

VASVÁRI TAMÁS–LONGAUER DÓRA–HAUCK ZSUZSANNA

Kiszervezési stratégiák és tanulási hatás a félvezetőiparban

A termelés kiszervezése, más országokba áthelyezése számos iparág sajátossága, aminek háttérében többnyire költségoptimalizálási megfontolások állnak. A saját termelés mellett szóló egyik legfőbb érv a tanulási hatásból eredő haszon. A vállalati tanulás azonban lassú folyamat, így a gyártás kiszervezéséből származó rövid távú előnyök felülírhatják a termelékenységi tudás felhalmozódásának hosszú távú hasznait. A félvezetőipar – mindamellett, hogy saját gyártáson és kiszervezésen alapuló modellekre egyaránt nyújt példát – kulcsfontosságú szerepre tett szert a koronavírus-járvány kitörése óta, mivel a csiphiány számos ágazatban lelassította vagy akár meg is bénította a termelést. Tanulmányunkban egy vállalat kiszervezési döntését modellezzük a félvezetőiparban, figyelembe véve a tanulási hatás és az ellátási ellenálló képesség (reziliencia) gazdasági hatásait. Numerikus szimulációk segítségével mutatjuk be az iparág világgjárvány előtti és utáni helyzetét: míg a járvány kitörése előtt a kiszervezés volt az optimális stratégia, azóta megnőtt a saját gyártás jelentősége. A jelenlegi optimális stratégiák stabilitását ugyanakkor nagyban befolyásolják a külső körülmények – például a relatív gyártási költségek vagy a csiphiány jelentette gazdasági hatások –, amelyek támpontul szolgálhatnak a félvezetőiparral kapcsolatos iparpolitikai megfontolásokhoz.*

Journal of Economic Literature (JEL) kód: L11, L63, M11.

Az elmúlt harminc évben a gyártási tevékenység – többnyire költségoptimalizálási megfontolásokból – fokozatosan tevődött át a fejlett országokból más régiókba, így mára az ipari termékek csaknem 90 százaléka részt vesz a nemzetközi

* A tanulmány alapjául szolgáló TKP2021-NKTA-19. számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Vasvári Tamás tudományos munkatárs, PTE Közgazdaságtudományi Kar Gazdaságtudományi Kiválósági Központ (e-mail: vasvari.tamas@ktk.pte.hu).

Longauer Dóra egyetemi adjunktus, PTE Közgazdaságtudományi Kar Kvantitatív Menedzsment Intézet (e-mail: longauer.dora@ktk.pte.hu).

Hauck Zsuzsanna egyetemi docens, PTE Közgazdaságtudományi Kar Kvantitatív Menedzsment Intézet (e-mail: hauckzs@ktk.pte.hu).

A kézirat első változata 2023. június 13-án érkezett szerkesztőségünkbe.

DOI: <https://doi.org/10.18414/KSZ.2024.2.176>

kereskedelemben. Ez alól a mintegy 600 milliárd dolláros bevételt realizáló félvezetőipar ágazata sem kivétel, ahol az elmúlt évtizedekben két meghatározó stratégia alakult ki: a hagyományos (integrált) gyártók (*Integrated Device Manufacturer, IDM*) saját maguk végzik a tervezést és a gyártást, míg vannak saját termelő kapacitással nem rendelkező (*fabless*) vállalatok, amelyek részére a gyártást szerződéses bérnyártók, úgynevezett *founndry* cégek végzik. Bár a piacvezetők, így az Intel és a Samsung jellemzően az integrált stratégiát követik, a *fabless* modell versenyképességét jól mutatja, hogy mára a tajvani *founndry*, a TSMC bevétel alapján a harmadik, kapacitás alapján pedig a második legnagyobb iparági szereplő. 1995 és 2020 között Kína, Tajvan és Dél-Korea részesedése a világtermelésből 40 százalékponttal nőtt, ezzel párhuzamosan az Egyesült Államok, Európa és Japán részesedése pedig folyamatosan csökkent.

A félvezetők szerepe meghatározó a világkereskedelemben, ezen alkatrészek számos iparág számára kulcsfontosságúak, az otthoni készülékektől kezdve a szórakoztatóiparon és járműgyártáson át a hadiiparig. Nem véletlen, hogy a koronavírus-járvány idején a csiphiány reflektorfénybe került, hiszen a csipekre támaszkodó iparágakban sok esetben kellett leállítani vagy visszafogni a termelést. Kézenfekvő megoldásnak tűnhet ugyan a kapacitások növelése, azonban új gyárak felépítése évekbe is telhet. Ezért a gyártók (*Original Equipment Manufacturer, OEM*) addig is kénytelenek további megoldásokat keresni a félvezetőipartól való függőségük csökkentése érdekében. A járműgyártásban például – mivel egy autó jellemzően több ezer csipet is tartalmazhat – a gyártók inkább elhagynak olyan extrafunkciókat, mint az USB-kimenet vagy az ülésfűtés, annak érdekében, hogy minél hamarabb elkészüljön a termék (Walsh [2022]).

A kialakult helyzetre a kormányzatok is igyekeztek reagálni: mind az Európai Unió, mind az Egyesült Államok külön jogszabályt alkotott a félvezetőgyártás támogatására vonatkozóan. A csipekről szóló európai jogszabály (*EB* [2022]) és a *CHIPS and Science Act* (*White House* [2022]) nemcsak a csiphiány megszüntetésének fontosságát, de az ázsiai gyártókkal szembeni technológiai lemaradás és függőség csökkentését is kiemelik. Ugyanakkor a nyugati országok szerepének erősödését nehezíti az iparágra jellemző rendkívül magas beruházási költség, a megfelelő szintű szaktudás biztosítása, a technológia folyamatos fejlődése, valamint az, hogy a termelékenységi tudás hiányából adódóan a lemaradó vállalatoknak és gazdaságoknak különösen nehéz a felzárkózás.

Annak ellenére, hogy a szakirodalom részletesen elemezte a félvezetőgyártás egyes aspektusait, tudomásunk szerint kevés olyan tanulmány született, amely egyszerre vizsgálná a kiszervezési döntéseket és a tanulási hatást az iparágban. Tanulmányunkban ezért egy olyan *make-or-buy* modellt mutatunk be, amellyel jól megragadhatók egy csipgyártó vállalat kiszervezési döntései. Ezeket iparági adatok segítségével (például beszerzési ár, gyártási változó és fix költség, az életciklus hossza, a csiphiány gazdasági hatásai, tanulási ráta) is számszerűsítjük. Az iparág világgjárvány előtti és azt követő állapotának bemutatása egyúttal lehetővé teszi az iparágban zajló változások értékelését is.

A továbbiakban először áttekintjük az idevágó szakirodalmat, majd áttérünk a félvezetőipar bemutatására. Ezt követően röviden vázoljuk az elméleti modellt és az

abból levonható következtetéseket, majd áttérünk az iparágra vonatkozó numerikus szimulációkra és a diszkusszióra. Az utolsó részben összefoglaljuk következtetéseinket, és kitekintést adunk további kutatási irányokra.

Szakirodalmi áttekintés

Kutatásunk elsősorban a tanulási hatáshoz (*learning-by-doing*), azon belül is ennek a kiszervezési döntésekben játszott szerepéhez kapcsolódik. E vonatkozásban *Deng és szerzőtársai* [2021] modellje két versenytárs (OEM) és egy szerződéses gyártó (CM) kapcsolatát vizsgálja; a szerzők arra jutnak, hogy a versenytársaknak jobban megéri, ha ugyanazzal a vállalattal szerződnek, mivel a bérgyártó magasabb termelési szintje a tanulási hatás révén alacsonyabb költségeket eredményez, ami mindkét versenytárs beszerzési árában érvényesülhet. Kétperiódusos modelljében *Gray és szerzőtársai* [2009] egy beszállító és egy vevő figyelembevételével elemzi az egy termékre (alkatrészre) vonatkozó kiszervezési típusú döntéseket. Hozzájuk hasonló, de játékelméleti eszközöket alkalmazó modellt mutat be *Xiao–Gaimon* [2013], amelynek újítása a termelési tapasztalat jövőértékének beépítése, valamint azon feltételek vizsgálata, amelyek mellett a vevő vállalat részleges kiszervezést választ. Utóbbi stratégia lehetővé teszi, hogy a cég a bérgyártás rövid távú alkalmazásából, valamint a saját gyártásból eredő jövőbeli hasznokat együttesen realizálja. *Longauer és szerzőtársai* [2023] dinamikus modellje szintén tartalmaz hasonló kevert stratégiákat, ugyanakkor figyelembe veszi azt is, hogy az egyes munkaállomások egymástól is tudnak tanulni. A minőség *outsourcing* döntésekben betöltött szerepét vizsgálva *Hauck* [2014] a *bi-sourcing*, azaz a saját gyártás és kiszervezés együttes lehetőségére is felhívja a figyelmet. Fejlett gazdaságok termelésáthelyezési döntéseit vizsgálva *Hauck és szerzőtársai* [2021a] arra a megállapításra jut, hogy a vállalati és az iparági nézőpont jellemzően nem ugyanazt az optimumot adja. *Anderson–Parker* [2002] analitikusan és numerikusan bizonyítja, hogy a kiszervezést inkább el kell kerülni olyan esetekben, amikor alacsony a modularitás, azaz a fejlesztés és a gyártás nehezen választható el egymástól. Azóta számos más tanulmány és gyakorlati példa mutatott rá, hogy a kiszervezés ilyenkor az innovációs képességek csökkenésével jár (például *Mazzola és szerzőtársai* [2019], *Vasvári és szerzőtársai* [2019]). Az innovációs képességek kiszervezés miatti változásának mértéke függ ugyanakkor a modularitás szintjétől, valamint a gyártási technológia érettségétől (*Longauer és szerzőtársai* [2023]). A félvezetőiparban például annak ellenére, hogy a technológia gyorsan fejlődik, a termékfejlesztés és a gyártás között kismértékű a függőség (*Shin és szerzőtársai* [2016]), ezért a gyártást nem indokolt feltétlenül a K + F-funkciók közelébe telepíteni (*Pisano–Shih* [2012]).

A félvezetőipart számos további szempontból vizsgálja a szakirodalom: *Appleyard* [1996], valamint *Liao–Hu* [2007] a tudástranszfert, *Asmat* [2021] az árazást, *Biwer és szerzőtársai* [2018] a kapacitástervezést, *Chiang és szerzőtársai* [2007] pedig az ellátási láncok menedzsmentjét helyezi előtérbe. Az iparág fejlődését részletesen tárgyalja *Scott–Angel* [1987], *Brown–Linden* [2005], *Bown* [2020], valamint *Thorbecke* [2021].

