

ÚJ MÓDSZER A MARÓTÁRCSÁS KOTRÓGÉPEK JÖVESZTÉSI ENERGIÁ- ÉS TELJESÍTMÉNYIGÉNYEINEK KISZÁMÍTÁSÁRA

A NEW METHOD FOR THE CALCULATION OF ENERGY AND POWER REQUIREMENTS OF BUCKET WHEEL EXCAVATORS

András József,¹ Kovács József,² András Endre,³ Kertész Ildikó,⁴ Tomus Ovidiu Bogdan⁵

*Petrozsényi Egyetem, Gépész és Villamosmérnöki Kar, Gépész, Ipari és Szállításmérnöki Tanszék,
Petrozsény, Románia*

¹ iosif.andras@gmail.com

² kovacsi@mail.com

³ andrei.andras@gmail.com

⁴ kerteszdiko@ymail.com

⁵ tobogdan@gmail.com

Abstract

The bucket wheel excavator (BWE) is a continuous working rock harvesting device which removes the rock by means of buckets armoured with teeth, mounted on the wheel and which transfers rock on a main hauling system (generally a belt conveyor). The wheel rotates in a vertical plane and swings in the horizontal plane and raised / descended in the vertical plane by a boom. In this paper we propose a graphical-numerical method in order to calculate the power and energy requirements of the main harvesting structure (the bucket wheel) of the BWE. This approach - based on virtual models of the main working units of bucket wheel excavators and their working processes - is more convenient than those based on analytical formulas and simplification hypotheses, and leads to improved operation, reduced energy consumption, increased productivity and optimal use of available actuating power.

Keywords: *bucket-wheel, excavator, power, virtual model.*

Összefoglalás

A marótárcsás kotrógép egy folyamatosan működő gép, amely jövesztő szerkezetére szerelt és bontófogakkal ellátott merítékek segítségével a kőzetet leválasztja és elszállítja a fő szállítóeszközhöz a gép szerkezetébe szerelt szállítószalag által. A marótárcsa függőleges síkban folytonos forgómozgást végez, és a gép által vízszintes síkban egy lengetőmozgást és függőleges síkban egy emelő-süllyesztő mozgást. A jelen tanulmányban egy grafikus-numerikus módszert javasolunk a marótárcsás kotrógép jövesztőszerkezet-teljesítményének meghatározása céljából. A marótárcsás kotrógépek különböző szerkezeti egységeinek elemzésére szolgáló virtuális modellekkel való megközelítésének az a célja, hogy a gép jövesztési szerkezetének működése javuljon, a fajlagosenergia-fogyasztás csökkenjen, a jövesztési folyamat termelékenysége megnöjjön, miközben a jövesztő szerkezet meghajtására szolgáló teljesítmény optimálisan legyen felhasználva.

Kulcsszavak: *marótárcsa, kotrógép, teljesítmény, virtuális modell.*

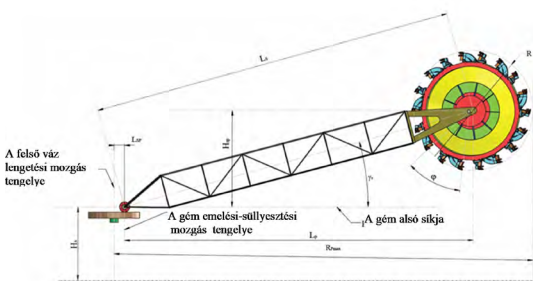
1. Általánosságok

A jövesztő szerkezet teljesítményének kiszámítási módját egy EsRc-1400 model BWE marótárcsás kotrógépre alkalmaztuk. [1] Ezt a típusú kotrógépet használják Olténia szénmedencéjének lignitbányáiban. A jövesztő szerkezet és a marótárcsa elhelyezésére vonatkozó geometriai jellemzőket az 1. ábrán mutatjuk be, ahol az alkalmazott jelölések jelentése a következő:

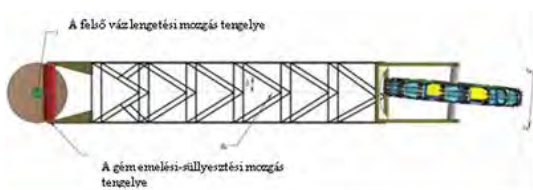
- H_s – a gém forgási tengelyének magassága a kotrógép szállítási szintjéhez viszonyítva, [m];
- L_{sp} – a gém forgási tengelye és a felsőváz forgástengelye közötti távolság, [m];
- L_p – a gém hossza forgástengelyétől a marótárcsa középponton átmenő, a gém szimmetriasíkjára merőleges síkig a gém szimmetriasíkjában mérve, [m];
- H_{sp} – a marótárcsa forgási középpontja és a gém alsó síkja közötti távolság;
- B_r – a marótárcsa forgási középpontja és a gém függőleges szimmetriasíkjának közötti távolság;
- δ – a marótárcsa síkjának elfordítási szöge, [°].

