

Megemlékezés

A TUDÓS, AKI HIDAT VERT TUDOMÁNY ÉS MŰVÉSZET KÖZÉ – 75 ÉVE HALT MEG D'ARCY WENTWORTH THOMPSON

THE SCIENTIST WHO HAS BUILT A BRIDGE BETWEEN SCIENCE AND ART: 75TH ANNIVERSARY OF DEATH OF D'ARCY WENTWORTH THOMPSON

Bujtor László

PhD, habilitált egyetemi docens, Eszterházy Károly Katolikus Egyetem Földrajz és Környezettudományi Intézet, Eger
bujtor.laszlo@uni-eszterhazy.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

D'Arcy Wentworth Thompson transzformációs elmélete nem aratott osztatlan sikert megjelenése idején, holott az alapját képező párhuzamok és jelenségek létezését korának minden gondolkodója elfogadta. Forradalmi megközelítése és új szemlélete a matematikai biológia volt, azaz a matematika alkalmazása a biológiában. A fizikai erők és törvények működését a biológiai rendszerek fejlődésében egyenrangú hatóként kezelte a darwini természetes szelekcióval, felhívva a figyelmet arra, hogy számos biológiai forma és kifejlődés megértéséhez szükségtelen a természetes szelekciót segítségül hívni. Manapság elmélete az evolúciós fejlődésbiológia alapműve, és számos kutatási irány gyökere Thompson műveiben keresendő. Hatása túlmutat a tudományon: szobrászok, festőművészek, építőmérnökök, sőt, még a mesterséges intelligencia arcfelismerő programjai is merítenek belőle, ősforrásuknak tekintik. Amennyiben transzformációs elmélete bizonyítható, úgy életműve a legnagyobb tudósok sorába, Darwinnal egy magasságba emelheti.

ABSTRACT

D'Arcy Wentworth Thompson's transformation theory was not a unanimous success at the time of its publication, although the existence of the parallels and phenomena on which it was based was accepted by all the thinkers of his time. His revolutionary new approach was mathematical biology, that is, the application of mathematics to biology. He treated the operation of physical forces and laws in the evolution of biological systems as an equal force to Darwinian natural selection, pointing out that natural selection was not necessary to understand many biological forms and evolutions. His theory now is the foundation of evolutionary developmental biology, and many lines of research have their roots in Thompson's work. His influence extends beyond science: sculptors, painters, civil engineers, and even facial-recognition AI programs draw on him as a source. If his transformation theory can be proven by evolutionary biology, then his legacy will be elevated to the highest scientific ranks, on a par with Darwin's.

Kulcsszavak: Evo-Devo, transzformációs elmélet, matematikai biológia, interdiszciplináris megközelítés

Keywords: Evo-Devo, transformation theory, mathematical biology, interdisciplinary approach

BEVEZETÉS

Mi mással kezdhethetnénk D’Arcy Wentworth Thompson illő méltatását, mint a 20. század egyik legnagyobb természettudományos ismeretterjesztőjétől, tudósától és iskolateremtőjétől, Stephen Jay Gouldtól vett idézettel: „[Thompson] közreadta gondolatait az organikus formákról, mely gondolatok helyenként különösek, máshol már-már jövőbe látók, ám mindig mélyek. Csaknem harminc évvel a második kiadás megjelenése, és több mint ötven évvel az első kiadás után gondolatai új hatást gyakorolnak a tudományra, mely csak most rendelkezik azzal a technológiával, ami éleselméjűségének mélyére hatol” (Gould, 1976).



D’Arcy Wentworth Thompson 1886-ban
Fotó: Dundee Robertson. A University
of St Andrews Libraries and Museums
szivességéből, ID: ms50128/2, Wikipedia,
licenc: CC0

Gould ezeket a sorokat csaknem ötven évvel ezelőtt vetette papírra, ám meg kell állapítanunk, hogy remek intuitív érzéke, lényeg- és éleslátása itt sem tévedett. Thompson hatása – sajnos elsősorban az angolszász tudományra – ma is élő, jelenvaló. Ez azonban sok tudóssal megesik. Thompson példája azért különleges és mélyen elgondolkoztató, mert nemcsak a természettudományok, hanem a szépművészetek (képző- és festő-), az építészet, sőt, még a zeneművészet jelesei is inspirálójuknak, példaadójuknak tartják, akinek máig friss gondolataiból sokat merítenek. Ki volt ez a különlegesen széles érdeklődésű, egyáltalán nem átlagos egyéniség?

