

10. OPTIMÁLÁSI LEHETŐSÉGEK A MŰVELET-ELEMEK TERVEZÉSEKOR

A technológiai tervezés ezen szintjén a fő feladatok a következők:

- a forgácsolási **paraméterek meghatározása**,
- a **szerszám mozgásciklusok** (üresjárat, munkautak) tervezése,
- a műszaki **időnorma** számítása.

A forgácsolási paraméterek optimalizálását szolgáló matematikai modell **komponensei**: az **éltartam** összefüggés, a **célfüggvény**, a **korlátrendszer**.

A modell független változói az optimalizálandó forgácsolási paraméterek (a: fogásmélység, f: előtolási sebesség, v: forgácsolási sebesség).

E fejezet célja elsősorban az optimalizálás algoritmusának bemutatása.

10.1. Az optimálás általános modellje

Az **általános modellstruktúra** fő elemei a következők:

- a forgácsolási folyamat alapösszefüggései:
 - a forgácsolóerő számítása,
 - a szerszám kopása,
 - a szerszám éltartama,
 - a forgácsolási zóna hőmérséklete,
 - a szerkezeti anyagok forgácsolhatósága,
- a célfüggvény:
 - a legkisebb költségek célfüggvénye,
 - a maximális termelékenység célfüggvénye,
 - a legkisebb főidő célfüggvénye,
 - a legnagyobb nyereség célfüggvénye,
- az optimumkeresés korlátrendszer:
 - az előtoláskorlátok,
 - a fordulatszámkorlátok,
 - a fogásmélység korlátok,
 - a forgácsolóerővel összefüggő korlátok,
 - az optimálás módszere

A szerszám éltartam egyenlete:

$$T = T(f, v, a) \quad (10.1)$$

A **korlátrendszer (feltételrendszer)** azon összefüggések rendszere, amelyek meghatározzák, hogy az MKGS rendszer milyen feltételek (korlátok) mellett működőképes.

Ezen összefüggések lényegében:

- a beállítási tartományok (gépen kapcsolható előtolás, fordulatszám tartományok),
- a megengedhető erők, nyomatékok, teljesítmények,
- a forgácsolási zóna hőmérséklete,
- a megmunkálási pontosság, felületminőség,
- a rezgésmentes működés, forgácstörési képesség,
- a megengedhető rugalmas alakváltozások.

A beállítási tartományokon kívül a megmunkálási folyamat többi jellemezőjét többé-kevésbé bonyolult összefüggések határozzák meg. Közülük fontos, de viszonylag egyszerű a **főforgácsoló-erőre** vonatkozó képlet (esztergálásra).

$$F_f = C_f \cdot a^{X_F} \cdot f^{Y_F} \cdot v^{Z_F} \quad (10.2)$$

ahol:

X_F, Y_F, Z_F szerszámtól, munkadarabtól és megmunkálási körülményektől függő kitevők,

C^F a megmunkálandó anyag forgácsolhatóságát és a szerszám pillanatnyi forgácsoló képességét jellemző állandó.

A forgácsoló erő számításának **fajlagos forgácsolóerőre** alapozott képlete:

$$F_f = k_c \cdot h \cdot b \quad (10.3)$$

ahol:

k_c fajlagos forgácsolóerő,

$h \cdot b$ forgácskeresztmetszet,

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^z} \quad (10.4)$$

amit.

