

## STUDIES AND RESEARCHES ON ENERGETIC OPTIMIZATION OF FODDER HARVESTING COMBINES-UNIDIMENSIONAL MODELS

### STUDII ȘI CERCETĂRI ASUPRA OPTIMIZĂRII ENERGETICII COMBINELOR DE RECOLTAT FURAJE – MODELE UNIDIMENSIONALE

Math. Cârdei P.<sup>1)</sup>, Eng. Sfîru R.<sup>1)</sup>, PhD. Stud. Ștefănoiu M.D.<sup>2)</sup>, Prof. PhD. Eng. Bădescu M.<sup>2)</sup>,  
 Assoc. Prof. PhD. Eng. Boruz S.<sup>2)</sup>, Assoc. Prof. PhD. Eng. Lazar S.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>INMA Bucharest / Romania; <sup>2)</sup>University of Craiova / Romania; <sup>3)</sup>University of Novi Sad / Serbia  
 e-mail: petru\_cardei@yahoo.com

**Abstract:** This article is the first among a series of three articles describing mathematical models of fodder harvesting combines energetics, in order to optimize their working regimes. Starting from scientific literature of 1970-1980s, the classical models have been improved and adjusted, obtaining new models and results. The calibrating method of mathematical models is shown in order to determine the model constants which are not given by specialty literature. There are made references to manner of validating the results and possible applications in a wider domain of technique and science. The three articles are structured according to complexity of mathematical models elaborated and used for optimization. The first article deals with generalities and unidimensional model, namely that model considering a unique speed for working regime, idle speed and at turnings. The second contains models that consider the working speed and turning speed equal to idle speed, and the third one will describe the models containing the three speeds as independent variables.

**Keywords:** combine, energetics, optimization

#### INTRODUCTION

Optimization of agricultural machines and equipment energetics is a continuous concern, especially in this era marked not only by fossil fuel crisis, being generally an energetic crisis, but also by the negative change of planet climate determined by the increased consumption of fossil fuels and power.

As a general rule, this theme, focused on agricultural machines and equipment has not been widely tackled in specialty literature, being rather difficult to solve, unless optimum combinations of parameters are obtained, as the energetic terms structure is in such a way that optimum points strictly speaking (local extremum points of aim or objective functions) almost do not exist, without introducing additional terms, or calculation special restrictions. There are theoretical approaches but also experimental approaches of optimization or energetic efficiency increment of agricultural machinery. Among the few relevant references, we started from Romanian specialty literature, [1], [3], [4], where we could find articles treating about the cereal and fodder harvesting combines energetics optimization. The manner in which the problem is dealt with is clear and simple. Nevertheless, in some formulae, mistakes appeared, which should be corrected. Therefore, none of mathematical models elaborated within the paper is similar to those given in [1], [3] and [4]. Mathematical models developed within this paper have started from criticisms addressed to models elaborated in [1], [3] and [4]. Another reason for which the models built in this paper differ from those in [1], [3] and [4], is that new terms beside the above authors, have been introduced. On the one hand, these terms have been introduced for enabling the calibration of the model on basis of experimental data, and on the other hand new variables have been introduced, because it is natural that

**Rezumat:** Acest articol este primul dintr-o serie de trei articole dedicate descrierii unor modele matematice ale energeticii combinelor de recoltat furaje, modele folosite pentru optimizarea regimurilor de lucru ale acestor utilaje agricole. Pornind de la literatura științifică a anilor 1970-1980, modelele clasice au fost îmbunătățite și corectate, obținându-se modele și rezultate noi. Se ilustrează modul de calibrare a modelelor matematice în scopul determinării constantelor de model care nu sunt date în literatura de specialitate. Se fac referiri la modul de validare a rezultatelor și la aplicațiile posibile într-un domeniu mult mai larg în cadrul tehnicii și științei. Cele trei articole sunt structurate după complexitatea modelelor matematice elaborate și folosite pentru optimizare. Primul se ocupă de generalități și de modelul unidimensional, adică cel care consideră o singură viteză pentru regimul în lucru, în gol și la întoarcere. Al doilea articol conține modele care consideră viteza în lucru și viteza de întoarcere egală cu cea în gol, iar al treilea articol va descrie modelele care conțin cele trei viteze ca variabile independente.

**Cuvinte cheie:** combină, energetică, optimizare

#### INTRODUCERE

Optimizarea energeticii mașinilor și echipamentelor agricole este o preocupare permanentă, mai ales în această epocă marcată nu numai de criza combustibililor fosili și în general energetică, ci și de modificările negative ale climatului planetar datorate creșterii masive a consumului de combustibili fosili și de energie.

În general, tema, centrată pe mașini și utilaje agricole, nu este foarte mult abordată în literatura de specialitate, fiind destul de greu rezolvabilă până la obținerea unor combinații optime de parametri, deoarece structura termenilor energetici ai acestora este de așa natură încât punctele optime în sens strict (de puncte de extremum locale ale unor funcții scop sau obiectiv) aproape că nu există, fără introducerea unor termeni suplimentari sau a unor restricții speciale în calcul. Există abordări teoretice, dar și experimentale ale problemei optimizării sau creșterii eficienței energetice a mașinilor și utilajelor agricole. Din puținul material bibliografic, am pornit de la literatura românească de specialitate, [1], [3], [4], unde am găsit o abordare a optimizării energeticii combinelor de recoltat cereale sau furaje. Metoda de abordare a problemei este clară și simplă. Totuși în unele formule s-au strecurat greșeli care au trebuit îndreptate. Pentru acest motiv, niciunul dintre modelele matematice elaborate în lucrare nu este similar celor date în [1], [3] și [4]. Modelele matematice dezvoltate în lucrare au plecat de la criticile aduse modelelor elaborate în [1], [3] și [4]. Un alt motiv pentru care modelele construite în lucrare diferă de cele din [1], [3] și [4], este acela că s-au introdus termeni noi față de lucrările autorilor susmenționați. Pe de-o parte s-au introdus acești termeni pentru a putea calibra modelul cu date experimentale, iar pe de altă parte s-au introdus variabile noi întrucât ni se pare natural ca viteza în gol, la deplasarea spre o zonă de greș, sau viteza de întoarcere,

the idle speed when moving to a dislevelment area, or the reverse rate should not be equal or simple relations between them should not exist. During the modeling activity, starting from power needed to idle driving of combine working parts, it was considered as interesting to model and estimate the existence of optimum points, and, at idle driving and turning, the power supply from PTO is stopped (either by the tractor driver or by means of an automated device based on sensors which are able to perceive the absence of vegetal matter in front of cutting device).

In this article we will present the classical model obtained from correcting and completing the model from [1], [3] and [4], model with a single variable, a unique speed [6, 7, 8].

## MATERIAL AND METHOD

In order to optimize the energetics of the tractor-trailed fodder harvesting combine aggregate, we will follow a way similar to that from [1], [3] and [4], where such a calculation is made for self-carried combines. Method used in [1], [3], [4] is clear, consisting of the following stages: writing down the power balance of cereal harvesting combine; obtaining the energetic balance out of power balance by multiplying each power term by the suitable working time; replacing the time according to plot characteristics and working speed (real speed, idle speed, at turnings); optimization of energetic consumption simultaneously with improving the working capacity.

