

# Nagyméretű vasbuca előállítása szabadon álló avar kohóban

## Bevezetés

### Történeti háttér

A kora középkori kohótelepek régészeti feltárásai alapján látható, hogy az avar kori jellemzően részben vagy teljesen szabadon álló kohók nagyobbak voltak, mint a későbbi honfoglalás- és Árpád-kori, műhelygödör oldalfalába beépített magyar kohók. Az avar kohók a kohótelepeken egymagukban vagy párosával, a későbbi, kisebb magyar kohók pedig egy-egy műhelygödörben többmagukkal, néha tízesével is előfordultak. A késő avar korból ismert három kb. 10kg-os faszerszámokkal teljesen betömörített kb.  $6\text{g/cm}^3$  sűrűségű ékelt vasbuca (egy a Petesalmi Vidrapark egyik halastavából – a sűrűséget csak ezen állt módomban mérni – kettő pedig Zalavárról egy Karoling udvarházból). Kérdésként vetődik fel, hogy lehetséges volt-e az avar kohókban ekkora vasbucákat előállítani, illetve egyáltalán az, hogy mekkora bucákat lehetett az avar kohókban csinálni?

A kohósítás után a kohóból kihúzott vasbucát farönkön, fakalapácsokkal melegen összetömörítik. Az első tömörítés után a sűrűségük kb.  $4\text{g/cm}^3$ . Ezt további újraizítások követhetik, amelyek során a maradék salak kiolvad a vasbucából és az tovább tömöríthető. Eközben a vasbuca méretétől (fajlagos felületétől függően) a tömege kb. az egyharmadával csökken, azaz egy 15kg-os egyszer tömörített buca kb. 10kg-os lesz, mire faszerszámokkal teljesen betömörítik (az ilyen bucának nincsenek sík felületei, mert vasszerszámokkal nem értek hozzá, de már annyira tiszták, hogy megkocogtatva őket csilingelnek). Az ékelt vasbucák kapcsán kérdés tehát, hogy lehetséges volt-e kb. 15kg-os bucákat előállítani az avar kohókban?

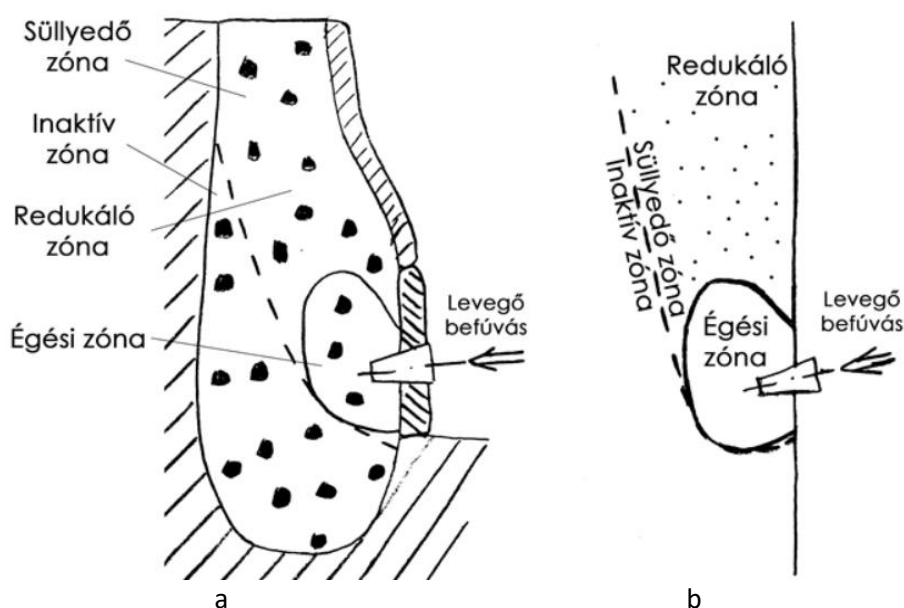
### Technológiai háttér

A 2023. szeptember 2-án a Nemeskéri avar kohó másolatában elvégzett próbakohósítás célja az volt, hogy a lehető legnagyobb méretű vasbucát állítsuk elő. A kísérlet során az általunk már jól ismert petesalmi gyevasércet (ld. 3a ábra) kohósítottuk, amelynek jellemző kémiai összetétele: 80%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 7%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 6%  $\text{SiO}_2$ , 3%  $\text{CaO}$ , 2%  $\text{MnO}$ , 2% egyéb, tehát ez egy alapvetően nagy vastartalmú érc, amelyben viszont sajnos nagyon sok foszfor is van. A korábbi próbakohósítások során három fő probléma volt ezzel az ércel:

- gyakran tapasztaltuk a nagy foszfortartamú vasbucák melegtörékenységet,
- az apró (kb. 0-15mm-es) szemcseméret miatt az érc a nagyobb szemcseméretű faszén között könnyen átpergett és nem növelte a vasbuca tömör magját,
- kevés salak keletkezett, a vasérc „túlredukálódott” és a kapott vasbucák „szárazak” voltak, nehezen lehetett őket tömöríteni

Ezen problémák ellenére a petesalmi vasérc „a la nature”, tehát a tóból összeszedett állapotában (sokszor még vizesen is) általában jól kohósítható volt a kisebb méretű fajszi kohókban, apró szemű, általában 6-25mm-es vagy 6-40mm-es frakciójú faszénnel. 10-15kg vasérc kohósításával 2-4kg-os egyszer tömörített vasbucát lehetett kapni. Azonban a nagyméretű vasbuca előállítását célzó kísérletben a felsorolt problémákra megoldást kellett találni.

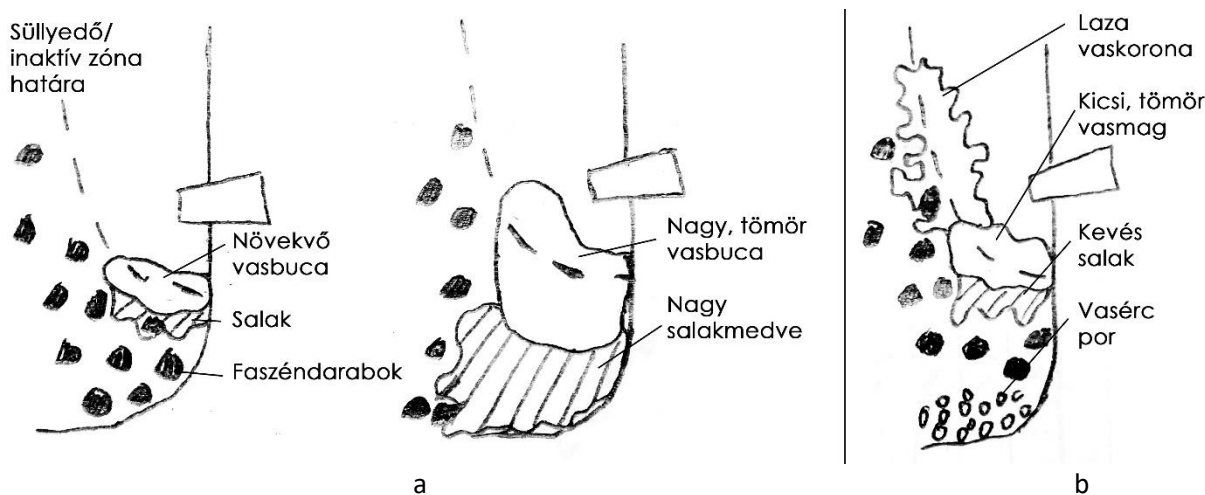
Ahhoz, hogy a kohóban előálló vasbuca méretét növeljük, a fúvóka előtt kialakuló égéstér (ahol a faszén elégéséhez elegendően oxidáló az atmoszféra) méretét kell megnövelni. A kohó főbb metallurgiai zónáit mutatja az 1. ábra.



1. ábra: a) A bucakohó főbb metallurgiai zónái. b) Ugyanez sematikusan.