$k_{c1.1}$ fajlagos forgácsoló erő $h=1$ és $b=1$ mm esetén

→

$$F_f = k_{c1.1} \cdot h^{1-z} \cdot b$$

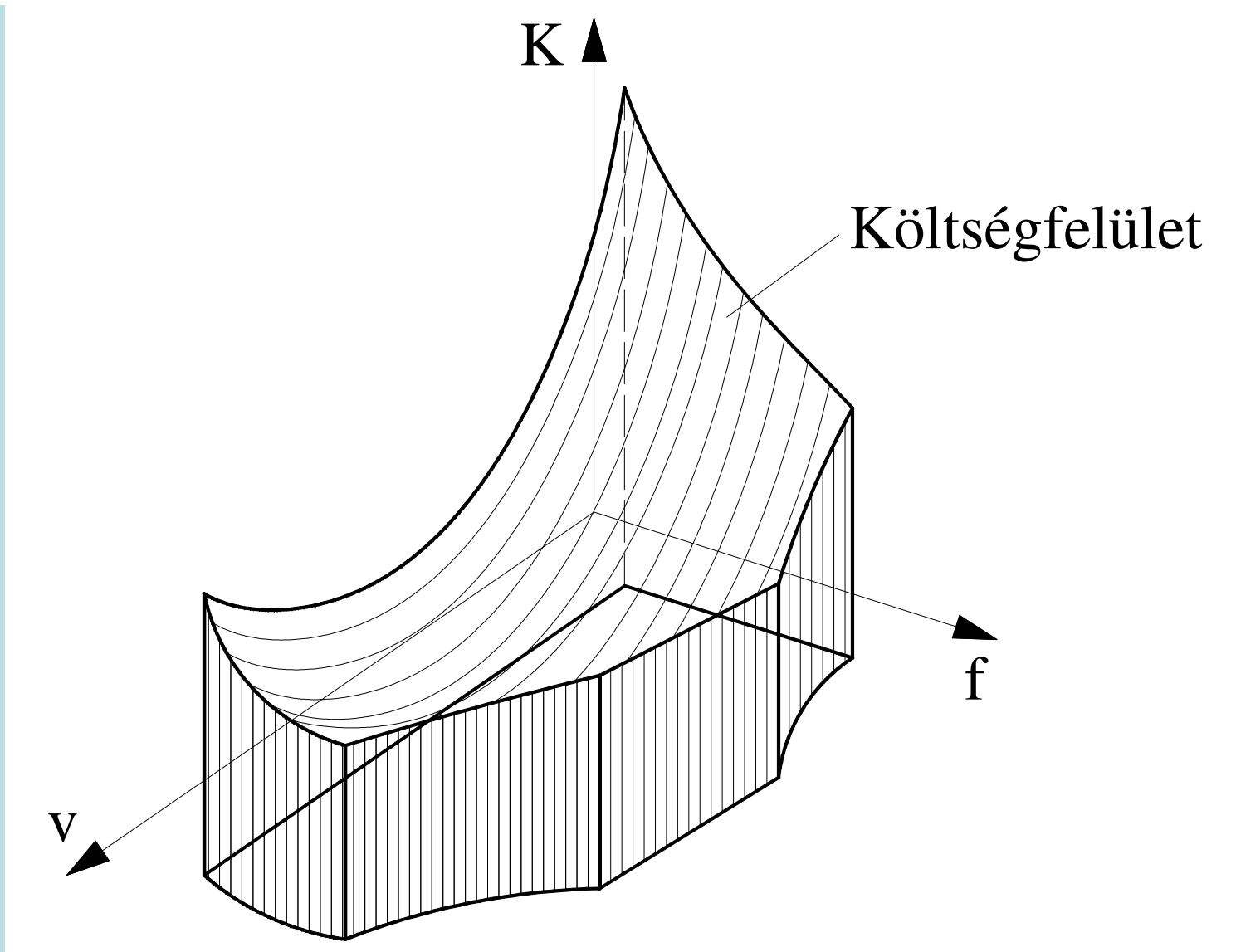
h_z a munkadarab és a szerszám anyagától függ,

A **kitevős erőegyenlet** felírható általános (minden megmunkálási módra érvényes) alakban. Hasonló összefüggések írhatók fel a forgácsolás hőmérsékletére, a felületi érdességre, más fizikai jellemzőkre.

A forgácsolási folyamat feltételrendszere általános alakban:

$$E_{j_{\min}} \leq a^{X_j} \cdot f^{Y_j} \cdot v^{Z_j} \leq E_{j_{\max}} \quad (10.5)$$

A háromdimenziós modell a három szabadon választható paraméter (a , f , v) meghatározására szolgál. **Az ehhez tartozó optimumkeresési korlátok térbeli ábrázolása a 10.1. ábrán látható.**



10.1. ábra

Optimumkeresési felület térbeli ábrázolása

Jellegzetes korlátok:

$f_{\text{ming}}, f_{\text{maxg}}$ a gépen beállítható előtolások,
 f_{mint} technológiai szempontból megengedhető legkisebb előtolás,

f_{maxRa} az előállítandó felületi érdességből következő megengedhető maximális előtolás,

$v_{\text{ming}}(n_{\text{ming}})$ a szerszámgép legkisebb és legnagyobb forgácsolási
 $v_{\text{maxg}}(n_{\text{maxg}})$ sebessége (illetve ahhoz tartozó fordulatszám),

$v_{\text{mint}}, v_{\text{maxt}}$ technológiai szempontból ajánlott alsó és felső sebességhatárok,

$a_{\text{mint}}, a_{\text{maxt}}$ technológiai szempontból ajánlott alsó és felső fogásmélység korlátok,

a_{maxsz} szerszámra megengedett legnagyobb fogásmélység,

a_{maxg} szerszámgépen szokásos legnagyobb fogásmélység,

$\lambda = a/f$ fogásmélység/előtolás viszony megengedett határai a $\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}} = 4 \div 20$ dinamikus instabilitás, megfelelő forgácskereszt- metszet biztosítására.

A független változók (a , f , v) tulajdonságai

Az adott korlátok között az előtolás (f), a forgácsolási sebesség (v) illetve a fordulatszám (n) tetszőleges értéket vehet fel, ugyanakkor a fogásmélységre érvényes, hogy:

$$R_j = a_1 + a_2 \dots + a_z = \sum_{k=1}^z a_k \quad (10.6)$$

A fogásmélységre is kiterjedő háromdimenziós feladat megoldása **dinamikus programozást** igényel. Gyakorlatban: **heurisztikus** megfontolások alapján előre meghatározzák a **fogásmélységet** és ezzel kétdimenzióssá (f , v) redukálják az optimálási feladatot. Ugyanis az **optimális fogásmélység** értéke a **maximális fogásmélység közelében van** ($a_{\text{opt}} \approx a_{\text{max}}$).