Mathews [1997], valamint *Chang–Wu* [2021] kifejezetten a tajvani fejlesztésekre koncentrálnak. *Dick* [1991], valamint *Irwin–Klenow* [1994] az iparági tanulási hatást vizsgálva megállapították, hogy a félvezetők fajlagos gyártási költsége a termelési szint duplázódásával mintegy 20 százalékkal csökken. A *Mönch–Uzsoy–Fowler* szerzőhármas részletes áttekintést nyújt az ellátásilánc-menedzsment iparág-specifikus tényezőiről; három tanulmányból álló sorozatuk olyan témákat ölel fel, mint a stratégiai hálózatépítés (*Mönch és szerzőtársai* [2018a]), a kereslet és kapacitástervezés (*Uzsoy és szerzőtársai* [2018]) vagy a termelés- és anyagigény-tervezés (*Mönch és szerzőtársai* [2018b]). *Ramani és szerzőtársai* [2022] a félvezetők ellátási láncában bekövetkezett anomáliák hatását elemzi a járműiparra vonatkozóan.¹

Tekintettel arra, hogy az utóbbi néhány évben számos fejlett ország tett kísérletet a félvezetőipar támogatására,² tanulmányunk részben kapcsolódik a termelés anyországba való visszatelepítésének (*reshoring*) irodalmához is. E döntéseknek számos oka lehet, például a korábbi téves döntések felülvizsgálata (lásd *Kinkel–Maloca* [2009], *Gray és szerzőtársai* [2013]), a külső körülmények változására történő reakció (például *Barbieri és szerzőtársai* [2019]) vagy az üzleti stratégiát érintő változások (*Di Mauro és szerzőtársai* [2018]). Ha azonban a kiszervezés általánossá válik egy térségben vagy egy iparágban, úgy a technológiát, a beszállítói bázist, a szaktudást, know-how-t magában foglaló termelési képességek (*industrial commons*) akár teljesen el is tűnhetnek, ami megnehezítheti az újraparositási törekvéseket (például *Pisano–Shih* [2009], *Gurtu és szerzőtársai* [2016]). *Sheffi* [2020] szerint éppen ez az oka annak, hogy a vállalatok nem feltétlenül hagyának fel az ázsiai termeléssel – ott érhetőek el ugyanis a hatékony és versenyképes gyártáshoz szükséges termelési képességek. Ehhez kapcsolódóan *Gurtu és szerzőtársai* [2016] is rámutat, hogy a gyártás hazatelepítése jelentős erőfeszítésekkel járhat mindaddig, amíg a kiszervezés során leépített termelékenységi tudás fel nem zárkózik a ma elvárt szintre.

A félvezetőipar

A félvezetőipar stratégiai jelentőségű technológiát biztosít számos iparág számára (*Paier és szerzőtársai* [2017]), és nagy verseny (*Chang–Wu* [2021]), valamint magas technológiai komplexitás (*Mönch és szerzőtársai* [2018a]) jellemzi termékeit. A félvezető termékek nagy része integrált áramkör vagy csip, amelyek a legkülönbözőbb feladatokat láthatják el: a piac 26 százalékát alkotó memóriacsipek az adattárolásért felelnek, az egyszerűbb diszkrét, analóg és egyéb termékek (*Discrete, Analog, and Other, DAO*) körébe tartoznak például a diódák, illetve az adattovábbításért vagy az energiagazdálkodásért felelős csipek (32 százalék), míg az iparág árbevételeinek legnagyobb részét a logikai egységek adják (42 százalék), amelyek a bonyolult számításokért felelnek (*Varas és szerzőtársai* [2021]). Utóbbiak esetében a számítási

¹ A magyarországi járműipar függőségi viszonyait részletesen vizsgálja *Braun és szerzőtársai* [2020].

² *Hauck és szerzőtársai* [2021b] megmutatta, hogy azokban az országokban, régiókban, ahol nagyobb az ipar aránya, ott gyorsabban volt képes a gazdaság talpra állni a világválság okozta sokkhatás után.

teljesítményt és annak energiaigényét nagyban meghatározza a tranzisztorok száma; a jelenleg egyik legfejlettebb 3 nanométeres technológiával egy csip akár kétszázmillió tranzisztort is tartalmazhat négyzetmilliméterenként, ami rendkívül bonyolulttá teszi a gyártást: a félvezető ostyákon (úgynevezett *wafér*) végzett, 400–1400 lépésből álló mikroműveletek csaknem steril körülményeket és nagyfokú precizitást követelnek (*Varas és szerzőtársai* [2021]). A félvezetők tehát kifejezetten összetett termékek mind a tervezés, mind a gyártás tekintetében, nem véletlen, hogy a vállalatok összevételüknek jellemzően csaknem 20 százalékát kutatás-fejlesztésre költik (*Aubry-Renou-Maissant* [2014]), illetve egy-egy gyár felépítése több évbe és 10–20 milliárd dollárba is kerülhet. A beruházás költségei így messze meghaladják a gyártási költségeket, ami miatt a munkaerő költsége kevésbé fontos szempont a lokáció kiválasztásában vagy a kiszervezési döntésekben (*Brown-Linden* [2005]).

A világgazdaságban az utóbbi évtizedekben lezajlott globalizációs folyamatok erőteljes munkamegosztáshoz vezettek az egyes régiók között. A magas szakképzettségű, így a fejlesztésekért felelős munkaerő jellemzően a fejlett országokban összpontosul, míg a kisebb hozzáadott értékűnek számító tevékenységeket (például gyártás, csomagolás) a kevésbé fejlett régiókban végzik el. A félvezetőiparban két különböző megközelítés alakult ki. A hagyományos modellben a termékfejlesztést és a gyártást is maga a vállalat végzi, ezek a hagyományos (integrált, úgynevezett *IDM*) gyártók, ezzel szemben a saját gyártási kapacitással nem rendelkező (*fabless*) vállalat szerződéses bérnyártókhoz (*foundry*) szervezi ki a gyártást, jellemzően a Távol-Keletre. Közismert integrált vállalat például az Intel és a Samsung, míg az AMD, az Nvidia és az Apple jellemzően kiszervezi a gyártást. A piacvezető bérnyártó a tajvani TSMC, amely 2021-ben mintegy ötszáz ügyfele számára 13 millió (12” méretnek megfelelő) félvezető ostyát gyártott le, ami a globális kapacitás mintegy 13 százaléka (*Knomet Research* [2022]). A saját gyártás nyilvánvaló előnye a K + F és a termelés közelségéből eredő pozitív externáliák, valamint a külföldi beszállítóknak való alacsonyabb kitettség. Nehézséget jelent azonban, hogy a termelés növelése jelentős ráfordításokat igényel, ráadásul a keresleti bizonytalanságok miatt a kapacitások könnyen túltervezhetők (*Biwer és szerzőtársai* [2018], *Chang-Wu* [2021]). Mivel a gyártási kapacitással nem rendelkező vállalatok a termékfejlesztést követően átadják a gyártási feladatokat a szerződéses partnernek, ezért nagyságrendileg kevesebb beruházásra van szükségük, ami hozzájárult a *fabless* modell elterjedéséhez (*Mönch és szerzőtársai* [2018a], *Bown* [2020]).³ A bérnyártók (*foundry*) jellemzően nem rendelkeznek saját márkával vagy termékkel, kizárólag a gyártásra helyezik a súlyt, ezért a K + F-költségeik alacsonyabbak,⁴ és ezeket elsősorban a termelési folyamatok fejlesztésére fordítják. *Shin és szerzőtársai* [2016] ezenfelül kiemeli, hogy az üzleti modellek eltérően teljesítenek az innovációs képességek terén: a gyártás nélküli vállalatok ugyan többet költhetnek K + F-re, de az integrált vállalatok K + F-ráfordításai jobban megtérülnek.

³ Az AMD a 2000-es évek végén eladta gyártókapacitásait. Ezenfelül számos IDM vállalat is tengereitüli beszállítói kapacitásokra támaszkodik hirtelen keresletnövekedés esetén (*Brown-Linden* [2005]).

⁴ Például a TSMC bevételarányos K + F-ráfordításai a felét tették ki az Intel vagy az AMD kiadásainak 2021-ben (7,9 százalék a 19,2 és 17,3 százalékhoz képest).

Napjainkban a félvezetők több mint felét Tajvanban, Kínában és Dél-Koreában gyártják, annak ellenére, hogy a csipek nagy részét az Egyesült Államok, Japán és az EU vállalatai tervezik. Utóbbi régiókban a gyártás 1995 és 2020 között 40 százalékponttal esett vissza, és ezzel a világszintű kapacitásnak már csak kevesebb mint 35 százalékát birtokolták 2020-ban (1. táblázat).⁵

1. táblázat

A félvezetőipar globális tagoltsága (százalék)

	Bevételek székhely szerint (2020)	Kapacitás (2020)	Fogyasztók (2019)
Egyesült Államok	47	13	25
Európa	10	6	20
Japán	10	16	6
Dél-Korea	20	20	2
Tajvan	7	21	1
Kína	5	15	24
Többi ország	1	9	22

Forrás: SIA [2021], IC Insights [2021] és Varas és szerzőtársai [2021].

Ráadásul a vezető technológiákat tekintve még nagyobb a távol-keleti szereplők térnyerése (1. ábra). A kapacitások részarányának Távol-Keletre való eltolódása nagyrészt annak köszönhető, hogy Ázsiában a beruházási költségeket enyhítették a különböző kormányzati támogatások (Brown-Linden [2005]).

Az utóbbi években tapasztalt csiphiány rámutatott arra, hogy egyes gazdaságok mennyire kiszolgáltatottak a félvezetőipari ágazatnak, amelyet egyaránt jellemeznek a megnövekedett átfutási idők és az emelkedő árak.⁶ A jelenségnek számos oka van: a koronavírus-járvány karanténidőszakaiban több iparág (például járműgyártás) visszafogta megrendeléseit, ami arra ösztönözte a beszállítókat, hogy más vevők után nézzenek. Mivel az elektronikai iparban ezzel párhuzamosan jelentős keresletnövekedés alakult ki, ezért hamar átálltak az ő kiszolgálásukra. A digitális transzformáció felerősödése, valamint az okostechnológiák (például a dolgok internete – *Internet of Things, IoT*) térnyerése tovább fokozta az integrált áramkörök és csipek iránti keresletet. A kapacitások visszaeséséhez hozzájárulhatott az Egyesült Államok és Kína közötti „kereskedelmi háború” is.⁷ Ugyanakkor

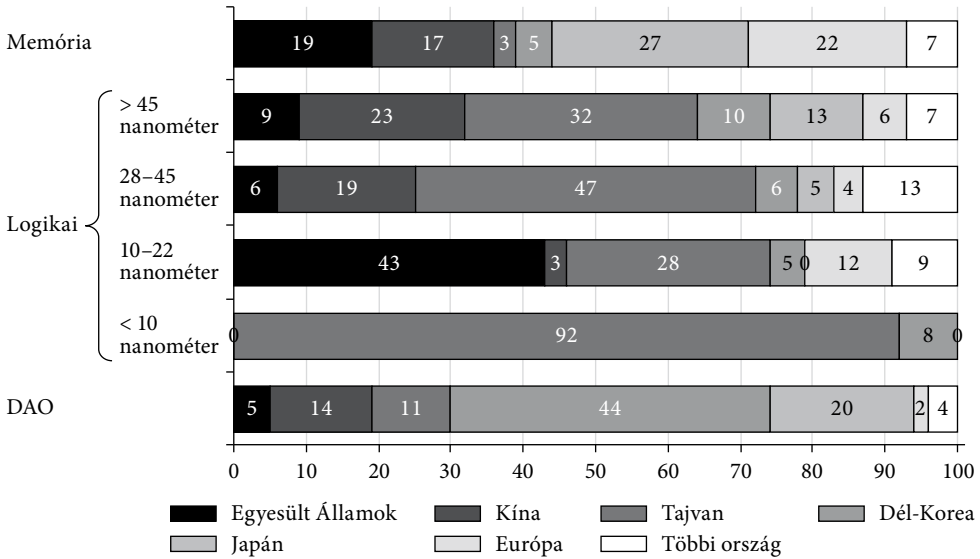
⁵ Ennek megfelelően az értéklánc földrajzilag is összetettebbé vált: a tervező szoftverek elsősorban az Egyesült Államokból érkeznek, a gyártóberendezéseket Európából szállítják Kelet-Ázsiába, ahol a gyártás nagy része történik. A csomagolást és az összeszerelést többnyire Kínában végzik, majd a termékeket a fogyasztókhoz szállítják.