1860-ban született Edinburghban. Édesapja a görög nyelv és a klasszika-filológia professzora, aminek köszönhető kiváló görögstudása. Felsőbb tanulmányait az Edinburghi Egyetemen orvostanhallgatóként kezdte, majd a cambridge-i Trinity College-ban foly-

tatta, ahol már zoológiát hallgatott. 1884-ben a biológia professzorává nevezték ki a Dundee-i Egyetemre, ahol harminckét éven át töltötte be a pozíciót. 1885-ben az Edinburghi Királyi Társaság tagjává választották. 1917-ben a skóciai St. Andrews Egyetemen kinevezték a természettudományok elnökévé, mely posztot egészen haláláig töltötte be. Számos brit és amerikai tudományos társaság választotta tagjai közé, és számos díjjal ismerték el munkásságát. 1948-ban, egy indiai utazást követően egészsége megrendült, és nyolcvanhét éves korában otthonában érte a halál. Sírja az Edinburgh nyugati részén fekvő Dean temetőben található.

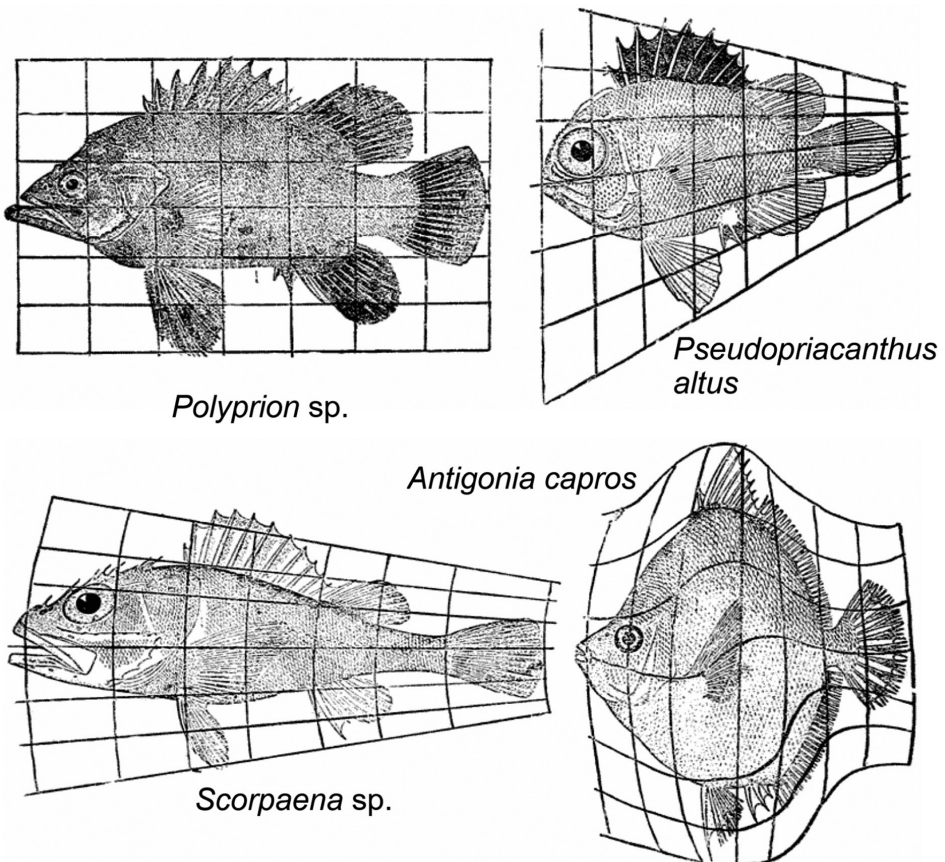
A sommás ítélet szerint egykönyves szerző, ami bár nem felel meg a valóságnak, mégis alapvetően egyetlen könyve az (Thompson, 1917), amely életművéből a legnagyobb hatást gyakorolta (és gyakorolja) korának és korunknak a kultúrájára. Am kezdetben a lelkesedés és elismerés egyáltalán nem volt egyöntetű. Saját kora igencsak másként vélekedett Thompson legfontosabb művéről: Szélszélyes! Anakronisztikus! Nem kapcsolódik korunk biológiájához! – szoltak a vélemények. Ám Thompson megítélése és a reá aggatott jelzők sokkal inkább kora történetírását, semmint az ő tudományát jellemzik. Részletes vizsgálatok, publikálatlan levéltári anyagok és levelezése alapján egyértelmű, hogy széles kapcsolatrendszerrel rendelkezett, egyáltalán nem volt magányos tudós, és biológiája számos nemzetközi kutatási programhoz csatlakozott (Esposito, 2014) – ám ezek nem tartoztak kora tudományának fősodrába.