In table 1 is presented the list comprising the model parameters, so that their explanation should not be necessary for each formula.

să nu fie egale între ele, sau, să nu existe relații simple între acestea. Pe parcursul activității de modelare, pornind de la puterea necesară acționării în gol a organelor de lucru ale combinei, s-a considerat interesant să se modeleze și să estimeze existența unor puncte optime și în cazul în care la deplasările în gol și întoarceri, debitarea de putere la priza de putere se oprește (fie de către tractorist, fie cu ajutorul unui dispozitiv automat bazat pe senzori care pot sesiza absența materialului de vegetal din fața aparatului de tăiere).

În acest articol se va prezenta modelul clasic obținut prin corectarea și completarea modelului din [1], [3] și [4], model cu o singură variabilă, o singură viteză [6, 7, 8].

## MATERIAL ȘI METODĂ

Pentru a încerca să ajungem la optimizarea energeticii agregatului format din tractor și combina tractată de recoltat furaje, vom urma o cale asemănătoare cu cea din [1], [3] și [4], unde se face un astfel de calcul pentru combine autopurtate. Metoda folosită în [1], [3], [4] este clară, constând în următoarele etape: scrierea bilanțului de putere al combinei de recoltat cereale; obținerea bilanțului energetic din cel de putere prin înmulțirea fiecărui termen putere cu timpul de lucru corespunzător; înlocuirea timpului funcție de caracteristicile parcelei și vitezele de lucru (efectiv, în gol, la întoarceri); optimizarea consumului energetic simultan cu maximizarea capacității de lucru.

În tabelul 1 se prezintă lista parametrilor modelului, astfel încât să nu fie nevoie explicitarea acestora la fiecare formulă întâlnită.

Table 1 / Tabelul 1

List of parameters of mathematical model used for optimizing the energetics of tractor-trailed fodder harvesting combine aggregate / Lista parametrilor modelului matematic folosit la optimizarea energeticii agregatului tractor-combina tractată de recoltat furaje

No./Nr.	Parameter / Parametrul	Notation / Notație	MU / UM
1	Gravity acceleration / <i>Accelerația gravitațională</i>	$g$	$\text{ms}^{-2}$
2	Increment coefficient of energy specific for acting the harvesting parts / <i>Coeficient de creștere a energiei specifice pentru acționarea organelor active la recoltare</i>	$p_{2r}$	$\text{Ws}^2\text{kg}^{-1}\text{m}^{-1}$
3	Increment coefficient of resistance force to movement / <i>Coeficientul de creștere a forței de rezistență la deplasare</i>	$f_v$	$\text{sm}^{-1}$
4	Friction coefficient of combine wheels rolling on soil / <i>Coeficientul de frecare la rularea roților combinei pe sol</i>	$f$	-
5	Coefficient of connection between the idle speed and working speed / <i>Coeficientul de legatură între viteza în gol și viteza în lucru</i>	$\beta$	-
6	Maximum allowable flow rate / <i>Debitul maxim admisibil</i>	$q$	$\text{kgs}^{-1}$
7	Distance from the plot edge to the road / <i>Distanța de la marginea parcelei la drum</i>	$e$	m
8	Specific energy for acting the active parts when harvesting / <i>Energia specifică pentru acționarea organelor active la recoltare</i>	$p_1$	$\text{Wskg}^{-1}$
9	Coefficient of increment of energy specific to drive the active parts in work / <i>Coeficient de creștere a energiei specifice pentru acționarea organelor active în lucru</i>	$p_2$	$\text{Ws}^2\text{kg}^{-1}\text{m}^{-1}$
10	Specific weight of combine on working width / <i>Greutatea specifică a combinei pe lățimea de lucru</i>	$g_s = \frac{(M+m) \cdot g}{B}$	$\text{Nm}^{-1}$
11	Combine working width / <i>Lățimea de lucru a combinei</i>	$B$	m
12	Plot width / <i>Lățimea parcelei</i>	$C$	m
13	Plot length / <i>Lungimea parcelei</i>	$L$	m
14	Length of path run for repairing the dislevelments / <i>Lungimea traseului parcurs pentru repararea greșurilor</i>	$L_s$	m
15	One turning's length / <i>Lungimea unei întoarceri</i>	$l_i$	m
16	Combine mass / <i>Masa combinei</i>	$M$	kg
17	Equipment mass / <i>Masa echipamentului Ei</i>	$m$	kg
18	Production appropriate to surface unit / <i>Producția specifică unității de suprafață</i>	$\rho$	$\text{kgm}^{-2}$
19	Power consumed at PTO in idle speed / <i>Puterea consumată la priză în gol</i>	$P_{pg}$	W
20	Power consumed at PTO in idle speed / <i>Puterea consumată la priză în gol</i>	$P_{pgef}$	W
21	Real power at PTO / <i>Puterea efectivă la priza de putere</i>	$P_p$	W
22	Real power at PTO / <i>Puterea efectivă la priza de putere</i>	$P_{pef}$	W
23	Real power for combine trailing / <i>Puterea efectivă pentru tractarea combinei</i>	$P_{tef}$	W
24	Power necessary for acting the combine active parts in idle speed / <i>Puterea necesară pentru acționarea organelor de lucru ale combinei în gol</i>	$P_{rg}$	W
25	Power necessary for combine towing / <i>Puterea necesară pentru tractarea combinei</i>	$P_t$	W
26	Total effective power needed to drive the combine during work / <i>Puterea totală efectivă pentru acționarea combinei în timpul lucrului</i>	$P_{Tef}$	W
27	Radius of turning / <i>Raza de întoarcere</i>	$R$	m
	Time necessary to turning / <i>Timpul necesar întoarcerilor</i>	$t_i$	s
28	Working time in idle speed / <i>Timpul de lucru în gol</i>	$t_g$	s

No./Nr.	Parameter / Parametrul	Notation / Notație	MU / UM
29	Working time at harvesting / Timpul de lucru în recoltare	$t_r$	s
30	Working speed (when harvesting or in load) / Viteza de lucru (în recoltare sau sarcină)	$v_r, v$	m/s
31	Idle speed / Viteza în gol	$v_g$	m/s
32	Turning speed / Viteza la întoarceri	$v_i$	m/s
33	Specific fuel consumption of engine per HP and hour / Consumul specific de combustibil al motorului pe cal putere și oră	$C_{hcp}$	kgCP <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>

### Balance of power of fodder harvesting combine – a partition of power balance which is simplified

Authors [1] make a simplified power balance in order to solve as simply as possible the aggregate energetics optimization. In this chapter, a correct solution to problem from [1], generalized by two relations allowing to consider complex approaching situations will be given. So, it will be considered the power necessary to tow the trailed harvesting combine,  $P_t$ , as:

$$P_t = \begin{cases} g_s f B v_r + g_s f_v B v_r^2, & \text{pentru lucru in sarcina (recoltare)} \\ g_s f B v_g + g_s f_v B v_g^2, & \text{pentru lucru in gol (la intoarceri)} \end{cases} \quad (1)$$

And for power acted at PTO:

$$P_r = \begin{cases} P_{pg} + p_1 B \rho v_r + p_2 B \rho v_r^2, & \text{pentru lucru in sarcina (recoltare, } \rho > 0 \text{)}, \\ P_{pg}, & \text{pentru lucru in gol (} \rho = 0 \text{)} \end{cases} \quad (2)$$

The second degree terms of working speed and idle speed are introduced to enable the appearance of an objective function which should have an optimum point as local extremum, therefore minimizing the consumed energy. These terms contain the working speed square and idle speed square, as well as in case of machines for soil works, especially ploughs, [2]. Authors [1] have introduced the square term in working speed,  $v_r$ , and adding the square term in idle speed,  $v_g$ , represents a first original contribution of the author. The existence of this term is neither sure nor experimentally checked, but as we shall see, the experimental data allow the calibration of such a model.

