

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

**A légköri szén-dioxid koncentráció növekedése és a globális
hőmérséklet növekedése az elmúlt körülbelül másfél évszázadban**

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Kristóf Erzsébet

Földtudományi alapszak,

Meteorológus szakirány

Témavezető:

Dr. Matyasovszky István, egyetemi docens

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2013

Tartalomjegyzék

I. Bevezetés.....	3
II. A légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet emelkedése közötti kapcsolat vizsgálatának módszerei.....	7
II.1. A Granger-okozatiság alapkonceptiója	7
II.2. A Granger-okozatiság időtartománybeli vizsgálatának keretei: az autoregresszív folyamatok	8
II.3. Az ok-okozati kapcsolat vizsgálata közvetlen Granger-próbával	10
II.3.1. A próba elvégzésének alapvető feltételei: homogenitás, normális eloszlás és stacionáriuság	10
II.3.2. Az idősorok stacionáriuságának vizsgálata és stacionárius tételük módszerei .	11
II.3.3. A közvetlen Granger-próba végrehajtása	13
II.4. A Granger-okozatiság vizsgálata mintán kívüli megközelítés alapján	14
II.5. A Sims-próba és a Geweke-Meese-Dent-próba	15
II.6. Polinomiális regresszió	16
III. Az elmúlt két évtized Granger-típusú ok-okozati kapcsolatot	17
vizsgáló néhány tanulmányának következtetései	17
III.1. Linyan Sun és Muhong Wang elemzése.....	19
III.2. David J. Thomson tanulmánya	20
III.3. David I. Stern és Robert K. Kaufmann vizsgálata.....	21
III.4. Evan Kodra, Snigdhansu Chatterjee és Auroop R. Ganguly elemzése.....	24
III.5. Antonello Pasini, Alessandro Attanasio és Umberto Triacca tanulmánya	27
III.6. Alessandro Attanasio vizsgálata	28
III.7. Umberto Triacca tanulmánya.....	30
IV. Az ok-okozati összefüggés vizsgálata polinomiális regresszióval.....	31
V. Összefoglalás	35
VI. Ábrák	37
Köszönetnyilvánítás	43
Irodalomjegyzék	44

I. Bevezetés

Az Éghajlat-változási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC), az Egyesült Nemzetek Szervezetének globális éghajlatváltozással foglalkozó, több ezer klímakutatót tömörítő szakosított szervezete, 2007-ben adta ki Negyedik Értékelő Jelentését. A jelentésben a globális éghajlatváltozással kapcsolatban két nagy horderejű megállapítást tett. Egyrészt kijelentette a Föld éghajlati rendszerének, azaz a légkör és a földfelszín légkörrel kémiai és fizikai kölcsönhatásban álló részeinek egyértelmű melegedését a huszadik századtól kezdődően. Ennek bizonyítékaul a globális földfelszíni és óceánfelszíni éves átlaghőmérséklet (a továbbiakban: globális felszínhőmérséklet) emelkedése, a sarkvidéki jégtakarók felgyorsult ütemű olvadása és a globális átlagos tengerszint-emelkedés szolgált. Másrészt kilencven százalék feletti valószínűséggel az antropogén eredetű, vagyis emberi tevékenységből származó üvegházhatású gázokat nevezte meg a globális felmelegedés okaiként (Éghajlatváltozás, 2007).

A dolgozatban a légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet növekedése közötti ok-okozati viszony elemzésére használt néhány matematikai statisztikai módszer és ezzel foglalkozó tanulmány eredményének ismertetésére kerül sor.

A globális felmelegedés magyarázatának az üvegházhatású gázok azért tekinthetők, mert légköri mennyiségük változásával befolyásolják a Föld és a légkör rendszerének energia-egyensúlyát. A Napból érkező elektromágneses sugárzás bizonyos hányada a földfelszínen elnyelődik, egy része viszont hosszúhullámú sugárzás formájában kibocsátódik a világűr felé. Ha a légkörben feldúsul az üvegházhatású gázok mennyisége, akkor az infravörös sugárzást a gázmolekulák elnyelhetik, miközben gerjesztett állapotba kerülnek. A molekulák a többletenergiát az alapállapotba történő visszatérés során izotróp módon kisugározzák, ezáltal melegítve a légkört. A jelenség neve az üvegházhatás.

A Negyedik Értékelő Jelentés az üvegházhatású gázok éghajlati rendszerre gyakorolt hatását azok sugárzási kényszer értékével fejezi ki. A Föld-légkör rendszer bejövő és kimenő energiájának egyensúlyát a légkört alkotó gázok meg tudják változtatni. A sugárzási kényszer az a mennyiség, amennyivel a földfelszínre érkező elektromágneses sugárzás energiájának mértéke eltér a csillagászatilag lehetséges, Napból a földfelszínre jutó elektromágneses sugárzás energiájának mennyiségétől. Mértékegysége [Wm^{-2}], azaz egységnyi idő alatt, egységnyi felületre jutó energia. Ha az előjele pozitív, akkor pozitív sugárzási kényszerről és a légkör tekintetében fűtő hatásról, ellenkező esetben negatív sugárzási kényszerről és a

légkört hűtő hatásról beszélünk. Az üvegházhatású gázok pozitív sugárzási kényszerrel rendelkeznek. Az IPCC 2007-es jelentése szerint a legnagyobb pozitív sugárzási kényszerrel a szén-dioxid bír, amelynél lényegesen kisebb a metán és a dinitrogén-oxid sugárzási kényszere. A pozitív és a negatív sugárzási kényszer lehet természetes vagy antropogén forrású (Éghajlatváltozás, 2007).

A globális felmelegedés létezése tehát műszeres mérések eredményeiből összeállított adatsorok elemzése útján állapítható meg. A szén-dioxid, mint a legjelentősebb hatású antropogén eredetű üvegházhatású gáz és a globális felszínhőmérséklet közötti okozatisági kapcsolat vizsgálatára pedig különböző matematikai statisztikai eljárások, hipotézisvizsgálat és statisztikai próbák alkalmazhatók.

Az éghajlatkutatók többsége tudományos körökben nagy elismertségű egyetemek, kutatóintézetek által összeállított hőmérsékleti és légköri szén-dioxid koncentráció adatsorokra alapozza kutatásait. A globális felszínhőmérséklet esetében számos kutató a Kelet-Angliai Egyetem Klímakutató Egysége (University of East Anglia, Climate Research Unit: CRU) és a brit meteorológiai szolgálat keretei között működő Hadley Központ (jelenlegi nevén: Met Office Hadley Centre for Climate Change) által összeállított HadCRUT hőmérsékleti anomália adatsort használja fel (Jones et al., 2010). Az adatsoron rendszeres ellenőrzéseket és bővítéseket végeznek, legutóbbi verziója 1850 és 2012 közötti értékeket tartalmaz. Képzéséhez az 1850-től napjainkig mért globális felszínhőmérséklet értékeiből vonják ki az 1961 és 1990 közötti bázisidőszak hőmérsékleti átlagértékeit. Pozitív érték esetén pozitív anomáliáról van szó, amely az átlagosnál melegebb időt feltételez, míg a negatív értékek negatív anomáliát jelentenek, amelyből az átlagosnál hidegebb időre következtethetünk. Az értékeket 1850-től 2010-ig ábrázolva megfigyelhető, hogy a huszonegyedik század elejére $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli pozitív anomália alakult ki (*1. ábra*). Referenciaperiódusnak azért az 1961 és 1990 közötti időszakot választották, mert ebben a harminc évben a mérőállomások száma és térbeli eloszlása globálisan optimális volt, azaz nagy lefedettséget biztosított a Földön. (Szalai, 2004).

Egy másik, gyakran használt hőmérsékleti anomália adatsor az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatala (National Aeronautics and Space Administration: NASA) éghajlatkutatással is foglalkozó űrtudományi intézete (Goddard Institute of Space Studies: GISS) által szerkesztett adatsor. Ez rövidebb időszakra vonatkozik, mint a HadCRUT. Utolsó változatát 1880-tól 2012-ig mért értékek képezik. Az anomáliák kiszámításához a referencia időszakot az 1951 és 1980 közötti harminc évben állapították meg (Hansen et al., 2013).

A szén-dioxid légköri mennyiségére vonatkozó, 1850-től 2010-ig terjedő adatsort több forrásból állították össze. Az 1958 és 2010 közötti időszak adatsora az Amerikai Egyesült Államok meteorológiai szolgálata, a Nemzeti Éghajlati Adatközpont (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA) által Hawaii-on működtetett Mauna Loa Obszervatórium (Mauna Loa Observatory) méréseiből származik, ahol C. D. Keeling amerikai kémikus kezdte meg a rendszeres méréseket 1958-ban (Keeling et al., 2009). Az 1958 előtti értékeket az antarktisi jégmagvak elemzéséből, az azokba zárt légbuborékok szén-dioxid koncentrációjának méréseiből állapították meg. Nevezetes jégmagvas vizsgálatok kötődnek például a Vostok állomáshoz és a Law Dome-hoz. A Law Dome feltárását 1987 és 1993 között végezték. A terület több szempontból is ideális, hiszen csak kismértékben szennyezett, erózió és olvadás kevéssé pusztítja a rétegeket. A DE08 és a DE08-2 mintavételezési helyeken 72 méter mélyről, a DSS helyen 66 méter mélyről származnak a jégmagvak (Etheridge et al., 1998)¹. A szén-dioxid légköri mennyiségének adatait ábrázolva 1850 és 2010 között megfigyelhető a légköri szén-dioxid koncentráció ugrásszerű növekedése a huszadik század második felében. A koncentrációt *ppm* mértékegységben adják meg, amely azt fejezi ki, hogy adott térrész összes molekulája közül hány darab szén-dioxid molekula van. Az 1850-es évek eleji 290 *ppm* körüli érték a huszonegyedik század elejére körülbelül 390 *ppm* értékre emelkedett (2. ábra)².

A légköri szén-dioxid koncentráció növekedésének antropogén eredetére bizonyítékul szolgál a szén ipari felhasználására vonatkozó 1751 és 2009 közötti, Boden et al. (2012) által összeállított adatsor. A nagyrészt fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából és ipari termelésből eredő emisszió az elmúlt fél évszázadban 8 milliárd tonnáról 38 milliárd tonnára emelkedett (3. ábra).

Megemlítendő, hogy a metán és a dinitrogén-oxid, mint jelentős üvegházhatású gázok légköri mennyisége főként a mezőgazdasági termelés fokozódása miatt emelkedett (Éghajlatváltozás, 2007).

Az éghajlatkutatók a hipotézisvizsgálatokat nem közvetlenül a szén-dioxid koncentráció értékek alapján végzik, hanem azokat sugárzási kényszer értékekké alakítva veszik figyelembe. A sugárzási kényszer kiszámítására több képlet is szolgál.

¹ Információ az antarktisi jégmagvas vizsgálatokról (Law Dome). Elérhetősége az Amerikai Egyesült Államok által működtetett Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) honlapján: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html> (megtekintve: 2013. május 11-én)

² A NASA GISS szén-dioxid légköri mennyiségére vonatkozó, több forrás alapján összeállított 1850 és 2010 közötti adatsora elérhető a NASA honlapján: <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

Az IPCC az 1990-ben kiadott Első Értékelő Jelentésében a következő formulát ajánlotta:

$$RC_{[CO_2]} = 5,35 \ln\left(\frac{C}{C_0}\right).$$

A képletben C az adott időpont légköri szén-dioxid mennyiségének értéke, C_0 pedig konstans. Myhre et al. (1998) tanulmányában 280 ppm értékűnek határozta meg az állandó értékét, amely az angol ipari forradalom, vagyis az 1750 előtti időkre feltételezett légköri szén-dioxid koncentráció.

Az IPCC a Negyedik Értékelő Jelentésében a szén-dioxid sugárzási kényszerét $1,6 \text{ Wm}^{-2}$ körülnek becsülte a 2000-es évek közepén (Éghajlatváltozás, 2007). Myhre et al. (1998) formuláját a NASA GISS légköri szén-dioxid koncentráció adatsorára felírva megfigyelhető a sugárzási kényszer növekedése és gyorsuló üteme a huszadik század második felében (4. ábra).

A légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet közötti ok-okozati kapcsolat vizsgálatához matematikai statisztikai módszereket alkalmazó, éghajlatkutatással foglalkozó szakemberek egy része a Granger-féle okozatiság meglétét elemzi az 1850-es évektől rendelkezésre álló adatsorok között. Az ok-okozati összefüggés elméleti alapjait N. Wiener amerikai matematikus rakta le, pontos definícióját és első vizsgálati módszerét pedig C. W. J. Granger Nobel-díjas brit közgazdász adta meg 1969-ben (Granger, 1969).

A dolgozat második fejezetében a Granger-típusú okozatiság vizsgálati módszerei kerülnek bemutatásra, majd a harmadik részben az Anthropogenic Global Warming Observer³ által gyűjtött, az elmúlt két évtizedben az ok-okozati összefüggéssel foglalkozó néhány tanulmány eredményének ismertetése következik. A dolgozat negyedik fejezetében önálló vizsgálat található a szén-dioxid légköri mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése közötti okozatisági összefüggésre vonatkozóan, az 1850-től 2010-ig terjedő időszakban, a CDIAC adatbázisában megtalálható HadCRUT globális felszínhőmérsékleti anomália adatsor (Jones et al., 2010) és a NASA GISS adatbázisában található légköri szén-dioxid koncentráció adatsora alapján⁴. A vizsgálat elvégzéséhez Fortran programnyelven írt alkalmazás használandó, az eredmények Excelben szerkesztett diagramokon kerülnek megjelenítésre.

³ Az Anthropogenic Global Warming Observer tanulmánygyűjteményének elérhetősége:
<http://agwobserver.wordpress.com/2010/02/18/papers-on-co2-temperature-correlation/>
(megtekintve: 2013. május 11-én)

⁴ A NASA GISS adatbázisában található légköri szén-dioxid koncentráció adatsorának elérhetősége:
<http://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

II. A légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet emelkedése közötti kapcsolat vizsgálatának módszerei

II.1. A Granger-okozatiság alapkonceptiója

Számos éghajlatváltozással foglalkozó kutató az elmúlt másfél évszázadbéli légköri szén-dioxid koncentráció növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között a Granger-típusú ok-okozati kapcsolat létezését vizsgálja.

Két változó Granger-féle okozatisági kapcsolatban áll egymással, ha az egyik változó múltbeli értékeinek alakulása hozzájárul a másik változó későbbi időpontbeli értékének pontosabb megbecsléséhez, azaz $t = 1, 2, \dots$ esetén X_t változó oka Y_t változónak, ha X_t segítségével Y_t -re jobb becslést tudunk adni, mint kizárólag Y_t múltbeli értékeinek ismerete alapján (Granger, 1969).

Az okozatisági kapcsolatot idősorok, tehát valószínűségi változók olyan sorozatai között vizsgálják, amelyekben az indexparaméter az időbeli sorba rendezettségre utal. A Granger-okozatiság megléte az időtartományban és a frekvenciatartományban egyidejűleg ellenőrizhető két változó között. Az időtartománybeli elemzés statisztikai próbák, azaz hipotézisvizsgálat útján valósul meg, például F -próba végrehajtásával. Ezt a módszert közvetlen Granger-próbának nevezik (Sun & Wang, 1996). Egyes tanulmányokban *mintán belüli* eljárásként is hivatkoznak erre. A próba elvégzéséhez azonban számos előfeltevés szükséges, például az idősorok normális eloszlása és stacionáriussága, amelyek nem mindig teljesülnek. Több szerző a *mintán kívüli* megközelítést ajánlja, amelyet alkalmasabb módszernek tartanak a Granger-okozatiság elemzésére (Pasini et al., 2012).

A frekvenciatartománybeli vizsgálatban az adatsorokat szinuszos hullámok összegeként ábrázolják és az elemzéshez a spektrálanalízis eszközei használandók fel. Ha az egyik tartománybeli analízis során megállapítható az ok-okozati kapcsolat létezése, akkor a másik tartománybeli vizsgálat is erre az eredményre jut, így az egyik elemzési típus igazolni tudja a másik következtetéseit (Sun & Wang, 1996). A következőkben az időtartománybeli vizsgálat néhány módszere és feltételei kerülnek bemutatásra.

