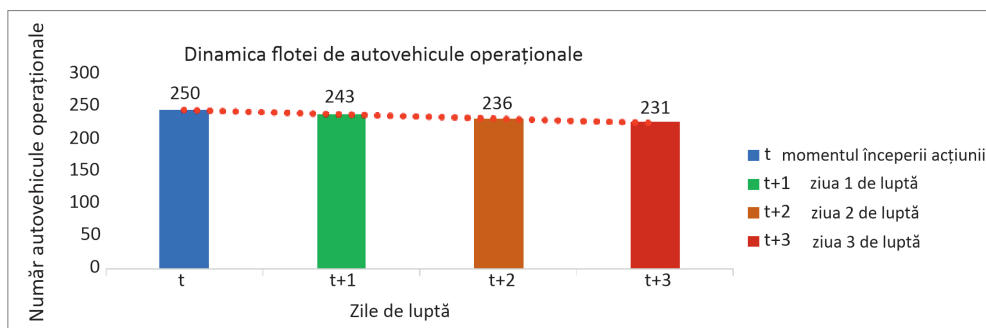
Graficul 4: Calculul dinamicii flotei pentru primele trei zile de acțiuni cu coeficientul **S** și capacitatea de reparație a 10 autovehicule pe zi (concepția autorilor)

Al doilea calcul:

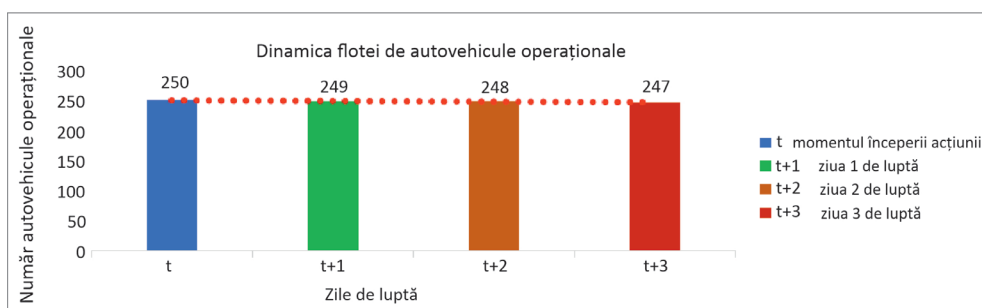
- Flota totală inițială, $N(t)$: 250 de vehicule;
- Capacitatea zilnică de reparații a SMIA, **C**: 20 de vehicule/zi;
- Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor, **r**: 15% (0.15);
- Coeficientul de pierdere irecuperabilă, **P**: 30% (0.30);
- **Coeficient de înlocuire, S**: 10 autovehicule pe zi.

Al treilea calcul:

- Flota totală inițială, $N(t)$: 250 de vehicule;
- Capacitatea zilnică de reparații a SMIA, **C**: 30 de vehicule/zi;
- Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor, **r**: 15% (0.15);
- Coeficientul de pierdere irecuperabilă, **P**: 30% (0.30);
- **Coeficient de înlocuire, S**: 10 autovehicule pe zi.



Graficul 5: Calculul dinamicii flotei pentru primele trei zile de acțiuni cu coeficientul S și capacitatea de reparație a 20 autovehicule pe zi (concepția autorilor)



Graficul 6: Calculul dinamicii flotei pentru primele trei zile de acțiuni cu coeficientul S și capacitatea de reparație a 30 autovehicule pe zi (concepția autorilor)

EVALUAREA MODELULUI

În această formă, modelul matematic ne arată că întrebuintarea unei strategii combinate, în care *reparațiile efectuate de către sistemul de mentenanță integrat de autovehicule sunt suplimentate cu un stoc sau cu o rezervă* pentru a înlocui autovehiculele avariate/distruse iremediabil, are un efect amplificator asupra capacității de luptă a structurii militare. În acest caz, cu adăugarea zilnică sau periodic, în funcție de situația din spațiul de luptă, a unui stoc sau rezerve de autovehicule, flota își poate menține un anumit nivel de capacitate operațională, fapt ce conduce către menținerea unui potențial disponibil al puterii de luptă.

