

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Építkezésekből származó porkibocsátás

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Németh Csilla

Földtudományi alapszak,
Meteorológus szakirány

Témavezető:

dr. Breuer Hajnalka

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest
2019

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. Kibocsátáshoz kapcsolódó nemzetközi egyezmények története	2
3. Porkibocsátás meghatározása, definíciók.....	4
3.1 A talajtípus befolyásoló hatása.....	7
3.2 A szél befolyásoló hatása	10
3.3 A porkibocsátás környezeti és egészségügyi hatásai.....	11
4. Az Európai Unió Emissziós jelentése 1990-2016-ra vonatkozóan	14
5. Az emissziós leltárak elkészítése	18
5.1 Top-down és Bottom-up módszerek	19
5.2 Módszertanok a leltárak létrehozására	21
5.3 Porkibocsátás mennyiségének számítása	22
6. Speciális eset vizsgálata: Kína	26
7. Életciklus-értékelés módszere az építőiparban.....	28
8. Porkibocsátás mérése	30
8.1 Helyszíni mérések	30
8.2 Antropogén kibocsátás műholdas mérések	34
9. Porkibocsátást csökkentő módszerek	38
10.Összefoglalás.....	40
11.Köszönetnyilvánítás	41
12.Irodalomjegyzék.....	42

1. Bevezetés

A levegőszennyezés a fejlődő világ velejáráó problémája, ennek a szabályozása és a mértékének csökkentése nem egyszerű feladat. Fel kell ismerni a káros anyag kibocsátás összes lehetséges forrását, és egy olyan megoldást kell találni azok kontrollálására, amely gazdaságilag is elfogadható az érintett feleknek. A pontos szabályozáshoz az egyes forrásokból származó kibocsátás mennyiségének meghatározása és ismerete elkerülhetetlen, ezért is hozták létre az emissziós leltárakat. A dolgozatomban ki fogok térni az emissziós leltárak általános elkészítési módszereire, és az ezekben alkalmazott számítási módszerekre az építkezésekből származó porkibocsátás szempontjából. A népességnövekedéssel és az urbanizáció folyamatával együtt jár az építkezések számának növekedése is, legyen ez lakáscélú vagy ipari tevékenység, emiatt az építőipar egy jelentős forrása a poroknak. Dolgozatom első részében általánosan ismertetem a különböző mérettartományú por definícióit, illetve az antropogén porkibocsátás lehetséges forrásait. A porkibocsátás és a klímaváltozás kapcsolata még hiányos, és ahogy az munkámban bemutatásra is kerül, számos egészségügyi megbetegedést is okozhat. Dolgozatomban az elmúlt évek emissziós leltárai alapján összehasonlítom a magyarországi és az európai uniós porkibocsátási adatokat. A porkibocsátással kapcsolatos kisszámú helyszíni mérések közül bemutatom egy 2014-es brazíliai mérés eredményének részletes vizsgálatát, majd egy speciális esetet Kínában, értékelve az ott bevezetett súlyosabb, anyagi költségekkel járó korlátozásokat. Bemutatom, hogy az épületek életciklus–elemzése során 50 évre megbecsülve 3 lakóépület mennyi légszennyező anyagot bocsát ki, végül pedig kitérek az építkezéseken javasolt kibocsátást csökkentő módszerekre is.

2. Kibocsátáshoz kapcsolódó nemzetközi egyezmények története

A légszennyezés az emberiség megjelenése óta probléma. Már az ókorban is feljegyezték a márvány épületek megfeketedését és a kellemetlen szagok megjelenését a nagyvárosokban. Angliában Erzsébet királynő betiltotta bizonyos tüzelőanyagok használatát a Westminster palotában. Jelentős mértékű légszennyezésről az ipari forradalom kezdetétől lehet beszélni. (Mosley, 2014) A szén elterjedt használata az iparban addig nem tapasztalt kibocsátásokat eredményezett. Bár a légszennyezés egyértelműen érezhető volt, - már nem csak, mint kellemetlen szag, de a megbetegedések és a szmog okozójaként is, - a légszennyezés elleni törvények nem voltak elég hatékonyak, és a gazdasági növekedés sokkal fontosabbnak bizonyult, mint a tiszta levegő és az emberek egészsége. A probléma politikai felismerésére egészen a 20. századig várni kellett, de sajnos eközben látványosabb katasztrófák is történtek. Az 1940-es években súlyosbodó Los Angeles-i, majd 1952-es nagy londoni szmog esete bebizonyította, hogy cselekedni kell. Egyre több törvény született meg a tiszta levegő védelmében, az elsők között 1947-ben Kaliforniában. A törvényeket nem lehetett létező adatok nélkül érvénybe léptetni, így 1970-ben megszületett az EPA (Environmental Protective Agency), az Amerikai Környezetvédelmi Hivatal. (Frankel, 1989)

Az 1960-as években egyre jelentősebb károkat okozott a savas eső. Erdőket pusztított el, veszélyeztette a tavak élővilágát, továbbá akár teljes ökoszisztémák felborulását kockáztatta az északi féltekén. A savas esők kialakulásának a kutatása során fedezték fel, hogy azokat olyan légszennyező anyagok okozzák, amelyek a veszélyeztetett területtől több ezer kilométerre kerültek kibocsátásra. A probléma megoldására már országhatárokon átívelő összefogásra volt szükség. A páneurópai térségből először 32 ország fogott össze, hogy csökkentsék a légszennyezést. 1979-ben írták alá az Egyesült Nemzetek Szövetségének Európai Gazdasági Bizottsága (ENSZ EGB; United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) által előkészített, a nagy távolságra jutó, országhatáron áterjedő légszennyezésről szóló (Long range Transboundary Air Pollution = LRTAP) Genfi Egyezmény. Az LRTAP konvenció olyan környezetvédelmi és egészségügyi problémákra keres megoldást, amelyek az iparosodás, a modern mezőgazdasági módszerek és a fosszilis üzemanyag-felhasználáshoz köthetők, a savasodás mellett ilyen például a fotokémiai szmog és a felszínközeli ózon. Ez volt az első egyezmény, amely a politikától független, környezetvédelmi összefogást tartalmazott. Az egyezmény 1983-ban lépett hatályba lefektetve az alapjait annak a nemzetközi összefogásnak, amely a légszennyező anyagok

kibocsátásának csökkentésére irányult. Az ózon lyuk 1985-ös felfedezésével ismét jelentős lépések történtek a károsanyag-kibocsátás terén. A Montreáli protokoll 1987-es érvénybelépésének és elfogadásának a hatására lecsökkent az ózontató anyagok kibocsátása. Az 1990-es évek során egyre nagyobb figyelmet kaptak a VOC-ok (Volatile Organic Compounds = illékony szerves anyagok), a nitrogén-oxidok és a PM₁₀ levegőbe jutásának káros hatásai is. (Everard, 2015)

A Genfi Egyezmény megalakulás óta a tagországok száma mára már 51-re emelkedett, az egyezmény részese az Amerikai Egyesült Államok, Kanada és önállóan az Európai Unió is. Az egyezményt időközben ki is bővítették, sokkal több anyagra vonatkozik és egyre nagyobb területeket fed le. Az egyezményben szereplő kitételek végrehajtásakor tapasztalható hatások vizsgálatára jött létre az EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) jegyzőkönyve. Jelenleg összesen 8 darab jegyzőkönyv tartalmazza a kibocsátás-csökkentés céljait, illetve az ezekhez tartozó intézkedéseket. A jegyzőkönyvek a felszínközeli ózonra, a POP-okra (Persistent Organic Pollutants), azaz a környezetben tartósan megmaradó szerves szennyezőanyagokra, a nehézfémekre, illetve a szálló por-kibocsátásokra is kiterjed. Az 1999-es Göteborgi Jegyzőkönyv 2010-re és 2020-ra állapít meg kibocsátási küszöbértékeket kén-dioxidra, nitrogén-oxidokra, ammóniára és illékony szerves anyagokra, tehát már a másodlagos légszennyező anyagokat is magában foglalja. Magyarország 1999-ben írta alá és 2006-ban ratifikálta a Genfi egyezményt. [1]

3. Porkibocsátás meghatározása, definíciók

Az angol nyelvben széles körben elterjedt a *fugitive dust* kifejezés, amelynek a magyar nyelvre fordításakor a szálló por juthat először az eszünkbe, azonban a két fogalom nem egyezik meg. Az előbbi ugyanis magába foglal minden, a talajból eredő, és valamilyen mechanikai folyamat során a szél által felkapott port is.