For fodder harvesting using the method of circular displacing with turnings at the fourth points of the plot, the following formula representing the length of one turn, is obtained:

$$l_i = R \left( \frac{\pi}{2} + 2 \right) + \frac{B}{2} + e \quad (3)$$

The working time during harvesting, according to [1], is given by:

$$t_r = \frac{CL}{B v_r} \quad (4)$$

And the idle time in work (turnings and distances run for repairing the dislevelments), according to [1]:

$$t_g = \frac{2C}{B v_g} \left( l_i + \frac{L_s}{C} B \right) \quad (5)$$

In these conditions, the energy consumed by the tractor on a plot when harvesting with fodder combine is obtained by multiplying the working power (harvesting), respectively without load, by the working time, respectively without load.

$$E = \left( f g_s B v_r + f_v g_s B v_r^2 + p_1 B \rho v_r + p_2 B \rho v_r^2 + P_{pg} \right) \frac{CL}{B v_r} + \frac{2C}{B v_g} \left( f g_s B v_g + f_v g_s B v_g^2 + P_{pg} \right) \left( l_i + \frac{L_s}{C} B \right) \quad (6)$$

Noting:

$$A = R \left( \frac{\pi}{2} + 2 \right) + e \quad (7)$$

And considering the linear relation between idle speed

### Bilanțul de putere al combinei de recoltat furaje - o partiție a bilanțului de putere simplificată

Autorii [1] fac un bilanț de putere simplificat pentru a rezolva cât mai ușor optimizarea energeticii agregatului. În acest capitol se va da o soluție corectă a problemei din [1], generalizată prin două relații care permit considerarea unor situații complexe de lucru. Astfel, se va considera puterea necesară tracțiunii combinei tractate de recoltat furaje,  $P_t$ , de forma:

iar pentru puterea acționării la priză:

Termenii de gradul al doilea în viteza în lucru și în viteza în gol sunt introduși pentru a face posibilă apariția unei funcții obiectiv care să aibă un punct optimal în sens clasic de extremum local, în acest caz, minimizând energia consumată. Acești termeni conțin pătratul vitezei de lucru și pătratul vitezei în gol, ca și la mașinile destinate lucrărilor solului, în special pluguri, [2]. Autorii [1] au introdus termenul pătratic în viteza de lucru,  $v_r$ , iar adăugarea termenului pătratic în viteza în gol,  $v_g$ , este o primă contribuție originală a autorului. Nu este sigură existența acestui termen, și foarte probabil nici nu s-a verificat experimental, dar, așa cum se va vedea, datele experimentale permit calibrarea unui astfel de model.

Pentru recoltarea furajelor, folosind metoda de deplasare circulară cu întoarceri în cele patru colțuri ale parcelei, se obține următoarea formulă pentru lungimea unei întoarceri:

Timpul de lucru în recoltare, conform [1], este dat de:

iar timpul de lucru în gol (întoarceri și distanțe parcurse pentru repararea greșurilor), tot conform [1]:

În aceste condiții energia consumată de tractor pe o parcelă la recoltarea cu combina de furaje, se obține înmulțind puterile în lucru (recoltare), respectiv în gol, cu timpii în lucru, respectiv în gol.

Notând:

și considerând relația liniară între viteza în gol și viteza

and working speed (a second original contribution):

$$v_g = \beta v_r \quad (8)$$

And, at the same time, according to [1], considering the additional relation:

$$Bv\rho - q = 0 \quad (9)$$

relation (9) being considered as a limit, then, eliminating the working width between (6) and (9), using for simplifying the notations:

$$M = g_s fCL + p_1 \rho CL + 2g_s fCA + \frac{P_{pg} \rho C (C + 2A)}{q} + f_v g_s \frac{\beta q (C + 2L_s)}{\rho} \quad (10)$$

$$N = f_v g_s CL + 2f_v g_s C\beta A + p_2 \rho CL \quad (11)$$

and

$$Q = \frac{(\rho P_{pg} + g_s f q)(C + 2L_s)}{\rho} \quad (12)$$

A simple expression of energy is obtained (14):

$$E = E(v) = M + Nv + \frac{Q}{v} \quad (13)$$

considering  $v > 0$ . Energy, depending on working speed  $v$ , has a minimum point whose abscissa (speed which reduces energy), is got by annulling the first derivative of  $E$ :

$$\frac{dE}{dv} = N - \frac{Q}{v^2} = 0 \quad (14)$$

From where:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{Q}{N}} \quad (15)$$

respectively:

$$E_{\min} = M + 2\sqrt{NQ} \quad (16)$$

Introducing (12) and (11) within the expression of optimum speed (15), is obtained the following expression of this speed:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{(\rho P_{pg} + g_s f q)(C + 2L_s)}{\rho C (f_v g_s L + 2f_v g_s \beta A + p_2 \rho L)}} \quad (17)$$

This solution presents two generalizations in comparison with solution from [1], concretized in formulae (2) and (8). Solution is slightly modified taking into consideration the power necessary to idle displacement at PTO, which in [1] is not performed at the harvesting working regime. In this test, we considered the power necessary at PTO as load regime, as being the amount of power measured in idle speed at PTO and other two terms depending on linear and square working speed (2).

## RESULTS

Solutions similar to that above, obtained by generalization and corrections, according to [4], are comfortable solutions given by analytical calculation and emphasize the role and influence of each parameter involved. These solutions are classified by the authors [4] or [11], as belonging to problems of optimum with connections. Energy function  $E$  is the goal function, and relation of flow rate calculation, (9), is according to [4], the function or relation of restriction. The authors solution in [4] or [1] is Lagrange method of multipliers. In this paper, a simpler and smarter solution was given, comprehensible at level of elementary mathematical analysis.