GONDOLATAI

Az eltérő generációkhoz tartozó két kortárs, korának ünnepelelt tudósa, Charles Darwin és a különcnek tartott D'Arcy Wentworth Thompson meghökkentően eltérő látásmódját talán legjobban az illusztrálja, ahogyan a méhfélék által készített lép szerkezetéről vélekedtek. Darwin ekként látja a méhsejtstruktúrát: „az ismert ösztönök között a legesodálatosabb” (Darwin, 1859). Ugyanazt Thompson emígy: „Mialatt a lép belső sejtjei szimmetrikusan helyezkednek el, ugyanakkora nyomást és feszültséget osztva meg szomszédjaikkal, nagy pontossággal törekedve az egyforma alak kialakítására, a helyzet nyilvánvalóan teljesen más a rendszer határvonalait alkotó sejteknél. Nos, hasonló módon, mint a mi szappanbuborékunk” (Thompson, 1917, 314.). Kétségkívül eredeti megközelítés, és tetten érhető benne a két tudós homlokegyenest ellentétes megközelítése: míg Darwin úgy tekinti az – egyébként valóban bámulatos – méhsejtszerkezetet, mint egy ösztönlény öröklött programját, amelyet a természetes szelekció alakított, addig Thompson értelmezésében ebben semmi felfoghatatlan nincs (különösen nem természetes szelekció), pusztán fizikai törvények és erők érvényesülnek a biológiai struktúrákban, amibe szükségtelen a létért folyó harcot belekeverni.

Ez Thompson leginkább egyedi meglátása, korának fősodrású biológiai gondolkodásától távol álló világa: nem hisz a természetes szelekció egyeduralkodásában és mindenekfölöttiségében, hanem egyéb erők és törvények (jelen esetben fizikai erők) fellépésével és működésével magyaráz számos biológiai formát. Kora ezt az értelmezést elutasította, ugyanakkor megfigyeléseit az abiotikus formák és biológiai jelenségek közti meglepő párhuzamokról mindenki elfogadta. A kétségtelenül meglévő hasonlóságok okairól azonban már heves viták zajlottak.

Híres könyvének kétségkívül leghíresebb fejezete az utolsó, a transzformációk elmélete. Ebben fejt ki központi gondolatát, melyet számos ábrával támaszt alá.



1. ábra. Thompson példái a transzformációs törvényre
(Bal felső saroktól kezdve, az óramutató járása szerint: *Polyprion*, *Pseudopriacanthus altus*,
Scorpaena, *Antigonia capros*)
(Thompson, 1917, 750. figs. 377–380. Közkincs)

Eszerint ha egy véletlenszerűen választott növényt vagy állatot egy descartes-i koordináta-rendszerben ábrázolunk, akkor valamely dimenzió matematikai transzformálásával (azaz a koordináta-rendszer valamely egységének/egységeinek nyújtásával, növelésével, kicsinyítésével, hajlításával, vagy a 90°-os derékszög helyett egyéb szögű koordináta-rendszerbeli transzformálásával) egy rokon fajhoz megszólalásig hasonló formához jutunk (*1. ábra*). Thompson szerint szükségtelen bonyolult szelekciós hatókat keresni, amikor rendelkezésre állnak a fizikai törvények és erők, amelyek hatnak az élővilágra, és annak megfelelően „transzformálják” az élőlényeket, hogy milyen fizikai tényezőkkel jellemezhető környezetbe kerülnek.

Sokan vádolták, hogy ellenzi az evolúciós gondolatot, és a természetes kiválasztódást. Ez azonban nem igaz, sokkal inkább az, hogy a természetes szelekció mindenhatóságába vetett hittel kapcsolatban a végletekig szkeptikus volt. Úgy vélte, hogy a természetes szelekció nem ad mindenre magyarázatot, és egyéb folyamatoknak – mint amilyenek a fizikai erők és törvények – legalább akkora szerepük van az élő rendszerek formálásában.