A kohóban az égéstérbe süllyed az elegyoszlop, amely a lefelé mozgást a süllyedő zónában végzi. A süllyedő zónát az inaktív zóna határolja, amelyben a kohósítás folyamán nem mozgó faszéndarabok vannak (ez alól csak fúvóka alatti medencerész kivétel, ahonnan a befolyó salak a faszenet részben kiszorítja). A tömör vasbuca az égési zónának az alján kezd el az el nem égő „faszénfilteren” felrakódni (ld. 2a ábra), növekedni, majd ahogyan jó esetben a sok híg folyós salak elkezd feltölteni a kohó medencéjét és onnan a salak kiszorítja a szilárd faszéndarabokat, a vasbuca lejjebb, mélyebbre tud süllyedni, felfelé pedig tovább tud növekedni (ld. 2b ábra). A vasbuca tehát bár felfelé növekszik, kissé lefelé is mozog.

A bucavaskohászatban fontos tehát a sok, híg salak, amely kedvez a nagy, tömör vasbuca kialakulásának. A salak az ércek redukálatlan vasoxidjaiból az ércek meddőtartalmából, a leolvadó agyagos mellfalazatból és a kohósítás során esetlegesen adagolt salakképzőkből jön létre. A salak annál hígabban folyik, minél nagyobb vastartalmú. Ez sajnos csökkenti a vaskihozatalt, de javítja a buca minőségét és növeli a méretét. Ha nem keletkezik elegendő híg salak, és a vasérc sokkal apróbb szemű, mint a faszén, akkor a vasbuca magas és „száraz” lesz (ld. 2a ábra), tömörítés közben összetörik. Ez tapasztalható a natúr petesmalmi vasérc kohósításakor, amikor a faszén szemcsemérete nagyobb, pl. 12-40mm-es vagy 25-40mm-es és a mellfalazat nem salakul el, ill. salakképzőt sem adunk be. A vasbuca fúvóka alatti tömör magja kicsi lesz, amire viszont egy laza, magas vaskorona épül fel, ami a tömörítéskor összetörik. A laza vaskorona egyrészt a buca tömör magjára rakódó, lesüllyedni (a bucának csak a fúvóka alá süllyedő része lesz tömör) és betömörödni nem tudó vasszivacsból áll (ld. 3b ábra), másrészt pedig az inaktív zóna fúvóka elé-fölé eső részén (ahol elegendően nagy a hőmérséklet és eléggé redukáló az atmoszféra) a faszénszemcsék között lepergő és összecementálódó redukálódott vasércből, laza vasszivacs darabkákból áll. Az apró vasércszemcsék ilyenkor nagy mennyiségben peregnek le egészen a kohó aljáig is, ahol por formájában a kohósítás végéig megmaradnak.



2. ábra: a) A kohóban kialakuló nagy tömör vasbuca ideális esetben, sok híg salak mellett (balra: a kohósítás elején, jobbra: a kohósítás végén) – granulációs technikával. b) A kohóban kialakuló laza, szivacsos, száraz vasbuca kevés salak és poros vasérc esetén – natúr petesmalmi vasércel és nagyszemű faszénnel.



3. ábra: a) Az aprószemű petesmalmi vasérc. b) Fémtisztára csiszolt problémás vasszivacs darabka a laza vaskoronából és az apró szemű petesmalmi gyevasérc.

A petesmalmi vasérc esetén a korábban említett három probléma egyszerre oldható meg az ún. granulációs technikával, ami azt jelenti, hogy az apró szemű vasércet oltottmészsel (és esetleg egy kevés agyaggal és vízzel) összekeverve formázható keveréket kapunk, amiből 20-30g-os granulákat lehet készíteni (ld. 4. ábra). A granulációs