⁶ Az átlagos átfutási idő 2021 előtt 10–15 hét alatt volt, 2022 elejére pedig több mint 25 hétre emelkedett (Peng [2022]).

⁷ A szellemi tulajdon védelmével kapcsolatos problémák miatt az Egyesült Államok 2018-ban 25 százalékos vámot vetett ki a kínai félvezetőimportra (Bown [2020]), míg az amerikai cégek 2019-től

1. ábra

A félvezetőgyártási kapacitások technológia szerint, 2019 (százalék)



Forrás: Varas és szerzőtársai [2021].

az új gyárok és kapacitások építésének magas beruházási és átfutási időigénye miatt a csiphiány várhatóan évekig elhúzódhat, ezért az eredetiberendezés-gyártók kénytelenek alkalmazkodni a megváltozott üzleti környezethez. Rövid távon a csipek iránti kereslet mérséklése gyors eredményeket hozhat: szoftverek átkódolásával például elérhető, hogy egy-egy csip több funkciót ellásson, vagy a terméket bizonyos funkciók (például USB-portok vagy ülésfűtés) nélkül kínálják (Walsh [2022]). Hosszú távon az újabb kapacitások létrehozása vagy a meglévő csipgyártók felvásárlása (például Render [2021]) jelenthet megoldást a vállalati vagy földrajzi függőség csökkentésére.

A félvezetők hiánya a politikai döntéshozók látóterébe is bekerült, felismerve az ázsiai országoktól, illetve gyártóktól való túlzott függőséget. A csipekről szóló európai jogszabály a K + F-tevékenység erősítését, valamint a gyártási és munkaerő-kapacitások növelését célozza, amivel az EU 2030-ra 20 százalékra növelné a részesedését a félvezetők gyártásában (EB [2022]). Az Egyesült Államokban törvénybe iktatott *CHIPS and Science Act* több mint 50 milliárd dollárt alokál K + F, valamint munkaerő- és gyártásfejlesztési célokra (White House [2022]), továbbá 25 százalék adókedvezményt helyezett kilátásba új beruházásokra. Az Intel és a memóriagyártó Micron már be is jelentették új gyárok létrehozását (20, illetve 40 milliárd dollár értékben), Arizonában pedig a TSMC épít új gyárat mintegy 12 milliárd dollár értékben (Reuters [2022]).

korlátozták a félvezetők értékesítését olyan kínai cégeknek, mint a Huawei vagy az SMIC (Thorbecke [2021]). E lépések mindkét országban csökkentették a vállalatok rendelkezésre álló kapacitásokat.

A kutatás motivációja és a modell

A fentiekből jól látszik, hogy a félvezetőiparban a kiszervezési döntések nagyban meghatározzák a vállalati stratégiát, amely során számos iparág-specifikus tényezőt kell figyelembe venni. Egyrészt a kormányzati támogatások, valamint kisebb részben az alacsony munkaerőköltség a távol-keleti országok felé tolták el az új kapacitások létrehozását. Nem véletlen, hogy mára a gyártás mintegy 70 százaléka ebben a régióban koncentrálódik. A bérgyártók (*foundry*) megkönnyítették a gyártás nélküli (*fabless*) vállalatok helyzetét azzal, hogy nem kellett tetemes összegeket investálni a kapacitások telepítésébe, és nem kellett foglalkozniuk az ezzel járó kockázatok mérlegelésével sem, így az olyan magas hozzáadott értékű tevékenységekre koncentrálnak, mint a K + F és a termékfejlesztés. Mindezek ellenére a *fabless* modell nem vált domináns stratégiává; számos, köztük több piacvezető vállalat továbbra is törekedett arra, hogy kiaknázza a saját gyártás pozitív hatását. Mivel azonban a félvezetőiparban a tervezés és a gyártás jellemzően moduláris (*Shin és szerzőtársai* [2016]), ezért az innováció terén a *fabless* és *foundry* vállalatok nem kerülnek hátrányba a hagyományos csipgyártókkal szemben. Ez azt sugallja, hogy a megnövelt kapacitásból eredő tanulási hatás felveszi a versenyt a tervezés–gyártás szinergiákból adódó előnyökkel (*Grimes–Du* [2022]). Az utóbbi évek iparági nehézségei, köztük a csiphiány azonban rávilágított arra, hogy saját gyártási kapacitások hiányában akár teljes szektorok bénulhatnak meg, illetve válhatnak függővé az ázsiai gyártástól. Az ellenálló képesség (reziliencia) és a félvezetők rendelkezésre állása fontosabb tényezővé vált a többi versenyprioritási tényezőnél (*Hauck és szerzőtársai* [2021b]), ezért számos kormányzati kezdeményezés szorgalmazza a saját kapacitások fejlesztését és a félvezetőipar fellendítését.

A fentiek alapján célunk egy olyan modell bemutatása, amely megragadja a félvezetőipar kiszervezési döntéseinek dinamikáját és következményeit. Ehhez figyelembe vesszük a kiszervezés rövid távú költségelőnyét, a gyártás közbeni tanulás révén elért termelékenységnövekedés hosszú távú hatását és az alacsonyabb reziliencia negatív gazdasági következményeit. A numerikus részben a modellt iparági adatokkal töltjük fel, aminek a segítségével lehetőségünk lesz a globális csipgyártás jelenlegi és pandémia előtti helyzetének összehasonlítására.

A kiszervezési probléma

A fenti jelenség illusztrálására egy dinamikus dinamikus (*make-or-buy*) döntési modellt írunk fel, ahol figyelembe vesszük, hogy a gyártás során tanulási hatások érvényesülnek. Utóbbin azt értjük, hogy a termelési tapasztalat növekedésével egyre csökken a gyártás változó költsége. A modellben feltételezzük, hogy adott időegység alatt fix mennyiséget gyárt a vállalat, amelyet jelölünk y -nal. A kapacitás rögzítése lehetővé teszi, hogy a vállalati tanulás költségekre gyakorolt hatására koncentráljunk (lásd például *Xiao–Gaimon* [2013]). A vállalat arról dönt, hogy ennek a fix mennyiségnek mekkora hányadát (y hány százalékát) termelje házon belül, azaz adott t -edik

időszakban mennyi legyen a házon belüli gyártás aránya, amelyet jelöljünk x_t -vel, amelyre $0 \leq x_t \leq 1$ teljesül. Vagyis a vállalat a fix volumen x_t arányát házon belül gyártja, míg $1 - x_t$ arányát kiszervezi. A használt jelöléseket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

A modell jelölései

Jelölés	Jelentés
$t \in [0, T]$	Diszkrét időindex, mely az időperiódusokat jelöli (az időperiódus hossza mérhető évben, hónapban, hétben stb.)
$T > 0$	A termék életciklusának hossza
$x_t \in [0, 1]$	A házon belüli gyártás aránya a teljes gyártáson belül a t -edik időperiódusban (döntési változó)
$q_t \geq \bar{q}_0$	A t -edik időpontig legyártott összes mennyiség
$c(q_t) > 0$	A házon belüli gyártás egységköltsége a t -edik időpontig gyártott összes mennyiség függvényében (konstans függvény). Feltételezzük, hogy $c(0) = c_0$, $\lim_{q \rightarrow \infty} c(q) = 0$, $c_q < 0$, $c_{q^2} > 0$
$y > 0$	A t -edik időperiódusban szükséges teljes volumen (konstans)
$f > 0$	A t -edik időperiódusban felmerülő, y kapacitáshoz szükséges fix költség (konstans)
$p > 0$	A beszerzés egységköltsége (konstans)
$\tau \geq 0$	A hiány/hátralék miatti egységnyi kibocsátásra vetített veszteség (konstans)
$r \in [0, 1)$	Diszkontráta (konstans)
$\rho \geq 0$	A tanulási rátát meghatározó paraméter (a tanulási ráta az $1 - 2^{-\rho}$ összefüggés alapján számolható)

Kiszervezés (*buy*) esetén a vállalat feltételezésünk szerint p egységáron jut hozzá a termékhez a szállítótól. Mivel a félvezetők súlya elenyésző az értékükhöz képest, ezért feltételezzük, hogy ez az ár a szállítási költséget is magában foglalja. A reziliencia megragadása érdekében bevezetjük a τ paramétert, amely a hiány vagy a határidőn túli leszállítás miatti veszteséget jelenti. A vállalat kiszervezéshez kapcsolódó költsége a t -edik időszakban a jelöléseink alapján ezek szerint $(p + \tau)(1 - x_t)y$.

Házon belüli gyártás (*make*) esetén a vállalatnak a termeléshez kapcsolódó költsége keletkezik. Feltevésünk szerint a termelés egységköltsége függ a vállalat korábbi gyártási tapasztalatától. A kumulatív gyártási mennyiség növekedése csökkenti az egységköltséget, amit a növekvő termelési tapasztalat tesz lehetővé (lásd például Dick [1991], Vörös [2021]). A tanulási hatás erőssége természetesen függ a termék és a termelési folyamat komplexitásától. A félvezetőiparban a tanulási ráta jellemzően 20 százalék körüli, ami azt jelenti, hogy a kumulatív output megduplázódása a termelési költség 20 százalékos csökkenését eredményezi (Irwin-Klenow [1994]). Mindez abban érhető tetten, hogy az adott időegység alatt előállított termékek mennyisége és a selejtarány is javul (Dick [1991]). A modellben q_t -vel jelöljük a t -edik időpontig házon belül megtermelt összes termékmennyiséget, és Vörös [2021] alapján a következő mozgásegyenletet alkalmazzuk:

$$q_t = q_{t-1} + x_{t-1}y. \quad (1)$$

A házon belüli gyártás kumulatív termelési volumentől függő egységköltségét írja le a $c(q)$ függvény, amelynek tulajdonságai Dick [1991] alapján a következők:

- a) $c(0) = c_0$,
- b) $\lim_{q \rightarrow \infty} c(q) = 0$, (2)
- c) $c_q < 0$, $c_{q^2} > 0$.