Leginkább eredeti gondolatai azok, amelyek – ha el nem is utasítják, de – erős kritikával illetik a megfontolás nélkül alkalmazott és minden fa gyökerei közt felfedezni vélt evolúciós adaptációt, amit mélyen elutasított. Ezek a gondolatai vezettek markáns és annyit vitatott elméletének megfogalmazásához.

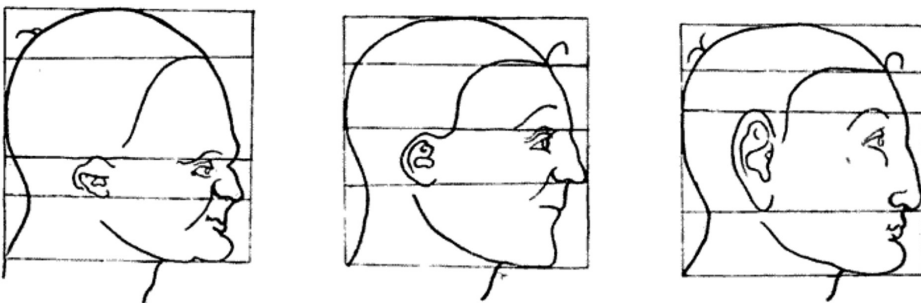
EVO-DEVO

Thompson transzformációs elméletének alkalmazása korunk evolúciós fejlődésbiológiájában (Evo-Devo) azonban igazi áttörést hozott. Annak feltételezése, majd elfogadása, hogy a növekedési arányokban vagy a koordinátamintázatban kifejezett apró különbségek rejtőzhetnek a fajok közötti morfológiai különbségek mélyén, igencsak termékeny feltételezés volt, melynek első és eredeti forrása Thompson. Az evolúciós fejlődésbiológusok régóta elmélkednek azon, hogy a transzformációk eredete talán a sejtosztódás arányainak, időtartamának és irányának megváltozásában rejtőzhet. Ha ez valóban bebizonyosodik, akkor Thompson és munkássága olyan tudományos magasságokba emelkedik, ahol jelenleg kevesen tartózkodnak – kortársa, Darwin közéjük tartozik. Korunk tudománya ezen az úton jó irányban halad. Az evolúciós fejlődésbiológia egyre több bizonyítékot szállít arra, amit Thompson látnoki módon vizionált. Matthew A. Wund és szerzőtársai (2008) a tuskés pikó esetében szellemes kísérletben igazolták, hogy a tuskés pikó az egyedfejlődés során az adott környezet által diktált feltételek szerint fejlődik: az állat fejének és állkapcsának morfológiai plaszticitása oly nagy, hogy eltérő étrenddel táplálva a pikó alakja az étrendnek megfelelő környezetben tapasztalathoz hasonlóan fejlődik ki.

Thompson művének öröksége ma elevenebb és inspirálóbb, mint megjelenése idején. Megközelítése és ötletei ma is meglehetősen eredetiek és relevánsak. A morfológia, morfometria, fejlődésgenetika vagy evolúciós biológia területén számos olyan kutatás zajlik, amelynek ötletét elsőként Thompson vetette föl (Abzhanov, 2017).

MAGÁNYOS KÜLÖNC VAGY JÖVŐBE LÁTÓ ZSENI?

Transzformációs elméletének kidolgozásában sokat segített a családi háttér biztosította klasszikus műveltsége. Igen nagy hatást gyakorolt rá Albrecht Dürer művészete, aki megmutatta számára, hogy az igencsak eltérő emberi alakok közt (2. ábra) pusztán geometriai transzformációkkal folyamatos átmenet létezik. Időbeli kontextusba helyezve talán nem túlzás azt állítani, hogy nemcsak a tudományok és a művészetek közé vert hidat, hanem évszázadok tudását kapcsolta össze és vetítette ki a jövőbe. Amikor az emberi test arányait illetően Dürerhez fordult, az jelentékenyen inspirálta transzformációs elméletét, és klasszikus műveltsége révén tudta, hogy abban bizony ókori, Dürert hatszáz évvel megelőző minták jelenhetnek meg (Dürer, 1532)! Thompson lábjegyzetben utalt Vitruvius művének harmadik fejezetére, amely mű immár kétezer éve része kultúránknak. Igencsak elgondolkodtató, hogy Thompsonon keresztül Vitruvius gondolatai a 20. század sztárépítészeinek műveiben élnek tovább. Nem, Thompson egyáltalán nem volt különc. Szerzteágazó kapcsolatrendszerrel rendelkezett, szűkebb környezetének szeretett, később bálványozott alakja lett, akiről ma már egyértelműen állíthatjuk: jövőbe látó zseni volt.



