

# A globális klímaváltozás becslésére készült új RCP kibocsátási scenáriók összehasonlítása

SZAKDOLGOZAT  
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK  
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

**Mester Máté Attila**

Témavezető:

**Dr. Pongrácz Rita**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Alapfogalmak, definíciók, az RCP kifejezés értelmezése .....	4
3. Az RCP forgatókönyvek megszületése: elvárások, követelmények az új scenáriókkal szemben, a létrehozás körülményei .....	8
4. Az RCP forgatókönyvcsalád ismertetése.....	12
4.1 Az RCP 8.5 scenárió bemutatása.....	12
4.2 Az RCP 6.0 scenárió bemutatása.....	19
4.3 Az RCP 4.5 scenárió bemutatása.....	26
4.4 Az RCP 2.6 scenárió bemutatása.....	33
5. A forgatókönyvek kiterjesztései: az ECP-k bemutatása.....	41
6. Alkalmazások, felhasználás a gyakorlatban .....	44
7. Összefoglalás .....	48
Köszönetnyilvánítás .....	49
Irodalomjegyzék .....	50

# 1. Bevezetés

A globális éghajlatváltozás kutatásában kiemelt szerepet játszanak a kibocsátási forgatókönyvek vagy más szóval scenáriók. Segítségükkel vizsgálhatók az emberiség ma meghozott döntéseinek hosszú távú következményei mind a társadalmi és gazdasági folyamatokban, mind magában a Föld éghajlati rendszerének működésében. Ezen kívül fontos kapcsolatot képeznek a klímaváltozást vizsgáló különböző tudományágak – mint például a meteorológia, a közgazdaságtan, a társadalomtudományok és a geológia – között, amelyek így alapos és összetett becsléseket tárhatnak elénk a jövő várható alakulásáról.

A korábban széleskörűen használt kibocsátási és társadalmi-gazdasági forgatókönyvek – például az SRES<sup>1</sup> scenáriók (*Nakicenovic et al.*, 2000) – egyik legnagyobb hiányossága az volt, hogy nem vették figyelembe az éghajlatváltozás mérséklésére irányuló törekvéseket és intézkedéseket, valamint a Földet alkotó rendszerek – amelyeknek egyik eleme az éghajlati rendszer – alkalmazkodóképességét. Ezért 2007-ben az IPCC<sup>2</sup> felkérte a tudományos közösséget, hogy fejlesszen ki egy új forgatókönyvcsaládot, amely pótolja ezeket a hiányosságokat és megfelel a különböző tudományterületek elvárásainak. Ezeket az új forgatókönyveket a "representatív koncentrációs nyomvonalak" – Representative Concentration Pathways, röviden RCP – elnevezéssel illették.

A szakdolgozat célja az RCP forgatókönyvcsalád tagjainak összehasonlítása. A 2. fejezetben néhány fontosabb, a szakdolgozat jobb megértését szolgáló kifejezés részletes magyarázata található. Ezután a 3. fejezetben ismertetésre kerülnek a scenáriók létrehozásának legalapvetőbb követelményei, a fejlesztés különböző fázisai és konkrét lépései, továbbá a fejlesztést végző tudományos csoportokat is bemutatom röviden. A 4. fejezet egyenként sorra veszi a négy RCP forgatókönyvet, áttekinti a létrehozáshoz felhasznált modellek tulajdonságait és a modellezési folyamatokat, a scenáriók alaptörténetét és jellegzetességeit, illetve a gazdasági és energetikai becslések mellett tárgyalja az üvegházhatású gázok és légszennyezők kibocsátásának feltételezett alakulását. Ezt követi egy rövid kitekintés a scenáriók kiterjesztéseire az 5. fejezetben. A 6. fejezet a scenáriók alkalmazásával kapcsolatos néhány fontos vagy érdekes kísérletet, kutatást említ meg röviden, kitérve az elért eredményekre és következtetésekre. Végül a 7. fejezet a szakdolgozat összefoglalását tartalmazza.

---

<sup>1</sup> SRES - Special Report on Emission Scenarios: Kibocsátási Forgatókönyvek Tematikus Jelentése

<sup>2</sup> IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: Éghajlatváltozási Kormányközi Testület

## 2. Alapfogalmak, definíciók, az RCP kifejezés értelmezése

A szakdolgozat minél átfogóbb és jobb megértése érdekében ez a fejezet összegzi a legfontosabb alapfogalmak, definíciók bevezetését és magyarázatát, illetve az RCP kifejezés értelmezését.

Az egyik legfontosabb alapdefiníció az (éghajlati) forgatókönyv vagy – az angolszász szakirodalomból átvett – scenárió fogalma. Ehhez tudnunk kell, hogy az üvegházhatású gázok kibocsátása nagyon összetett, dinamikus természetbeli rendszerek működésének eredménye. Ezeknek a rendszereknek a működését számos tényező befolyásolja, mint például a népesedési viszonyok, a társadalmi és gazdasági fejlődés, valamint a technológiai előrelépés. Ezek megváltozása és pontos jövőbeli állapota nyilvánvalóan nem ismert. A scenáriók azonban alternatív képet írnak le a jövő várható alakulásáról, ezáltal alkalmasak arra, hogy segítségükkel különböző anyagok kibocsátásának jövőbeli alakulását vizsgáljuk. Emellett arra is alkalmazhatók, hogy az éghajlati becslések bizonytalanságait vizsgáljuk. Így a globális éghajlat megváltozásának elemzésében is kiemelkedő szerepet játszanak, hiszen felhasználják őket az éghajlati modellezésben, valamint a jövőbeli hatások és a környezet alkalmazkodóképességének kutatásában is (pl.: *IPCC*, 2013). Fontos kiemelni, hogy ezek a forgatókönyvek hozzávetőleges becslések, és meglehetősen valószínűtlen, hogy a kibocsátás időben pontosan a scenárióban foglaltaknak megfelelően alakulna. Általában nem különálló scenáriókról, hanem scenáriócsaládokról beszélünk. Ezeknek közös tulajdonsága, hogy a Föld klímájának elképzelhető változását tekintve ugyanarra az ún. alaptörténetre épülnek. Négy ilyen vezérfonalként szolgáló alaptörténetet dolgoztak ki a 2000-es évek elején (*Nakicenovic et al.*, 2000), és ezek bizonyos változtatásokkal a mai napig a kutatások alapját képezik. Mindegyik alaptörténet más-más demográfiai, társadalmi, gazdasági, technológiai és környezeti változásokkal számol, melyek közül egyesek kedvezőbb, mások pedig negatívabb jövőképet tárnak elénk. Az éghajlati forgatókönyvek tehát az alaptörténetek számszerűsítéseinek is tekinthetők, mivel mennyiségileg írják le a jövőre vonatkozó becsléseinket. Fontosnak tartom kiemelni, hogy a két fogalom csak együtt értelmezhető: a forgatókönyvek, illetve a rájuk alapuló modellfuttatások eredményei csak az alaptörténetek tükrében magyarázhatók: ők adják azt a keretet, melynek segítségével a kinyert adatok elemezhetők.

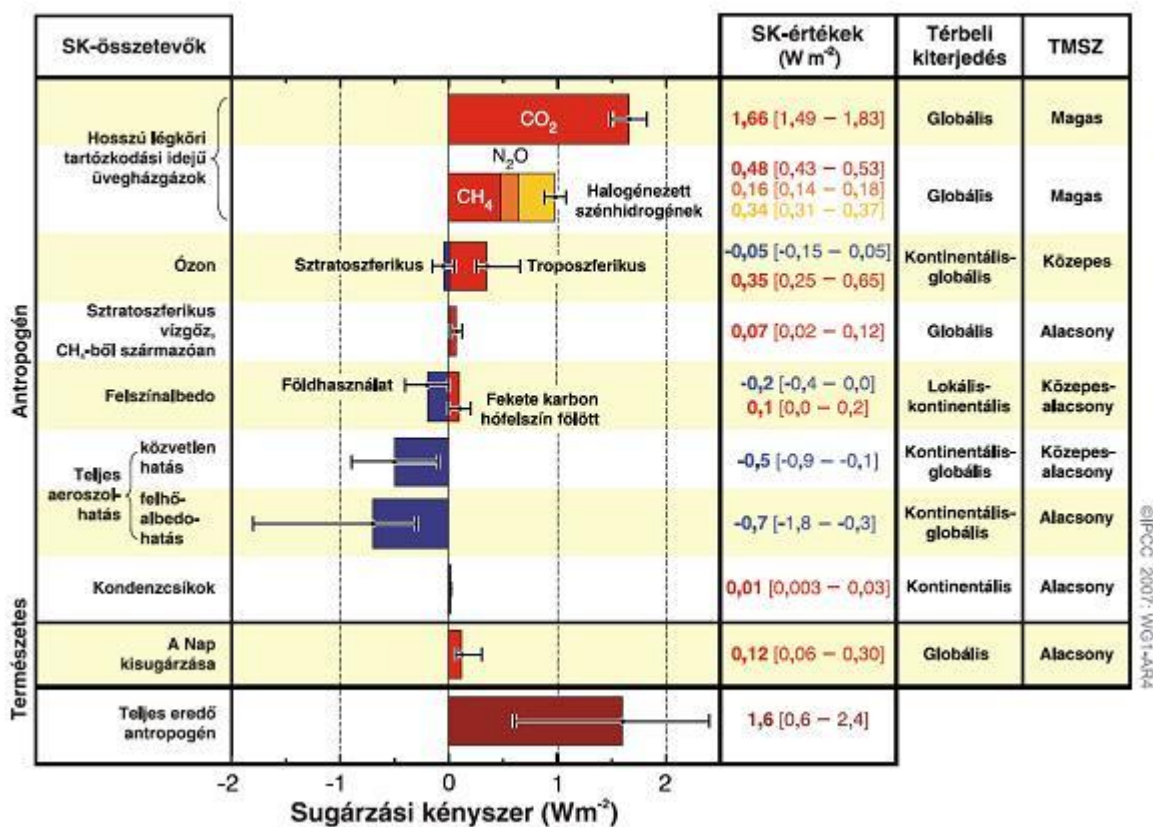
Az RCP – Representative Concentration Pathways – rövidítéssel egy új

szcenáriócsaládot jelöl a szakirodalom. Már a név is utal arra az új elgondolásra, amin a felhasználásuk alapszik. A pathway – nyomvonal – kifejezés hangsúlyozza, hogy az RCP-k feladata elsősorban a légkörben található üvegházhatású gázok koncentrációváltozásának időbeli leírása. Tehát azt jelenti, hogy nem csak a végeredményként kapott koncentrációértékek vagy az elért sugárzási kényszer értékei számítanak, hanem az a folyamat, út is, aminek a végeredménye az adott sugárzási kényszer. Nem tekinthetők teljes scenáriónak a szó korábban szokványos értelmében, mert a sugárzási kényszer változásához vezető légköri alkotóelemeknek a koncentrációját adják meg. Reprezentatívnak tekinthetők, hiszen az azonos tulajdonságokkal bíró scenáriócsaládokat képviselik, illetve összevethetők a szakirodalomban már előforduló összes korábbi forgatókönyvvel. A koncentráció szó pedig egyértelmű jele, hogy a kibocsátási értékek helyett a koncentrációs értékek az RCP-k elsődleges produktumai, s közvetlenül ezeket használják fel az éghajlati modellezésben. Természetesen csatolt szén ciklus-modellekkel megadhatók a kibocsátási értékek is (*Van Vuuren et al., 2011a*). A kidolgozott négy különböző RCP-t a 2100-ra elért sugárzási kényszerváltozások alapján különítjük el, ezek a 8,5 W/m<sup>2</sup>-es, 6 W/m<sup>2</sup>-es, 4,5 W/m<sup>2</sup>-es és 2,6 W/m<sup>2</sup>-es értékek (*Van Vuuren et al., 2011a*). Mindegyikük az 1850 és 2100 közötti időszakot fedi le, illetve elkészültek a 2300-ig tartó kiterjesztéseik is.

A másik kifejezés, ami gyakran előfordul a scenáriókkal kapcsolatban, a sugárzási kényszer vagy éghajlati kényszer – angolul radiative forcing – fogalma. Az IPCC Negyedik Helyzetértékelő Jelentése (*IPCC, 2007*) szerint a sugárzási kényszer annak a hatásnak a mértéke, amivel egy hatótényező megváltoztatja a Föld-légkör rendszer bejövő és kimenő energiájának egyensúlyát. Olyan index, amely lehetővé teszi az egyes hatótényezők mint a klímaváltozás potenciális okainak fontosság szerinti összevetését. A pozitív kényszer melegíti a felszínt, míg a negatív hűti azt. A sugárzási kényszer értékeit az iparosodás előtti, 1750-es állapotokhoz viszonyítják, és W/m<sup>2</sup> egységben adják meg (*IPCC, 2007*). Más szavakkal a sugárzási kényszer azt fejezi ki, hogyan módosítja például egy adott légköri alkotó az iparosodást megelőző időszakhoz képest megnövekedett mennyisége a be- és kilépő sugárzás energiamérlegét. Azaz meghatározza, hogy mennyivel növekedett meg az adott alkotó többletkoncentrációjának köszönhetően az alsó légkörben tárolt hőenergia mennyisége (*Gelencsér, 2014*). Mivel ez a hőmérséklettel arányos mennyiség, ezért megbecsülhető, hogy mekkora az általa előidézett felszíni hőmérséklet-változás mértéke. A koncentrációváltozásnak – ami nyilván a kibocsátásban bekövetkező változást is jelenti – számos oka lehet, például különböző társadalmi és gazdasági

folyamatok, változások. Ha pedig a teljes légkört tekintjük, akkor sugárzási kényszeren a légkört alkotó gázok és egyéb anyagok sugárzási kényszerének megfelelő összegzését értjük. A sugárzási kényszer változásának összetevői és tulajdonságaik az 1. ábrán láthatóak. Az RCP-k esetében ez az üvegházhatású gázokat, a kibocsátott aeroszol részecskéket, a kémiai aktív gázokat, illetve a földhasználatra vonatkozó adatokat jelenti, mert ezek az éghajlati és légkörkémi modellek bemenő adataiként szolgálhatnak, és jól jellemzik az előbb említett társadalmi és gazdasági folyamatokat. A kényszer értékei nem tartalmazzák az albedóból, a porból és a nitrát-aeroszlrészecskékből származó sugárzási kényszert (Van Vuuren et al., 2011a).

### A sugárzási kényszer (SK) összetevői



1. ábra A sugárzási kényszer megváltozásának antropogén és természetes összetevői, a feltételezett változások mértéke az 1750-2005 közötti időszakban. A zárójelben szereplő értékek az 5%-os és 95%-os valószínűségű értékeket jelölik. TMSZ: Tudományos Megértés Szintje (IPCC, 2007)

A korábbi foratókönyvekhez képest az RCP-k egyik legfontosabb újítása a földhasználat hatásainak érzékeltetése. A földhasználat sokféleképpen befolyásolja az éghajlati rendszert, többek között különböző anyagok kibocsátásával, a hidrológiai cikluson keresztül, földrajzi és biológiai jellemzők – mint például a felszínborítottság és felszín érdessége – változásával, illetve a Földet borító növényzet kiterjedésével. Korábban

ennek a hatásnak az érzékeltetése nem kapott megfelelő hangsúlyt a modellezési vizsgálatokban, azonban felismerték ennek alapvető fontosságát az éghajlati rendszerben. Számos kategóriát különítettek el – például szántó, legelő, erdő, ipari terület, stb. – és a rácsellákat ezekbe sorolták be az időben bekövetkező változásokat is figyelembe véve.

Gyakran használt fogalom a széndioxid-egyenérték (CO<sub>2</sub>-eq). Az IPCC definíciója szerint egy bizonyos mennyiségű szén-dioxid vagy azzal megegyező globális éghajlatmódosító potenciállal rendelkező mennyiségű üvegházhatású gáz vagy gázkeverék kibocsátása, amely ugyanazt a sugárzási kényszert eredményezi. Gázkeverék esetében figyelembe veszik az egyes gázok légköri tartózkodási idejét is. A GtCO<sub>2</sub>-eq jelölés egy gigatonna – vagyis egymilliárd tonna – kibocsátott anyagra utal (*IPCC, 2007*).

Az energetikai viszonyok tárgyalásakor felmerül a primerenergia és a végső energia fogalma. Az IPCC Negyedik Helyzetértékelő Jelentésében (*IPCC, 2007*) szereplő definíció alapján a primerenergia az az energia, ami a természeti erőforrásokban – például kőszén, nyersolaj, földgáz, uránérc – rejlik, bármiféle feldolgozás vagy antropogén folyamat előtt. Ezt másodlagos energiává alakítják át például tisztítással, finomítással, vagy áram- és hőtermeléssel. A másodlagos energiát a végfelhasználókhöz eljuttatva kapjuk a végső energiát, például a lakóházakba vezetett áramot. Ebből származik az általunk felhasznált energia (*IPCC, 2007*).

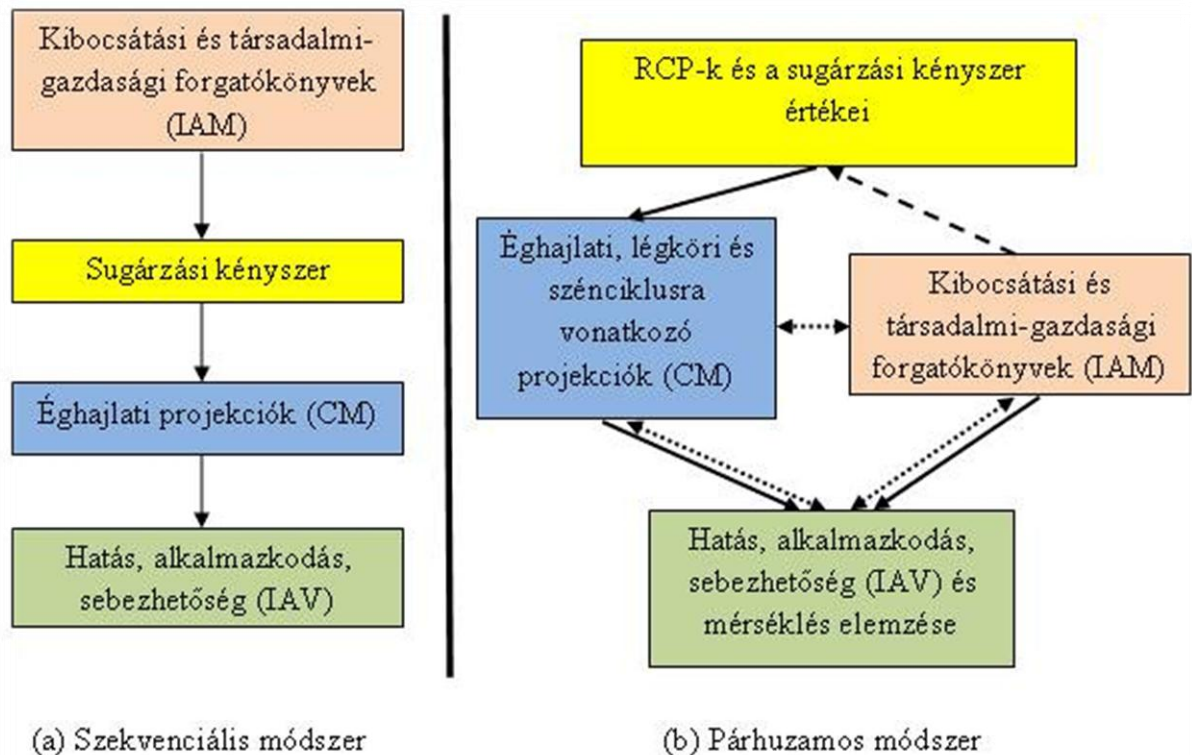
### **3. Az RCP forgatókönyvek megszületése: elvárások, követelmények az új scenáriókkal szemben, a létrehozás körülményei**

Noha korábban már számos kibocsátási scenárió létezett a jövőbeli állapotok becslésére – mint például az SRES 40 forgatókönyve (*Nakicenovic et al.*, 2000) –, a klímakutató társadalomnak újakra volt szüksége, mivel a korábbiak nem vették figyelembe az emberiség válaszát a klímaváltozásra. Mellőztek olyan nemzeti és nemzetközi intézkedéseket, egyezményeket, melyek az éghajlatváltozás enyhítésére törekedtek. Sok esetben pedig az alkalmazott szemléletmód nem volt megfelelő, hiszen a különböző tudományterületek – például meteorológia, fizika, biológia, társadalomtudományok, stb. – között rendkívül lassú és elégtelen információcsere zajlott. A korábbi scenáriók nem számoltak a környezet adaptációs képességével, s ma már nem biztosítanak megfelelően részletes és pontos bemenő adatokat az éghajlati modellek futtatásához sem (*Van Vuuren et al.*, 2011a).