In order to obtain a point of optimum, namely a working speed which should minimize one of the parameters defining the aggregate energetics, considering a simple expression of this parameter is not enough, precisely the very energy consumed for one plot harvesting. The natural structure of energy function (also, power, traction force or moment at PTO, etc.) does not allow to deduce an optimum speed which minimizes one of these objective functions, classically speaking ( a

în lucru (o a doua contribuție originală):

$$v_g = \beta v_r \quad (8)$$

și, de asemenea conform cu [1], considerând relația suplimentară:

$$Bv\rho - q = 0 \quad (9)$$

relația (9) fiind considerată o restricție, apoi eliminând lățimea de lucru între (6) și (9), folosind pentru simplificare notațiile:

$$M = g_s fCL + p_1 \rho CL + 2g_s fCA + \frac{P_{pg} \rho C (C + 2A)}{q} + f_v g_s \frac{\beta q (C + 2L_s)}{\rho} \quad (10)$$

$$N = f_v g_s CL + 2f_v g_s C\beta A + p_2 \rho CL \quad (11)$$

și

$$Q = \frac{(\rho P_{pg} + g_s f q)(C + 2L_s)}{\rho} \quad (12)$$

se obține o expresie simplă a energiei (14):

$$E = E(v) = M + Nv + \frac{Q}{v} \quad (13)$$

considerând  $v > 0$ . Energia, ca funcție de viteza de lucru  $v$ , are un punct de minim a cărui abscisă (viteza care minimizează energia), se obține anulând prima derivată a lui  $E$ :

$$\frac{dE}{dv} = N - \frac{Q}{v^2} = 0 \quad (14)$$

de unde:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{Q}{N}} \quad (15)$$

respectiv:

$$E_{\min} = M + 2\sqrt{NQ} \quad (16)$$

Introducând (12) și (11) în expresia vitezei optime (15), se obține următoarea expresie a acestei viteze:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{(\rho P_{pg} + g_s f q)(C + 2L_s)}{\rho C (f_v g_s L + 2f_v g_s \beta A + p_2 \rho L)}} \quad (17)$$

Această soluție prezintă două generalizări față de soluția din [1], concretizate în formulele (2) și (8). Soluția este ușor modificată și prin considerarea puterii necesare la mers în gol la priza de putere, ceea ce în [1] nu se face la regimul de lucru în recoltare. În această încercare am considerat puterea necesară la priză în regim de sarcină ca fiind suma dintre puterea în gol la priză și alți doi termeni care depind de viteza de lucru liniar și pătratic (2).

## REZULTATE

Soluțiile de tipul celei de mai sus, obținute prin generalizare și corecții, după [4], sunt soluții comode care se dau prin calcul analitic și pun în evidență rolul și influența fiecărui parametru implicat. Aceste soluții sunt clasificate de autorii [4] sau [1], în categoria problemelor de optimum cu legături. Funcția energie  $E$  este funcția scop, iar relația de calcul a debitului, (9), este după [4], funcția sau relația de restricție. Soluția autorilor în [4] sau [1] se face prin metoda multiplicatorilor lui Lagrange. În această lucrare s-a dat am dat o soluție mai simplă și mai elegantă, inteligibilă la nivel de analiză matematică elementară.

Pentru obținerea unui punct optimal, în esență a unei viteze de lucru care să minimizeze una dintre mărimile ce definesc energetica agregatului, este insuficientă considerarea unei expresii simple a acestei mărimi, în cazul concret din acest subcapitol chiar energia consumată pentru recoltarea unei parcele. Structura naturală a funcției energiei (de asemenea putere, forță de tracțiune sau moment la priza de putere, etc.) nu permite deducerea unei viteze optime care să minimizeze vreuna din aceste funcții scop (obiectiv), în

local minimum outside of the definition domain). For this reason, it is necessary to introduce not only the linear terms but also the square terms in working or idle speed, and even more, to limit the working width and working speed, in case of this subchapter, (13). Eliminating the working width between restriction and goal function, leads to an expression whose derivative has a single real positive root, with variation of sign, proving that it is in fact the abscissa (speed) of a point of minimum of energy, so exactly what is looked for. This procedure supposed that less usual factors have been introduced in specialty literature of all types of combine:

- Coefficient of increasing the resistance force at displacement,  $f_v$  (which in terms of dimensions, is the reverse of a speed);
- energy specific for acting the active parts,  $p_1$ ;
- coefficient of increasing the specific energy for acting the active parts when harvesting,  $p_2$ ;
- combine specific weight,  $g_s$  or aggregate specific weight, less used, although it is a performance parameter in terms of design and manufacturing the combine.

### Calibration of mathematical model

A mathematical model with not very complex relations but with many parameters (which for numerical studies need values, and these values are hardly found in specialty literature, being newly introduced by the author), needs, in order to be appropriately used for optimum speed calculation and its dependence on different parameters, a calibration, namely, setting the model parameters values in a concrete case [2, 3, 7, 8]. This operation is made using the experimental data from a fodder harvesting combine and adjusting (choosing) parameters of model so that the theoretical power resulted from mathematical model be sufficiently closed of the same power values measured in tests.

We have used the experimental data got on trailed fodder harvesting combine, CTF with the equipment for harvesting grassy fodder, EI, [6]. These values, as well as the theoretical ones got by calibration are given in table 2.

sensul clasic al unui minim local nesituat pe frontiera domeniului de definiție. Pentru acest motiv, este nevoie de introducerea unor termeni pătratici și nu numai liniari în viteza de lucru sau viteza în gol, și, în plus de o restricție în care să fie implicată lățimea de lucru și viteza de lucru, în cazul acestui subcapitol, (13). Eliminarea lățimii de lucru între restricție și funcția scop conduce la o expresie a funcției scop a cărei derivată are o singură rădăcină reală pozitivă, cu variația de semn care arată că aceasta este abscisa (viteza) unui punct de minim a energiei, prin urmare exact ceea ce se căuta. Această procedură a presupus totuși introducerea unor factori puțin uzuali în literatura de specialitate a combinelor de orice tip:

- coeficientul de creștere a forței de rezistență la deplasare,  $f_v$  (care, din punct de vedere dimensional, este inversul unei viteze);
- energia specifică pentru acționarea organelor active,  $p_1$ ;
- coeficient de creștere a energiei specifice pentru acționarea organelor active la recoltare,  $p_2$ ;
- greutatea specifică a combinei,  $g_s$  sau agregatului, puțin utilizată, deși este un parametru de performanță în ceea ce privește proiectarea și construcția combinei.

### Calibrarea modelului matematic

Un model matematic cu relații nu neapărat foarte complexe, dar cu foarte mulți parametri (care, pentru studii numerice au nevoie de valori, iar aceste valori sunt greu de găsit în literatura de specialitate sau chiar imposibil, fiind nou introduși de autor), are nevoie, pentru a putea fi folosit cu încredere la calculul vitezelor optime și la studiul dependenței acestora de diverși parametri, de o calibrare, adică de fixarea valorilor parametrilor modelului pe un caz concret [2, 3, 7, 8]. Această operație se face, de exemplu, folosind datele experimentale de la o combină de recoltat furaje și reglând (alegând) parametri de model astfel încât puterile teoretice rezultate din modelul matematic să fie suficient de apropiate de valorile aceluiași puteri măsurate în la încercări.

Ca date au fost folosite datele experimentale obținute pe combina tractată de recoltat furaje, CTF cu echipamentul de recoltat furaje ierboase, EI, [6]. Aceste valori, precum și cele teoretice obținute prin calibrare, sunt date în tabelul 2.

