

Szabó Péter*

A GÍZAI NAGY PIRAMIS – AZ ÉPÍTÉS REKONSTRUKCIÓS KÍSÉRLETE

THE GREAT PYRAMID OF GIZA – EXPERIMENTAL RECONSTRUCTION OF THE BUILDING PROCESS

KIVONAT / HUN

A tanulmány az építészeti és régészeti adatok alapján a gízai nagy piramis építési technikájának tudományos alaposságú rekonstrukciójával foglalkozik. Fókuszál a konstrukciós anyagok geológiai eredetére, a munkaerő logisztikai szervezésére, valamint az alkalmazott építési eszközökre és módszerekre. Kiemeli a piramis szerkezeti elemeinek statikai analízisét, és tárgyalja az építési folyamatot meghatározó lehetséges technológiai innovációkat. Az elemzés során az ókori építkezési gyakorlatok mélyreható megértésére törekszik, kiemelve az építészeti teljesítmény és az ókori mérnöki tudás összetettségét.

Kulcsszavak:

Egyiptom, piramis, Kheopsz, ókor

ABSTRACT / ENG

The study focuses on the scientifically rigorous reconstruction of the construction techniques of the Great Pyramid of Giza based on architectural and archaeological data. It examines the geological origins of the construction materials, the logistical organization of the workforce, and the tools and methods used in the building process. The research highlights the structural analysis of the pyramid's elements and discusses possible technological innovations that may have influenced the construction process. Through this analysis, the study aims to achieve a deep understanding of ancient construction practices, emphasizing the complexity of architectural achievements and ancient engineering knowledge.

Keywords:

Egypt, pyramid, Cheops, antiquity

ektorált tartalom

* okl. építésmérnök, PhD, egyetemi docens, Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Kreatívipari Intézet,
e-mail: szabo.peter@uni-sopron.hu

1. | ADATOK

Az ókor hét csodájából napjainkra egyedül a gízai nagy piramis maradt fenn, amit a IV. dinasztia fáraója, Kheopsz (Khufu, Hufu) építtetett az i.e. 26. században. A piramis 146 méteres magasságával évezredekig a világ legmagasabb épülete volt. Az építés körülményeiről még napjainkra sincs egységes konszenzus, pedig a legutóbbi régészeti eredmények jelentősen szélesítették az ismereteinket [1].

Az építési helyszín eredeti formájára csak a mai felmérések alapján következtethetünk, azonban a környék feltárásai és a korabeli írott források alapján ez a kép tovább árnyalható. A piramis jó minőségű burkoló köveit az elmúlt évszázadok során beépítették a város épületeibe, ezért a síremlék pontos méretei, igaz nagyon jó közelítéssel, de csak becsülhetők.

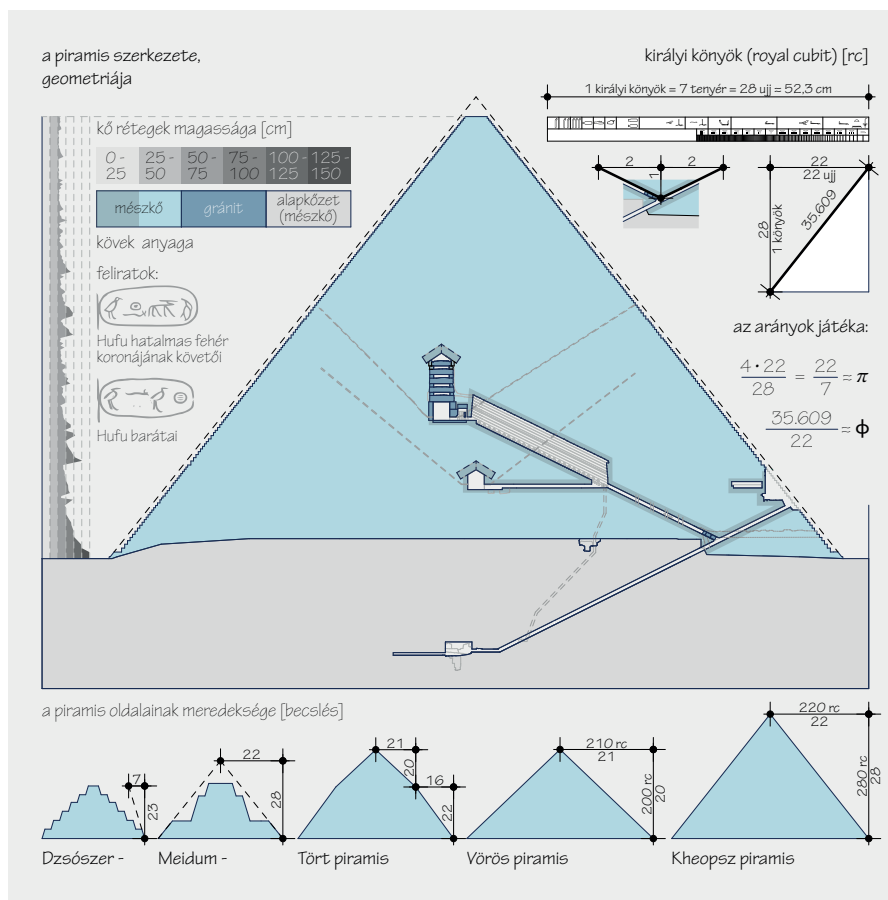
1.1. AZ EGYIPTOMI HOSSZMÉRTÉK

Ebben az időben hosszsmértékként Egyiptomban a könyököt használták. A piramis építésekor nem a hagyományos könyököt (ami 6 tenyér hosszúságú), hanem a királyi könyököt alkalmazták a 7 tenyérnyi méretével. Egy *királyi könyök* hozzávetőlegesen 52,3 cm hosszúságú [2]. További felosztásként a tenyeret 4 ujj egységre bontották, így egy királyi könyök 7 tenyér, vagyis 28 ujj (1. ábra).

A dőlésszögeket, lejtéseket egy, az egyik befogójára állított derékszögű háromszög segítségével határozták meg. A függőleges befogót egy királyi könyök hosszúságúnak vették, a vízszintes befogót pedig újbán mérték fel. Ez a vízszintes hosszsmérték a *seked* [3], a dőlésszög egyiptomi mértéke.

1.2. A PIRAMIS MÉRETEI

A piramis szabályos négyzög alapú gúla, az alap hossza 440 királyi könyök, a magassága pedig 280. Az oldalainak a dőlésszöge 22 seked. Mai mértékegységekben meghatározva [4] az alap hossza 230, a magassága pedig 146 méteres, az oldalainak dőlésszöge 51°50'. A belső járatok dőlésszöge nagyon közel van az 1/2 seked, értékhez, vagyis 26°33'-hez. A fő síkokat pontos



1. ÁBRA: A piramis szerkezete, geometriája

san a négy égtáj felé tájolták, egy északi irányba helyezett „bejárat” [5].

1.3. SZERKEZETI ELEMEK

A gízai fennsík mészkőből áll, innen bányászták az építőkövek legnagyobb részét. A piramist burkoló kövek és a mögöttük található 2-4 sornyi pontosan faragott „támasztó” kő a turai bányából származik [6]. A királyi sírkamra gránit elemeit pedig Asszuánból szállították ide. Az építéshez nagy mennyiségű gipszhabarcsot használtak fel. A piramis 210 különböző magasságú kő-sorból (szintből) áll (1. ábra). Az egyes szintek magassága 1,50 és 0,5 méter között változik [7]. Felfelé haladva egyre kisebb köveket használtak az építéshez. A felhasznált kövek mérete 500 és 80 000 kg között változik. Egy átlagos, egy köbméteres építőelem, 2 500 kg-ot nyom [8].