Putem observa că, dacă vom configura capacitatea de reparații la 10 autovehicule pe zi și înlocuim autovehiculele avariate/distruse iremediabil cu un stoc sau o rezervă, numărul de autovehicule operaționale ale flotei poate fi menținut la un nivel ridicat doar pentru primele două zile de luptă, respective peste 85%. Configurând capacitatea de reparații de la 20 la 30 de autovehicule pe zi și înlocuind autovehiculele avariate/distruse iremediabil cu 10 pe zi, putem observa că numărul de autovehicule operaționale ale flotei se menține ridicat, la 90% pentru 25 de zile.

Practic, optimizarea capacității de reparație și a coeficientului de înlocuire va da configurarea optimă a sistemului de mentenanță integrat de autovehicule.

Această formă a modelului matematic, optimizată, poate da planificatorilor militari variante pentru proiectarea, configurarea și întreținerea unui sistem de mentenanță integrat de autovehicule care să asigure nevoile de reparații autovehicule ale structurilor militare de nivel tactic în operațiile militare.

Acest exercițiu simplu demonstrează că, în condițiile date, respectiv capacitatea de reparație de 30 autovehicule pe zi și un stoc sau rezervă de înlocuire de 10 autovehicule pe zi, SMIA îndeplinește obiectivul de a menține flota de autovehicule la un nivel ridicat, peste 85%.

De asemenea, modelul ne ajută să identificăm punctele slabe. Ce se întâmplă dacă rata de pierderi r crește la 30%? Sau dacă coeficientul de pierdere irecuperabilă P crește la 50% din cauza lipsei de capacitate de evacuare rapidă? Modelul ne permite să simulăm aceste scenarii și să vedem cum ar trebui să ajustăm capacitatea de reparație C și stocul sau rezerva de autovehicule S pentru a compensa pierderile iremediabile.

MODEL MATEMATIC DE OPTIMIZARE

Pentru a transpune datele într-o ecuație de optimizare, trebuie să definim un **obiectiv** și **variabilele** pe care le putem ajusta. Esențial este să găsim o relație de echilibru dinamic sau de optimizare a resurselor.

Vom utiliza o ecuație care echilibrează *rata pierderilor* cu *capacitatea logistică*. O putem exprima ca o balanță între partea „*adversă*”, respectiv pierderile, și partea „*proprie*”, respective capacitatea de reparație a SMIA.

Obiectivul nostru este de a menține flota operațională cât mai aproape de nivelul inițial, $N(0)$. Putem atinge acest obiectiv dacă *suma capacităților noastre logistice este egală sau depășește suma pierderilor noastre*.

Textual, termenul ecuației de echilibru este:

Capacitatea logistică (partea proprie) $\geq$ Pierderi totale (partea adversă).

Capacitatea de reparație + capacitatea de înlocuire $\geq$ autovehicule reparabile
+ autovehicule distruse iremediabil

Transpusă matematic, ecuația devine:

$$C + S \geq R_i + R_r$$

Înlocuind termenii, obținem:

$$C + S \geq r \cdot N(t) + P \cdot r \cdot N(t)$$

Această ecuație ne permite să modelăm și să optimizăm ambele părți.

Vom analiza fiecare parte a ecuației, pentru a le putea modela și optimiza prin ajustarea termenilor acesteia.

Partea stângă a ecuației – Optimizarea capacității de reparație a SMIA

Aici, optimizăm resursele noastre. **Variabilele** pe care le putem controla sunt:

- **C - capacitatea de reparație:** Putem crește această valoare prin alocarea de personal tehnic suplimentar, proiectarea, configurarea și dotarea cu ateliere mobile și echipamente specifice necesare;
- **S - capacitatea de înlocuire:** Putem mări acest coeficient prin crearea unui stoc sau a unei rezerve mai mari de autovehicule noi sau reparate și pregătite pentru a fi trimise în luptă în timpul oportun.

Partea dreaptă a ecuației – Modelarea amenințării

Aici, modelăm amenințarea, folosind estimări din date istorice și evaluări tactice.

Variabilele sunt influențate de inamic, dar le putem estima și contracara:

- **r - coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor:** acesta variază în funcție de tipul de conflict. O putem estima pentru diferite scenarii (intensitate scăzută, medie sau ridicată);
- **P - coeficientul de pierdere irecuperabilă:** această valoare depinde de capacitatea de recuperare din teren. Putem să o reducem prin creșterea capacității de evacuare rapidă (Linia I), înainte ca tehnica avariata să fie distrusă complet;
- **N(t) - numărul de vehicule operaționale:** aceasta este variabila dependentă, pe care o urmărim pentru a vedea cum evoluează în timp și să o optimizăm.

