



Fotók: Andy Ryan
Craig B. Smith, P.E.

Egy az időbeli szakadék okozta nehézségek áthidalására napjaink korszerű módszertanát felvonultató szakértői elemzés némiképp meglepő válaszokkal szolgált a gizai Nagy Piramis építésének mikéntjét feszegető kérdésekre.

A gizai Nagy Piramis megépítése az ókori világ egyik csodája. Az eredetileg 147 m magas piramis – a felső 9 m az idő pusztításának esett áldozatul – alapja 5.3 hektárnyi területet foglal el, tömege 2.6 millió m³ építőanyagot foglal magába és mérete mintegy kétharmada a Hoover Gáténak. Századok óta csodálja az emberiség, hogy a régi egyiptomiak miként voltak képesek így elrendezni a területet, elhelyezni a hatalmas mészkő- és gránit tömböket – melyek közül egynémelyik 20 tonnát is nyom – és mind méreteit, mind tájolását tekintve oly precízen megépíteni ezt az irdatlan méretű építményt.

Túl a megoldandó műszaki problémákon, amit maga az építés felvetett, kifinomult projektmenedzsment- és építésszervezési szemléletet is igényelt. A projekt tetemes mennyiségű lebonyolítói feladatot is magába foglalt, ami többek között kiterjedt az egész egyiptomi birodalomból nagy mennyiségben érkező anyagok beszállítására-, igazgatására-, a munkások ezreinek élelmezésére-, elszállásolására és fizetésére-, valamint a munkálatok időben – de leginkább a fáraó halála előtt – történő befejezését szolgáló ütemezésre is.

Mind egyiptomi, mind Egyesült Államok-beli vezető egyiptológusokkal – de legfőképpen Mark Lehnerrel, a Harvard Sémia Múzeum egyiptológusával – szoros együttműködésben a nemzetközi építészeti-, mérnöki- és építési menedzsment szolgáltatásokra szakosodott Daniel, Mann, Johnson & Mendenhall (DMJM) vállalat egy építési menedzserekből álló kutatócsoportja szakértői elemzéseket folytatott az ókori egyiptomiak által a Nagy Piramis építésénél vélhetően alkalmazott építési-, építésirányítási módszerek meghatározására. Modern programmenedzsment és építési menedzsment megközelítéssel élve a projektcsapat számos érde-

kes meglátást fejtett ki évszázados, a munkaerő méretére-, az építés időtartamára-, valamint az építési rámpa kialakítására vonatkozó rejtélyekkel kapcsolatban.



Khufu piramisa, melyre gyakran csak a Nagy Piramis nével hivatkoznak, egy építési csoda. Az előtérben a korabeli építési rámpa maradványai láthatók. Craig Smith (balra) és a már említett Mark Lehner egyiptológus a munkások falujának Lehner által feltárt maradványai között áll.

A programmenedzsment a nagy magán- és közösségi projektek vezetésének tudománya, és gyakorlata. A DMJM mind a magán-, mind a közösségi szektorból kikerülő ügyfelek megbízásából nagy, összetett programok menedzszerként tevékenykedik szerte a világban. A logisztikai kérdések – annak biztosítása, hogy minden a megfelelő időben-, megfelelő mennyiségben- és megfelelő minőségben rendelkezésre álljon – ezen projektek legnagyobb kihívásai között szerepelnek, és ezek képezik a projektmenedzserek legfőbb feladatát is. Hogy a projektmenedzser által napjaink körülményei között végzendő összetett tevékenységet még szemléletesebben érzékeltesse, a DMJM olyan impozáns példát keresett, melyet a lehető legtöbb ember jól ismer. Ahogy valaki egyszer megjegyezte: „Ha valaki azt hiszi, hogy napjaink projektjeinek vezetése bonyolult feladat, próbálja megépíteni a Nagy Piramist!” Projektünk – a „*Program/Építési menedzsment i.e. 2550: A Gizai Nagy Piramis megépítése*” – így megszületett.

Eredeti célunk mindössze annyi volt, hogy áttekintsük egy képzeletbeli projektmenedzser ténykedésének főbb lépéseit a gizai Nagy Piramis építésének példáján. Arra kértük a gyakorló építési menedzserekből álló csoportot, vázolják fel a szükséges teendőket oly módon, hogy abból logikai diagrammot, ütemtervet, illetve a programmenedzser egyéb eszközeit állíthassuk elő. A projekt kibontakozása során azonban különös átalakulásnak lehettünk tanui. A csoport tagjait megragadta a kihívás: Tényleg! Hogyan építenénk meg a Nagy Piramist?