Az aeroszol részecskék leírása során az egyik legfontosabb jellemző a részecske mérete. Az erre használt mennyiség az aerodinamikus átmérő. A folyékony halmazállapotú aeroszolak részecskéi gömb alakúak, ami megkönnyíti ennek a mennyiségnek a megállapítását. Azonban a szilárd részecskék változatos, szabálytalan formákat vesznek fel. Annak érdekében, hogy a részecske mozgását leíró számításokban könnyebben lehessen kezelni ezeket a szilárd részecskéket, bevezetésre került az *ekvivalens aerodinamikus átmérő* fogalma. Ez a következőt jelenti: annak a gömb alakú, 1000 kg/m^3 sűrűségű (vízzel megegyező sűrűségű) részecskének az átmérője, amelynek az ülepedési sebessége és az aerodinamikus viselkedése a levegőben megegyező lenne a szilárd részecskéével. (Hinds, 1999)

Az IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry – Tiszta és Alkalmazott Kémia Nemzetközi Szervezete) 1990-ben az alábbiak szerint definiálta a port: „A port kicsi, száraz, szilárd részecskék alkotják, amelyek olyan természetes folyamatok során jutottak a levegőbe, mint a szél vagy a vulkánkitörések, illetve mechanikai vagy emberi munkából kifolyóan, mint például zúzás, aprítás, őrlés, fúrás, bontási folyamatok, lapátolás, fuvarozás vagy söprögetés során. A por részecskéi általában $1\text{--}100 \mu\text{m}$ közötti átmérőjűek, és lassan kiülepednek a gravitáció hatására.” (Calvert, 1990)

A Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) 1994-s definíciója a porra a következő: „A por kicsi, szilárd részecskék összessége, és hagyományosan a $75 \mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjű szemcséket foglalja magában. Ezek a részecskék saját súlyuk miatt a száraz ülepedés során kikerülnek a légkörből, de egy bizonyos ideig a levegőben lebegve is megmaradhatnak.” [2]

Az Egészségügyi Világszervezet (WHO – World Health Organization) definíciója a következő: „A port $1 \mu\text{m}$ és $100 \mu\text{m}$ közötti aerodinamikus átmérővel rendelkező szilárd részecskék alkotják, amelyek a forrásuktól, a fizikai tulajdonságoktól és a környezeti tényezőktől függően a levegőben vannak, vagy a levegőbe kerülnek.” (Johnston, 2000)

Az Egyesült Államokbeli konvenció alapján a por: „Olyan apró szemcsékből álló anyag, amelyet a mechanikai vagy a szél által végzett munka során a levegőbe juttatott geológiai, szerves, szintetikus, vagy oldott szilárd anyagok alkotnak. Ez a por definíció nem foglalja magába a nem geológiai eredetű, belső és külső égési folyamatok során levegőbe jutott makrorészecskéket.” A por kibocsátása pedig: „valószínűleg nem kémények, kipufogók, füstelvezetők, vagy más hasonló funkciójú nyílásokon keresztül zajlik.” (WRAP, 2006)

Megkülönböztethető a természetes, illetve az antropogén eredetű por. Természetes módon, az eredeti állapotában lévő területekről a szél felkavarhat, és ezáltal a légkörbe juttathat porszemcséket. Ilyen források lehetnek a kiszáradt tó- és folyómedrek, a kopár és a sivatagos területek, a homokdűnék és a természetes eredetű tüzek. (WRAP, 2006). Az EPA definíciójában a természetes források kiegészülnek még az őshonos állatok mozgása által a természetes állapotú területeken, a természetes eredetű földcsuszamlások, a kőtörmelék hullása és a lavinák során, a vulkánokból, a gejzírekből, a vízeséseknél és a zuhatagoknál történő szilárd és oldott anyagkibocsátással. (EPA, 1995)

A természetes állapotából az ember által átalakított területekről a szél által felkavart és a légkörbe juttatott anyagok, azaz antropogén források lehetnek: az építkezési és a bánya területek, a hulladéklerakatok, az anyaghalomok, vagy az üres telkek. Ebbe a forráscsoportba tartoznak még a mesterségesen felszínre kerülő tó- és folyómedrek vagy az olyan mesterséges tavak medre, amelyek lecsapolás vagy kiszáradás miatt felszínre kerültek, valamint a mesterséges tüzek által leégetett területek. (WRAP, 2006) Az antropogén forrásokon belül megkülönböztethető direkt és indirekt forrás is. Indirekt a forrás, amikor földhasználati változásokból eredően, de természetes úton kerül a levegőbe por, például szél eróziókor, míg direkt forrásról beszélünk amennyiben egy konkrét emberi tevékenység miatt jön létre a por kibocsátás. (Chen *et al.*, 2018). Az építkezésekből eredő származó por kibocsátás tehát egy antropogén, direkt forrásból ered.

Az EPA (Environment Protection Agency – Környezetvédelmi Ügynökség) megfogalmazása szerint jelentős mennyiségű légköri por a szemcsés anyagok mechanikai felkavarásából, majd ezeknek a szabad levegőbe jutásából ered. A por kibocsátás jelentős forrásai közé tartoznak a földutak, a mezőgazdasági talajművelési munkák, a tároló halomok és a nehézgépes építkezési munkálatok. „Két fő oka van annak, hogy a műveletek során por képződik. Az első ilyen ok a felszíni anyagok aprózódása és porítása a munkagépek működése során, a második pedig a turbulens légáramlatok porszemekre gyakorolt

légbeszívó hatása. Ez utóbbira példa az erős szélnek kitett területek felszíni eróziója.” (EPA, 1995)

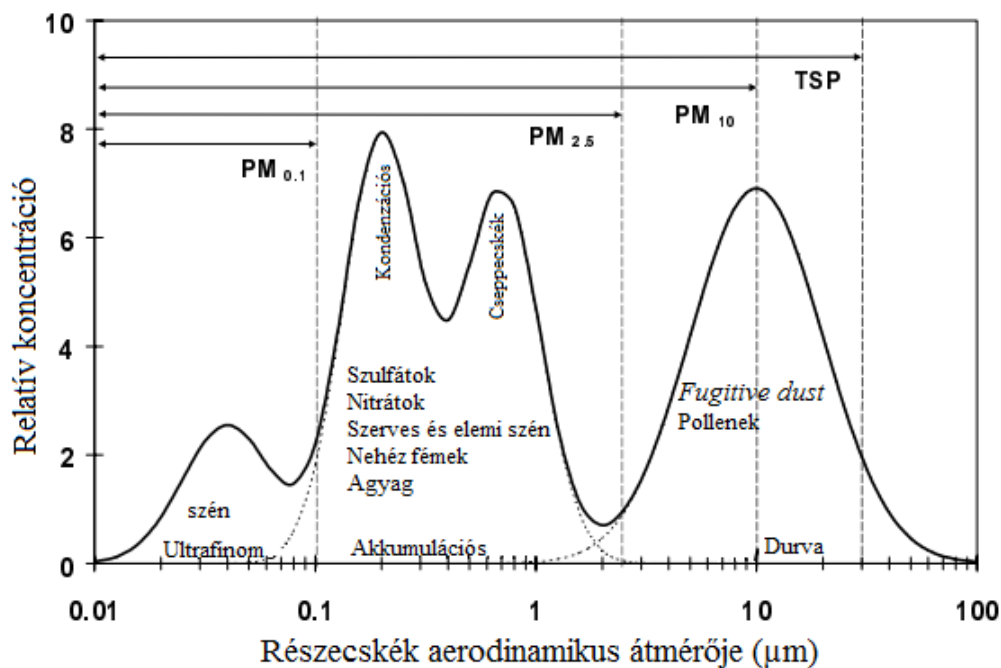
A *szálló por* a magyar szakirodalomban a „*particulate matter*” angol kifejezés megfelelője, rövidítve PM, amelyet a levegőben lebegő szilárd és folyékony aeroszol részecskék gyűjtőneveként használunk. A szálló por kifejezés célja, hogy az meg legyen különböztetve az ülepedő portól. A PM₁₀ a 10 µm-nél kisebb aerodinamikus átmérővel rendelkező részecskéket foglalja magában, a PM_{2,5}, pedig a 2,5 µm-nél kisebb átmérővel rendelkező részecskéket definiálja. A mérethatár meghatározása azért volt fontos lépés, mert a nagyobb méretű részecskék egészségre gyakorolt káros hatása lényegesen kisebb, mint a kisebb méretű társaiké. A szálló por változatos forrásokból juthat a levegőbe, így különböző anyagokat tartalmazhat. Ezek között lehet szerves anyag, nehézfém, szilikátokat tartalmazó anyag, de természetes eredetű pollenek és spórák is. A PM₁₀ légköri koncentrációját kötelező mérni. Magyarországon ezeket a méréseket az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat végzi.