II.2. A Granger-okozatiság időtartománybeli vizsgálatának keretei: az autoregresszív folyamatok

Két változó között a Granger-féle ok-okozati összefüggés vizsgálatára megfelelő keretet biztosít az idősorok autoregresszív folyamatokkal történő modellezése. Autoregresszív folyamat esetén az idősor adott időpontbeli változója a múltbeli változók lineáris kombinációjaként írható fel. Egy tetszőleges X_t idősor a következőképpen modellezhető egy p -ed rendű autoregresszív folyamattal:

$$X_t = a_1 X_{t-1} + a_2 X_{t-2} + \dots + a_p X_{t-p} + \varepsilon_t = \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} + \varepsilon_t.$$

A folyamat tehát a $\sum_{i=1}^p a_i X_{t-i}$ taggal kifejezett korábbi állapotából, vagyis saját múltjából és az önálló fluktuációjából, azaz ε_t zaj folyamatból épül fel. Az autoregresszió rendje p , amely azt adja meg, hogy a regresszió során milyen messzire tekintünk vissza a múltba, azaz melyik a legkorábbi múltbeli érték, amelyet felhasználunk a felírásra. Az a_1, \dots, a_p együtthatók becslésére alkalmas például a legkisebb négyzetek módszere vagy a Yule-Walker egyenletrendszer megoldása (Matyasovszky, 2002).

A Granger-okozatiság időtartománybeli vizsgálatában az előbb definiált autoregresszív modellt számos szerző *korlátozott autoregresszív modell*ként tartja számon. Emellett felírandó a vizsgált idősorokra a folyamat *korlátatlan autoregresszív modellje* is, amelyben az adott valószínűségi változó múltban felvett értékei mellett a másik változó korábbi értékei szintén szerepelnek (Attanasio, 2012).

Legyen X_t a légköri szén-dioxid koncentráció, Y_t a globális felszínhőmérséklet idősora. A két idősor korlátozott autoregresszív modellje a következőképpen adható meg:

$$X_t = \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} + \varepsilon'_t \quad (1)$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^p b_i Y_{t-i} + \mu'_t \quad (2).$$

A két egyenletben a_1, \dots, a_p és b_1, \dots, b_p értékek a modellek együtthatói, p a modellek rendje, ε'_t és μ'_t pedig a zaj folyamatok.

A két idősor korlátolatlan autoregresszív modellje pedig az alábbiak szerint adható meg:

$$X_t = \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^p b_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3)$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^p d_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^p c_i X_{t-i} + \mu_t \quad (4).$$

A modellekben $a_1, \dots, a_p, b_1, \dots, b_p, c_1, \dots, c_p$ és d_1, \dots, d_p értékek az együtthatók, illetve ε_t és μ_t a zaj folyamatok.

A korlátozott és korlátolatlan modellek alapján hipotézisvizsgálat útján dönthető el, hogy az idősort melyik felírás közelíti jobban. A hipotézisvizsgálatban a nullhipotézis, jelölje H_0 , mindig a két változó függetlensége, tehát az, hogy (1) igaz (3) helyett vagy (2) igaz (4) helyett. Az ellenhipotézis, jelölje H_1 az, hogy a két változó ok-okozati kapcsolatban áll egymással (Granger, 1969).

A próbák elvégzése folyamán megbizonyosodhatunk a nullhipotézis megtartásának vagy elvetésének helyességéről. Az elsőfajú hiba elkövetésének, azaz a nullhipotézis igaz volta ellenére történő elutasításának valószínűsége irrandó elő kötelezően alacsony szintűnek. Ez a próba szignifikancia szintje. Minél alacsonyabb szignifikancia szinten kerül a nullhipotézis elvetésére, annál erősebb ok-okozati összefüggés található a változók között. A hipotézisvizsgálat során a választott próbastatisztika értéke és a p -érték számítandó ki. A nullhipotézis elutasítandó, amennyiben a szignifikancia szint meghaladja a p -értéket, illetve ha a próbastatisztika értéke nagyobb, mint az adott szignifikancia szinthez és szabadsági fokhoz tartozó kritikus érték. A hipotézisvizsgálat eredményeinek ilyen módon történő értékelése miatt a változók közötti ok-okozati összefüggés létezése nem feltétlenül állapítható meg egyértelműen. A kutatók egy része azt a szignifikancia szintet, amelyen a nullhipotézis elvethető túl alacsonynak találhatja, míg más kutatók megfelelőnek ítélik az adott szignifikancia szintet arra, hogy kijelentsék, a változók között fennáll az ok-okozati kapcsolat.

A szén-dioxid légköri mennyisége és a globális felszínhőmérséklet idősora vonatkozásában a statisztikai próbák két irányban végzendők el. Egyrészt vizsgálható, hogy a globális felszínhőmérséklet emelkedése okozza-e a légköri szén-dioxid koncentráció növekedését. Ebben az esetben a statisztikai próba az (1) és a (3) autoregresszív folyamat vonatkozásában végzendő el. A nullhipotézis és az ellenhipotézis az alábbi:

$$H_0: b_1, \dots, b_p = 0: Y_t \text{ értékei nem okai } X_t \text{ értékeinek,}$$

$$H_1: b_1, \dots, b_p \neq 0: Y_t \text{ értékei okai } X_t \text{ értékeinek.}$$

Másrészt elemezhető, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése okozza-e a globális felszínhőmérséklet emelkedését. Ekkor a statisztikai próba alapját a (2) és a (4) autoregresszív modell képezi. A nullhipotézis és az ellenhipotézis pedig a következő:

$$H_0: c_1, \dots, c_p = 0: X_t \text{ értékei nem okai } Y_t \text{ értékeinek,}$$

$$H_1: c_1, \dots, c_p \neq 0: X_t \text{ értékei okai } Y_t \text{ értékeinek}$$

(Attanasio, 2012).

A Granger-okozatisággal kapcsolatban további fogalmak is definiálhatók. Két idősor esetén, amennyiben a hipotézisvizsgálatban a nullhipotézist mindkét előbb felírt irányban elvetjük, akkor *feedback* kapcsolatról van szó, tehát nemcsak X_t változó oka Y_t változónak, hanem fordítva, Y_t változó is oka X_t változónak (Sun & Wang, 1996).

II.3. Az ok-okozati kapcsolat vizsgálata közvetlen Granger-próbával

II.3.1. A próba elvégzésének alapvető feltételei: homogenitás, normális eloszlás és stacionáriusság

A közvetlen Granger-próba során F -próba végzendő el a légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet (1) – (4) egyenlettel definiált korlátozott és korlátozatlan autoregresszív modelljeinek reziduális négyzetösszegeire. A teszt felírásához azonban az idősoroknak meg kell felelniük több előfeltételnek: homogéneknek, normális eloszlásúaknak és stacionáriusoknak kell lenniük.

Az eredmények torzításához vezet az idősorok inhomogenitása. Az elmúlt másfél évszázad szén-dioxid légköri mennyiségére és globális felszínhőmérsékletére vonatkozó adatsorainak inhomogenitása többek között azt fejezi ki, hogy az értékeket különböző típusú és eltérően beállított műszerekkel, esetleg rendszertelenül mérték.

A normális eloszlás megállapítására különböző próbákat fejlesztettek ki, ilyen például a Shapiro-Wilk-próba. A normális eloszlás a QQ-plot vizsgálatával is megállapítható. A QQ-plot egy kétdimenziós derékszögű koordináta-rendszerrel ábrázolható, amelynek y tengelyén az adatsor tényleges értékei, x tengelyén a feltételezett eloszlás, tehát a normális eloszlás alapján becsült értékek szerepelnek. Ha a pontpárok megközelítőleg egy egyenesre illeszkednek, akkor az adatsor normális eloszlásúnak tekinthető (Lukács, 2002).

A stacionaritás bizonyos módon stabilan viselkedő idősort jelent. Ha az idősort zavaró hatás éri, akkor tartós hatást elő nem idézve, az idősor exponenciális gyorsasággal tér vissza stacionárius helyzetébe. Ezáltal az idősort jellemző paraméterek, többek között a

valószínűségi változó átlagos nagysága, azaz a várható érték és a várható érték körüli ingadozását kifejező szórásnégyzet állandó a folyamat során, függetlenül a választott időponttól (Dévényi & Gulyás, 1988). A természetben azonban sok folyamatra az előbb felsoroltak nem teljesülnek, ezek a nem stacionárius folyamatok. Granger kimutatta, hogy a stacionáriuság azért nélkülözhetetlen feltétele a hipotézisvizsgálatnak, mert ennek hiányában gyakrabban elvetik a változók függetlenségét kifejező nullhipotézist, azaz hamis ok-okozati kapcsolatot állapítanak meg (Darvas, 2004). Ezek a folyamatok azonban bizonyos esetekben stacionáriussá tehetők.

II.3.2. Az idősorok stacionáriuságának vizsgálata és stacionáriussá tételük módszerei

Egy autoregresszív folyamat stacionárius, ha a karakterisztikus egyenletét felírva annak gyökeire teljesül, hogy a komplex számok halmazán értelmezett egységkörön belül helyezkednek el (Matyasovszky, 2002). Ennek megállapítására egységgyök tesztek fejlesztettek ki. Ilyen többek között a Phillips-Perron-teszt, a Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin-próba (KPSS-próba) és a Dickey-Fuller-egységgyök teszt. A stacionáriuság vizsgálatához szükséges az idősorok integrációja és a differenciaképzés fogalmának ismertetése.

A trendek lehetnek determinisztikusak és sztochasztikusak. A stacionárius folyamatok nem tartalmaznak trendet. Ha egy folyamat determinisztikus trendet tartalmaz, akkor annak kiszűrésével stacionáriussá tehető. A sztochasztikus trenddel rendelkező folyamatokat nem stacionárius folyamatoknak tekintik. Az ilyen folyamatok differenciaoperátor egyszeri vagy többszöri alkalmazásával stacionáriussá alakíthatók (Sun & Wang, 1996). A differenciaoperátor, jelölje ΔY_t , olyan leképezés, amely egy adott függvényhez a függvény valamely két változóhelyen felvett értékének különbségét rendeli. A differenciaképzés a következőképpen szemléltethető. Legyen Y_t egy nem stacionárius folyamat, amelyben f_t a sztochasztikus trend, z_t autoregresszív folyamat, azaz a folyamat a múltbeli értékei alapján meghatározott:

$$Y_t = f_t + z_t .$$

Az előbbi kifejezés elsőrendű differenciája két szomszédos időpont közötti különbség, azaz

$$\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1} = f_t - f_{t-1} + z_t - z_{t-1} .$$

Ha $f_t - f_{t-1}$ kicsi, akkor ez elhanyagolható és stacionárius folyamathoz jutunk. Lineáris folyamat esetén a trend is lineáris, tehát $f_t - f_{t-1}$ konstans. Ha a trend nem lineáris, kieshet például másodrendű differenciaképzés eredményeképpen.

A differenciaképzéshez szorosan kapcsolódik az idősor integrációs fokának fogalma. Ha egy folyamat nem stacionárius, viszont elsőrendű differenciája már az, akkor a folyamat integrációs foka egy. Általánosan, egy folyamat integrációs foka q , ha q -szor képezve a differenciákat stacionárius folyamathoz jutunk. A differenciaképzés nélkül is stacionárius folyamatok integrációs foka nulla (Stern & Kaufmann, 1999).

A differenciaképzés után sem stacionárius folyamatok más eljárások alá vethetők. Ilyen például az integrált autoregresszív mozgóátlag modell (ARIMA-modell). A nem-stacionárius folyamatok ezen a módon történő stacionáriussá alakítását előfehérítő folyamatnak, a folyamathoz használt modellt pedig előfehérítő szűrőnek nevezik (Sun & Wang, 1996).

A közvetlen Granger-próba elvégzéséhez szükséges, hogy a vizsgálandó idősorok integrációs foka, vagyis az a differenciaképzési rend, amellyel stacionáriussá válnak, megegyezzen (Kodra et al., 2011).

A differenciaképzés és az előfehérítő szűrők alkalmazása mellett egy harmadik módszer is alkalmazható a folyamatok stacionáriussá tételére. H. Y. Toda és T. Yamamoto (1995) gazdaságtudománnyal foglalkozó kutatók tanulmányában az idősort modellező korlátozott és korlátozatlan autoregresszív folyamatot úgy teszik stacionáriussá, hogy azokat túlillesztik d értékkel, amely az integráció maximális foka (Attanasio, 2012). Például két nem stacionárius idősort tekintve, ha az egyik idősor kétszer, a másik idősor háromszor differenciálva válik stacionáriussá, akkor az integráció maximális foka három. A túlillesztés során azonban oda kell figyelni arra, hogy ne torzuljon jelentős mértékben az idősor autoregresszív folyamattal történő felírása. Túlillesztés esetén ugyanis az autoregresszív modellt nem az optimális időpontig visszamenőleg írják fel, hanem olyan korábbi időpillanatok értékeit is belefoglalják, amelyek a valóságban már nem járulnak hozzá az idősor modelljének pontosításához.

Tetszőleges Y_t idősor túlillesztett korlátozott autoregresszív modellje és az Y_t idősort tetszőleges X_t idősor múltbeli értékei felhasználásával felírt, túlillesztett korlátozatlan autoregresszív modellje az alábbiak szerint adható meg:

$$Y_t = \sum_{i=1}^{p+d} b_i Y_{t-i} + \varepsilon_t$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^{p+d} b_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^{p+d} a_i X_{t-i} + \mu_t .$$

A modellekben a_1, \dots, a_p és b_1, \dots, b_p az együtthatók, ε_t és μ_t a zaj folyamatok, p a modell optimális rendje, d pedig az integráció maximális foka, más néven a késleltetés operátor (Attanasio, 2012).

A légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet közötti Granger-okozatiság vizsgálatához a túlillesztett korlátozott és korlátozatlan autoregresszív modellek az (1) – (4) egyenlethez hasonlóan írhatók fel, amelyekben a modellek rendje $p + d$ értékre módosul.

Az autoregresszív folyamatok optimális rendje különböző információs kritériumok alkalmazásával határozandó meg. Felhasználható többek között az Akaike információs kritérium, a Bayes-féle információs kritérium, a Schwarz információs kritérium és a Hannan-Quinn információs kritérium (Matyasovszky, 2002). Ezek közül az Akaike információs kritérium definiálására a dolgozat negyedik fejezetében kerül sor.

II.3.3. A közvetlen Granger-próba végrehajtása

Miután az idősorról bebizonyosodott, hogy homogén, normális eloszlású és stacionárius vagy valamilyen módszerrel stacionáriussá transzformált, felírható az F -próba a vizsgált idősorok reziduális négyzetösszegeire.

Legyen RSS_R a reziduális négyzetösszeg az (1) és a (2) korlátozott autoregresszív folyamatokban, míg RSS_{UR} a reziduális négyzetösszeg a (3) és a (4) korlátozatlan autoregresszív folyamatokban. Ha az F -próbával azt teszteljük, hogy a globális felszínhőmérséklet változása okozhatja-e a szén-dioxid légköri koncentrációváltozását, akkor a reziduális négyzetösszegek a következőképpen írandók fel, az (1) és a (3) egyenletre vonatkozóan:

$$RSS_R = \sum_{t=1}^N \varepsilon'_t{}^2$$

$$RSS_{UR} = \sum_{t=1}^N \varepsilon_t^2.$$

Az egyenletekben N a megfigyelések száma. Ha az F -próbát annak tesztelésére írjuk fel, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció szerepet játszik-e a globális felszínhőmérséklet alakulásában, akkor a reziduális négyzetösszegek a (2) és a (4) egyenletekre vonatkoznak:

$$RSS_R = \sum_{t=1}^N \mu'_t{}^2$$

$$RSS_{UR} = \sum_{t=1}^N \mu_t^2.$$

A próbastatisztika a következőképpen számítandó ki a nem túlillesztett modellekre:

$$F = \frac{(RSS_R - RSS_{UR})/p}{RSS_{UR}/(N - m)}.$$

A formulában N a megfigyelések száma, m a becsült paraméterek száma a korlátozatlan modellben, p pedig az autoregresszív folyamat rendjével egyenlő. Ha a folyamat d késleltetés operátorral túlillesztve lett stacionárius, akkor az F -próba felírási módja az alábbi:

$$F = \frac{(RSS_R - RSS_{UR})/p}{RSS_{UR}/(N - 2p - 2d - 1)}$$

(Attanasio, 2012).