A mérnöki ismeretek, a matematika és a tudományok – szakismeretek, melyek a nagy építési projektek megvalósításához elengedhetetlenek – jó alapokon nyugodtak az ókori Egyiptomban. Az egyiptomiak előre tudták jelezni a Nílus áradását, megkülönböztették a nagyobb csillagokat, megfelelő pontossággal beazonosították a csillaghalmazok helyzetét, továbbá tudtak felületet, és térfogatot is számolni olyan összetett alakzatok esetében is, mint például a gúlák. Az írásos feljegyzések rendszerén túl számos alapvető, vörösrézből készült eszközt használtak, ide értve a különféle fűrészeket, vésőket, kalapácsokat, és fűrőket, valamint az emelőrudak és lejtők alkalmazásának elveit is ismerték. Ezek alapján indokolt feltételezni, hogy bírtak mind a képességgel, mind az erőforrásokkal egy olyan összetett projekt vállalásához is, mint amilyen a gizai Nagy Piramis megépítése lehetett.

A Khufu Piramisa – Khufu fáraó időszámításunk előtt 2551 és 2528 között uralkodott – néven is ismert Nagy Piramis a negyedik dinasztia időszakában, hozzávetőlegesen Krisztus születése előtt 2550 évvel épült. A legismertebb és legnagyobb a Nílus nyugati partja mentén ismertté vált mintegy 80 piramis közül. Valójában több mint 4000 éven át ez volt a legnagyobb emberalkotta építmény a világon.

A piramis építésének logisztikai kérdései akkor igazán zavarba ejtőek, ha figyelembe vesszük, hogy a korai egyiptomiak még nem ismerték a csigasort, valamint nem voltak kerek járművek és vas eszközeik. A nagy mészkő és gránit tömböket – melyek némelyike akár 20 tonnát is nyomhatott – kőfejtőkben ki kellett termelni és hajókon le kellett úsztatni a Níluson. Igaz, a belső tömbök mindegyikét a Giza fennsíkon fejtették ki, de a piramis külső borításához használt mészkő Turából, a Nílus túlsó partjáról érkezett. Az építmény fő tömegét a mindenütt 2.5 és 6 tonna közötti súlyú mészkőtömbök alkotják. Becslések szerint több mint 2 millió ilyen tömböt használtak fel az építéshez. A legtöbb ezek közül egy Giza melletti kőfejtőből került ki, míg a Király Kamrájához használt nehezebb gránittömbök Aswanból érkeztek.

Az egyiptomi mesteremberek kézi hajtású fűróikkal tökélyre vitték a kő felületébe mélyítendő rések, üregek készítésének technikáját. Az ily módon készített résekbe illesztett ékeket fa kapácsokkal ütögetve táblákat hasítottak le a sziklából, majd a táblákat méretre faragták.

Az elkészült tömbök méretei különösen pontosak voltak a piramis külső burkolatán: az illesztések a hüvelyk töredékén belüli – n esetben lényegében 3 mm-en belüli – pontossággal készültek. A piramis hatalmas oldalfalaival Észak-Dél, illetve Kelet-Nyugat tájolású. Ez önmagában is figyelemre méltó teljesítmény volt, különös tekintettel a megvalósítás pontosságára, merthogy az egyiptomiaknak ezt a Nap-, vagy a csillagok megfigyelésére támaszkodva kellett véghez vinniük – az iránytűt akkor még nem ismerték. A piramis méretei módfelett pontosak. Az építési területet a teljes alapterületen a hüvelyk töredékét alig elérő hibahatáron belül szintezték. Ez kiállja a próbát a modern építési eljárásokkal és lézeres szintezési technikákkal elérhető pontossággal összevetésben is.

A görög történetíró, Hérodotosz szerint a rámpa és a piramis építése mintegy 100.000 munkással mintegy 30 évet vett igénybe. Olyan elmélet is létezik, miszerint a munkaerő egy része idénymunkásokból, főként földművelőkből állt, akik a Nílus áradásának időszakában érkeztek, amikor saját földjeiken képtelenek voltak dolgozni. A százezres szám annak tükrében, amit ma ismerünk soknak tűnik, de bármilyen mértékkel is mérjük, és bármilyen szempontból is vizsgáljuk, a vállalkozás óriási volt.

Az ásatások egy hozzávetőlegesen 4-5 ezer embernek szállást adó hajdani „munkásfalú” létezésére utalnak. Ez, valamint a szerszámok és műhelyek nyomai arra engedtek következtetni, hogy mintegy 4-5 ezer fős lehetett az „állandó foglalkoztatású” munkaerő, ide nem számítva a távoli kőfejtőkben a mészkő tömbök kitermeléséért-, azok Gizába fuvarozásáért- és helyszínre szállításáért felelős munkásokat. Ez a szám szintén nem tartalmazza az adminisztrációhoz, illetve az állandó munkaerő élelmezéséhez és ápolásához szükséges kiszolgáló csapatok személyzetét, és azokat sem, akikre a logisztikai feladatok ellátásához, az ellátmány-, az állványzatok és görgők faanyagai-, a kötömbök- és más építőanyagok beszállításához volt szükség.



Craig Smith és Mark Lehner szoros együttműködésben dolgozott a Nagy Piramis építésének mikéntjét taglaló szakértői elemzés során. A baloldali kép a Khufu fáraó piramisa mellett található királynői piramisokat mutatja, ahol a burkolókövek kialakítása is jól látható.