Folosind ecuația de mai sus, putem găsi, cel puțin la nivel teoretic, răspunsuri la următoarele întrebări, precum:

- Cât personal tehnic suplimentar, pentru capacitatea de reparație **C**, avem nevoie pentru a menține flota stabilă, dacă rata de pierderi este, de exemplu, 25% ($r = 0.25$), iar pierderile irecuperabile sunt de 50% ($P = 0.5$)?
- De câte vehicule în stoc sau în rezerva, **S**, avem nevoie pentru a compensa un vârf de pierderi, dacă capacitatea noastră de reparații **C** este depășită?

Ecuația de echilibru a sistemului ne ajută să evaluăm dinamic sistemul de mentenanță integrat de autovehicule și să luăm decizii informate pentru a alocă sursele existente acolo unde este cea mai mare nevoie și la timpul oportun.

Vom continua cu dezvoltarea modelului matematic prin introducerea și integrarea unui **factor de reacție a mentenanței**, factor care are un rol vital, deoarece viteza de decizie și de intervenție are un impact direct asupra numărului de vehicule recuperabile și a eficienței reparațiilor.

Stabilim că **M** reprezintă factorul de reacție a mentenanței în modelul nostru. Acest coeficient va fi o valoare între 0 și 1 și va afecta direct capacitatea de reparații. Factorul de reacție a mentenanței este definit de potențialul disponibil al SMIA și se referă la acea stare de organizare și configurarea a microstructurilor

de mentenanță specifice, dotarea cu ateliere, secții și stand-uri de mentenanță, încadrate cu personal tehnic minim necesar și existența unui sistem de comandă și control capabil să planifice și să coordoneze evacuarea și reparația autovehiculelor.

Analiza rolului coeficientului de reacție – M

Definiție: **M** reprezintă eficiența cu care sistemul SMIA detectează o avarie, alocă o echipă și începe procesul de reparație sau evacuare.

- **M=1:** Reacție optimă. Echipele sunt trimise imediat, iar timpul de reacție este minim, situația ideală. Capacitatea reală de reparație a SMIA este aproape de capacitatea sa maximă tehnică;
- **M<1:** Reacție slabă, întârziată. Întârzierile pot fi cauzate de lipsa de personal, decizii lente, deficit de piese, comunicații defectuoase sau dificultăți de acces pe teren. Capacitatea reală de reparație este mult redusă, chiar dacă sistemul are un număr mare de mecanici și ateliere.

Impactul asupra capacității de reparație: O reacție rapidă crește șansele de a recupera vehiculele avariate înainte ca acestea să fie distruse complet de inamic. O reacție lentă, un **M** mic, crește probabilitatea ca o avarie recuperabilă să devină o pierdere irecuperabilă.

Dezvoltarea relației matematice cu coeficientul de reacție

Vom integra noul coeficient **M** în modelul extins, concentrându-ne pe cum afectează acesta capacitatea noastră de reparație **C**.

$$N(t+1) = N(t) + M \cdot C - r \cdot N(t).$$

Interpretarea relației matematice:

- **Partea de reparații:** Expresia **M·C** arată că această **capacitate reală de reparație** a sistemului SMIA nu este capacitatea maximă **C**, ci este capacitatea maximă multiplicată cu factorul de reacție **M**. Astfel, dacă sistemul poate repara 30 de vehicule pe zi, **C** = 30, dar are un factor de reacție de doar 0,5, **M** = 0,5, capacitatea reală de reparație este de doar 15 autovehicule pe zi.
- **Optimizare:** Această relație scoate în evidență o direcție esențială: pentru a maximiza eficiența, nu este suficient să mărim doar numărul de ateliere și mecanici din capacitatea de reparație **C**. Trebuie să investim și în sisteme de comandă și control, comunicații și decizii rapide pentru a crește factorul de reacție **M**.
- Factorul de reacție a mentenanței **M** afectează direct capacitatea de reacție prin mărirea sau micșorarea numărului de reparații în funcție de condițiile de luptă din spațiul de luptă. Ca un exemplu, **M** reflectă și faptul că o decizie lentă întârzie deplasarea pentru evacuare, începerea lucrărilor și, implicit, reduce numărul total de reparații finalizate într-o anumită perioadă de timp, ceea ce afectează puterea de luptă a forțelor.