II.4. A Granger-okozatiság vizsgálata mintán kívüli megközelítés alapján

A Granger-okozatiság az F -próba helyett más megközelítéssel, mintán kívüli módon is vizsgálható. A kutatók egy része, többek között Pasini et al. (2012) szerint így elkerülhető olyan, a közvetlen Granger-próba során felmerülő probléma, mint a hamis okozatisági kapcsolat felismerése.

A mintán kívüli eljárás során a szórásokra vonatkozó F -próba helyett az idősorok korlátozott autoregresszív modellje (az (1) vagy a (2) egyenlet) és a korlátozatlan autoregresszív modellje (a (3) vagy a (4) egyenlet) reziduálisaira írhatók fel az MSE -típusú próbák, például az $MSE-t$ -próba és az $MSE-REG$ -teszt. (McCracken, 2007). A dolgozatban az $MSE-t$ -próba ismertetésére kerül sor.

A nullhipotézis és az ellenhipotézis az alábbi módon adandó meg, ha azt vizsgáljuk, hogy a globális felszínhőmérséklet emelkedése okozhatja-e a légköri szén-dioxid koncentráció növekedését:

$$H_0: E(\varepsilon_t^2) = E(\varepsilon'_t{}^2)$$

$$H_1: E(\varepsilon_t^2) < E(\varepsilon'_t{}^2).$$

A globális felszínhőmérséklet növekedése nem oka a szén-dioxid légköri mennyisége növekedésének, ha a korlátozott és a korlátozatlan modellbeli zaj folyamat négyzetének várható értéke egyenlő nagyságú. Ha a korlátozatlan modell zaj folyamatának várható értéke kisebb, mint a korlátozott modellé, akkor a globális felszínhőmérséklet emelkedése a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése okaként tekinthető (Pasini et al., 2012).

Fordított irányú elemzés esetén, vagyis annak vizsgálatakor, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció emelkedése okozza-e a globális felszínhőmérséklet növekedését, a nullhipotézis és az ellenhipotézis a következő:

$$H_0: E(\mu_t^2) = E(\mu_t'^2)$$

$$H_1: E(\mu_t^2) < E(\mu_t'^2)$$

(Pasini et al., 2012).

A próbastatisztika kiszámításához meghatározandó az eltérés négyzetösszeg (mean squared error: MSE) adott t . időpillanatban, amely a korlátozott és a korlátozatlan autoregresszív modellek reziduálisáiból képezhető az (1) és a (3) autoregresszív folyamatokra, illetve a (2) és a (4) autoregresszív modellekre vonatkozóan:

$$MSE_t = (\hat{\varepsilon}_t')^2 - (\hat{\varepsilon}_t)^2$$

$$MSE_t = (\hat{\mu}_t')^2 - (\hat{\mu}_t)^2.$$

Az egyenletekben $\hat{\varepsilon}'$ és $\hat{\varepsilon}$ az (1) és a (3) korlátozott és korlátozatlan autoregresszív folyamat reziduálisainak becslése, valamint $\hat{\mu}'$ és $\hat{\mu}$ a (2) és a (4) korlátozott és korlátozatlan autoregresszív folyamat reziduálisainak becslése. MSE_t értéke a vizsgált idősorok alapján közelíthető; becslét értékét jelölje \hat{a} , standard hibáját pedig $SE \hat{a}$. Ekkor a próbastatisztika ($MSE - t$) a következőképpen számítható ki:

$$MSE - t = \frac{\hat{a}}{SE \hat{a}}$$

(Pasini et al., 2012).

II.5. A Sims-próba és a Geweke-Meese-Dent-próba

C. A. Sims Nobel-díjas amerikai közgazdász 1972-ben módosította a Granger-okozatiság elemzésének keretét szolgáló idősort modellező autoregresszív folyamatot, a Granger által megadott modellhez képest. Sims X_t változót kizárólag Y_t változó múltbeli értékeit felhasználva írta föl:

$$X_t = \sum_{i=-m}^n b_i Y_{t-i} + \varepsilon_t.$$

Az összegzés határai úgy választandók meg, hogy minden jelentős együttható szerepeljen a modellben. A hipotézisvizsgálat során a nullhipotézis továbbra is az ok-okozati összefüggés hiánya a két változó között, azaz $b_i = 0$, minden $i < 0$ értékre (Sun & Wang, 1996).

J. Geweke ausztrál közgazdász azonban a Sims-teszt helyett az R. Meese és W. Dent közreműködésével kidolgozott Geweke-Meese-Dent-próbát ajánlotta 1983-ban, amelyben a közvetlen Granger-próbához felírt korlátozatlan autoregresszív folyamatbeli összegzések határait módosították. Tetszőleges Y_t változó ($t = 1, 2, \dots$) adott időpontbeli értékét annak korábbi értékei, valamint egy tetszőleges X_t ($t = 1, 2, \dots$) változó múltbeli értékei alapján úgy írták föl, hogy a két változónak nem ugyanabban az időpontban vették a kezdőértékét. Úgy ítélték meg, hogy az egyik változó értékei azon időpontokban is hozzájárultak a vizsgált változó t . időpontbeli értékének alakításához, amelyben másik változó értékei még nem. A korlátozatlan autoregresszív folyamat ebben az esetben a következő:

$$Y_t = \sum_{i=1}^n b_i Y_{t-i} + \sum_{i=-m}^n a_i X_{t-i} + \varepsilon_t .$$

A nullhipotézis ebben a próbában is az ok-okozati kapcsolat hiánya, azaz $a_i = 0$ (Sun & Wang, 1996).

II.6. Polinomiális regresszió

Az idősorok autoregresszív folyamatokkal történő modellezése során a globális felszínhőmérséklet illetve a légköri szén-dioxid koncentráció adott időpontbeli értéke a saját korábbi értékei, illetve a másik változó értékei első hatványainak lineáris kombinációjaként írható fel. A polinomiális regresszió esetében a mért hőmérsékleti és szén-dioxid koncentráció adott időpontbeli értékeit az idő valamilyen fokszámú polinomjával próbáljuk közelíteni. Ez is végrehajtható úgy, ha az egyik változó értékeit közelítő polinomban figyelembe vesszük a másik változó értékeit, ezáltal az okozatisági kapcsolat vizsgálhatóvá válik. Amennyiben jobban közelíthetők egy változó mért értékei, ha a másik változó értékeit is felhasználjuk, mint anélkül, akkor feltételezhető a két változó közötti ok-okozati kapcsolat megléte.

Az autoregresszív folyamatok esetén a különböző információs kritériumok használatával meghatározható a folyamat optimális rendje. Ehhez hasonlóan a polinomiális regresszió modelljében az információs kritériumok alapján kiszámítható a polinom optimális fokszáma. Ez adja meg, hogy a változó t . időpillanatbeli értékének felírásához legfeljebb milyen magas fokszámú polinomot érdemes használni. A polinomiális regresszió klasszikus esete az adathalmazra elsőfokú polinom, azaz egyenes illesztése. Ekkor lineárisan növekvő vagy csökkenő trend figyelhető meg. Az idősorok polinomokkal való közelítésének módszere részletesebben a negyedik fejezetben kerül ismertetésre.

III. Az elmúlt két évtized Granger-típusú ok-okozati kapcsolatot vizsgáló néhány tanulmányának következtetései

Az elmúlt két évtizedben a légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszín-hőmérséklet közötti okozatisági kapcsolat meglétének vizsgálatával számos tanulmány foglalkozott. A vizsgálatok különböző megközelítéseken, módszereken alapultak, többségük azonban ok-okozati összefüggést mutatott ki a szén-dioxid légköri mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között. Az okozatisági kapcsolat erősségét illetően viszont nincs minden esetben egyetértés. Az alábbiakban az 1995 óta eltelt közel két évtized néhány tanulmányának bemutatása és eredményeinek ismertetése olvasható, amelyek a Granger-féle ok-okozati összefüggés témájában készültek és elérhetőek az Anthropogenic Global Warming Observer honlap gyűjtésében.

A Granger-okozatiság tesztelésének módszerét először gazdasági elemzésekben alkalmazták, majd az 1990-es évektől egyre több kutató használta a globális felmelegedés okainak tanulmányozására. Elsőként a bemutatandó tanulmányok rövid áttekintésére kerül sor. L. Sun és M. Wang (1996) mind az időtartományban, mind a frekvenciatartományban elemezte a Granger-okozatiság meglétét a szén-dioxid légköri mennyiségének változása és a globális felszínhőmérséklet ingadozása között. Tanulmányuk szerint a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése oka a globális felszínhőmérséklet emelkedésének (Sun & Wang, 1996).

D. J. Thomson (1997) szintén idő- és frekvenciatartománybeli elemzés útján határozta meg az ok-okozati összefüggés meglétét az antropogén és a természetes sugárzási kényszerek együttes növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között (Thomson, 1997).

D. I. Stern és R. K. Kaufmann (1999) időtartománybeli közvetlen Granger-próbát elvégezve jutott arra a következtetésre, hogy a déli félgömb hőmérséklete, amely az üvegházhatású gázok okozta pozitív sugárzási kényszer helyettesítő idősorának tekinthető, ok-okozati kapcsolatban áll az északi félgömb hőmérsékletével (Stern & Kaufmann, 1999).

A szén-dioxid légköri mennyiségéből sugárzási kényszer értékeket számítva, mintán belüli közvetlen Granger-próba alapján következtetett a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése közötti ok-okozati összefüggésre Kodra et al. (2011) illetve A. Attanasio (2012). U. Triacca (2005) ugyanakkor kritikusabban szemlélte az időtartománybeli közvetlen Granger-próbával elvégzett hipotézisvizsgálat eredményeként kapott okozatisági kapcsolatot, mivel szerinte az ok-okozati összefüggés

hiányát kifejező nullhipotézis csak abban az esetben vethető el, ha az elsőfajú hiba elkövetésének valószínűsége viszonylag nagy (Triacca, 2005).

A szén-dioxid légköri koncentrációja és a globális felszínhőmérséklet közötti okozatisági kapcsolat megléte nemcsak mintán belüli, hanem mintán kívüli módon is elemezhető (Pasini et al., 2012).

A Granger-okozatiság vizsgálatának egyéb módszerei is léteznek, amelyek jelen dolgozatban csak megemlítésre kerülnek. D. A. Smirnov és I. I. Mokhov (2009) a Granger-típusú ok-okozati kapcsolat kiterjesztését kísérelte meg. Annak alapkonceptióját ugyanis, a definíciójából következően csak rövidebb távon érvényesülő ok-okozati összefüggésekre találták alkalmasnak, míg a hosszabb távon létező okozatisági kapcsolatok feltárására nem. Módszerükkel ok-okozati kapcsolatot állapítottak meg a szén-dioxid légköri mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között (Smirnov & Mokhov, 2009).

A Granger-típusú okozatiság elgondolásának olyan változatát is kifejlesztették, amelyben az egyik változóra nemcsak a másik változó időbeli – jelen- és múltbeli – értékei alapján, hanem térbeli értékeit alapul véve próbáltak minél pontosabb becslést adni, azaz $t = 1, 2, \dots$ esetén X_t változó oka Y_t változónak, ha X_t térbeli értékeinek felhasználásával Y_t -re jobb becslés adható, mint anélkül (Lozano et al., 2009).

III.1. Linyan Sun és Muhong Wang elemzése

A Granger-okozatiság koncepciója a gazdaságtudományból származik, ezért a legrégebben készült, ismertetésre kerülő tanulmány két környezetgazdálkodással foglalkozó kutató, L. Sun és M. Wang 1996-ban megjelent tanulmánya.

Sun és Wang (1996) a légköri szén-dioxid kibocsátás és a globális felszínhőmérséklet közötti ok-okozati összefüggés fennállását az időtartománybeli analízisen kívül frekvencia-tartománybeli spektrálanalízissel is megerősítette. Az időtartományban közvetlen Granger-próbát és Geweke-Meese-Dent-tesztet végeztek el.

A legtöbb tanulmány a szén-dioxid légköri mennyiségének adatsoraként a huszadik század második felében Mauna Loán mért koncentrációértékeket, az 1950-es évek előtt pedig az antarktisi jégfuratokból vett mintákból becsült koncentrációértékeket használja. Ezekből sugárzási kényszert számítanak az IPCC által 1990-ben ajánlott képlet alapján. Sun és Wang (1996) a légköri szén-dioxid koncentráció adatsora helyett Boden et al. (2012) folytatólagos méréseinek 1994-ben összeállított változatát, a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából származó szénkibocsátásra vonatkozó, 1751-es évtől kezdődően elérhető adatsorát alkalmazta, amelyből kiszámítható a szén-dioxid légköri mennyisége és annak változása. Az okozatisági kapcsolat elemzésének alapjául szolgáló másik idősor a globális felszínhőmérsékletre vonatkozó éves anomáliákat tartalmazta, amelynek forrása Hansen et al. (2013) adatsorának 1988-ban elérhető változata volt (Sun & Wang, 1996).

A szerzők az idősorok stacionáriusságának vizsgálatához a Dickey-Fuller egységgyök tesztet választották. A globális felszínhőmérsékleti anomáliák idősorát egyszeri differenciálás, míg a légköri szén-dioxid kibocsátás idősorát kétszeri differenciálás után tekintették stacionáriusnak (Sun & Wang, 1996).

A Granger-okozatiságot mind a közvetlen Granger-próba, mind a Geweke-Meese-Dent-teszt alátámasztotta. Az eredményeket a frekvenciatartománybeli spektrálanalízis is megerősítette. A közvetlen Granger-próba során elvégzett F -teszt alapján Sun és Wang (1996) megállapította, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között ok-okozati kapcsolat áll fenn már öt százalékos szignifikancia szinten is, tehát nagy bizonyossággal tartható a szén-dioxid emisszió növekedése a globális felszínhőmérséklet emelkedése okának. Az, hogy a globális felszínhőmérséklet növekedése okozza a légköri szén-dioxid mennyiségének növekedését, csak közel húsz százalékos szignifikancia szint mellett állítható, azaz nagy a valószínűsége hamis ok-okozati kapcsolat kimutatásának (Sun & Wang, 1996).

III.2. David J. Thomson tanulmánya

D. J. Thomson matematikai statisztikával foglalkozó szakember 1997-ben kiadott tanulmányában az idő- és a frekvenciatartománybeli elemzés kombinációjával vizsgálta az ok-okozati kapcsolatot a globális felszínhőmérséklet emelkedése és a szén-dioxid légköri mennyisége elmúlt másfél évszázadban bekövetkezett antropogén eredetű növekedése, illetve a globális felszínhőmérséklet emelkedése és a Napból érkező besugárzás természetes forrású változása között.

Az elemzéshez Thomson (1997) a globális felszínhőmérséklet adatsoraként a Kelet-Angliai Egyetem Klímakutató Központjának éghajlatkutatói által összeállított adatsorát, azaz Jones et al. (2010) 1994-ben elérhető idősorát használta fel. Az éves anomáliák képzéséhez bázisidőszakként nem az 1990-es években gyakran választott 1951 és 1980 közötti harminc éves éghajlati normálidőszakot alkalmazta, hanem az 1854 és 1990 közötti évek átlagértékeiből vonta ki az 1854-től 1918-ig tartó referencia időszak átlagait. Thomson (1997) szerint a fenti hatvanöt éves bázisidőszak használata előnyös. Egyrészt a Nap aktivitását jól reprezentálja ez a periódus. Másrészt ebben a referencia időszakban a szén-dioxid légköri koncentrációja sokkal kisebb mértékben, mindössze az 1951 és 1980 közötti növekedés egynegyedével emelkedett. A bázisként használt évek mentesek a halogénezett szénhidrogének hatásától is, amelyek a sztratoszférikus ózon bontására, ezáltal a Földre érkező besugárzás és a globális felszínhőmérséklet módosítására képesek (Thomson, 1997).