Ekkor a megmunkálási folyamat feltételrendszere:

$$G_{j_{\min}} \leq f^{Y_j} \cdot v^{Z_j} \leq G_{j_{\max}} \quad \dots j=1, 2, 3, \dots \quad (10.7)$$

Logaritmikus transzformációval:

$$\log G_{j_{\min}} \leq y_j \cdot \log f + z_j \cdot \log v \leq \log G_{j_{\max}} \quad (10.8)$$

Egyenlősséggé alakítva:

$$\log f = -\frac{z_i}{y_i} \cdot \log v + C_i \quad \dots i=1, 2, 3, \dots \quad (10.9)$$

amit a \log_f - \log_v síkban konvex poligon szemléltet $[\log_n]$.

A célfüggvény:

1. $K_{\text{megm.költség}} \rightarrow \min.$

$$K = C_M \cdot \left(t_1 + C_T \cdot \frac{t_1}{T} \right) \rightarrow \min \quad (10.10)$$

ahol:

T szerszáméltartam,

t_1 megmunkálási idő,

C_M gép időegységre vetített költsége (beleértve a dolgozó, energia, hely, karbantartás, vállalati általános költségeket).

$$C_T = \frac{K_{sz}}{C_M} + t_{cs} \quad (10.11)$$

ahol:

K_{sz} egy éltartamra eső szerszám költség,
 t_{cs} egy élre vonatkoztatott szerszámcsere idő.

$$t_1 = \frac{L}{n \cdot f} \quad (10.12)$$

ahol:

L megmunkálási hossz [mm],
n fordulatszám [1/ford],
f előtolás [mm/ford].

$$K = \frac{L \cdot C_M}{n \cdot f} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) \rightarrow \min \quad (10.13)$$

vagy

$$K = \frac{1}{n \cdot f} \left(1 + \frac{C_T}{T_B} \right) \quad (10.14)$$

Az egyszerűsítés az optimumhelyet nem befolyásolja.

2. megmunkálási idő $t \rightarrow \min$

$$C_T = t_{cs}$$

$$t = \frac{1}{n \cdot f} \cdot \left(1 + \frac{t_{cs}}{T} \right) \rightarrow \min \quad (10.15)$$

Az optimumpont a C_T értékének változása miatt a nagyobb „n” irányába mozdul el.

Szerszáméltartam összefüggés

A forgácsolási paraméterek és a szerszám elhasználódása (kopása, éltartama) közötti kapcsolatot jellemzi. Szerepel az optimális modell célfüggvényében.

Kopásmódok: kráteres, hát, csúcs, mellékél kopás, abrazív, diffúziós, stb.

Domináns kopás: jellege és intenzitása szerint az adott megmunkálásra jellemző, mértékadó kopásfajta.

$$\Delta = C_{\Delta} \cdot a^{x_{\Delta}} \cdot f^{y_{\Delta}} \cdot v^{z_{\Delta}} \cdot t^{u_{\Delta}} \quad (10.16)$$

ahol:

Δ kopás pillanatnyi értéke,

$C_{\Delta}, x_{\Delta}, y_{\Delta}, z_{\Delta}$ megmunkálási körülményekre jellemző állandó és kitevő

a fogásmélység,

f előtolás,

v forgácsolási sebesség,

t forgácsolásban eltöltött idő.

Éltartam egyenlet: a forgácsolási paraméterek, a megengedett kopásérték és a szerszám éltartama közötti összefüggés.