A fehér turai mészkő burkolat simára csiszolt felülete adta a piramis végső

megjelenését. Hasonlóan gondos megmunkálást kaptak a kamrák és folyosók szerkezeti is [9]. A tehermentesítő gerendák és a burkoló kövek mögötti támaszkövek illesztése és megmunkálása is nagyon pontos. A szerkezet többi, helyben bányászott, rossz minőségű „kitöltő” mészkőre azonban elnagyolt tömb, amik nincsenek síkra munkálva. A pontatlan illesztéseket gipsz habarccsal töltötték ki. Az építőkövek száma nagyságrendileg 2,5 millió.

1.4. ELHELYEZKEDÉS

A piramis helyeként a gízai mészkő fennsík egy 50 méter magasra emelkedő pontját határozta meg Kheopsz fáraó és építész, Hemiunu herceg. A helyszíntől pár száz méterre délre található a helyi mészkőbánya, a kikötő és a munkások városa is [10]. Keleti irányban volt a Nílus egyik mellékága (csatornája) duzzasztógátakkal és öblökkel (She Khufu). Ebből az irányból történt a

végleges piramis komplexum megközelítése is **(2. ábra)**. Az ábrán szereplő „munkások városa” a mai régészeti feltárások alapján készült, több időszak egymásra épüléséből [11]. A kikötő és a munkások városa között áll az úgynevezett Varjú fal (Heit el-Ghurab), amiről az ősi település is kapta a nevét. A fal 200 méter hosszú, 12 méter széles és 10 méter magas. A fal nyugati végében, egy hatalmas vízszintes áthidaló fedte kapu található. A bánya és a kikötő elhelyezkedése alapján a piramis induló rámpáját a délnyugati sarokban volt célszerű elhelyezni [12]. Így az építés teljes ideje alatt, a szatellit piramisok, a halotti templom és a felvonulási útvonal párhuzamos építésével is zavartalanul végezhető volt a munka.

1.5. A MUNKÁSOK

A település feltárásával a leletek betekintést adnak az ott élők mindennapjaiba és életkörülményeikbe. A munkaszervezésről és a csapatok méretéről, a pár éve megtalált, a piramis építésére datált, *vörös-tengeri tekercsek* [13] adnak leírást. A táblázatos formában fennmaradt papirusz Merer felügyelő 40 fős csapatának a tevékenységét, élelmézését követi nyomon közel egy éven keresztül. A csapat Tura és Gíza között szállított köveket az építkezésre, de részt vett a piramis melletti gátak megnyitásában és az élelmiszerellátásban is. A piramisban is megmaradt néhány munkáscsapatnak a felirata. Ezek a nevek közvetlenül „Hufu”-ra vagy a fáraó Hórusz nevére utalnak, egyértelműen a fáraóhoz kötve az építkezést **(1. ábra)**.

A 40 fős (külön névvel bíró) csapatok a kisebb munkákat 10 fős „brigádokban” végezték, és 4 db 40 fős csapat alkotott egy nagyobb egységet külön felügyelők alá szervezve. Ez a munkaszervezés a létszámok tekintetében megfelel a mai katonai raj-szakasz-század kialakításnak. Bár országonként és fegyvermenként vannak eltérések a 10-40-160 főből álló felépítés már több, mint négyezer éve jól vizsgálzik.

1.6. ARZÉNBRONZ

A vésést réz vésővel és fa kalapáccsal végezték. A csiszolást bazalt vagy kovakő darabokkal készítették el [14]. A

réz keményebb, mint a mészkő, azonban egy-egy réz szerszám nagyon hamar elkopik. Az egyiptomi réz szerszámok azonban arzén tartalmúak. Az arzén gyakran megtalálható a rézércben, azonban az ókorban (az ón használatától előtte) a réz ötvöztetésére használták, arzénbronzot létrehozva.

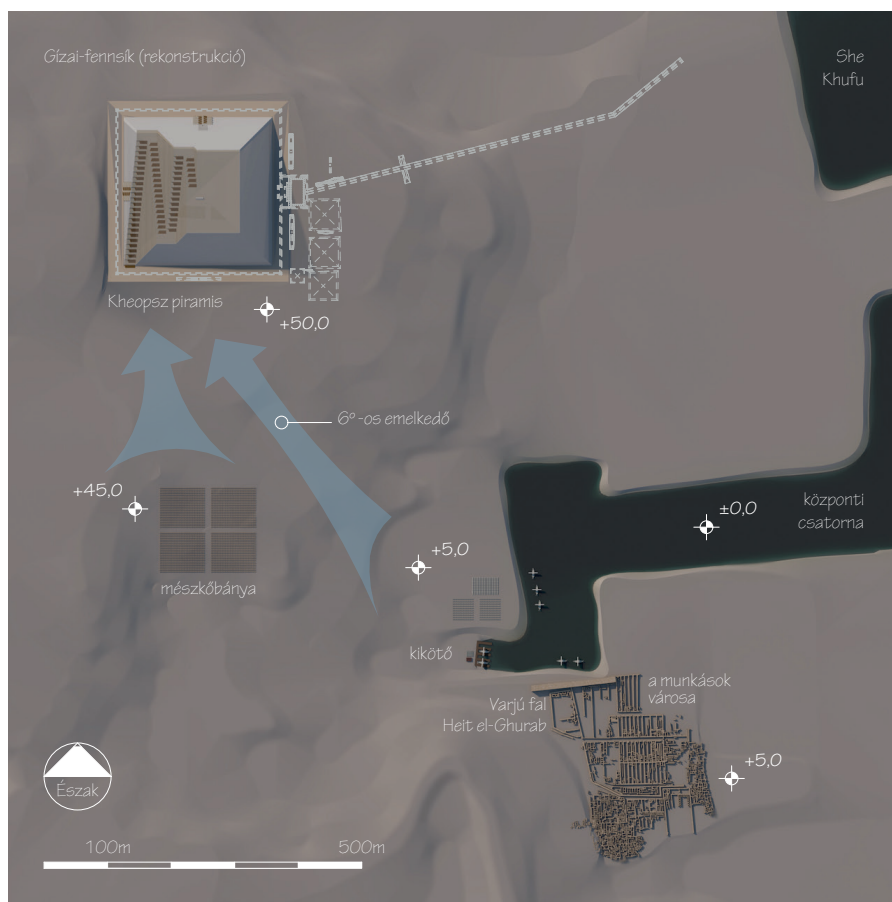
Összehasonlításként a 8%-os arzéntartalmú bronz, valamint a 8%-os óntartalmú bronz, a kovácsolás során azonos mértékű keményedést mutatott és elérte ugyanazt a végső keménységi szintet [15]. A Vickers keménység alapján az arzénbronz 50-250 HV keménységet ér el, az ónbronz pedig 150-300 HV értéket. Az arzénbronz hidegen is jól kovácsolható, míg az ónbronz 12%-os óntartalom felett törékennyé válik. Az arzénbronz vésők a gyakorlatban ugyanazt a keménységet produkálják, mint az ónbronz (bronz) vésők a későbbi korszakokban, könnyebb megmunkálhatóság mellett.