Emiatt 2007-ben az IPCC a tudományos közösséget egy új forgatókönyv-család létrehozására kérte fel. Fontos megjegyezni, hogy maga az IPCC nem vett részt a fejlesztésekben, ez a feladat a kijelölt tudományos csoportokra hárult. A fejlesztéshez új módszert használtak fel: szakítva a régi, egymást követő lépések sorozatából álló folyamattal – amikor először a társadalmi-gazdasági folyamatok jövőre vonatkozó becslésével és a kibocsátási forgatókönyvek kifejlesztésével kezdtek, majd ezeket használták fel az éghajlatváltozást jellemző modellekben – ezúttal bizonyos fázisokat párhuzamosan, egymással egy időben kívántak végrehajtani, a 2. ábrán látható módon (*Van Vuuren et al.*, 2011a; *IPCC*, 2007):

- Az RCP-k kidolgozása: azaz olyan forgatókönyvcsaládok létrehozása, melyekben a főszerepet a kibocsátási és koncentrációs értékek, illetve a földhasználatra vonatkozó adatok kapják.
- A kapott scenáriók felhasználása éghajlati, légköri és a szénkörforgás változását leíró modellekben. Ezzel párhuzamosan felhasználás kibocsátási modellekben, valamint új társadalmi-gazdasági modellek fejlesztése.
- Végző integrálás a modellekbe: a becsült változások hatásainak és a Föld adaptív folyamatainak, továbbá a várható változások enyhítésére tett intézkedéseknek a vizsgálata, elemzése. Eközben a visszacsatolási mechanizmusok vizsgálata az előző pontban foglaltakkal.





2. ábra A scenáriók kifejlesztésekor alkalmazott módszerek: (a) korábbi, szekvenciális módszer; (b) az új párhuzamos módszer. A teljes nyilak az információ átadását, a szaggatott nyíl az RCP-k kiválasztását, a pontozottak a visszacsatolási folyamatokat jelölik (Moss *et al.*, 2008).

Tehát az RCP-eket úgy kellett megválasztani, hogy az éghajlati modellezést – CM<sup>3</sup> – végző szakemberek, a hatásértékeléssel – IAM<sup>4</sup> – valamint az adaptációval, következményekkel – IAV<sup>5</sup> – foglalkozó tudományos csoportok is bátran felhasználhassák őket (Van Vuuren *et al.*, 2008). Így kétféle felhasználót különböztethetünk meg: a végfelhasználót, aki a scenáriók segítségével kinyert adatokat a döntéshozatali folyamatokban használja fel, valamint a köztes felhasználót, aki a forgatókönyveket bemeneti adatokként használja fel további kutatások céljából (Moss *et al.*, 2008).

Nyilvánvaló, hogy a két felhasználói csoport igényei jelentős mértékben eltértek, ezért kompromisszumos megoldásra volt szükség. Az RCP-vel szemben támasztott egységes követelményrendszert 2007 szeptemberében, az IPCC szakértői gyűlésén, Noordwijkerhoutban határozták meg, és többek között a következőket tartalmazzák (Van Vuuren *et al.*, 2011a; Moss *et al.*, 2008):

<sup>3</sup> CM - Climate Modelling: Éghajlati Modellezés

<sup>4</sup> IAM - Integrated Assessment Modelling: Egyesített Értékelő Modellezés

<sup>5</sup> IAV - Impact, Adaptation, Vulnerability: Hatás, Alkalmazkodás, Sebezhetőség

- Az RCP-eket a szakirodalomban már rendelkezésre álló forgatókönyvekből kell kifejleszteni. A "reprezentatív" jelző arra utal, hogy a szakirodalomban fellelhető, alacsony és magas kibocsátási és koncentrációs értékek közt kell vizsgálnia a lehetséges jövőbeli állapotokat, a velük járó bizonytalansággal együtt. A különböző RCP-eket különböző kutatócsoportoknak kell kifejlesztenie.
- Összesen négy RCP kifejlesztésében állapodtak meg. Ez a szám még épp megfelelő ahhoz, hogy egyenletesen fedjék át az értékeket (azaz nem a középső RCP-t tekintjük a legjobb becslésnek). Ugyanakkor több, mint két lehetséges jövőbeli állapotot ír le (tehát a köztes verziók is modellezhetők). Nem utolsó sorban ez a szám még költséghatékony modellezési munkálatokat is jelent, mely főleg az éghajlati modellezők kérése volt a korlátozott források miatt.
- Az RCP-knek a sugárzási kényszer minden olyan összetevőjét számba kell venniük, amelyek az éghajlati és légkörkémi modellek bemenő adataiként szolgálhatnak. Ilyenek az üvegházhatású gázok, a kibocsátott aeroszol részecskék, a kémiai aktív gázok, valamint a földhasználatra vonatkozó adatok. Fontos, hogy ezeket az adatokat pontos földrajzi megfeleltetéssel kell tárolniuk, azaz rácscellánként kell megadniuk a szükséges kibocsátási értékeket és a felszínborítottság-földhasználat jellemzőit.
- A kezdeti évre olyan kibocsátási és földhasználati adatokat kell megadni, melyek biztosítják, hogy a történelmi és jövőbeli időszakokra vonatkozó vizsgálatok között megfelelően folyamatos legyen az átmenet.
- A vizsgált időszaknak 2100-ig kell tartania, de az adatoknak az ezt követő évszázadokra is rendelkezésre kell állniuk, hogy a hosszabb skálájú folyamatok is modellezhetők legyenek. Az alapmeneteknek 2100-ra észrevehetően el kell különülniük.

A fejlesztéseket 2008-ban kívánták végrehajtani, és a fenti kritériumoknak megfelelően négy csoport látott neki a munkának (*Van Vuuren et al.*, 2011a). Az RCP 8.5-öt az osztrák IIASA<sup>6</sup> fejlesztette ki, a MESSAGE<sup>7</sup> modellre és a saját értékelési keretrendszerükre támaszkodva. Az RCP 6-ot a japán NIES<sup>8</sup> AIM<sup>9</sup> modellezői alkották

---

<sup>6</sup> IIASA - International Institute for Applied Systems Analysis: Alkalmazott Rendszerek Nemzetközi Kutatóintézete

<sup>7</sup> MESSAGE - Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact: Alternatív Energiaellátási Stratégiákat és Általános Környezeti Hatásaikat vizsgáló Modell

<sup>8</sup> NIES - National Institute for Environmental Studies: Környezeti Kutatások Állami Intézete

<sup>9</sup> AIM - Asia-Pacific Integrated Model: Egységes Ázsiai és Csendes-óceáni Modell

meg. Az RCP 4.5-öt az amerikai JGCRI<sup>10</sup> GCAM<sup>11</sup> modellező csapata hozta létre. A legkisebb sugárzási kényszert eredményező RCP 2.6 munkálataihoz pedig a holland PBL<sup>12</sup> IMAGE<sup>13</sup> modellezői láttak neki. A CM, IAM és IAV csoportok munkájának összehangolása az alkalmazott új szemlélet szerves részét képezte, ezért 2010-ig számos közös megbeszélést és egyeztetést tartottak. A gyakorlatban a fejlesztés az alábbi, hét lépésből álló folyamatot jelentette (*Van Vuuren et al.*, 2011a):

1. A kritériumoknak megfelelő négy, már létező scenárió kiválasztása a szakirodalomból.
2. A forgatókönyvek frissítése. Közös kibocsátási értékek és felszínborítottság-földhasználati osztályok megállapítása a kezdeti évre (ahol lehetséges). A nyers forgatókönyvek többszöri felülvizsgálata.
3. A felszínborítottság-földhasználati tulajdonságok megadása a kezdeti évre, mindegyik rácscellára ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontásban).
4. A légszennyezők – azaz az aeroszol részecskék és a troposferikus ózon prekursorai – kibocsátási adatainak megadása minden cellára ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  rácscellák).
5. A kibocsátási értékek átalakítása koncentrációs értékekké; ehhez jól keveredő üvegházhatású gázok esetében egy egyszerű, szenciklust leíró éghajlati modellt hívtak segítségül, reaktív anyagok esetén pedig légkörkémiiai modellt alkalmaztak.
6. Az RCP-k kiterjesztése a 2100-2300 időszakra.
7. A lényeges információk közzététele egy központi tárhelyen, ahonnan a felhasználók megtekinthetik és letölthetik az összesített, illetve a rácscellákra vonatkozó kibocsátási, koncentrációs, valamint sugárzási kényszerrel kapcsolatos és felszínborítottság-földhasználatra vonatkozó adatokat.

Ezután kezdődhetett csak meg az a modellezési és értékelési munka, ami az RCP-k mint bemenő adatok használatán alapszik. Ez az átfogó elemzés még nem fejeződött be, hiszen az RCP-k nagyban megváltoztatják a klímaváltozásról és annak becsléséről alkotott képünket. Számos kutatási irányt határoztak meg, ami hatalmas munkát ad a témával foglalkozó szakembereknek. Szakdolgozatomban a scenáriók áttekintése után röviden ismertetem az RCP-k alkalmazásának legfontosabb irányvonalait.

---

<sup>10</sup> JGCRI - Joint Global Change Research Institute: Globális Változás Egyesített Kutatóintézete

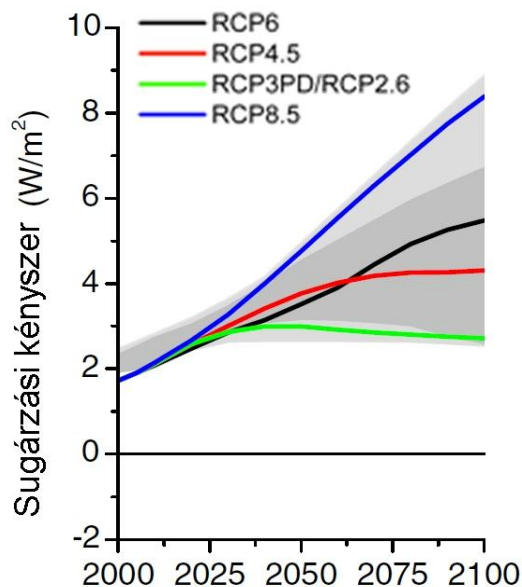
<sup>11</sup> GCAM - Global Change Assessment Model: Globális Változást Becsülő Modell

<sup>12</sup> PBL - Netherlands Environmental Assessment Agency: Holland Környezetkutató Ügynökség

<sup>13</sup> IMAGE - Integrated Model to Assess the Global Environment: Globális Környezetet Vizsgáló Egységes Modell

## 4. Az RCP forgatókönyvcsalád ismertetése

Ez a fejezet a négy RCP forgatókönyv tulajdonságait vizsgálja (3. ábra), számba véve a kifejlesztésükhöz felhasznált modellek jellegzetességeit, a scenáriók karakterisztikáit, illetve a gazdasági és energetikai rendszerekre vonatkozó becsléseiket. Ezen kívül jellemzi a légkör különböző alkotóinak kibocsátására és koncentrációjára vonatkozó projekciókat is.



3. ábra A sugárzási kényszer változásának menete a négy RCP forgatókönyv szerint. A világoszürke jelölés a szakirodalomban fellelhető értékek 98. percentiliseire, a sötétszürke a 90. percentiliseikre vonatkozik (Van Vuuren *et al.*, 2011a).

### 4.1 Az RCP 8.5 scenárió bemutatása

Az RCP-k bemutatását a legmagasabb sugárzási kényszert eredményező scenárió ismertetésével kezdem. Az RCP 8.5 azokat a forgatókönyveket képviseli a szakirodalomban, amelyek az üvegházhatású gázok nagymértékű kibocsátásával számolnak. Ez egy ún. kiindulási – a szakirodalomban 'baseline' – scenárió, ami a többitől eltérően nem határoz meg semmilyen célt az éghajlatváltozás mérséklésével kapcsolatban a vizsgált időszak végére. Tehát az üvegházhatású gázok kibocsátása és koncentrációja számottevően növekszik, ami az évszázad végére 8,5 W/m<sup>2</sup>-es sugárzási kényszert eredményez majd a forgatókönyv szerint (3. ábra).

Az RCP 8.5 alapjául az IPCC már korábban publikált A2r scenáriója (Riahi *et al.*, 2007) szolgált, innen származnak a népesedési és gazdasági, valamint technológiai változásokra, fejlesztésekre irányuló becslések, trendek. Az A2r alapjául szolgáló fő elképzeléseket természetesen felülvizsgálták és kiegészítették, így számos módszertani

fejlesztést eszközöltek. Ez többek között magában foglalja a jelenlegi és tervezett levegőminőségi szabályozások hatásának megjelenítését, illetve a légszennyező-kibocsátás és a mérséklésre tett intézkedések közti térbeli kapcsolat vizsgálatát. További újítás a földhasználati kategóriák finomítása, és ezzel a változások pontosabb érzékeltetése (*Riahi et al.*, 2011).

Az RCP 8.5 fejlesztéséhez felhasználták az osztrák IIASA integrált modellezési keretrendszerét is, ami az üvegházhatású gázok legfőbb kibocsátóit – az energiatermelést, ipart, mezőgazdaságot, erdőgazdálkodást – vizsgálja. Maga az értékelési keretrendszer több, különböző térbeli felbontással dolgozó modelltől áll, amelyek visszacsatolási mechanizmusok sorozatán keresztül kapcsolódnak egymáshoz (*Riahi et al.*, 2007). Egyikük a már korábban is említett MESSAGE modell, ami tulajdonképpen a keretrendszer központi részét jelenti. Ez egy rendszerfejlesztési optimalizáló modell, amit energetikai rendszerek közép- és hosszútávú tervezésére használnak, illetve az energetikai irányelvek meghatározásakor is alkalmazzák. Feladata esetünkben a teljes Földre vonatkoztatott energetikai rendszer feltérképezése olyan szempontok függvényében, mint a nyersanyagok kitermelése, exportja és importja, szállítása, feldolgozása, valamint a termelt energia végfelhasználóhoz történő eljuttatása. Globális és regionális információt biztosít többek között a felhasznált technológiákról, a légszennyezők kibocsátásáról, továbbá vázlatos képet nyújt a mezőgazdasági és erdőgazdálkodási szektorról és a hozzájuk kapcsolódó üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére szolgáló lehetőségekről. A MESSAGE tehát egy hosszú távú globális modell, ami 11 régióra osztja fel a Föld területét, és az 1990 és 2100 közötti időszakot öleli fel – így éppen megfelel az RCP-k követelményeinek (*Riahi et al.*, 2011; *Rao és Riahi*, 2006).

A másik alkalmazott modell az AEZ-WFS<sup>14</sup> modelltér. Ez a mezőgazdasági szektor várható jövőbeli változásait szimulálja több szempont figyelembevételével. Az AEZ becslést ad a föld termőképességéről és arról, hogy az adott kategóriájú földterület milyen termelésre alkalmas. A földterületeket hat nagyobb kategóriába sorolták be: beépített terület, mezőgazdasági művelés alatt álló terület, erdő, cserjés/legelő – ezen belül kezelt és természetes –, gyér növényborítottságú terület, valamint egyéb földterület. A WFS pedig egy általános egyensúlyi modell, ami a világ élelmiszer-ellátottságát rendszerszemléleti közelítéssel vizsgálja. Mivel a mezőgazdaság és a földhasználat szorosan kapcsolódik egymáshoz, ezért az RCP 8.5 ezt a térbeli összefüggést érzékeltetve

---

<sup>14</sup> AEZ-WFS - Agro-Ecological Zoning - World Food System: Agro-Ökológiai Rendezés - Globális Élelmiszer-Rendszer

ad becsléseket a földterületek jövőben feltételezett hasznosításáról (*Riahi et al.*, 2011; *Fischer et al.*, 2007).

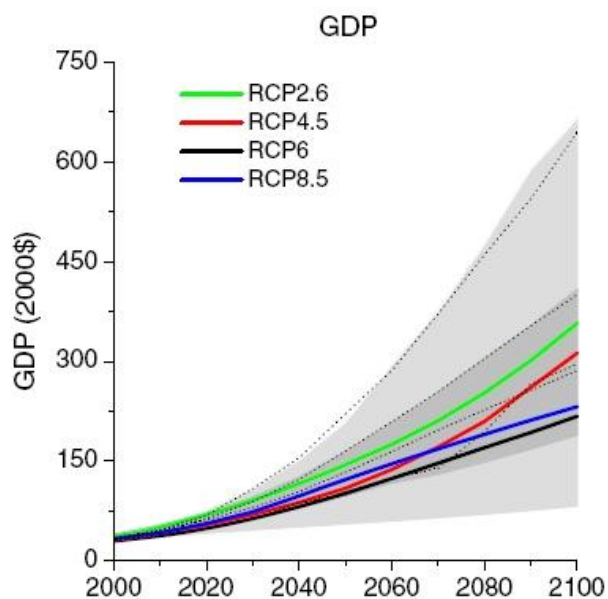
A keretrendszer harmadik tagja a DIMA<sup>15</sup>, amely számszerűsíti a világ erdősegeiben rejlő gazdasági lehetőségeket. Az ökoszisztémák és a földhasználati tevékenységek közötti kölcsönhatásokat nagyon kifejezően modellezi, a becslések alapjául pedig a faanyag iránti igény területi eloszlása és a szén, illetve a bioenergia világpiaci árai szolgálnak. A DIMA az AEZ-WFS bizonyos adatait is felhasználja: rácspontonként úgy biztosítja a megfelelő élelmiszerellátást a népesség számára, hogy az AEZ-WFS becslései alapján meghatároz egy rácspont-specifikus minimális értéket a városi és mezőgazdasági terület nagyságára. A DIMA 0,5° × 0,5° felbontású térbeli rácshálózattal dolgozik. Minden rácspontra megadja, hogy adott időintervallumban milyen erdőszeti tevékenység – erdősisítés, újraerdősítés, erdőirtás vagy konzerválás – mellett teljesül a területi faanyagigény, valamint a világpiaci árak mellett mekkora energetikai potenciált képvisel a terület. Ide tartozik az erdő szénnyelő tulajdonságainak becslése is, ami a szén-dioxid megkötése miatt fontos. A modell rendkívül alapos: figyelembe veszi az erdőszeti tevékenységek költségei mellett az erdősegek korszerkezetét, sőt, a növények fejlődését is életkoruk szerint vizsgálja. Ezáltal megfelelően reprezentálja az erdősegek és a gazdaság dinamikus kapcsolatát (*Riahi et al.*, 2011; *Rokityanskiy et al.*, 2007). A felsorolt modellek tulajdonságaiból tehát kitűnik, hogy az RCP 8.5 az A2r scenárió társadalmi, gazdasági, demográfiai, nyersanyaggal kapcsolatos és technológiai feltételezéseire épül, ez határozza meg a forgatókönyv alaptörténetét is.