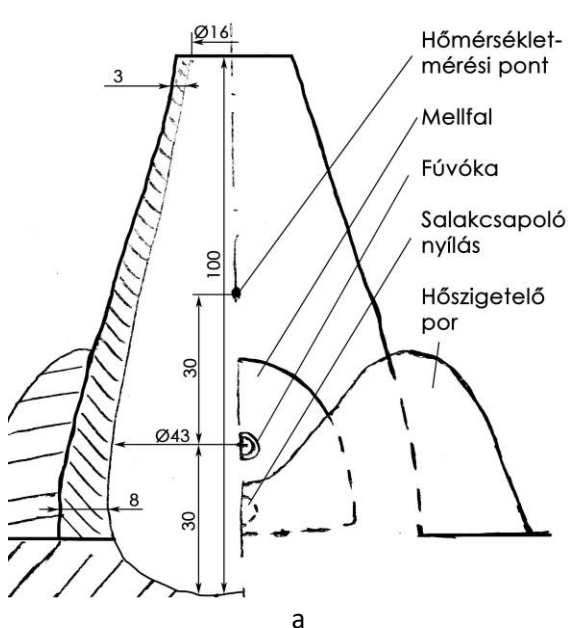
technika két hátránya, hogy egyrészt viszonylag időigényes, másrészt a kevésbé jól redukálódó nedves granulák esetén a sok salak keletkezése miatt romlik a vaskihozatal. A vaskihozatal a natúr petesmalmi vasérc szokásos, apró szemű faszénnel, kis mennyiségben történő kohósítása esetén kb. 30%-os, míg a granulációs technikával ennek csak kb. fele. A granulációs technikánál tehát sok, híg salak keletkezik, a granulák nem peregnek be a faszénzemcsék közé és a belőlük keletkező bázikus salak a vasbuca foszfortartalmát jelentősen csökkenti, így melegtörékenységre sosem jelentkezik.



4. ábra: Granulák 1 : 0,2 : 0,05 = érc : oltott mész : agyag arányok mellett

#### Próbakohósítás a Nemeskéri avar kohó másolatában

A nemeskéri kohó másolatát Gömri János iránymutatásával építettem meg és összesen négy kísérletet végeztem el benne. A kohóhoz 6mm-es szitán átszitált helyi agyagot használtam, amelyet hosszú szálú fúvel kevertem össze. Ebből a nagyon jól formázható agyagból megépítve a kohót nagyon kevés és csak vékony repedéseket tapasztaltam, amelyek utólag szépen javíthatók is voltak. A kohó falazata alul kb. 8cm, felül 3cm vastag volt, ez a masszív kohó az egyes kohósításokat követő esetleges javításokkal akár több tíz kohósítást is képes elviselni. A kohó magassága 100cm volt, a fúvósíkban 43cm-es átmérővel, a torokban pedig 16cm volt az átmérő. Ez a kohó kb. 70 liter belső térfogatú (a kísérletezgetésre szokásosan használt fajszi típusú viszont csak 35 literes). A kohó alján volt egy sekély, kb. 10cm mély salagködör, így a fúvóka a kohó aljához képest 30cm magasan volt. A fúvóka felett 30cm-es magasságban volt kialakítva a szokásos hőmérsékletmérési pont. A fúvóka belső átmérője 35mm volt (a szokásos 25mm helyett). A kohót hőszigetelés céljából a mellfalazat felső részéig porral vettem körbe, a kohóbontáskor ezt a port el kellett lapátolni a mellfalazat elől. A kohó vázlatos rajzát (félmetszet-félnézetben) a főbb méretekkel az 5a ábra mutatja, az 5b ábrán a kitisztított kohó, az 5c ábrán pedig az üzem közbeni kohó látható fotókon.



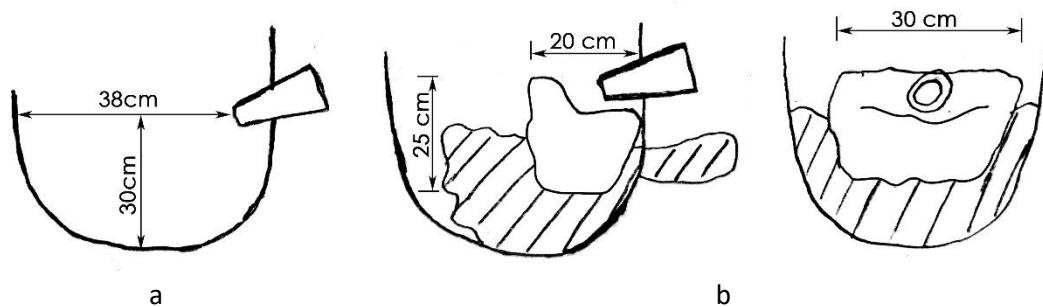
5. Ábra: a) A kohó vázlatos rajza a főbb részekkel és méretekkel. b) A kitisztított kohó, előtte salagködörrel. c) A kohó üzem közben centrifugál ventillátorral fújtatva és hőszigetelő porral körbevéve.