Számos elmélet bontakozott ki arra nézve, hogy a piramis ténylegesen hogyan is épült. Hérodotosz emelőkarok rendszerének használatát említi. Szerinte hosszú farudakat alkalmaztak a

tömböknek a piramis egyik terasz-szintjéről a másik terasz-szintre történő emeléséhez. Ahogy az a feljebb és feljebb emeléshez szükségessé vált, akár szintenkénti-, többszörös emelőrendszerrel használhattak, akár szintről-szintre magukat a rudakat is tovább adhatták. A mi megítélésünk szerint ez az út nem járható. Erős bizonyíték van azonban egy másik feltevés alátámasztására, nevezetesen a rámpa alkalmazására.

Tudjuk, hogy más piramisokhoz lejtős rámpákat építettek. Úgy okoskodtunk, hogy a terület szintbehozását követően egy kezdő tömbsort helyeztek el a piramis alapjának körülhatárolására. Ezt az elhelyezést különös körültekintéssel végezték el, hiszen viszonyítási alappá vált a további méretek meghatározásához az építkezés előrehaladása során. Ugyancsak feltételeztük, hogy a piramis alapvonala által körülzárt terület közepén meghagytak egy közelebről meg nem határozott alapterületű- és magasságú természetes sziklaszírtet. Az építkezés további tömbsorok elhelyezésével folytatódott, miközben egy Lejtős Folyosónak nevezett alagutat is mélyítették a piramis alapjába. Ez a folyosó hozzávetőlegesen 107 m-re nyúlik be – nagyjából a piramis közepéig, és az alá – mintegy 26 fokos lejtéssel, ahol egy kamrát alakítottak ki.

E kamrának a befejezetlen állapota arra utal, hogy a tervek megváltozhattak. A Lejtős Folyosóból indítva egy emelkedő folyosót építettek, ami a piramis alsóbb részének közepontjába vezet. Itt egy másik kamrát alakítottak ki, melyet napjainkban a Királynő Kamrája néven emlegetnek. A Királynő Kamrája fölött egyedülálló, hatalmas, hosszúkás, galéria – a Nagy Galéria – található, mely a Fáraó Kamrájához vezet. Ez volt Khufu fáraó tervezett végső nyughelye.

Ahogy az építkezés elérte egy-egy folyosó, illetve kamra szintjét, lehetővé vált a munkások számára a kész fal-, áthidaló- és földemelemek térszínről történő elhelyezése, majd ezek körül és felett a piramis további részeinek megépítése. Mindeközben folyamatosan haladtak fölfelé. Feltételezzük, hogy a rámpát egészen addig bővítették, amíg a piramis felső része is el nem készült, majd egy bizonyos ponton egy mészkőből készült „sisakkő” elhelyezésre nem került.



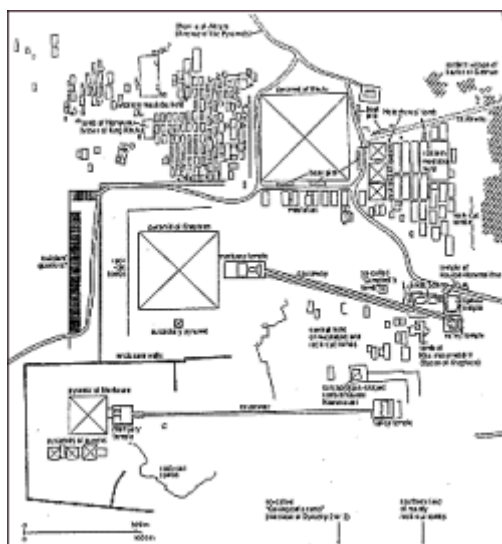
A Khufu piramisának alsó rétegeiben használt kőtömbök mérete ezen a képen nyilvánvaló.

A piramis külső kősorai turai fehér mészkő burkolókövekből készültek, melyeket a belső mag tömbjeinél pontosabban faragtak ki és illesztettek egymáshoz. Ezeket a köveket a külső oldalon hagyott többlet-anyaggal illesztették a helyükre, hogy azokat egy későbbi időpontban faragják véglegesre. Ha már a burkolókövek utolsó sora is helyére került, a rámpát és az állványzatot visszabontották, hogy a burkolókövek néhány sora szabaddá váljon. Ekkor a külső felszínt a végleges dimenzióknak megfelelően összezsírták, hogy ezáltal a piramisnak sima külső felületet adjanak. Mindezt lefelé haladva tették, miközben a rámpa és az állványzat fokozatosan elbontásra került.

A csapat tagjai nagy építési projekteken edzett saját szakértelmükre hagyatkoztak annak meghatározásánál, hogy mennyi időt vehetett igénybe a mészkőtömbök kitermelése, szállítása, illetve a piramis felhúzása. Megpróbálták bemérni azt az időt, ami a modern eszközök elérhetősége nélkül szükséges lehetett. Ebben a folyamatban első lépés egy tevékenységlista összeállítása – azaz az elvégzendő feladat különböző mozzanatainak meghatározása – volt.