Az arzén és a gőzei is nagyon mérgezőek. A kovácsokra igen komoly ve-

szélyt jelentett, idegkárosodást, végtagbénulásokat és halált okozva. Talán ezekre az ősi időkre vezethető vissza Héphaisztosz sántaságának a mítikus eredete is. Az ón használatára történő áttérésnek inkább egészségügyi okai voltak és nem technikai. A korai vasfegyvereknél is jobbak voltak a bronz fegyverek, de az ón lelőhelyek elvesztése kikényszerítette a vas használatát és a kovácsolás, edzés fejlődését. A lágycél Vickers keménysége 130-180 HV. A legjobb szerszámacélok keménysége elérheti a 800 HV értéket is.

2. I A REKONSTRUKCIÓ PARAMÉTEREI

Az építés rekonstruálásához és modellezéséhez egyszerűsítésekre volt szükség. A modellek és ábrák az ArchiDAD 27 és iClone 8.4 programokkal készültek a következőkben ismertetett elvek szerint.



2. ÁBRA: Gízai-fennsík (elvi rekonstrukció)

2.1. KIINDULÓ ADATOK

A modell kiinduló paramétereit:

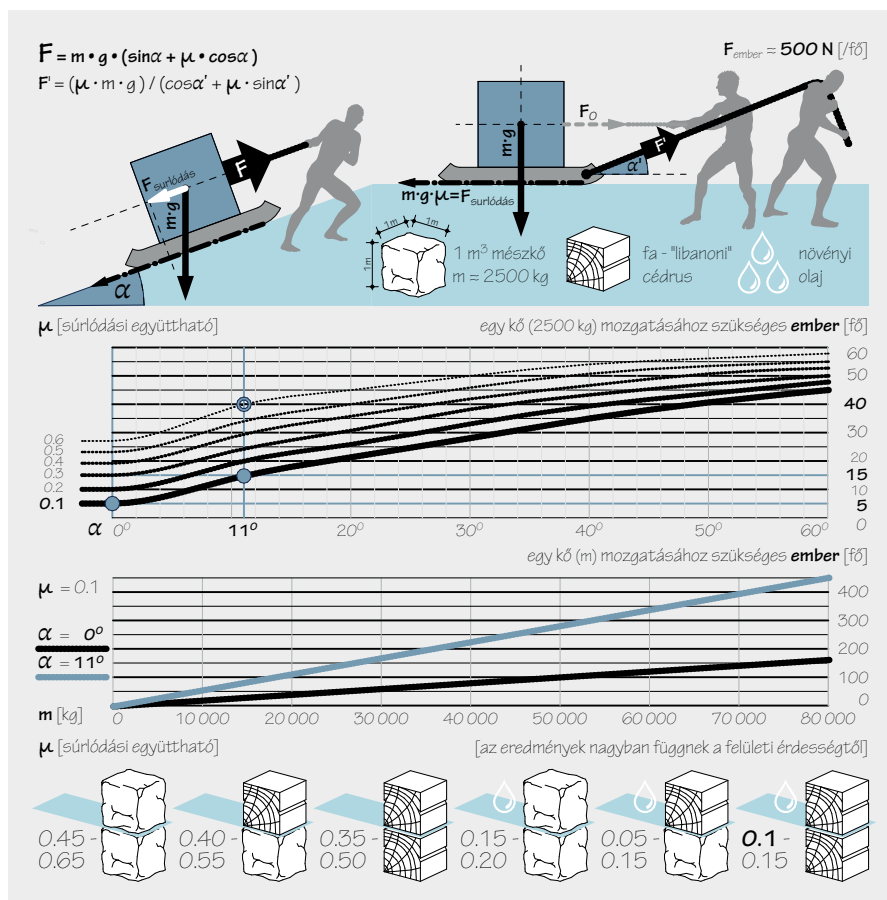
- A piramis építőkövei egy köbméteresek és 2 500 kg tömegűek, ezért a modellben a piramis 146 szintből épül fel.
- Egy ember átlagosan 50 kg-ot tud felemelni (húzni), 500 N erő kifejtésével számolva.
- A rámpák 20%-os (11°) emelkedéssel épülnek.
- A rámpák kőtörmelékkel és gipszhabarccsal készülnek, amikre fagerendákat helyeznek.
- A rámpák egy-egy szintet hidalnak át, 5 méter hosszúak és 1 méter magasak.
- A kövek mozgatása fa szánokon történik, hosszirányú fagerendákon (sín) mozgatva.
- Az építési brigádok 40 főből állnak.

2.2. AZ ARÁNYOK JÁTÉKA

Nincs adatunk arról, hogy 4500 évvel ezelőtt az egyiptomiak ismerték a n vagy az aránymetszés értékét. A legkorábbi emlék a n használatára egy későbbi matematika tekercsben (Rhind, i.e.1650) fordul elő, ahol ez az érték 256/81-nek [3,1604] adódik. A n értékére a legpontosabb közelítést az ókorban a szirakuszi Arkhimédész (i.e. 287–212) adta 22/7 [3,1428] értékben.

A korábbi piramisok nagyon pontos dőlésszögét azok romos állapota, valamint a burkoló kövek hiánya miatt nagyon nehéz meghatározni. Tudjuk, hogy a szögeket a királyi könyvek alapján határozták meg sekedben. A legelfogadottabb arányokat átírva sekedbe 16, 21, 22, 29 értékeket kapunk. A korábban épült négy piramis közül egyedül a Meidum piramisnak egyezik meg a dőlésszöge a Kheopszéval. Mindkettőnek 22 sekert vagyis 22/28 az oldalaránya.

Kétszer véve a piramis alapját elosztva a magassággal ($4 \times 22/28 = 22/7$), ami a n értékének Arkhimédészi közelítését adja. Az oldal lap háromszögének magassága elosztva az alap hosszának a felével ($35,609/22$) jó közelítéssel az aránymetszés arányát teszi ki (1. ábra). Ez azonban a véletlen és az arányok játéka és nem az ókori mérnökök szándéka volt.



3. ÁBRA: Pinceépítés bányász technológiával [2]

2.3. A RÁMPA NYOMÓSZILÁRDSÁGA

A rámpa teherbírásának az ellenőrzésére 3,2 cm oldalhosszúságú (gipszhabarccsal) próbatesteket készítettem. A próbatestek gipsz – homok tömegszázalékos arányát 1:9-től 9:1 arányig változtattam. A kísérletet kétféle szemcseméretű homokkal, szabványos törőgépen végeztem.

Már két egységnyi gipsz használatával is 4,4 N/mm² nyomószilárdság érték adódott. A gipsztartalom növelésével maximálisan 10,43 N/mm² érték volt elérhető. Már a legkisebb nyomószilárdsági érték is képes megtartani a gerendák rámpára nehezedő terhét. Mivel ilyen kisléptékű mintadarabok szilárdsági tesztje is igazolta azok teherbírását, nem volt szükség további tesztek végzésére [16].

A valódi piramisban az egy szintet áthidaló rámpák magassága átlagban 50-80 cm [17], vagyis a fa gerendák pár alátámasztó kővel vagy akár alá-

támasztás nélkül is működhetnek. A rámpák kialakítására inkább a szánok biztonságos pályán tartása érdekében, a lebillenés megakadályozása miatt volt szükséges.