Relația matematică cu factorul de reacție a mentenanței M și stocul sau rezerva de înlocuire S

Integrând coeficientul de reacție al mentenanței iM la modelul existent, vom obține relația matematică:

$$N(t+1) = N(t) + M \cdot C - r \cdot N(t) + S$$

Condiția de optimizare:

Pentru ca flota operațională să nu se diminueze, trebuie să ne asigurăm că termenul de creștere prin reparații și înlocuire este cel puțin egal cu termenul de pierdere/scoatere din luptă.

$$M \cdot C + S \geq r \cdot N(t)$$

Această ecuație ne permite să ne punem o întrebare esențială: *Care este valoarea minimă a lui M de care avem nevoie pentru a menține flota stabilă, având în vedere capacitățile noastre maxime?*

Putem exprima matematic acest lucru ca o condiție de echilibru critic:

$$M_{\text{echilibru}} = C \cdot r \cdot N(t)$$

Dacă valoarea noastră reală M este mai mare decât $M_{\text{echilibru}}$, flota crește. Dacă este mai mică, flota scade.

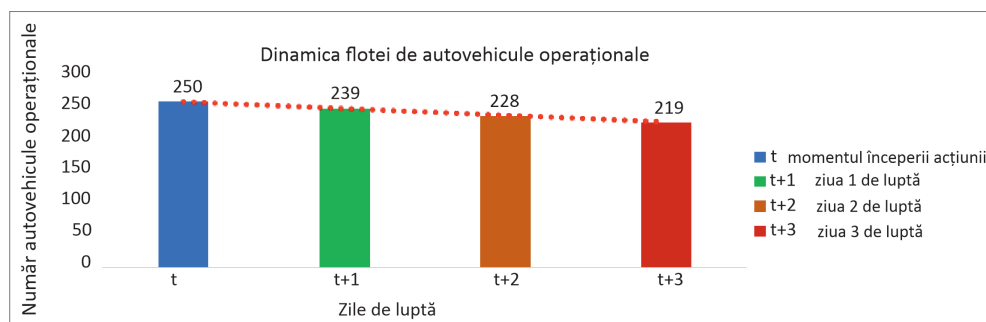
Aplicarea modelului pe un scenariu de simulare

Date de intrare:

- Flota inițială $N(t)$: 250 de vehicule;
- Coeficient de pierdere zilnică a autovehiculelor, $r = 10\%$ (0.1);
- Coeficientul de pierdere irecuperabilă, P : 30% (0.3);
- Capacitatea maximă de reparații SMIA: 20 de reparații pe zi;
- Factorul de reacție al mentenanței, $M = 0.5$, din cauza sistemelor de comunicații lente, a existenței unui deficit de piese, insuficiența mijloacelor de transport și evacuare, indisponibilitatea personalului tehnic la momentul respectiv etc.;
- Rezerva sau stocul de înlocuire $S = 5$ autovehicule pe zi.

După introducerea în relațiile matematice a datelor de intrare, obținem:

- **Pierderi zilnice totale (scoase din luptă):** $R_l = r \cdot N(t) = 0.1 \cdot 250 = 25$ de vehicule scoase din luptă;
- **Pierderi iremediabile:** $R_i P = r \cdot N(t) = 0.3 \cdot 0.1 \cdot 250 = 7,5 \approx 8$ vehicule distruse iremediabil;
- **Număr autovehicule reparabile:** $R_l - R_i = r \cdot N(t) - P \cdot r \cdot N(t) = 17,5 \approx 17$ autovehicule reparabile;
- **Capacitatea reală de reparații:** $M \cdot C = 0.7 \cdot 20 = 14$ autovehicule reparate;
- **Flota operațională la sfârșitul zilei 1:** $N(t+1) = 239$ de autovehicule;
- **Flota operațională la sfârșitul zilei 2:** $N(t+2) = 228$ de autovehicule;
- **Flota operațională la sfârșitul zilei 3:** $N(t+3) = 219$ autovehicule.