Mikor a tevékenységlista a rendelkezésünkre állt, egy folyamatábrát állítottunk össze a csapat által a legelfogadhatóbbnak talált építési sorrend szemléltetésére. Az építésselőkészítők a gépesítés bevezetése előtt alkalmazott módszerek elemezésébe kezdtek, hogy az egyes beazonosított tevékenységek élőmunkaigényének becslését elkészíthessék. Ahol lehetett, ezeket a becsléseket publikált adatokkal is összevetették. Javarészt azonban a munkacsoport saját tagjainak tapasztalataira támaszkodott. A csoport – közös munkával – több-tízezer embert mozgósító szaud-arábiai nagy építési projekteket tekintett át. Mindehhez, néhány csapattagnak már voltak a Harmadik Világ országaiban szerzett tapasztalatai az ú. n. munkaintenzív építési módszerekre vonatkozóan, ide értve a kézi földkitermelést és a vödörös betonbedolgozást is.

A munkaigénybecsléseket az anyagszükségletekre és építési technológiákra vonatkozó mérnöki számításokkal ötvözték, hogy a munkálatok egyes elemeinek végrehajtáshoz szükséges időtartamokat és munkáslétszámokat megállapítsák. Az így nyert adatokat egy hálós építési ütemterv kialakításához használták fel. Az elemzés bizonyos feltételezett építési módok megvalósíthatatlanként történő elvetését is lehetővé tette a csapat számára. Például: egyetlen, a piramis tetejéig érő rámpa 800 méternél is hosszabb lenne és nagyobb építési munkát foglalna magába, mint maga a piramis. Hasonlóképpen szükségtelennek találták, hogy minden egyes oldalra rámpa épüljön.



Giza helyszínrajza az itt található három fő piramis helyzetét mutatja: Khufu Piramisát – a Nagy Piramist, Khephren Piramisát és a Menkaure Piramist.

Ugyanakkor valamiféle rámpaszerkezet használatát feltételeztük, mivel a szóbajóhető építési módokra vonatkozó saját elemzéseink is erre utaltak, másrészt más helyszíneken rámpa maradványok kerültek napvilágra. A piramis 50. szintjéig egyetlen rámpa még elfogadható magasságú és tömegű lenne, és a tömbök kétharmadának elhelyezését tenné lehetővé. A csoport abból a feltevésből indult tovább, hogy az 50. szinttől szögletes csigavonalú rámpát építettek – magán a piramison – a felsőbb szintek eléréséhez. Ezen a ponton már lecsökken annyira a tömbök száma, hogy nem a szállítás korlátai a mértékadóak. A piramis csúcsán – az utolsó 10-20 szinten – a tömbök száma már igen csekély. A csoport felvetette, hogy akár egy belső „lépcsőház” is készülhetett, illetve emelőrudakat is használhattak a sisakkő, és a még hátralévő utolsó tömbök elhelyezéséhez.

A hálós időelemzés azt mutatta, hogy a kőfejtőben a tömbök kitermelése nem lehetett korlát. Ráadásul úgy véltük, hogy a tömböket előre is elkészíthették és felhalmozhatták a helyszínen arra az esetre, ha kőfejtőmunkásokból hiány lépett volna fel. Feltételezésünk szerint időszakos jelleggel, segítségképp, nagyszámú munkást is toborozhattak a tömböknek a rámpán a munkaszintre történő szállításához, ahol azután a képzett kőművesek helyükre tették azokat, illetve megépítették a folyosókat és kamrákat.

A csoport úgyszint kidolgozta a területelőkészítésnek-, a kőfejtőbeli munkálatoknak-, a faragott turai mészkő és aswani gránit szállításának-, a szakképzett állandó munkások számára egy munkásfaló létrehozásának-, a rámpák építésének-, a befejező munkák kivitelezésének-, valamint az építkezés végén a rámpák elbontásának a logisztikai részleteit.

A programmenedzseri megközelítés- és saját megalapozott sejtéseink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a teljes projekt átlag 13.200 fős munkáslétszámot igényelhetett, 40.000 fős maximummal. Két-három évet igényelhetett a területelőkészítés, öt évet a piramis építése, valamint két évet a rámpa elbontása-, a díszítés- és egyéb járulékos munkák. Ilyen méretű munkaerő összevonása – és élelmezése – úgy tűnik, abban az időben jóval az egyiptomi gazdaság teljesítőképességén belül lehetett, amennyiben a népesség valóban 1–1.5 millió fő volt.