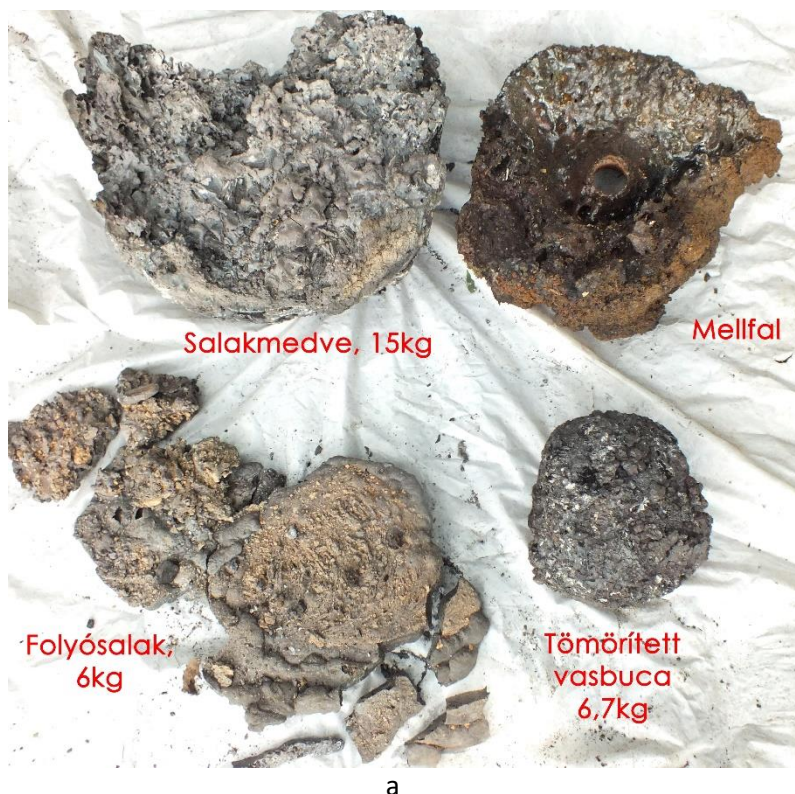
A kohósítás 90 perces fával majd 30 perces faszénnel történő előfűtéssel indult. A 330 perces adagolási szakaszban 40kg-nyi vasérből 1 : 0,2 : 0,05 = érc : oltott mész : agyag arányok mellett, kevés vízzel kb. 20g-os granulákat adagoltam be 300g-os adagokban (egy adag tehát 15db granulát tartalmazott), azaz összesen 50kg-nyi granulát kohósítottam így. A granulák és a faszén tömegaránya a szokásos módon 1:1 volt. A faszén 25-50mm-es szemcseméretű volt. A fűjtatást a szokásos centrifugál ventilátorral végeztem, 5-ös fokozaton, amely kb. 350 liter/perces levegő térfogatáramnak felel meg (nagyjából ugyanekkor térfogatáram érhető el a szokásosan használt egykamrás kézfűjtatóval intenzív fűjtatás mellett). A vasbuca csak 30kg-nyi vasérc (azaz 37,5kg granula) beadagolása után vált a fúvóka alatt tapinthatóvá, tehát a tömör buca mélyen volt. 40kg-nyi vasérc (azaz 50kg-nyi granula) után a buca már a fúvóka előtt is tapintható volt, azonban feltételezem, hogy további 10kg vasérc is gond nélkül befért volna még a kohóba. Az adagolási szakaszban a fúvóka fölött 30cm-rel átlagosan kb. 900°C-os hőmérséklet volt mérhető.