A 306/2010. (XII. 23.) Kormányrendelet az alábbi definíciókat tartalmazza [3]

PM₁₀: „a szálló por azon frakciója, amelynek legalább 50%-a átmegy a PM₁₀ mintavételének és mérésének referenciamódszereként az MSZ EN 12341:2001 szabványban meghatározott 10 µm aerodinamikai átmérőjű szelektív szűrőn.”

PM_{2,5}: „a szálló por azon frakciója, amelynek legalább 50%-a átmegy a PM_{2,5} mintavételének és mérésének referenciamódszereként az MSZ EN 14907:2006 szabványban meghatározott 2,5 µm aerodinamikai átmérőjű szelektív szűrőn.”

A „*fugitive dust*” nagyrészt 2–3 µm-nél nagyobb méretű (1. ábra), úgynevezett durva szemcsés anyag, amelyet főleg geológiai eredetű részecskék alkotnak, amelyek az aprózódás folyamata során jönnek létre. Az antropogén porkibocsátás során főleg ebből a tartományból jutnak a levegőbe a porszemek. A pollenek és a spórák is ugyanebben a mérettartományban helyezkednek el. Az 1. ábrán látható továbbá, hogy az „*fugitive dust*” az 1–100 µm-es mérettartományt fedi le, nagyjából fele a PM₁₀ csoportjába tartozik, valamint kis mértékben egybeesik a PM_{2,5} csoporttal is. (Watson&Chow, 2000)



1. ábra: Légköri részecskék méretbeli eloszlása, a forrás: (Watson & Chow, 2000).

3.1 A talajtípus befolyásoló hatása

A talajok besorolására sok módszer alakítottak már ki, de olyan, amelyből megállapítható az építkezések során felszabaduló szálló por mennyisége nagyon sokáig nem létezett. A Las Vegas völgyben végzett kutatások során 2001-re kialakítottak egy ilyen módszert (MacDougall et al., 2001). A besorolás alapján már az építkezés megkezdése előtt lehetőség van a szálló por szennyezés megbecslésére. A völgyben végzett építkezési munkálatok nagyjából 37%-át adták a 24 óra alatt kibocsátott PM₁₀ mennyiségének. A nagy mennyiségű kibocsátás miatt fontos volt, hogy pontosan megállapítsák, hogy mitől függ, és az alapján mivel csökkenthető a kibocsátás. Erre a talaj potenciális porkibocsátási indexe, azaz a PEP (Particulate Emission Potential) meghatározására vonatkozó módszertan kitalálása lett a cél. A besorolás alapját a talaj agyagtartalma és az optimális nedvességtartalma¹ adja. Clark megyében a vizsgált területen ezeket rendszeresen mérték, ezért az adatok már rendelkezésre álltak. A kibocsátott mennyiség összegének meghatározása még két tényező hatására változhat: ezek a potenciálisan kibocsátható mennyiség és a kibocsátás csökkentésének lehetséges mértéke. A kibocsátás mennyiségét a végzett munkálatok és a talajban természetesen előforduló részecskék mennyisége befolyásolja. Az egyes tevékenységek

¹ Azt a nedvességtartalmat, amelynél a talaj legjobban tömöríthető, optimális talajnedvességnek nevezik. forrás: Dexter & Bird (2001).

meghatározása után már csak a talajtípustól függ a kibocsátás. A talajban az agyag- és az iszapszemcsék mennyisége határozza meg annak a textúráját. A vizsgált területen a talaj százalékos összetétele változatos volt. Ezek eloszlása a 2. ábrán látható, a pontok az adott méréseket jelzik. A talajfajtákat a vizsgálat után 5 típusba sorolták be. A legtöbb típusnál eltérnek a porkibocsátás csökkentésére javasolt módszerek.

1. Magas porkibocsátási potenciállal rendelkező talajok:

15%-nál több iszap található benne, és az optimális nedvességtartalom 11%-nál magasabb. Ezek a talajok legtöbbször kiszáradt tó- és folyómedrekben találhatóak meg. A porkibocsátás csökkentése itt nehezebb folyamat, mint a többi területen, ugyanis a talaj hidrofób viselkedésű, így a nedvességet a talaj nehezebben szívja be, és több mennyiségre is van szükség ugyanolyan hatás eléréséhez, mint a többi területen. Esetleg a vízhez adott felületaktív anyagokkal lehet növelni a hatást.

2. Közepesen magas porkibocsátási potenciállal rendelkező talajok:

Az iszaptartalom 30–80% közötti, de az optimális nedvességtartalom nem több mint 11%. Hordalékból származó talajok, vegyes alkotóanyagokkal, amelyekben karbonátok és szilikátok is előfordulhatnak. Az ilyen típusú talajok kibocsátásának csökkentésénél hatékony módszer, ha a víz mellé olyan anyagokat is adnak, amely megköti a kisebb talajalkotó részecskéket és csökkenti a talaj felporzását.

3. Közepesen alacsony porkibocsátási potenciállal rendelkező talajok:

Az iszaptartalom 15–30% közötti, az optimális nedvesség tartalom 11% alatti. Szintén a folyók hordalékából származó, de főleg csak karbonátok alkotta talajok. A vizsgált terület legnagyobb része ebbe a kategóriába volt besorolható.

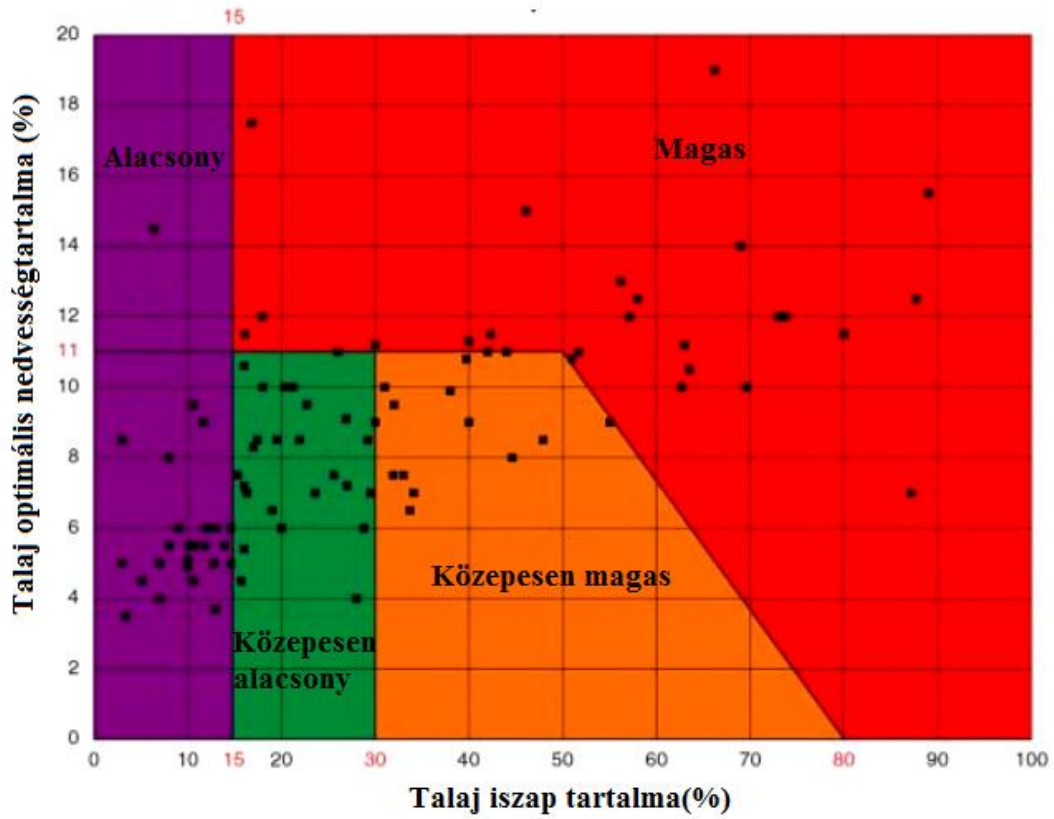
4. Alacsony porkibocsátási potenciállal rendelkező talajok:

Kolluviális, azaz a gravitáció hatására bekövetkezett törmelékfelhalmozódással keletkezett talajok. Az iszaptartalom 15% alatt van, az optimális nedvességtartalma nem meghatározott. Az ilyen típusú talajok porkibocsátásának szabályozása különösen nehéz feladat, mert a talaj vízmegkötő-képessége igen alacsony, ebből kifolyóan itt nem javasolt a víz használata erre a célra, ugyanis nem lenne nagy hatása. A talaj nem köti meg a vizet, az csak elfolyik, és nem csökken a porkibocsátás mennyisége.

5. Kialakításra került egy ötödik kategória azokra a talajokra, amelyeknél nagyon alacsony a porkibocsátási potenciál. Ezek jellemzően azok a területek, ahol az

alapkőzet már a felszínre jutott és nincs talajborítottság. Ez a talajtípus nem szerepel a 2. ábrán.

A talajtípusok alapján javasolt módszerek gyakorlati alkalmazására pozitív visszajelzés érkezett az építkezési munkálatokat végzők részéről. (MacDougall et al., 2001)



2. ábra: Talajtípusok a porkibocsátási potenciál szerint (MacDougall et al., 2001)

3.2 A szél befolyásoló hatása

A talajszemcsék mozgása három típusú lehet. Gördülő mozgásról akkor van szó, ha a 0,5–0,2 mm közötti, nagy szemcseméretű részecskék emelésénél a szél sebessége és energiája nem elegendő ahhoz, hogy felemelje, így a felszínen hagyva elgörgeti, elforgatja azokat. A másik mozgástípus a pattogó, vagy ugráló mozgás, amely során a részecskék rövidebb időre már képesek elhagyni a felszínt. Jellemzően a 0,05–0,20 mm nagyságú részecskék pár centimétertől akár 1–2 m távolságra is eljuthatnak. A részecskéket a leghosszabban a levegőben tartó részecskemozgás a lebegtetés. Ennek feltétele, hogy a talajfelszín közelében létrejövő egyenletes szélmozgásból a magasabb légrétegekre jellemző, örvénylő légáramlatokba is eljusson a felemelt részecske. A függőleges szélesebességnek legalább 3–5 km/órának kell lennie ahhoz, hogy a szél felemelje, és nagyobb távolságra szállítsa az anyagot. (*Stefanovits et al.*, 1999)

A porkibocsátás szempontjából fontos a szélesebesség erőssége. Megfelelő energia és turbulencia szükséges ahhoz, hogy a kibocsátás helyszínétől jelentős távolságra jusson a szennyezés. Amennyiben a szélesebesség 7 m/s feletti, (*Watson et al.*, 2000) már jelentősen magasabb a PM₁₀ légköri koncentrációja az építkezési területeken, mint az ennél alacsonyabb szélesebességeknél.

Azt, hogy milyen messzire juthat el egy-egy részecske a szélesebesség mellett a kibocsátási magasság, az ülepedési sebessége, és a légköri turbulencia határozza meg. Amennyiben a szélesebesség átlagosan 16 km/óra, a 100 µm-nél nagyobb átmérőjű részecskék 6–9 m távolságra juthatnak a kibocsátást forrásától. A 30–100 µm közötti részecskék ugyanakkor kb. 100 méteren belül kiülepednek. Az ezeknél kisebb, tehát a PM₁₀ és PM_{2,5} részecskék sokkal lassabban ülepednek ki, hiszen kisebb a tömegük és így a gravitációs ülepedés nincs akkora hatással rájuk, sokkal inkább a légköri áramlatok határozzák meg meddig juthatnak el. (*EPA*, 1995)

Az építkezésekről származó, szél által felkapott por fele, mint láttuk (1. ábra) 10 µm-nél nagyobb átmérővel rendelkezik, így azok az építkezés néhány 100 méteres környezetében kiülepednek. A másik fele azonban szállóporként folytatja útját, lényegesen nagyobb kiülepedési távolsággal. Éppen ezért az építkezésekhez kapcsolódó vizsgálatok elsősorban a PM₁₀ részecskékre vonatkoznak.

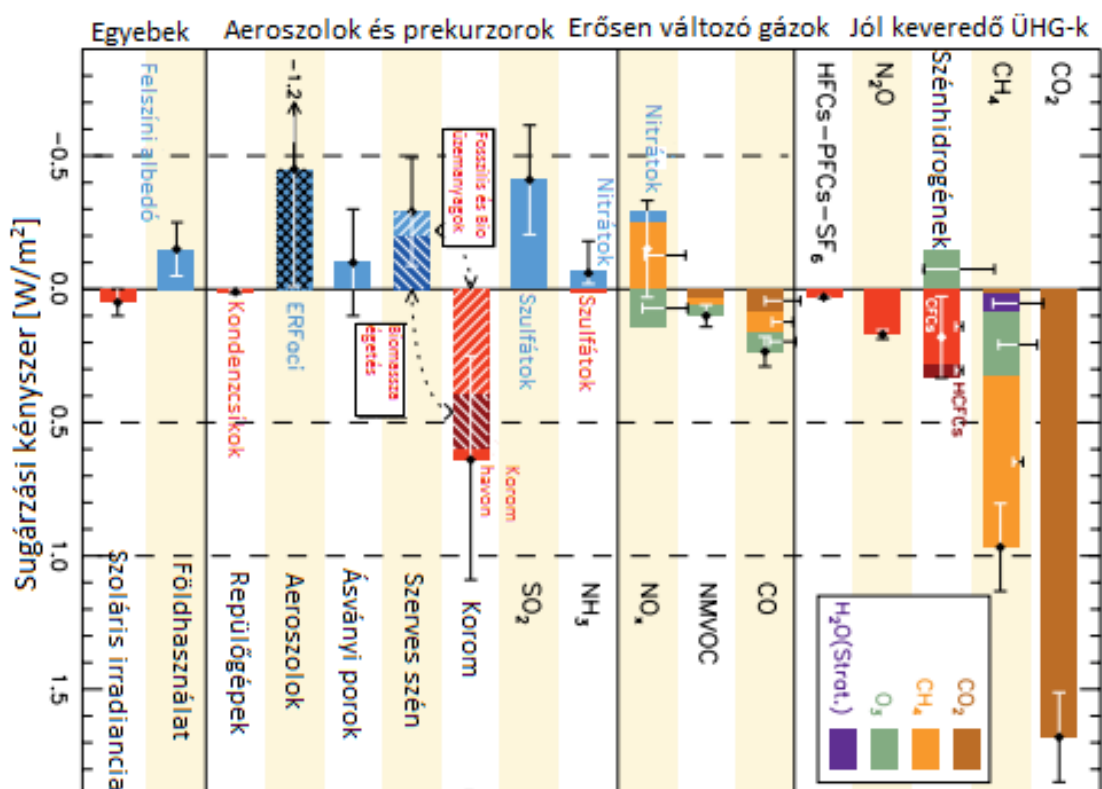
3.3 A porkibocsátás környezeti és egészségügyi hatásai