A kotrógép gémje függőlegesen emelkedés-süllyedés mozgása a gém vízszintes forgási tengelye körül történik (1. ábra). Vízszintes síkban a lengetési mozgás a felsőváz forgástengelye körül, v_p sebességgel történik (2. ábra).

Technológiai szempontból a két forgás (emelő-süllyesztő és lengető) síkjainak függőlegesnek, illetve vízszintesnek kell lenniük. A függőlegességtől, illetve a vízszinteségtől megengedett eltérés nem haladhatja meg a 3,5°-4,5° értéket.



1. ábra. A jövesztő szerkezet geometriai jellemzői, oldalnézetben



2. ábra. A jövesztő szerkezet geometriai jellemzői, felülnézetben

2. A forgácsolásparaméterek meghatározása és számítása

A jövesztő meríték a marótárcsa tengelye körüli forgása közben egy sarló alakú forgácsot vág, ezt az N, F és G pontok határolják meg (3. ábra).

A forgács maximális vastagsága h_0 , és az FG és O_1O_2 szegmensek hosszával egyenlő. Ezek szerint a marótárcsa R sugara a bontófogak vágóéleinek körvonalán a következő módon fejezhető ki:

$$R = \overline{O_1A} = \overline{O_2B} \quad (1)$$

A függőleges tengelytől mért elfordulási α szög esetében a forgács vastagsága h_i , ennek értéke pedig:

$$h_i = \overline{O_1A} - \overline{O_1B} = R - \overline{O_1B} \quad (2)$$

Ugyanakkor:

$$O_1B = BC - O_1C \quad (3)$$

A ΔBCO_2 derékszögű háromszögben, a (2) összefüggést számba véve, ki lehet írni, hogy:

$$\overline{BC} = \overline{O_2B} \cdot \cos \lambda = R \cdot \cos \lambda \quad (4)$$

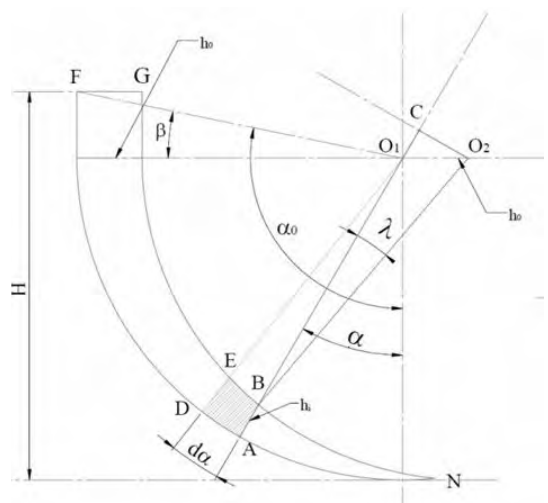
A ΔO_1O_2C derékszögű háromszögben ki lehet írni, hogy:

$$\overline{O_1C} = \overline{O_1O_2} \cdot \sin \alpha = h_0 \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

Ha a (4) és (5) összefüggéseket behelyettesítjük a (3) összefüggésbe, a következőt kapjuk:

$$h_i = R - R \cdot \cos \lambda + h_0 \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

Behelyettesítve a (6) összefüggést a (2) összefüggésbe, a következőt kapjuk:



3. ábra. A forgács hosszirányú keresztmetszetének mértani jellemzői

$$h_i = R - R \cdot \cos \lambda + h_0 \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Mivelhogy a λ szög kicsi, elfogadható pontatlansággal tekinthetjük, hogy $\cos(\lambda) \approx 1$, tehát a (6) összefüggés alakja a következő lesz:

$$h_i = h_0 \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

A fenti kifejezés a forgácsvastagság változását, annak maximális értékéhez viszonyítva, a marótárcsa elfordulási szöge függvényében írja le.