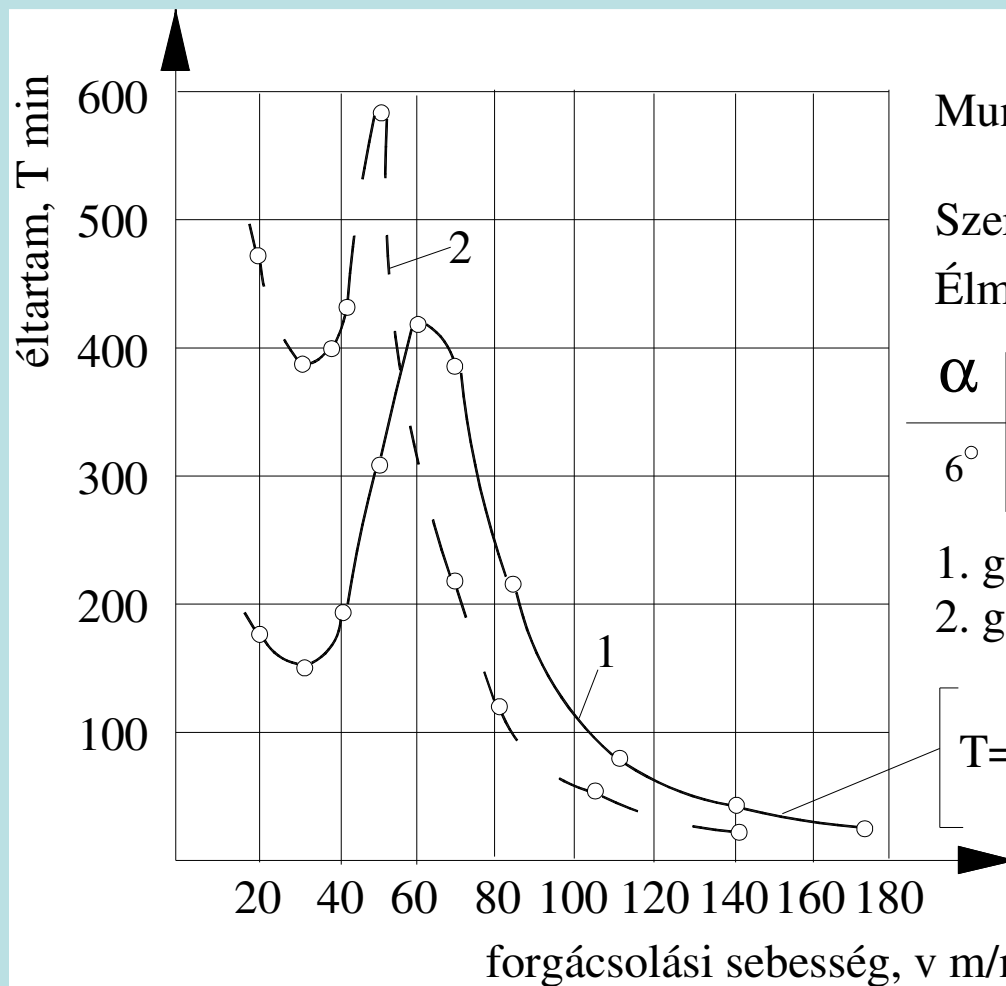
Egyszerű Taylor éltartamegyenlet:

$$v_c \cdot T^m = C_v \quad (10.17)$$

Bővített Taylor éltartamegyenlet rögzített kopásérték mellett, az ipari gyakorlatban többnyire ezt használják. Fontos az érvényességi tartomány figyelése.

$$T = \frac{C_T}{v^{z_T} \cdot f^{y_T} \cdot a^{x_T}} \quad (10.18)$$

Az éltartamgörbét gyakran forgácsolási kísérletekkel határozzák meg. Erre példa a 10.2. ábra.



Munkadarab: C60 kovácsolt
normalizált

Szerszám: nagyoló esztergakés

Élminőség: DA 10 (P10)

α	γ	λ	χ	τ	r
6°	8°	-3°	90°	20°	1 mm

1. görbe: a=2mm, f=0,316mm/ford

2. görbe: a=2mm, f=0,4 mm/ford

$$T = 10^3 \cdot \frac{5,7 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 - 0,4 \cdot v + 20}{(2,23 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 - 0,273 v + 9) \cdot v}$$

10.2. ábra

Kísérleti úton felvett éltartamgörbe közelítése racionális törtfüggvénnyel

10.2. Az optimalás módszere

A bemutatott modell általános megoldási lépései:

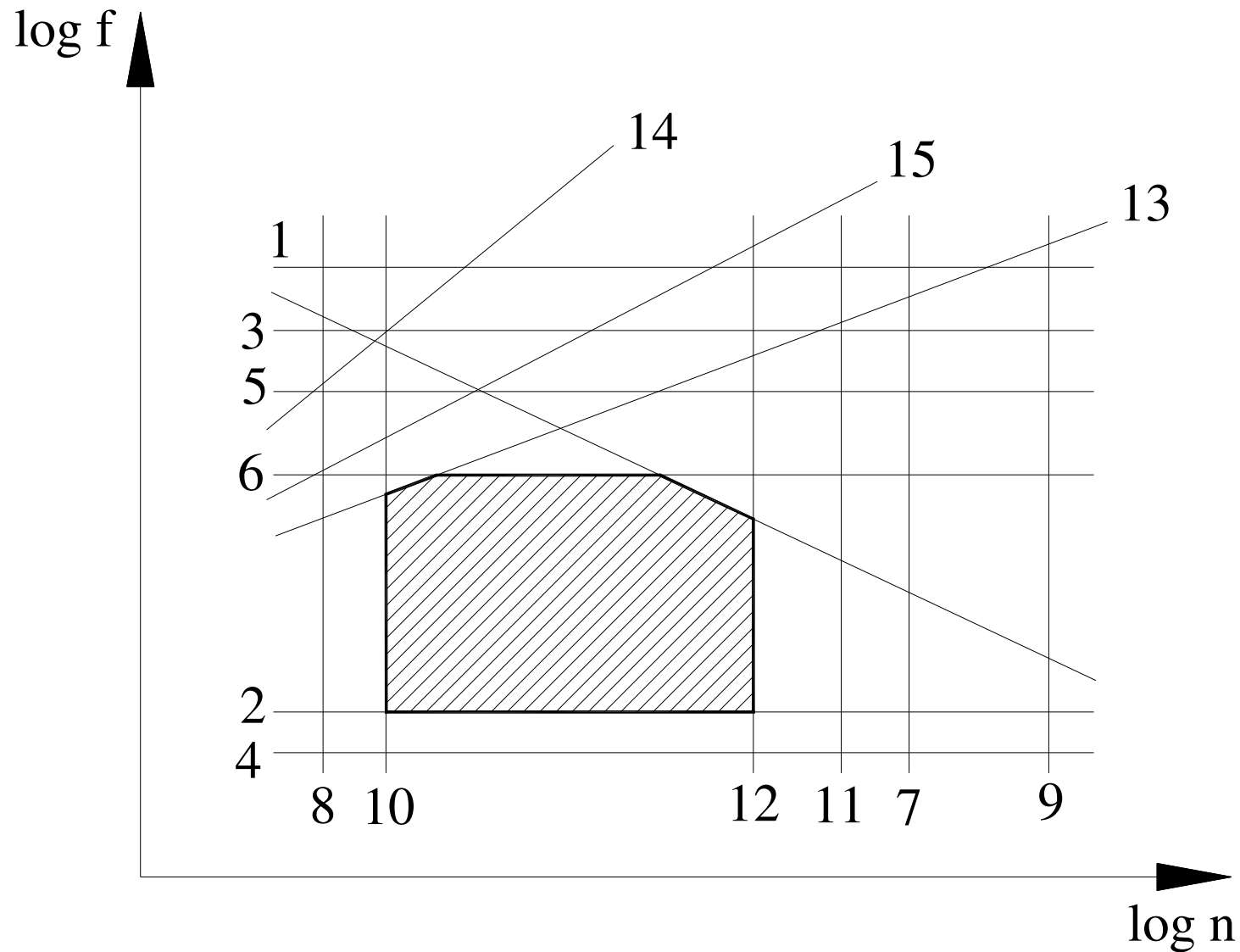
1. Meghatározandó a feltételrendszert kielégítő $\{a, f, v, n\}$ paraméterkombinációk halmaza, vagyis a megoldáshalmazban először a homogén korlátok által behatárolt értelmezési tartományt jelöljük ki, majd szűkítjük azt az inhomogén korlátok figyelembevételével.
2. A megoldáshalmazból a célfüggvény extrémuma segítségével kiválasztjuk a paraméterkombinációt.

Megoldásra a matematikai programozás legkülönfélébb eszközei felhasználhatók.

Erre az esetre különösen elegáns és hatékony a Somló-Girnt féle módszer az optimumesélyes pontok módszere.

Lényege: kétdimenziós modellre épül, feltételezi a fogásmélység előre adott voltát.

A feltételrendszer $\log f$ - $\log n$ koordinátarendszerben (10.3. ábra).