Az elmúlt másfél évszázad légköri szén-dioxid koncentrációértékei kiszámításához a szerző 1860 és 1955 között Boden et al. (2012) folytatólagos méréseinek 1994-ben rendelkezésre álló, fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából becsült szénkibocsátásra vonatkozó adatsorát használta fel. 1955 és 1994 között pedig Keeling et al. (2009) méréseinek 1994-ben elérhető adatsorát alkalmazta. Az antropogén sugárzási kényszer kifejezése érdekében a szén-dioxid koncentráció értékeinek logaritmusát képezte (Thomson, 1997).

Az elemzés alapjául szolgáló harmadik, a természetes sugárzási kényszert reprezentáló adatsor, P. Foukal és J. Lean asztrofizikusok 1990-ben publikált adatsora, amely a Nap sugárzási áramsűrűségének, azaz irradianciájának értékeit tartalmazza. A sugárzási áramsűrűség az egységnyi idő alatt, egységnyi felületre érkező sugárzási energia, mértékegysége [Wm^{-2}]. A légköri szén-dioxid koncentráció adatsorához hasonlóan az irradiancia adatsora is rekonstruált, azaz nemcsak rendszeres, műszeres mérések eredményeit tartalmazza, hanem becsléseket is: az idősort a Nap direkt sugárzásának méréséből, valamint a naptevékenység megfigyeléséből állították össze (Thomson, 1997).

Az időtartománybeli két hipotézisvizsgálat folyamán a nullhipotézisek a globális felszínhőmérséklet emelkedése és a légköri szén-dioxid koncentráció növekedésének, illetve a globális felszínhőmérséklet emelkedése és a Nap sugárzási áramsűrűsége változásának egymástól való függetlensége voltak. A globális felszínhőmérséklet és a szén-dioxid légköri mennyisége közötti ok-okozati összefüggés hiánya nagy bizonyossággal került elutasításra, továbbá bebizonyosodott, hogy az antropogén és a természetes sugárzási kényszer növekedése együttesen okozzák a globális felszínhőmérséklet emelkedését (Thomson, 1997).

Thomson a frekvenciatartománybeli elemzés során szinuszos hullámok összegeként ábrázolta az éves hőmérsékleti ciklust az elmúlt körülbelül másfél évszázadban. A korábbiakban mért frekvencia változását észlelte a huszadik század közepétől kezdődően: a frekvencia egyre közelebb került a Föld sugárzási egyenlegével együtt változó anomalisztikus⁵ év frekvenciájához, és egyre távolodott a tropikus évtől⁶, amellyel együtt a Napból a Földre érkező közvetlen sugárzás mennyisége ingadozik. Az eltolódás a légköri szén-dioxid koncentráció növekedési ütemének felgyorsulásával egyidejűleg kezdődött meg. Mivel a sugárzási egyenleget befolyásolják az üvegházhatású gázok, ezért arra lehet következtetni, hogy a globális felszínhőmérséklet alakulásában nagyobb szerepet játszanak az antropogén hatások, mint a természetes befolyásoló tényezők. Thomson becslése szerint a globális felszínhőmérséklet emelkedését háromnegyed részt az antropogén, egynegyed részt a természetes sugárzási kényszer okozta (Thomson, 1997).

III.3. David I. Stern és Robert K. Kaufmann vizsgálata

D. I. Stern és R. K. Kaufmann energiaforrásokkal és környezetgazdálkodással foglalkozó kutatók 1999-ben publikált tanulmányukban a Granger-okozatiság meglétét a globális felszínhőmérséklet emelkedése és a légköri szén-dioxid mennyiségének növekedése között az előző két elemzéstől eltérően kizárólag az időtartományban vizsgálták, közvetlen Granger-próba alkalmazásával.

A felhasznált idősorok is eltértek a korábbiaktól, mivel az *F*-próbát nem az átlagos éves globális felszínhőmérsékletből számított anomáliák és a szén-dioxid koncentrációértékekből

⁵ Az anomalisztikus év két perihélium között eltelt idő, amely körülbelül 365,26 nap. A perihélium azon időtartam, amely alatt a Föld napközélebről ismét napközélebe jut (Marik, 1989).

⁶ A tropikus év az az időtartam, amely két napéjegyenlőség között eltelik, azaz körülbelül 365,24 nap (Marik, 1989).

képzett sugárzási kényszer idősorai alapján végezték el. A vizsgálat alapjaként Jones et al. (2010) 1994-ben kiadott, az északi és a déli félgömb felszínhőmérsékletére vonatkozó, 1850-től 1990-ig terjedő idősora szolgált (Stern & Kaufmann, 1999).

A szén-dioxid légköri mennyiségének globális felszínhőmérsékletre gyakorolt hatása Stern és Kaufmann (1999) elemzése során azért mutatható ki, mert az egyik hőmérsékleti idősor a szén-dioxid légköri mennyiségét reprezentáló idősorként tekinthető. Ha a két félgömb felszínhőmérséklete közötti ok-okozati összefüggés feltárára kerül, és az okozatiság iránya megfelelő, akkor megállapítható, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció emelkedése hatással van a felszínhőmérséklet növekedésére (Stern & Kaufmann, 1999).

Stern és Kaufmann (1999) feltevése a következő volt: az antropogén forrású üvegházhatású gázok, például a szén-dioxid, a dinitrogén-oxid és kisebb mértékben a metán, a légkörbe kerülésük után megközelítőleg egyenletesen keverednek el. Ezek a sugárzási kényszert növelik, tehát fűtő hatásuk az egész Földön érvényesül. Ezt jól példázzák a CDIAC adatbázisában elérhető szén-dioxid adatsorok, hiszen egymáshoz nagyon hasonló mértékben növekvő trendet mutatnak akár a Mauna Loán, akár a Déli-sarkon mért értékekből képezték azokat. A két idősor az évszakos ingadozásában tér el egymástól. Hawaii-on jóval nagyobb az éves hőmérsékleti ingadozás, mint a sarkvidéken, amelyre a légköri szén-dioxid koncentráció is reagál, a hűvösebb levegő kevesebb szén-dioxidot, a melegebb levegő több szén-dioxid tartalmaz.⁷ A szulfát aeroszolok azonban negatív sugárzási kényszerrel bírnak. Hűtő hatásukat pedig főként ott fejtik ki, ahol a légkörbe kerülnek. Az ipari létesítmények többsége az északi féltekén épült, ezért az antropogén eredetű aeroszolok szerepe nagyobb az északi félgömbön, mint a déli féltekén. Ennek következtében a déli félgömb felszínhőmérséklete magasabb, amely okozhatja az északi félteke felszínhőmérsékletének növekedését, míg fordított irányú okozatiság nem állhat fenn (Stern & Kaufmann, 1999).

A szerzők kiindulópontként a két félgömb hőmérsékleti idősorát autoregresszív folyamatokkal modellezték. A közvetlen Granger-próbához használt *F*-próba felírásához a nullhipotézis a két félgömb felszínhőmérsékletének egymástól való függetlensége volt. A próbastatisztika kiszámítása után megállapították, hogy az északi félgömb felszínhőmérsékletének változása nincs hatással a déli félteke felszínhőmérsékletére. A déli félgömb felszínhőmérséklete azonban bizonyosan szerepet játszik az északi félteke felszínhőmérsékletének alakításában. A szerzők az eredményt úgy értelmezték, hogy a déli félgömb felszínhőmérsékleti idősora a légköri szén-dioxid koncentráció értékei

⁷ A Scripps Oceanográfiai Intézet mérőhálózatának idősorai a légköri szén-dioxid koncentrációra vonatkozóan: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-keel.html> (megtekintve: 2013. május 11-én)

helyettesítőjeként szolgálhat, hiszen képes az északi félgömb hőmérsékletében, részben az üvegházhatású gázok által okozott változások magyarázatára (Stern & Kaufmann, 1999).

A két félgömb közötti ok-okozati viszony feltárása után az üvegházhatású gázok légköri mennyiségére vonatkozó idősorokban közös trendet kerestek és megvizsgálták annak hatását az északi és a déli félgömb hőmérsékletére. A hasonló trendet mutató idősorok közötti kapcsolatkeresés képezi alapját a negyedik fejezetben található vizsgálatnak is, amelyben a hőmérsékleti adatsor az idő különböző fokszámú polinomjaival kerül közelítésre. A szerzők a Phillips-Perron-, a Schmidt-Phillips-, a Dickey-Fuller- és a KPSS-próba alkalmazásával ellenőrizték, hogy az idősorok nem stacionáriusak-e, azaz tartalmazznak trendet. A globális valamint az egyes félgömbök hőmérsékleti idősorai, a Nap irradianciája, illetve a különböző antropogén eredetű gázok integráltsági fokára nem kaptak egyértelmű eredményt. Az első két próba alapján a hőmérsékleti idősorok stacionáriusak, míg a másik kettő szerint elsőrendben integráltak. A többi idősor első vagy másodrendben integrált. Az eltérés oka a tesztek elvégzésének különböző feltételrendszere volt. Abban azonban mindegyik próba eredménye megegyezett, hogy a légköri üvegházhatású gázok idősorai stacionáriussá sohasem váltak kisebb rendű differenciaképzéssel, mint a globális és a félgömbökre vonatkozó felszínhőmérséklet idősorai (Stern & Kaufmann, 1999).

Az elemzés során Stern és Kaufmann (1999) az időben visszafelé haladt, mindig egy-egy évvel bővítve a vizsgált időintervallumot. Az első időszak 1965 és 1994 közötti, majd a következő 1964-től 1994-ig tartott és így haladtak visszafelé 1865-ig, mindig egyre hosszabb időtartamot figyelembe véve. A vizsgálat eredményeképpen a szerzők ok-okozati kapcsolatot mutattak ki az üvegházhatású gázok légköri mennyisége és a globális felszínhőmérséklet között, hatása pedig az északi félgömb tekintetében bizonyult jelentősebbnek. A vizsgált időszakok tekintetében az okozatisági összefüggés erőssége nőtt a huszadik század végéhez közeledve. Mivel a szén-dioxid légköri mennyisége az 1950-es évektől jelentősen növekedett, a próbák eredményei az antropogén hatás meghatározó voltát bizonyítják (Stern & Kaufmann, 1999).

III.4. Evan Kodra, Snighansu Chatterjee és Auroop R. Ganguly elemzése

S. Chatterjee statisztikus, A. R. Ganguly környezetmérnök, valamint doktorandusza, E. Kodra, 2011-ben megjelent tanulmányában a közvetlen Granger-próbát mintán belüli megközelítéssel, kétféle módon megválasztott időszakokra végezte el.

A tanulmányban *időben előre felé kumulált Granger-próba* néven nevezték azt a módszert, amelyben az elemző a vizsgálat alapjául szolgáló időtartományokat adott múltbéli időponttól a jelen felé tartva választja ki. A szerzők ehhez a vizsgálatához tizenegy időszakot határoztak meg, az 1860-as évvel kezdődően. Az első időintervallum 1860 és 1900 közötti, majd tíz évet hozzáadva haladtak az utolsó időtartományig, 1860-tól 2008-ig (Kodra et al., 2011).

Kodra et al. (2011) egy adott időponthoz képest a múlt felé tartva meghatározott időszakokban elvégzett próbára *reverz kumulatív Granger-próba* néven hivatkozott. A próba során a vizsgálatához alapul vett tizenhat időtartomány végpontja minden esetben 2008. Elsőként az 1995 és 2008 közötti időszakot választották. A második időtartam a korábbi hét évvel bővítve 1988-tól 2008-ig tartott, majd a továbbiakban tíz-tíz évvel terjesztették ki a vizsgálat időtartamát, az 1860-as évekig visszajutva. A szerzők ezt a módszert alkalmasabbnak tekintették a légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet emelkedése közötti kapcsolat vizsgálatára, mivel az elmúlt másfél évszázadra vonatkozó idősorok adatai túl sok forrásból származnak, amely a statisztikai próbák eredményeinek torzulásához vezethet. A reverz kumulatív Granger-próba alkalmazásával az 1959 és 2008 közötti időszakra egységes mérésekből, azonos forrásból származó adatsorokra végezhető el a hipotézisvizsgálat. Az elemzés legfontosabb időszaka, pedig éppen az elmúlt körülbelül fél évszázad, hiszen a szén-dioxid légköri koncentrációja az 1950-es évektől mutat erősen növekedő tendenciát és a globális felszínhőmérséklet emelkedése is ebben az időszakban a legjelentősebb (Kodra et al., 2011).

Kodra et al. (2011) a Granger-okozatiságot három idősorra vonatkozóan elemezte. A globális felszínhőmérséklet idősoraként Jones et al. (2010) 1994-ben publikált idősora szolgált.

A légköri szén-dioxid koncentráció értékei 1860 és 1958 között Etheridge et al. (1998) antarktisi jégmagvas vizsgálataiból származtak, majd 1959-től 2008-ig a forrásuk Keeling et al. (2009) adatsora volt. A koncentrációértékekből az IPCC 1990-ben kiadott értékelő jelentésében ajánlott, Myhre et al. (1998) által módosított képletből sugárzási kényszer értékeket állítottak elő. (Kodra et al., 2011).

A harmadik felhasznált idősor az El Niño – Déli Oszcilláció (El Niño Southern Oscillation: ENSO⁸) hatását mérő Déli Oszcillációs Index (Southern Oscillation Index: SOI) értékeit tartalmazta⁹.

A tanulmányban a Granger-okozatiságot, a korábbi elemzésektől eltérően nemcsak a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése, hanem a SOI-index és a globális felszínhőmérséklet között, valamint a SOI-index és a légköri szén-dioxid koncentráció között is vizsgálták (Kodra et al., 2011).

A szerzőknek a hipotézisvizsgálatok eredményeivel kapcsolatban több fenntartása is volt. Ennek forrása a közvetlen Granger-próba feltételeinek sérülése, mivel Kodra et al. (2011) kétszer elvégzett differenciaképzés után sem tekintette a sugárzási kényszer idősorát stacionáriusnak és normális eloszlásúnak. A szén-dioxid légköri mennyiségének globális felszínhőmérsékletre gyakorolt hatása és az ENSO-jelenségkör hatásának elkülönítése is problémásnak bizonyult (Kodra et al., 2011).

A normális eloszlás meglétét vizsgáló Shapiro-Wilk-próba és a stacionáriuságot ellenőrző KPSS-próba elvégzése után a Granger-okozatiság létezését tesztelő F -próbát a globális felszínhőmérséklet és a sugárzási kényszer idősora között a második differenciákat képezve, a globális felszínhőmérséklet és a SOI-index idősora között az első differenciákat kiszámítva folytatták le. A vizsgálathoz az optimális késleltetési hossz megállapítására három eljárást alkalmaztak. Az Akaike és a Bayes-i információs kritérium alapján hétnek, a Hannan-Quinn információs kritérium szerint az optimális késleltetési hosszt háromnak találták (Kodra et al., 2011).

Az időben előrehaladva kumulált Granger-próba során negyvennégy tesztet futtattak le, tizenegy időszakra, a késleltetési hosszt háromnak és hétnek választva. A hipotézisvizsgálat az esetek felében arra vonatkozott, hogy a globális felszínhőmérséklet növekedése okozza-e a légköri szén-dioxid koncentráció emelkedését. További huszonkét próbastatisztikát számítottak ki a fordított irányú ok-okozati kapcsolat vizsgálatára, vagyis arra, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése okozza-e a globális felszínhőmérséklet emelkedését. A reverz kumulatív Granger-próbát az időben előrefelé haladóhoz képest több, összesen

⁸ Az ENSO-jelenségkör során La Niña- és El Niño-események váltakoznak. La Niña idején Dél-Amerika nyugati partjainál a keleties passzátszél felerősödik, így az Egyenlítői-áramlás több vizet szállít keletről nyugati felé. A víz pótlására hidegebb víz áramlik fel Dél-Amerika partjainál, hűvösebb időt okozva. Eközben a Csendes-óceán nyugati medencéjében az átlagosnál melegebb idő köszönt be. El Niño során az óceán nyugati részén felgyülemlett melegebb víz visszaáramlik Dél-Amerika partjaihoz az Egyenlítői-ellenáramlással, ebben a térségben okozva magasabb léghőmérsékletet (Bartholy et al., 2010).