A globális szinten a légkörbe jutott por, annak kiülepedése, azaz a porkörforgás és a klíma kapcsolata még számos megválaszolatlan kérdést tartalmazó témakör, így az sem biztosan tudott tény, hogy a megnövekedett porkibocsátás milyen hatással lesz az éghajlatra, erősítheti, vagy esetleg gyengítheti a globális felmelegedést. Az ásványi anyagokat tartalmazó porszemeknek számtalan hatása lehet az éghajlatra. Ezek a részecskék szórják vagy elnyelik a beérkező fényt, így befolyásolva a globális sugárzási egyenleget. A légkörbe kerülő szemcsék kondenzációs magként részt vehetnek a felhőképződési folyamatokban, így megváltoztatva az egyes területek albedóját. A légkörbe juttatott por a kiülepedés után tápanyaggal láthat el olyan területeket, ahova egyébként az nem jutna el, így például a sivatagos területeket. Azonban maga az éghajlat is befolyásolja a porkibocsátás mennyiségét. A kiülepedett por mennyisége lényegesen nagyobb volt a jégkorszakokban, mint az interglaciális időszakok során. A kérdés az, hogy a porkibocsátás és az éghajlatváltozás között pozitív vagy negatív visszacsatolás áll-e fent. Erre a kérdésre még nincsen konkrét válasz, hiszen a kölcsönös kapcsolat során több kérdéses tényezőt kell számításba venni. A csapadék hullás elősegíti az ülepedést és csökkenti a felkavarható por mennyiségét, így a csapadékeloszlás változását pontosan kellene ismerni. A por szállítását a szél végzi, így a szél irányának és az erősségének a jövőbeli változásait is szükséges lenne ismerni. Ezeken a folyamatokon kívül a megnövekedett széndioxid és szerves anyag mennyisége is szerepet játszik a sivatagok esetleges termékenyvé válásában. Továbbá hiányzó információ még a porok sugárzást befolyásoló tulajdonságainak a pontos ismerete, illetve ezeknek az adatoknak a globális cirkulációs modellekbe történő helyes bevitele is még megoldásra vár. (Kok et al, 2018)

A 2018-as IPCC jelentés szerint a légkörben található ásványi eredetű por 20–25%-a antropogén eredetű lehet, az utakról felkavarodó porból, illetve a földhasználati változásokból eredően. Az 1750 és 2010 közötti időszakot vizsgálva $-0,3 \text{ W/m}^2$ és $+0,1 \text{ W/m}^2$ közötti sugárzási kényszert okozott a légkörben található ásványi por. A jövőbeli előrejelzések teljesen eltérők kimeneteleket jeleznek. Létezik olyan tanulmány, amely háromszoros növekedést, és van, amelyik 60%-os csökkenést mutat a porkibocsátásra. A 3. ábrán az aeroszol részecskék között van ábrázolva az ásványi porok hatása. A doboz diagrammok megmutatják azt is, hogy mekkora bizonytalansággal kell számolni egyes anyagok esetében. Ezt a függőlegesen megvastagított részek és a teljes szélesség aránya jelzi. Az aeroszolak és a sugárzást befolyásoló hatásuk még mindig nagyon magas

bizonytalansággal határozható meg, azonban lényegesen kisebb hatással járul hozzá a teljes sugárzási egyenleghez, mint az üvegházhatású gázok. (Myhre et al., 2018)

A pontosabb hatás előre jelzéséhez részletesebb ismeret kellene arról, hogy az emberi tevékenységek, amelyek hozzájárulnak, vagy éppen csökkentik a porkibocsátást melyik irányba változnak, így az emberi viselkedés megítélésétől függően változhat az eredmény is. A sivatagos és a félsivatagos területek mezőgazdasági hasznosítására megfelelő módszer a föld megművelése és öntözése, amely folyamat megköti a talajrészecskéket, így azok száma alapvetően csökkenne, de a munkálatok során a gépesítéstől függően nőhet is a porkibocsátás. A túllegetetés, az erdőirtás, az építkezések és a sivatagban végzett katonai tevékenységek által okozott változások előrejelzése is kérdéses tényező. (Boucher et al., 2001)

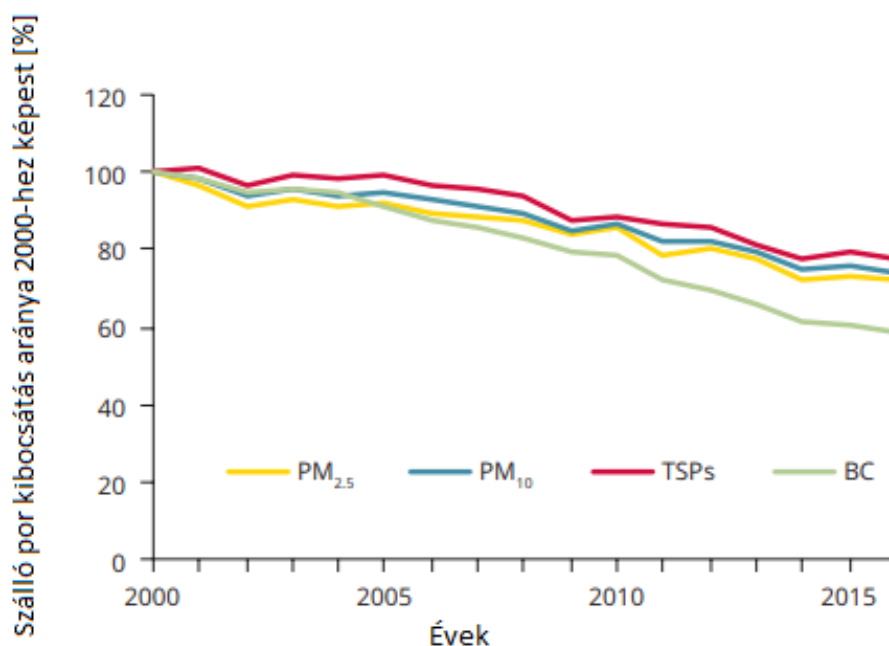


3. ábra: Az 1750–2011 közötti sugárzási kényszer a különböző kibocsátott anyagokra. A kék negatív, a piros pozitív sugárzási kényszert jelez. (Myhre et al. 2018)

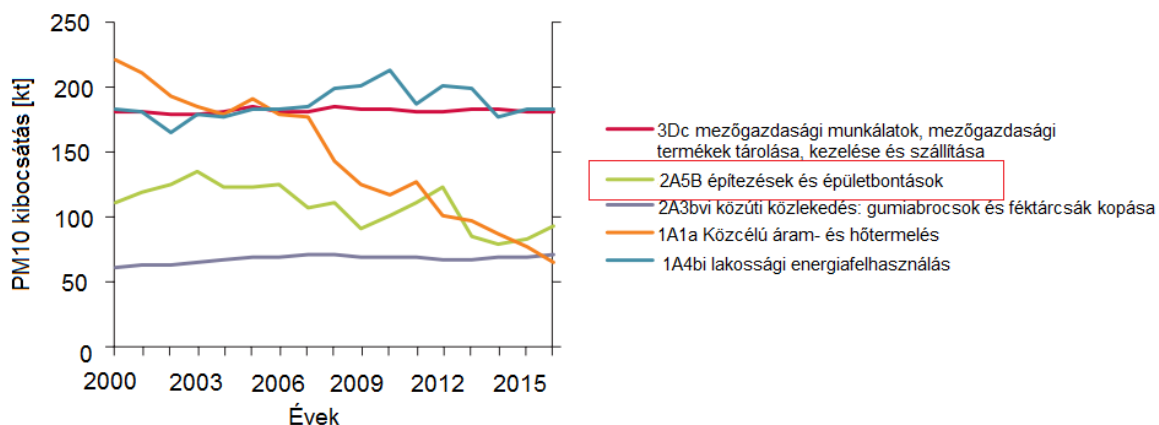
A kültéri szálló porszennyezés 0,8 millió korai halálesetet és 6,4 millió halálos megbetegedést okozhat évente. A becslés 50%-os bizonytalansággal dolgozik, hiszen nehéz megállapítani pontosan melyik folyamatok összesen mennyi embert érinthetnek. A statisztika a városi PM₁₀ és PM_{2,5} mérési adatokból és a lakossági megbetegedések számából készült. (Cohen *et al.*, 2005) A lebegő részecskék belélegzése, illetve a belélegzett részecskéknek az emberi szervezetben megtett útjának a hossza függ a részecske aerodinamikus átmérőjétől, a légtömeg sebességétől, a légutak nagyságától, és a légzésmintától. Ha a részecskét vízdoldékony anyagok alkotják és az lerakódik a szervezetben, akkor ott a szöveti folyadékban fel is oldódhat, így összetevői bejuthatnak a véráramba, azon keresztül pedig a szervekig is eljuthatnak, ezáltal különböző megbetegedések kiváltó okaként is szerepelhetnek. Ez a folyamat olyan veszélyes, mérgező anyagok esetében is megtörténhet, mint az ólom. A kiülepedés helyétől függően a vízben nem oldódó anyagok is problémát okozhatnak. Amikor egy nagy, kb. 30 µm átmérőjű részecske kerül belélegzésre, akkor az már az orrban vagy a felső légutakban kiszűrődik. A kisebb részecskék eljuthatnak a tüdő légcserét végző részeihez, a légútyagocskákhoz is. Itt kiülepedve egyes anyagok súlyos megbetegedésekhez vezetnek, például a kristályos szilícium-dioxid szilikózist okoz, amely a tüdő hegesedésével jár. Minél kisebb az aerodinamikai átmérője egy részecskének, annál nagyobb az esély arra, hogy a részecske mélyre jut a légzőrendszerben. A 10 µm-nél nagyobb szemcséknél elég kicsi az esély arra, hogy azok elérnek a hörgőkig, de az ennél kisebbek egyre nagyobb valószínűséggel érik el azt a területet. (Johnston, 2000)