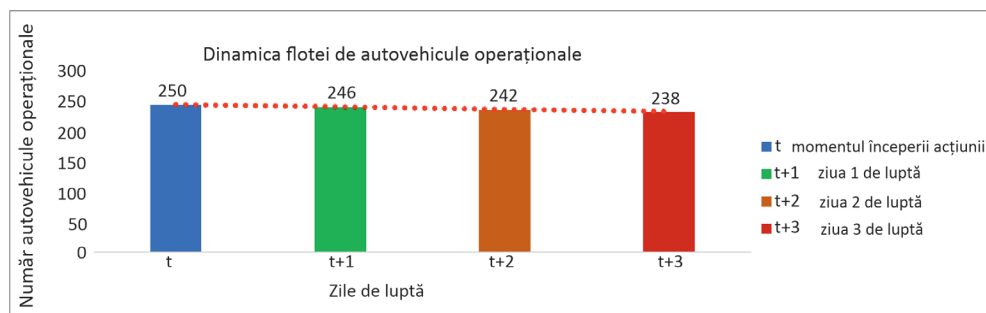


Graficul 7: Calcul pentru primele 3 zile cu factorul de reacție al mentenanței și stoc de înlocuire (concepția autorilor)

Evaluarea simulării cu factor de reacție a mentenanței și stoc de înlocuire

Factorul de reacție al mentenanței, după integrarea în modelul matematic și simulare, reduce numărul de autovehicule operaționale al flotei, deoarece condițiile care au dus la atribuirea valorii de 0,5 sunt reale și existente în spațiul de luptă, influențând direct capacitatea de reparație a SMIA. Analizând rezultatele pentru cele trei zile de luptă din *graficul 7*, putem observa că, chiar și cu factorul de mentenanță de 0,5, numărul de autovehicule este peste nivelul minim de 85%, nivel necesar menținerii unui potențial disponibil ridicat al forțelor militare și, implicit, continuarea misiunilor permise.

Pentru a observa impactul factorului de reacție al mentenanței **M**, vom relua calculul cu aceleași date de intrare, mai puțin valoarea acestuia, pe care o vom mări la $M = 0,9$, ceea ce înseamnă că SMIA are o configurare optimă de ateliere, secții, personal și echipamente, precum și sistemul de comandă și control funcțional, cu un sistem de observare, evacuare și reparație funcțional, care asigură detectarea/observarea, evacuarea și repararea rapidă a unui autovehicul.



Graficul 8: Calcul pentru primele 3 zile cu factorul de reacție al mentenanței mărit și stoc de înlocuire (concepția autorilor)

Rulând calculul cu valoarea lui $M = 0,9$ pentru trei zile de luptă, putem observa, în *graficul 8*, că numărul de autovehicule operaționale este mai mare decât

în cazul în care valoarea factorului de mentenanță M era de $M = 0,5$. Acest lucru demonstrează faptul că factorul de reacție a mentenanței are un impact definitoriu asupra dinamicii autovehiculelor reparate într-o zi de luptă și, implicit, asupra capacității de reparație a SMIA.

Pentru a avea un factor de reacție M cât mai mare și, implicit, creșterea numărului de reparații al autovehiculelor, investiția, din timp de pace, în comandă și control este la fel de importantă ca investiția în ateliere și personal tehnic de specialitate.

CONCLUZII

Succesul unei structuri militare planificată să execute acțiuni sau operații militare este determinat, printre multe altele, și de capacitatea sistemului logistic de a asigura nevoile acestor forțe, inclusiv de existența unui sistem de mentenanță a autovehiculelor. Acest sistem de mentenanță integrat pentru autovehicule poate fi proiectat și configurat prin utilizarea modelării matematice și a optimizării pentru a obține și întrebuița structura optimă de mentenanță cu resurse cât mai mici. De asemenea, acest sistem de mentenanță trebuie să poată integra și să adapteze factorii, variabilele și coeficienții care influențează funcționarea acestuia, în cazul nostru, capacitatea de reparație, stocul sau rezerva de autovehicule și factorul de reacție a mentenanței.