2.4. A SÚRLÓDÁSI EGYÜTTHATÓK

A súrlódási együtthatókat kísérleti úton határoztam meg (3. ábra). A kísérlet során kétfajta faanyagot, duglászfenyőt és libanoni cédrust, a kövek vizsgálatához mészkövet és szürke gránitot használtam. Minden próbatest fűrészelt és csiszolt felülettel is rendelkezett. Minden variációt megvizsgáltam, száraz, nedvesített és olajozott körülmények között. A próbatestek négyzet alapja 10 cm élhosszúságú volt, a súlya pedig 10 N.

A tapadási súrlódás vizsgálatát döntő lejtőn végeztem el, a csúszási súrlódás meghatározását három különböző módszerrel is vizsgáltam. Vízszintes

1. TÁBLÁZAT: A kövek megmunkálásához szükséges munkások becsült létszáma

munkanem	becslés egy kőre	óra/ember	kő [db]	munkások
mésző bányászása Gízában	12 ember 2 óra	24	2 500 000	1250
mésző bányászása Turában	12 ember 2 óra	24	330 000	165
burkolókő ferde megmunkálása	2 ember 3 óra	24	80 000	10
támasztó kő megmunkálása	2 ember 18 óra	36	250 000	188
burkolókő ferde csiszolása	2 ember 3 óra	6	80 000	10
támasztó kő csiszolása	2 ember 18 óra	36	250 000	188

felületen, állandó sebesség mellett húzva rugós erőmérővel. Lejtőn lecsúsztatva, a próbatestre szerelt gyorsulásmérővel és lejtőn gyorsulva az út és idő meghatározásával [18].

Ahogy az várható volt, a súrlódási együtthatót a felületek minősége határozta meg leginkább. Érdekes eredmény volt, hogy a nedvesített felületek csak a „ritkán” létrejött vízfilm kialakulásakor mutattak könnyű csúszást, gyakoribb volt a felületek letapadása. Csak állandó és nagyon intenzív vizezés hozott jó eredményt, ami a piramis építésénél gyakorlatban nem volt megvalósítható. Növényi olaj használatával azonban már nagyon kevés „kenőanyag” is alacsony [0,1] együtthatót produkált. A fa az olaj egy részét magába szívta, így a csúszási paraméterek hosszan megmaradtak, újra olajozás nélkül is. Az olaj a csiszolt kövek között is hatékony kenőanyagnak bizonyult.

A kövek közötti tapadási együttható 0,5 körülnek adódott, ami a piramis

belső járatainak a dőlésszögével egyezik meg (1. ábra). A zárókövek a felületek minősége alapján a járatokban a lecsúszás közeli állapotban vannak, azok megtámasztása azonban nem igényel komoly tartószerkezetet. Azokat megdőlve, vagy fagerendára tolva, esetleg beolajozva könnyen lecsúszthatatók.

2.5. A KÖVEK MOZGATÁSA

A szánokra helyezett köveket hosszanti fa gerendákon mozgatják a munkások [19]. Olajozás nélkül egy követ vízszintesen 10, rámpán pedig 19 ember tud elhúzni. Ugyanez olajozott fagerendákon 5, illetve 15 embert jelent (3. ábra). Fa feszítő rudat használva (egyszerű emelő), 0,2 és 1,8 méteres erőkarral számolva, a kövek vízszintes eltolásához, olajozott felületeken elegendő egyetlen ember. Hasonló feltételekkel a rámpán két ember már elegendő a mozgatáshoz (4. ábra). A rámpán a

2. TÁBLÁZAT: A kövek megmunkálásához szükséges munkások becsült létszáma

munkanem	v [m/s]	súrlódás, μ [-]	ember/kő	hossz [m]	munkások
vízszintes mozgatása (szárazon)	0,2	0,3	15	640 743 605	279
vízszintes mozgatása (olajjal)	0,2	0,1	5	640 743 605	93
mozgatása rámpán (szárazon)	0,1	0,3	24	469 066 300	652
mozgatása rámpán (olajjal)	0,1	0,1	15	469 066 300	408
eltolás feszítőrúddal (szárazon)	0,01	0,3	2	144 566 856	168
eltolás feszítőrúddal (olajjal)	0,01	0,1	1	144 566 856	84
Gíza, szállítás (szárazon)	0,2	0,3	15	1 415 000 000	615
Gíza, szállítás (olajjal)	0,2	0,1	5	1 415 000 000	205
Tura, szállítás (szárazon)	0,2	0,3	15	165 000 000	72
Tura, szállítás (olajjal)	0,2	0,1	5	165 000 000	24
hajón szállítás, Níluson	1 hónap alatt 200 követ 40 ember szállít				275

feszítő rudakkal a visszacsúszás megakadályozható. Kör keresztmetszetű, 5 cm átmérőjű rúd a fellépő nyomások hatására nem törik el. Az eredmények a megadott képletek, valamint az elemi szilárdági számítások alapján lettek meghatározva.

2.6. A MUNKÁSOK LÉTSZÁMA

A munkások számának becsléséhez, több, a gyakorlatban elvégzett méretarányos kísérlet (pl.: NOVA) alapján van mód [20]. Húsz éven keresztül az év 300 napján, 8 órás munkaidővel számolva a piramis 48 000 órán keresztül épült. A piramis belső köveinek a száma 2 500 000, a burkolat mögötti támasztó köréteg 250 000 db, a burkolat pedig 80 000 követ számlál.

Az egyes munkafolyamatok becsült adatai alapján a teljes 20 éves időtartamot figyelembe véve a piramis melletti kőbányában egyszerre 1250 ember dolgozik, míg Turában 165. A támasztó kövek méretre vágását és csiszolását 375 ember végzi, a burkolatok megmunkálásához pedig 20 ember munkájára van szükség, igaz 48 000 órán keresztül (1. táblázat).

A kövek mozgatásához szükséges távolságokat a felépített CAD modell alapján számítottam, figyelembe véve minden egyes kőnek a piramison belül elfoglalt pozícióját. A kövek összesített vízszintes mozgatási távolsága a piramis közeléből és a piramis szintjein belül 640 743 605 méter. A teljes kőmennyiséget figyelembe véve a rámpán történő mozgatáshoz 469 066 300 méter utat kell megtenni. A gízai kőbányából a piramis lábához megtett út, összesítve a kövekre 1 415 000 000 méter. A turai kőbányában megtett út becslése 165 000 000 méter. A Níluson történt szállításra a vörös-tengeri tekercsek alapján adtam becslést.

A piramison a kövek mozgatását és elhelyezését, a számítások alapján egyszerre 584 ember végzi. A kövek hajón történő szállításához az adatok alapján 275 ember elegendő (2. táblázat).

A létszámok és mozgatási sebességek becslésen alapulnak, azonban a munkások nagyságrendjének meghatározásához jó alapul szolgál. Természetesen a 20 éves munkavégzés alatt a létszámok és a munkafolyamatok mennyisége változott. Nem számoltam



4. ÁBRA: Egy 2500 kg-os kő oldalirányú eltolása feszítő rúddal

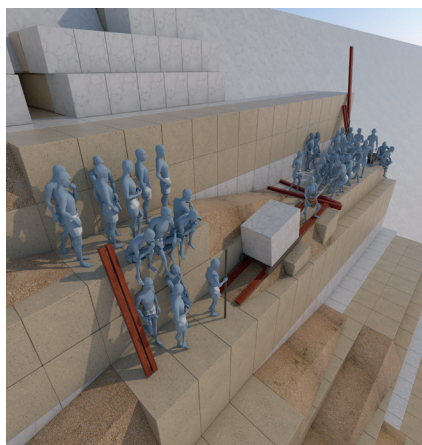
a szánok „üres” mozgatásával és a ki-segítő munkásokkal, családtagokkal, ahogy a kevés, de nagyon nehéz gránit gerendák mozgatásával sem.