4. Az Európai Unió Emissziós jelentése 1990-2016-ra vonatkozóan

A levegőbe juttatott részecskék közül a PM₁₀, a PM_{2,5}, a TSP (Total Suspended Particulates), és a BC (korom) mennyiségét 2000 óta kötelező mérni. Az Egyesült Nemzetek Szervezete Európai Gazdasági Bizottságának (ENSZ EGB, UNECE) a nagy távolságra jutó, országhatáron áterjedő légszennyezésről szóló egyezménye alapján készült jelentésében figyelemre méltó eredmények szerepelnek. Az adatok elemzéséből kiderül, hogy a TSP 22%-os, a PM₁₀ 26%-os, és a PM_{2,5} 28%-os kibocsátáscsökkenést mutat az Európai Unióban. A 4. ábrán látható, hogy a szálló por kibocsátási aránya minden mérettartományban csökkenő tendenciát mutat a 2000-es évekhez képest. A csökkenés oka a közcélú áram és hőtermelés PM₁₀ kibocsátásnak folyamatos csökkenése. Az 5. ábrán az egyes kulcskategóriákra lebontott trendek láthatók. Az építkezésekből származó porkibocsátás, az ipari folyamatok és a termékfelhasználás szektorba esik. Ezen belül a 3. legjelentősebb osztályt képviselik a 2A5B-építkezések és épületbontások a PM₁₀-kibocsátás szempontjából. Összességében egy -16%-os csökkenő porkibocsátási trend figyelhető meg, bár ez nem monoton csökkenés, több kiugrás is szerepel benne.



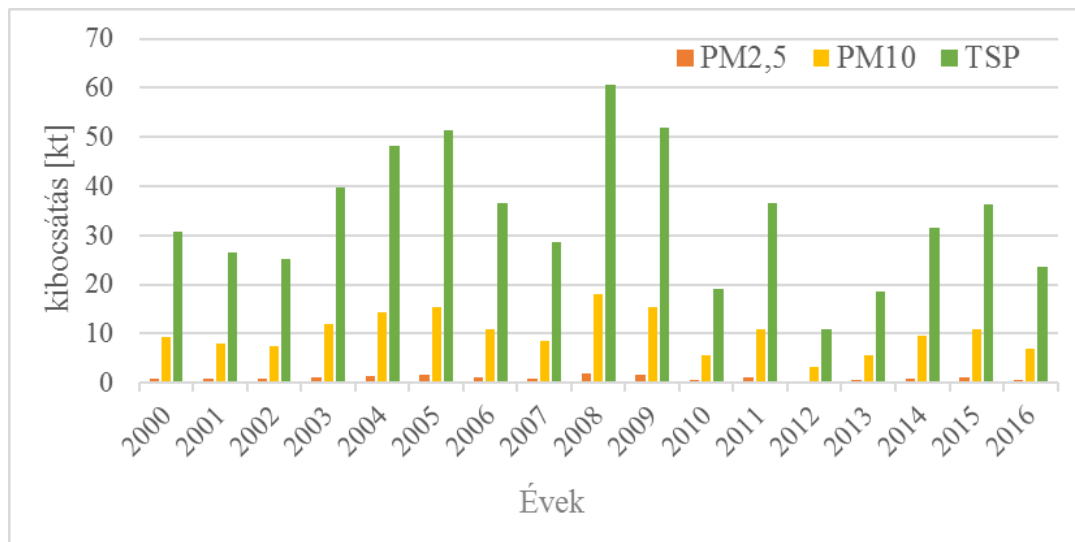
4. ábra: A szálló port alkotó PM_{2,5}, PM₁₀, TSP, BC kibocsátás alakulása az Európai Unióban 2000–2016. (EEA Report No 6/2018)



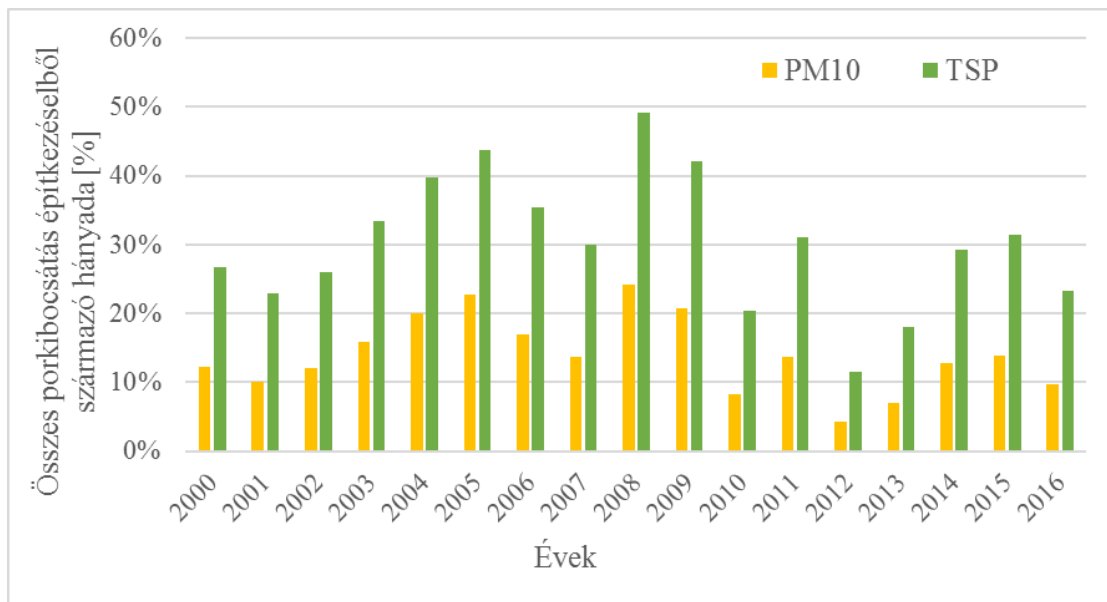
5. ábra: PM₁₀ kibocsátás az Európai Unióban 2000–2016 között a kulcskategóriákban (EEA Report No 6/2018)

A dolgozatomhoz tartozó 2A5, építkezések és bontások csoportot a CEIP [4] (Centre on Emission Inventories and Projections) adatbázisából hozzáférhető nyilvános adatok segítségével Magyarországra vonatkozóan is megvizsgáltam. A magyarországi kibocsátási adatok a PM_{2,5}-re, a PM₁₀-re, és a TSP-re vonatkozóan a 2018-as jelentésből származnak. Az értékek nem mért adatokból származnak, hanem a 2016 EMEP/EPA irányelvei által javasolt módszer alapján lettek kiszámítva. A módszer vizsgálatára az 5.3. fejezetben térek ki.