A Nagy Piramis tervezésére vonatkozólag nem találtak feljegyzéseket. Későbbi dinasztikák idején épült sírhalmokhoz azonban találtak rajzokat, melyeken felül léteznek további rajzok és egyéb feljegyzések, amik arra utalnak, hogy Khufu uralkodásának idején ez egyiptomiak tudták, hogy hogyan kell térfogatot-, felületet-, és irányszöveget számolni, tudták miként kell egy területet szintezni, merőlegest állítani, ismerték nyitját a földmérésnek, a csillagászati-, illetve Nap-megfigyelések építmények tájolásához történő felhasználásának, felismerték a szerkezeti teherátadás elvét, és láthatólag volt fogalmuk az általuk használt anyagok teherbíró képességéről, illetve, hogy felismerték az építmények megfelelő alapozásának szükségességét. Mivel ki tudták számolni a rámpa tömegét, feltételezzük, hogy a szükséges anyagok és munkaerő minimálásához – csakúgy, ahogy azt ma tennénk – optimalizálták az építkezés terveit, hogy a munkaerőt a projekt legkritikusabb, legnagyobb erőpróbát jelentő vonatkozásaira fordíthassák. Úgy okoskodtunk, hogy a piramis terveit vélhetően egy olyan építőmester, vagy főmunkavezető dolgozta ki, aki már dolgozott más piramison.

A gizai ásatások régi kőfejtők nyomait és egy munkásfalú maradványait tárták fel. További ásatások Deir el Medinánál, ahol bőséges feljegyzéseket találtak, alátámasztják azt az elméletet, hogy a helyszínen volt egy állandó munkástábor, ami a képzett kőműveseknek, rajzolóknak és munkavezetőknek biztosított szállást. A falu kétségkívül képes volt a munkaerő fenntartására, mivel pékségnek is vannak nyomai – sőt azon munkások sírhalmainak is, akik az építkezés során haltak meg. Más aspektusból, általunk területelőkészítésként figyelembevett feladatok között szerepelt a szállások-, egészségügyi létesítmények-, műhelyek-, és a gizai kőfejtőből a piramisépítés helyszínére vezető utak-, valamint kikötők építése is. (A Nílus évenkénti áradásának ideje ideális időszak lehetett az áruk hajóval történő beszállítására, mivel a felduzzadt víz alig 400 m-re közelítette meg a gizai helyszínt.)

Úgy gondoljuk, hogy a piramis helyszínét először felmérték-, majd a piramisszerkezetnek szilárd alapot biztosító szikla altalajig feltárták. A piramis helyszínéül a Giza fennsíkot kétségkívül a fellelhető mészkő miatt választották, és mert az a fáraó lakhelyének közelébe esett. A laza anyag eltávolítása során az építők meghagytak egy sziklaszirtet, amit később beépítettek a piramisszerkezetbe. A szükségesnél nagyobb anyagmozgatás elkerülése végett valószínű, hogy a kitermelt anyagot az építési rámpa területére szállították, és úgy helyezték le, hogy az a rámpa részévé válhasson.

A szikla altalaj feltárását követően beszíntezték a területet. Ezt leginkább egy derékszögű szintezővel – egy A betűre emlékeztető derékszög, átkötő elemmel és egy függőönnel, mely a derékszög csúcsából lóg alá és az aktuális értékeket az átkötőelemen jelzi – végezhették. A szintezést mérések sorozatával készíthették, melyek során magassági alappontokat alakítottak ki az alapok teljes hosszában.

Egy másik elmélet úgy tartja, hogy a szintezéshez a teljes területet behálózó sáracsatornákat építettek, melyeket vízzel töltöttek fel, majd a víz szintjéhez viszonyítva mérték meg a sziklák mélységét – alant (alpvonalak és magassági pontok képzésével). Ezt az elméletet azonban elvetettük az egy ilyen kiterjedésű csatornahálózat víz alatt tartásához szükséges vízmennyi-

ség szállítására fordítandó erőfeszítések-, valamint a párolgásból és szivárgásból adódó veszteségek miatt.

Következő lépésben a Nap pályájának megfigyelései-, vagy csillagászati megfigyelések felhasználásával kitűzési munkapontokat állíthattak fel, és rögzíthették a sarokpontokat. Mivel az egyiptomiak Nap-imádók voltak, hihetőbbnek tűnik számunkra, hogy ismerték a Nap járásának sajátosságait, és napfénybeli árnyékok mérésével határozták meg a pontos északi irányt. Az ókori egyiptomiak számára is elérhető eszközök és ismeretek felhasználásával végzett egyszerű kísérlet alapján úgy találtuk, hogy ez az irány-meghatározás könnyen kivitelezhető.

Ezen a ponton valószínűleg elkezdődtek a Lejtős Folyosó és az alsó kamra építésének alagút-építési munkálatai. A lejtős-, illetve emelkedő folyosók-, a Nagy Galéria- és a Fáraó Kamrája építésének idején egy munkahézagot hagyhattak szabadon a piramis magtömbjei között.



Ezen a Khufu Piramisánál lévő teraszt mutató képen tisztán láthatók az ókori földmérők által készített mérési pontok nyomainak vélt négyzetes „csapok”.