Table 2 / Tabelul 2

Physical size on basis of which calibration is performed and experimental and theoretical values by positive choice of model parameters / Mărimile fizice în termenii cărora se face calibrarea și valorile experimentală și teoretică prin alegerea potrivită a parametrilor de model

Size/ Marimea, MU	Measured value / Valoarea măsurată	Calibrated value / Valoarea calibrată
Real power for towing the combine / Puterea efectivă pentru tractarea combinei, kW	5.020 / 5,020	5.020 / 5,020
Real power at PTO / Puterea efectivă la priză de putere, kW	29.500 / 29,500	29.500 / 29,500
Power consumed in idle speed / Puterea consumată la priză în gol, kW	7.600 / 7,600	7.600 / 7,600
Total power for acting the combine in work / Puterea totală efectivă pentru acționarea combinei în timpul lucrului, kW	34.520 / 34,520	34.520 / 34,520

Table 3 / Tabelul 3

Model parameters, notations, measuring units and calibrating values. Parameters which denomination (second column) is hachured are the only directly involved in the calibration process. Parameters with cell of classifying hachured are newly introduced parameters / Parametrii modelului, notații, unități de măsură și valorile de calibrare. Parametrii ai căror denumire (coloana a doua) este hașurată sunt singurii direct implicați în procesul de calibrare. Parametri cu celula de ordine hașurată sunt parametri nou introduși în model

No./Nr.	Parameter / Parametrul	Notation / Notație	MU / UM	Calibrating value / Valoarea de calibrare
1	Gravity acceleration / Acclerația gravitațională	$g$	$\text{ms}^{-2}$	9.810 / 9,810
2	Radius of turning / Raza de întoarcere	$R$	m	3.400 / 3,400
3	Distance from the access road to plot edge / Distanța de la drumul de acces la marginea parcelei	$e$	m	0
4	Combine working width / Lățimea de lucru a combinei	$B$	m	2
5	Combine mass / Masa combinei	$M$	kg	1600
6	Equipment mass / Masa echipamentului EI	$m$	kg	650
7	Combine specific weight on working width / Greutatea specifică a combinei pe lățimea de lucru	$g_s = \frac{(M+m) \cdot g}{B}$	$\text{Nm}^{-1}$	11040
8	Friction coefficient of combine wheels when rolling on soil / Coeficientul de frecare la rularea roților combinei pe sol	$f$	-	0.0809 / 0,0809 ([5], pag. 28)

9	Coefficient of growth of resistance force to displacement / de creștere a forței de rezistență la deplasare	$f_v$	$\text{sm}^{-1}$	0.005 / 0,005
10	Energy specific for acting the active parts in idle speed/ Energia specifică pentru acționarea organelor active în gol	$p_1$	$\text{Wskg}^{-1}$	3277.750 / 3277,750
11	Coefficient of growth of specific energy for acting the active parts during work / Coeficient de creștere a energiei specifice pentru acționarea organelor active în lucru	$p_2$	$\text{Ws}^2\text{kg}^{-1}\text{m}^{-1}$	178.600 / 178,600
12	Specific production / Producția specifică	$\rho$	$\text{kgm}^{-2}$	1.420 / 1,420
13	Maximum allowable flow rate / Debitul maxim admisibil	$q$	$\text{kgs}^{-1}$	5.166 / 5,166
14	Linking coefficient between idle speed and working speed / Coeficientul de legătură între viteza în gol și viteza în lucru	$\beta$	-	1
14	Plot width / Lățimea parcelei	$C$	m	50
15	Plot length / Lungimea parcelei	$L$	m	700
16	Length of path run for repairing the errors / Lungimea traseului parcurs pentru repararea greșurilor	$L_s$	m	1750
17	Power output when trailing / Randamentul de putere la tractiune	$\eta_t$	-	0.720 / 0,720
18	Yield of power transmission to PTO / Randamentul de transmisie a puterii la priza de putere	$\eta_p$	-	0.850 / 0,850

Considering the values of parameters in table 3 and the results in table 2, the calibration proces is considered successfully finished. Optimum speed obtained by the optimization model built according to [4] including the relevant corrections, is of: 1.78 m/s [6,409 km/h, formula (17)]. Value got suitably frames within the speed range considered efficient also by the author [6], 2.4÷7.5 km/h.

## CONCLUSIONS

It is important to see more clearly the manner in which the optimum speed (17) acts according to different variables defining it. It is clearly observed that minimum speed lows along with plot length growing. Increasing the idle speed and working speed relation leads to reducing the optimum working speed. These aspects can be found in graphic of fig. 1, which is created starting from data from table 3. Plot length,  $L$  and idle speed and working speed relation,  $\beta$ , are variable.

If the plot length is varied between 100 and 1100 m, respectively the report between the idle speed and working speed between 0.5 and 1.5 (both varying within reasonable limits), for the rest of data given in table 3, it is noticed (graphic in fig. 1) that optimum speed varies hyperbolically with plot length and practically very little with the report above. To be noticed that the influence of that report depends on its coefficients from the optimum speed expression.

Cu valorile parametrilor din tabelul 3 și cu rezultatele din tabelul 2, se consideră procesul de calibrare încheiat cu succes. Viteza optimă obținută prin modelul de optimizare construit după [4] cu corecțiile de rigoare, au valorile: 1,78 m/s [6,409 km/h, formula (17)]. Valoarea obținută se încadrează bine față de intervalul de viteze considerate eficiente și de către autorul [6], 2,4÷7,5 km/h.

## CONCLUZII

Este important să vedem mai clar cum se comportă viteza optimă (17) funcție de diverse variabile care o definesc. Se observă clar că viteza minimă scade cu creșterea lungimii parcelei. Creșterea raportului dintre viteza în gol și viteza în lucru, conduce la scăderea vitezei optime de lucru. Aceste aspecte sunt vizibile pe reprezentarea grafică din fig. 1, care este construită folosind date din tabelul 3. Lungimea parcelei,  $L$  și raportul dintre viteza în gol și cea în lucru,  $\beta$ , sunt variabile.

Dacă se variază lungimea parcelei între 100 și 1100 m, respectiv raportul dintre viteza în gol și viteza în lucru între 0,5 și 1,5 (ambele variabile în limite rezonabile), pentru restul datelor cu valorile din tabelul 3, se observă (reprezentarea grafică din fig. 1) că viteza optimă variază aproximativ hiperbolic cu lungimea parcelei și, practic foarte puțin, relativ la raportul dintre viteza în gol și cea în lucru. Se precizează că influența raportului dintre viteza în gol și viteza în lucru depinde de coeficienții acestuia în expresia vitezei optime.

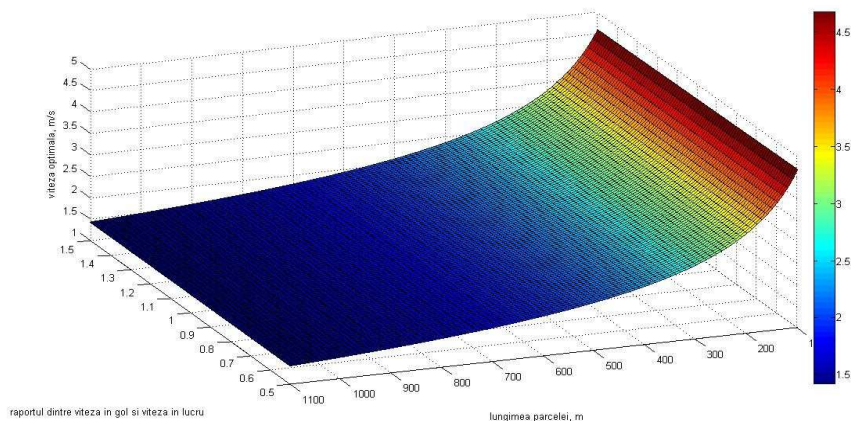


Fig. 1 - Variation of optimum speed according to plot length,  $L$  and report  $\beta$  between the idle speed and working speed / Variația vitezei optime în raport cu lungimea parcelei,  $L$ , și cu raportul  $\beta$ , dintre viteza în gol și viteza de lucru

Little dependence of optimum speed on the report between idle speed and working speed can be noticed in fig. 2, where it is graphically represented, for six length values. Dependence of optimum speed on the above report, whatever the plot length could be, is strictly decreasing.