Integrarea factorilor, variabilelor și coeficienților care influențează sau au un impact asupra acțiunilor din spațiul de luptă într-un model matematic și optimizarea acestora generează direcții de proiectare și configurare a unui sistem de mentenanță integrat de autovehicule, care să îndeplinească condiția de echilibru, respectiv să fie capabil să asigure nevoile de reparații ale forțelor militare în operațiile militare.

Prin exemplele date de utilizare a modelării matematice și optimizării, observăm cum condiția de echilibru a sistemului de mentenanță integrat pentru autovehicule, optimizată cu factorul de reacție a mentenanței și coeficientul de înlocuire a autovehiculelor distruse iremediabil, ne ajută să evaluăm rapid performanța sistemului logistic și, în special, a componentelor acestuia, care au impact direct asupra menținerii numărului de autovehicule operaționale ale flotei de autovehicule. Aceste modele, dezvoltate și optimizate permit planificatorilor și decidenților militari să identifice unde trebuie alocate resurse suplimentare (de exemplu, creșterea capacității de reparații, pentru anumite perioade de timp, a desfășurării operațiilor militare, alocarea de mai multe autovehicule ca stoc sau rezervă de înlocuire și la intervale de timp stabilite prin calcule științifice și nu prin estimări, crearea unei rezerve de resurse de mentenanță etc.) pentru a menține potențialul disponibil și puterea de luptă a forțelor la un nivel minim care să le asigure succesul.

BIBLIOGRAFIE:

1. Col. Bălăceanu, I., col. Dumitru, D., col. (r) Ioana, I. (2006). *Potențialul de luptă al forțelor terestre în context NATO*. București: Editura Top Form.
2. Buneci, M.R. (2008). *Optimizări*. Târgu-Jiu: Editura Academica Brâncuși.
3. Buța, V., Alexandrescu, G., Dumitru, D. (2004). *Elemente dinamice ale câmpului de luptă modern – Puterea de luptă*. București: Editura Universității Naționale de Apărare.
4. Du Bois, E.L., Hughes Jr., W.P., Low, L.J. (1998). *A Concise Theory of Combat*, The Military Conflict Institute.
5. Dulău, M., Oltean, S. (2008). *Modelare și simulare, Curs*. Târgu Mureș: Universitatea „Petru Maior”.
6. FM 100-17-3, *Reception, Staging, Onward Movement, and Integration, distribution restriction: Approved for public release; distribution is unlimited*, Headquarters, 1999.
7. Col. dr. ing. Ghiță, Al. ș.a. (1993). *Analiza cantitativă a datelor istorice despre lupte.*, București: Editura Academiei Tehnice Militare.
8. Major Johnson, R.L. (1990). *Lanchester's Square Law in Theory and Practice*, School of Advanced Military Studies. SUA: Fort Leavenworth, Kansas.
9. *Leader's guide to maintenance and Services* (2023). Army Center for Lessons Learned. SUA: Fort Leavenworth.
10. Lupșa, L., Blaga, L. (2007). *Special Type of Transportation Problems*, Automation Computers Applied Mathematics, vol. 16, nr. 2.
11. NATO logistic handbook, Logistic functions (1997).
12. Nica, V.T. (2011). *Cercetări operaționale I, Introducere în cercetarea operațională, elemente de programare liniară, analiza drumului critic, Introducere în programarea neliniară*. București: Editura ASE.
13. Pawelczyk, M. (2018). *Contemporary challenges in military logistics support*. Polonia: War Studies University.
14. Roman, M. (2012). *Analiza multicriterială. Manual*. București.
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Military_logistics, accesat la 28 august 2025.
16. https://florinleon.byethost24.com/Curs_IA/IA05_Optimizare2.pdf?i=2, accesat la 10 septembrie 2025.
17. <https://sadat.com.tr/en/kategori/en/turnkey-solutions/products/>, accesat la 10 septembrie 2025.
18. <https://warfarehistorynetwork.com/article/hein.z-guderian-author-of-the-blitzkrieg/>, accesat la 20 septembrie 2025.
19. <https://warontherocks.com/2019/02/a-vicious-cycle-the-u-s-militarys-maintenance-and-modernization-problem/>, accesat la 10 septembrie 2025.
20. https://www.army.mil/article/282460/enabling_rapid_repair_capability_at_echelon, accesat la 25 august 2025.
21. <https://www.nato.int/docu/logi-en/1997/lo-106.htm>, accesat la 12 septembrie 2025.