Ahogy az a 6. ábráról is leolvasható, Magyarországon az építkezések során a levegőbe jutott PM_{2,5} szinte elhanyagolható mennyiségű, gyakran az 1 kt-t sem éri el, viszont a TSP és a PM₁₀ értékek elég magas kibocsátást mutatnak. A Központi Statisztikai hivatal oldaláról letöltött adatok alapján 2004-ben épült a legtöbb lakás (43913) ezzel magyarázható a porkibocsátásban is látható csúcs 2004 és 2005 között. A lakásépítések száma ettől az évtől folyamatosan csökkent, így a porkibocsátás magas értékei valószínűleg az útépitésekből származik. A jelentés tartalmazta az összesített éves kibocsátást, amelyből kiszámítva a PM₁₀ és a TSP mennyiségét arra következtetésre lehet jutni, hogy a mennyiségek kb. 1/3-a ebből a forrásból származhatott. A legmagasabb értékek 2008-ban voltak mérhetőek, ekkor a TSP kibocsátás közel 50%-a az építkezésekből származott. A százalékos porkibocsátási adatok évekre lebontva a 7. ábrán láthatók.



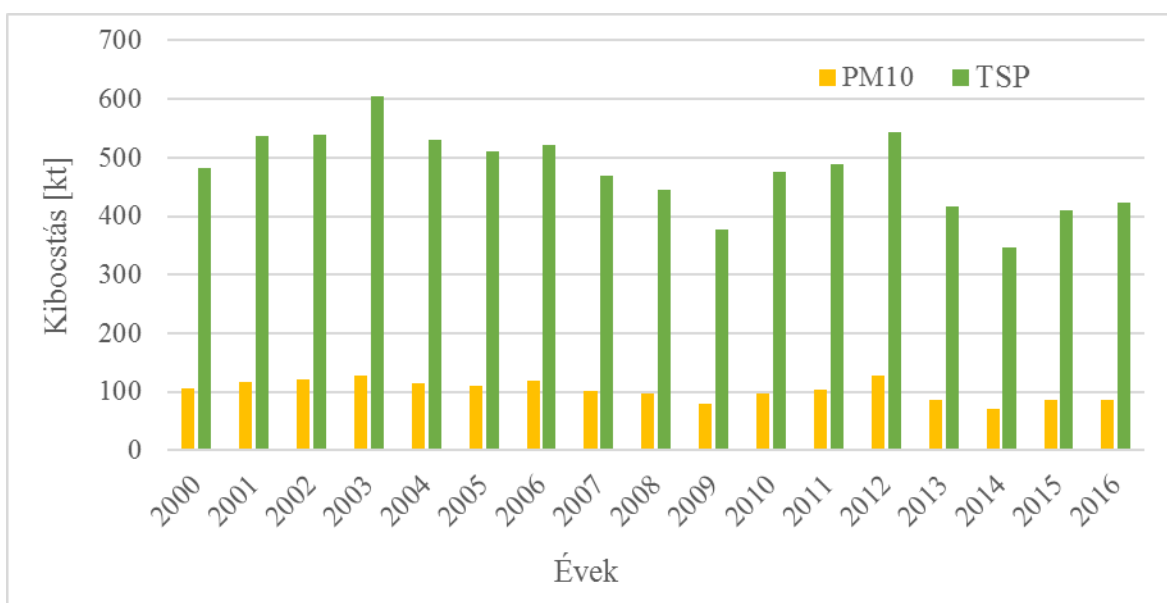
6. ábra: Építkezésekből származó évi porkibocsátás [kt] Magyarországon, 2000-2016 (EEA Report No 6/2018)



7. ábra: A magyarországi éves összes porkibocsátás építkezésekből származó porkibocsátási százaléka (EEA Report No. 6/2018.)

A magyar statisztikához hasonlóan minden évben elkészül az Európai Unió 28 tagállamát összefoglaló emissziós leltár is. Az EU28-ra megvizsgálva ezek az adatok meglehetősen eltérőek. A legnagyobb különbség abban látható, hogy az összes porkibocsátáshoz milyen arányban járult hozzá az építkezésekből származó PM₁₀ és TSP.

A 6. és 8. ábrát összehasonlítva az is látható, hogy Magyarország és az Európai Unió összesített adatai között lényeges eltérés van. Az EU-ban a PM₁₀ esetében az összes kibocsátás 5%-a se származik az építkezésekből, a TSP esetében pedig ez az érték 10% körül ingadozik, amely lényegesen alacsonyabb, mint Magyarország esetében. Az innen származó PM_{2,5} kibocsátás 1% körüli, ezért nem tüntettem fel a 8. ábrán. Az egymást követő években se figyelhető meg akkora ingadozás az európai kibocsátási értékekben, mint a hazai adatok esetében.



8. ábra: Építkezésekből származó évi porkibocsátás [kt] az Európai Unióban 2000–2016 (EEA Report No. 6/2018).

5. Az emissziós leltárak elkészítése

Az emissziós leltárak célja, hogy teljesebb képet adjanak a szennyező anyagok mennyiségéről és területi eloszlásáról. Ezzel egyidejűleg segítik a politikai szabályozásokat is azzal, hogy tudományos indokot adnak ezek kidolgozására, illetve a problémák részletesebb ismertetésével elősegítik az azok megszüntetésére irányuló legmegfelelőbb megoldások felismerését és az intézkedések létrejöttét.

Az EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) által meghatározott legfontosabb szempontok, amelyeket figyelembe kell venni egy emissziós leltár elkészítése során:

- **Átláthatóság:**
Fontos, hogy a leltár készítése során alkalmazott módszerek és feltételezések egyértelműen legyenek meghatározva, hogy az adatok felhasználása során hitelesen lehessen hivatkozni azokra, és ellenőrizhetőek legyenek az azokból levont következtetések.
- **Következetesség:**
A számítások során a leltárban szereplő egymást követő évek, és a különböző adatsorok felvételekor azonos módszereket kell alkalmazni.
- **Összehasonlíthatóság:**
A különböző felek által beküldött leltárak adatainak összehasonlíthatónak kell lenniük egymással.
- **Teljesség:**
Az összes kibocsátó és elnyelő teljeskörű leírásának szerepelnie kell az összes leltárban, illetve minden, a leltárban megtalálható anyagnak rendelkeznie kell az üvegházhatást okozó gázok nemzeti nyilvántartási rendszereire vonatkozó 1996. évi átdolgozott IPCC útmutatóban szereplő irányelvekkel.
- **Pontosság:**
A lehetőségekhez mérten a források és az elnyelők lehető legpontosabb meghatározást kell megadni. Fontos, hogy azok ne legyenek alul vagy felül becsülve, és a lehető legkisebb bizonytalanságok forduljanak elő az adatok bevitele során.

A kibocsátási adatok meghatározását két csoportba sorolhatjuk, a top-down és a bottom-up módszerekre. (*National Academies of Sciences*, 2016)

5.1 Top-down és Bottom-up módszerek

Top-down módszer:

Ez a módszer felülről lefelé építkezve elemzi az adatokat. A légköri modell és a mért adatok alapján következtet a kibocsátás helyére és mennyiségére. Előnye, hogy így vizsgálva a szennyező anyagok globális terjedése átláthatóbbá válik. Hátránya viszont, hogy nagyon komplex modellezési háttér szükséges hozzá, és a módszerrel nem szűkíthető le egy pontra a kibocsátás helyszíne, csak az adott koncentráció-mérésig kereshető vissza a kibocsátás eredete.

Bottom-up módszer:

Ez a módszer alulról felfelé építkezve elemzi az adatokat. A beérkező kibocsátási értékeket, a kibocsátási tényezőket és az ismert tevékenységeket felhasználva számol. A módszer nagy hátránya, hogy a bemenő adatok akár hiányosak is lehetnek, amennyiben nem érkezik be megfelelő tájékoztató a kibocsátás tevékenységéről. A fennmaradó hiányosságokat csak becsülni lehet.