35 perces lefűjtatást követően a kohóbontást salakcsapolással kezdtem (a kohósítás alatt nem volt szükség salakcsapolásra). A salak hígan folyt és feltöltötte a kohó előtti salakcsapoló gödröt. Egészen a mellfal aljáig kitérítve a salakcsapoló nyílást, kifolyattam a salakot a kohóból, majd a mellfal kitörése után a még izzó faszénet kilapátolva láthatóvá vált a vasbuca, amely szélteében majdnem teljesen kitöltötte a kohót (a szélessége kb. 30cm volt), magassága 25cm, mélysége 20cm volt. A vasbucát kihúzva a kohóból a szokásos módon betömörítettem, darabok nem estek le róla, jól tömöríthető volt, egyben maradt és a tömege 6,7kg lett, ami bár az eddigi legnagyobb buca, a beadott 40kg-nyi vasércre számolva csak 17%-os vaskihozatalt jelent. A kicsapolt folyósalak 6kg volt. A kohó medencéjéből másnap vettem ki a lehűlt masszív salakmedvét, amelynek tömege 15kg volt és kitöltötte a medence majdnem teljes térfogatát, 5cm híján teljesen hátraért a kohó hátsó falzatához. A vasbuca kohóbontáskor megfigyelt alakját és a salakmedvét vázlatosan a 6 ábrán látható rajz mutatja.

A 8. ábrán láthatók a salakok, a vasbuca és a mellfal.



6. Ábra: a) A buca és a salak számára rendelkezésre álló hely a kohóban. b) A buca és a slaakmedve kohóbontáskor megfigyelhető alakja oldal és előlnézetben.



8. ábra: a) A kohósítás salakjai, vasbucája és mellfalazata. b) A tömörített, 6,7kg-os vasbuca.



A kohó környékét kitarakítva pár fotót készítettem a kicsapolt folyósalakról és a kohóban maradt salakmedvéről, ezek láthatók a 9. ábrán.



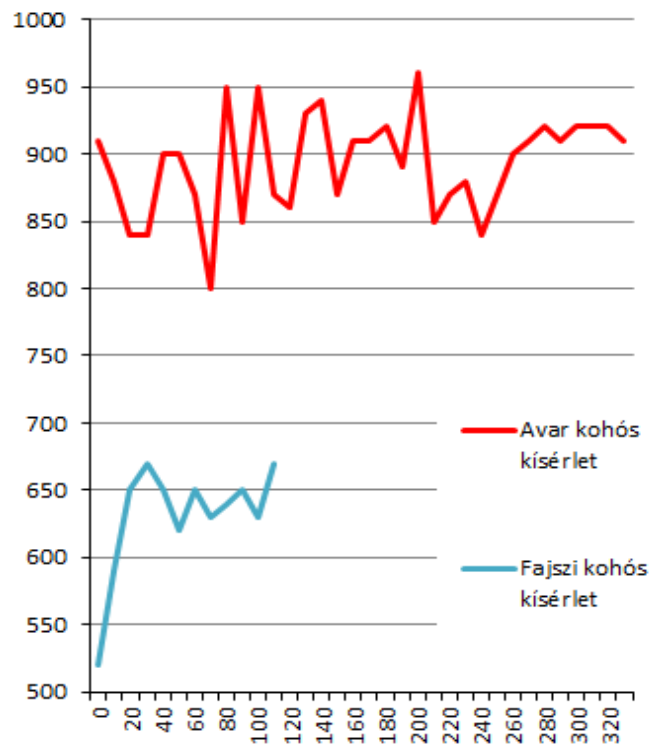
9. ábra: A kohósítás után a kohóban maradt salakmedve és a kohó elé kifolyt folyósalak.

### Az eredmények értékelése

A szabadon álló avar kohós kísérlet eredményeit érdemes összehasonlítani egy szokásos fajszi kohós kísérlet eredményeivel. Az avar kohó  $D=43\text{cm}$ ,  $d=16\text{cm}$ ,  $m=100\text{cm}$ -es méreteihez képest a kísérletekhez szokásosan használt fajszi kohó méretei  $D=28\text{cm}$ ,  $d=18\text{cm}$ ,  $m=95\text{cm}$  voltak (ezekből a méretekből mindössze fele térfogat adódik). Az 1. táblázatban összehasonlításképpen a fajszi kohóban elvégzett szokásos kohósítás adatait láthatjuk 9kg, 0-15mm-es szemcseméretű natúr petesalmi vasérc kohósítására, 150l/p-es levegőmennyiség és a vasérchez 1:1 arányban adagolt 6-25mm-es frakciójú faszén esetén.