⁹ A Déli Oszcillációs Index adatsorának elérhetősége 1817 és 2011 között:
<http://www.jisao.washington.edu/data/globalsstenso/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

kétszázhuszonnégy esetben végezték el, tizenhat időszakra, egytől hétig, hétféleképpen meghatározott késleltetési hosszal (Kodra et al., 2011).

Az időben előrehaladva kumulált módon elvégzett próbák során először azt vizsgálták, hogy a légköri szén-dioxid sugárzási kényszere okozta-e a globális felszínhőmérséklet növekedését. Ha a késleltetési hosszt háromnak választották, akkor a kiszámított p -érték az 1860 és 1990 közötti időszak kivételével minden időszakban meghaladta a tíz százalékos szignifikancia szintet is, tehát a változók függetlenségét kifejező nullhipotézist nem vethették el. A p -érték az 1860-tól 1970-ig terjedő időszakokban határozottan magasabb volt, mint a huszadik század utolsó negyedének és a huszonegyedik század első évtizedének figyelembe vételével. Amennyiben azt vizsgálták, hogy a globális felszínhőmérséklet növekedése okozta-e a légköri szén-dioxid koncentrációjának növekedését, a p -érték még magasabb volt, tehát egyértelműen nem találtak Granger-okozatóságot a két változó között. A késleltetési hossz értékét hétnek választva hasonló eredményre jutottak, mint három esetén. A reverz kumulatív módon végrehajtott hipotézisvizsgálat eredményeképpen ok-okozati összefüggést mutattak ki a sugárzási kényszer és a globális felszínhőmérséklet között (Kodra et al., 2011).

Kodra et al. (2011) szerint azért nem detektálható az 1860-hoz közelebb eső időintervallumokban Granger-okozatóság a légköri szén-dioxid mennyisége és a globális felszínhőmérséklet között, mert az ENSO-jelenség gyengíti a sugárzási kényszer hatását. Az 1970-es évekre kiterjesztve a vizsgálatot ugyanakkor megnő a Granger-okozatóság meglétének bizonyossága a légköri szén-dioxid koncentrációból számított sugárzási kényszer és a globális felszínhőmérséklet között, miután a szén-dioxid légköri mennyisége jelentős növekedésnek indult.

Kodra et al. (2011) megállapította, hogy a SOI-index és globális felszínhőmérséklet trendjei kapcsolatban állnak egymással. Az okozatóság vizsgálata érdekében ismét F -próbát végeztek el. Egytől ötig választva a késleltetési hosszt, a teljes 1860-tól 2010-ig terjedő időszakra vonatkozóan, a nullhipotézis már egy százalékos szignifikancia szinten is elvethető volt, tehát kijelenthető, hogy az ENSO-jelenség nagy valószínűséggel hatással van a globális felszínhőmérséklet alakulására. Fordított irányú ok-okozati összefüggés azonban nem áll fenn. A szén-dioxid légköri koncentrációja és a SOI-index vonatkozásában folytatott hipotézisvizsgálat során körülbelül öt százalékos szignifikancia szinten elvetették a nullhipotézist, azaz a szén-dioxid légköri koncentrációja befolyásolja a SOI-index alakulását és ez a kapcsolat fordítva is fennáll (Kodra et al., 2011).

III.5. Antonello Pasini, Alessandro Attanasio és Umberto Triacca tanulmánya

A. Attanasio statisztikával foglalkozó kutató, A. Pasini fizikus, illetve U. Triacca gazdaságtannal és éghajlatkutatással foglalkozó szakember 2012-es elemzésében a Granger-okozatiság meglétét az antropogén eredetű üvegházhatású gázok légköri mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között, valamint a természetes sugárzási kényszerek változása és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között vizsgálta.

Elemzésükben a korábbiaktól eltérően nem mintán belüli, hanem a hamis okozatisági kapcsolat detektálása és a túlillesztés jelenségének elkerülése szempontjából megbízhatóbbnak tartott mintán kívüli megközelítést alkalmaztak. Az elemzés érdekessége, hogy a hipotézisvizsgálat alapjául szolgáló adatsorokon Attanasio (2012) megismételte a vizsgálatot mintán belüli módszerrel, amellyel hasonló eredményekre jutott.

A vizsgálathoz a szerzők 1850 és 2006 közötti idősorokat használtak fel. A hőmérsékleti adatok forrása Jones et al. (2010) folytatólagos méréseinek 2006-ban rendelkezésre álló változata volt. A természetes sugárzási kényszer adatsorai több forrásból tevődtek össze, részben a Nap irradianciájának idősora és a kozmikus sugárzás NOAA adatbázisában megtalálható idősora szolgált az alapjául. Az antropogén sugárzási kényszert a szén-dioxid, a metán és a dinitrogén-oxid légköri koncentrációjának idősorai képviselték (Pasini et al., 2012).

A szerzők az időben előrefelé haladva öt időtartományra (1981-2007, 1971-2007, 1961-2007, 1951-2007 és 1941-2007) végezték el az *MSE-t*-próbát és az *MSE-REG*-tesztet, a természetes sugárzási kényszerek és a globális felszínhőmérséklet között, illetve a három üvegházhatású gázra, azok együttes sugárzási kényszerére és a globális felszínhőmérsékletre vonatkozóan. A vizsgálat alapjául, a fenti módon megválasztott időtartamok előnye az volt, hogy a huszadik század végéhez közeledve egyre egységesebb, vagyis rendszeres, előírt módon beállított műszerekkel mért értékeket tartalmazó adatsorok állnak rendelkezésre.

A hipotézisvizsgálathoz felírt korlátozott és korlátozatlan autoregresszív modellek rendjét alacsony szinten próbálták tartani, a túlillesztés jelenségének elkerülése érdekében. A modelleket egytől négyig választott renddel írták föl. Az eredmények azt mutatták, hogy a Granger-okozatiság létezésére a természetes sugárzási kényszerek és a globális felszínhőmérséklet között nincsen bizonyíték, hiszen a nullhipotézis csak tíz százalék feletti szignifikancia szint esetén vethető el.

Az antropogén sugárzási kényszerek és a globális felszínhőmérséklet között azonban egyértelmű a Granger-típusú ok-okozati összefüggés megléte. A légköri szén-dioxid koncentráció növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között, illetve a légköri

dinitrogén-oxid mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között az okozatiság hiánya, tehát a nullhipotézis, elvethető öt százalék körüli szignifikancia szinten. A légköri szén-dioxid koncentráció esetében az 1981 és 2007 közötti időszakban vizsgálva pedig egy százalékos szignifikancia szinten is elutasításra került a nullhipotézis (Pasini et al., 2012).

Pasini et al. (2012) tehát a megbízhatóbb matematikai statisztikai módszerek tekintett mintán kívüli elemzéssel is igazoltnak látta azt a feltevést, miszerint az antropogén eredetű üvegházhatású gázok, különösképpen a szén-dioxid, a huszadik század második felében tapasztalt globális felmelegedésben jelentős szerepet játszottak.

III.6. Alessandro Attanasio vizsgálata

A. Attanasio 2012-es tanulmányában mintán belüli vizsgálattal is elemezte a természetes és antropogén sugárzási kényszerek, illetve a globális felszínhőmérséklet elmúlt másfél évszázadbéli növekedése közötti kapcsolatokat, a Pasini et al. (2012) által használt idősorok alapján. A mintán belüli vizsgálat során a korlátozott és a korlátozatlan autoregresszív modellek reziduális négyzetösszegeire F -próbát írt fel. Attanasio (2012) a modell rendjét az előző tanulmányhoz hasonlóan alacsony szinten tartotta. A rendet egytől háromig választva írta föl a korlátozott és a korlátozatlan modellt. A próbákat azonban több, tizenegy időszakra végezte el, először 1950-től 2007-ig, majd az időben visszafelé haladva tíz évvel bővítve az időintervallumokat, 1850-ig.

Pasini et al. (2012) vizsgálatához hasonlóan Attanasio (2012) nem talált meggyőző bizonyítékot a Granger-típusú okozatisági kapcsolatra a természetes sugárzási kényszerek, így a Nap irradianciája és a globális felszínhőmérséklet, valamint a kozmikus sugárzás intenzitása és a globális felszínhőmérséklet között. A kozmikus sugárzás intenzitása esetén azonban a 2007-es évtől az 1850-es évig visszafelé haladva, egyre hosszabb időszakok alapján elvégezve a hipotézisvizsgálatot, az ok-okozati kapcsolat hiányát kifejező nullhipotézis fenntartásának bizonyossága csökkent, sőt az 1860 és 2007, illetve az 1870 és 2007 közötti időtartományok alapján elvethetőnek bizonyult öt százalékos szignifikancia szinten (Attanasio, 2012). A felhasznált statisztikai módszer előfeltételei azonban az 1800-as évekhez közelítve fokozódó mértékben sérülhetnek, például az adatsorok homogenitása egyre kevésbé teljesül, hiszen a kozmikus háttérsugárzási értékek különböző forrásokon alapuló becslésekből származnak.

Az antropogén eredetű üvegházhatású gázok teljes sugárzási kényszerének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között viszont egyértelműen kijelenthető a Granger-okozatiság megléte. Ha az elemzésre a 2007-es évtől az 1850-es évhez egyre közelebbi időintervallum alapján került sor, akkor a növekvő p -értékből látható, hogy a nullhipotézis elvetésének bizonyossága csökkent, azaz a huszonegyedik századhoz közeledve egyre jelentősebb az emberi tevékenység hatására a légkörbe kerülő üvegházhatású gázok szerepe a globális felszínhőmérséklet emelkedésében. Az idősorokat modellező autoregresszív folyamat rendjének növelésével a nullhipotézis elutasításának bizonyossága szintén csökkent, de a szén-dioxidra és a metánra vonatkozóan a nullhipotézis minden esetben elvethető maradt. A dinitrogén-oxid és a globális felszínhőmérséklet esetében a nullhipotézis csak akkor utasítható el, ha az autoregresszív modell rendje három. A modell rendjét egynek vagy kettőnek választva, a huszadik századi időszakokra a szén-dioxid és a globális felszínhőmérséklet illetve a metán és a globális felszínhőmérséklet között a nullhipotézis már egy százalékos szignifikancia szinten is elvethető (Attanasio, 2012).

Összefoglalóan megállapítható, hogy a mintán kívüli megközelítéshez hasonlóan a mintán belüli módszerrel elvégzett hipotézisvizsgálat során is bebizonyosodott, hogy az antropogén eredetű üvegházhatású gázok, különösen a szén-dioxid légköri koncentrációjának növekedése hozzájárul a globális felszínhőmérséklet emelkedéséhez. A metán és a dinitrogén-oxid szerepét illetően azonban eltérő eredményre jutott a két elemzés. Attanasio (2012) mintán belüli elemzésében a metán légköri mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése közötti ok-okozati kapcsolat erősebbnek mutatkozott, mint a dinitrogén-oxid légköri koncentrációjának emelkedése és a globális felszínhőmérséklet növekedése között. Pasini et al. (2012) mintán kívüli vizsgálata ezzel ellentétes eredményre jutott, miszerint a dinitrogén-oxid légköri mennyiségének emelkedése és a globális felszínhőmérséklet növekedése között detektálható a szorosabb ok-okozati összefüggés.

III.7. Umberto Triacca tanulmánya

U. Triacca gazdaságtannal és éghajlatkutatással foglalkozó szakember 2005-ben publikált tanulmánya példázta, hogyan lehet a közvetlen Granger-próba eredményeit a korábban ismertetett elemzésekhez képest eltérően értelmezni.

Triacca (2005) az 1860-tól 2000-ig tartó időszakban végzett elemzése során arra a megállapításra jutott, hogy az ok-okozati kapcsolat létezése a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között nem jelenthető ki egyértelműen a közvetlen Granger-próba eredménye alapján. A vizsgálathoz a korábbiakban is gyakran használt idősorokat használta fel: Jones et al. (2010) folytatólagos méréseinek 1860 és 2000 között rendelkezésre álló globális felszínhőmérsékleti adatsorát valamint légköri szén-dioxid koncentráció adatsorként 1860-tól 1959-ig Etheridge et al. (1998) antarktisi Law Dome jégmagvakból származtatott adatsorát, 1959 és 2000 között pedig Keeling et al. (2009) Mauna Loán mért értékeiből összeállított, 2000-ben elérhető adatsorát.

Mivel sem a globális felszínhőmérséklet, sem a légköri szén-dioxid koncentráció idősora nem stacionárius, Toda és Yamamoto (1995) módszerét alkalmazva az integráció maximális fokának megállapítása után a globális felszínhőmérséklet és a szén-dioxid légköri mennyiségét modellező autoregresszív folyamatokat egygel, illetve kettővel illesztette túl. A közvetlen Granger-próbát 1860-tól a jelen felé közeledve mindig tíz évvel hosszabb időszakokra írta fel, az 1860 és 1900 közötti periódussal kezdődően. Arra vonatkozóan, hogy a szén-dioxid légköri koncentrációja okozhatja-e a globális felszínhőmérséklet emelkedését, összesen huszonkét tesztet végzett el. Az okozatisági kapcsolat hiányát elutasító eredmény öt százaléknál alacsonyabb szignifikancia szinten mindössze egy esetben született, az 1860 és 1930 közötti időszak tekintetében. A vizsgálat alapján az elsőfajú hiba elkövetésének valószínűségét túl magasnak ítélte meg, ezért alkalmatlannak találta a közvetlen Granger-próbát annak megállapítására, hogy a szén-dioxid légköri mennyiségének növekedése okozhatja-e a globális felszínhőmérséklet emelkedését (Triacca, 2005).

IV. Az ok-okozati összefüggés vizsgálata polinomiális regresszióval

A szén-dioxid légköri koncentrációja és a globális felszínhőmérséklet elmúlt körülbelül másfél évszázadban bekövetkezett emelkedése közötti okozatisági kapcsolat kimutatására saját vizsgálatban is sor kerül.

Az elemzéshez két adatsor használandó fel. Az első a Kelet-Angliai Egyetem Klímakutató Egységétől származó, globális felszínhőmérséklet anomália adatsora (Jones et al., 2010). A hőmérsékleti anomáliákat úgy képezték, hogy a globális felszínhőmérséklet 1850 és 2010 közötti havi átlagértékeiből kivonták az 1961 és 1990 közötti referencia időszak havi átlagos értékeit. A havi értékekből aztán éves átlagokat számoltak (1. ábra). A második adatsor a légköri szén-dioxid koncentráció változását tartalmazza az 1850-es évtől kezdődően a 2010-es évig. A koncentrációértékeket 1850-től 1958-ig antarktisi jégmagvakból határozták meg, majd 1958-tól Mauna Loán mérték (2. ábra).

A globális felszínhőmérséklet átlagához képesti pozitív és negatív eltérések, vagyis a pozitív és a negatív anomáliák a hőmérsékletváltozás trendjét mutatják 1850-től kezdődően. Az ok-okozati viszonyt nem a trendtől megtisztított adatokban, hanem ellenkezőleg, a trendek között próbáljuk kimutatni. A hőmérsékleti idősor, de még inkább a szén-dioxid idősor legfontosabb vonása ugyanis a meredeken emelkedő trend, ezért teljesen logikus a trendek között kapcsolatot keresni. Az vizsgálandó tehát, hogy jobb becslés adható-e a hőmérséklet trendjére a hőmérsékleten túl a szén-dioxid koncentráció figyelembevételével, mint pusztán a hőmérsékletek számításba vételével.