Ismerjük, hogy a piramis építésének minden égtájhoz tartozóan volt egy-egy felügyelője. Feltételezve, hogy mindegyikük 160 (4×40) embert felügyelt, akkor a piramison egyszerre 640 ember dolgozhatott. Ennyi munkás pedig a becslés alapján elegendő az építéshez és egymás zavarása nélkül el is fér a területen. A Gízai fennsíkon a bányászok, kőművesek, szállítók és az ellátást segítő személyzet száma 2500-3000 főre tehető. A szomszédos munkás város létszámát 5000 főre lehet becsülni. Turában a becsült létszámok alapján két „század” dolgozhatott egyszerre. Így az ottani becsült teljes létszám 500 fő körül mozoghatott.

3. | MÉRNÖKI TERVEZÉS

3.1. RÁMPÁK, SZÁNOK ÉS SÍNEK

Egyiptomban nagyon kevés a faanyag, a jó minőségű építőanyagot (libanoni cédrus) külföldről hozták be, ezért a rámpák kő törmelékéből és gipszhabarcsból állnak. Mivel kevés a faanyag, ezért telepített sín rendszerek lerakására nincsen mód. A piramis belsejében szabálytalan alakú kötömbök [4] találhatóak, ezért azokon a gerendák használata nélkül nem lehet a szánokat mozgatni.



5. ÁBRA: A keskeny rámpán történő mozgatus, kétirányú közlekedés 40 ember esetében.

Egy csapat (40 ember) felszerelése: 2 db szán, 8 db 6 méter hosszúságú gerenda, 8 db 3 méteres gerenda, 4 db 2 méteres feszítő rúd, kötelek és olajos kancsók. 4×4 ilyen munkáscsapat fel tudja építeni a piramist az odaszállított kövekből.

3.2. A RÁMPÁK MÉRETE, ELHELYEZÉSE

Egy egyenes külső rámpa nagyon sok szempontból előnytelen. A rámpa nagyon sok anyagot igényel, minden új szint elérésekor a rámpát is növelni szükséges és szinte lehetetlen a rámpán való mozgást szakaszolni. A körbe futó rámpát nehéz a piramis szerkezetére támasztani és a sarkokon is kényelmetlen a nagyobb kövekkel manőverezni. Egy spirális belső rámpa [21] állékonysági és szállítási problémákat vet fel.

Mivel egy szint magassága csupán egy méter (a modellen), ezért az egyik szintről a másikra egy 5 méter hosszú rámpán (20%) a köveket két, a rámpára ideiglenesen elhelyezett gerendán fel lehet húzni. A rámpák kialakítására a piramis területén belül is mód van, így az egyik oldal ideiglenesen „nyitott” marad. A rámpákat váltott irányban, „Z” formában egymás mellé lehet helyezni. Az egyik rámpáról a másikra nem kell befordulni, hanem merőlegesen át lehet tolni a köveket rövid fagerendákon. (A szánok kereszt irányban is mozgathatók, a súrlódás nem függ az érintkező felületek nagyságától.) A kisebb kövek átmozgathatóak pusztán emberi



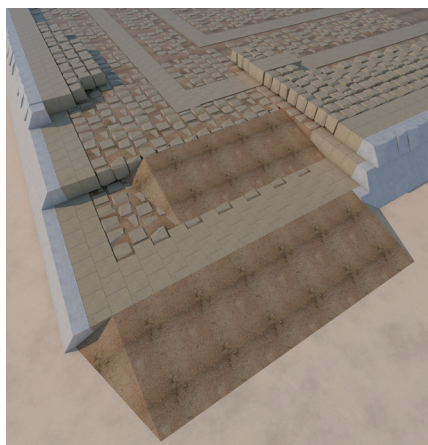
6. ÁBRA: A turai, fehér mészkő burkolat formázása és csiszolása

erővel is. Keskenyebb rámpákon, vagy nagyobb kövek mozgásakor, azok a lerakott gerendákon, feszítő rudak segítségével tolatók el (**4. ábra**). A keskenyebb, a piramis oldalán futó rámparendszer kőrámpákból vagy részben kövekkel merevített szerkezettel képzelhető el. Ezeknél a keskeny rámpáknál faszervezetek, vagy telepített fa sínek használata is feltételezhető. A legkeskenyebb rámpák használatakor is van elég hely a pihenőkön a kétirányú közlekedésre (**5. ábra**). A modellen a fehér kövek a burkolat csiszolt vagy még le nem munkált elemei. A kívülről rájuk támaszkodó világosbarna „kockák” az építés segéd szerkezetei, a keskeny rámpák alátámasztását szolgálják.

A rámparendszert úgy kell megtervezni, hogy a legnagyobb, akár 9 méter hosszú, 80 000 kg-os köveket is a helyére lehessen mozgatni. Az efölötti szintekre azonban keskenyebb rámpa is megfelelő. A rámpa rendszernek a piramis csúcsa közelében is lehetővé kell tennie a kövek szállítását. A rámpa nem akadályozhatja a burkoló kövek elhelyezését, valamint nem lehetetlenítheti el az élek és lapok pontos kitűzését.

3.3. A BURKOLÓKÖVEK ELHELYEZÉSE

A piramis burkoló köveit nem célszerű utólag elhelyezni, azok a szintekkel egyszerre kerülnek a helyükre. A piramis legkülső 3-5 kőora pontosan illesztett és faragott kövekből áll, ezért a következő sor építését, pontos elhe-



7. ÁBRA: A piramist merevítő „réteges falszerkezet”

lyezését ezen a ponton kell elvégezni. Itt lehet kimérni a pontos lejtést és a síkok összecsiszolására is itt kerülhet sor. Minden szinten a burkolat köveit helyezik el először, amit a támasztó kősorok követnek. Ezek után helyezik el a kitöltő, szabálytalan alakú helyi mészkövet, gipszhabarcsba ágyazva. A sírkamrák, folyosók és a szellőzők a szintekkel együtt épülnek [22]. Az építés során a burkolatok síkba csiszolását a helyszínen végzik el (**6. ábra**).

3.4. A MEREVÍTŐ FALRENDSZER

A szerkezet merevítése miatt a kitöltő kövek közé bizonyos távolságokra (5-8 méter) célszerű lenne faragott 2-4 sorból álló merevítő falakat emelni a támasztó sorok mintájára. Ilyen merevítő kősor (födém) beépítésére

vízszintesen is szükség lenne. A modellben a vízszintes merevítő sor nem ábrázolható (mivel minden kősor 1 méter magas), azonban a piramisban [7] bizonyos szintek sokkal vastagabb kövekből épülnek fel (**1. ábra**). Egy vastagabb kősor után csökken a szintek magassága, amit ismét egy vastagabb szint követ. A vastagabb (merevítő) kősor egy belső elem (például kamra) tetejének a kialakítása után következik. Ez teljesen megfelel a mai mérnöki tervezési szemléletnek. A merevítő falak beépítésére nincsen egyértelmű bizonyíték [23], azonban a rablók által vájt alagút falzatának a vizsgálata és a korábbi piramisok feltárt falszerkezete alapján ennek meglétét lehet feltételezni. A modellben szereplő (kétfajta) kőpárkány szélességét ezen merevítő kősorok alapján célszerű megtervezni. Sznofru korábbi piramisainak „építési sorrendjét” jelölő struktúra is inkább magyarázható a szintenkénti belső merevítéssel, mint a hagymahéj szerű bővítéssel (**7. ábra**).