A területelőkészítés indításával egy időben megkezdődhetnek a kőfejtőbeli munkálatok. Úgy véljük, hogy az építőanyagok zöme magáról az építkezés területéről került ki a nehéz tömbök szállításának minimalása végett. Régészeti bizonyítékok támasztják alá azt a megállapítást, hogy egy vagy több kőfejtő volt a területen. Itt a tömbök elhelyezési ütemének megfelelő létszámú munkaerőt tételeztünk fel. (Kisebb létszámú munkaerőt is alkalmazhattak, amennyiben a munkát egy évvel korábban, a készletek felhalmozásával kezdték.)

Az építés első lépése a talp-réteg lefektetése lehetett. Ez a folyamat a nagyméretű tömbök nagy pontossággal történő elhelyezését foglalhatta magába a piramis méreteinek rögzítése végett. Szakirodalomban hivatkozott felmérés alapján a négyzetes alapterület sarokpontjainak és tájolásának pontatlansága oly csekély, hogy az napjaink építői számára is komoly kihívást jelentene. Az építkezés a további tömb-rétegek ráépítésével folytatódhatott, míg el nem érték a következő „lépcsőfokot”, ahol ismételtelen gondosan beszíntezhették az építményt. Nem feltétlenül kellett minden réteget szintbe hozniuk, hiszen az minden egyes tömbön növelte volna a fejtés és faragás munkaigényét, és anyagvesztéssel járt volna. Úgy hisszük, hogy 14-16 réteg alkothatott egy lépcsőt, és összességében 15-17 ilyen lépcső lehetett.

Feltevésünk szerint az építmény három szerkezeti alapelemre épül: a külső burkolókövekre – gondosan faragott fehér turai mészkőből; egy belső, „támasztó kövekvől” álló rétegre; és a magot alkotó-, gízai mészkőből készült tömbökre. Ez utóbbiakat nem faragták pontosra, de gondosan beleillesztették a piramis tömegébe és csak az egyes lépcsőknél hozták szintbe (nem minden rétegnél). Rendhagyó alakzatokat is bedolgozhattak a szerkezetbe, hogy a rendelkezésre álló anyagok felhasználását maximálják. A burkolótömböket viszont úgy meg kellett faragniuk, hogy azok a mellettük- és alattuk lévő tömbökhöz pontosan illeszkedjenek.

Többféle megoldást is számításba vettünk annak felderítésére, hogy a rendelkezésükre álló szűkös eszközparkkal miként lehettek képesek az egyiptomiak mintegy 147 m-es magasságba juttatni a tömböket. Feltételeztük görgők használatát, de kerek járművek-, vagy csigák alkalmazását nem. A rámpa kérdésének vizsgálatához először a tömbök rétegenkénti számának, illetve a tömbök tömegének-, magasságának- és egyéb mérőszámainak meghatározásával számos matematikai modellt készítettünk. Tudjuk, hogy méreteiket tekintve a tömbök nem egyformák. 1.5 m-es vastagságukkal az alsóbb tömbök nagyobbak, míg a csúcs közelében 0.6

m-re, illetve az alá csökken a rétegvastagság. Mivel a tipikus méretekről nem állt rendelkezésünkre kimutatás, számítások sorát készítettük el – átlagos méretek alapján.

Számításaink meggyőztek minket arról, hogy a legtöbb rámpa-elképzelés gyakorlatiatlan lett volna, mivel nagyobb építési erőfeszítéssel járt volna, mint ami magához a piramishoz szükséges. Feltételeztük, hogy az egyiptomiak sem kötöttek volna le erőforrásokat semmi többnek a megépítésére, mint ami minimálisan szükséges, lévén, hogy a rámpát az építkezés végén el kell bontani.

Az irodalom arról számol be, hogy a Nagy Piramist 2.3 millió kötömbből építették, és hogy ezek mindegyike átlag 2.5 tonnát nyom. Vizsgálataink során nem találtuk alapját, vagy eredetét ezeknek a számoknak, melyeket ugyanakkor széleskörűen idéznek. Saját becsléseket végeztünk különböző méretekké, a mészkő térfogatsúlyát 2.560 kg/m^3 -nek feltételezve. Ezek a számítások azt mutatták, hogy 2-2.8 millió tömb lehet – a feltételezett méret függvényében. Tovább finomítottuk a számításokat a folyosók és kamrák üregtérfogatának levonásával, engedményeket tettünk az áthidalóknál, a süvegkőnél és mennyezeteknél alkalmazott gránit miatt, a külső réteget pedig külön kezeltük. Mindez azt sugallta, hogy – egy átlagos, 0.9 m széles, 1.0 m magas és 1.2 méter hosszú tömböt véve alapul – maga az alap építmény hozzávetőlegesen 2 millió tömböt számlál.