Az a) feltétel alapján az egységköltség c_0 , amennyiben a vállalat még nem rendelkezik gyártási tapasztalattal. A b) alapján az egységköltség alsó korlátja nulla, hiszen negatív értéket nem vehet fel a függvény. A c) pedig azt biztosítja, hogy a termelési egységköltség a kumulatív kibocsátás csökkenő és konvex függvénye (c_q és c_{q^2} a költségfüggvény első- és másodrendű deriváltjai). Mivel a fix költségek mértéke döntő jelentőségű lehet a kiszervezési típusú dilemmáknál, és ez különösen igaz a félvezetőiparra, bevezetjük a termelés fix költségét is, melyet f -fel jelölünk a modellben, és amelyről feltesszük, hogy mértéke arányos a vállalat által alkalmazni kívánt házon belüli termelés arányával. A vállalat házon belüli gyártáshoz kapcsolódó költsége a t -edik időperiódusban ezek alapján $[c(q_t)y + f]x_t$.

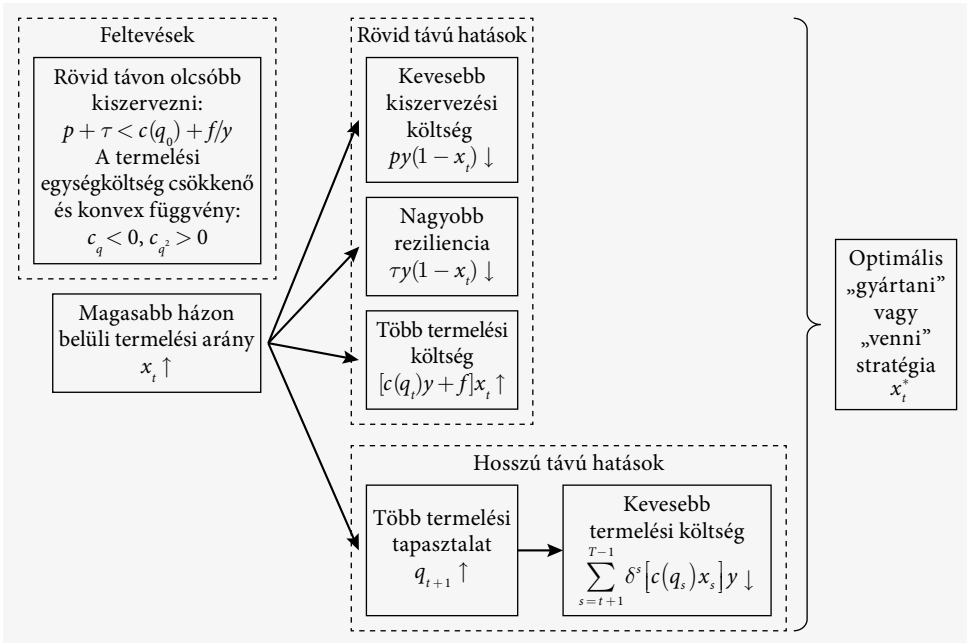
A vállalat teljes költsége a t -edik időperiódusban a kétféle esethez kapcsolódó költség összegeként áll elő, vagyis $[c(q_t)y + f]x_t + (p + \tau)y(1 - x_t)$. Értelemszerűen amennyiben $x_t = 1$ -et választ a vállalat, úgy a teljes gyártást házon belül végzi (tisztá *make* stratégia). Amennyiben a döntés $x_t = 0$, akkor a vállalat a teljes kiszervezést választja (tisztá *buy* stratégia). Ugyanakkor a felírt modellben előfordulhat olyan optimális költségszerkezet is, ahol a vállalat egy köztes megoldást választ, azaz házon belül is gyárt, és beszállítók segítségét is igénybe veszi, azaz $0 < x_t < 1$ esete (kiszervezési stratégia). Utóbbi esetben részleges kiszervezést valósít meg a vállalat.

Mindemellett élünk az irodalomban általánosan elfogadott feltételezésekkel (lásd például Gilbert és szerzőtársai [2006]), miszerint nincs minőségbeli különbség a saját gyártású és a beszállító által előállított termékek között, valamint mindkét vállalat számára rendelkezésre állnak a kapacitások és inputok a szükséges volumen legyártásához. A döntési időhorizont $T > 0$, ami egyben a termék életciklusának hosszát is jelenti, ez idő alatt feltételezzük, hogy az r diszkontráta konstans ($0 \leq r < 1$).

A 2. ábra bemutatja, hogy milyen mechanizmusok lépnek életbe, ha a vállalat növeli a saját termelésének részarányát. A rövid távú hatások között kell megemlíteni a növekvő rezilienciából fakadó előnyöket, továbbá a magasabb házon belüli részarány rövid távon több termelési költséggel, ugyanakkor kevesebb kiszervezési költséggel jár együtt. Mindezen hatásokon felül hosszú távon a vállalat a tanulási hatásnak köszönhetően csökkenteni tudja a termeléshez kapcsolódó költségeit a termelési tapasztalat bővülése következtében. E rövid és hosszú távú hatások eredőjeként határozható meg az optimális házon belüli termelési arány.

2. ábra

Az optimális kiszervezési stratégia meghatározása tanulási hatás mellett



Az alkalmazott modell és megoldása

A fentiekben bevezetett hosszú távú költségoptimalizáló modellt írja le a (3) diszkrét idejű optimalizálási probléma. A vállalat a saját termelés arányáról dönt, vagyis x_t a vállalat döntési változója. A cég az első időperiódus elején dönt a saját gyártás arányáról a teljes tervezési időhorizontra nézve, vagyis a cél az x_t házon belüli optimális (költségminimalizáló) termelési pálya megtalálása.

$$\min_{x_t \in [0, 1]} TC_0(x_t) = \sum_{t=0}^{T-1} \delta^t \{ [c(q_t)x_t + (p + \tau)(1 - x_t)]y + fx_t \},$$

$$\text{feltéve, hogy } q_t = q_{t-1} + x_{t-1}y = \bar{q}_0 + \sum_{k=0}^{t-1} x_k y, \tag{3}$$

ahol $\delta = 1/(1 + r)$ a diszkontráta alapján számított diszkonttényező, \bar{q}_0 pedig a vállalat által a döntési időszak kezdetéig legyártott mennyiséget jelöli. Az optimalizálási probléma megoldását a Függelékben adjuk közre, itt már csak az optimális döntést közöljük. A döntési változó optimális értékére a következő szabályt kapjuk:

$$x_t = \begin{cases} 1, & \text{ha } \lambda_t > c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau) \\ \in [0, 1], & \text{ha } \lambda_t = c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau), \\ 0, & \text{ha } \lambda_t < c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau) \end{cases} \quad (4)$$

ahol bevezettük a λ_t változót, amely a saját gyártásból eredő tanulási hatás költségekre tett jövőbeli értékét fejezi ki, és azt mutatja meg, hogy mennyi költséget tud a vállalat hosszú távon megtakarítani a tanulási hatásnak köszönhetően, ha a kiszervezéssel szemben a házon belüli gyártást választja az adott időperiódusban. Mivel feltevések szerint a tanulás következtében a fajlagos termelési költség csökken ($c_q < 0$), ezért $\lambda_t > 0$.

A kiszervezést a vállalatok jellemzően azért választják, mert rövid távon olcsóbb stratégia, mint a termelés, emiatt $c(q_t) + f/y > (p + \tau)$.

A (4) döntési szabály értelmében a kiszervezési döntés kimenetelét a t -edik időperiódusban az határozza meg, hogy milyen a hosszú távú költséghaszna a tapasztalati tanulásnak (λ_t), és ehhez képest mekkora rövid távon a két stratégia fajlagos költsége közötti különbség [$c(q_t) + f/y - (p + \tau)$]. Ha a tanulási hatás hosszú távú költséghaszna nem elegendő ahhoz, hogy fedezze a termelés rövid távú költséghátrányát, vagyis $\lambda_t < c(q_t) + f/y - (p + \tau)$, akkor a vállalat a kiszervezést fogja választani, és emiatt $x_t = 0$. Ellenkező esetben, vagyis $\lambda_t > c(q_t) + f/y - (p + \tau)$ esetén a tanulási hatás elég erős ahhoz, hogy a vállalat a termelés rövid távú költséghátránya ellenére mégis a saját gyártás mellett döntsön, emiatt $x_t = 1$ lesz a döntés. Amennyiben a kétféle, hosszú távú és rövid távú hatás éppen egyenlő, úgy kevert, azaz kiszervezési stratégiát alkalmaz a vállalat. A *Függelékben* megmutatjuk, hogy ez utóbbi kevert stratégia instabil, és emiatt csak átmenetileg fordulhat elő.

A modell arra is rávilágít, hogy ha a vállalat a saját gyártás mellett döntött, akkor ehhez tartani is fogja magát, és nem vált kiszervezésre, hiszen a tanulásból származó költségelőnyöket képes lesz hosszú távon érvényesíteni.

Numerikus szimulációk

A következőkben a modellt a félvezetőipar koronavírus-járvány előtti és utáni paramétereivel (3. táblázat) töltjük fel, amivel célunk az optimális kiszervezési stratégiák változásai mögött álló okok feltárása.

A tanulás gyártási költségekre gyakorolt hatását az irodalomban gyakran alkalmazott összefüggéssel írjuk le (lásd *Anderson–Parker* [2002], *Xiao–Gaimon* [2013], *Vörös* [2021]):

$$c(q_t) = \frac{c_0}{(1 + q_t)^\rho}, \quad (5)$$

3. táblázat

A paraméterek értékei a koronavírus-járvány előtt (kiinduló állapot) és után (jelenlegi állapot)

Paraméter/jelölés	Kiinduló állapot	Jelenlegi állapot
A félvezető ostyák beszerzési egységára (p) – referenciaérték	1	1
A félvezető ostyák előállítási egységköltsége (c_0)	1,7832	1,4000
A termelés egy félvezető ostyára vetített fix költsége ($F = Tf$)	3,5073	3,9206
A termék életciklusának hossza (T)	10	7
Kiinduló termelési tapasztalat (\bar{q}_0)	0	0
Tanulási ráta ($1 - 2^{-\rho}$) (százalék)	20	20
A csiphiány gazdasági hatása (τ)	0,000	0,5478
Diszkontráta (r) (százalék)	0	4

ahol $c_0 > 0$ a kezdeti, azaz minden korábbi gyártási tapasztalat hiányában ($q_t = 0$) elért fajlagos gyártási költség, és $\rho \geq 0$ a tanulási rátát meghatározó paraméter. A tanulási ráta azt fejezi ki, hogy a termelési volumen minden egyes megduplázódásával milyen mértékben csökken a fajlagos gyártási költség; mértékét az $1 - 2^{-\rho}$ összefüggés írja le (Irwin–Klenow [1994]). Az (5) összefüggés alapján a tanulásnak a korai periódusokban van a legnagyobb jelentősége (Jarmin [1994]), mivel kezdetben a költségek gyorsabban csökkennek, majd ez a csökkenés lelassul, ahogy nő az összkibocsátás, és egyre érettebbé válik a technológia.