Dependența slabă a vitezei optime de raportul dintre viteza în gol și viteza în lucru se poate observa în fig. 2, unde dependența este reprezentată grafic, pentru șase valori ale lungimii parcelei. Dependența vitezei optime de raportul dintre viteza în gol și viteza în lucru, indiferent de lungimea parcelei, este strict descrescătoare.

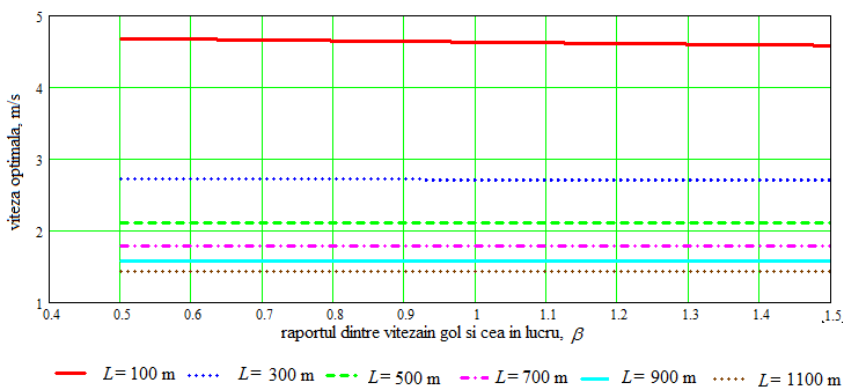
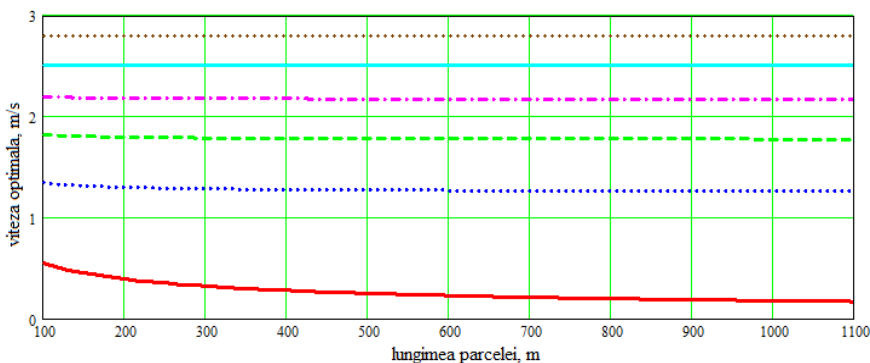


Fig. 2 –Variation of optimum speed according to the report between idle speed and working speed, for different length of plot / Variația vitezei optimele relativ la raportul între viteza în gol și cea în lucru, pentru diverse lungimi ale parcelei

Influence of the path developed for repairing the dislevelments on optimum speed variation clearly results from graphical representation in fig. 3. Increasing  $L_s$ , involves growing the optimum speed, which can be seen from structure of fraction under the radical defining the optimum speed, where  $L_s$  appears at the counter. For a path without errors, in case of model defined by values of parameters in table 3, the optimum speed is low under 1 m/s, instead of a path where the errors that are corrected reaches 25 % out of the length of working path, optimum speed being around 2.5±3 m/s. These remarks are shown in fig. 4, bidimensional representation of optimum speed dependence on plot length and path length developed for correcting the errors as fraction from the length of path run by the aggregate on the entire plot.

Influența lungimii drumului parcurs pentru repararea greșurilor asupra variației vitezei optimele rezultă clar din reprezentarea grafică din fig. 3. Creșterea  $L_s$ , implică creșterea vitezei optimele, ceea ce se poate vedea și din structura fracției de sub radicalul care definește viteza optimă, unde  $L_s$  apare la numărător. Pentru un parcurs fără greșuri, în cazul modelului definit de valorile parametrilor din tabelul 3, vitezele optimele sunt mici, sub 1 m/s, în timp ce pentru un parcurs în care lungimea traseului parcurs pentru repararea greșurilor ajunge la 25 % din lungimea traseului în lucru, vitezele optimele sunt undeva între 2,5±3 m/s. Aceste observații sunt vizibile și în fig. 4, reprezentare bidimensională a dependenței vitezei optimele de lungimea parcelei și de lungimea traseului parcurs pentru repararea greșurilor ca fracție din lungimea traseului parcurs de agregat pe întreaga parcelă.



- $L_s = 0.0\%$  out of total length of working path
- $L_s = 5.0\%$  out of total length of working path /  $L_s = 5.0\%$  din lungimea totală a traseului în lucru
- - -  $L_s = 10.0\%$  out of total length of working path
- . - .  $L_s = 15.0\%$  out of total length of working path /  $L_s = 15.0\%$  din lungimea totală a traseului în lucru
- $L_s = 20.0\%$  out of total length of working path
- · · ·  $L_s = 25.0\%$  out of total length of working path /  $L_s = 25.0\%$  din lungimea totală a traseului în lucru

Fig. 3 – Variation of optimum speed depending on plot length, for different values of path run for repairing the errors / Variația vitezei optimele funcție de lungimea parcelei, pentru diverse valori ale lungimii drumului parcurs pentru repararea greșurilor

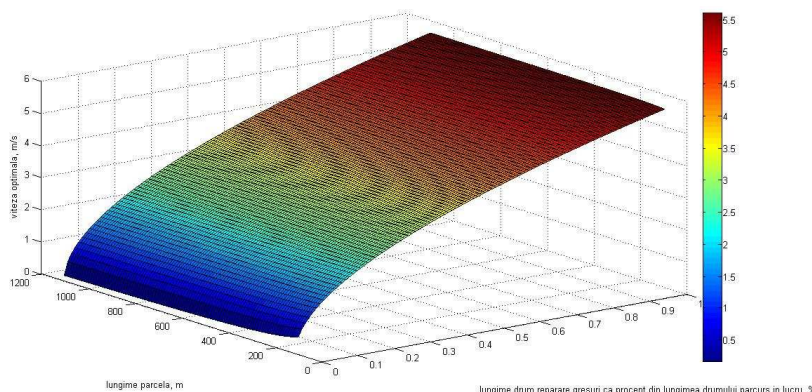
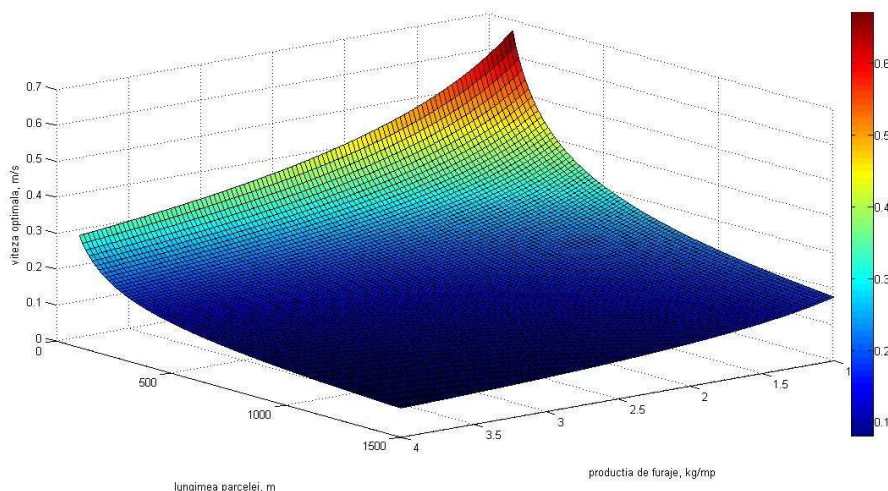