Az első vizsgálatban Fortran programozási nyelven írt alkalmazás segítségével a légköri szén-dioxid tartalom figyelmen kívül hagyásával, különböző fokszámú polinomokkal becslendő a hőmérsékleti anomáliákból álló adatsor. Egy p -ed fokú polinom olyan valós változójú valós értékű függvény, amelyhez létezik $p + 1$ darab a_0, \dots, a_p szám, hogy az x -hez a következő meghatározott értéket rendel:

$$x \mapsto a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_px^p .$$

A vizsgálat során az elsőfokútól a hetedfokúig írjuk fel az idő (t) polinomjait:

$$t \mapsto a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_pt^p .$$

A második elemzésben a hőmérsékleti adatsort a légköri szén-dioxid koncentráció figyelembe vételével becsljük. A megválaszolendő kérdés az, hogyha a polinomban a légköri

szén-dioxid koncentrációja, $[CO_2]$ is szerepel, akkor jobb becslést kapunk-e a hőmérsékleti trendre, mint az első esetben:

$$t \mapsto b[CO_2] + a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_p t^p.$$

A polinomban b a szén-dioxid légköri mennyiségnek együtthatója, a_0, \dots, a_p a globális felszínhőmérséklet változásának együtthatói.

Annak megállapítására, hogy a modell, azaz a polinom mennyire jól közelíti a valóságban megfigyelt folyamatot, a szórásnégyzet ($\hat{\sigma}_e^2$) minimalizálása, valamint a közelítéshez használt polinom optimális fokszámának meghatározása szükséges. A zaj ugyanis csökken a polinom fokszámának növelésével, ezáltal viszont nő a megbecslendő ismeretlen paraméterek száma. A polinom optimális fokszáma kiszámítható az Akaike információs kritérium, az AIC -érték minimalizálásával. Az AIC -érték az alábbiak szerint írható fel, ahol n az adatsor hossza:

$$AIC = n \ln \hat{\sigma}_e^2 + 2p \rightarrow \min$$

(Matyasovszky, 2002).

Ha a hőmérsékletbeli trendet a szén-dioxid koncentráció figyelembe vétele nélkül becsüljük, akkor az 1. táblázatba foglalt eredményeket kapjuk. A táblázatban a szórásnégyzetet és az AIC -értéket hat tizedes jegy pontossággal írtuk ki. Megállapítható, hogy a szórásnégyzet és az AIC -érték a hetedfokú polinom esetében minimális, tehát a polinom optimális fokszáma $p = 7$.

1. táblázat:

<i>a polinom fokszáma</i>	<i>szórásnégyzet</i>	<i>AIC-érték</i>
1	0,033793	-543,402039
2	0,022581	-607,321411
3	0,022367	-607,880249
4	0,020788	-618,695496
5	0,018544	-636,117126
6	0,017981	-640,122375
7	0,013876	-680,892822

A polinom fokszámának nyolcat választva noha a szórásnégyzet kismértékben, tízezredekkel csökken, az AIC -érték már tizedekkel fog nőni. A polinom fokszámát kilencnek választva azonban a szórásnégyzet és az AIC -érték is kisebb lesz, mint $p = 7$ esetén. A

polinom rendjének további emelésével mind a szórásnégyzet, mind az *AIC*-érték egyértelműen növekedni fog.

Ha a hőmérsékletbeli trend becslése a szén-dioxid koncentráció számításba vételével történik, akkor a 2. táblázatban található eredményekre jutunk. A táblázatban a szórásnégyzetet és az *AIC*-értéket ismét hat tizedes jegy pontossággal adjuk meg. A közelítéshez használt polinom optimális fokszáma ebben az esetben is hét, hiszen $p = 7$ esetén minimális a szórásnégyzet és az *AIC*-érték.

2. táblázat:

<i>a</i> polinom fokszáma	szórásnégyzet	<i>AIC</i> -érték	<i>t</i> -érték
1	0,022412	-608,532288	9,040999
2	0,021973	-610,735901	2,317274
3	0,021796	-611,068359	2,260250
4	0,020853	-617,229736	-0,717791
5	0,017599	-643,584961	3,054098
6	0,017712	-641,603638	1,828620
7	0,013325	-686,483032	2,710096

Ebben a vizsgálatban *t*-próba elvégzésére is sor kerül, mivel a hipotézisvizsgálat várható értékekre vonatkozik. A hőmérsékleti idősorban megtalálható trend ugyanis a globális felszínhőmérsékleti anomália hosszú idő alatt vett várható értékének becslésére alkalmas (Matyasovszky, 2002). A teszt annak megítélésére használandó, hogy a polinomban a szén-dioxid légköri mennyiségének figyelembe vétele pontosítja-e a hőmérsékleti trend becslését. Ennek megfelelően a nullhipotézis az, hogy a korábban felírt polinomban $b = 0$, tehát a szén-dioxidnak nincs szerepe. Az ellenhipotézis pedig az, hogy $b \neq 0$. A kritikus érték öt százalékos szignifikancia szinten körülbelül 1,96, míg egy százalékos szignifikancia szintre 2,58 körüli. Különböző fokszámok ($p = 1 \dots p = 7$) mellett elvégezve a *t*-próbát, $p = 4$ és $p = 6$ kivételével a teszt eredménye meghaladja a kritikus értéket. A nullhipotézis ezért elutasításra kerül, vagyis statisztikai bizonyosságot kaptunk arra nézve, hogy a szén-dioxid szerepe jelentős a hőmérsékleti trend kialakításában. A fokszám növelésével azonban a próbastatisztika értéke csökken, tehát két ellentétes folyamat figyelhető meg: a polinom fokszámának növelésével csökken a szórásnégyzet és az *AIC*-érték, ezáltal a hőmérsékleti adatsort a polinom egyre jobban közelíti. Ugyanakkor a fokszám növelése mellett a *t*-próba elvégzésével egyre kevésbé kapunk szignifikáns eredményt, a nullhipotézis csökkenő

bizonyossággal vethető el. Ennek oka az, hogy a szén-dioxid koncentráció trendje maga is mindjobban közelíthető egyre növekvő fokú polinommal, tehát a hőmérsékleti trend kétféle közelítése közötti különbség logikusan egyre kisebbnek várható. Ezért kifejezetten meggyőző a hetedfokú polinomiális közelítéshez tartozó $t \approx 2,71$ érték.

A 5 – 11. ábrákon szemléltetjük, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció figyelembe vétele nélkül vagy számításba vételével tekinthető-e jobbnak az 1850 és 2010 közötti hőmérséklet-változás közelítése. A polinom fokszámának növelésével valamint a szén-dioxid légköri mennyiségének számbavételével természetesen egyre jobb illeszkedés látható.

Bár a negyed- és a hatodfokú polinom a vizsgált polinomoktól jelentősen eltér, mert itt nincs szükség a légköri szén-dioxid koncentráció bevonására, a többi eset t -értéke kifejezetten meggyőző.

Az optimális hetedfokú polinommal közelítve a hőmérsékleti értékeket az elmúlt másfél évszázadban, jó látható, hogy 1850-től az 1930-as évekig a két polinom értékei csak kis mértékben térnek el egymástól (11. ábra). Jelentősebb különbségre a rendszeres és nagy pontosságú légköri szén-dioxid koncentráció mérések kezdete óta két időszakban került sor. Először az 1960-as évek második felében, amikor a légköri szén-dioxid koncentrációkat figyelembe véve alacsonyabb értékek kaphatók, mint a globális felszínhőmérsékletre a szén-dioxid légköri mennyiségének számításba vétele nélkül, valamint az 1980-as évek elejétől az 1990-es évek kezdetéig, amely periódusban éppen fordítva, a légköri szén-dioxid koncentráció figyelembe vételével számíthatók magasabb hőmérsékleti értékek, mint anélkül.

V. Összefoglalás

A mérések alapján az éghajlatváltozással foglalkozó kutatók többsége egyetért abban, hogy az elmúlt másfél évszázadban, különösen a huszadik században mind a globális felszínhőmérséklet, mind a szén-dioxid légköri mennyisége emelkedni kezdett. A dolgozatban bemutatott elemzések túlnyomó többsége pedig arra az eredményre jutott, hogy az elmúlt másfél évszázad globális felszínhőmérsékleti és légköri szén-dioxid koncentráció adatsorait alapul véve Granger-típusú ok-okozati összefüggés áll fenn a szén-dioxid légköri mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése között, még hozzá a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése okozza a globális felszínhőmérséklet emelkedését. Ennek szignifikánságában azonban nincs feltétlen egyetértés.

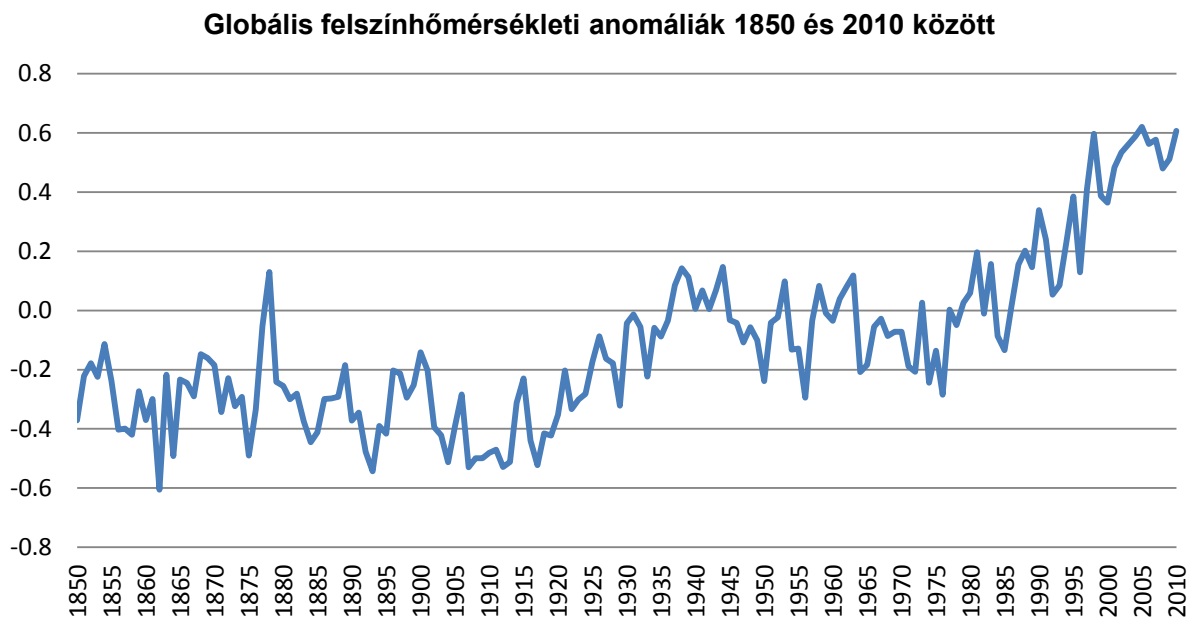
A dolgozatban időtartománybeli hipotézisvizsgálatra alkalmazott matematikai statisztikai módszerek bemutatására került sor. Nullhipotézisnek mindig a légköri szén-dioxid koncentráció és a globális felszínhőmérséklet változásának egymástól való függetlensége választandó, míg ellenhipotézisnek az ok-okozati összefüggés fennállása. Mivel a próbastatisztikák értéke alapján a nullhipotézis jellemzően öt százalék körüli vagy magasabb szignifikancia szinten vethető el, ezért nem jelenthető ki egyértelműen az okozatiság megléte, fennáll a hamis ok-okozati kapcsolat detektálásának lehetősége. Ebből kifolyólag a kutatókon is múlik, hogyan értelmezik a statisztikai próbák eredményét. A dolgozatban ismertetett tanulmányok szerzőinek többsége, valamint a saját vizsgálat eredményei alapján azonban nagy bizonyossággal állítható az, hogy a szén-dioxid légköri mennyiségének növekedése hozzájárult a globális felszínhőmérséklet emelkedéséhez az 1850 utáni időszakban.

A szén-dioxid légköri mennyiségének növekedése és a globális felszínhőmérséklet emelkedése közötti ok-okozati kapcsolat vizsgálatára két különböző szemlélet alapján került sor az időtartományban. A harmadik fejezetben ismertetett tanulmányokban a Granger-okozatiság létezésének teszteléséhez az 1850-es évektől a huszonegyedik század elejéig rendelkezésre álló globális felszínhőmérsékleti anomália idősort autoregresszív folyamatokkal modellezték. A hipotézisvizsgálat során arra keresték a választ, hogy a hőmérsékleti idősor melyik esetben közelíthető pontosabban: kizárólag a múltbeli hőmérsékleti értékek első hatványainak lineáris kombinációjaként felírva vagy ezek mellett a szén-dioxid koncentráció figyelembe vételével. A tanulmányok többségében megállapításra került, hogy a légköri szén-dioxid mennyiségével pontosabb becslés adható, mint anélkül.

A negyedik fejezet elemzésében a globális felszínhőmérséklet idősorát polinomiális regresszióval, vagyis az idő különböző hatványainak lineáris kombinációjával modelleztük, először csak a hőmérsékleti adatok, majd a szén-dioxid koncentráció figyelembe vételével. A hipotézisvizsgálat alapjául a globális felszínhőmérséklet anomália idősorában megtalálható trend szolgált, ezt közelítettük különböző fokszámú polinomokkal, először a szén-dioxid koncentráció értékeinek figyelmen kívül hagyásával, majd számításba vételével. Ez azért lehetséges, mert az idősorban megtalálható trend a globális felszínhőmérsékleti anomália hosszú idő alatt vett várható értékének becslésére alkalmas (Matyasovszky, 2002). Az autoregresszív modellezéshez hasonlóan az elemzés végén arra a következtetésre jutottunk, hogy a globális felszínhőmérséklet idősora az elmúlt másfél évszázadban akkor közelíthető pontosabban, ha a szén-dioxid légköri mennyiségét nem hanyagoljuk el, tehát a szén-dioxid légköri koncentrációjának növekedése oka a globális felszínhőmérséklet emelkedésének.