Mivel a félvezetőpiaci adatokhoz való hozzáférés különösen nehéz (Aubry–Renou–Maissant [2014], Shin és szerzőtársai [2016]), ezért a paraméterek meghatározása során üzleti jelentésekre, folyóiratokra vagy más forrásokra támaszkodtunk. A numerikus szimulációkat a logikai egységek gyártásának két meghatározó szereplője, az Intel mint integrált gyártó vállalat, valamint a TSMC mint bérnyártó vállalat adatai alapján végezzük el. Az iparág világgjárvány előtti állapotából indultunk ki, és – elsősorban a kapacitásadatok elérhetősége miatt – 2014. évi adatokat használtunk. Referenciaértékünk az egy félvezető ostyára jutó beszerzési költség, amelyet a TSMC kapacitásaiból számoltunk ki. A gyártási költséget az Intel egy félvezető ostyára jutó közvetlen költségei (*cost of goods sold*) alapján becsültük.⁸ A fix költség a TSMC által 2014-ben bevezetett 16/12 nanométeres technológia becsült beruházási költségéből származik (Khan–Mann [2020] 44. o.). Kezdetben 10 éves termékéletciklust vettünk figyelembe,⁹ és az éves fix költséget ezen időtáv felhasználásával számoltuk ki. A kezdeti termelési előzményeket és a diszkontrátát nullának tekintettük, míg a tanulási rátát Irwin–Klenow [1994] alapján 20 százalékra állítottuk. Az egyszerűség kedvéért az éves kapacitást mindkét esetben egynek vettük (azaz $y = 1$), és a fix költségeket erre a referenciakapacitásra normalizáltuk.

⁸ Ehhez a TSMC, illetve az Intel 2014. évi jelentését vettük figyelembe. A kapacitások forrása: IC Insight [2016].

⁹ 2022-ben a TSMC teljes bevételének még mindig jelentős, 13 százalékát tette ki a 16/12 nanométeres technológia.

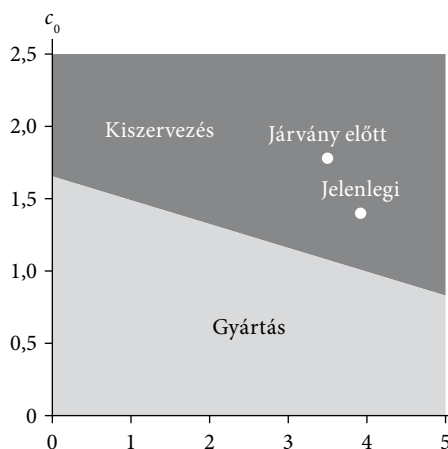
Az iparág dinamikájának megragadására a szimulációkat lefuttattuk a járvány követő paraméterértékek behelyettesítésével is. A gyártási költségek és a beszerzési árak közötti különbség több forrás szerint is csökkent (például *Varas és szerzőtársai* [2020], *Scheper* [2022]). Összhangban az iparági tapasztalatokkal, a termékéletciklus hosszát hét évre rövidítettük. A fix költséget a TSMC Arizonában épülő új gyáranak teljes értéke és tervezett kapacitása alapján módosítottuk (*Reuters* [2022]). A csiphiány gazdasági hatását az első kiinduló állapotban nullának tekintettük, azaz nem feltételeztünk hiányt vagy jelentős késedelmet. A járvány óta a félvezetőknél tapasztalt ellátási problémák ugyanakkor egyes becslések szerint csak az Egyesült Államok gazdaságának 240 milliárd dollár kárt okoztak (*Rowell* [2022]), ezt az összeget a 2021. évi globális kapacitásra vetítve becsültük meg a csiphiány hatását.¹⁰ A járvány után tapasztalható emelkedő kamatok miatt a diszkontrátát 4 százalékra módosítottuk.¹¹

A numerikus szimulációk eredményét a 3–5. ábra mutatja be, bal oldalon a koronavírus-járvány előtti, jobb oldalon a járvány utáni állapotot ábrázoltuk. Minden grafikonon egy pont jelöli az iparág adatok alapján számított optimális stratégiáját az adott időszakban. Általánosságban megállapítható, hogy 2020 előtt a kiszervezés volt az optimális stratégia, míg jelenleg a házon belüli gyártás tűnik indokoltnak. A változás fő oka elsősorban a csiphiány gazdasági hatásának jelentős növekedése

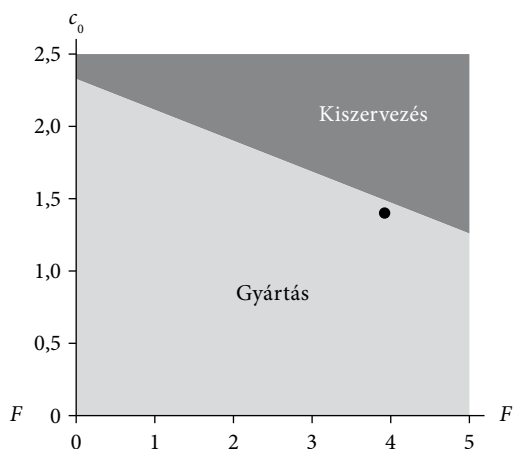
3. ábra

Optimális stratégiák a félvezetőiparban: fix költség (F) és termelési költség (c_0)

Járvány előtti, kiindulási állapot



Járvány utáni, jelenlegi állapot



¹⁰ Elfogadjuk, hogy ebben a formában ez egy nagyvonalú becslés (például jobb lenne, ha csak az amerikai felhasználást vennénk figyelembe, azonban erre vonatkozóan nem áll rendelkezésre információ), de véleményünk szerint a valós gazdasági hatást ez a megközelítés inkább alulbecsüli; például az *AlixPartners* [2021] becslése szerint csak az autóiparban 210 milliárd dollár gazdasági kárt okozott a csiphiány.

¹¹ 2023. március 31-én az Egyesült Államokban 4,75–5,00 százalékos az alapkamat, az euróövezetben 3,50 százalékos, míg az Egyesült Királyságban 4,25 százalékos (<https://tradingeconomics.com/country-list/interest-rate>).

és a termelési költség beszerzési költségekhez viszonyított arányának csökkenése. Megjegyezzük, hogy a koronavírus-járvány utáni optimális stratégia relatíve közel helyezkedik ahhoz a területhez, ahol már a kiszervezés választása lenne kifizetődő – ez azt sugallja, hogy a külső tényezők változása könnyen újra a kiszervezés felé billentheti a vállalatokat.

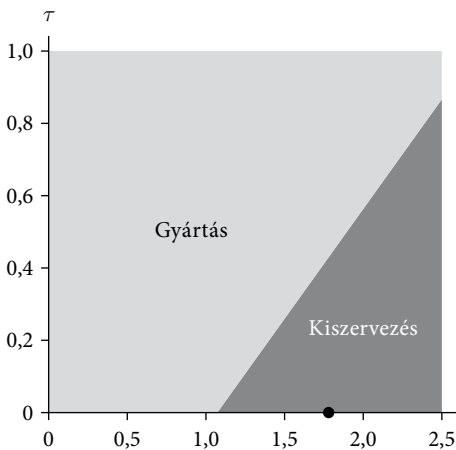
A 3. ábra a fix és termelési költségek függvényében mutatja be az optimális stratégiákat. Azt látjuk, hogy a saját termelés esélye csökken, ha e költségek növekednek. Azonban míg a járvány előtt a saját gyártás és a kiszervezés közötti stratégiák közötti határvonal nagyjából a grafikon közepén helyezkedik el, addig a jelenlegi feltételek felfelé tolják el ezt a határvonalat, amivel a saját gyártás válik az optimális stratégiává. Megjegyezzük, hogy a termelési és a fix költségek jelenlegi kombinációja a járvány előtti esetben kiszervezéshez vezetett volna.

A termelési költség és a csiphiány gazdasági hatása közötti kapcsolatot mutatja be a 4. ábra. A kiindulási állapotban, amikor a termelési költségek szintje viszonylag alacsony volt, és az iparág nem szembesült ellátási zavarokkal, kézenfekvő döntés volt kiszervezés választása. Modellünk azonban azt sugallja, hogy ma már racionálisabb lehet a házon belüli gyártás.

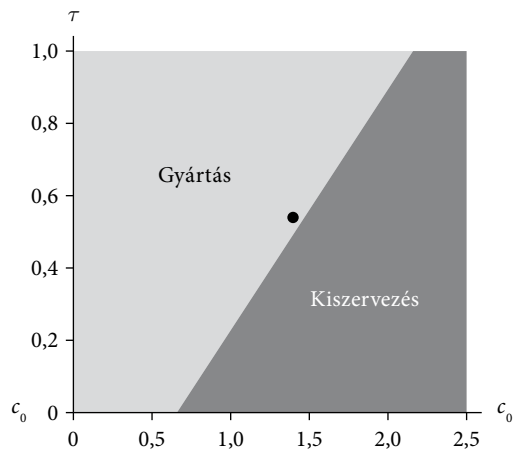
4. ábra

Optimális stratégiák a félvezetőiparban: termelési költség (c_0) és a csiphiány gazdasági hatása (τ)

Járvány előtti, kiindulási állapot



Járvány utáni, jelenlegi állapot

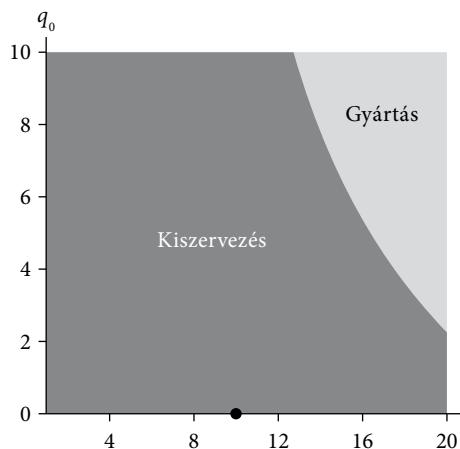


Végül az 5. ábra a termelési tapasztalat és a termékéletről kapcsolatot szemlélteti. Ez alapján elmondható, hogy a korábbi termelési tapasztalat csak akkor játszik szerepet, ha az életről 12 évnél hosszabb, minden egyéb esetben a kiszervezés az optimális stratégia. A koronavírus-járvány utáni időszakra vonatkozóan a modell szerint a házon belüli termelés ajánlott lehet még a gyártási múlttal nem rendelkező (*fabless*) vállalatok számára is. Figyelembe véve a stratégiák közötti határvonal meredekségét, elmondható, hogy – összevetve a járvány előtti állapottal – a korábbi gyártási tapasztalat kisebb szerepet játszik a jelenlegi döntésekben.

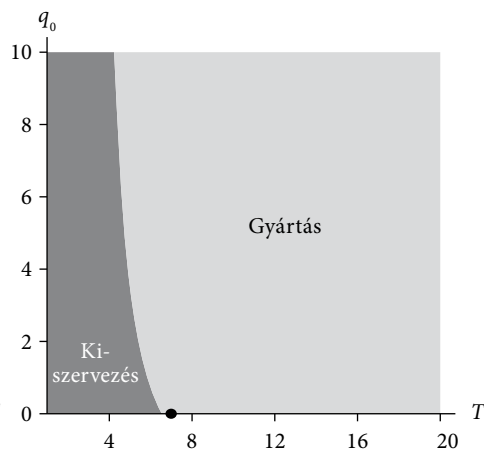
5. ábra

Optimális stratégiák a félvezetőiparban: termékéletciklus (T) és termelési tapasztalat (q_0)

Járvány előtti, kiindulási állapot



Járvány utáni, jelenlegi állapot



Következtetések

Általános modellünkben két egyszerű következtetést vonhatunk le a tanulási hatás kiszervezési típusú döntésekben játszott szerepével kapcsolatban. Egyrészt, ha a kiszervezés rövid távon költséghatékony is bizonyul, hosszú távon mégis racionális lehet a házon belüli gyártást választani, mivel a termelési költségek a tanulás hatására idővel csökkenhetnek. Másrészt, a tanulási hatás számbavétele a korábbi kiszervezési döntések felülvizsgálatához vezethet. Ez utóbbi különösen hangsúlyos lehet a félvezetőiparban, hisz az ellátási zavarok és a növekvő csiphiány egyik oka az ázsiai gyártóközpontoktól való függés, aminek a csökkentéséhez szükséges lehet a termelési funkciók relokációja (*insourcing* vagy *reshoring*).