10.3. ábra

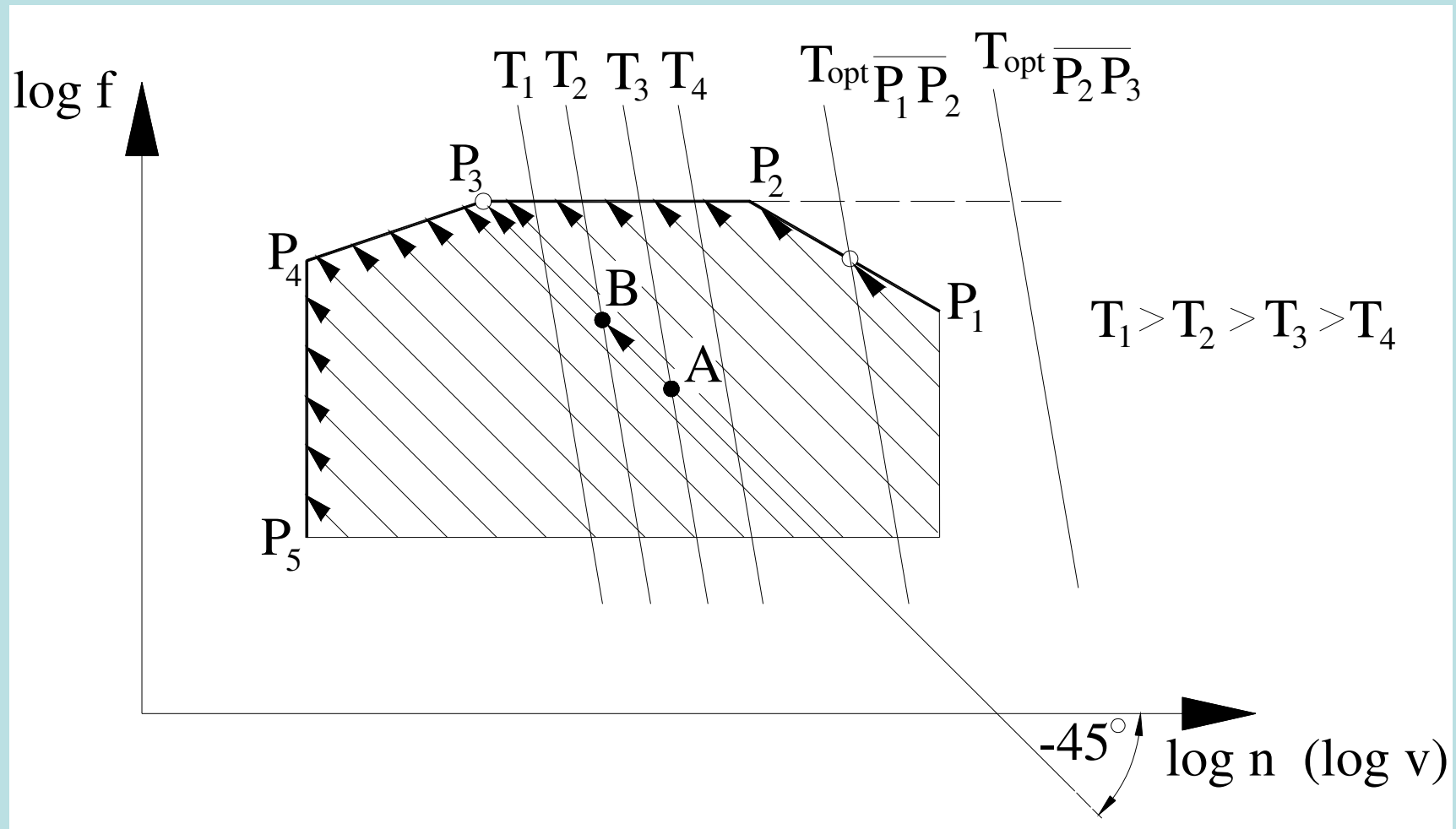
A feltételrendszer kialakulása \log_f - \log_n koordinátarendszerben

Az optimumpont meghatározásához két tételt kell ismerni [79]:

1. Az optimumpont csak a keresési tartomány (megoldáshalmaz) határán lehet. Ott sem akárhol, hanem csak azokon a szakaszokon, amelyeket a tartomány bármely pontjából felfelé induló -45° -os hajlásszögű egyenes metsz. $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5$ =az optimumesélyes határvonal. Magyarázat: bármelyik -45° -os egyenesen az n és f sorozat értéke állandó, azaz a megmunkálás főideje = const., ugyanakkor a T éltartam értéke nő. A T_1 és T_2, \dots, T_n éltartam egyenesek meredekebbek, mint a -45° -os egyenes. Ugyanis $\alpha_T = \arctan(-1/y_v)$, $y_v = 0.1 \div 0.3 < 1$, az egyenesen felfelé haladva a főidő állandó, a szerszámozási költség csökken, tehát a költségfüggvény (célfüggvény) értéke csökken.

2. Az optimum szempontjából esélyes görbén legfeljebb egy lokális szélsőérték pont lehet (10.5. ábra). A potenciális optimumpontok helye egyszerű szélsőérték számítással meghatározható. A szélsőérték vagy valamely szakaszon van (akkor ez optimum) vagy kívül esik a tartomány határain, akkor a határoló szakasz valamelyik szélső pontjában lesz minimális. További részletek [79]. T_1 = a Taylor képlet szerinti éltartam a P_1 pontban, T_{sz1} = a P_1 - P_2 szakaszhoz tartozó optimális éltartam, azaz a P_1 - P_2 szakaszhoz tartozó éltartamgörbe szélső értéke.

$$T_{sz,j} = \frac{1 + y_v \cdot N_j - (N_j + 1) \cdot m}{m \cdot (N_j + 1)} \cdot C_T \quad (10.19)$$