3.5. KESKENY RÁMPA

A fő rámpa induló pontja a helyi bányás és a kikötő alapján célszerűen a gúla délnyugati sarkába kerülhet. Az északi oldalon lévő bejárat miatt ott is szükség van egy, a későbbi temetést kiszolgáló rámpa felépítésére. Egy ilyen kisméretű rámparendszer oldja meg a piramis legfelső szintjére a feljutást. Ez a rámpa csak átlagos kövek mozgatását teszi lehetővé. A burkoló kövek egy sávját nem vágják le, azok a rámpa megtartá-

sát szolgálják. A rámpát az alsó szakaszon törmelékből is el lehet készíteni, a felső keskenyebb szakaszon pedig ferdére vágott kövekből vagy akár fából is készülhet (**8. ábra**).

3.6. A RÁMPA BONTÁSA

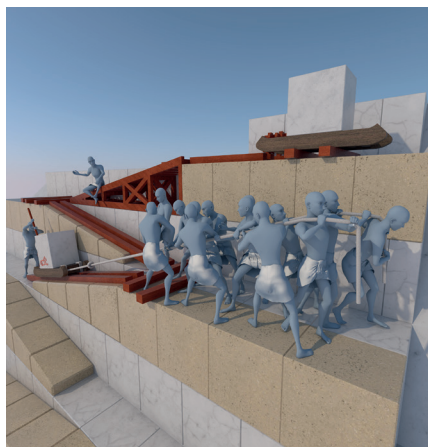
A legfelső kövek elhelyezése után a rámpát szintenként, felülről lefelé el kell bontani. Az eddig támasztékként szolgáló burkoló köveket csak ezután lehet síkba vágni és csiszolni. Itt állványként az alatta lévő sorok szolgálnak (**9. ábra**). A halotti menet után a bejárat burkoló köveit kell elhelyezni, amit a rámpa bontása és a burkolat véglegesítése követ.

4. I KIVITELEZÉS

A következőkben tekintsük át az építéskivitelezés elméletünk szerinti szakaszait a helyszínválasztástól a csúcskő elhelyezéséig.

4.1. A HELYSZÍN KIVÁLASZTÁSA

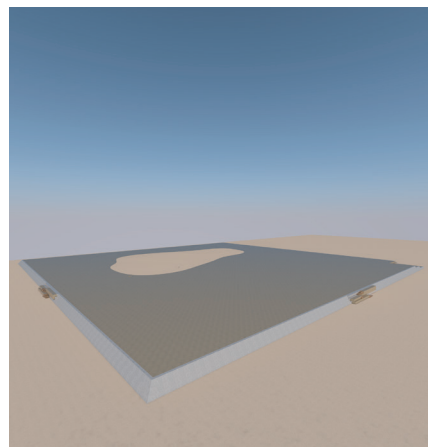
A piramis kitűzésére a Gízai fennsíkon került sor, figyelembe véve a kikötő és a kibányászható mészkőtömbök helyzetét. A kőzetlemez repedései behatárolják az építés helyét és vélhetőleg egy ilyen repedés az oka annak is, hogy a bejáratot el kellett tolni a piramis középtengelyéhez képest [6]. A piramis a meglévő mészkő domb egy darabját



8. ÁBRA: A keskeny rámpa kialakítása a piramis utolsó fázisának elkészítéséhez



9. ÁBRA: A keskeny rámpa bontása után a „felesleges” kövek eltávolítása, a burkolat csiszolása



10. ÁBRA: A meglévő mészkő domb „beépítése” a piramis szerkezetébe

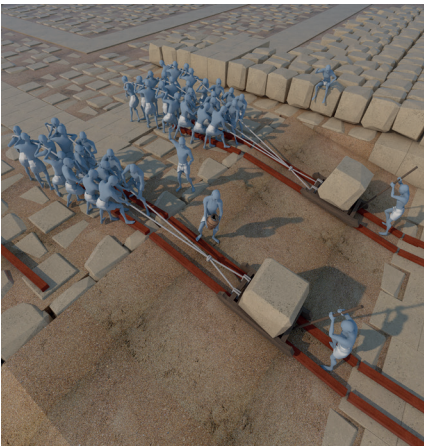
is magába foglalja, ezzel jelentősen csökkentve a szükséges építőkövek számát (10. ábra). A pontos tájolást a nap segítségével könnyen el tudták végezni a megfelelő pontossággal, valamint a sík fogadósínt beállítása se okozhatott gondot egy vízszintező árok segítségével.

4.2. INDULÓ RÁMPÁK

A kitűzés után a gondosan faragott külső burkolóköveket helyezték el. A piramis délnyugati sarkán egy 16 méter széles rámpa épült 20%-os lejtéssel (7. ábra). Ez a rámpa a külső faltól befelé épült a piramis területén belül. A nyugati és az északi oldal közepén a burkoló kövekre támaszkodva egy-egy keskeny rámpa építése is elkezdődött. Az északi a fáraó temetéséhez szükséges, a nyugati pedig a piramis befejező szakaszában fog szerepet kapni (11. ábra).

4.3. FALMEREVÍTÉS

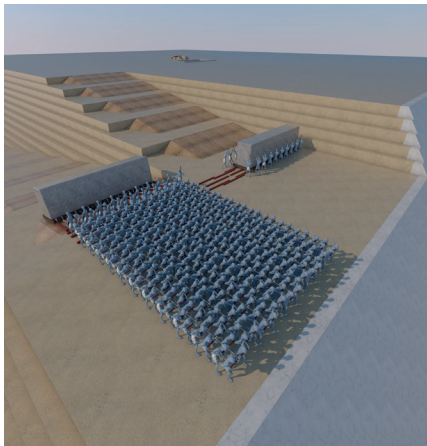
Az alsó sírkamrát a folyosójával együtt az alapkőzetbe vágva már kialakították (1. ábra). (Az alsó kamrát sohasem fejezték be teljesen.) A burkolat mögé két sornyi pontosan megmunkált támasztó kő került. A burkoló- és támasztó kövek is jó minőségű mészkövek a délre található Turai bányából [6] származnak. Ezek a kövek a valóságban 1,5 méter magasak, 10-15 tonna súlyúak, így ezek a piramis alapszerkezetének legnagyobb elemei (a modell



12. ÁBRA: Kőmozgatáshoz szükséges létszám olajozott és „száraz” fagerendákon húzva

1 méter magas köveket tartalmaz). A támasztó kövek mögé szabálytalanul megmunkált helyi mészkőtömbök kerülnek, gipszhabarcsba ágyazva. Ilyen szabálytalan kövekből áll a nemrég felfedezett „nagy üreg” is. Nyolc-tíz méternyi szabálytalan kötömb után ismét 2-3 sor pontosan faragott szilárdító fal épült. Ez a felépítés változik a közép-pont felé (12. ábra).