Ez alapján felmerülhet a kérdés, hogy a gyártókapacitással nem rendelkező (*fabless*) vállalatok túlonként rövid távra optimalizáltak-e azzal, hogy termelésüket a Távol-Keletre szervezték ki. Szimulációink szerint nem, mivel a világvárvány előtti időszakban egyértelműen a termeléskihelyezés volt az optimális döntés, még akkor is, ha figyelembe vesszük a tanulási hatás (*learning-by-doing*) pozitív hatásait. Bár az ázsiai bérnyereség költségelőnye főként a kormányzati ösztönzőknek volt köszönhető, szimulációink szerint a beruházási vagy foglalkoztatási ösztönzők sem tarthaták volna vissza a termelés fejlett országokból való kiáramlását. A 3. ábra jól szemlélteti, hogy a világvárvány előtt a kiszervezés az optimális stratégia a beruházási költségek bármilyen értéke esetén, illetve akkor is, ha a gyártási költségek és a beszerzési ár közötti különbség a harmadára csökkenne.

Kétségtelen, hogy a kiszervezés több szempontból is rendkívül előnyös volt a vállalatok számára: nem terhelték őket a jelentős beruházási kiadások, és többnyire védve voltak a kereslet bizonytalanságaitól is. Ezenfelül a tervezési és termelési

tevékenységek modularitása miatt a gyártás és a K + F szétválasztása nem járt technológiai hátránnyal sem. Ugyanakkor a bérgyártók jelentős kapacitásokat tudtak kiépíteni, ami a termelés felfutásával a gyártási költségek csökkenéséhez vezetett. Ez alátámasztja *Deng és szerzőtársai* [2021] megállapításait, miszerint a kiszervezés mind a gyártás nélküli, mind a bérgyártó vállalatok számára előnyös volt.

Minden előnye ellenére a Távol-Keletre történő kiszervezés számos kockázatot rejt magában, legyen szó szállításról, minőségről vagy a szellemi jogok védelméről. A félvezetőipar példája rámutat, hogy ezek a zavarok (például a csiphiány) milyen könnyen átterjedhetnek más iparágakra. Úgy tűnik azonban, hogy a saját gyártókapacitással rendelkező vállalatok jobb helyzetben vannak, és kevésbé vannak kitéve késéseknek vagy megnövekedett átfutási időnek. Ennek megfelelően modellünkbe beépítettünk egy paramétert a csiphiány gazdasági hatására vonatkozóan. Nem meglepő, hogy a jelenlegi helyzetben a házon belüli gyártás tűnik optimális stratégiának. Modellünk azonban további következtetésekkel is szolgál. Egyrészt, amint azt a 3. ábra a járvány utáni időszakra vonatkozóan szemlélteti, az optimális stratégia érzékeny a termelési költségekre, azaz a saját gyártás változó költségének relatív növekedése újfent a kiszervezési stratégia felé terelheti a vállalatokat. Ez összhangban van *Varas és szerzőtársai* [2020] megállapításaival, amely szerint ma már a beruházási költségek és a kormányzati ösztönzők mellett a munkaerő költségének is nagy szerepe van a gyárak telepítése során, annak ellenére, hogy *Brown-Linden* [2005] még nem tulajdonított ennek nagy jelentőséget. Ez rávilágít arra, hogy a gazdasági környezet milyen irányba változott az elmúlt évtizedben: amennyiben a jelenlegi termelési költségeket a járvány előtti forgatókönyv alapján jelenítjük meg, az optimális stratégia a kiszervezés lenne. Ez alátámasztja, hogy a munkaerő költségének kisebb szerepe volt a korábbi időszakokban. Másrészt, a csiphiány negatív gazdasági hatásai miatt növekedhetnek a beszerzési árak,¹² ami a termelés költségének relatív csökkenését eredményezheti, tovább erősítve a saját gyártást. Jelenleg azonban e stratégia közel áll a választóvonalhoz, ami azt is sugallja, hogy az iparági optimum rendkívül érzékeny a külső hatásokra, amelyek könnyen újra a kiszervezés felé terelhetik a vállalatokat. Például, ha a csiphiány mértéke csökken, akkor a termelési költségek relatív csökkenése is megáll, és e két hatásnak köszönhetően újra a kiszervezés lehet az optimális stratégia (4. ábra). Harmadrészt, modellünk azt sugallja, hogy amíg a termék életciklusa meghaladja a hat évet, még a termelési tapasztalat nélküli (*fabless*) vállalatok is megfontolhatják saját gyártórészleg létrehozását (5. ábra).

Összegzés

A koronavírus-járvány óta a félvezetőipar számos iparág számára jelent szűk keresztmetszetet. Az okok nyilvánvalóak: a többletkeresletet új kapacitások telepítésével lehetne érdemben kielégíteni, ami azonban több évet vesz igénybe, és jelentős

¹² A TSMC már 2021-ben 20 százalékkal emelte árait, amit 2022-ben további 5–8 százalékos emelés követett (*Sevilla* [2022], *Ting-Fang-Li* [2022]).

ráfordításokat igényel. Ennek kapcsán egy vállalat kiszervezési döntési problémáját modelleztük, figyelembe véve a saját termelésből eredő tanulási hatást. Numerikus szimulációkkal mutattuk be, hogy a félvezetőgyártásban a modell szerint mi az optimális stratégia, és az hogyan változott az elmúlt évtizedben.

Az elméleti modellből két egyszerű tanulságot tudunk levonni. Egyrészt, ha a kiszervezés rövid távon költséghatékonyak is bizonyul, hosszú távon racionális lehet a saját gyártás mellett dönteni. Másrészt, a tanulási hatás számbavétele a korábbi kiszervezési döntések felülvizsgálatához, akár a termelés hazatelepítéséhez is vezethet.

Az elmúlt évtizedekben jelentős termelőkapacitások jöttek létre Ázsiában, amivel nagyban eltolódott az egyes régiók részaránya a félvezetőgyártásban. A beruházások és a gyártás széles körű kormányzati támogatása jelentős kapacitások létrehozását tette lehetővé ebben a régióban, az olcsóbb gyártás pedig mágnesként vonzotta a tengerentúli megrendeléseket. Ez ugyanakkor lehetőséget adott a gyártás nélküli (*fabless*) vállalatok számára, hogy mentesüljenek a nagy terheket jelentő beruházások alól, egyúttal a bérnyújtásra (*foundry*) hárítva a keresleti bizonytalanságok kockázatát is. Mai szemmel – tekintettel az iparágból eredő ellátási zavarokra – ezek a kiszervezési döntések rendkívül rövidlátónak tűnhetnek. Szimulációink eredményei alapján azonban arra jutottunk, hogy a kiszervezés megalapozott döntés volt, és még a kormányzati ösztönzők sem tudták volna megállítani ezt a folyamatot.

A csiphiány számos iparágra bénítóan hatott, ami felvetette a távol-keleti gyártóktól való függőség csökkentését, új hazai kapacitások kiépítését. Számos nyugati országban születtek kormányzati kezdeményezések a félvezetőgyártás újjáélesztése érdekében. Modellünkben arra a következtetésre juthatunk, hogy az iparág jelenlegi helyzetében a saját gyártás a kormányzati ösztönzők nélkül is előnyös lehet a termelési múlttal nem rendelkező cégek és a saját gyártással rendelkező vállalatok számára is. A kapacitások fejlesztése azonban korántsem egyszerű, mivel a korábbi évtizedek kiszervezéseinek hatására leépültek azok a termelési képességek (például szaktudás, beszállítói hálózat), amelyek az iparág működtetéséhez szükségesek.¹³ Nem véletlen, hogy inkább a vertikális integráció kiterjesztése, a már meglévő csipgyártók felvásárlása a gyakoribb, amire már az autóiparban is láthattunk példát (*Render* [2021]). Hozzáteesszük azonban, hogy az optimális stratégia rendkívül érzékeny: a csiphiány mértékének csökkenése például könnyen a kiszervezésre ösztönözheti a vállalatokat. Már most is vannak jelei az eszközök, például a PC-k vagy az okostelefonok iránti kereslet csökkenésének (*de Laubier* [2022]) és a kiegészítők növekedésének (*Culpan* [2022], *Dobberstein* [2022]), ami előrevetíti a félvezető iránti kereslet csökkenését is. Az optimum érzékenységből az is következik, hogy a változásokhoz való alkalmazkodás, a reziliencia kulcsfontosságú az iparágban. Ez jelentheti a termelési stratégiák (beszerzés és saját gyártás) közötti váltás rugalmasságát, de értelmezhető akár a szuboptimális helyzet elfogadásaként mindaddig, amíg az iparág vissza nem tér a *status quo*-hoz, és a beszerzési nehézségek enyhülésével újra a kiszervezés lesz az optimális stratégia. Utóbbi azonban ellentétes lehet

¹³ A TSMC új arizonai gyáránál jelentős nehézségeket okoz a megfelelő ellátási lánc kialakítása (*Patterson* [2022]).

az ipari és politikai érdekekkel, emiatt a kormányzati ösztönzőprogramok még nagyobb hangsúlyt kaphatnak a jövőben.

Tanulmányunkban átfogó képet kívántunk nyújtani a félvezetőiparról, azonban számos lehetőség kínálkozik a további kutatásra. Először is azt feltételeztük, hogy a cég teljes kapacitással termel, és a költségek minimalizálására törekszik, ami a félvezetők iránti jelenlegi túlkereslet idején igaz is. A keresleti oldal modellbe való beépítése azonban jobban segítheti az üzleti döntések megértését abban az esetben, ha a vállalatok nem szembesülnek hiánnyal és ellátási problémákkal. Ez az irány ugyanakkor lehetőséget ad arra is, hogy a termék árának és minőségének dinamikáját is figyelembe vegyük a kiszervezési típusú döntésekben (Vörös [2019]).