10.4. ábra

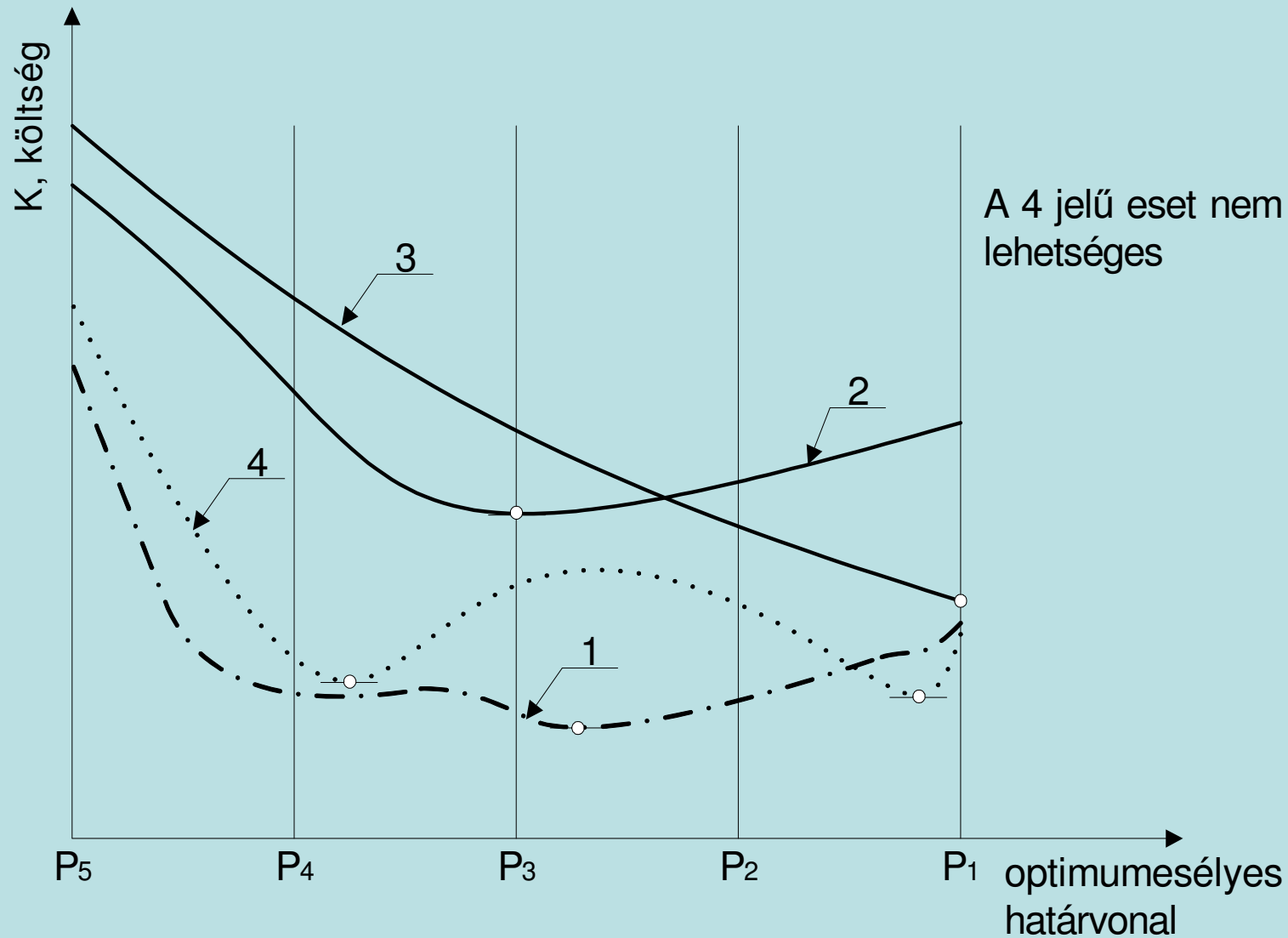
Az optimumesélyes határvonal értelmezése

ahol:

$$N_j = -\frac{z_j}{y_j}$$

a megengedett tartományt határoló $f=H_j \cdot n^{N_j}$ egyenletű, j -dik optimumesélyes görbeszakasz logaritmikus transzformáció utáni meredeksége.

Látható: minden szakaszhoz saját éltartam szélsőérték tartozik, a szakaszonkénti lokális szélsőértékekhez tartozó éltartamok a technológiai adatoktól függetlenek, csak a feltételi egyenletrendszer kitevőitől, a Taylor összefüggés kitevőitől és a költségfüggvény C_T együtthatójától függnnek, vagyis adott matematikai modell esetén állandók.



10.5. ábra

Az optimumesélyes határvonalon csak egyetlen lokális szélsőérték pont lehet

Az $N_j = -\frac{z_j}{y_j}$ behelyettesítést elvégezve:

$$T_{sz,j} = \frac{y_j - y_v \cdot z_j - (y_j - z_j) \cdot m}{m \cdot (y_j - z_j)} \cdot C_T \quad (10.20)$$

10.3. Az optimálás algoritmusa

Az optimálás algoritmusát 10.6. ábra szemlélteti.

Kiszámítandó T_1 és T_{sz1} és ha $T_1 > T_{sz1}$, akkor optimum a P_1 pontban.