A forgács területének kiszámításához az elementáris ABED felületet vesszük figyelembe.

Ennek a területét egy négyszög területével közelítjük meg, amelynek egy oldala egyenlő a forgács t_i pillanatnyi vastagságával, a másik pedig az AD körív hosszával.

Ez utolsónak az értékét a következő kifejezés adja, ha a $d\alpha$ elementáris szöget radiánban fejezzük ki:

$$\widehat{AD} = R \cdot d\alpha \quad (9)$$

Így az ABED elementáris területét a következőképpen írhatjuk le:

$$S_{ABED} = h_i \cdot \widehat{AD} = h_i \cdot R \cdot d\alpha = h_0 \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \quad (10)$$

A forgács összterületét úgy kapjuk meg, hogy a (10) kifejezést integráljuk az α szög változásának határértékei között:

$$S = \int_0^{\alpha_0} h_0 \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = h_0 \cdot R \cdot (-\cos \alpha) \Big|_0^{\alpha_0} = h_0 \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha_0) \quad (11)$$

Annak érdekében, hogy a forgácsolási folyamat szimulációját elvégezzük és a marótárcsa tengelyére ható erőket megkapjuk, a meghajtó teljesítménymeghatározása szükséges. Úgy, mint az elektrotechnikában, itt is egy tényleges értéket vezetünk be, éspedig a forgácsvastagság tényleges értékét.

A mi esetünkben ez egy olyan négyszög oldalhossza, amelynek területe egyenlő a (11) kifejezéssel kiszámított területtel, amelynek a másik oldalhossza egyenlő az α_0 szög által átfogott körív hosszával.

Ennélfogva a forgács területe a tényleges forgácsvastagság függvényében így fejezhető ki:

$$S = h_{ef} \cdot R \cdot \alpha_0 \quad (12)$$

Egyenlítőve a (11) és (12) kifejezéseket, megkapjuk a forgácsvastagság tényleges értékét:

$$h_0 \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha_0) = h_{ef} \cdot R \cdot \alpha_0 \Rightarrow h_{ef} = \frac{h_0 \cdot (1 - \cos \alpha_0)}{\alpha_0} \quad (13)$$

A maximális jövesztési magasság a következőképpen fejezhető ki:

$$H = R + R \cdot \sin \beta_0 = R \cdot (1 + \sin(\alpha_0 - 90)) = R \cdot (1 - \cos \alpha_0) \quad (14)$$

A két egymást követő meríték közötti szög haladási ideje:

$$T = \frac{\varphi \cdot R}{V_t} \quad (15)$$

Ennélfogva a forgács szélessége a következőképpen fejezhető ki:

$$b = V_p \cdot T = \varphi \cdot R \cdot \frac{V_p}{V_t} \quad (16)$$

A meríték térfogata a kifejtett közet mennyiségét kell befogadja. Ezek szerint, ha k_a -val jelöljük a lazulási tényezőt, és Q -val a meríték térfogatát, akkor:

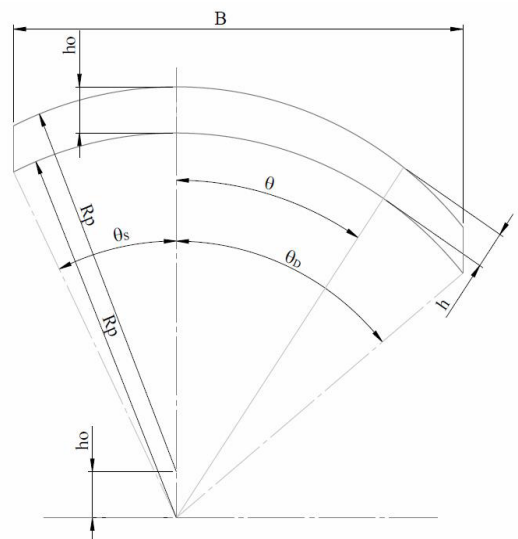
$$b \cdot S \cdot k_a = Q \quad (17)$$

A forgácsszélesség maximális értéke a következőképpen fejezhető ki:

$$b_{\max} = \frac{Q}{S \cdot k_a} = \frac{Q}{k_a \cdot h_0 \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha_0)} \quad (18)$$

A 4. ábrán a forgács mértani elemei vannak bemutatva, amelyben:

B – a kifejtett blokk szélessége;
 θ – a marótárcsa helyzeti szöge a blokk szélességi skálában.