A forgatókönyv alaptörténete egy heterogén jövőbeli világot ír le, folyamatosan növekedő globális lakosságszámmal. Az RCP 8.5 becslése szerint így a Föld lakossága 2100-ra eléri a 12 milliárdot. Az egy főre jutó jövedelem csak lassan növekszik, és a gazdagabb és szegényebb országok között is csak kis mértékben csökkennek a különbségek. A globális GDP értéke (4. ábra) 250 milliárd dollár körül ingadozik majd (2005-ös dollárértékekkel számolva). Ez 2100-ig lassú gazdasági fejlődést jelent, és a hatékonyság is kevésbé javul. Ez a rendkívül magas népességszám-növekedéssel nagy energiaigényhez vezet a jövőben, viszont a nemzetközi energia- és technológiacsere korlátozott marad. Így a régiók és országok önállósága nagy hangsúlyt kap, és az országon belüli saját nyersanyagforrások szerepe felértékelődik. A kőolaj és a földgáz kitermelése egyre nehezebbé és drágábbá válik, a mai értelemben vett hagyományos

---

<sup>15</sup> DIMA - Dynamic Integrated Model of Forestry and Alternative Land Use: Erdőszeti és Alternatív Földhasznosítási Dinamikus Integrált Modell

lelőhelyek száma megcsappan, ugyanakkor megkezdődik a kevésbé hagyományos készletek – mint például a kátrányhomok vagy az olajpala – kitermelése. Mivel a lassú technológiai fejlődés az energetikai szektort is érinti, a scenárió feltételezései szerint további elmozdulás figyelhető meg a szénalapú megoldások irányába, ami az üvegházhatású gázok erősödő kibocsátását eredményezi. Tehát az A2 scenárióban vázolt, erős lokális környezeti problémák továbbra is jelen vannak, főleg a gazdag és közepesen gazdag területeken. A másik komoly probléma az élelmiszer-ellátottság biztonsága, elsősorban a szegényebb területeken, hiszen a mezőgazdasági termelésnek lépést kell tartania a stabilan növekedő népességgel. Ilyen feltételezések mellett az RCP 8.5 a szakirodalomban előforduló scenáriókhöz képest sokkal "konzervatívabb", azaz nem tapasztalható számottevő fejlődés az érintett területeken: a nagy energiaigényhez hatalmas népesség társul, az energiatermelés csak lassan fokozódik, hasonlóan az egy főre jutó jövedelem lassú növekedéséhez (Riahi et al., 2011).



4. ábra A globális GDP változásának trendje a négy RCP forgatókönyv alapján. A világosszürke jelölés az IPCC Negyedik Helyzetértékelő Jelentésének adatbázisában fellelhető értékek 98. percentiliseire, a sötétszürke a 90. percentiliseikre vonatkozik. A pontozott görbék négy hasonló SRES scenáriót jelölnek (Van Vuuren et al., 2011a).

Ezek a tényezők a kibocsátási és koncentrációs értékek mellett az energetikai viszonyok alakulására is hatással vannak, emiatt az energiatermelés és -felhasználás változásait is vizsgálni kell. Az RCP 8.5 becslései szerint a primerenergia-termelés mindössze évi 0,5%-kal fog növekedni az évszázad során, ami a lassú technológiai fejlődésnek tudható be (Riahi et al., 2011). Ugyanakkor a becsült népességnövekedés miatt az energiaigény a vizsgált időszak alatt megháromszorozódik majd, ezt pedig fosszilis

energiahordozók használatával igyekeznek kielégíteni. Ennek két oka is van: egyrészt a nem fosszilis technológiák lassú fejlődése, ezáltal relatíve magas költségei; másrészt a ma még nem gazdaságos olaj-, szén- és gázlelőhelyek nagy száma. Idővel ezek kitermelése is gazdaságossá válik, és ez költséghatékonyabb megoldás, mint a nem fosszilis módszerek fejlesztése. A szénfelhasználás az RCP 8.5 becslései szerint várhatóan tízszeresére nő 2100-ig, és a közlekedési ágazat továbbra is kőolajfüggő marad. Ugyanakkor a fosszilis technológiák terén várható némi fejlődés, ami hosszabb távon növeli a hatékonyságukat és teljesítményüket. Például a villamosenergia-termelésben teret fognak hódítani az ún. tiszta szén technológiák, amelyek célja a káros anyagok és üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése vagy megszüntetése. A hagyományos olajlelőhelyek kimerülésével az olajárak is emelkedni fognak, azonban ez fellendíti a szintetikus üzemanyagok – például különféle szénalapú folyadékok – használatát. Ezen kívül hosszú távon hozzájárul a nukleáris és vízi áramtermelés terjedéséhez is, de a domináns primerenergia-források továbbra is fosszilis eredetűek lesznek. A végfelhasználóhoz eljuttatott energia jelentősen megváltozik az RCP 8.5 feltételezése alapján: az elektromos áram lesz a legmeghatározóbb energiatípus, főként a háztartásokban és az iparban. 2050 után pedig úgy becsülik, hogy ennek nagy része nukleáris vagy biomassza eredetű lesz (*Riahi et al., 2011*).

A nagy népességnövekedés nem csak az energiatermelésre, hanem a mezőgazdasági ágazatra is egyre nagyobb nyomást fog gyakorolni a scenárió szerint. Jelenleg nagyjából 1,6 milliárd hektárnyi területet használnak növénytermesztésre, amiből 1 milliárd a fejlődő országokban található. Az elmúlt 30 év során körülbelül évi 5 millió hektárral bővült a művelés alá vont terület nagysága. Ennek a növekménynek például a 35%-a csak Dél-Amerikában található, és úgy tűnik, hogy a művelhető területek főként csak Afrikában és Dél-Amerikában terjeszthetők ki. Ugyanakkor Ázsiában él a világ népességének közel 60%-a, itt viszont kicsi az esély a termelésre használt területek kiterjesztésére. Ez a kiegyensúlyozatlanság az RCP 8.5 földhasználatra vonatkozó becsléseire is nagy hatással van. A scenárió szerint 2000 és 2050 között összesen 185 millió hektáros növekedés várható, 2100-ig pedig további 120 millió hektáros. A növekedés azonban térben nem egyenletes: míg a fejlett országokban a szántóterületek mérsékelt csökkenése valószínűsíthető, a tényleges növekmény kizárólag a fejlődő országokban jelentkezik. Így Afrika és Dél-Amerika együttesen a növekedés 85%-át adja majd. A népesség ellátásához természetesen a meglévő területek hozamát is növelni kell majd, illetve intenzívebb művelést kell folytatni. Ennek eredményeképpen a világ mezőgazdasági össztermelése a forgatókönyv szerint 2050-ig 85%-kal, 2080-ig pedig 135%-kal fog növekedni



(*Riahi et al.*, 2011). A forgatókönyv egyik legfőbb jellegzetessége, hogy a becslések szerint a fejlődő országokban kereskedelmi skálán is egyre nagyobb szerepet fog kapni a biomassza-alapú energia előállítása. Ma ez még nem olyan jelentős, de a jövőben külön erre a célra szánt bioenergia-átalakító üzemekben folyhat majd az áram- és hőtermelés. A bioenergia globális szinten is egyre fontosabbá válhat majd: az RCP 8.5 szerint a 2000-es évekbeli 40 EJ-ről több, mint 150 EJ-ra emelkedhet a termelt energia mennyisége 2100-ra. Az ehhez felhasznált biomassza jelentős részét az erdőkből nyerik ki, így bár az erdős területek teljes nagysága csökken a forgatókönyv feltételezése szerint, a kezelt erdők és biomassza-termelésre használt területek aránya növekedni fog. Utóbbi például 17 millió hektárról több, mint 26 millió hektárra 2100-ig (*Riahi et al.*, 2011). Természetesen a földhasználattal kapcsolatos becslések nagy bizonytalansággal terheltek, és az idő múlásával egyre nagyobb a különbség közöttük. A felhasznált modellek és adatbázisok finomítása, kiegyensúlyozása ezért további munkát igényel.

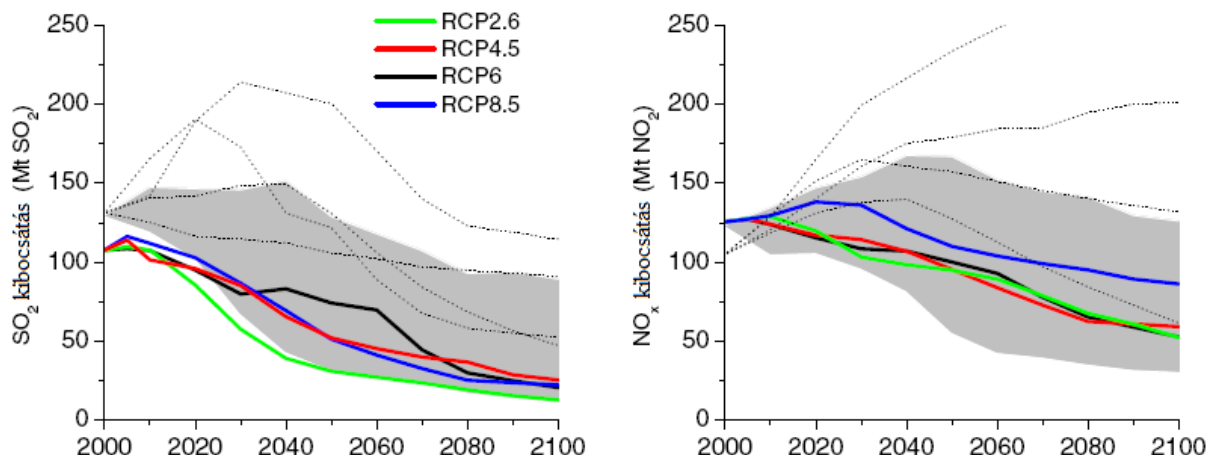
A fosszilis alapú energiatermelés dominanciája, a nagy népességnövekedés és az ebből fakadó fokozódó élelmiszerigény miatt az üvegházhatású gázok tovább erősödő kibocsátása várható a scenárió szerint. Az RCP 8.5 kibocsátási értékei rendkívül magasak, nem csak a szakirodalomban fellelhető más kibocsátási forgatókönyvekhez képest, hanem más kiindulási scenáriókhoz viszonyítva is. Például a kibocsátott széndioxid-egyenérték 2050-re több, mint a duplájára emelkedik a 2000-es szinthez képest, 2100-ra pedig megháromszorozódik, eléri a 120 GtCO<sub>2</sub>-egyenértéket. Ennek a növekedésnek nagyjából a háromnegyedéért valószínűsíthetően az energetikai ágazat lesz a felelős. A maradék növekmény főként a fokozódó trágyázásnak és az egyre intenzívebbé váló mezőgazdasági termelésnek lesz köszönhető, ezzel viszont emelkedik a dinitrogén-oxid kibocsátása is. A magas metánkibocsátásra vonatkozó értékek pedig az élelmiszertermelés folyamataival – például az állattartás, a kérődző állatok emésztése, rizstermelés – állnak kapcsolatban (*Riahi et al.*, 2011).

Az üvegházhatású gázok kibocsátása mellett a másik fontos kérdés az, hogy hogyan alakul majd a légszennyező anyagok kibocsátása. Noha az RCP 8.5 a klímaváltozás mérséklésének irányelveit nem veszi figyelembe, a levegőminőségre vonatkozó szabályozások hatásának érzékeltetése igenis fontos szerepet kap (*Riahi et al.*, 2011). Ez azt bizonyítja, hogy erre már a világ számos országában ügyelnek, és az RCP 8.5 feltételezi, hogy 2030-ig a jelenlegi és várható intézkedéseket sikeresen fogantatosítják majd. Valószínűleg ezek a szigorú korlátozások 2030 után sem szűnnek meg, sőt, tovább erősödnek. A forgatókönyv a kibocsátás intenzitásának meghatározásakor figyelembe veszi

az adott területet érintő szabályozásokat, a gazdasági növekedést és a technológiai fejlettséget is. Ennélfogva a szennyező anyagok kibocsátásának eloszlása térben nem homogén, sok tényezőtől függ. Az OECD<sup>16</sup> tagországaiban a legszigorúbb a levegőminőségi szabályozás, ebből adódóan itt már eleve alacsony kibocsátási értékekkel kell számolni, amelyek a jövőben tovább fognak csökkenni. A közepes fejlettségű régiókban a mai korlátozások betartásával 2030-ra már jelentős visszaesés figyelhető meg a kibocsátási értékekben. Ez különösen az energiatermelési és közlekedési ágazatot érinti: kötelezővé válhat például az ipari kéményekből távozó füst kénmentesítése, valamint a gépjárművek katalizátorral való ellátása. A jelenleg legszegényebb országokban csak mérsékelt szabályozások vannak érvényben. A scenárió szerint ezeken a területeken várható a leggyengébb csökkenés 2030-ig, ez pedig azt mutatja, hogy nincsenek konkrét terveik még a rövid távú szabályozásra sem. 2030 után a forgatókönyv további visszaesést helyez kilátásba ezekben a régiókban, melynek fő oka a gazdasági fejlődés. Nagyobb bevétel mellett olyan technológiákat alkalmaznak majd, melyek a légszennyezők kibocsátását jelentős mértékben mérséklék. Ezt valószínűsítik például a kén-dioxid esetében is: a szigorúbb szabályozások következtében nem csak az alkalmazott szűrőberendezések miatt, de a már korábban említett tiszta szén módszerek – például a gázosítás – bevezetésével is csökkenhet majd a kibocsátás. Csakhogy egyes feltörekvő gazdaságú országokban – Kínában, Indiában és más ázsiai országokban – a hatalmas energiaigény miatt nem elegendő a már meglévő és tervezett szabályozás, így ezeken a területeken egyebek mellett a kén-dioxid kibocsátása akár növekedhet is. Globális skálán és hosszú távon azonban egyértelműen csökkenő tendencia várható (5. ábra). Mivel az RCP 8.5 mellőzi az országoknak a klímaváltozás enyhítését célzó rendelkezéseit, szét kell választani a szén-dioxid kibocsátását a légszennyezőkétől. Ugyanis előbbi számottevően növekszik a fokozódó ipari tevékenységnek és közlekedésnek köszönhetően, hiszen a gazdaság továbbra is szénalapú energiahordozókra épül majd a forgatókönyv szerint (Riahi et al., 2011).

---

<sup>16</sup> OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development: Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet



5. ábra A kén-dioxid és a nitrogén-oxidok kibocsátása az RCP scenáriók becslései alapján. A szürke terület a szakirodalomban fellelhető 22 scenárió értékeinek 90. percentiliseit jelöli. A pontozott görbék SRES forgatókönyvekre vonatkoznak (Van Vuuren et al., 2011a).

A scenárió tehát magas kibocsátási értékeket valószínűsít, amelyek számos gazdasági és társadalmi problémára vezethetők vissza. Abban a tekintetben pesszimista, hogy a Föld és lakossága számára kedvezőtlen eshetőségekkel számol, valamint szándékosan mellőz mindenféle klímapolitikát. Így ezt a forgatókönyvet másokkal összehasonlítva értékelhetjük azt, hogy mekkora lehetőség rejlik azokban az intézkedésekben, amelyeket a különböző nemzeti és nemzetközi intézmények hoznak a klímaváltozás enyhítése érdekében.

## 4.2 Az RCP 6.0 scenárió bemutatása

Ha az RCP forgatókönyveket a sugárzási kényszer várható megváltozása szerint csökkenő sorrendbe rendezzük, a  $6 \text{ W/m}^2$ -es értéket eredményező scenárió követi az RCP 8.5-öt (3. ábra). Az RCP 6.0 ezt az értéket 2100-ra éri el, anélkül, hogy a korábbi években átlépné azt (Masui et al., 2011). Az RCP 8.5-höz képest a legfontosabb különbség az, hogy ez a scenárió már figyelembe veszi azokat a rendelkezéseket és irányelveket, amelyeknek célja a klímaváltozás mérséklése. A másik két forgatókönyvhöz – az RCP 4.5-höz és az RCP 2.6-hoz – képest sokkal enyhébb klímapolitikával számol, így a vizsgált időszak végére elért sugárzási kényszer és a kibocsátási értékek is magasabbak, mint a két említett scenárióé. További érdekesség, hogy több lépésben fejlesztették ki: először létrehoztak egy referencia-forgatókönyvet, amit aztán úgy változtattak meg, hogy 2100-ra a kívánt sugárzási kényszer értéket érje el.

Az RCP 6.0 esetében nem beszélhetünk egy konkrét, a szakirodalomban már korábban létező scenárióról, ami alapként szolgált volna. Ez az alkalmazott modellek

sajátosságából származtatható: a felhasznált AIM modellcsalád tulajdonképpen az SRES A1B forgatókönyv (*Nakicenovic et al.*, 2000) becsléseit számszerűsíti, míg az energetikai számításoknál felhasználták a B2 scenárió adatait is. Így sikerült egy köztes változatot kifejleszteni, amivel sokkal változatosabban becsülhetők a globális éghajlatváltozást befolyásoló tényezők.

A fejlesztés mögött álló modellezési munka egy többlépcsős folyamatot takar. Először az üvegházhatású gázok kibocsátásának időbeli alakulását számították ki az AIM/I<sup>17</sup> modellel, melyből globális léptékű információkat kaptak. Ezt aztán kényszerértékeként alkalmazva az AIM/CGE<sup>18</sup> esetében, kiszámították a regionális skálájú és különböző gazdasági ágazatokra vonatkozó kibocsátási értékeket, valamint egyes rövidebb tartózkodási idejű anyagok – például a kén-dioxid és származékainak – emisszióit. Eközben az AIM/CGE segítségével kapott összesített regionális termelési adatokat finomabb skálára is kivetítették egy erre kifejlesztett földhasználati modell segítségével, amely egy növényzet alakulását szimuláló részmodellel is rendelkezik. A módosított földhasználattal kapcsolatos üvegházhatású gázok kibocsátási adatait visszatáplálták az AIM/CGE modellbe. A regionális kibocsátási adatokat pedig – leszámítva a szén-dioxid és dinitrogén-oxid értékeit – szintén finomabb térskálára ültették át. Így a vizsgálatokhoz szükséges térbeli felbontású adatbázist kaptak (*Masui et al.*, 2011).

Tehát az RCP 6.0 nagyrészt az AIM modellcsaládra épül, ezért ennek rövid bemutatása megkerülhetetlen a jobb értelmezés érdekében. Az AIM tulajdonképpen egy egymással összefüggő modellekből álló rendszer, amit a japán NIES és a Kiotói Egyetem szakemberei hoztak létre (*Kainuma et al.*, 2003). Feladata a klímaváltozás és a mérséklésre irányuló intézkedések hatásainak becslése. Felhasználták többek között Japán klímapolitikai intézkedéseinek értékelésére, valamint a korábban már említett SRES A1B scenárió számszerűsítésére (*Nakicenovic et al.*, 2000). A rendszer a következő anyagok globális kibocsátására ad becslést: szén-dioxid, metán, dinitrogén-oxid, halogénezett fluorozott szénhidrogének (HFC-k), perfluorkarbonok (PFC-k), kén-hexafluorid (SF<sub>6</sub>). A következő, kémiaileg aktív anyagok kibocsátásáról pedig regionális bontásban szolgál adatokkal: szén-monoxid, nitrogén-oxidok, nem metán illékony szerves vegyületek (NMVOC-ok), ammónia, valamint különféle aeroszol részecskék, például szulfát, korom és szerves szén. Az ezekre vonatkozó adatokat a modell 0,5° × 0,5° felbontású

---

<sup>17</sup> AIM/I - Asia-Pacific Integrated Model/Impact: Egységes Ázsiai és Csendes-óceáni Modell/Hatásértékelő Modell

<sup>18</sup> AIM/CGE - Asia-Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium: Egységes Ázsiai és Csendes-óceáni Modell/Általános Egyensúlyi Modell

rácshálózaton adja meg. Ahogyan az a modellezési folyamat felvázolásából is látszik, az AIM több részre bontható. Az AIM/I egy egyszerű éghajlati modellel párosított, globális dinamikus optimalizálási modell. A modell maximálja a számított teljes gazdasági hasznot, ami a fogyasztás függvényeként értelmezhető. A világ összes gazdasági tevékenységét egy homogén végtermékbe fogja össze, ami egyaránt felhasználható a szolgáltatási és háztartási ágazatban, illetve a befektetéseknél. A modellezett folyamat során tehát az AIM/I-ben növekszik a tőkeállomány, amivel több fogyasztási cikk állítható elő a jövőben, emiatt pedig a gazdasági tevékenység is fokozódik. Ezzel a modellel az 1990 és a 2300 közti mintegy három évszázados időszakot vizsgálják. A kibocsátási értékeket a felhasznált energia és a teljes gazdasági termelés alapján határozzák meg. A modell ezután kiszámítja a légkör alkotóinak mennyiségét, illetve a sugárzási kényszer értékét. A végeredmény egy kibocsátási alapmenet, amit az AIM/CGE modell használ fel (*Masui et al.*, 2011; *Hijioka et al.*, 2008).