1. Táblázat: Egy szokásos fajszi és az avar kohós kísérlet összehasonlító adatai

	Fajszi	Avar
Vasérc	9kg natúr pet. vasérc 0-15mm-es szemcseméret	40kg pet. (50kg granula, 20% omész, 5% agyag)
Faszén frakció	6-25mm	25-50mm
Betétek aránya	1:1	1:1
Levegő térfogatáram (liter/perc)	150l/p (vent. 1)	350l/p (vent. 5)
Előfűtés	60+30p	90+30p
Adagolás	145p	330p
Faszén égési sebessége	62g/p	152g/p
Lefűjtetés	90p	35p
Átlaghőmérséklet (30cm-rel a fúvóka felett)	631°C	893°C
Tömör buca	2,5kg	6,7kg
Összes vas		
Salakmedve	3kg	15kg
Folyósalak		
vas aránya a salak+ vas ösztömegeből	45%	24%
Vaskihozatal (vasércre)	27%	17%



10. ábra: Az avar kohós kísérlet és egy szokásos fajszi kohós kísérlet összehasonlító hőmérsékletdiagramja,  $T$  (°C) –  $t$  (perc) diagram

Figyeljük meg, hogyan változik az égéstér mérete a konkrét faszén szemcseméret-befújt levegőmennyiség párosításoknál. Ez jól jellemezhető a faszén égési sebességével, az adagolási szakaszban a beadagolt faszén mennyiségének és az adagolási szakasz időtartamának hányadosaként határozható meg. A fajszi kohós kísérlet égési sebessége 62g/perc, az avar kohósé viszont kb. 2,5x-szerese ennek, 152g/perc. Ennek oka, a betétek, és főképp a faszén nagyobb szemcsemérete, ill. a befújt levegő nagyobb mennyisége. Az égéstér méretével összefügg még a fúvóka felett 30cm-rel mérhető hőmérséklet is, amely 631°C vs. 893°C, azaz jól látható a kb. 250°C-os különbség, ami a hőmérsékletdiagrammon is megjelenik.

Érdekes még elemezni a vaskihozatal kérdését. A mostani granulációs kísérletben a vaskihozatal értéke vasércre számolva 17%, granulára számolva pedig csak 13%. Ehhez képest, amikor natúrban kohósítottam a finomszemű petesalmi vasércet a fajszi kohóban 27%-os vaskihozatal volt elérhető. Figyeljük meg még, hogy a granulációs technikánál keletkezett salak mennyisége háromszorosa a vasénak, míg a referencia kohósításnál mindössze ugyanakkora.

A granulációs technikánál kialakuló nagy mennyiségű salak tehát részben a redukálatlan vasoxidokból, részben pedig a mintegy plusz 30%-nyi meddőből (oltottmészéből és agyagból) származik. A redukálatlan vasoxidok viszont növelik a salak FeO tartalmát, amelytől a salak nagyon jól kezelhető, kedvezően folyékonyvá válik. A régészeti salakok is általában nagy vastartalmúak, jól átolvadtak és tömörek, így az ilyen salak nemcsak technológiai szempontból jó, de korhűnek is mondható, a nagy vasvesztés ellenére.

### **További perspektívák és következtetések**

Ideális, durva szemcseméretű faszén és vasérc felhasználása esetén (a petesalmi vasércnél granulációs technikával és 25-50mm-es frakciójú faszénnel) a Nemeskéri kohó másolatában könnyedén elérhető volt egy 6,7kg-os tömörített buca előállítás. Valószínűleg pusztán több vasérc beadagolásával a kísérlet hosszabbra nyújtásával előállítható lenne egy max. 8-9kg-os vasbuca, de a 10kg-os méret sem elképzelhetetlen. Ez azonban még mindig nem elegendően nagy buca, ennek tömörítésével, többszöri újraizzításával és ékelésével jelentős tömegvesztés következik be: egy 10kg-os egyszer tömörített bucából (a kisebb bucákon végzett tömörítési tapasztalataim szerint) kb. 6-7kg-os teljesen betömörített buca jönne létre, azaz a buca elvesztené a tömege kb. harmadát. Ezt figyelembe véve a késő avar kori kb. 10kg-os ékelt bucák egyszer tömörített állapotban kb. 15kg-osak kellett volna, hogy legyenek, ekkorát bucát viszont a Nemeskéri kohó másolatában nem lehetne elkészíteni.