Egy érdekes lehetőség, hogy a süvegkővet a rámpával még elérhető legfelsőbb szintre hozhatták fel, majd bakokra is teheték, miközben a piramis többi részét megépítették – azaz a piramist ez alatt építhették fel, míg a süvegkő együtt emelkedett a még hátralévő szintekkel.

Matematikai modellünk tanulmányozása megmutatta, hogy azon a ponton, ahol elérték az 50. szintet-, illetve réteget, lényegében kétharmadát a tömböknek a helyükre tették. Ez viszont azt sugallja, hogy egyetlen nagy rámpa – a piramis egy oldalán – kivitelezhető megoldás lehetett. Ez a rámpa hozzávetőlegesen 50 m magas és több mint 350 m hosszú lehetett, mintegy 15 százalékos emelkedéssel – amit mi felső határértéknek tekintettünk. Mindemellett, magának a piramis tömegének a 30 százalékát tehetette ki. A rámpa méreteit az építési ütemterv befolyásolhatta. A piramis elfogadható ütemezés szerinti építéséhez a rámpának elég szélesnek kellett lennie ahhoz, hogy egyidejűleg több munkacsoport számára is lehetővé tegye a munkaterület megközelítését, a szállítmány célbajuttatását, és a többi munkás feltartása nélküli távozást.

Végül egy hibrid rámparendszernél állapotunk meg. Egyetlen rámpa volt a piramis egyik oldalán egészen az 50. szintig, ahonnan rámpák sora ölelte körül a piramist és érte el a 120. szintet. Ezek a rámpák jóval keskenyebbek lehettek, és magára a piramisra támaszkodhattak, így lényegesen kevesebb anyagból is meg lehetett építeni őket. Feltételeztük, hogy az utolsó két sor (két külső sor) tömbjeit kihagyták a sarok közelében, hogy kellő szélességű leadóhelyet alakítsanak ki a főrámpa számára. A kisebb rámpákat olyan magasságig alkalmazhatták, amíg a vízszintes méretek számottevő magasságyerést tettek lehetővé.

Azt feltételeztük, hogy e pont fölött egy harmadik módszert alkalmaztak: egy „lépcsőházat” az építmény legtetetjén – közepén. A csúcs tömbjeit alulról, kézzel tolhatták fel, illetve rudakon- vagy csapágy-köveken átvett kötelekkel húzhatták fel ebben a lépcsőházban, majd teheték helyükre. Ezen a ponton – az utolsó 20 réteghez – a szükséges tömbök száma mindössz-

sze 7000. Ha már a süvegkővet helyreügyeskedték, a lépcsőházat felülről feltölthették, le, egészen az utolsó rámpa végénél lévő terasz szintjéig.

Egy érdekes, megfontolandó lehetőség, hogy a süvegkővet a rámpával még elérhető legfelsőbb szintre hozhatták fel, majd bakokra is teheték miközben a piramis többi részét megépítették – azaz a piramis felső részét a süvegkő alatt építhették fel, míg az együtt emelkedett a még hátralévő szintekkel.

A piramist a Nílus túlsópartján lévő Tura melletti kőfejtőből származó fehér mészkő burkolókövekkel fejezték be. Feltevésünk szerint a burkolótömböket hajóval hozták Gizába. Ezeket a tömböket gondosan a helyükre illesztették, majd elhelyezésük után faragták véglegesre, hogy a piramisnak sima külső felületet biztosítsanak. Ugyanannak a modellnek a felhasználásával, mint amit a tömbök rétegenkénti számának meghatározásához használtunk, kiszámoltuk, hogy ezeknek a burkolóköveknek a száma hozzávetőlegesen 53.000 lehetett.

Feltételeztük, hogy a felső szinteken állványzatokat emeltek ezeknek a tömböknek az elhelyezéséhez, és hogy a munkálatok fölfelé haladtak rétegről rétegre. Mivel a legfelsőbb tömbök méretre fele akkora, mint egyébként a tömbök javarésze, kézzel is elhelyezhették azokat. Ha már a munkálatok elérték a piramis tetejét, lefelé haladva valamennyi kihagyott tömböt pótolhatták, és mindenféle végső simítást elvégezhettek. A rétegek elkészültével a rámpát fokozatosan elbonthatták.

Amellett állapodtunk meg, hogy „havonta” három 10 napos „munkahét” volt – 8 nap munka, melyet 1-2 szabadnap követett. Egy munkanap négy-öt munkaórából állt délelőtt, melyet ebéd után újabb 4-5 munkaóra követett. Az ünnepnapok és vallási szokások miatt kieső napok általában levonandók, így évi 280 munkanapot használtunk építési-idő becslésünkhöz.