Az 5 méter hosszú rámpát a következő szinten egy szintén 5 méteres vízszintes szakasz követi. A következő rámpa innen fog indulni. A ferdére faragott külső burkoló köveket utólag csiszolják síkra egy egyszerű kinyúló állványzat segítségével (7. ábra). Az állványzatot akár a kövek szállítására használt szán és gerendák felhasználásával is meg lehet oldani. A burkolatok csiszolása folyamatosan történik, nem igényel alsó állványzatot.



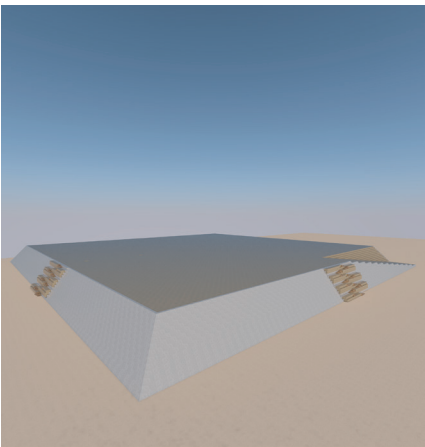
13. ÁBRA: A legnagyobb gerendák mozgatásához szükséges hely és létszám

4.4. A RÁMPARENDSZER ELSŐ SZAKASZA

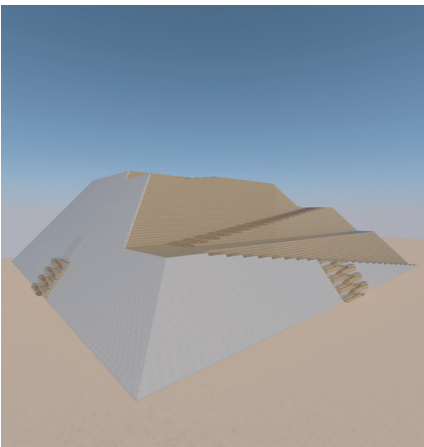
A széles rámparendszerre a király-kamra tető gerendáinak az elhelyezéséig van szükség. Ez a piramis rámparendszerének az első szakasza, amivel a kövek 72% elhelyezhető. Egy 80 tonnás gerenda rámpán történő mozgatásához 450 emberre van szükség (3. ábra). Oldalirányú eltolásához feszítőbotok segítségével pedig 18 munkásra (13. ábra). Ennyi munkásra [19] több falfestmény is utal a későbbi korszakokban [24].

4.5. A MÁSODIK SZAKASZ

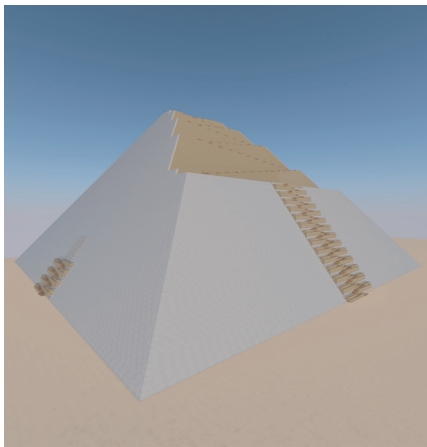
Az építés következő fázisában keskenyebb rámpa is elegendő, ezért a széles teraszokat lecsökkentik, azokat rész-



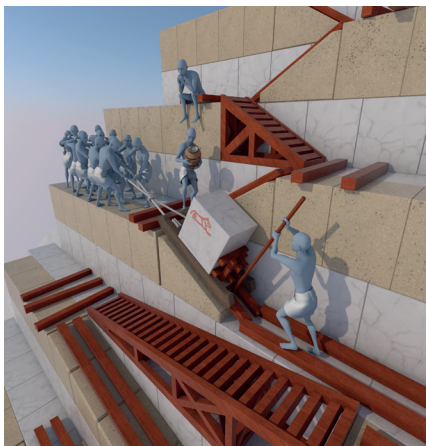
11. ÁBRA: A kisegítő északi és nyugati keskeny rámpa elhelyezkedése



14. ÁBRA: A széles rámpák és teraszok „feltöltése”, a 72% megépítés után



15. ÁBRA: A belső rámpák „feltöltése”, az oldalsó rámpa kialakítás a hátralévő 7% felépítéséhez



16. ÁBRA: A legfelső szakasz keskeny, meredek-rámparendszere

ben „feltöltik”. A belső merevítő fal-szerkezetek a feltöltés vonalát is meghatározzák. A széles rámpák feltöltése után a piramis 113 méteres magasságig tovább építhető (**14. ábra**).

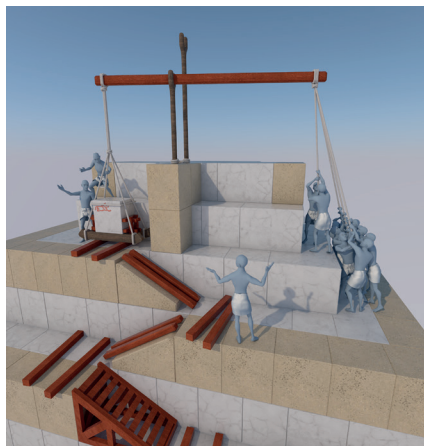
4.6. A HARMADIK SZAKASZ

Ezt követően olyan kicsi a legfelső szint területe, hogy biztonságosan, a piramis befoglaló méretén belüli rámpakialakítás már nem lehetséges. A teraszokat ekkor feltöltik és a piramis nyugati oldalán kap szerepet a burkolatra támaszkodó keskeny rámpa. Ezzel a rámparendszerrel építik meg a piramis tömegének hiányzó 7%-át (**15. ábra**).

4.7. A LEGFELSŐ SZAKASZ

A legfelső 32 szint már nem elég széles ahhoz, hogy ott két egymást követő 5 méteres rámpa helyet kapjon, ezért onnantól egy-egy keskenyebb rámpa épül. Ezen a területen már nem lehet feltöltésből építeni a rámpákat, azok kő vagy fa szerkezetűek.

Az utolsó kilenc szint felépítésére a helyhiány miatt meredekebb rámpák kialakítása szükséges, 26,56°-os lejtéssel. A piramis belső járatainak is ez a dőlésszöge, ami könnyen szer-



17. ÁBRA: A piramis csúcsának kialakítás a külső burkolókövekre támaszkodó segédépítménnyel

keszthető egy 2:1 arányú derékszögű háromszög alapján. A piramis felső szintjei a valóságban már csak 50 cm magasak, a felhasznált kövek így csak 500-1000 kg tömegűek. Olajozott fa gerendákon egy ilyen követ 5-10 munkás tud felhúzni (**16. ábra**).

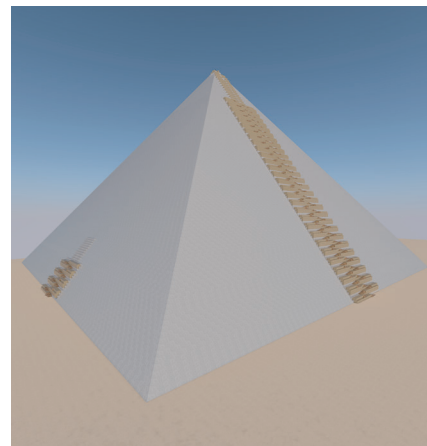
4.8. A PIRAMIS CSÚCSA

A legfelső pár szintre a köveket emberi erővel is fel lehet emelni, de egy egyszerű emelővel is elvégezhető a munka. Ilyen emelő használatára nincsenek az adott korból források, de a hajók mozgatható árbocai vagy a gémeskutak hasonló elven működtek (**17. ábra**).