Az AIM/CGE egy dinamikus, rekurzív, általános egyensúlyi modell. Minden gazdasági ágazatot egy beágyazott, állandó helyettesítési rugalmasságú termelési függvény képvisel. A modell 2001 és 2100 között 24 nagyobb földrajzi régiót vizsgál, amelyekhez egyenként 21 gazdasági termék és szolgáltatás tartozik (*1. táblázat*). Az AIM/CGE már figyelembe veszi a megújuló és nem-fosszilis alapú energiaforrások alkalmazását is, például a nukleáris energiatermelést, a napenergia használatát, valamint számol a nyersanyagforrások korlátozottságával is. Az egyes ágazatokhoz tartozó termékeket és szolgáltatásokat tőkévé alakítja át, ez pedig felosztható régi és új tőkére. A legfontosabb különbség köztük, hogy a régi tőke nem csoportosítható át más ágazathoz, az új tőke viszont igen. Az átcsoportosítás után azonban már régi tőkévé válik. További jellegzetesség, hogy minden technológiai újítás és energetikai fejlesztés az új tőkéhez kötődik. Így az adott ágazatra és régióra jellemző tőketermelés a régi és új tőkéhez köthető technológiai szintek súlyozott összegéből számítható. Az AIM/CGE felhasználja az AIM/I segítségével számolt kibocsátási alapmenetet mint kényszerértéket, és így szimulálja a jövő várható alakulását. A földhasználat jellemzőit is 24 nagy régiónál vizsgálja, s az erre, valamint a népességre és a GDP-re vonatkozó adatokat 30 ívmásodperc nagyságú rácscellákra bontva adja meg. A modell számol az urbanizáció fokozódása mellett a mezőgazdasági termelésre használt földterületek kiterjesztésével is. Az összesített földhasználatra és felszínborítottságra vonatkozó információkat  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontású rácscellákra határozza meg, amelyek összegzéséből  $60 \times 60$ , azaz 3600, egyenként 30 ívmásodperces felbontású cella adódik (*Masui et al.*, 2011; *Matsumoto és Masui*, 2010).

1. táblázat Az AIM/CGE modell által vizsgált földrajzi régiók és gazdasági termékek, szolgáltatások (Masui et al., 2011).

Régió	Gazdasági termék vagy szolgáltatás
Japán	Mezőgazdaság
Kína	Állatállomány
Korea	Erdőgazdálkodás
Indonézia	Halászat
India	Bányászat (kivéve fosszilis tüzelőanyagok)
Thaiföld	Energiaigényes termékek
Egyéb délkelet-ázsiai országok	Kohászat és gépészet
Egyéb dél-ázsiai országok	Élelmiszer
Ausztrália	Egyéb termékek
Új-Zéland	Víz
A csendes-óceáni és ázsiai térség többi területe	Építőipar
Kanada	Közlekedés
Amerikai Egyesült Államok	Távközlés
Nyugat-Európa	Közszolgálat
Kelet-Európa	Egyéb szolgáltatások
Oroszország	Szén
Európa többi része	Nyersolaj
Brazília	Kőolajszármazékok
Mexikó	Földgáz
Argentína	Gázellátás és -szállítás
Egyéb latin-amerikai területek	Elektromos áram
Közel-Kelet	
Dél-Afrika	
Egyéb afrikai területek	

Az AIM modellcsalád tagjai mellett felhasznált másik modell a VISIT<sup>19</sup>, mely az ökoszisztéma változását vizsgálja. Elődjének a Sim-CYCLE<sup>20</sup> modell (Ito és Oikawa, 2002) tekinthető, amelyet a földi szénkörforgás folyamatainak modellezésére fejlesztettek ki. Ennek fő feladata a biomassza égetésekor és a földhasználat során kibocsátott anyagok mennyiségének becslése volt. A VISIT pedig a légkör és a földi ökoszisztéma között zajló széndioxid-cserét határozza meg figyelembe véve a földi növénytakaró fotoszintézisét és respirációját. Olyan kisebb mértékű szénárammal is számol, mint ami a földhasználat változásaiból vagy a biomassza égéséből származik, továbbá ide sorolhatjuk a biogén illékony szerves vegyületek kibocsátása mellett a metán emisszióját is, valamint a talaj szénvesztését, ami az erózió és a kimosódás következménye (Ito, 2010). A VISIT 0,5° × 0,5° felbontású rácscellákra és a vizsgált időszak minden hónapjára megadja a kívánt információkat (Masui et al., 2011).

Az RCP 6.0 már említett érdekessége, hogy először egy referenciaszenáriót hoztak létre. Ez egy olyan kezdeti forgatókönyvet jelent, ami nem veszi figyelembe az

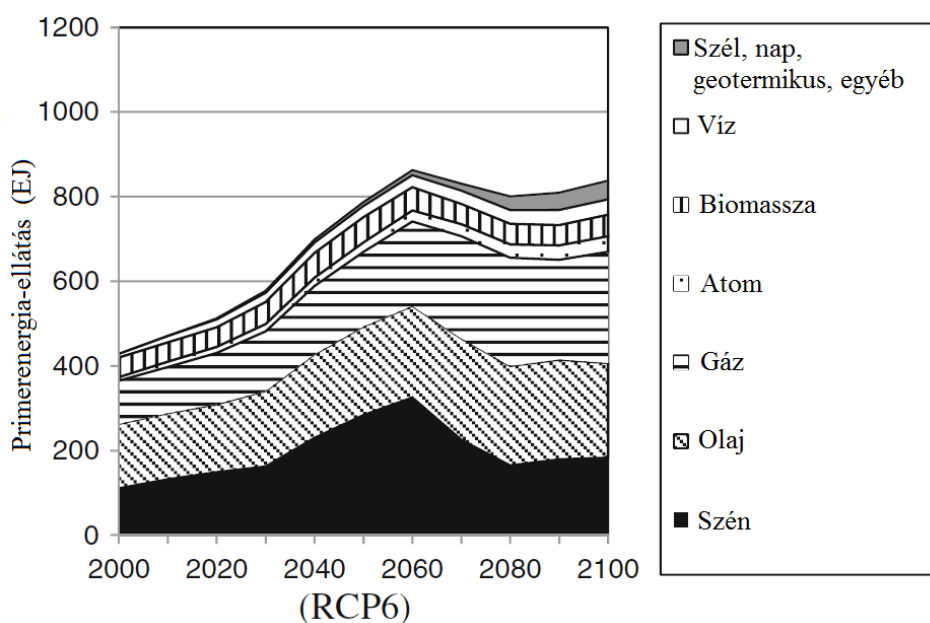
<sup>19</sup> VISIT - Vegetation Integrative Simulator for Trace gases: Átfogó Növényzeti Szimulátor Nyomgázokhoz

<sup>20</sup> Sim-CYCLE - Simulation model of Carbon cYCLE in Land Ecosystems: Szárazföldi Ökoszisztémák Szénkörforgását Szimuláló Modell

éghajlatváltozás mérséklésére tett intézkedéseket. Noha más környezeti problémák megoldására irányuló rendelkezésekkel számol, úgy alakították ki, hogy tisztán az üvegházhatású gázok kibocsátását szabályozó bármilyen új lépést mellőzzön. Ezt a referenciaszcenáriót tulajdonképpen a tényleges RCP 6.0-val történő összehasonlítás céljából hozták létre, és az SRES B2 forgatókönyv korszerűsített változata. A korszerűsítés főleg népesedési és gazdasági becslésekre, feltételezésekre alapul. Például a Föld teljes lakossága 2000 és 2100 között 6,1 milliárdról 9,8 milliárdra növekedhet majd a viszonyítási alapként használt scenárió szerint, és a csúcserték 2080 és 2090 között várható. A globális GDP értéke a 2000-re megadott 30 milliárd dollárról 225 milliárd dollárra emelkedik 2100-ra (4. ábra). Ugyanerre az évre a primerenergia-termelés értéke eléri az évi 1190 EJ-t, valamint a scenárió feltételezése szerint Kína fog rendelkezni a legnagyobb gazdasággal GDP és primerenergia-igény szempontjából. A széndioxid-kibocsátás évi 27,7 GtC-re növekszik az időszak végére. Az ipari forradalom időszakától kezdve számított teljes sugárzási kényszer változása pedig a 2000-re meghatározott 2 W/m<sup>2</sup>-es értékről 7 W/m<sup>2</sup>-re emelkedik majd (Masui et al., 2011).

A referenciaszcenárió után magát az RCP 6.0-t tekintve a változásokról alkotható képünk már jóval árnyaltabb. Az üvegházhatású gázok kibocsátása várhatóan 2060-ban éri el a csúcserteket, ezután viszont csökkenni fog – bár a referencia-forgatókönyvhöz képest a kibocsátás csökkentése már előbb, 2010-ben megkezdődik. Az is valószínűsíthető, hogy a gazdasági veszteségek minimalizálására törekedve a nagyobb gazdasággal rendelkező országok továbbra is megvásárolják majd a kevésbé intenzív termelést folytató országoktól a kibocsátási kvótákat, így a szabályozási folyamat – az emisszió régiók közötti nagy eltéréstől eltekintve – globálisan sikeres lesz. A 2030 utáni időszakban a sugárzási kényszer megváltozásának mértéke az RCP 6.0 esetében valamelyest alacsonyabb, mint a referenciaszcenáriónál. A teljes Földre vonatkozó széndioxid-kibocsátás 2060-ban éri el a tetőpontját, ami számszerűsítve 17,7 GtC-t jelent évente. Az alkalmazott rendelkezések miatt 2100-ra ez évi 13 GtC-re mérséklődik. Habár ez kevesebb, mint a fele a referencia-forgatókönyv által becsült értéknek, viszont 1,8-szer nagyobb, mint a 2000-re vonatkozó kibocsátási érték. A teljes 21. századra összegzett széndioxid-kibocsátás csökkenésében az RCP 6.0 és az alkalmazott referenciaszcenárió közötti eltérés 463 GtC (Masui et al., 2011). A regionális széndioxid-kibocsátást tekintve Ázsia gazdaságának szabályozása kiemelt fontosságú kérdés. Az ázsiai gazdaság hirtelenszerű növekedése azt eredményezi, hogy az RCP 6.0 és a referenciaszcenárió esetében is 2100-ban az erre a területre vonatkozó széndioxid-emisszió meghaladja a teljes globális összeg 60%-át. 2100-ban a teljes globális

primerenergia-termelés eléri az évi 838 EJ-s szintet (6. ábra). Az évszázad során becsült növekedése viszont nem egyenletes: 2060 után az emelkedés lelassul, miközben a széntermelés visszaesik. Ezzel szemben a földgázellátás nagyon gyorsan növekszik, 2100-ra a 2000-es szint 2,6-szeresére. A megújuló energiaforrások – például a biomassa, a vízenergia, a napenergia, a szélenergia, stb. – használata is teret hódít majd az energiatermelésben a forgatókönyv szerint, a 2000-es 12,9%-hoz képest a vizsgált időszak végére arányuk eléri a 15,7%-ot. A regionális arányok elemzéséből feltételezhető, hogy Kína és India a globális primerenergia-termelés 39%-áért felel majd. Ennek eredményeképpen Ázsia – leszámítva a Közel-Keletet – a 21. század végére több, mint 50%-os arányban fogja felhasználni a termelt energiát. A végső energia iránti globális igény – az épületeknél, az iparban és a közlekedésben – is tovább fokozódik: évi 297 EJ-ről 760 EJ-ra emelkedik. A viszonyítási alapként felhasznált referencia-forgatókönyvhöz képest ez még így is 172 EJ-lal kevesebb 2100-ban. A végső energia termelésében az elektromos áram arányának nagymértékű növekedése emelhető ki – már 47% 2100-ban –, másrészt a szilárd tüzelőanyagok használata visszaszorul az évszázad során. Ahogyan az már az egész Földre vonatkozó primerenergia-igény esetében is megmutatkozott, Ázsia vezető helyen áll a globális végső energiaigényben is a 2100-ra becsült 50%-ot meghaladó részesedésével (Masui et al., 2011).

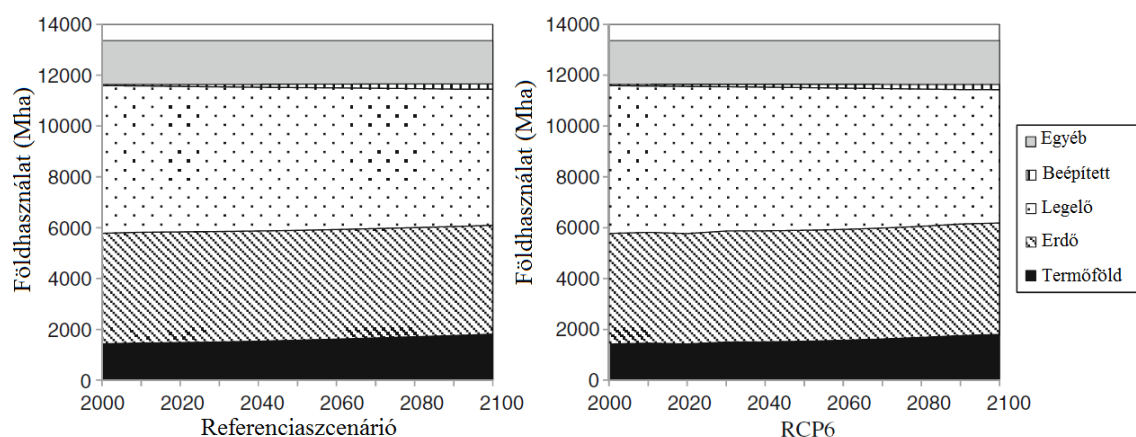


6. ábra A primerenergia-ellátás változásának energiaforrások szerinti megoszlása (Masui et al., 2011).

Az RCP 6.0 feltételezései alapján az energiatermelési eljárásokban is fontos változások állnak be. A széntüzelés háttérbe szorulásával a földgáz felhasználása hódít



majd teret. A nem fosszilis alapú energiahordozók felhasználása – beleértve az atomerőműveket – is fokozódik, 2100-ra meghaladja a 30%-ot. 2060 után pedig az áramtermeléshez köthető széndioxid-kibocsátás visszaesése várható a scenárió szerint. Ennek fő oka a nem fosszilis alapú energiaforrások térhódítása, valamint a CCS<sup>21</sup> technológiák elterjedése. Az RCP 6.0 becslései szerint az évszázad végére a hőerőművek 74%-ára felszerelik majd ezeket a berendezéseket (Masui et al., 2011).



7. ábra A földhasználat változása kategóriák szerint az RCP 6 és a hozzá kapcsolódó referencia-forgatókönyv becslései alapján (Masui et al., 2011).

A forgatókönyv részletes áttekintésében egy másik fontos kérdés a felszínborítottság és a földhasználat alakulása. Az RCP 6.0 esetében a népességszámban és a gazdaságban feltételezett növekedések következményeként a beépített vagy városi területek és a termőföldek kiterjednek. Ennek eredményeképpen fokozódik az igény az élelmiszerek, a lábasjóságok és az ún. energianövények iránt. Ennek kielégítésére a termőföldek területe 26%-kal növekszik 2100-ig, annak ellenére, hogy a termés hozamot valószínűleg még inkább növelni tudják majd különböző fejlesztésekkel. A scenárió szerint a legelők aránya 10%-kal esik vissza, miközben az erdős területek nagysága kis mértékben növekszik. Fontos megjegyezni, hogy az RCP 6.0 és a referencia-forgatókönyv nagyon hasonló változásokat helyeznek kilátásba a földhasználatot illetően (7. ábra). Jelentősen különböznek viszont a legelők és az erdőségek 2060 utáni állapotának tekintetében. Mivel az RCP 6.0 a metánkibocsátás csökkentését feltételezi – az egyik legjelentősebb metánforrásnak pedig a szarvasmarhák tekinthetők –, a marhacsordák lassabb ütemű gyarapodásával számol. Ennek következménye, hogy 2060 után a referenciascenárió becsléseihez képest mérséklődik a legelők használata is. Így az RCP 6.0 esetében az erdős területek kissé kiterjedtebbek, ezzel ellensúlyozva a legelők területének mérsékeltebb növekedését (Masui et al., 2011).

<sup>21</sup> CCS - Carbon Capture and Storage: Szénleválasztás és -tárolás

A már említett energetikai változások – például az olaj- és gázalapú energiatermelés térhódítása a szénalapúval szemben, a CCS technológiák alkalmazása, stb. – miatt a szénkibocsátás jelentősen visszaesik majd. Ehhez a szén árának 2060 és 2080 között várhatóan bekövetkező ugrásszerű megemelkedése is hozzájárul. Így nagyobb hangsúly helyeződik a szolgáltatási ágazatra a gazdaságban, mely a globális GDP-re is hatással van: 2100-ra az RCP 6.0 által becsült értéke majdnem 3%-kal alacsonyabb lesz a referenciaforgatókönyv szerinti értéknél. Ez a különbség sokkal magasabb lenne, ha a scenárió tiltaná a kibocsátási kvóták globális adásvételét (*Masui et al.*, 2011).

A kibocsátási értékek alakulásában is fordulópontot jelent a 2060 körüli időszak: a scenárió szerint például a metán globális emissziója ekkor éri el a csúcspontját, ezután azonban csökkenni fog. A földrajzi eloszlás nem tekinthető egyenletesnek: a referenciaforgatókönyv szerint Brazíliában, Indiában és Afrikában az intenzívebb mezőgazdasági tevékenység következményeképpen a metánkibocsátás sokkal nagyobb lesz 2100-ban a század eleji értékekhez képest. A Közel-Keleten ugyanez tapasztalható majd, de teljesen más okból, itt ugyanis az energiatermelés tehető felelőssé érte. Ezzel együtt a dinitrogén-oxid globális kibocsátása a 2000-es értéknél 55%-kal magasabb lesz 2100-ban a referenciascenárió becslései alapján. Az RCP 6.0 esetében a metánra és dinitrogén-oxidra vonatkozó értékek csökkennek majd, de ez kizárólag az energiatermeléssel és -fogyasztással kapcsolatos kibocsátásra vonatkozik, a mezőgazdasági eredetű és földhasználatból következő emisszió valószínűsíthetően fokozódik. A légszennyezők kibocsátásáról nagy általánosságban az mondható el, hogy a levegőminőségi szabályozásoknak köszönhetően nagy mértékben csökken mind az RCP 6.0, mind a hozzá kapcsolódó referenciascenárió alapján. A fejlett országokban lesz várhatóan a legnagyobb mértékű a visszaesés, míg például Ázsiában a kén- és nitrogén-oxidok kibocsátása eleinte nő, majd mérséklődik. Ennek oka a gazdaság hirtelenszerű felfutása a század elején. További érdekesség, hogy 2060 után az RCP 6.0 feltételezései szerint felgyorsul a kibocsátás csökkentése.

### **4.3 Az RCP 4.5 scenárió bemutatása**

A következő bemutatásra kerülő scenárió az RCP 4.5, amelynél az ipari forradalom előtti időszakhoz képest a sugárzási kényszer megváltozásának mértéke 2100-ra  $4,5 \text{ W/m}^2$  (3. ábra és 8. ábra). Ezt az értéket anélkül éri el, hogy a korábbi években átlépné azt. A többi RCP forgatókönyvhöz hasonlóan ez is hosszú távú becslést ad a

különböző üvegházhatású gázok és rövid tartózkodási idejű anyagok globális kibocsátására, valamint a földhasználat és a felszínborítottság jellemzőire a világ gazdasági folyamatainak függvényében. Az RCP 4.5 esetében azonban a gazdasági folyamatok és az emissziós értékek kapcsolata más jellegű: a klímaváltozás mérséklésére törekvő rendelkezések, intézkedések az RCP 8.5-höz és az RCP 6.0-hoz képest sokkal nagyobb szerepet játszanak. A forgatókönyv a gazdasági folyamatokat egyértelműen ezeknek rendeli alá, törekedve a felmerülő költségek minimalizálására. A forgatókönyvben ez az üvegházhatású gázok kibocsátásáért kivetett bírságok formájában jelenik meg (*Thomson et al.*, 2011). Így egy olyan kibocsátás-csökkentésre optimalizált forgatókönyvről beszélünk, aminek segítségével eredményesen vizsgálható a különböző szabályozások légkörre gyakorolt hatása. Bár a scenárió célja egy stabil sugárzási kényszer elérése, ez nem vonja azonnal maga után a kibocsátási és koncentrációs értékek vagy a földi éghajlati rendszer stabilitását.