2. ábra. Thompson ábrája egy az egyben veszi át Dürer 1532-es rajzait, hogy illusztrálja az igencsak különböző emberi fizimiskák egyszerű matematikai transzformációval történő folyamatos átmeneteit (Thompson, 1917, 364. Közkincs)

MAGYARUL

D'Arcy Thompson korszakalkotó műve eddig nem jelent meg magyarul. Sem az első, 1917-es, sem a jelentősen kibővített második, 1942-ben napvilágot látott kiadás. Meglepő, hogy oly sok területen tapintható hatása ellenére magyar nyelven vagy a magyar köz- és tudományos életben milyen keveset olvasunk róla vagy vele kapcsolatban. Egy csaknem harminc évvel ezelőtt megjelent cikkben, amely a fizikai erők szerepét vizsgálja a biológiában (Forgács, 1996), jelent meg Thompson felfogása. Rá két évvel a fullerénekkal kapcsolatban hívták fel arra a figyelmet (Kiss, 1998), hogy a biológiai formák számos esetben mutatnak jóval egyszerűbb, tisztán matematikai szerkezeteket, gömbszerű poliédereket. Legutóbb pedig 2010-ben ezen lap hasábjain jelent meg írás a biológiai mintázatok eredetéről, benne futó utalással Thompsonra (Molnár, 2010). Ezek mellett magyar nyelven nemigen bukkan fel olyan munka, amely érdemben foglalkozna akár Thompson személyével, akár elméletével.

A TUDOMÁNY BERKEIN TÚL

A tudomány – lehet, hogy csak újabb száz év elteltével – megnyugtató helyre helyezi majd Thompson művét és gondolatait a tudomány kiválóságainak nagy csarnokában. Ám gondolatainak inspiratív és provokatív jellegére, egyedi látásmódjára remek példát nyújt mindaz, amit a művészetek merítettek és merítenek belőle. A művészeket ugyanis nem köti oly szigorúan a hierarchia, szokásjog, prioritás, mint a tudomány embereit. Mialatt korunk tudománya megpróbálja Thompson jövőbe látó biológiai gondolatait igazolni, és megtalálni az őt ténylegesen megillető helyet a tudománytörténetben, addig műve olyan területeken hat és inspirál más elméletet, amely területeken kifejthető és fellépő hatásról a tudósok túlnyomó többsége nem is álmodik. Zsenialitásának *a priori* kifejeződése mindaz, amit a művészek merítettek és merítenek az *On Growth and Form* című könyvéből.

Építészet

Jørn Utzon, a Sydney-i Operaház építészé számára az *On Growth and Form* a mindennapos tervezőgyakorlatban oly alapvető volt, hogy ez volt az egyetlen könyv, amelyet kifejezetten ajánlott a tervezőintézetébe belépő új kollégák számára. De merített belőle a New York-i Guggenheim Múzeum tervezője, Frank Lloyd Wright, a Bauhaus legendás tervező-teoretikusa, Ludwig Mies van der Rohe vagy korunk jellegzetes épületeinek tervezője, Norman Foster is (Jarron, 2023). Le Corbusier a *Projekt a korlátlan növekedés múzeumáért* kezdeményezésével 1932-ben hívta fel a figyelmet Thompsonra és gondolataira, majd húsz évvel később ő nyitotta meg Richard Hamilton *Growth and Form* című kiállítását.