4. ábra. A forgács mértani elemei a sáv térfogatának kiszámításához

3. Az erőtani és energetikai jellemzők kiszámítása

A jövesztés folyamatban az energiaigénynek, a marótárcsa vonatkozásában, két fő összetevője van, és pedíg:

- a jövesztésre fordított energiaigény,
 - az anyagemelésre fordított energiaigény. [5], [6]
- A fentiekben felsorolt energiaigények közül a jövesztésre fordítottak a részaránya lényegesen nagyobb, kb. az össz-energiaigény 60-90%-át képezi.

Az energia- és teljesítményigény meghatározása a kotrógép tetszőleges körülmények között való üzemelési folyamatában lényeges fontosságú a következő tevékenységek lebonyolításához:

- adott körülményeknek megfelelő kotrógép kiválasztása;
- új kotrógép tervezése-fejlesztése;
- létező kotrógépek jövesztés-rakodás szerkezetének korszerűsítése.

A teljesítményigény megfelelő meghatározása hasznos lehet a következő tevékenységek lebonyolításához:

- egy tetszőleges kotrógépnek a teljesítményigény és üzemelési paraméterek közötti összefüggések meghatározása;
- az energiafogyasztás optimalizálása, ill. maximális jövesztési teljesítmény minimális energiafogyasztással;
- a jövesztő-rakodó szerkezet teljesítményigényének a jövesztési teljesítmény, illetve a lengetési sebesség függvényében való meghatározása.

A marótárcsás kotró jövesztő szerkezetének, a merítékeknek és a marótárcsának erőtani, energetikai paraméterei alatt az alábbiakat értjük:

- a merítékre ható erőket:
 - a kerületi sebesség irányú vágóerőt, F_x ;
 - a kerületi sebességre merőleges rányomóerőt F_y ;
 - a lengetés irányú (oldalirányú) erőt, F_z ;
- az egyidejűleg forgásban lévő merítékek alapján a marótárcsára ható erőket:
 - az eredő vágóerőt, F_{xR} ;
 - az eredő rányomóerőt, F_{yR} ;
 - a lengetés irányú (oldalirányú) erőt, F_{zR} ;
- az energetikai jellemzők
 - a jövesztésre fordított hajtóteljesítményigényt P_{ex} ;
 - az anyagemelésre fordított hajtóteljesítményigényt, P_r ;
 - a gémlengetésnek (gémfordításnak) a jövesztésből adódó teljesítményigényét, P_p .

A felsorolt erőtani-energetikai paraméterek az idő, illetve a marótárcsa elfordulásszögének függvényében változnak, mivel a forgácsolóparaméterek és az egyéb jellemzők is változnak. Ezért a gyakorlatban átlagértékekkel dolgozunk.

A fentiek figyelembevételével a marótárcsahajtás átlagos teljesítményigénye:

$$P = \frac{P_{ex} + P_r}{\eta_t} \quad (19)$$

ahol η_t – a hajtómű hatásfoka. [1], [2].

Az előbbi összefüggések alapján felírható:

$$P = \frac{1}{\Delta t \cdot \eta_t} Q_T \left[\frac{k_{uz} \cdot K_e}{k_a} + \frac{1}{\eta_r} \left(D - \frac{H}{2} - \frac{2}{3} h_c \right) \rho_a \cdot g \right] \quad (20)$$

ahol

Q_T – az elméleti jövesztési teljesítmény (3280 m³/h);

D – a marótárcsa átmérője (11,5 m);

H – a blokk magassága (7,5 m);

k_{uz} – a bontófog kopási együtthatója (1,2);

K_e – fajlagos vágóerő (60 N/cm²);

k_a – lazulási tényező (1,35);

η_t – hajtómű hatásfoka (0,85);

h_c – a meríték magassága (0,84 m);

ρ_a – a laza közet fajsúlya (1,3-2 t/m³).

A (20) kifejezés alapján kiszámított teljesítmény értéke, a fenti adatokkal $P = 314$ kW.

4. A marótárcsás kotrógépek teljesítményének meghatározása grafikus-numerikus módszerrel

Egy EsRc 1400 korszerűsített kotrógép esetében, amely a Roșița dél-romániai külszíni lignitbányában működik, kiszámítottuk a kifejtett szelet térfogatát.

A számításhoz szükséges jövesztési paraméterek az 1. táblázatban vannak összegezve.