Az RCP 4.5 alapjául a MiniCAM 2. szintű<sup>22</sup> stabilizációs forgatókönyve szolgált (*Clarke et al.*, 2007), ezt azonban jelentős mértékben módosították. A MiniCAM-féle scenárió másképp értelmezte a sugárzási kényszer fogalmát, mint az RCP 4.5: hat üvegházhatású gáz – szén-dioxid, metán, dinitrogén-oxid, fluorozott szénhidrogének, perfluorkarbon, kén-hexafluorid – figyelembevételével határozta meg az értékét. Ehhez képest az RCP 4.5 az előbbi anyagok antropogén emissziójával még inkább számol, valamint más kémiai aktív gázok hatását is vizsgálja, például a szén-monoxidét és az illékony szerves vegyületekét. Emellett a szulfát aeroszol-részecskék, a korom és a szerves szén is a vizsgált anyagok csoportját bővíti, így a korábbiaknál pontosabb becslést ad a sugárzási kényszer változásaira. További különbség a két forgatókönyv között a sugárzási kényszer nagysága, a MiniCAM esetében ez nagyjából  $4,7 \text{ W/m}^2$ . Az előzmény-forgatókönyv a széndioxid-koncentráció 2100-as értékére is magasabb becslést ad: 550 ppm-t az RCP 4.5 által feltételezett 525 ppm-mel szemben. A MiniCAM fejlesztése idején még nem álltak rendelkezésre az RCP 4.5 megalkotásához felhasznált földhasználatot és felszínborítottságot szimuláló modellek, így ezeket még nem tudták beépíteni a korábbi forgatókönyvbe. A később kidolgozott RCP 4.5 ezen kívül már frissített történeti adatsorokkal dolgozik.

Talán a legkiemelkedőbb újítás a kibocsátási értékek és a földhasználati-felszínborítottsági jellemzők nagyobb felbontású rácshálózatra történő leképezése. A 14

---

<sup>22</sup> MiniCAM Level 2 - Mini-Climate Assessment Model Level 2: 2. szintű Mini Éghajlatbecslési Modell

geopolitikai GCAM-régió adatait  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontású cellákra ültették át, ezzel lehetővé téve az RCP 4.5 felhasználását légkörkémi és globális éghajlati modellekben. Egy másik említendő fejlesztés a MiniCAM-hez képest a bioenergia-termelés párosítása a CCS-technológiával, amivel úgy állítható elő végső energia – például elektromos áram –, hogy közben a nettó szénkibocsátás negatív értékű (*Luckow et al., 2010*). Az RCP 4.5 fejlesztése az RCP 6.0-hoz és az RCP 2.6-hoz hasonló módon zajlott: először létrehozta egy referenciaszcenáriót, ami figyelmen kívül hagyja a klímapolitikai intézkedéseket, majd ebből fejlesztették ki a tényleges, kibocsátás-csökkentésre optimalizált forgatókönyvet a GCAM modell segítségével (*Thomson et al., 2011; Clarke et al., 2007*).

A GCAM egy olyan globális egyesített értékelési modell, ami a korábbi MiniCAM modell (*Brenkert et al., 2003*) közvetlen utódja. A világ gazdaságát, energetikáját, mezőgazdaságát és földhasználatát reprezentálja, számításba véve a szárazföldi és óceáni szénkörforgást, egy sor párosított gázciklust és éghajlati modelleket. Számos üvegházhatású gáz és más anyag – például illékony szerves vegyületek, szén-monoxid, kén-dioxid, széntartalmú aeroszol-részecskék, kén-hexafluorid, stb. – kibocsátásának, valamint koncentrációjának változását követi nyomon (*Thomson et al., 2011*). A GCAM dinamikus, rekurzív gazdasági modellje a népesség méretére és a munkaerő termelőképességére vonatkozó becslésekre alapoz. A modell ezekből kiszámítja a lehetséges GDP értékét 14 régióra, 15 éves időlépcsővel. Az energetikai rendszerekkel foglalkozó része rendkívül részletes, hiszen vizsgálja a primerenergia forrásait, az ipari termelést, az energia átalakítását és a végső energia szolgáltatási szektorban történő hasznosítását is – ilyen például az utazási kilométer a szállítmányozásban vagy az épületek légkondicionálása. A mezőgazdaságot és földhasználatot vizsgáló komponens együtt fut a gazdasági és az energetikai résszel. Ez az adott területet a várható haszon alapján sorolja be a földhasználati kategóriákba, ami viszont a termelékenység mellett a termék árától és a további költségektől – például a munkaerő bérezésétől vagy a műtrágya árától – függ. A termelékenység az idő függvényében folyamatosan változik, és nagyban befolyásolják a terméshozam jövőbeli alakulásáról alkotott becslések is. A mezőgazdasági tevékenységből származó gázok – például dinitrogén-oxid és metán – kibocsátása a termelés szintjéhez kötődik a modellben (*Thomson et al., 2011; Wise et al., 2009*).

A légkör fizikai állapotának jellemzésére, valamint az éghajlat leírására a MAGICC<sup>23</sup> modellt választották a GCAM-et fejlesztő szakemberek. Az RCP 4.5 szcenárió

---

<sup>23</sup> MAGICC - Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change: Üvegházhatású Gázok Okozta Klímaváltozást Becslő Modell

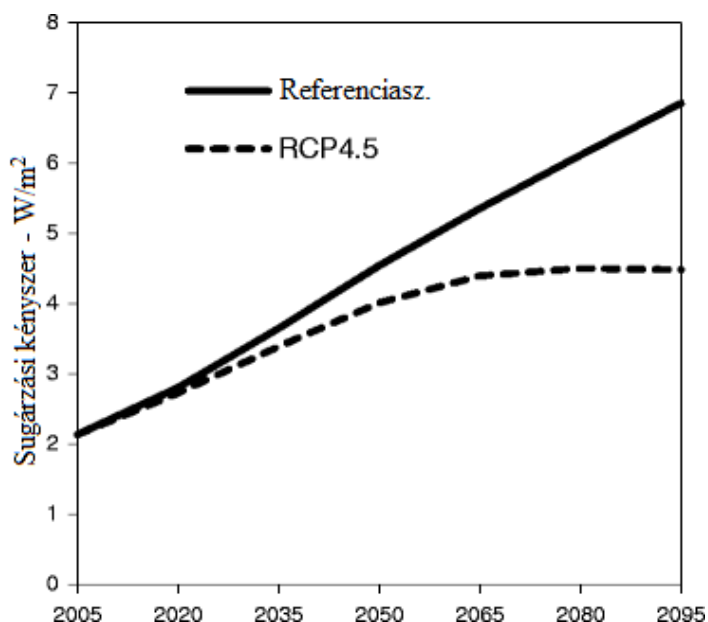
létrehozásához a MAGICC 5.3-as változatát használták fel, noha a véglegesített koncentrációs alapmeneteket már a 6-os verzió segítségével adták meg. A sugárzási kényszer értékének megállapításánál a modell nem veszi figyelembe az albedóból, a nitrátból és a porból származó járulékot. Az 5.3-as modellben ezek fix jövőbeli sugárzási kényszerrel rendelkeznek, amelynek nagysága  $-0,4 \text{ W/m}^2$  (Thomson *et al.*, 2011). A gáz halmazállapotú légszennyezők kibocsátása a régióként modellezett antropogén tevékenység – például az üzemanyag-fogyasztás – mellett a kibocsátás-szabályozások feltételezett szintjétől is függ. Utóbbit a jövedelem függvényeként értelmezi a modell, és a feltételezések szerint idővel minden országban emelkedni fog (Smith és Wigley, 2006). A magas bevétellel rendelkező országokban nyilvánvalóan nagyobb lesz az emelkedés mértéke, erre kiváló példa a fejlődő országok azon csoportja, ahol a jövedelmek majd elérik a jelenlegi OECD-tagországokban érvényes szintet. A légszennyező- és aeroszolrészecske-kibocsátás szintjeinek konzisztenciáját a referenciascenárióban a MOZART<sup>24</sup> légkörkémiái modell segítségével ellenőrizték. Ez egy kétlépcsős folyamat volt, amely során regionális becsléseket adtak a felszínközeli részecskékre és az ózonszintre vonatkozóan. Ezután a kibocsátás-csökkentést az RCP 4.5-ben úgy határozták meg, hogy a felszíni szennyezők koncentrációja konzisztens legyen a becsült regionális jövedelem mértékével (Thomson *et al.*, 2011). A GCAM kibocsátási adatainak leskálázása szintén két lépésben történt: először a 14 GCAM-régió minden 15 éves időszakra vonatkozó adatát összesítették a 12 RCP-területre, amit aztán az összesen 231 országra vetítettek le. Végül létrehozták a  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontású rácscellákból álló hálózatot. Az országokon kívüli adatokat – vagyis a nemzetközi hajózáshoz és a légi közlekedéshez köthető emissziót – pedig egy globális számadatba foglalták össze. A földhasználati jellemzők esetében más módszert követtek: a 14 régióra vonatkozó adatokat rögtön leképezték a rácscellákra, ügyelve a történeti és jövőbeli – azaz az 1500-2005, illetve a 2005-2100 időszak – adatok közötti megfelelően folyamatos átmenetre (Thomson *et al.*, 2011; Hurtt *et al.*, 2011).

Az RCP 4.5 referenciascenáriójával kapcsolatban fontos kiemelni, hogy ezt is a GCAM modell segítségével fejlesztették. A világ lakosság számára vonatkozó becslései szerint 2065-ben több, mint 9 milliárd ember fog élni a Földön. Ez azonban 2100-ra visszaesik hozzávetőleg 8,7 milliárdra, miközben a globális GDP értéke egy nagyságrenddel nő (4. ábra). Ezzel párhuzamosan a primerenergia-felhasználás is

---

<sup>24</sup> MOZART - Model for OZone and Related chemical Tracers: Ózon és Kapcsolódó Vegyi Nyomjelzők Modellje

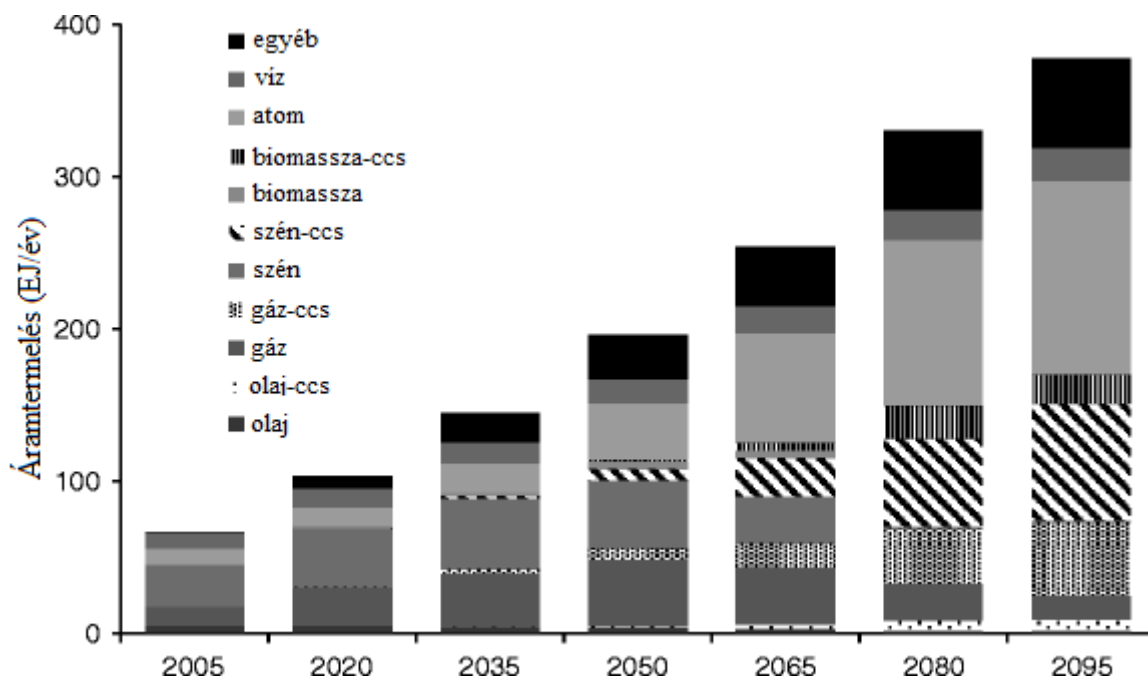
megháromszorozódik. Mivel referencia-forgatókönyvről van szó, ezért kifejezetten a szénkibocsátás korlátozására irányuló lépésekkel nem számol. Emiatt a fosszilis üzemanyagok dominanciája továbbra is érvényesül, a nukleáris és megújuló energia számottevő térnyerése ellenére. Így a légköri széndioxid-koncentráció tovább emelkedik az évszázad során, és 2100-ra eléri a 792 ppmv-t. Ennek hatására az ipari forradalom előtti időszakhoz képest a sugárzási kényszer változásának mértéke megközelíti a  $7 \text{ W/m}^2$ -t a vizsgált időszak végére (8. ábra). A fosszilis üzemanyagok felhasználásából és a mezőgazdasági területek terjeszkedéséből következik, hogy a metán- és dinitrogénoxid-kibocsátás is tovább emelkedik majd. Ez az erdőségek zsugorodásával jár, hiszen egyre inkább fokozódik az igény az élelmiszerek és a bioenergia előállításakor felhasznált energianövények iránt. Noha a becslések szerint a mezőgazdasági termelékenység növekszik a különböző fejlesztéseknek köszönhetően, a század első felében mégis számolni kell a termőföldek jelentős terjeszkedésével. Ennek oka a népesség és a bevételek növekedése, következményként pedig a istállózó állattartásból származó hústermelés fokozódását említhetjük. 2050 után viszont az élelmiszerigény növekedése lelassul, részben a csökkenő népességszámnak köszönhetően. Ennek eredményeképpen a termőterületek nagysága, valamint az átalakuló földhasználatból eredő emisszió visszaesik (Thomson *et al.*, 2011).



8. ábra A sugárzási kényszer változása az RCP 4.5 és a hozzá kapcsolódó referenciaszcenárió becslései szerint (Thomson *et al.*, 2011)

A tényleges RCP 4.5 scenárió ugyanazon a népesedési és jövedelmi kényszeren alapszik, mint a referencia-forgatókönyv. Figyelembe veszi azonban azokat a

klímapolitikai lépéseket, amelyeknek célja 2100-ig rögzíteni a légköri sugárzási kényszer változásának értékét  $4,5 \text{ W/m}^2$ -nél. Ennek a törekvésnek köszönhetően az antropogén széndioxid-kibocsátás csökken a 21. század folyamán, és 2100-ra a koncentráció várhatóan eléri az 525 ppm-t. A stabilizáció hozzávetőleg 2080-ban következik be a forgatókönyv becslései szerint: a sugárzási kényszer ekkor éri el a  $4,5 \text{ W/m}^2$ -t, a kibocsátási költségek pedig ekkor állandósulnak. Ezzel egyidejűleg a szén-dioxid emissziója is egy nagyjából állandó értéket vesz fel. Ugyanakkor a teljes energia-felhasználásban visszaesés várható, és a referenciaszcenárióhoz képest a fosszilis üzemanyagok használata is mérséklődik. Ezzel párhuzamosan hódít teret a nukleáris energiatermelés és a megújuló energiaforrások alkalmazása. A végfelhasználói ágazatokban bekövetkező üzemanyag-váltásnak köszönhetően az elektromos áram aránya nőni fog a teljes végső energiában. A CCS technológia nagymértékű használata miatt továbbra is felhasználhatjuk a fosszilis üzemanyagokat többek között áramtermelésre és cementgyártásra, de a referenciaszcenárióhoz képest jóval kisebb hangsúlyt kapnak (9. ábra). Ugyanakkor a bioenergia-termelés és a CCS párosítása olyan alternatívát kínál az áram előállítására, amelynél negatív a légkörbe történő nettó szénkibocsátás. Fontos viszont megjegyezni, hogy a bioenergia-termelés alapanyagai csak korlátozott mennyiségben állnak majd rendelkezésre, mivel a klímapolitikai mérséklő intézkedéseknek köszönhetően az erdőségek területe növekedésnek indul. Ez abból a feltételezésből táplálkozik, amely szerint minden szénkibocsátásért, ami a fosszilis üzemanyagokhoz és a földműveléshez kötődik, egyfajta pénzbeli bírságot vetnek ki. Így a földhasználat átalakításával – azaz erdősítéssel, valamint egyes legelőként és termőföldként használt területek energianövény-termesztésre fogásával – a kibocsátás mérsékelhető. Ha ezt a szemléletet valóban alkalmazzák, akkor a forgatókönyv szerint 2100-ra a bioenergia-termelés több, mint évi 50 EJ-lal járulna hozzá a globális energiaigény kielégítéséhez. Ez az érték azonban csak a kifejezetten erre a célra termesztett növények feldolgozásából származó járulék. További 120 EJ energia származna egyes hulladék anyagok – például növényi maradványok, a cellulóz- és papírgyártás melléktermékei vagy a városi szerves hulladék – felhasználásából. Ezzel párhuzamosan az élelmiszertermelés folyamatai során is minél kevesebb szén kibocsátása lenne a cél, ami főként a marhahús fogyasztás visszaszorításával érhető el. Habár ez az egész világon megemelné az élelmiszerárakat, az összesített élelmiszerre fordított kiadások csökkennének (Thomson *et al.*, 2011).



9. ábra Az áramtermelés megoszlása a felhasznált technológia szerint az RCP 4.5 becslései alapján (Thomson et al., 2011).

Az RCP 4.5 szerint 2100-ra a szén ára eléri a 85 dollárt minden tonna szén-dioxid esetében. Ez az árnövekedés várhatóan jelentősen átalakítja a világ gazdaságát. Az áramtermelés a legnagyobb kibocsátóból olyan rendszerré válik, ahol negatív a nettó emisszió értéke az atom- és a megújuló energia elterjedésének, valamint a CCS technológia alkalmazásának köszönhetően. Az épületek fenntartása és az ipar egyre inkább elszakad a szénalapú technológiáktól, mivel fokozódik a villamosítás. Ezek a változások a kibocsátási értékekre is rányomják a bélyegüket: például az átalakuló földhasználatból eredő kibocsátás éves értéke 0,13 GtCO<sub>2</sub>-re csökken. A teljes antropogén széndioxid-kibocsátás nagyjából 2040-ben éri el maximumát – számszerűsítve évi 42 GtCO<sub>2</sub>-t –, 2080-ig azonban csökken, ekkor hozzávetőleg évi 15 GtCO<sub>2</sub>-nél rögzül, és ezt a század végéig tartja is. A kibocsátások földrajzi eloszlásának vizsgálata még jobban jellemzi a légkörkémiai és éghajlati modellezés számára fontos változásokat. Például a teljes metánkibocsátás és a hozzá köthető sugárzási kényszer járuléka globális szinten viszonylag állandónak tekinthető időben. Ez 70%-os visszaesést jelent a referenciaszcenárió 2100-ra vonatkozó adataihoz képest. Az RCP 4.5-ben azonban a metánkibocsátás jelentős földrajzi eltéréseket mutat, mivel az egyes területeken változó a kiváltó hatás és a szabályozások szintje. A dél-amerikai és afrikai metánemisszió növekszik a század folyamán, szemben a Kínára, Indiára, az Amerikai Egyesült Államokra és Nyugat-Európára vonatkozó értékekkel. A teljes sugárzási kényszerhez leginkább a szén-dioxid kibocsátása járul hozzá, ezt követi a metán, a halogénezett szénhidrogének, a troposzférikus ózon és a dinitrogén-oxid



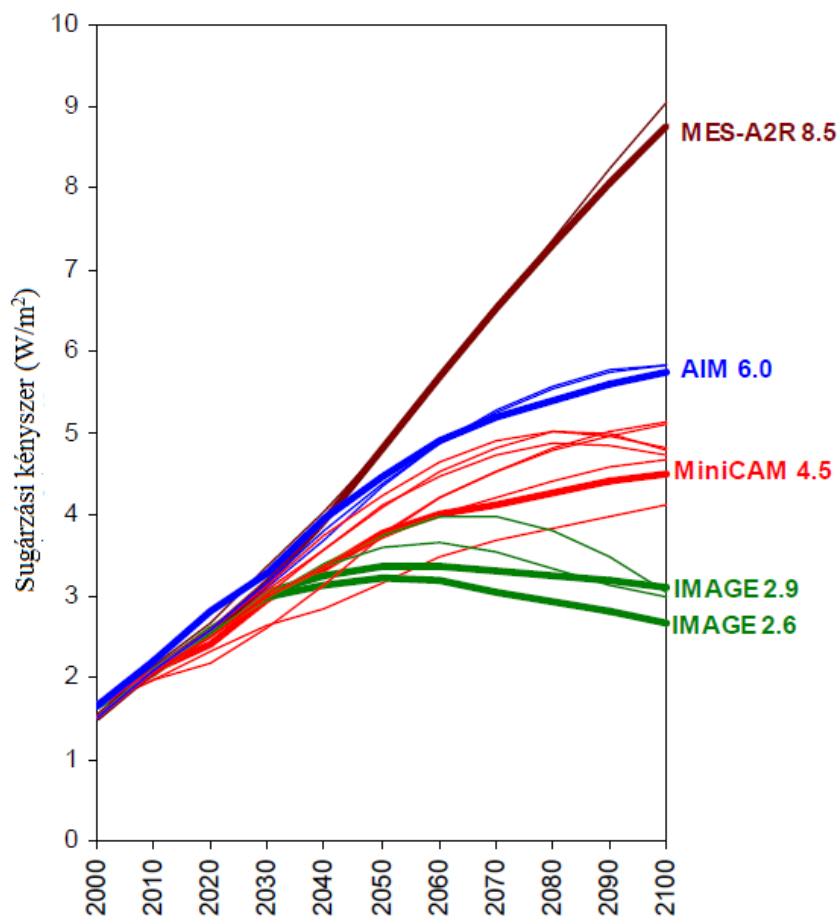
emissziója. A sugárzási kényszer módosulásának pozitív részét alkotó gázok – kivéve a szén-dioxid – járulékaiknak relatív aránya állandó marad az évszázad során. Bár a növekvő népességszám és jövedelem növekvő antropogén tevékenységet, ezzel együtt fokozódó kibocsátást feltételeznek, a szénárak növekedésével az üvegházhatású gázok kibocsátását a már említett klímapolitikai intézkedésekkel mérsékelni fogják. A végeredmény ezen gázok időben nagyjából állandó emissziója (*Thomson et al.*, 2011). A szulfátokból származó sugárzási kényszer összesített értéke negatív a 100 év során, és ez várhatóan még inkább csökkenni fog a kéndioxid-kibocsátást is érintő klímapolitikai szabályozásoknak köszönhetően (*Smith et al.*, 2005).