Képzőművészet

A nemzetközileg jelentős szobrászművészek közül elsőként *Henry Moore* fedezte fel magának Thompson könyvét. 1919-ben Moore Leedsben volt művészeti hallgató, és ismerkedett meg a könyvvel és gondolataival. A műből merített inspirációk egy évtizeddel később jelennek meg Moore biomorfikus szobraiban (például *Reclining Figure*, 1938), melyek a világhírig repítették alkotójukat. Moore örökségét méltó módon viszi tovább Peter Randall-Page 2009-ben készített szobra (*In the Beginning*), amelyet a sejtosztódás inspirált, és anyaga a foraminiferákat tartalmazó kilkeny-i mészkő, mely lények inspirálták Thompsont arra, hogy a biológia tanulmányozásához matematikai módszereket alkalmazzon.

Festészet

A szeretve gyűlölt, polgárpukkasztónak tartott Jackson Pollock művészetére is nagy hatással volt Thompson műve és gondolatai, akinek saját példánya volt az *On Growth and Form* kötetből. Pollockot különösen a cseppek formaelemzése érdekelte, hiszen műveinek nagy részét a festék csurgatásával, fröcskölésével, spriccelésével hozta létre, úgy, hogy vásznai a megszokottól eltérően az alkotófolyamat során nem állványon lógtak függőlegesen, hanem a padlóra fektetve heverték, miközben Pollock ide-oda járt, hogy különböző színű festéket vagy szokatlan anyagokat szórjon vásznaira. Habár Pollock festményei kuszának, véletlenszerűnek és kaotikusnak tűnnek – akár a természet maga –, mégis megfontolt tervezés és gondos kivitelezés eredményeként keletkeztek, és váltják ki azt a hatást, amely miatt méltán világhírű alkotójuk.

Moholy-Nagy László angliai tanulmányútján 1935–37 között találkozhatott Thompsonnal, akinek gondolatai azonnal megragadták. Lelkesedése nem lankadt, és utolsó, Chicagóban megjelent posztumusz könyvében (*Vision in Motion*, 1947) újabb művészgenerációk figyelmét hívta fel Thompson gondolataira.

A szürrealizmus óriása, Salvador Dalí *A bűvös mesterségbeli tudás ötven titka* (Dalí, 1948) című könyvében számos helyen utal Thompson művére és gondolataira. Lehetne még hosszan sorolni azon kisebb jelentőségű művészeket és alkotásaikat, akiknek munkáit Thompson inspirálta. Az érdeklődő olvasó számára Matthew Jarron (2023) összefoglalóját ajánlom.

Mesterséges intelligencia

Elsőre meghökkentő, ám tulajdonképpen illik hozzá, hogy Thompson munkássága egy olyan területen is felbukkan, ahol a legkevésbé várnánk: korunk mesterségesintelligencia-kutatási iparában szintén hivatkozzák mint kiinduló forrást: „D’Arcy Thompson klasszikus munkájában (Thompson, 1917) megfigyelte, hogy

a hasonló, de nem azonos alakzatok gyakran egybeesésbe hozhatók egyszerű koordináta-transzformációkkal” (MIEA 2009). Thompson felismerését jelenleg a több magyarországi egyetem együttműködésében létrejött kutatási projektben is az arcfelismerő programok fejlesztésénél alkalmazzák mint elméleti alapot és kiindulást.

Zene

Igen, még a zenében is felbukkan Thompson. A Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem doktori iskolájának egyik művében (Burghardt, 2017), amely az aranymetszés formavilágát vizsgálja a zenében és a természetben, jelenik meg Thompson mint az arányképzés a természetben témakör egyik forrása.

ÖSSZEGRZÉS

A kanonizált, jól szervezett, szigorúan tudományterületekre, résztudományokra, szakterületekre és azon belüli specializációra bomló egykor egységes természet-tudomány művelőinek szinte kizárólagos tömegét a főáramlatba tartozó tudósok alkotják: egyre mélyebben ássák bele magukat egyre keskenyebb, egyre kisebb áttekintést biztosító területekre: csak így lehet ugyanis újdonságot elérni, kiemelkedni az átlagból. Az olyan kutatókra, akik ezzel szemben átfogóan, több területre vonatkozóan is újdonságot mondanak, már ferde szemmel néz a fősodrású tudomány, vagy ha nem is néz ferde szemmel, de nem vesz róluk tudomást. Ám gyakran az ilyen különcök (nevezzük őket egyedi látásmódú tudósnak) alapozzák meg új tudományok, korszakalkotó felfedezések elméleti alapjait.