Kiszámítandó a P_2 -höz tartozó T_2 és ha $T_1 > T_{sz1}$, akkor a P_1P_2 szakaszon lokális szélsőérték pont van, amelyhez tartozó fopt előtolás és n_{opt} fordulatszám a:

$$T^m = T_{sz1}^m = \frac{C_v}{v \cdot f^{y_v} \cdot a^{x_v}} = \frac{C_v}{\frac{\pi \cdot d}{1000} \cdot n \cdot f^{y_v} \cdot a^{x_v}} = \frac{C_v^x}{a^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot n} \quad (10.21)$$

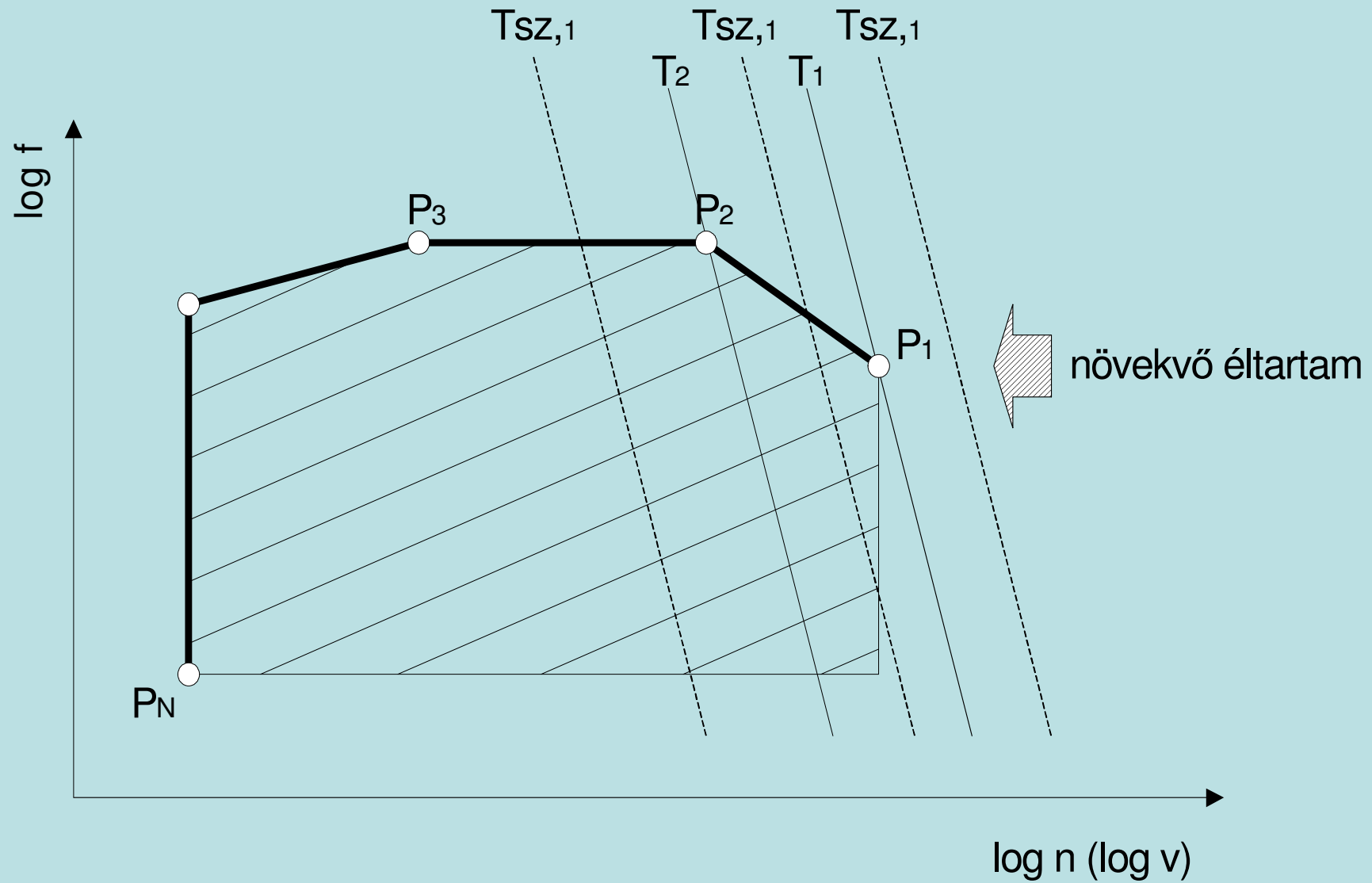
és

$$f = H_1 \cdot n^{N_1} \quad (10.22)$$

alapján az alábbiak szerint számíthatók:

$$n_{opt} = \left[\frac{C_v^x}{H_1^{y_v} \cdot a^{x_v} \cdot T_{sz1}^m} \right]^{\frac{1}{y_v \cdot N_1 + 1}} \quad f_{opt} = H_1 \cdot v_{opt}^{N_1} \quad (10.23)$$

ha $T_2 < T_{sz1}$, akkor az optimális pont nem a P_1P_2 szakaszon van és a P_2 ponttól kezdődően a P_2P_3 szakaszon megismétlődnek a P_1P_2 szakaszra elvégzett vizsgálatok.



10.6. ábra

Az optimálás algoritmusának szemléltetése