A még nagyobb méretű vasbuca előállítása érdekében a jól sikerült kísérlet tapasztalataiból kiindulva:

- egyrészt célszerű lenne a granulációs technika esetében is a vaskihozatalt növelni.
  - A granulák oldaláról ennek érdekében egyrészt a granulák redukálhatóságát kellene javítani, pl. úgy, hogy az előkészített vizes granulákat meg lehetne szárítani, esetleg pörkölni, másrészt pedig a granulák elkészítéséhez csak oltottmészet kellene használni, agyagot nem, mert az a nagy SiO<sub>2</sub> tartalmánál fogva fayalitos salakot képezve csökkenti a vaskihozatalt.
  - A kohó oldaláról pedig a redukció számára jobb feltételeket biztosítandó érdemes lenne a kohó magasságát kis mértékben növelni, de sokkal inkább a kohó kúpszögét csökkenteni, azaz nagyobb torokátmérő mellett hengerebb kohót építeni, amelyben lelassul az elegyoszlop süllyedése, így több idő marad a redukcióra.
- másrészt lehetne a kohó fúvósíkbeli átmérőjét tovább növelni, felmenni akár D=50cm-re is (amellyel a kohó belső térfogata, jóval 100liter fölé nőne), ha ez régészeti indokolható.
- egy nagyobb belső átmérőjű kohó esetén az égési zóna méretét is tovább lehetne növelni a befújt levegő mennyiségével, pl. a kísérletekben két ventilátort használni, ami megfelelne egy fúvókához párban csatlakoztatott egykamrás fújtatókkal való intenzív fújtásnak.

A mostani kísérletben 40kg-nyi vasércből közel 7kg-os buca lett, ami 17%-os vaskihozatalt jelent. Ha az elmondottak szerint kissé javítanánk a granulák redukálhatóságát, és elérnénk kb. 25%-os vaskihozatalt, akkor egy 15kg-os egyszer tömörített bucához 60kg-nyi vasérc (granulációs technika esetén kb. 75kg-nyi száraz granulára) és kb. 90kg faszénre volna szükség.

Itt fontos még azt megjegyezni, hogy ha ismernénk olyan gypvasérc lelőhelyet, ahonnan nagy mennyiségben, könnyedén fejthető jó minőségű vasérc, akkor azt pörkölés, aprítás és a poros frakció (kb. 6mm alatti szemcseméret) leszítálása után a granulációs technika mellőzésével jól lehetne kohósítani. Somogyban csak a Libickozma közelében lévő Aranyosi-árokban és Somogyszobon a Kócsmóna-patakban tudok olyan biogén gypvasérc lencséről, amikben esetleg alkalmasak lennének erre, azonban mindkét hely nehezen megközelíthető, innen nem gyűjthető könnyen gypvasérc.

Végezetül pedig érdemes még rávilágítani arra, hogy a nagy méretű avar kohók, amelyek belső térfogata kb. 2x-e volt a későbbi honfoglalás kori és Árpád-kori kohókénak, jóval nagyobb méretű vasbucák előállítását tették lehetővé. A kísérleti tapasztalatok alapján pl. a fajszi típusú kohóban, amelynek fúvósíkbeli átmérője kb. 30cm legfeljebb 4-kg-os tömörített vasbutát tudunk előállítani. Ezzel szemben a 43cm-es fúvósíkbeli átmérőjű Nemeskéri avar kohóban közel

7kg-os vasbuca keletkezett, ami viszont lehetett volna még pár kg-mal nehezebb is. Az avar kori kohók méreteit figyelembe véve nagyjából 2x, 3x nagyobb méretű vasbucák előállítását feltételezhető, mint a későbbi magyar kohókban.

Összeségében tehát elmondható, hogy a bemutatott kísérlet jól sikerült, és a kísérlet alapján feltételezhető, hogy a nagyméretű ékelt avar bucák a Nemeskérinél egy kicsit nagyobb kohóban akár egyetlen kohósításból is előállíthatók lehettek. De az is elképzelhető, hogy több kicsi bucából hegesztették őket össze, és persze a két technika kombinációja is lehetséges.