A piramis csúcsa a feltételezések alapján arany bevonatú volt. A kisebb méretű kövek felemelhetőek, az aranylemez burkolat a helyszínen is kialakítható. Az adott korban nem tiszta aranyat használtak, hanem elektrumot (55% arany, 45% ezüst).

4.9. A RÁMPÁK BONTÁSA

A burkolatra épített tartóköveket fentről lefelé lebontották (**18. ábra**), a burkolatot pedig simára csiszolták (**9. ábra**). A fáraó temetése után a bejárat felőli rámpákat is elbontották és elvégezték a csiszolási feladatokat. Ez-



18. ÁBRA: A piramis külső rámpáinak eltávolítása, az építmény befejezése

zel nyerte el végső formáját a piramis komplexum legnagyobb építménye, a Gízai nagy piramis.

5. | ÖSSZEGZÉS

Amíg nem találunk olyan papiruszt, ami pontosan leírja, hogy milyen technológiával épültek a piramisok addig csak feltételezésekre szorítkozhatunk. Az ismertett építési módszer az adott kor anyagait és technológiáit felhasználva próbál egy lehetséges mérnöki megoldást felvázolni, figyelembe véve a régészeti feltárások eredményeit is. Ez az elmélet módszert mutat be a legnagyobb kövek mozgatására, a burkolatok csiszolására és a legfelső szintek megépítésére is. A sírkamrák építésével és azok lefedésével egy következő tanulmány fog foglalkozni.

A korai piramisokat áttekintve egyértelmű, hogy nem voltak kiforrott technológiák, sokat hibáztak és próbáltak tanulni a hibáikból. Egyfajta irány vagy akár fejlődés azonban felismerhető a piramisépítésben. Minden piramis más és más, vélhetően az építési technológiák is eltértek egymástól. Építésként nem állítom, hogy így épült fel Kheopsz piramisa, én így építettem volna fel, és azért az sem zárnam ki, hogy eleink is hasonlóan gondolkoztak.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] **Keith Hamilton:** The Great Pyramid, Part 1, A Layman's guide. 2022.02.25. <https://www.academia.edu/72468121/>

[2] **Peter-Christian Jánosi (ed.):** Structure and significance: Thoughts on ancient Egyptian architecture. Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2005.

[3] **Dušan Magdolen: The Seked:** On ancient Egyptian mathematics and astronomy. Asian and African Studies 13, 2004, 2, 134-140. <https://www.academia.edu/3572583/>

[4] **Keith Hamilton:** The Great Pyramid Void, A Layman's guide. 2023.03.06. <https://www.academia.edu/98053499/>

[5] **Szabó Adrián:** Architectural visualization of the Great Pyramid of Khufu and its complex. <https://www.academia.edu/100729089/>

[6] **Dietrich Klemm, Rosemarie Klemm:** The Stones of the Pyramids: Provenance of the Building Stones of the Old Kingdom Pyramids of Egypt (1st edition). De Gruyter, 2010.

[7] **W. M. Flinders Petrie:** The Pyramids and Temples of Gizeh (revised edition). Histories & Mysteries of Man, 1990. http://www.gizapyramids.org/pdf_library/petrie_gizeh.pdf

[8] **V. Maragioglio, C. Rinaldi:** L'Architettura delle Piramidi Menfite, Parte IV - Testo, Centro per le Antichità e la Storia dell'Arte del Vicino Oriente, Roma, 1962. https://gizamedia.rc.fas.harvard.edu/images/MFA-images/Giza/Gizalimage/full/library/maragioglio_piramidi.pdf

[9] **Galal Ali Hassaan:** Mechanical engineering in ancient Egypt, Part XXXVIII: non-stone, non-wooden human statues industry. International Journal of Engineering and Techniques 3(1), 2017, 43-55. <https://www.academia.edu/36678349/>

[10] **Mark Lehner, Zahi Hawass:** Giza and the Pyramids: The Definitive History. University of Chicago Press, 2017.

[11] **Mark E. Lehner:** The lost port city of the pyramids: The Heit el-Ghurab site reveals a new face. Aeragram, 2013. <https://www.academia.edu/36930567/>

[12] **Mark Lehner, Megan Flowers, Rebekah Miracle (ed.):** ARCE Sphinx Project 1979-1983 Archive. Open Context, 2017. <https://doi.org/10.6078/M7CZ356B>

[13] **Mark Lehner, Pierre Tallet:** The Red Sea Scrolls: How Ancient Papyri Reveal the Secrets of the Pyramids. Thames & Hudson, 2022.

[14] **Stan Florek, Thomas Hikade, Sarah Carter:** The flint artefacts from two workshops at Wadi el-Sheikh, Eastern Desert, Egypt. Records of the Australian Museum 71(4), 121-137. o. <https://doi.org/10.3853/j.2201-4349.71.2019.1681>

[15] **Heather Lechtman:** Arsenic bronze: Dirty copper or chosen Alloy? A View from Americas. Journal of Field Archaeology 23, 1996, 477-514. <https://www.academia.edu/3801230/>

[16] **M. Regourd, J. Kerisel, P. Deletie, B. Haguenauer:** Microstructure of mortars from three Egyptian pyramids. Cement and Concrete Research, 18(1), 81-90. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90124-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90124-X)

[17] **M. Hurst:** Ancient quarry ramp system may have helped workers build Egypt's Great Pyramids. University of Liverpool, 2018.11.02. <https://news.liverpool.ac.uk/2018/11/02/ancient-quarry-ramp-system-may-have-helped-workers-build-egypts-great-pyramids/>

[18] **Preklet Edina, Szabó Péter:** Súrlódási együttható meghatározása a gyakorlatban. Dimenziók: Matematikai Közlemények 12, 2024, 25-32. o. <http://publicatio.uni-sopron.hu/3391/1/dimenziok-12evf-2024-12k-025-032.pdf>

[19] **Wilhelm Jansson:** To move an obelisk. Uppsala Egyetem, 2019. <https://www.semanticscholar.org/paper/To-Move-an-Obelisk-Jansson/de66ee9ea2f0339cc696cc3620633ec9e27d62c0>

[20] **Tom Fowlie, Eric Meyers:** NOVA: Decoding The Great Pyramid. PBS (Direct), 2019.

[21] **Bob Brier, Jean-Pierre Houdin:** The Secret of the Great Pyramid: How One Man's Obsession Led to the Solution of Ancient Egypt's Greatest Mystery. Smithsonian, 2008.

[22] **David Ian Lightbody:** Biography of a Great Pyramid Casing Stone, The Journal of Ancient Egyptian Architecture 1 (2016), 39-56. o. https://web.ujaen.es/investiga/egiptologia/journal-architecture/downloads/JAEA1_Lightbody.pdf

[23] **Aidan Dodson:** The Layer Pyramid of Zawiyet el-Aryan: Its layout and context. Journal of the American Research Center in Egypt, 37, 2000, 81-90. o. <https://doi.org/10.2307/40000524>

[24] **C. St. C. Davison:** Transporting sixty-ton statues in Early Assyria and Egypt. Technology and Culture, 2(1), 1961, 11-16. o. <https://doi.org/10.2307/3101295>