Úgy becsültük, hogy az 50. szinttől a 74. szintig óránként 180 tömbös szállítási ütemre volt szükség, és ebből az értékből indultunk ki annak meghatározására, hogy a rámpa mérete és a munkacsoportok száma kivitelezhető megoldásra vezet-e. És lehetségesnek mutatkozott. Ezt követően konstatáltuk, hogy az ennél alacsonyabb szinteknél a rámpa eleve szélesebb lenne, és kétszer ekkora szállítási teljesítményt is lehetővé tenné. A 75. szint felett a szállítási igény a tömbök kisebb száma miatt visszaesik, így a rámpaméret és a munkacsoportszám csökken. A munkacsoportok létszáma többféleképpen is becsülhető. A szállítási kapacitás végtére is a rakománytól és a távolságtól függ. Mi egy átlagos munkacsoportot 20 fősnek tételeztünk fel.



Ez a részlet jól mutatja, hogyan faragták a burkolóköveket a megfelelő dőlés-szögűre.

A fajlagos költségek becslése több forrásból építkezett, ide értve csoportunk saját megítéléseit és tapasztalatait is. Például, a tömbökénti két műszak-fős fejtési munkaigénybecslés a mi megítélésünkön alapul. Egy átlagos tömb esetében azt feltételeztük, hogy egy 20 fős brigád volt szükséges ahhoz, hogy a szánt a rámpán felhúzzák a munkaterületre. Ez átlagban négy órát vehetett igénybe (az 50. szintig), ami azt jelenti, hogy egy brigád két tömböt tudott szállítani naponta. Következésképpen, minden egyes tömb helyszállítása tíz műszak-főt igényelt.

A földfejtéssel és rámpaépítéssel kapcsolatos becsléseknél századfordulós mérnöki kézikönyvekben néztünk utána-, és állapítottunk meg teljesítmény-értékeket a kézi földmozgatás esetére. Ez hozzávetőlegesen $0.8 \text{ m}^3/\text{ó}$ -nak felelt meg – az anyagmozgatási távolság függvényében rátartott idővel együtt. Úgy becsültük, hogy átlagos távolságnál a norma $0.1 \text{ nap}/\text{m}^3$ volt.

Élőmunkaigény változási előrejelzéseket is készítettünk. Túl azon, hogy a szakképzett munkaerőszükséglet egyenletes volt, egy 4.000-5.000 fős munkásfaluvál a helyszínen, az 1-50 rétegek elkészülte után a munkaerőigény számottevően lecsökkent. Az összes munkaigény 36.7 millió napot tett ki, vagyis hozzávetőlegesen 131.200 munkás-évet. Így a munkaerő átlag-létszáma a projekt 10 éves időtartama alatt mintegy 13.200 fő volt.

Megtudtuk, hogy a munkásokat gabonában fizették – kenyér és sör készítéséhez – csakúgy, mint olajban, egyéb élelemben és kelmében. A fizetségek természetesen különbözőek voltak, a szakismerettől és a beosztástól függően. Ókori feljegyzések megemlítik, hogy egy főfelügyelő naponta 8 kancsó sört és 16 egész cipót keresett. Mi önhatalmúlag arányosítottuk ezeket a számokat a munkásrangsor további szintjei fizetségének becsléséhez. Miközben ez kétségkívül erős egyszerűsítés, lehetővé teszi az építkezés összes költségének nagyságrendi becslését. Az időtájt egyfajta barter-gazdaság volt jelen, így egy adott jártassággal rendelkező munkás munkát végezhetett egy másiknak, aki a szivességet valaminek az elkészítésével viszonzta neki. Némi mellékfoglalkozást is folytattak, midőn a munkások szabadidejüket egyéb ügyfelek számára történő munkavégzésre használták. Eképpen a piramis építésének munkaerő-költsége hozzávetőlegesen 111 millió kancsó sör és 126 millió darab cipó lehetett a projekt 10 éves időtartama alatt. Az akkori agrár-Egyiptom termelési kapacitásai úgy sejtetik, hogy a gazdaság oldaláról tökéletesen elfogadható volt egy ilyen vállalkozás ilyen időtartamú fenntartása.

Miközben bizonytalanság van a tekintetben, hogy pontosan miként építették meg az egyiptomiak a Nagy Piramist, bizonyosság van azt a tényt illetően, hogy megépítették. A piramis ma fenséges tanúságaként áll azon nép merő céltudatosságának és szakértelmének, mely megépítette. Áhítattal kell adóznunk programmenedzsment technikájuk előtt is, mint ahogyan az is bizonyos, hogy magasan fejlett adminisztrációs és tervezési szakértelemmel rendelkeztek. E projektnek az összetettsége és logisztikai teljesítményei egyszerűen csodálatra méltók.

Craig B. Smith, P.E., Ph.D., a Daniel, Mann, Johnson & Mendenhall vezető tisztségviselője Los Angelesben. Projektjüket az „Egyiptom nagy építői” című televíziós külön-kiadásban ismertette, amit az „Arts & Entertainment” csatornán sugároztak ez év elején.

Eredeti szöveg: Craig B. Smith, *Program Management B.C.*, Civil Engineering Magazine, June 1999 (volume 69, number 6)

Forrás: <http://www.pubs.asce.org/ceonline/0699feat.html>

Fordította: Dr. Vattai Zoltán András, 2006. március