Fig. 4 - Variation of optimum speed along with plot length and length of path developed for repairing the errors as a fraction from total length of aggregate path / Variația vitezei optimele cu lungimea parcelei și cu lungimea traseului parcurs pentru repararea greșurilor ca fracție din lungimea totală a traseului parcurs în lucru de agregat

Variation of optimum speed related to plot length and vegetal production, for two values of length of path developed for repairing the errors, appears in figures 5 and 6, emphasizing not only the decrease of speed along with plot length but also the speed reducing along with vegetal production growing and optimum speed increasing when the path run is longer.

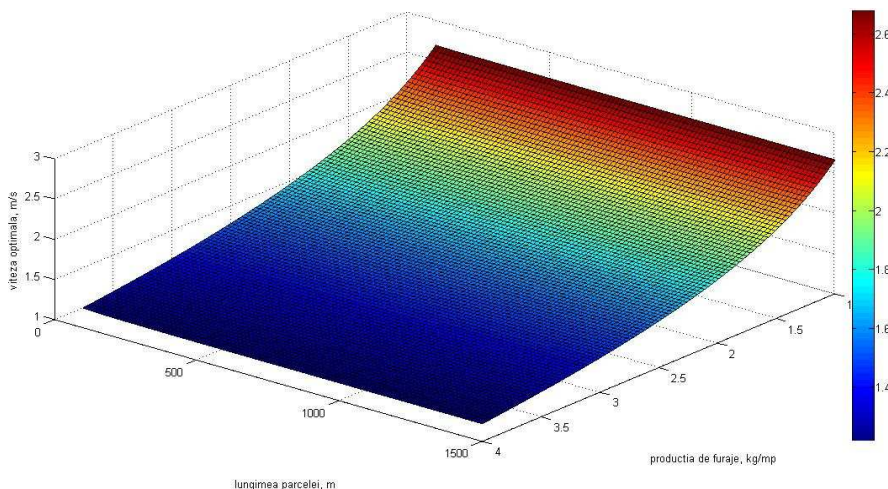
Variația vitezei optime în raport cu lungimea parcelei și cu producția vegetală, pentru două valori ale lungimii traseului parcurs pentru repararea greșurilor, apare în figurile 5 și 6, punând în evidență în afară de scăderea vitezei cu lungimea parcelei (evidențiată și mai sus), scăderea vitezei optime cu creșterea producției vegetale, dar și creșterea vitezei optime atunci când lungimea traseului parcurs pentru repararea greșurilor crește.



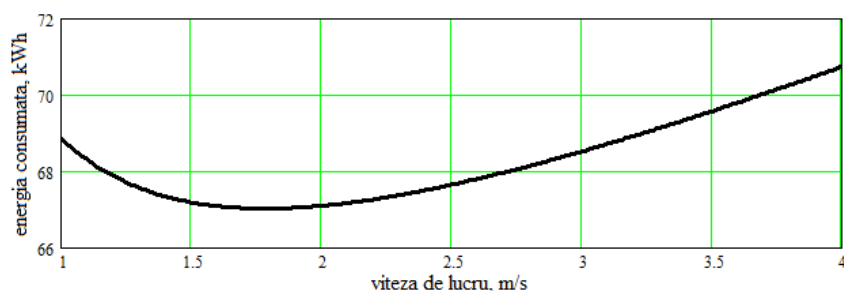
**Fig. 5-** Variation of optimum speed along with plot length and specific production for  $L_s=0$  / *Variația vitezei optime cu lungimea parcelei și producția specifică, pentru  $L_s=0$*

In graph from fig. 7, is emphasized the energy variation related to working speed, so the point of minimum may be seen (optimum speed) appropriate to values of parameters in table 3. The minimum energy is of approx. 67 kWh.

În graficul din fig. 7, se pune în evidență și variația energiei cu viteza de lucru, astfel încât se poate vizualiza punctul de minim (viteza optimă) corespunzătoare valorilor parametrilor din tabelul 3. Se identifică energia minimă de aproximativ 67 kWh.



**Fig. 6 –** Variation of optimum speed along with plot length and specific production, for  $L_s=15\%$  out of harvesting path length / *Variația vitezei optime cu lungimea parcelei și producția specifică, pentru  $L_s=15\%$  din lungimea traseului în recoltare*



**Fig. 7 –** Numerical emphasizing of working point of optimum / *Punerea în evidență pe cale numerică a punctului optimal de lucru*

In order to estimate the behaviour of optimum speed according to variable  $g_s$ , we must make some tests on trailed harvesting combine, for observing the interval within which this variable varies.

Pentru estimarea comportamentului vitezei optime în raport cu variabila  $g_s$ , trebuie făcute câteva investigații asupra combinelor tractate de recoltat furaje, pentru a vedea în ce interval variază această variabilă.



Table 4 / Tabelul 4

Types of trailed combines and data necessary / Tipuri de combine tractate și datele necesare calculului  $g_s$ 

Nr./No.	Type/Tipul	Mass/Masa [kg]	Working width/Lățimea de lucru, [m]	$g_s$ [N/m]
1	New Holland 790	1411	2.79 / 2,79	4961.26 / 4961,26
2	New Holland FP 230	2040 (+218)	3.30 / 3,30	6060.36+6712.42 / 6060,36+6712,42
3	New Holland FP 240	2130 (+231)	3.30 / 3,30	6331.91+7018.61 / 6331,91+7018,61
4	INMA CTF EI	2250	2.00 / 2,00	11036.25 / 11036,25
5	John Deer 625 Side-Pull MoCo	2027	2.50 / 2,50	7953.95 / 7953,95
6	John Deer 630 Side-Pull MoCo	2130	3.00 / 3,00	6965.10 / 6965,10
7	John Deer 635 Side-Pull MoCo	2388 (2233)	3.50 / 3,50	6693.22 (6258.78) / 6693,22 (6258,78)
8	John Deer 830 Mid-Pivot MoCo	2802 (2659)	3.00 / 3,00	9162.54 (8694.93) / 9162,54 (8694,93)
9	John Deer 835 Mid-Pivot MoCo	2916 (2762)	3.50 / 3,50	8173.13 (7741.49) / 8173,13 (7741,49)
10	John Deer 946 Mid-Pivot MoCo	3118 (2955)	4.00 / 4,00	7646.89 (7247.14) / 7646,89 (7247,14)
11	John Deer 956 Mid-Pivot MoCo	3325 (3055)	4.50 / 4,50	7248.50 (6659.90) / 7248,50 (6659,90)
12	JF-Stoll AMAKO	2760	2.10+3.10 / 2,10+3,10	12893.14 - 8734.06 / 12893,14 - 8734,06
13	CASE FHX300	2130	3.30 / 3,30	6331.91 / 6331,91
14	ROSTSELMASH Sterh KSD 2,0	1250	2.0 / 2,0	6131.25 / 6131,25
15	Tehinvest-CX, OOO	1250	2.0 / 2,0	613125