Hivatkozások

- ALIXPARTNERS [2021]: Shortages related to semiconductors to cost the auto industry \$210 billion in revenues this year, says new AlixPartners forecast. Press Release, szeptember 12. <https://www.alixpartners.com/media-center/press-releases/press-release-shortages-related-to-semiconductors-to-cost-the-auto-industry-210-billion-in-revenues-this-year-says-new-alixpartners-forecast/>.
- ANDERSON, E. G.–PARKER, G. G. [2002]: The Effect of Learning on the Make/Buy Decision. *Production and Operations Management*, Vol. 11. No. 3. 313–339. o. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2002.tb00189.x>.
- APPLEYARD, M. M. [1996]: How Does Knowledge Flow? Interfirm Patterns in the Semiconductor Industry. *Strategic Management Journal*, Vol. 17. No. 52. 137–154. o. <https://doi.org/10.1002/smj.4250171112>.
- ASMAT, D. [2021]: Collusion Along the Learning Curve: Theory and Evidence from the Semiconductor Industry. *The Journal of Industrial Economics*, Vol. 69. No. 19. 83–108. o. <https://doi.org/10.1111/joie.12235>.
- AUBRY, M.–RENOU-MAISSANT, P. [2014]: Semiconductor industry cycles: Explanatory factors and forecasting. *Economic Modelling*, Vol. 39. 221–231. o. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.02.039>.
- BARBIERI, P.–STEFANO, E.–FRATOCCHI, L.–GOLINI, R. [2019]: Relocation of second degree: Moving towards a new place or returning home? *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 25. No. 3. 100525. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2018.12.003>.
- BIWER, S.–FILIPEK, M.–ARIKAN, E.–JAMMERNEGG, W. [2018]: Capacity Planning Challenges in a Global Production Network with an Example from the Semiconductor Industry. Winter Simulation Conference (WSC), Göteborg, 3639–3650. o. <https://dx.doi.org/10.1109/WSC.2018.8632286>.
- BOWN, CH. P. [2020]: How the United States Marched the Semiconductor Industry into Its Trade War with China. *East Asian Economic Review*, Vol. 24. No. 4. 349–388. o. <https://dx.doi.org/10.11644/KIEP.EAER.2020.24.4.384>.
- BRAUN ERIK–KISS TIBOR–SEBESTYÉN TAMÁS [2020]: A magyar járműipar kapcsolati szerkezetének vizsgálata. A német járműipartól való függőség alakulása. *Közgazdasági Szemle*, 67. évf. 6. sz. 557–584. o. <https://dx.doi.org/10.18414/KSZ.2020.6.557>.

- BROWN, C.–LINDEN, G. [2005]: Offshoring in the Semiconductor Industry: A Historical Perspective. *Brookings Trade Forum, Offshoring White-Collar Work*, 279–333. o. https://www.jstor.org/stable/25058769#metadata_info_tab_contents.
- CHANG, B.-G.–WU, K.-S. [2021]: The nonlinear relationship between financial flexibility and enterprise risk-taking during the COVID-19 pandemic in Taiwan's semiconductor industry. *Oeconomia Copernicana*, Vol. 12. No. 2. 307–333. o. <https://dx.doi.org/10.24136/oc.2021.011>.
- CHIANG, D.–GUO, R.-S.–CHEN, A.–CHENG, M.-T.–CHEN, CH.-B. [2007]: Optimal supply chain configurations in semiconductor manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 45. No. 3. 631–651. o. <https://dx.doi.org/10.1080/00207540600792499>.
- CULPAN, T. [2022]: A new normal is dividing the global chip industry. *The Economic Times*, augusztus 17. <https://economictimes.indiatimes.com/small-biz/trade/exports/insights/a-new-normal-is-dividing-the-global-chip-industry/articleshow/93606836.cms?from=mdr>.
- DE LAUBIER, CH. [2022]: Why the global chip market is seizing up despite massive investments. *Le Monde*, szeptember 28. https://www.lemonde.fr/en/economy/article/2022/09/28/why-the-global-chip-market-is-seizing-up-despite-massive-investments_5998492_19.html.
- DENG, S.–GUAN, X.–XU, J. [2021]: The coepetition effect of learning-by-doing in outsourcing. *International Journal of Production Research*, Vol. 59. No. 2. 516–541. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1696493>.
- DICK, A. R. [1991]: Learning by Doing and Dumping in the Semiconductor Industry. *Journal of Law and Economics*, Vol. 34. No. 4. 131–159. o.
- DI MAURO, C.–FRATOCCHI, L.–ORZES, G.–SARTOR, M. [2018]: Offshoring and backshoring: A multiple case study analysis. *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 24. No. 2. 108–134. o. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2017.07.003>.
- DOBBERSTEIN, L. [2022]: TSMC reports record profits as customers hoard chips. *The Register*, július 15. https://www.theregister.com/2022/07/15/tsmc_record_profits/.
- EB [2022]: A csipekről szóló európai jogszabály. Európai Bizottság, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_hu.
- GILBERT, S.–XIA, Y.–YU, G. [2006]: Strategic outsourcing for competing OEMs that face cost reduction opportunities. *IIE Transactions*, Vol. 38. No. 11. 903–915. o. <https://doi.org/10.1080/07408170600854644>.
- GRAY, J. V.–TOMLIN, B.–ROTH, A. V. [2009]: Outsourcing to a Powerful Contract Manufacturer: The Effect of Learning-by-Doing. *Production and Operations Management*, Vol. 18. No. 5. 487–505. o. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01024.x>.
- GRAY, J. V.–SKOWRONSKI, K.–ESENDURAN, G.–RUNGTUSANATHAM, M. J. [2013]: The reshoring phenomenon: What supply chain academics ought to know and should do. *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 49. No. 2. 27–33. o. <https://doi.org/10.1111/jscm.12012>.
- GRIMES, S.–DU, D. [2022]: China's emerging role in the global semiconductor value chain. *Telecommunications Policy*, Vol. 46. No. 2. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101959>.
- GURTU, A.–SEARCY, C.–JABER, M. Y. [2016]: Effects of offshore outsourcing on a nation. *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 7. 94–105. o. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.06.001>.
- HAUCK ZSUZSANNA [2014]: Az outsourcing és az integráció közötti választás szempontjai, avagy minőség teszi a döntést. *Vezetéstudomány*, 45. évf. 4. sz. 41–50. o. <https://doi.org/10.14267/veztud.2014.04.04>.

- HAUCK ZSUZSANNA–LONGAUER DÓRA–VASVÁRI TAMÁS [2021a]: Termelésáthelyezési döntések modellezése a fejlett gazdaságokban. *Sigma*, 52. évf. 3. sz. 269–292. o.
- HAUCK ZSUZSANNA–VASVÁRI TAMÁS–VÖRÖS JÓZSEF [2021b]: Iparági sérülékenység a pandémia tükrében. *Scientia et Securitas*, 2. évf. 3. sz. 316–323. o. <https://doi.org/10.1556/112.2021.00057>.
- IC INSIGHT [2016]: Samsung, TSMC Remain Tops in Available Wafer Fab Capacity. *Research Bulletin*, január 6. <https://www.icinsights.com/news/bulletins/Samsung-TSMC-Remain-Tops-In-Available-Wafer-Fab-Capacity/>.
- IC INSIGHT [2021]: Taiwan Maintains Edge as Largest Base for IC Wafer Capacity. *Research Bulletin*, július 13. <https://www.icinsights.com/news/bulletins/Taiwan-Maintains-Edge-As-Largest-Base-For-IC-Wafer-Capacity/>.
- IRWIN, D. A.–KLENOV, P. J. [1994]: Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry. *Journal of Political Economy*, Vol. 102. No. 6. 1200–1227. o.
- JARMIN, R. [1994]: Learning by Doing and Competition in the Early Rayon Industry. *The RAND Journal of Economics*, Vol. 25. 441–454. o. <https://doi.org/10.2307/2555771>.
- KHAN, M. S.–MANN, A. [2020]: AI Chips: What They Are and Why They Matter. Center for Security and Emerging Technology, április, <https://cset.georgetown.edu/publication/ai-chips-what-they-are-and-why-they-matter/>.
- KINKEL, S.–MALOCA, S. [2009]: Drivers and antecedents of manufacturing offshoring and backshoring. A German perspective. *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 15. No. 3. 154–165. o. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2009.05.007>.
- KNOMETA RESEARCH [2022]: Top Five Leaders Continue Expanding Share of Global IC Fab Capacity. Knometa Research, San Diego, július 4. <https://www.knometa.com/news/?post=top-five-leaders-continue-expanding-share-of-global-ic-fab-capacity&tag=global-wafer-capacity>.
- LIAO, SH.-H.–HU, T.-CH. [2007]: Knowledge transfer and competitive advantage on environmental uncertainty: An empirical study of the Taiwan semiconductor industry. *Technovation*, Vol. 27. No. 6–7. 402–411. o. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2007.02.005>.
- LONGAUER DÓRA–HAUCK ZSUZSANNA–VASVÁRI TAMÁS [2023]: Make-or-Buy Strategies in a Multi-Stage Manufacturing Process and the Role of Learning Effect in Relocation Decisions. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 180. 109259. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109259>.
- MATHEWS, J. A. [1997]: A Silicon Valley of the East: Creating Taiwan's Semiconductor Industry. *California Management Review*, Vol. 39. No. 4. 25–55. o. <https://doi.org/10.2307/41165909>.
- MAZZOLA, E.–BRUCCOLERI, M.–PERRONE, G. [2019]: The curvilinear effect of manufacturing outsourcing and captive-offshoring on firms' innovation: The role of temporal endurance. *International Journal of Production Economics*, Vol. 211. 197–210. o. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.010>.
- MÖNCH, L.–UZSOY, R.–FOWLER, J. W. [2018a]: A survey of semiconductor supply chain models. Part I: semiconductor supply chains, strategic network design, and supply chain simulation. *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 13. 4524–4545. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1401233>.
- MÖNCH, L.–UZSOY, R.–FOWLER, J. W. [2018b]: A survey of semiconductor supply chain models. Part III: master planning, production planning, and demand fulfilment. *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 13. 4565–4584. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1401234>.