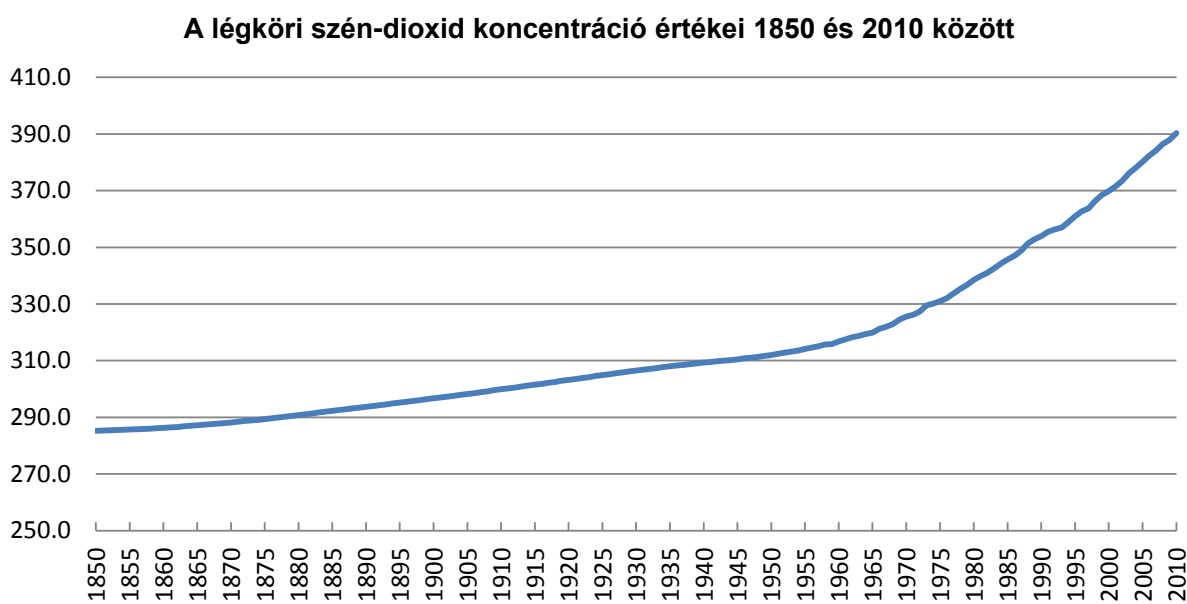
VI. Ábrák

1. ábra:



Az x tengelyen az évek, az y tengelyen a hőmérsékleti anomália értéke található, Celsius-fokban. Az adatok forrása: Annual mean Northern Hemisphere temperature anomaly data values from 1850 to 2010 relative to the 1961-1990 reference period (Jones et al., 2010)

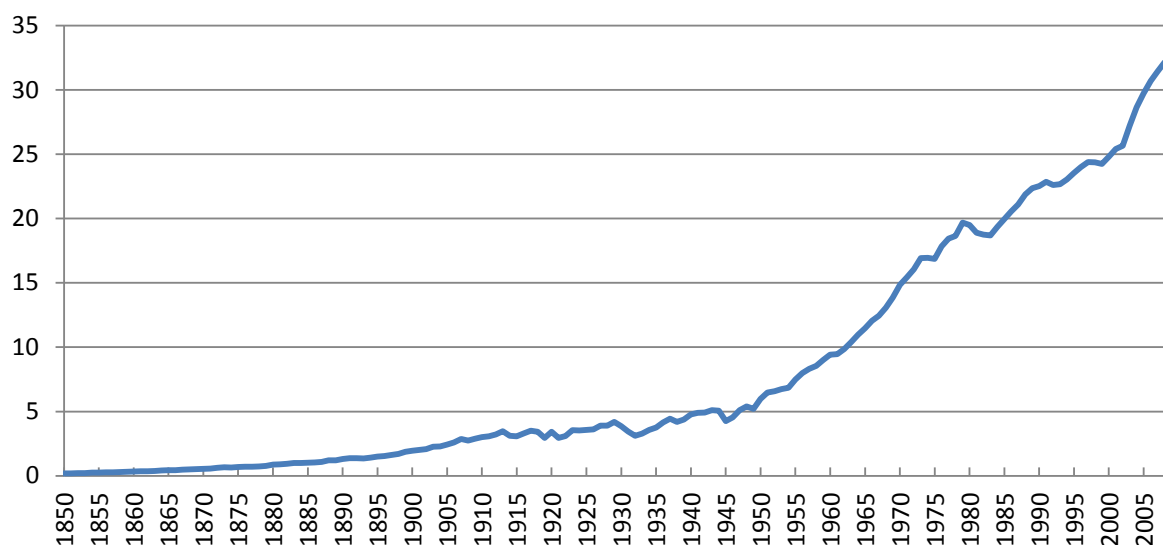
2. ábra:



Az x tengelyen az évek, az y tengelyen a szén-dioxid koncentráció értékei szerepelnek, ppm mértékegységben. Az adatok forrása: NASA, Goddard Institute for Space Studies: <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

3. ábra:

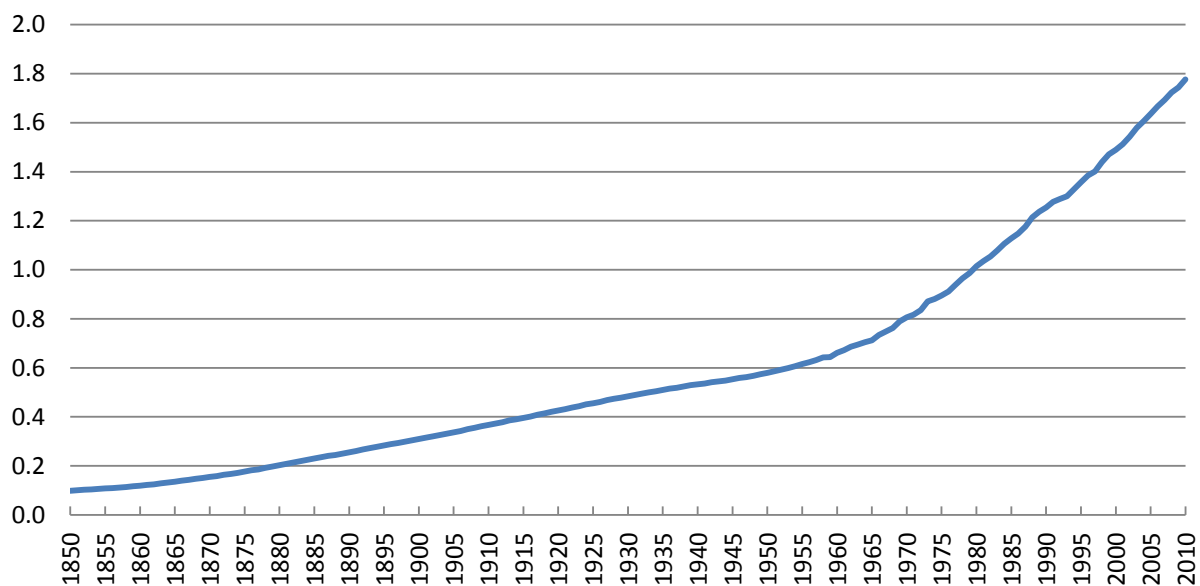
A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó globális szén-dioxid emisszió 1850 és 2009 között



Az x tengelyen az évek, az y tengelyen a teljes Föld ipari szén-dioxid kibocsátása látható, milliárd tonnában. Az adatok forrása: Boden et al. (2012) (Az eredeti adatsor a szén mennyiségére vonatkozik, ezt 3,667-del szorozva számítható ki a szén-dioxid mennyiség.)

4. ábra:

A légköri szén-dioxid koncentráció sugárzási kényszer értékei 1850 és 2010 között



Az x tengelyen az évek, az y tengelyen a légköri szén-dioxid koncentráció által okozott pozitív sugárzási kényszer található [Wm^{-2}] mértékegységben. A számításhoz felhasznált adatok forrása: NASA, Goddard Institute for Space Studies:

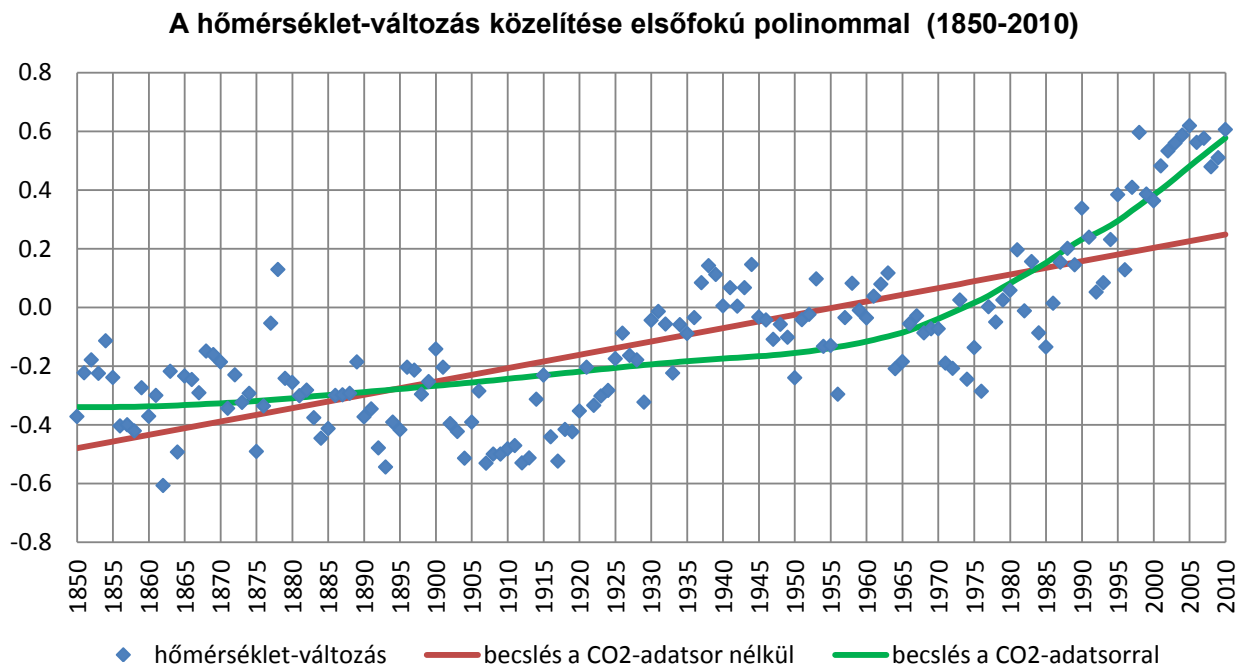
<http://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

Az 5 – 11. ábrákon az x tengelyen az évek, az y tengelyen a hőmérsékletváltozás értékei találhatóak, Celsius-fokban kifejezve.

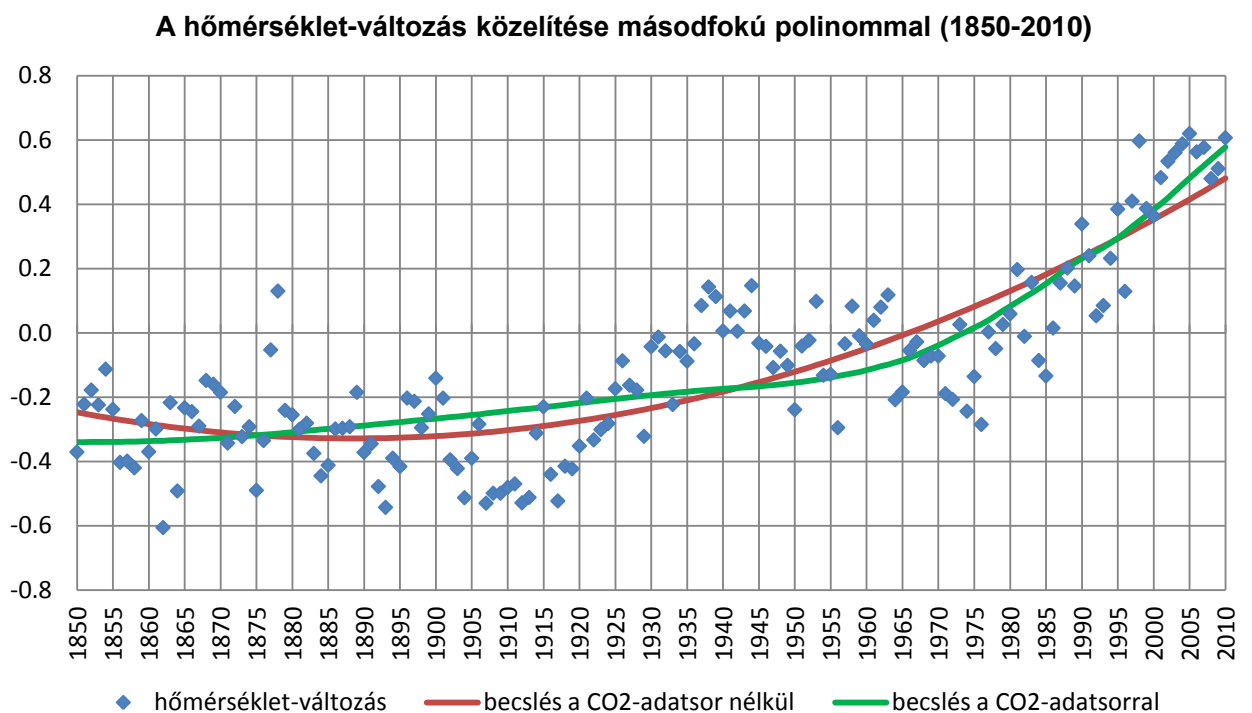
A globális felszínhőmérséklet adatsorának forrása: Jones et al. (2010)

A légköri szén-dioxid koncentráció adatsorának forrása: NASA, Goddard Institute for Space Studies: <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

5. ábra:

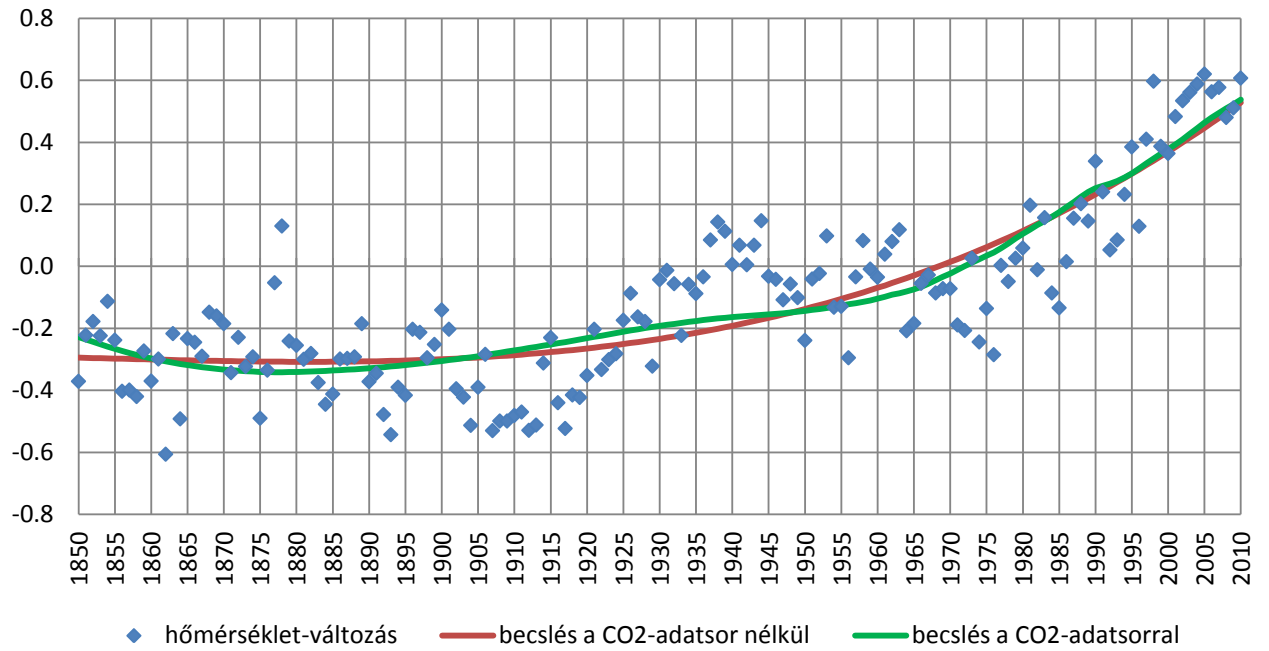


6. ábra:



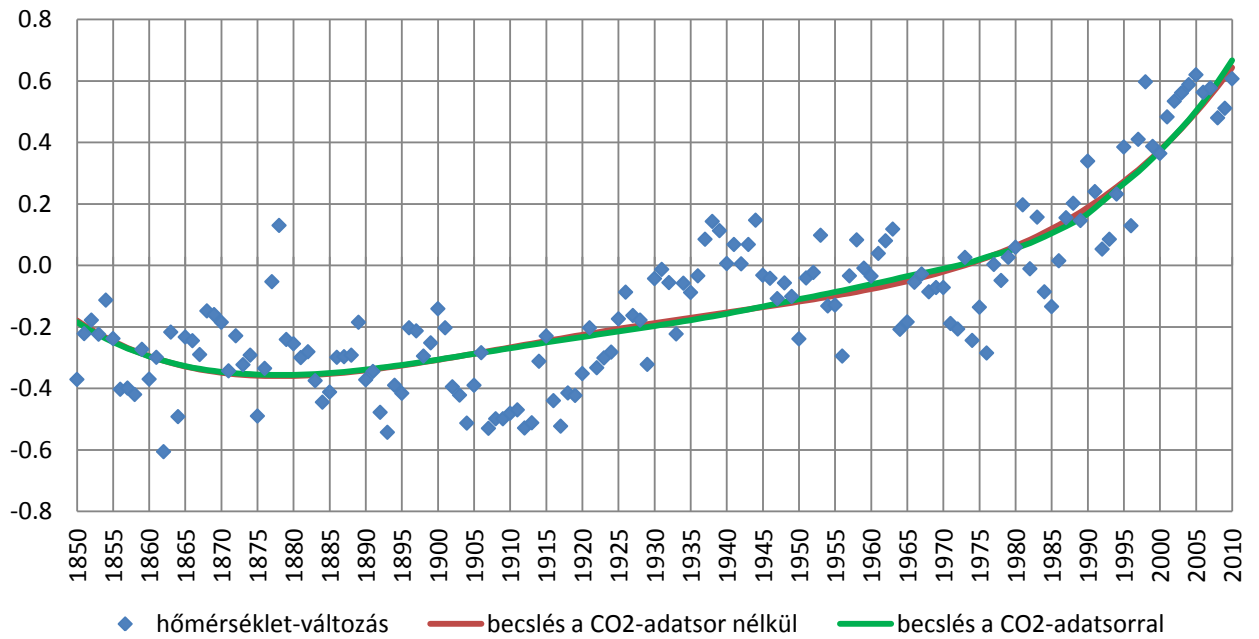
7. ábra:

A hőmérséklet-változás közelítése harmadfokú polinommal (1850-2010)



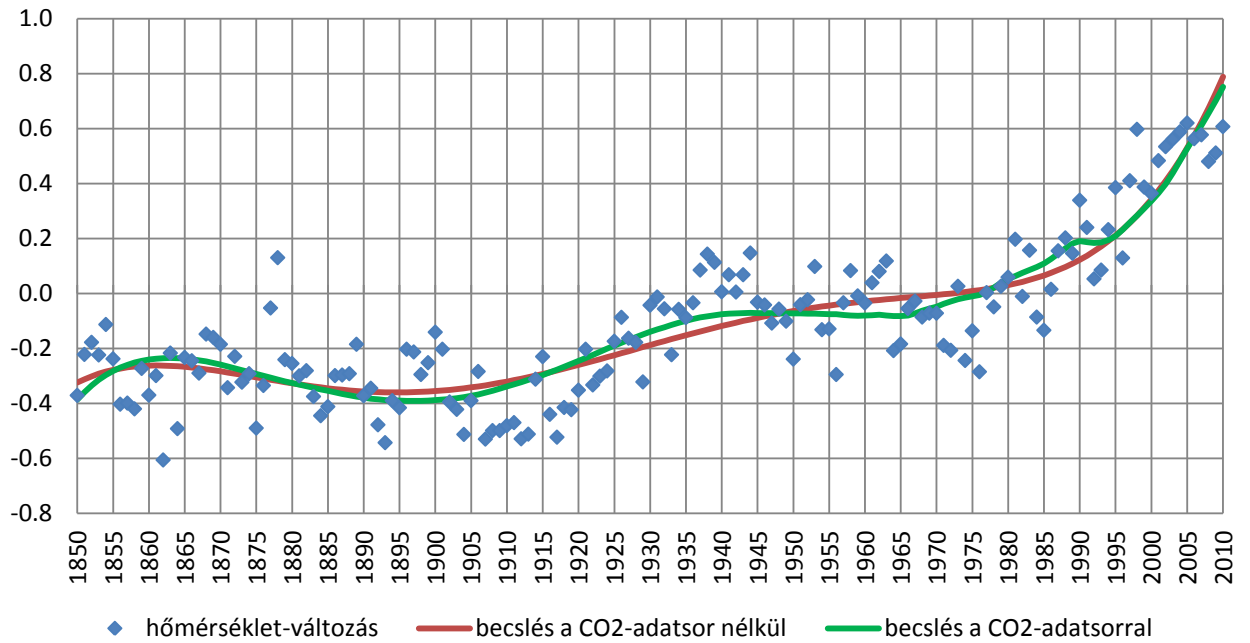
8. ábra:

A hőmérséklet-változás közelítése negyedfokú polinommal (1850-2010)



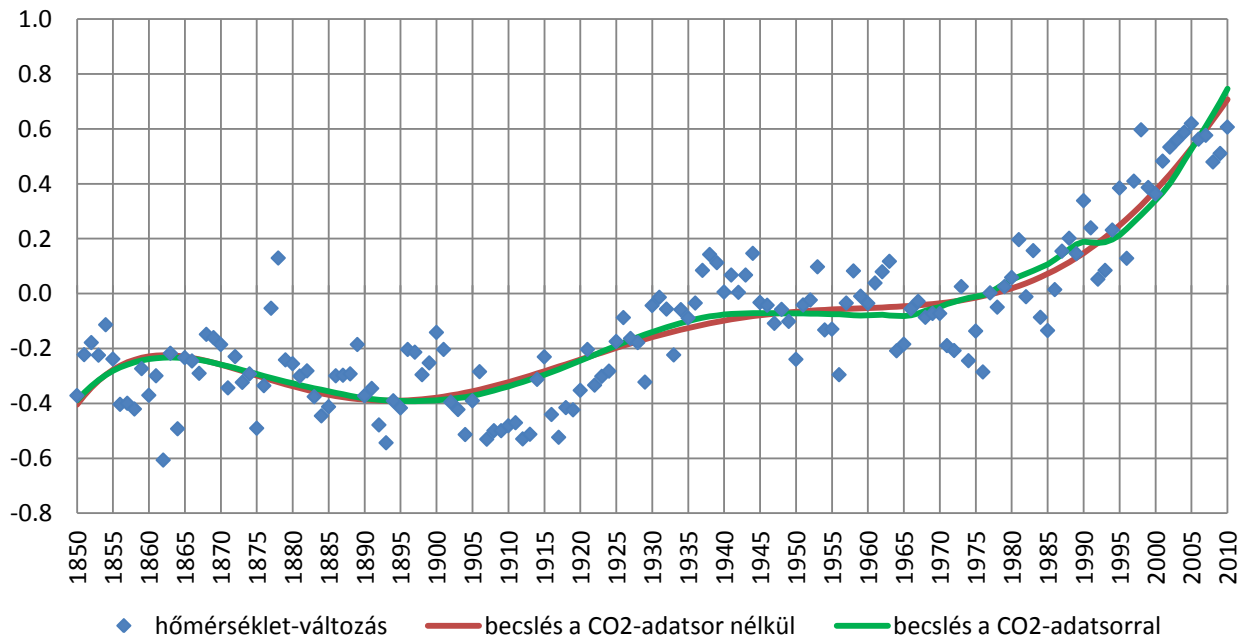
9. ábra:

A hőmérséklet-változás közelítése ötödfokú polinommal (1850-2010)



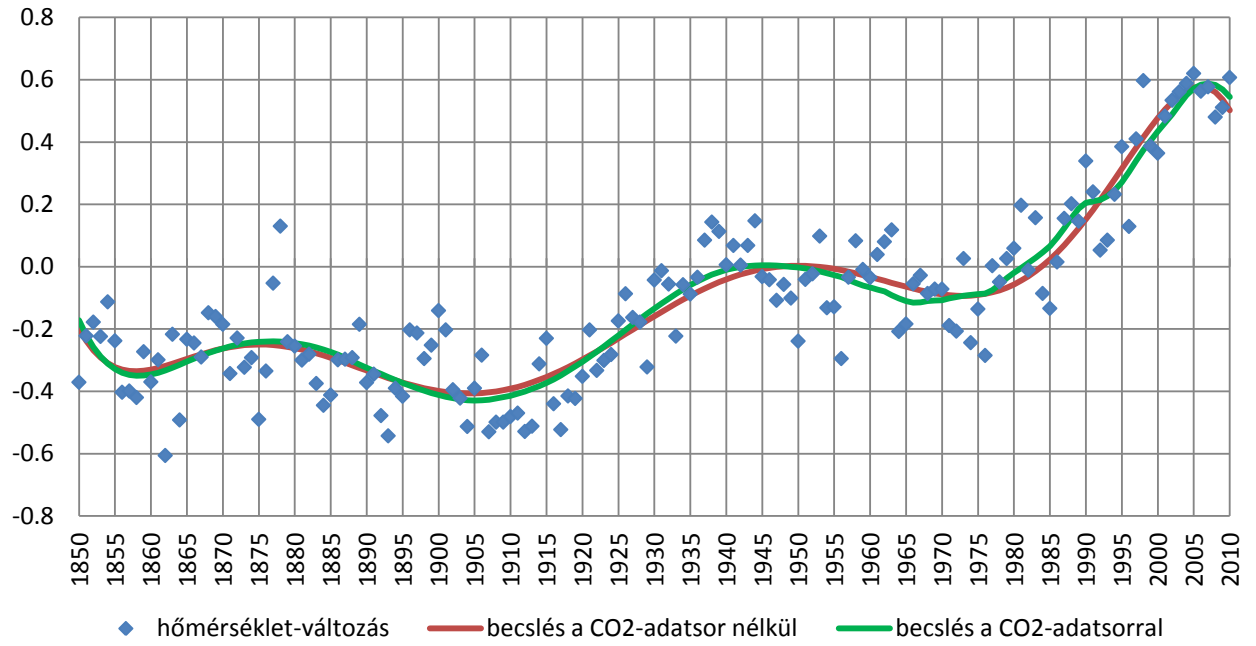
10. ábra:

A hőmérséklet-változás közelítése hatodfokú polinommal (1850-2010)



11. ábra:

A hőmérséklet-változás közelítése hetedfokú polinommal (1850-2010)



Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőm, Dr. Matyasovszky István segítségéért, amelyet az elmúlt egy évben a témaválasztás során, a szakdolgozat forrásaként szolgáló tanulmányok és adatsorok kiválasztásában, valamint szakdolgozatom elkészítésében és ellenőrzésében nyújtott.

Irodalomjegyzék

Felhasznált irodalom:

Attanasio A, 2012: **Testing for linear Granger Causality from natural/anthropogenic forcings to global temperature anomalies.** Theoretical and Applied Climatology, Vol. 110, 281-289.

Attanasio A, Pasini A, Triacca U, 2012: **A contribution to attribution of recent global warming by out-of sample Granger causality analysis.** Atmospheric Science Letters, Vol. 13, 67-72.

Bartholy J, Geresdi I, Matyasovszky I, Mészáros R, Pongrácz R, 2010: **A meteorológia alapjai.** Budapest

Darvas Zs, 2004: **Robert F. Engle és Clive W. J. Granger, a 2003. évi közgazdasági Nobel-díjasok.** Statisztikai Szemle, Vol. 82, 296-319.

Dévényi D, Gulyás O, 1988: **Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában.** Tankönyvkiadó, Budapest

Éghajlatváltozás 2007: Az Éghajlat-változási Kormányközi Testület negyedik értékelő jelentése. A munkacsoportok döntéshozói összefoglalói
elérhetőség: http://www.met.hu/doc/IPCC_jelentes/ipcc_jelentes_2007.pdf
(megtekintve: 2013. május 11-én)

Granger, CWJ, 1969: **Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods.** Econometrica, Vol. 37, 424-438.

Kodra E, Chatterjee S, Ganguly AR, 2011: **Exploring Granger causality between global average observed time series of carbon dioxide and temperature.** Theoretical and Applied Climatology, Vol. 104, 325-335.

Lozano A, Li H, Niculescu-Mizil A, Liu Y, Perlich C, Hosking J, Abe N, 2009: **Spatial-temporal Causal Modeling for Climate Change Attribution.** The 15th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Paris, France.

Lukács O, 1987: **Matematikai statisztika.** Műszaki Könyvkiadó, Budapest

Marik M, 1989: **Csillagászat.** Akadémiai Kiadó, Budapest

Matyasovszky I, 2002: **Statisztikus klimatológia.** ELTE Eötvös Kiadó, Budapest

McCracken MW, 2007: **Asymptotics for out-of-sample tests of Granger causality.** Journal of Econometrics, Vol. 140, 719-752.

Myhre G, Highwood EJ, Shine KP, Stordal F, 1998: **New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases.** Geophysical Research Letters, Vol. 25, 2715-2718.

Smirnov DA, Mokhov II, 2009: **From Granger causality to long-term causality: Application to climatic data.** Physical Review, Vol. 80.

Stern DI, Kaufmann RK, 1999: **Econometric analysis of global climate change.** Environmental Modelling & Software, Vol. 14, 597-605.

Sun L, Wang M, 1996: **Global Warming and Global Dioxide Emission.** Journal of Environmental Management, Vol. 46, 327-343.

Szalai S, 2004: **Globális-e a globális hőmérséklet?** Természet Világa, Vol. 135.

Thomson DJ, 1997: **Dependence of global temperatures on atmospheric CO₂ and solar irradiance.** National Academy of Sciences, Colloquium Paper, Vol. 94, 8370-8377.

Toda HY, Yamamoto T, 1995: **Statistical inference in vector autoregression with possibly integrated processes.** Journal of Econometrics, Vol. 66, 225-250.

A hivatkozott adatsorok forrásai:

A Kelet-Angliai Egyetem Klímakutató Egysége és a Hadley Központ globális felszínhőmérsékleti anomália adatsora 1850 és 2010 között:

Annual mean Northern Hemisphere temperature anomaly data values from 1850 to 2010 relative to the 1961-1990 reference period (Jones et al., 2010)

Jones PD, Parker DE, Osborn TJ, Briffa KR, 2010: Global and hemispheric temperature anomalies - land and marine instrumental records. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi: 10.3334/CDIAC/cli.002

A NASA Goddard Űrtudományi Intézet globális felszínhőmérsékleti anomália adatsora 1880 és 2012 között:

Global Annual Temperature Anomalies (Land Meteorological Stations) (1880-2012) (Hansen et al., 2013)

Hansen, JE, Ruedy R, Sato M, Lo K, 2013. NASA GISS Surface Temperature (GISTEMP) Analysis. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi: 10.3334/CDIAC/cli.001

elérhetőség: http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/temp/hansen/gl_land.txt
(megtekintve: 2013. május 11-én)

A Law Dome jégmagvak vizsgálatából származó szén-dioxid koncentráció adatsora:

Historical CO₂ Records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS Ice Cores (Etheridge et al., 1998)

Etheridge DM, Steele LP, Langenfelds RL, Francey RJ, Barnola J-M, Morgan VI, 1998: Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

elérhetőség: <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.combined.dat>

(megtekintve: 2013. május 11-én)

A NASA Goddard Űrtudományi Intézet szén-dioxid koncentráció adatsora (1850-2010):

National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Institute for Space Studies: elérhetőség: <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

Az adatsor forrásai 1850-1958 között: antarktisi jégmagvas vizsgálatok (Law Dome)

Etheridge DM, Steele LP, Langenfelds RL, Francey RJ, Barnola J-M, Morgan VI, 1996: *Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn*. Journal of Geophysics, Vol. 101, 4115-4128.

Az adatsor forrásai 1958-2010 között: Mauna Loán mért szén-dioxid koncentrációértékek 1958-1974: Keeling CD, Whorf TP (UC SIO)

elérhetőség: <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-keel.html> (megtekintve: 2013. május 11-én)

1975-1982 és 2003: Tans P, Thoning K (NOAA CMDL)

elérhetőség: <ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/in-situ/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

1983-2002: Tans P, Conway TJ (NOAA CMDL)

elérhetőség: <ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/flask/> (megtekintve: 2013. május 11-én)

2004-2010: NOAA/ESRL/Global Monitoring Division

elérhetőség: ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt

(megtekintve: 2013. május 11-én)

A CDIAC ipari szén-dioxid kibocsátására vonatkozó adatsora 1751 és 2009 között:

Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions (Boden et al., 2012)

Boden, TA, Marland G, Andres, RJ. 2012. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2012

elérhetőség: http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2009.ems

(megtekintve: 2013. május 11-én)

A Mauna Loán mért szén-dioxid koncentráció értékek (1958-2008):

Atmospheric Carbon Dioxide Record from Mauna Loa (Keeling et al., 2009)

Keeling, RF, Piper SC, Bollenbacher AF, Walker JS, 2009: Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi: 10.3334/CDIAC/atg.035

elérhetőség: <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>

(megtekintve: 2013. május 11-én)