#### **4.4 Az RCP 2.6 scenárió bemutatása**

Az RCP forgatókönyvcsalád negyedik tagja a 2.6-os scenárió, ami a szakirodalomban fellelhető kibocsátás-csökkentési scenáriók közül az alacsony sugárzási kényszert eredményezőket képviseli. Ezeknek a forgatókönyveknek közös jellemzője, hogy alacsony kibocsátási értékekkel számolnak, valamint a globális átlaghőmérséklet emelkedését 2 °C-ra korlátozzák. Az elmúlt évtizedben a klímaváltozás enyhítésére való törekvés különösen nagy hangsúlyt kapott, ennek köszönhetően számos kutatás indult a klímapolitikai intézkedések hatásosságának vizsgálatára. Többek között új kibocsátás-csökkentési forgatókönyvek fejlesztésébe kezdtek, azonban a Föld éghajlatának jövőbeli változását legtöbbször még mindig olyan scenáriók (*Nakicenovic et al.*, 2000) segítségével vizsgálják, amelyek nem veszik figyelembe a jelenlegi és jövőbeli esetleges klímapolitikai szabályozásokat. Az új RCP forgatókönyvek esetében ezt a hiányosságot pótolták, illetve az RCP 2.6 megalkotásával egy olyan scenárió is definiáltak, amely elsősorban a kibocsátások drasztikus csökkentése nem lépi túl a 3 W/m<sup>2</sup> alatti sugárzási kényszer változást az ipari forradalom előtti időszakhoz képest. Ez azért különösen fontos, mert Meinshausen és munkatársai szerint (*Meinshausen et al.*, 2006) a sugárzási kényszernek ilyen alacsony szinten kellene rögzülnie ahhoz, hogy a globális átlaghőmérséklet nagy valószínűséggel csak legfeljebb 2 °C-kal emelkedjen.

Ilyen alacsony sugárzási kényszer változást mindössze hat scenárió alkalmazott a korábbi szakirodalomban, és további – elsősorban energetikai és földhasználatra vonatkozó – változtatásokat kellett eszközölni, hogy ez az érték tartósan 3 W/m<sup>2</sup> alatt maradjon (*Azar et al.*, 2006; *Van Vuuren et al.*, 2007; *Riahi et al.*, 2007). A fejlesztésekhez az IMAGE modellt és az ahhoz kapcsolódó forgatókönyveket használták fel. A kutatások két

különböző sugárzási kényszer változást –  $2,6 \text{ W/m}^2$ -t és  $2,9 \text{ W/m}^2$ -t – eredményeztek (10. ábra), és mivel nem tudtak dönteni a két lehetőség között, a Noordwijkerhoutban megrendezett konferencián ideiglenesen mindkét verziót elfogadták (Moss *et al.*, 2008). Az így kapott szcenárió az RCP3-PD nevet kapta – a PD jelentése "peak-and-decline", azaz tetőzés és visszaesés –, ezzel jelezve, hogy a kibocsátás alakulásának következtében a sugárzási kényszer változás a század közepén eléri  $3 \text{ W/m}^2$ -es maximumát, ezután pedig csökkenni fog (Van Vuuren *et al.*, 2011b). Miután más modellekkel is sikerült elérni a  $2,6 \text{ W/m}^2$ -es értéket, a forgatókönyv beépült az RCP szcenáriók rendszerébe, és azóta RCP 2.6 néven használják (3. ábra). Amellett, hogy a történeti és jövőre vonatkozó kibocsátási adatok között megfelelő az átmenet, illetve a térbeli megfeleltetéssel tárolt adatok felhasználhatók az éghajlati modellezésben, az RCP 2.6 egyik kiemelkedő újítása a bioenergiához kapcsolódó emisszió vizsgálata. A bioenergia és a megújuló energia elterjedése a földhasználatra is rányomja bélyegét. Többek között ezek a változások is modellezhetők az IMAGE modell segítségével.



10. ábra A sugárzási kényszer változása az RCP-k fejlesztéséhez felhasznált modellek és szcenáriók alapján. Zölddel jelölve az RCP 2.6 előzményszcenáriói (Moss *et al.*, 2008).

Az RCP 2.6 létrehozásához használt IMAGE 2.4 (Bouwman et al., 2006) modellezési keretrendszer valójában egy egyesített értékelési modell, ami több összekapcsolódó modellből épül fel. A globális környezeti változások hosszú távú, dinamikus folyamatainak leírására szolgál, ilyen például a légszennyeződés, az éghajlatváltozás és a földhasználat átalakulása. A keretrendszer legfontosabb része a TIMER<sup>25</sup> globális energetikai modell, a földhasználatot és felszínborítottságot vizsgáló részmodell, a szén ciklus-modell, valamint a MAGICC6 (Meinshausen et al., 2008) éghajlati modell. A keretrendszer fontos része még ezen kívül a FAIR<sup>26</sup>-SiMCAp<sup>27</sup> 2.0 (den Elzen et al., 2007), ami az IMAGE többi komponense által biztosított adatok alapján klímapolitikai forgatókönyveket hoz létre. Ez úgy történik, hogy a modell különböző gázokra meghatározza a kibocsátás-csökkentés értékeit különböző időkben, a lehető legalacsonyabb szinten tartva a költségeket. Ennek érdekében az IMAGE-ből származó, különböző kibocsátási forrásokra vonatkozó ún. regionális MAC<sup>28</sup>-görbéket használja fel.

Az RCP 2.6 modellezési folyamatait három jelentősebb lépésre bonthatjuk fel (Van Vuuren et al., 2011b):

1. Először létrehozták a kiindulási forgatókönyvet az IMAGE földhasználati és energetikai részmodelljeinek segítségével. Ezek az energetikához és a földhasználati rendszerekhez köthető üvegházhatású gázok kibocsátásáról – például az emisszió lehetséges csökkentéséről és költségeiről – is fontos adatokkal szolgálnak.
2. A FAIR-SiMCAp modellel olyan globális kibocsátási menetet határoztak meg, amivel elérhető az üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának hosszú távú stabilizációja. Ebben a lépésben a FAIR modell a kiindulási scenárió adataiból kiszámította a globális kibocsátás-csökkentést és a felmerülő költségeket, figyelembe véve a szennyezés-elhárítási mellékköltséget és a költségoptimalizált csökkentés lehetőségeit. Az optimalizálás bizonyos végrehajtási kritériumoknak megfelelően zajlott, többek között maximális kibocsátás-csökkentési potenciállal és a csökkentés maximális ütemével számoltak.

---

<sup>25</sup> TIMER - The IMage Energy Regional model: IMAGE Regionális Energetikai Modell

<sup>26</sup> FAIR - Framework to Assess International Regimes for differentiation of climate commitments: Éghajlati kötelezettségvállalások elkülönítésére szolgáló, Nemzetközi Szervezeteket felügyelő Értékelési Keretrendszer

<sup>27</sup> SiMCAp - Simple Model for Climate Policy assessment: Klímapolitika Értékelésére használt Egyszerű Modell

<sup>28</sup> MAC - Marginal Abatement Costs: Szennyezés-elhárítási mellékköltség

3. A végső, kibocsátás-csökkentésre optimalizált változat megalkotásához a már megváltozott kibocsátási értékeket használták a teljes IMAGE keretrendszer futtatásakor.

Az IMAGE fontos részét képezi a TIMER globális energetikai modell, ami a Föld energetikai rendszerének hosszú távú folyamataiba nyújt betekintést. A modell 26 régióban írja le kilenc végsőenergia-hordozó és tíz primerenergia-hordozó keresletét és kínálatát. A keresleti rész öt ágazat – ipar, közlekedés, lakhatás, szolgáltatás és egyéb – üzemanyag- és áramigényét határozza meg. Az áramszükségletet a modellben a fosszilis tüzelőanyagok vagy a bioenergia alapú hőerőművek, a vízienergia-termelés, az atomerőművek, valamint a nap- vagy szélenergia hasznosítása elégíti ki. A modell azt a technológiát részesíti előnyben, amelynél alacsonyabb anyagi ráfordítás is elegendő, ezen kívül felhasznál ún. multinomiális logit<sup>29</sup> egyenleteket is a választás során. A fosszilis tüzelőanyagok feltárása és kiaknázása – legyen szó áramtermelésről vagy közvetlen felhasználásról – a források kimerülésének és a technológiai fejlettségnek a függvénye. A bioenergia helyettesíti a fosszilis tüzelőanyagokat mind a folyékony üzemanyagok, mind a hőerőművek esetében. A kibocsátási értékek kiszámítása pedig úgy történik, hogy az energiatermelés és -fogyasztás adatait megszorozzák egy olyan kibocsátási tényezővel, ami földrajzi régióként és tüzelőanyag-típusonként változik. A legtöbb gáz esetében ez a tényező idővel csökken, köszönhetően a technológiai fejlődésnek és a növekvő környezettudatosságnak. A széndioxid esetében viszont a kibocsátási tényező nagysága állandó marad, hacsak a modell nem kifejezetten CCS technológiával párosított energiatermelési módszerrel számol (*Van Vuuren et al.*, 2011b; *Bouwman et al.*, 2006).

A felszínborítottság és földhasználat változásait szimuláló részmodell  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontású rácsellák hálózatát használja. A modell meghajtását az élelmiszer, a faanyag és a bioüzemanyagok iránti igény, valamint az éghajlatváltozás adják. A mezőgazdasági termelésre vonatkozó becslések alapját agrárgazdasági modellek forgatókönyvei biztosítják. Ezen kívül része egy természetes növényzetet modellező komponens is, ez a vegetáció klímaváltozásra adott válaszait szimulálja. A kibocsátás magából a földhasználatból – például az állatoktól származó metán emisszió – és annak átalakulásából – például erdőirtás – ered. Az előbbihez kapcsolódó emissziót szintén

---

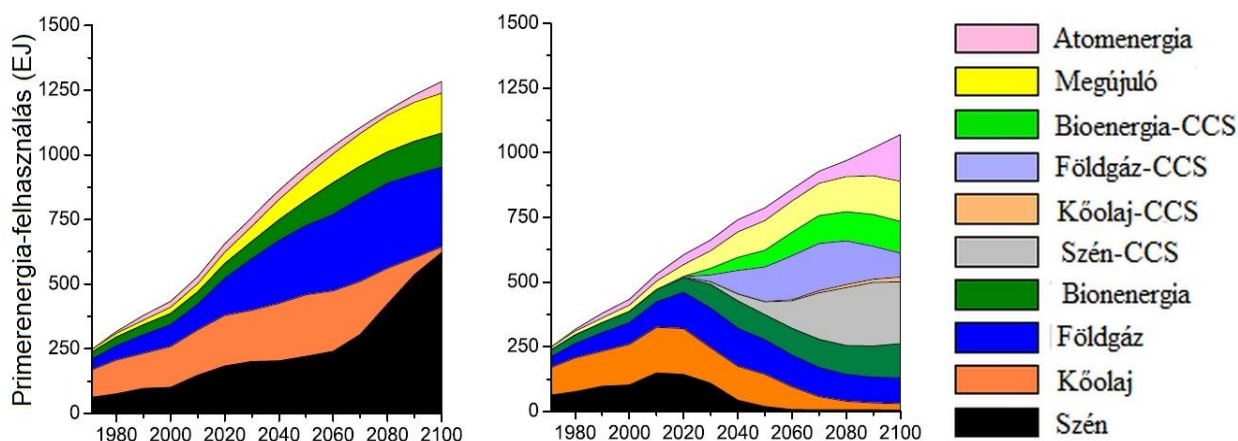
<sup>29</sup> Multinomiális logit modell: ha a válaszadónak több mint két lehetőség közül kell választania egy döntési halmazon belül, halmazonként annyi megfigyelésünk lesz egy válaszadótól, ahány választási lehetőséget tartalmaz a döntési halmaz (minden kártyáról tudjuk, hogy választotta-e a válaszadó vagy sem). Az ilyen típusú választás modellezésére a leggyakrabban alkalmazott módszer a feltételes logit, más néven multinomiális logit modell (*Baji*, 2012).

kibocsátási tényezők segítségével számítják ki, miközben az utóbbihoz tartozót a növényzet, a talaj szénkészlete és a légkör közti szénáramlás befolyásolja (Van Vuuren *et al.*, 2011b; Bouwman *et al.*, 2006).

Az éghajlati rendszer változásait a MAGICC6 modell (Meinshausen *et al.*, 2008) segítségével érzékeltették. Ez az üvegházhatású gázok és a légszennyezők IMAGE által kiszámított koncentrációváltozásait használja fel a sugárzási kényszer, illetve a globális átlaghőmérséklet emelkedésének meghatározásához. Ezen kívül a hőmérséklet és a csapadék változásait adja meg a rácsellák szintjén. A változások kiváltó mechanizmusa a termelt növények kiválasztásához és az ökoszisztémák elmozdulásához köthető. A modell segítségével becslés adható többek között a terméshozamok változására, adott területen a mezőgazdasági termelés típusára és a természetes ökoszisztémák vándorlására. A  $2,6 \text{ W/m}^2$ -t eredményező scenárió esetében eredetileg a MAGICC4-et alkalmazták, de a továbbfejlesztett MAGICC6 sokkal pontosabb becsléseket tesz lehetővé, hiszen egyebek mellett figyelembe veszi az aeroszol részecskékből származó sugárzási kényszert is (Van Vuuren *et al.*, 2011b; Meinshausen *et al.*, 2008).

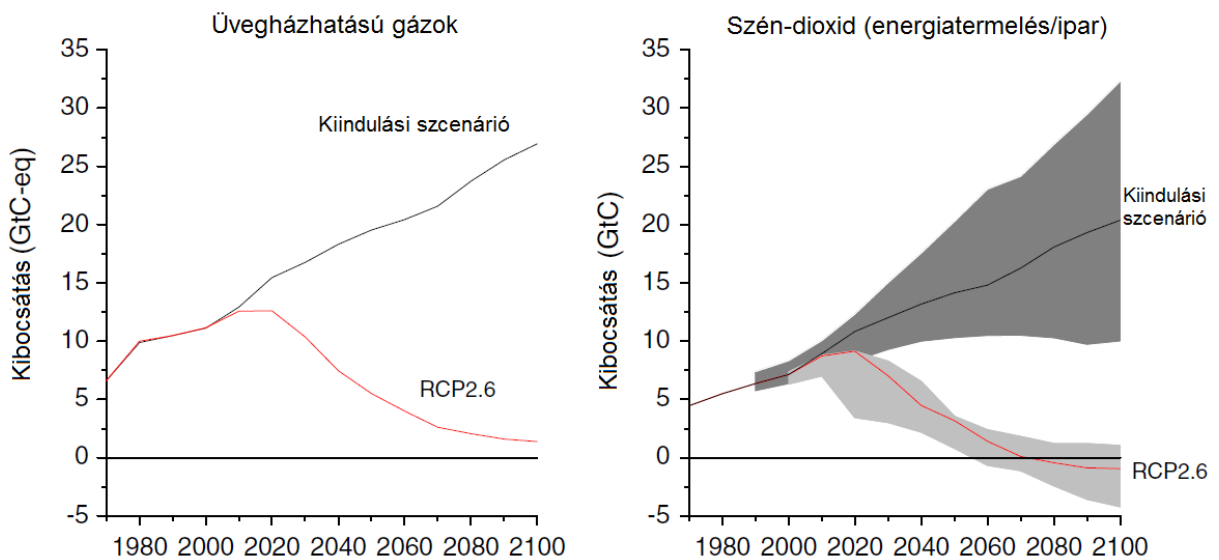
Az RCP 2.6 kiindulási forgatókönyve az IMAGE 2.4 B2 scenáriója (Van Vuuren *et al.*, 2010), ami közepes szintű fejlődéssel számol a népesedés, a bevételek, az energiafelhasználás és a földhasználat terén. Ezt úgy módosították, hogy a sugárzási kényszer menete egy túllépési profilt kövessen, így jutottak el a végleges RCP forgatókönyvhöz. Mérsékelt túllépés esetén az éghajlati rendszer tehetetlensége miatt ez nem vezet egy megszabott hőmérsékleti szint átlépéséhez (den Elzen és Van Vuuren, 2007). Továbbá az IMAGE előnye, hogy futtatható a bioenergia-CCS párosítással és anélkül egyaránt. Így vizsgálható, hogy a  $2,6 \text{ W/m}^2$ -es sugárzási kényszer változás valóban elérhető-e, mivel a bioenergia és CCS technológia párosítása eredményezhet negatív nettó kibocsátást az energetikai részmodellben. A kiindulási scenárió feltételezései szerint a következő pár évtizedben néhány korábbi trend tovább folytatódik majd. Például az energiaigény további növekedése várható, különösen a feltörekvő gazdasággal rendelkező területeken, ahol a becslések alapján magas lesz a bevétel növekedése. Ezzel szemben a fejlett országokban a jelenlegi magas energiaigény már csak kisebb mértékben fog emelkedni. Az árbecslések alapján az energiahordozók között továbbra is a fosszilis tüzelőanyagok dominálnak majd (11. ábra); miközben az olaj és a földgáz hosszú távon drágul, a szén ára viszonylag alacsony marad. Ez a szén használatának fokozódásához vezet a villamosenergia-termelésben és a hidrogén előállításában. Ennek következtében a kiindulási forgatókönyv szerint 2050 után a hidrogén versenyképes megoldást jelenthet a közlekedési ágazatban, de

ez nagyban függ a közlekedési technológiák jövőjéről alkotott becslésektől. Így elképzelhető, hogy a hidrogén helyett más üzemanyagok és meghajtások – például bioüzemanyagok vagy elektromos hajtás – hódítanak majd teret (*van Ruijven et al., 2007*).



11. ábra A globális primerenergia felhasználásának alakulása a kiindulási Szenárió (bal) és az RCP 2.6 (jobb) becslései alapján (*Van Vuuren et al., 2011b*).