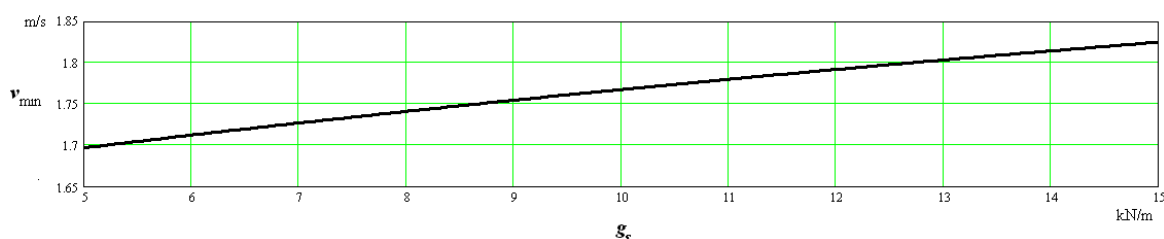


Fig. 8 – Variation of optimum speed given in data from table 1.2.2, according to parameter  $g_s$  / Variația vitezei optime pe datele din tabelul 1.2.2, funcție de parametrul  $g_s$

As we can notice from fig. 8, the optimum speed increases along with variable  $g_s$ . At the same time, the optimum energy increases along with machine specific weight per working width, see fig. 9.

După cum din se observă în fig. 8, viteza optimă crește odată cu creșterea variabilei  $g_s$ . De asemenea, energia optimă crește și ea odată cu creșterea greutății specifice a mașinii pe lățimea de lucru, așa cum se poate observa din fig. 9.

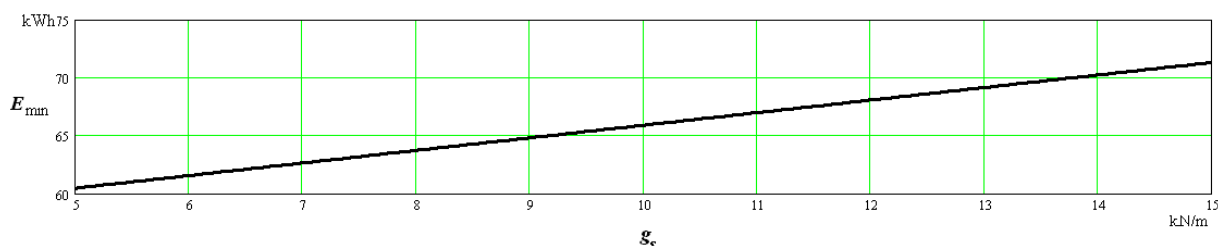


Fig. 9 – Variation of optimum speed given in data from table 4, according to parameter  $g_s$  / Variația energiei optime pe datele din tabelul 4, funcție de parametrul  $g_s$

Specific weight is usually considered as a performance parameter in design and manufacturing agricultural machinery.

Less is the value of this parameter, more the machine is performant, excepting the case of machines which need a bigger weight for specific works (soil works).

In our case, a weight specific to a smaller working width leads to a lower working speed (so, a reduced capacity of work), but also to a diminished optimum energy, namely a reduced fuel consumption, reduced harmful gas emissions and, finally reduced soil compaction.

Greutatea specifică lățimii de lucru este considerat, de obicei, un parametru de performanță al proiectării și construcției mașinilor agricole.

Mașina se consideră că este cu atât mai performantă cu cât valoarea acestui parametru este mai mică, cu excepția acelor mașini care au nevoie de greutate mare pentru lucrările specifice (de exemplu lucrări ale solului).

În cazul nostru se observă că o greutate specifică lățimii de lucru mai mică, conduce la o viteză optimă de lucru mai mică (deci și capacitate de lucru mai mică), dar conduce și la o energie optimă mai mică, ceea ce înseamnă consum redus de combustibil, reducerea emisiilor de gaze în atmosferă și nu în cele din urmă, reducerea fenomenului de compactare a solului.

## REFERENCES

- [1]. Dobrescu C. (1981) – *Optimization of agricultural aggregates parameters in order to reduce the energy consumption*, Editorial propaganda agricultural machinery Publishing, Bucharest;
- [2]. Letoşnev N.N. (1959) - *Agricultural Machines*, State Agro-Forestry Publishing House;
- [3]. Schuler R. T. (1991) - *Estimating Agricultural Field Machinery Costs*, A3510, Agricultural Bulletin, Rm. 245, 30 N. Murray St., Madison, Wisconsin 53715;
- [4]. Şandru A., Bădescu M., Şandru L. (1982) – *Reducing the energy consumption by rationally using the agricultural aggregates*, Scrisul Românesc Publishing, Craiova;
- [5]. Şandru A., Popescu S., Cristea I., Neculăiasa V. (1983) – *Exploitation of agricultural equipment*, Didactic and Pedagogic Publishing, Bucharest;
- [6]. Voicu E. (2007) – *Researches on dynamic and energetic optimization of tractor-fodder harvesting combine aggregate*, Ph.D. Thesis, University Transilvania Braşov, Faculty of Mechanical Engineering;
- [7]. \*\*\* Regional Statistics Office Bucharest, <http://www.bucuresti.insse.ro>
- [8]. <http://dexonline.ro/definitie/gre%C8%99>.

## BIBLIOGRAFIE

- [1]. Dobrescu C. (1981) - *Optimizarea parametrilor agregatelor agricole în scopul reducerii consumului de energie*, Redacția de propagandă tehnică agricolă, București;
- [2]. Letoşnev N.N. (1959) - *Maşini Agricole*, Editura Agro-Silvică de Stat;
- [3]. Schuler R.T. (1991) - *Estimarea costurilor domeniul maşinilor agricole*, A3510, Buletinul Agricol, RM. 245, 30 N. Str.Murray, Madison, Wisconsin 53715;
- [4]. Şandru A., Bădescu M., Şandru L. (1982) - *Reducerea consumului de energie prin folosirea rațională a agregatelor agricole*, Editura Scrisul Românesc, Craiova;
- [5]. Şandru A., Popescu S., Cristea I., Neculăiasa V. (1983) - *Exploatarea utilajelor agricole*, Editura Didactică și Pedagogică, București;
- [6] Voicu E. (2007) - *Cercetări privind optimizarea dinamică și energetică a agregatului tractor cu combină de recoltat furaje*, Teza de doctorat, Universitatea Transilvania din Braşov, Facultatea de Inginerie Mecanică ;
- [7]. \*\*\* Direcția Regională de Statistica București, <http://www.bucuresti.insse.ro>
- [8]. <http://dexonline.ro/definitie/gre%C8%99>.