A táblázatban megadott értékekből kiindulva, a SOLIDWORKS programcsomagot alkalmazva, a marótárcsa nyomának a térfogatát számol-

1. táblázat.

Ssz.	Paraméter elnevezése	Jelölés	M.E.	Érték
1	Jobb-bal irányú lengetési szög	θ_s	Fok	42,80
		θ_p		90,00
2	Lengetési sugár	R_p	m	41,68
3	Marótárcsa átmérője	D	m	11,5
4	A forgács maximális vastagsága (fogásmélység)	h_o	m	0,6

tuk ki egy teljes lengési folyamat elvégzése után (5. ábra).

Ugyanaz a térfogat a fogásmélységgel egyenlő értékkel lett előretolva (6. ábra).

A két térfogat különbözete, a SOLIDWORKS programmal végezve, megadja a forgács teljes térfogatát (7. ábra). [4]

A SOLIDWORKS beépített térfogatszámítási modulját használva, kiszámítottuk a forgács térfogatát, a blokk magasságának két értékét figyelembe véve: 3,5 m és 7,5 m. A számítások eredményei a 2. táblázatban vannak kimutatva.

A tanszék keretében végzett kísérleti kutatások ([1], [2], [3], [4], [7], [8]) az adott közet – szürke agyag – fajlagos energiaigényének 0,15-0,27 kWh/m³ közötti értékeket mutattak ki.

A forgács kifejtéséhez szükséges energia a következő kifejezéssel számítható ki:

$$W_f = V \cdot w_{sp} \quad (21)$$

ebben:

W_f – a sáv kifejtéséhez szükséges energia (kWh);

V – a sáv térfogata (m³);

w_{sp} – a fajlagos jövesztési energiaigény (0,15-0,27 kWh/m³).

A (21) kifejezést alkalmazva, kiszámítottuk a jövesztési teljesítményt a fajlagos energiaigény minimális, átlag és maximális értékeinek megfelelően.

A lengetési idő a terepen, a kotrógép működése közben lett mérve, a 3,5 m fejtési blokkmagasság esetében ennek átlagértéke 438 s volt (2. táblázat).

Ugyanezzel az értékkel számítottuk a teljesítményt a 7,5 m magasság esetében is.

Amint ez látható a 2. táblázatban, a 0,27 kWh/m³ fajlagos energiaigény esetében a kiszámított teljesítmény meghaladja a hajtómotor névleges teljesítményét.

Ebben az esetben csökkenteni kell a lengetési sebességet, így a lengési idő megnövelésével a teljesítmény csökken.

Az eredmények a 2. táblázatban vannak tömörítve.

Ha számba vesszük a lenti egyenlőtlenséget:

$$P_{ExMax} < P_n \quad (22)$$

amelyben

P_n – a névleges, illetve

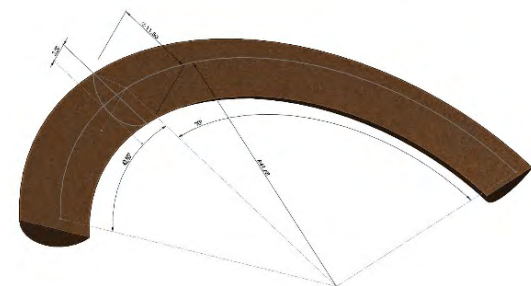
P_{ExMax} – a maximális kiszámított teljesítmény.

Kiszámíthatjuk a maximális lengetési sebességet, amely biztosítja, hogy a valós teljesítmény ne haladja meg a motor névleges teljesítményét (23) kifejezés szerint:

$$P_{ExMax} = \frac{W_f}{t_{ex}} = \frac{W_f \cdot v_{pmax}}{L} \Rightarrow v_{pmax} < \frac{P_n \cdot L}{W_f} \quad (23)$$

2. táblázat.

Szsz.	Blokk magassága (m)	Kifejtett térfogat (m ³)	Lengetés ideje (s)	Fajlagos energiaigény (kWh/m ³)	Használt energia (kJ)	Teljesítmény (kW)
1	3,5	160	438	0,15	86 400	197
2				0,21	129 960	276
3				0,27	155 520	355
1	7,5	297	438	0,15	160 380	366
2				0,21	224 500	512
3					288 600	659



5. ábra. A marótárcsa nyomának a térfogata egy teljes lengési folyamat elvégzése után



6. ábra. A két térfogat együttes alakja



7. ábra. A forgács (szelet) térbeli alakja

ebben:

- t_{ex} – a lengetési idő;
- v_{pmax} – a maximális lengetési sebesség;
- L – a lengetési pálya hossza;
- P_n – a motor névleges teljesítménye (630 kW).