Száz évvel korszakalkotó művének megjelenését követően, 2018-ban a skóciai St. Andrews Egyetemen emlékülést tartottak, ahol Kevin N. Laland fejlődésbiológus így méltatta Thompson munkásságát: „Száz évvel a könyv első kiadása után az *On Growth and Form* még mindig provokatív és inspiráló könyv” (Laland, 2018). Kívánhat-e annál többet egy tudós, hogy művét tudomány és művészet, az élet e két oly távoli területe egyaránt alpműnek tekinti? Bizony, legtöbbször csak sóvárgunk ilyen elismerésre vagy ilyen szellemi teljesítmény elérésére. Őrizzük meg jól emlékezetünkben D’Arcy Wentworth Thompson szellemi örökségét, mert az előttünk álló évtizedekben ez az örökség egyre jelentősebbé válik.

IRODALOM

- Abzhanov, Arhat (2017): The Old and New Faces of Morphology: The Legacy of D’Arcy Thompson’s ‘Theory of Transformations’ and ‘Laws of Growth’. *Development*, 144, 4284–4297. DOI: 10.1242/dev.137505, <https://journals.biologists.com/dev/article/144/23/4284/19222/The-old-and-new-faces-of-morphology-the-legacy-of>
- Burghardt, Benedikt (2017): *Az aranyművészet formavilága a természetben és a zenében*. DLA tézis. Budapest: Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem, https://apps.lfze.hu/netfolder/PublicNet/Doktori%20dolgozatok/benedikt_burghardt/tezis_hu.pdf
- Dalí, Salvador (1948): *Fifty Secrets of Magic Craftsmanship*. New York: Dial Press
- Darwin, Charles (1859): *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London: John Murray, <http://darwin-online.org.uk/content/frameset?pageseq=1&itemID=F373&viewtype=side>
- Dürer, Albrecht (1532): *De Symetria partium in rectis formis humanorum corporum*. Nuremberg, <https://digitalcollections.nyam.org/islandora/object/islandora:1117#page/1/mode/2up>
- Esposito, Maurizio (2014): Problematic “Idiosyncrasies”: Rediscovering the Historical Context of D’Arcy Wentworth Thompson’s Science of Form. *Science in Context*, 27, 1, 79–107. DOI: 10.1017/S0269889713000392, <https://tinyurl.com/yckz5563>
- Forgács Gábor (1996): Fizika a biológiában. *Fizikai Szemle*, 46, 3, 95–97. <https://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz9603/forg9603.html>
- Gould, Stephen Jay (1976): D’Arcy Thompson and the Science of Form. In: Grene, Marjorie – Mendelsohn, Everett: *Topics in the Philosophy of Biology. Boston Studies in the Philosophy of Science* (BSPS) 27. Dordrecht: Springer Dordrecht, 66–97. DOI: 10.1007/978-94-010-1829-6_3 ISBN 9789027705952
- Jarron, Matthew (2023): *A Sketch of the Universe. The Artistic Influence of D’Arcy Thompson*. Art UK. <https://artuk.org/discover/curations/a-sketch-of-the-universe-the-artistic-influence-of-darcy-thompson>
- Kiss Levente (1998): Fullerén szerkezetek az élővilágban. *Természet Világa*, 129, 5, 202. <https://www.termvil.hu/archiv/tv98/tv9805/fulleren.html>
- Laland, Kevin N. (2018): *D’Arcy Thompson and the Extended Evolutionary Synthesis*. Extended Evolutionary Synthesis. 29 June 2018. <https://extendedevolutionarysynthesis.com/darcy-thompson-and-the-extended-evolutionary-synthesis/>
- MIEA (2009): *Mesterséges Intelligencia Elektronikus Almanach*. http://project.mit.bme.hu/mi_almanach/books/aima/ch24s05
- Molnár István (2010): Biológiai mintázatok eredete. *Magyar Tudomány*, 171, 4, 425–436. <http://www.matud.iif.hu/2010/04/06.htm>
- Thompson, D’Arcy Wentworth (1917): *On Growth and Form*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, <https://www.gutenberg.org/files/55264/55264-h/55264-h.htm>
- Wund, Matthew A. – Baker, John A. – Clancy, Brendan et al. (2008): A Test of the “Flexible Stem” Model of Evolution: Ancestral Plasticity, Genetic Accommodation, and Morphological Divergence in the Threespine Stickleback Radiation. *The American Naturalist*, 172, 4, 449–462. DOI: 10.1086/590966