A mezőgazdasági termelés szintén növekedni fog a kiindulási forgatókönyv szerint. Ennek legfőbb okai a globális népességszám emelkedése, az egy főre jutó fogyasztás szintjének szerény növekedése, valamint a több húst tartalmazó étrend kialakulása. Az elmúlt évtizedekhez hasonlóan az élelmiszertermelés fokozását a terméshozamok növelésével próbálják majd elérni. A Szenárió feltételezései szerint viszont nemcsak a terméshozam-növelés, hanem az élelmiszerigény emelkedésének üteme is lelassul. A korábbinál alacsonyabb hozamjavulással számolva a termőterületek nagysága 2050-ig csak szerény mértékben növekszik majd, utána pedig stabilizálódni fog. A legelők többé-kevésbé változatlanok maradnak a jelenlegi nagyságukhoz képest, aminek egyik legjelentősebb oka a rögzülő, végül 2050 után csökkenő népességszám, illetve a globálisan egyre elterjedtebbé váló istállózó állattartás. Tehát a mezőgazdasági területek nagysága viszonylag stabilizálódik, aminek eredményeként a földhasználat-változásokból adódó kibocsátás csökkenése várható a 21. században. A zérus közeli értéket azonban csak 2060 után közelíti meg. Az üvegházhatású gázok teljes kibocsátása – beleértve a földhasználatból köthető széndioxid-emissziót is – jelentősen megnövekszik 2000 és 2100 között: 11 GtC-eq-ről 27 GtC-eq-re. Ennek következtében a koncentráció értékei is megemelkednek, aminek eredménye a hozzávetőlegesen 7,2 W/m<sup>2</sup>-es sugárzási kényszer változás 2100-ra. A globális évi középhőmérséklet emelkedése 2100-ban nagyjából 4 °C-kal haladja meg az iparosodás előtti szintet, 3 °C-os klímaérzékenységet feltételezve (*Van Vuuren et al., 2011b*).



12. ábra Az üvegházhatású gázok emissziójának menete, valamint az energiatermeléshez és ipari tevékenységhez köthető széndioxid-kibocsátás menete az RCP 2.6 és kiindulási szcenáriója alapján. A szürke jelölések a 10. és 90. percentilisek közti értékeket jelölik (Van Vuuren et al., 2011b).

A kiindulási szcenárió bemutatásából jól látható, hogy az RCP 2.6 esetében a kibocsátásnak jelentős mértékben vissza kell esnie a  $2,6 \text{ W/m}^2$ -es sugárzási kényszer eléréséhez. Az RCP 2.6 alapján a teljes évszázadra vonatkozó összegzett kibocsátás-csökkentés 70 %-os a kiindulási szcenárióhoz viszonyítva, 2100-ban pedig meghaladja a 95 %-ot (12. ábra). A legfontosabb üvegházhatású gázok esetében nagyon eltérő a visszaesés mértéke. A szén-dioxid esetében ez több, mint 100%-os csökkentést jelent, ami nagyjából  $-1 \text{ GtC/év}$  nagyságot eredményez 2100-ban. Ez az energiahatékonyság jelentős növelésével, és a fosszilis tüzelőanyagok használatának megváltoztatásával – például CCS technológiák alkalmazásával, a megújuló energiaforrások és az atomenergia kiaknázásával, illetve bioenergia-termeléssel – érhető el (Van Vuuren et al., 2007). Az energianövények termesztésével azonban valamelyest növekedhet a földhasználatból származó széndioxid-emisszió, mivel az erdősítés folyamata lelassulhat, így a szén-dioxid megkötésének mértéke is visszaeshet. A metán és dinitrogén-oxid emissziója kisebb mértékben csökken az RCP 2.6 szerint. Ennek oka, hogy ezeknek a gázoknak a kibocsátása csak korlátozott mértékben fogható vissza. Ilyen például a kérődző állatoktól eredeztethető metánkibocsátás, valamint a talaj dinitrogén-oxid emissziója. Ezzel szemben az energetikához köthető metánkibocsátás majdnem nullára redukálható: csak a külszíni szénbányászat és földgázzállítás járuléka marad. A dinitrogén-oxidnál a feldolgozáshoz köthető emisszió gyakorlatilag megszüntethető, de mezőgazdasági kibocsátása csak kis mértékben korlátozható. További dinitrogén-oxid-kibocsátással jár a bioenergia-termelés

fokozódása (*Crutzen et al.*, 2007). A Montreali Jegyzőkönyv (*Oliver*, 2005) által nem szabályozott halogénezett gázok kibocsátása a kiindulási scenárióban gyorsan növekszik a légkondicionálásban való felhasználásuk miatt. Az RCP 2.6 viszont jelentős csökkenésükkel számol, mivel más gazdaságos alternatívák is rendelkezésre állnak a légkondicionálókban való kiváltásukhoz (*Van Vuuren et al.*, 2011b).

Mind a kiindulási, mind az RCP 2.6 scenárióban jelentősen változik a légszennyezők kibocsátása. Ez nem csak a gazdasági és egyéb tevékenységek, hanem a kibocsátási tényezők megváltozásának is betudható. A kiindulási forgatókönyv különösen a kén-dioxid és a szén-monoxid emissziójában számol jelentős visszaeséssel. Ennek oka főként az, hogy a fejlődő országok felzárkóznak a gazdagabb országokhoz a klímapolitikai intézkedések tekintetében, ezek pedig a levegőminőséget is befolyásolják. Más légszennyezők – például ammónia, nitrogén-oxidok és illékony szerves vegyületek – esetében viszont többé-kevésbé állandó a kibocsátás 2050-ig. Az RCP 2.6 szerint a kén-dioxid mellett az illékony szerves vegyületek kibocsátás-csökkenése is jelentős lesz. Ez egyrészt abból következik, hogy a magas széndioxid-kibocsátással járó folyamatok – például a szénégetés – magas szennyezőanyag-kibocsátást eredményeznek. Tehát a korlátozásukkal mindkét emisszió egyszerre csökkenthető. Másrészt az illékony szerves vegyületek kibocsátása erősen függ a közlekedéstől, így annak változásai révén – például a hidrogénhajtás bevezetésével – ugyancsak redukálható az emisszió. Az RCP 2.6 az ammónia-kibocsátás fokozódását feltételezi, ami főleg a mezőgazdasági ágazatban valószínűsíthetően végbemenő átalakulás következménye. A szerves szén és korom esetében az energetikához köthető kibocsátási tényezők idővel csökkenni fognak, a földhasználatnál pedig állandóak maradnak. Összességében véve a kiindulási scenárióban a hagyományos energia-felhasználás visszaszorulásának köszönhetően, valamint az erdőirtás hatására egy olyan csökkenő trenddel számolhatunk, aminél a fennmaradó szerves szén kibocsátás főleg a szavanna felégetéséből származik, a korom pedig az energiatermelési ágazat miatt kerül a légkörbe. Az RCP 2.6-nál a klímapolitika eredményeképpen nagyobb csökkenés várható, ugyanakkor a szerves szén kibocsátását csak kis mértékben befolyásolja, mivel a scenárió nem számol kifejezetten a korommal és szerves szénrel foglalkozó szabályozásokkal (*Van Vuuren et al.*, 2011b).



## 5. A forgatókönyvek kiterjesztései: az ECP-k bemutatása

Az RCP forgatókönyvcsalád egyik legnagyobb újítása, hogy a fejlesztés során elkészültek a scenáriók 2100 utáni időszakra vonatkozó egyszerű kiterjesztései is. Ezek az ECP – Extended Concentration Pathway, azaz Kiterjesztett Koncentrációs Nyomvonal – elnevezést kapták. Létrehozásukat az indokolta, hogy az éghajlati modellezéssel foglalkozó szakértők az éghajlati rendszer és az óceánok hosszú távú változásait 2100 után is modellezni kívánták, így az RCP scenáriókat 2300-ig terjesztették ki. Mivel a kibocsátás előidézőire – például a demográfiai és gazdasági viszonyokra – vonatkozó többszázéves időtávú becslések nagy bizonytalansággal terheltek, ezért a szakemberek nem bocsátkoztak részletes társadalmi és gazdasági becslésekbe és feltételezésekbe a 2100 utáni időszakra vonatkozóan. Ehelyett viszonylag egyszerű vezérelveket követve terjesztették ki a koncentrációra, kibocsátásra és földhasználatra vonatkozó adatsorokat. Ez alapvetően háromféleképpen valósulhatott meg, de ezek kombinációit is alkalmazták (*Meinshausen et al.*, 2011):

1. A sugárzási kényszer és a koncentráció állandó szinten tartásával.
2. A kibocsátás állandó szinten tartásával.
3. A kibocsátás időbeli változtatásával, ekkor ez a 2100. évi értéktől eltérő szinten, később stabilizálódik.

Számos alternatív kiterjesztés került szóba a fejlesztés során, például az RCP 8.5 esetében az egyik véglet a koncentráció szinten tartását jelentette 2100 után, míg a másik a kibocsátás állandósulását 2300-ig, ami rendkívül magas sugárzási kényszert eredményezett. Ezért ebben a konkrét esetben egy köztes megoldást választottak, mely szerint 2250 után durván 2000 ppm-nél rögzül a szén-dioxid koncentrációja. Fontos kiemelni, hogy az ECP-k csak nagyvonalú becsléseknek tekinthetők a 2100-2300 időszak viszonyainak alakulására, mivel nem alapulnak olyan részletes társadalmi és gazdasági elemzéseken, mint az RCP forgatókönyvek. Ennek ellenére az éghajlati modellezésben jól használhatóak a 2100 utáni állapotokat összehasonlító elemzések készítésére (*Van Vuuren et al.*, 2011a; *Meinshausen et al.*, 2011).

Az ECP-k létrehozásának általános kritériumait a 2. táblázat tartalmazza. Mind a négy RCP scenárió kiterjesztését elkészítették, valamint a hatásvizsgálati szakemberek kérésére létrehoztak egy kiegészítő forgatókönyvet is. Ez az RCP 6.0 alapjain nyugszik, és a sugárzási kényszer változása 2100 után éri el a csúcsertékét – vagyis a  $6 \text{ W/m}^2$ -t –, ezután pedig lecsökken és rögzül  $4,5 \text{ W/m}^2$ -nél. Az ECP 4.5 és ECP 6.0 mellett ezzel a

kiterjesztett forgatókönyvvel vizsgálhatók az éghajlati rendszer és a szénkörforgás aszimmetriái, illetve a kapcsolódó folyamatok visszafordíthatósága mellett a biofizikai rendszerekre gyakorolt hatásuk is. A scenárió az SCP6to4.5 megjelölést kapta, ezzel is utalva legfőbb jellegzetességére (Van Vuuren *et al.*, 2011a).

2. táblázat Az ECP-k kifejlesztésének alapvető követelményei (Van Vuuren *et al.*, 2011a)

Paraméter	ECP	Általános követelmény
Szén-dioxid és egyéb, jól elkeverődő üvegházhatású gázok	ECP 8.5	Sugárzási kényszer változásának stabilizációja 12 W/m <sup>2</sup> -nél
	ECP 6.0	2150-re a koncentrációk stabilizálódása (sugárzási kényszer változás stabilizálódása nagyjából 6 W/m <sup>2</sup> -nél)
	ECP 4.5	2150-re a koncentrációk stabilizálódása (sugárzási kényszer változás stabilizálódása nagyjából 4,5 W/m <sup>2</sup> -nél)
	ECP 2.6	Kibocsátás állandósulása a 2100. évi szinten
	SCP6to4.5	2250-re az összes gáz által kiváltott sugárzási kényszer változás csökkenjen az RCP 6.0-ban található szintekről az RCP 4.5 szintjeire
Reaktív gázok	Összes ECP	Koncentrációjuk állandósuljon a 2100. évi szinten
	SCP6to4.5	A reaktív gázok által okozott kényszer változás csökkenjen az üvegházhatású gázok által okozott kényszer változással együtt
Földhasználat	Összes ECP	Állandósuljon a 2100. évi szinten

Az alapkövetelmények következtében az ECP 8.5, ECP 6.0 és ECP 4.5 esetében a szén-dioxid kibocsátásában jelentős csökkenés tapasztalható 2100 után. Az ECP 2.6 és a kiegészítő forgatókönyv esetében pedig az emisszió-csökkenés a 2100 előtti trend folytatását jelenti. Az ECP 8.5 esetében viszont ez nagy törést jelent a 2100 előtti tendenciákhoz képest, és nagy visszaesést a kibocsátásban 2150 és 2250 között. Az ECP 2.6-ban tapasztalható negatív emissziós értékek pedig arra világítanak rá, hogy sikerül megfelelő nyelőkapacitást találni a szén-dioxid tárolásához – például a CCS technológiák széles körű alkalmazásával. Bár 2100 után növekszik a tárolási igény – a 2100 előtti 600 GtC-ről további 200 GtC-vel –, az optimista becslések szerint a tárolókapacitás lépést fog tartani ezzel, amennyiben csak a bioenergia-felhasználásból származó szén-dioxid tárolását kell megoldani. Az ECP 2.6 feltételezései szerint 2300-ra a sugárzási kényszer ipari forradalom előtti időszakhoz viszonyított megváltozása nagyjából a 2000. évi értéket éri majd el, a szén-dioxid koncentrációja pedig a 360 ppm-t. Az SCP6to4.5 forgatókönyv szintén lehetséges alternatívát kínál a jövőre nézve, de ennek teljesüléséhez arra van

szükség, hogy a kibocsátás hirtelenszerűen essen vissza. További feltétel a negatív előjelű széndioxid-kibocsátás, azaz a szén-dioxid légkörből való kivonódásának hosszú periódusa. Ez számszerűsítve mintegy évi  $-13,9 \text{ GtCO}_2$  2150 és 2230 között, ami jelentősen meghaladja az RCP 2.6-ban előírt hasonló értéket ( $-3,41 \text{ GtCO}_2/\text{év}$ ). Más szavakkal az ebben a scenárióban meghatározott célok elérése viszonylag nehézkesnek tűnik (*Van Vuuren et al.*, 2011a; *Meinshausen et al.*, 2011).

## 6. Alkalmazások, felhasználás a gyakorlatban

Ahogy az a forgatókönyvek és kiterjesztéseik bemutatásából is látható, az RCP-k rendkívül sok területen felhasználhatók az éghajlatkutatásban és a kapcsolódó tudományágakban. Kiemelkedően fontos szerepet játszanak az olyan globális klímaszimulációk elvégzésében, mint például a CMIP5<sup>30</sup> projekt (*Taylor et al.*, 2012). Ez a nemzetközi program számos tudományos intézet éghajlati modelljének összehasonlítását, a modellfejlesztések összehangolását tűzte ki célul. A CMIP5 keretében a legfontosabb scenáriókkal – beleértve az SRES és az RCP forgatókönyveket is – hajtottak végre modellkísérleteket. Ezek eredményei szolgáltak alapul az IPCC 2013-ban megjelenő Ötödik helyzetértékelő jelentéséhez. A CMIP5 projektben az RCP-ket hosszú távú kísérletekhez használták fel, amelyeket AOGCM<sup>31</sup> és ESM<sup>32</sup> modellekkel is futtattak. Ezek meghajtásként az üvegházhatású gázok történeti és jövőre vonatkozó koncentrációs adatait használják, amelyeket az RCP-k közötti jobb összehasonlíthatóság érdekében a kibocsátási adatokból származtattak a MAGICC6 modell segítségével (*Meinshausen et al.*, 2011). A kísérletek a klíma jövőbeli alakulását vizsgálják a 21.-23. században, így a 2100 utáni időszak modellezéséhez szükség volt a scenáriók kiterjesztéseire is. Az egyik ilyen kísérletet – CMIP5-beli elnevezése: esmrcp85 – érdemes megemlíteni, mivel ebben az esetben a jövőre vonatkozó éghajlati becsléshez az RCP 8.5 forgatókönyv koncentrációs adatai helyett inkább a széndioxid-kibocsátás értékeit vették alapul (*Taylor et al.*, 2012).

Egy másik, már nem a CMIP5 keretében végzett kísérletben (*Lacressonnière et al.*, 2014) a levegő minőségének változását vizsgálták Európában a 2030-as és 2050-es években. Ehhez egy kémiai anyagszállítási modell mellett az RCP 8.5-öt használták fel, és a klímaváltozás mellett a globális és regionális emisszió változásának hatásaival is számoltak. Az eredmények alapján Északnyugat-Európában megnövekszik a felszíni ózon mennyisége, szemben a kontinens déli területeivel, ahol a szimuláció szerint csökkenés várható. Az ózon átlagos mennyisége nyáron nagyjából 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -rel emelkedik tízévenként a kísérlet szerint. Európa jelentős hányadában – különösen Nyugat-Európában – pedig jelentős mértékben korlátozzák majd a nitrogén-oxidok kibocsátását. Az elemzés eredményei felhasználhatók a troposzférikus ózonszennyezést korlátozni kívánó stratégiák kidolgozásakor, amelyeknek célja az európai levegőminőségi szabályozások javítása.

---

<sup>30</sup> CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5: Csatolt Modellek Összehasonlító Projektjének ötödik szakasza

<sup>31</sup> AOGCM - Atmosphere-Ocean General Circulation Model: Légkör-Óceán Általános Cirkulációs Modell

<sup>32</sup> ESM - Earth System Model: Földrendszer-modell

A rövid tartózkodási idejű nyomgázok és aeroszol-részecskék kibocsátásának jövőbeli alakulása rendkívül bizonytalan. A sugárzási kényszer és a levegőminőség változásaiban azonban fontos szerepet játszanak, ennek ellenére az RCP-k csak egy részükkel foglalkoznak behatóbban. Az egyik kutatás (*Chuwah et al.*, 2013) során azt tanulmányozták, hogyan változik bizonyos légszennyezők koncentrációja, ha különböző becslésekkel és feltételezésekkel élnek a jövőbeli klímapolitikával kapcsolatban. Ehhez az IMAGE modell segítségével az RCP-hez hasonló scenáriókat dolgoztak ki, amelyek 2100-ra  $2,6 \text{ W/m}^2$ , illetve  $6,0 \text{ W/m}^2$ -es sugárzási kényszer változást érnek el az ipari forradalom előtti időszakhoz viszonyítva. Az eredmények alapján a légszennyezést szabályozó intézkedések jelentősen csökkenthetik a troposzférikus ózonhoz és koromhoz köthető melegedést, illetve a szulfát aeroszol hűtő hatását 2020-ig. 2050-re pedig a globális átlagos sugárzási kényszer a  $6,0 \text{ W/m}^2$ -es forgatókönyvben várhatóan  $+0,09 \text{ W/m}^2$ -t, a  $2,6 \text{ W/m}^2$ -es scenárióban pedig  $-0,16 \text{ W/m}^2$ -t változik. Kifejezetten az ózonra fókuszáló kutatás is indult, ami az ózon és prekursorainak jövőbeli változását vizsgálta az RCP scenáriókban. Ehhez az RCP-k éghajlatváltozásra vonatkozó becslései mellett igénybe vették a prekursorok antropogén kibocsátására vonatkozó adatait is, és így modellezték a felszíni ózonkoncentráció időbeli alakulását 2050-ig (*Kim et al.*, 2015).

Az RCP 6.0 fejlesztési folyamatainak részeként létrehoztak egy olyan scenáriót, amivel a biomassza égetéséből származó, hosszú távú aeroszolzrészecske-emisszió mellett a földhasználat átalakulásából származó széndioxid-kibocsátás is vizsgálható. Az ehhez kapcsolódó kutatás során Kato és munkatársai a földhasználatból származó emisszió becsléseinek bizonytalanságát tanulmányozták, amit a szén-dioxid koncentrációváltozása mellett a földhasználati scenáriók is befolyásolnak (*Kato et al.*, 2011).

Egy másik tanulmány (*You et al.*, 2014) a Kína középhőmérsékletének, maximumhőmérsékletének és minimumhőmérsékletének jövőbeli alakulását vizsgálta. A becslések a 2006-2100 időszakra vonatkoznak, a 2011-2040 és 2061-2090 periódusok esetében pedig felhasználták az RCP 8.5, RCP 4.5 és RCP 2.6 adatait. Az eredmények alapján az éghajlatváltozás leginkább Kína északkeleti részét és a Tibeti-fennsíkot érinti majd. Ugyanakkor nem sikerült érzékeltetni a maximum- és minimumhőmérsékletre vonatkozó projekciók esetében az eltérő trendet, ami a múltbeli megfigyelések alapján egyértelműen azonosítható (*You et al.*, 2014).