A mi esetünkben (1. táblázat) $L = 96,6$ m. A (23) kifejezés segítségével kiszámított maximális lengetési sebesség $0,224$ m/s.

5. Következtetések

Jelen tanulmány a kotrógép marótárcsájának a meghajtásiteljesítmény-meghatározását tárgyalja egy grafikus-numerikus módszer alkalmazásával.

A módszer a marótárcsás kotrógépek jövesztési paramétereinek grafikus modellezésén alapul, annak érdekében, hogy a fajlagos energiafogyasztás csökkenése, a meghajtás névleges teljesítményének megtartása maximális jövesztési teljesítménnyel egyszerűen meghatározható legyen.

A SOLIDWORKS szoftvercsomaggal végzett jövesztési folyamatból eredő forgács (szelet) digitális mértani modellt fejlesztettünk ki. Ez a modell két azonos alakú blokkból áll, amelyek a marótárcsa lengetési pályán haladó nyomát képezi. A két blokk közötti különbség, a szoftver beépített művelet segítségével, meghatározza az egy lengetés alkalmával kitermelt kőzet mennyiségét.

Erre alapozva a jövesztési energetikai és teljesítményi paramétereket számítottuk ki $3,5$ és $7,5$ m-es fejtési magasság eseteiben, a bemutatott módszert alkalmazva. Az eredményeknél a hagyományos módszerrel számított értékektől való eltérés elfogadható.

Mivel a javasolt módszer numerikus számításokon alapul, általánossági tulajdonsággal rendelkezik, és ezért alkalmazható bármely marótárcsás kotrógép esetében, bármilyen kőzet és jövesztési paraméterek között.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kovács I., András I., Nan M. S., Popescu F. D.: *Theoretical and experimental research regarding the determination of non-homogeneous materials me-*

chanical cutting characteristics. 8th WSEAS International Conference on simulation, modelling and optimization (SMO'08) Santander, Cantabria, Spain, September 23-25, 2008.

- [2] Kertész (Brînaș) Ildikó: *Simularea și modelarea parametrilor de funcționare a rotorului excavatoarelor în timpul procesului de excavare*. Raport de cercetare nr.2, Petroșani, 2018.
- [3] Kovács I., Nan M. S., András I., Jula D.: *Study of the working regime of the bucket wheel excavators in the conditions of Romanian open pit lignite mines*. 8th WSEAS International Conference on simulation, modelling and optimization (SMO'08), Santander, Cantabria, Spain, September 23-25, 2008.
- [4] Kressner M., ș.a.: *Cutting Resistance and Cutting Tool Design on Bucket Wheel Excavators*. Proceedings of ISCSM 2006, 8TH International Symposium, Continuous Surface Mining, Aachen, September 24th – 27th 2006.
- [5] Raaz, V.: *Optimierung der maschinen- mid Verfahrenrechnischen Parameter von Schaufelradbaggern für einen abbau von harteren Materialien im Tagebau*. Braunkohle in Europa: Innovationen für die Zukunft; 1. Internationale Konferenz, 29. März bis 1. April 2000. in Freiberg, Tagungsband.
- [6] Sümeği I.: *Külfejtési marótárcsás kotrógépek jövesztő szerkezetének elméleti vizsgálata és fejlesztése*. Doktori értekezés, Miskolci Egyetem, 2002.
- [7] András A., Fraur F., Risteiu M.: *Overview of the Unwanted Effects of Unmineable Rock Formations on the Mining System of Bucket Wheel Excavator During the Excavation Process*. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, Conference Proceedings, 29 June - 5 July, 2017, 17/13. (2017) 637–644.
<https://doi.org/10.5593/sgem2017/13/S03.081>
- [8] Tomus O. B., András A., András I.: *Study of the Dependence Between the Cutting Direction Relative to Stratification and the Digging Characteristics of Lignite in Oltenia Coal Basin (Romania)*. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, Conference Proceedings, 29 June - 5 July, 2017, 17/13. (2017) 825–830.
<https://doi.org/10.5593/sgem2017/13/S03.104>