- PAIER, M. F.–DÜNSER, M.–UNGER, A. [2017]: Regional Knowledge Creation in a Global Industry: An Empirical Agent-Based Model of the Austrian Semiconductor Industry. Szeptember 7. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3039326>.
- PATTERSON, A. [2022]: TSMC's Culture Clash at Arizona Fab. EE Times, március 1. <https://www.eetimes.com/tsmcs-arizona-culture-clash/>.
- PENG, I. [2022]: Wait Times for Chip Deliveries Grow Again as Shortages Persist. Bloomberg, március 11. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-03-11/wait-times-for-chip-deliveries-grow-again-as-shortages-persist>.
- PISANO, G. P.–SHIH, W. C. [2009]: Restoring American Competitiveness. Harvard Business Review, Vol. 87. No. 7–8. 114–125. o.
- PISANO, G. P.–SHIH, W. C. [2012]: Does America Really Need Manufacturing? Harvard Business Review, Vol. 90. No. 3. 94–102. o.
- RAMANI, V.–GHOSH, D.–SODHI, M. S. [2022]: Understanding systemic disruption from the Covid-19-induced semiconductor shortage for the auto industry. Omega, Vol. 113. 102720. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102720>.
- RENDER, B. [2021]: OM in the News: Ford and GM Move into Chip Making with Vertical Integration. Jay, Barry and Chuck OM blog, november 23. <https://heizerrenderom.wpcomstaging.com/2021/11/23/om-in-the-news-ford-and-gm-move-into-chip-making-with-vertical-integration/>.
- ROWSELL, J. [2022]: How much has the semiconductor shortage cost? Supply Management, május 5. <https://www.cips.org/supply-management/news/2022/may/how-much-has-the-semiconductor-shortage-cost/>.
- REUTERS [2022]: Taiwan's TSMC progressing well with Arizona chip plant, governor says. Reuters, augusztus 31. <https://www.reuters.com/technology/tsmc-making-excellent-progress-with-arizona-chip-plant-state-governor-says-2022-08-31/>.
- SEVILLA, G. [2022]: TSMC planning another price increase. Insider Intelligence, május 13. <https://www.insiderintelligence.com/content/tsmc-planning-another-price-increase>.
- SCHEPER, F. [2022]: A revitalized semiconductor industry will power Europe's digital future. World Economic Forum, szeptember 2. <https://www.weforum.org/agenda/2022/09/a-revitalized-semiconductor-industry-will-drive-europes-digital-future/>.
- SCOTT, A. J.–ANGEL, D. P. [1987]: The US semiconductor industry: a locational analysis. Environment and Planning, Vol. 19. No. 7. 875–912. o.
- SHEFFI, Y. [2020]: The New (Ab)Normal. Reshaping Business and Supply Chain Strategy beyond Covid-19. MIT CTL Media, Cambridge, Mass.
- SHIN, N.–KRAEMER, K. L.–DEDRICK, J. [2016]: R&D and firm performance in the semiconductor industry. Industry and Innovation, Vol. 24. No. 3. 280–297. o. <http://dx.doi.org/10.1080/13662716.2016.1224708>.
- SIA [2021]: State of the U.S. Semiconductor Industry. <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-SIA-State-of-the-Industry-Report.pdf>.
- THORBECKE, W. [2021]: The Semiconductor Industry in the Age of Trade Wars, COVID-19, and Strategic Rivalries. Megjelent: Kathuria, S. (szerk.): Age of Ferment: Developments in Asian–European Trade Relations. Konrad Adenauer Stiftung's Regional Economic Programme Asia (SOPAS), 21.–34. o. <https://kas-japan.or.jp/wp-content/uploads/2022/06/Age-of-Ferment.pdf>.
- TING-FANG, CH.–LI, L. [2022]: Chip giant TSMC plans further price rises amid inflation concerns. Financial Times, május 17. <https://www.ft.com/content/a5b1b807-1975-4bcb-be82-b894f56be40c>.

- UZSOY, R.–FOWLER, J. W.–MÖNCH, L. [2018]: A survey of semiconductor supply chain models. Part II: demand planning, inventory management, and capacity planning, *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 13. 4546–4564. o. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2018.1424363>.
- VARAS, A.–VARADARAJAN, R.–GODRICH, J.–YINUG, F. [2020]: Government Incentives and US Competitiveness in Semiconductor Manufacturing. BCG–SIA, szeptember 16. <https://www.bcg.com/publications/2020/incentives-and-competitiveness-in-semiconductor-manufacturing>.
- VARAS, A.–VARADARAJAN, R.–GODRICH, J.–YINUG, F. [2021]: Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era. BCG–SIA, április, https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/BCG-x-SIA-Strengthening-the-Global-Semiconductor-Value-Chain-April-2021_1.pdf.
- VASVÁRI TAMÁS–DANKA SÁNDOR–HAUCK ZSUZSANNA [2019]: Termelés és innováció – tanulságok a hazai iparpolitika számára. *Közgazdasági Szemle*, 66. évf. 10. sz. 1031–1055. sz. <http://dx.doi.org/10.18414/Ksz.2019.10.1031>.
- VÖRÖS JÓZSEF [2019]: An analysis of the dynamic price-quality relationship. *European Journal of Operational Research*, Vol. 277. No. 3. 1037–1045. o. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.03.032>.
- VÖRÖS JÓZSEF [2021]: Production dynamics in case of organizational learning. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 157. 107340. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107340>.
- WALSH, D. [2022]: How auto companies are adapting to the global chip shortage. MIT Sloan, június 21. <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/how-auto-companies-are-adapting-to-global-chip-shortage>.
- WHITE HOUSE [2022]: Fact Sheet: CHIPS and Science Act Will Lower Costs, Create Jobs, Strengthen Supply Chains, and Counter China. The White House, augusztus 9. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/09/fact-sheet-chips-and-science-act-will-lower-costs-create-jobs-strengthen-supply-chains-and-counter-china/>.
- XIAO, W.–GAIMON, C. [2013]: The Effect of Learning and Integration Investment on Manufacturing Outsourcing Decisions: A Game Theoretic Approach. *Production and Operations Management*, Vol. 22. No. 6. 1576–1592. o. <https://doi.org/10.1111/poms.12042>.

Függelék

A diszkrét idejű kiszervezési probléma megoldásának levezetése

Az alábbiakban megadjuk A kiszervezési probléma című alfejezetben formalizált (3) döntési probléma megoldását.

$$\min_{x_t \in [0, 1]} TC_0(x_t) = \sum_{t=0}^{T-1} \delta^t \left\{ [c(q_t)x_t + (p + \tau)(1 - x_t)]y + fx_t \right\},$$

$$\text{feltéve, hogy } q_t = q_{t-1} + x_{t-1}y = \bar{q}_0 + \sum_{k=0}^{t-1} x_k y. \quad (\text{F1})$$

Vegyük a teljesköltség-függvény x_t szerinti elsőrendű deriváltját:

$$\begin{aligned} \frac{\partial TC_0}{\partial x_t} &= \delta^t \left\{ [c(q_t) - (p + \tau)]y + f \right\} + \sum_{k=t+1}^{T-1} \delta^k c_{q_k}(q_k) x_k y^2 = \\ &= \delta^t y \left[c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau) + \sum_{k=t+1}^{T-1} \delta^{k-t} c_{q_k}(q_k) x_k y \right] = \delta^t y \left[c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau) - \lambda_t \right], \end{aligned} \quad (F2)$$

ahol felhasználtuk a $\frac{\partial c(q_k)}{\partial x_t} = \frac{\partial c(q_k)}{\partial q_k} \cdot \frac{\partial q_k}{\partial x_t} = c_{q_k}(q_k) y (k > t)$ parciális deriváltakat,

illetve bevezettük a $\lambda_t = - \sum_{k=t+1}^{T-1} \delta^{k-t} c_{q_k}(q_k) x_k y$ jelölést. Ez utóbbi kifejezés fontos,

ugyanis a saját gyártásból eredő tanulási hatás jövőbeli hasznát fejezi ki, és azt mutatja meg, hogy mennyi költséget tud a vállalat megtakarítani a kumulatív kibocsátás marginális növekedése következtében, vagyis a kiszervezéssel szemben a házon belüli gyártás révén. A kifejezés tehát a tanulási hatásból következő hosszú távú költségmegtakarítást fejezi ki (a t -edik időperiódusra diszkontálva). Mivel a termelési költség-függvénnyel kapcsolatos (2) feltételezéseink alapján $c_q < 0$, emiatt $\lambda_t > 0$, így összességében a tanulási hatás csökkentheti a vállalat hosszú távú költségeit.

A továbbiakban megmutatjuk, hogy x_t -nek három értéke lehet optimumban, de a három esetből csak kettő stabil. Rögzítsük minden változó értékét, kivéve x_t -t. A teljes költség-függvény x_t szerinti második deriváltja ekkor a következő:

$$\frac{\partial^2 TC_0}{\partial x_t^2} = \delta^t y \left[\sum_{k=t+1}^{T-1} \delta^{k-t} c_{q_k^2}(q_k) x_k y^2 \right], \quad (F3)$$

ahol $c_{q_k^2}(q_k)$ jelöli a $c(q_k)$ függvény q_k szerinti másodrendű deriváltját. Az (F3) kifejezés előjele a c_{q_k} deriváltaktól függ. Mivel a (2) feltevések értelmében $c_{q_k} > 0$, emiatt (F3) pozitív, és a TC_0 teljes költség-függvény konvex az x_t döntési változóban. Ez azt jelenti, hogy létezhet olyan megoldás, amely esetén x_t a $[0, 1]$ intervallum valamely belső értékét veszi fel a $\partial TC_0 / \partial x_t = 0$ szükséges feltétel által meghatározott pontban. A másik két megoldás az intervallum határára esik, ha $\partial TC / \partial x_t > 0$ a teljes $[0, 1]$ intervallumon, akkor a teljes költség-függvény növekszik x_t -ben, és emiatt az optimális döntés $x_t = 0$, míg ellenkező esetben, vagyis $\partial TC / \partial x_t < 0$ esetén a teljes költség x_t csökkenő függvénye, vagyis $x_t = 1$ lesz a helyes döntés. Az optimális döntést ezek alapján a következő szabállyal fogalmazhatjuk meg:

$$x_t = \begin{cases} 1, & \text{ha } \lambda_t > c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau), \\ \in [0, 1], & \text{ha } \lambda_t = c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau), \\ 0, & \text{ha } \lambda_t < c(q_t) + \frac{f}{y} - (p + \tau). \end{cases} \quad (F4)$$

Az alábbiakban megmutatjuk, hogy a közbenső, köztes optimumnak megfelelő állapot rendkívül instabil, hiszen az (F2) derivált értéke és emiatt a döntési és az állapotváltozó által meghatározott dinamikus rendszer folyamatosan változik, instabillá téve ezzel bármilyen belső megoldást. Ennek bizonyítására nézzük meg, hogyan változik időben az (F2) kifejezésben szereplő $c(q_t) - \lambda_t$ tag [a kifejezésben szereplő $f/y - (p + \tau)$ tag konstans, így ez időben változatlan]:

$$\begin{aligned}
 \Delta[c(q_t) - \lambda_t] &= [c(q_{t+1}) - \lambda_{t+1}] - [c(q_t) - \lambda_t] = \\
 &= \left[c(q_{t+1}) + \sum_{k=t+2}^{T-1} \delta^{k-t-1} c_{q_k}(q_k) x_k y \right] - \left[c(q_t) + \sum_{k=t+1}^{T-1} \delta^{k-t} c_{q_k}(q_k) x_k y \right] = \\
 &= [c(q_{t+1}) - c(q_t)] + \frac{1-\delta}{\delta} \sum_{k=t+1}^{T-1} \delta^{k-t} c_{q_k}(q_k) x_k y - c_{q_{t+1}}(q_{t+1}) x_{t+1} y = \\
 &= \frac{1-\delta}{\delta} \sum_{k=t+1}^{T-1} \delta^{k-t} c_{q_k}(q_k) x_k y = -\frac{1-\delta}{\delta} \lambda_t = -r \lambda_t < 0, \tag{F5}
 \end{aligned}$$

ahol felhasználtuk, hogy $c(q_{t+1}) - c(q_t) \approx c_{q_{t+1}}(q_{t+1}) x_{t+1} y$. Vagyis $\lambda_t > 0$ alapján a kifejezés időben csökkenő, amit úgy is értelmezhetünk, hogy a termelés a kiszervezéshez képest időben egyre költséghatékonyabbá válik a vállalat számára. Legfontosabb következménye mindennek azonban az, hogy az (F2) derivált függvény időben folyamatosan változik, instabillá téve ezzel a belső optimum szerinti megoldást. A modell előrejelzése alapján tehát nem jellemző, hogy a vállalatok kevert stratégiát alkalmazzanak (részleges kiszervezés), hacsak a döntés háttérében nem valamilyen egyéb, a modell által nem kezelt tényező áll, például elégtelen gyártási kapacitás.