A globális éghajlatváltozás hatására a különböző területek éghajlati osztályba sorolása is megváltozik, az éghajlati rendszerek eltolódása várható. Feng és munkatársainak kutatása a Köppen-Trewartha osztályozás segítségével, valamint az

RCP 8.5 és RCP 4.5 scenáriók felhasználásával modellezte a változásokat, az 1900 és 2010 közötti megfigyelésekre, illetve az 1900-2100 időszak szimulációjára támaszkodva. Az eredmények nagyvonalakban azt mutatják, hogy a mérsékelt, trópusi és száraz területek kiterjednek a sarki, sarkvidéki és szubtrópusi területek rovására. Az RCP 4.5 alapján a Föld területének 31,4%-a, az RCP 8.5 alapján pedig 46,3%-a kerül más éghajlati osztályba a 21. század végéig (*Feng et al.*, 2014).

A klímapolitikai intézkedések bevezetésével valószínűsíthetően elterjed a CCS technológiák alkalmazása, ami az RCP forgatókönyvcsalád esetében is fontos szerepet játszik. *Dooley és Calvin* (2011) tanulmánya ennek vizsgálatával foglalkozik, különös figyelmet szentelve a biomassza-CCS párosítás felhasználásának az energiatermelésben. Ezen kívül a szén-dioxid tárolásának lehetőségeit is részletesen elemzik.

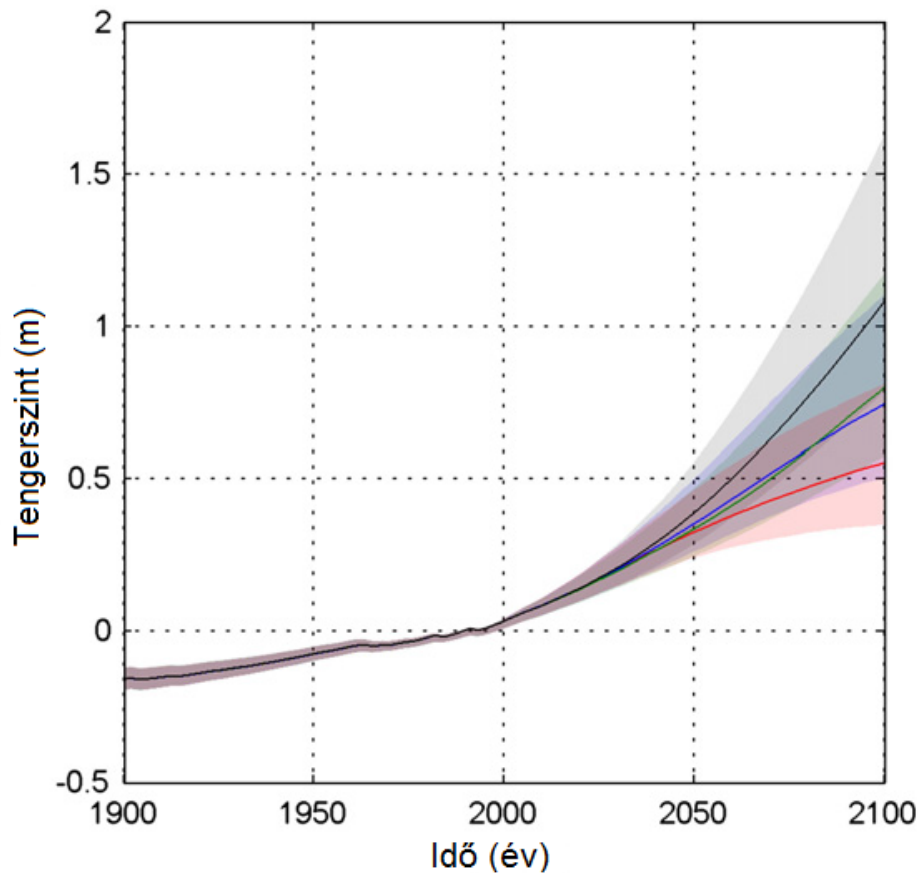
Fontos kérdés a jövőre nézve a hidrológiai viszonyok vizsgálata, ezen belül is az éghajlatváltozás és az aszály kapcsolata, illetve az antropogén hatások becslése. *Wanders és Wada* (2014) kutatásai során egy globális hidrológiai és vízkészleteti modell futtatásához felhasználták a négy RCP forgatókönyvet figyelembe vevő CMIP5 klíma projekciókat. A scenáriók közötti kis különbségek arra mutattak rá, hogy az emberi vízfelhasználás arányos az éghajlat változásaival, illetve a régiók és évszakok közötti eltérések rendkívül változatosak (*Wanders és Wada*, 2014).

Mokhov és munkatársai a különböző – RCP 2.6 és RCP 8.5 – scenáriók segítségével azt vizsgálták, hogy a légköri blocking helyzetek jellegzetességei miként változnak a 21. század során az euro-atlanti régióban és az északi félgömbön. Eredményeik azt mutatták, hogy az euro-atlanti területeken egész évben – különösen télen – gyakrabban fognak kialakulni ilyen helyzetek, ugyanakkor a teljes északi félgömbre a csökkenésük figyelhető meg (*Mokhov et al.*, 2014).

Az RCP-kre mint a sugárzási kényszer értékeit megadó komponensre épít az egyik olyan új forgatókönyv-keretrendszer, aminek célja a különböző éghajlatkutató csoportok – például az éghajlati modellezők, hatásbecsléssel foglalkozó szakértők, mérséklési kérdéseket kutató tudósok, társadalmi és gazdasági viszonyokat vizsgáló szakemberek, stb. – munkájának összehangolása (*Van Vuuren et al.*, 2012).

Az éghajlatváltozással kapcsolatban az egyik leggyakrabban megfogalmazott kérdés, hogy milyen mértékben fog megemelkedni a tengerek szintje. Az erre irányuló vizsgálat (*Jevrejeva et al.*, 2012) 2500-ig ad becsléseket az emelkedésre, felhasználva a négy RCP forgatókönyvet. Az RCP 2.6 esetében 2100-ig 0,57 méteres, az RCP 8.5 esetében pedig 1,1 méteres emelkedés várható (*13. ábra*), ami 2500-ig rendre 1,84 méterre,

illetve 5,49 méterre növekszik majd a szimulációk szerint. Továbbá bizonyították, hogy a sugárzási kényszer stabilizálódása után még évszázadokig emelkedhet a tenger szintje az óceánok hosszú válaszideje miatt (*Jevrejeva et al., 2012*).



13. ábra Az RCP forgatókönyvek becslései a tengerszint megváltozására 2100-ig.  
Jelölések: vörös – RCP 2.6; kék – RCP 4.5; zöld – RCP 6; fekete – RCP 8.5.  
A hasonló színű árnyékok kijelölik az alsó és felső – 5%-os és 95%-os – konfidenciaszinteket  
(*Jevrejeva et al., 2012*).

Az RCP-k sokrétű alkalmazhatóságának további bizonyítéka a búzatermelés változásainak, ezen belül pedig a terméshozamoknak a becslése. Mivel a búza rendkívül érzékeny az éghajlat változásaira, az RCP-k segítségével létrehozott klíma projekciók jól alkalmazhatók szimulációkhoz. Ugyanakkor az eredmények azt mutatták, hogy a klímaváltozás negatív hatásai ellensúlyozhatók a terméshozamok mesterséges fokozásával (*Balkovič et al., 2014*).

## 7. Összefoglalás

A szakdolgozat célja az RCP forgatókönyvcsalád áttekintése volt, amely során részletesen ismertettem a scenáriók leírásának megértéséhez szükséges alapfogalmakat és definíciókat. Részletes jellemzésre került többek között az éghajlati forgatókönyv fogalma, az RCP kifejezés, illetve a sugárzási kényszer definíciója. Ezt követte a forgatókönyvek kifejlesztésének okait, követelményeit és lépéseit tárgyaló fejezet, amelyben bemutattam a scenáriókat kifejlesztő tudományos csoportokat is. A szakdolgozat ezután rátért a négy RCP forgatókönyv bővebb, alaposabb jellemzésére, különös figyelmet szentelve a létrehozásukat jelentő modellezési folyamatoknak és az alkalmazott modelleknek, a scenáriók legfontosabb karakterisztikáinak, az energetikai és gazdasági viszonyok becsült jövőképeinek, valamint az üvegházhatású gázok és légszennyezők kibocsátásának. Ezután egy kitekintés jellegű fejezetben röviden bemutattam a scenáriók kiterjesztéseit, továbbá ezek legjellegzetesebb projekcióit. Végül néhány olyan érdekes és fontos kutatást, vizsgálatot tárgyaltam, amelyek jól reprezentálják az RCP-k alkalmazhatóságának sokoldalúságát.

Noha az RCP-k kifejlesztésére 2007-ben tett javaslat után azonnal megindultak a munkálatok, a forgatókönyvcsaládban rejlő lehetőségeket korántsem aknázták még ki teljes mértékben. Jelenleg is számos kutatás, vizsgálat folyik, amelyek alapjául az RCP scenáriók szolgálnak. Ez nem meglepő, hiszen az RCP-k egyedülállóan részletes és átfogó adatot biztosítanak az éghajlati modellek projekcióihoz, mind térbeli felbontás, mind információtartalom tekintetében. A létrehozásukkor támasztott követelményeknek teljes mértékben megfelelnek, hiszen amellett, hogy a szakirodalomban fellelhető összes forgatókönyvet megfelelően képviselik, figyelembe veszik az éghajlatváltozás módosítására törekvő szabályozásokat és rendelkezéseket, továbbá viszonylag nagy földrajzi pontossággal ábrázolják a jövőbeli viszonyok térbeli eloszlását.

Az IPCC által felkért tudományos közösségnek tehát sikerült egy minden szempontból megfelelő forgatókönyvcsaládot kifejlesztenie, amivel az éghajlatváltozást vizsgáló különböző tudományágak közötti együttműködés tovább javítható. Ez a jövőről alkotott képünket is nagy mértékben befolyásolja, hiszen a különböző tudományterületek ismereteinek ötvözésével alaposabb becslések készíthetők a globális éghajlatváltozással kapcsolatban.



## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönöm témavezetőmnek, dr. Pongrác Ritának, az ELTE Meteorológiai Tanszék adjunktusának a szakdolgozat létrehozásában nyújtott segítségét.

## Irodalomjegyzék

- Azar, C., Lindgren, K., Larson, E., Möllersten, K., 2006: Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass—costs and potential role in stabilizing the atmosphere. *Climatic Change*, 74, 47–79.
- Baji, P., 2012: A diszkrét választás módszere. *Statisztikai Szemle*, 90, 943-963.
- Balkovič, J., van der Velde, M., Skalský, R., Xiong, W., Folberth, C., Khabarov, N., Smirnov, A., Mueller, N. D., Obersteiner, M., 2014: Global wheat production potentials and management flexibility under the representative concentration pathways. *Global and Planetary Change*, 122, 107–121.
- Bouwman, A. F., Kram, T., Klein Goldewijk, K., (szerk.) 2006: Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE 2.4. Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven. 228 p.
- Brenkert, A., Smith, S., Kim, S., Pitcher, H., 2003: Model documentation for the MiniCAM. PNNL-14337, Pacific Northwest National Laboratory, Richland. 69 p.
- Chuwah, C., van Noije, T., van Vuuren, D. P., Hazeleger, W., Strunk, A., Deetman, S., Beltran, A. M., van Vliet, J., 2013: Implications of alternative assumptions regarding future air pollution control in scenarios similar to the Representative Concentration Pathways. *Atmospheric Environment*, 79, 787-801.
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., Richels, R., 2007: CCSP synthesis and assessment product 2.1, Part A: scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. U.S. Government Printing Office, Washington, DC. 154 p.
- Crutzen, P. J., Mosier, A. R., Smith, K. A., Winiwarter, W., 2007: N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7, 11191–11205.
- den Elzen, M. G. J., Van Vuuren, D. P., 2007: Peaking profiles for achieving long-term temperature targets with more likelihood at lower costs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 17931–17936.
- den Elzen, M., Meinshausen, M., Van Vuuren, D., 2007: Multi-gas emission envelopes to meet greenhouse gas concentration targets: costs versus certainty of limiting temperature increase. *Global Environmental Change*, 17, 260–280.
- Dooley, J. J., Calvin, K. V., 2011: Temporal and spatial deployment of Carbon dioxide Capture and Storage technologies across the Representative Concentration Pathways. *Energy Procedia*, 4, 5845–5852.
- Feng, S., Hu, Q., Huang, W., Ho, C.-H., Li, R., Tang, Z., 2014: Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Global and Planetary Change*, 112, 41–52.
- Fischer, G., Tubiello, F. N., van Velthuisen, H., Wiberg, D. A., 2007: Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990-2080. *Technological Forecasting & Social Change*, 74, 1083-1107.
- Gelencsér, A., 2014: Koromrészecskék a légkörben. A kipufogócsőtől az éghajlat-módosításig. *Magyar Tudomány*, 175., 1366-1375.
- Hijioka, Y., Matsuoka, Y., Nishimoto, H., Masui, T., Kainuma, M., 2008: Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environmental Engineering*, 13, 97-108.
- Hurt, G. C., Chini, L. P., Frolking, S., Betts, R. A., Feddema, J., G. Fischer, Fisk, J. P., Hibbard, K., Houghton, R. A., Janetos, A., Jones, C. D., Kindermann, G., Kinoshita, T., Goldewijk, K. K., Riahi, K., Shevliakova, E., Smith, S., Stehfest, E., Thomson, A., Thornton, P., van Vuuren, D. P., Wang, Y. P., 2011: Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*

*Special Issue: The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, , 109, 117-161.

- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. L. (szerk.)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (szerk.)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p.
- Ito, A., 2010: Changing ecophysiological processes and carbon budget in East Asian ecosystems under near-future changes in climate: implications for long-term monitoring from a process-based model. *Journal of Plant Research*, 123, 577–588.
- Ito, A., Oikawa, T., 2002: A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling*, 151, 143–176.
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A., 2012: Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, 80–81, 14–20.
- Kainuma, M., Matsuoka, Y., Morita, T., (szerk.) 2003: Climate policy assessment. Springer Japan, Tokyo. 402 p.
- Kato, E., Kawamiya, M., Kinoshita, T., Ito, A., 2011: Development of spatially explicit emission scenario from land-use change and biomass burning for the input data of climate projection. *Procedia Environmental Sciences*, 6, 146–152.
- Kim, M. J., Park, R. J., Ho, C.-H., Woo, J.-H., Choi, K.-C., Song, C.-K., Lee, J.-B., 2015: Future ozone and oxidants change under the RCP scenarios. *Atmospheric Environment*, 101, 103-115.
- Lacressonnière, G., Peuch, V.-H., Vautard, R., Arteta, J., Déqué, M., Joly, M., Josse, B., Marécal, V., Saint-Martin, D., 2014: European air quality in the 2030s and 2050s: Impacts of global and regional emission trends and of climate change. *Atmospheric Environment*, 92, 348-358.
- Luckow, P., Wise, M. A., Dooley, J. J., Kim, S. H., 2010: Large-scale utilization of biomass energy and carbon dioxide capture and storage in the transport and electricity sectors under stringent CO<sub>2</sub> concentration limit scenarios. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 865-877.
- Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., Kinoshita, T., Nozawa, T., Ishiwatari, S., Kato, E., Shukla, P. R., Yamagata, Y., Kainuma, M., 2011: An emission pathway for stabilization at 6 W/m<sup>2</sup> radiative forcing. *Climatic Change Special Issue: The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, 109, 59-76.
- Matsumoto, K., Masui, T., 2010: Economic implications of avoiding dangerous climate change: an analysis using the AIM/CGE [Global] model. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 4 (7), 76–83.
- Meinshausen, M., Hare, B., Wigley, T. M. L., Van Vuuren, D., Den Elzen, M. G. J., Swart, R., 2006: Multi-gas emissions pathways to meet climate targets. *Climatic Change*, 75, 151–194.
- Meinshausen, M., Raper, S. C. B., Wigley, T. M. L., 2008: Emulating IPCC AR4 atmosphere-ocean and carbon cycle models for projecting global-mean, hemispheric and land/ocean temperatures: MAGICC 6.0. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8, 6153–6272.
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., van Vuuren, D.P., 2011: The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change Special Issue: The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, 109, 213-241.

- Mokhov, I. I., Timazhev, A. V., Lupo, A. R., 2014: Changes in atmospheric blocking characteristics within Euro-Atlantic region and Northern Hemisphere as a whole in the 21st century from model simulations using RCP anthropogenic scenarios. *Global and Planetary Change*, 122, 265–270.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J. P., Zurek, M., 2008: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. 132 p.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000: Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge University Press, Cambridge. 570 p.
- Oliver, J. E., 2005: Encyclopedia of World Climatology. Springer Netherlands, Dordrecht. 516 p.
- Rao, S., Riahi, K., 2006: The role of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases in climate change mitigation: long-term scenarios for the 21st century. *The Energy Journal*, 27, 177–200.
- Riahi, K., Gruebler, A., Nakicenovic, N., 2007: Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting & Social Change*, 74(7), 887–935.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P., 2011: RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change Special Issue: The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, 109, 33-57.
- Rokityanskiy, D., Benitez, P., Kraxner, F., McCallum, I., Obersteiner, M., Rametsteiner, E., Yamagata, Y., 2007: Geographically explicit global modeling of land-use change, carbon sequestration, and biomass supply. *Technological Forecasting & Social Change*, 74, 1057–1082.
- Smith, S. J., Pitcher, H., Wigley, T. M. L., 2005: Future sulfur dioxide emissions. *Climatic Change*, 73(3), 267–318.
- Smith, S. J., Wigley, T. M. L., 2006: Multi-gas forcing stabilization with the MiniCAM. *The Energy Journal*, 27, 373–391.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E., Edmonds, J. A., 2011: RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change Special Issue: The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, 109, 77-94.
- Van Ruijven, B., Van Vuuren, D. P., de Vries, B., 2007: The potential role of hydrogen in energy systems with and without climate policy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 1655–1672.
- Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G. J., Lucas, P. L., Eickhout, B., Strengers, B. J., van Ruijven, B., Wonink, S., van Houdt, R., 2007: Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, 81, 119–159.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K., 2011a: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change Special Issue: The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, 109, 5-31.
- Van Vuuren, D. P., Feddema, J., Hibbard, K., Hurtt, G., Lamarque, J. F., Riahi, K., Rose, S., Smith, S., 2008: Draft work plan for data exchange between the Integrated assessment and Climate Modeling community in support of the Preparatory Phase of scenario analysis for climate change assessment

(Representative Concentration Pathways). Elérhető: [http://www.aimes.ucar.edu/docs/RCP\\_handshake.pdf](http://www.aimes.ucar.edu/docs/RCP_handshake.pdf) (Megtekintés időpontja: 2015.05.12.)

- Van Vuuren, D. P., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., Kram, T., Berkhout, F., Swart, R., Janetos, A., Rose, S. K., Arnell, N., 2012: A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*, 22, 21–35.
- Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Den Elzen, M. G. J., Deetman, S., Hof, A., Isaac, M., Klein Goldewijk, K., Kram, T., Mendoza Beltran, A., Oostenrijk, R., Van Vliet, J., Van Ruijven, B., 2011b: RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change Special Issue: The Representative Concentration Pathways in Climatic Change*, 109, 95-116.
- Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G. J., van Vliet, J., Isaac, M., 2010: Exploring IMAGE model scenarios that keep greenhouse gas radiative forcing below 3 W/m<sup>2</sup> in 2100. *Energy Economics*, 32, 1105–1120.
- Wanders, N., Wada, Y., 2014: Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. *Journal of Hydrology* (in press)
- Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Sands, R., Smith, S. J., Janetos, A., Edmonds, J., 2009: The implications of limiting CO<sub>2</sub> concentrations for agriculture, land-use change emissions, and bioenergy. PNNL-17943, Pacific Northwest National Laboratory, Richland. 42 p.
- You, Q., Min, J., Fraedrich, K., Zhang, W., Kang, S., Zhang, L., Meng, X., 2014: Projected trends in mean, maximum, and minimum surface temperature in China from simulations. *Global and Planetary Change*, 112, 53–63.