Az emisszió megbecsülésére használt legegyszerűbb képlet:

$$E = \sum_{\text{tevékenységek}} AR \times EF \quad (1)$$

Ez a számítás lineáris kapcsolatot feltételez a tevékenység intenzitása (AR, Activity Rate) és a kibocsátás között. A képletben az EF az egyes tevékenységekhez tartozó kibocsátás arányossági tényezője. Ebben a megközelítésben az emissziók az országos szintű aktivitás és az adott országra jellemző kibocsátási arányok összesítését jelentik.

A számítás során azonban figyelembe kell venni a kibocsátás gazdasági, technológiai és emberi viselkedéssel kapcsolatos változásait, mint például a kibocsátás csökkentésre vonatkozó rendeletek betartását is. Erre az alábbi összetettebb képletet lehet alkalmazni adott t évre:

$$E(t) = \sum_{\text{tevékenységek}} \left(\sum_{\text{technológiák}} (AR(t) \times P(t) \times EF) \right) \quad (2)$$

A képletben megjelenő P a különböző technológiák elterjedésének arányát jelöli:

$$\sum P(t) = 100\% \quad (3)$$

A különböző technológiákra meghatározható a kibocsátói arányosság (EF), ami a P -vel összeszorozva megadja az adott tevékenységből származó kibocsátást, már javítva azt a téves feltételezést, hogy az egységesen lenne kibocsátva, így a kibocsátás már nem a végzés helyétől és időtartamától függ, hanem a folytatott tevékenység sajátosságaitól.

A számításhoz egy olyan adatbázist kell alkalmazni, amelyben legalább a következő három adattábla megléte szükséges. Egy, amely az egyes tevékenységek intenzitását adja meg minden fontos helyszínre az adott időtáv alatt. A másik, a tevékenységekből származó kibocsátások arányossági tényezőit tartalmazza. A harmadik táblában pedig az egyes tevékenységhez tartozó technológiák felsorolásának kell szerepelnie.

A számításhoz még szükséges a következő adatok minél pontosabb meghatározása és az alábbi szempontok betartása is:

- A helyszín, azaz, hogy pontosan hol történik a kibocsátás. Ez lehet egy nagyobb terület, mint a megyék vagy a járások, de egy konkrét kibocsátási pont is, mint egy erőmű vagy egy gyár (vagy esetünkben egy építkezés).
- A szennyező anyagok meghatározása. Az egyes EF értékek egy-egy adott anyag kibocsátására vonatkoznak. Ezek pontos leírása és mértékegységének megadása elősegíti az eredmények értékelését. (Például: a szálló por mérettartománya vagy a VOC-ok definíciója).
- A kibocsátás forrásainak részletes meghatározása az összes tulajdonság megadásával.
- Javasolt még egy tábla megadása az adott tevékenységekhez tartozó időszakok hozzárendelésével, azt elkerülendő, hogy más évekből származó adatok is hozzá legyenek számítva az egyes leltárakhoz.

- Fontos a mértékegységek egységesegek egységessége. A leltárakban mindig SI mértékegységeket használunk.

A számítás szempontjából a kibocsátás arányossági tényezője a legfontosabb adat. Ezeket a következő forrásokból lehet meghatározni:

- gázoknál: IPCC irányelvek, IPCC kibocsátási tényezők
- légszennyező anyagoknál: EMEP/EEA irányelvek, az US EPA: emissziós leltárak és kibocsátási tényezők adategyeztető központja által kiadott útmutatás.

Az adott kibocsátás becslésére használt módszer korlátozott ismerete a számítások során bizonytalanságokhoz és hibákhoz vezethet. A bemenő adatokban lévő hibákból bekövetkezett számítási hibákat akár a méréseken alapuló kibocsátási tényezők mérési hibája is adhatja. A környezeti tényezőktől függő adatok átlagos értékével végzett számítások eltérnek a valójában kialakult helyzet értékeitől.

A kibocsátási adatokból levonható következtetések közé tartozik a kulcskategóriák elkülönítése. Ez az országos leltárakból lehívható adat. Az adott ország szempontjából a kulcskategóriákból nagy mennyiségű kibocsátás történik, amely kibocsátások jelentősen meghatározzák az összességében vett kibocsátás teljes mennyiségét vagy az abban bekövetkező trendet.

5.2 Módszertanok a leltárak létrehozására

1. szint: Legegyszerűbb számítási módszer, könnyen elérhető, már rendelkezésre álló statisztikai adatokat használ fel. A technológiai különbségeket nem veszi figyelembe, az átlagos körülményekkel számol. Lineáris kapcsolatot feltételez a tevékenység intenzitása és az abból származó kibocsátott mennyiség között.

2. szint: Ez a módszer már az országokra jellemző specifikus körülményeket is figyelembe veszi, eltérő kibocsátási értékekkel számol, de alapvetően az 1. szintű módszerhez hasonlóan működik. Megfelelő módszer a kulcskategóriák megtalálására.

3. szint: Bármilyen, a 2. szintű módszernél bonyolultabb elven alapuló módszertan ide tartozik. Ide tartozhat a módszer, ha sokkal részletekbe menőbben vizsgált kibocsátási értékeket és tevékenységeket tartalmaz, de hasonló elven működik, mint az előző 2. szintű módszer. Tartalmazhat azonban részletes dinamikai modellel dolgozó eredményeket is.

A leltár minőségét és megbízhatóságát a módszerek helyessége adja, ezért gyakran szükséges ellenőrizni, fejleszteni azokat. Egyes esetekben pedig a már elkészült leltárakat is újra kell számolni. Újraszámolásra adhat okot amennyiben az addiginál több vagy részletesebb adat válik elérhetővé, ha az irányelv egy újabb verziója kerül kiadásra, felfedezésre kerül valamilyen korábbi hiányosság, vagy valamelyik kategória kulcskategóriává lesz minősítve.

A leltár készítése során két dolog okozhat nagy problémát: egy forrás kihagyása a számításból, vagy ha ugyanaz az emisszió duplán számolva kerül bele a leltárba. Ezen kívül a még ismeretlen források vagy tevékenységek miatt is tapasztalható eltérés a valóságtól. (*Pulles & Heslinga, 2007*)

5.3 Porkibocsátás mennyiségének számítása

Az első, az EPA által 1975-ben kiadott számítási módszer a következő képletet tartalmazta az építkezésekből származó porkibocsátás számítására:

$$e = 2,7Mg/(ha \cdot hónap) = 1,2 t/(hold \cdot hónap) \quad (3)$$

Az e a légkörbe jutó TSP mennyiségét adta meg, ami általánosan a 30 μm -nél kisebb aerodinamikus átmérőjű részecskék összessége. Ez a képlet még nem különböztette meg az építkezés egyes fázisainak a során végbemenő más-más jellegű munkálatokat, illetve azzal a közelítéssel élt, hogy a teljes területen egész idő alatt egyenletes kibocsátás történik. Ezt az eljárást 1993-ban annyival finomították, hogy a különböző munkafolyamatokat már más-más kibocsátási faktorial számították bele az egyenletbe, viszont ezek az adatok nem az építkezésekre vonatkoztak, hanem más ipari tevékenységekre, mivel főként a bányászatból lettek átvéve. (*Muleski, 2005*)

1996-ban a Midwest Research Institute Best Available Control Measure munkacsoport által végzett kutatások során a kibocsátás mennyiségének számítását már külön bontották a lakáscélú és a nem lakáscélú, valamint az útépitésekre vonatkozó tényezőkre. Továbbá az építési munkálatok szintjéhez kötötten eltérő kibocsátási faktorokat is megadtak.

A lakáscélú épületek, ide tartoznak a családi házak és a lakások, emissziós faktorát a következőképpen határozzák meg:

$$E(PM_{10}) = 0,32t (PM_{10})/(hold \times hónap) \times B \times f \times M \quad (4)$$

Mivel amerikai forrásból dolgoztam a képletben szereplő angol hold kb. 0,4 hektárt jelent. A képletben a B az épített házak számát jelöli, az f az épületek számából az alapterület kiszámítására használt együttható, az m pedig az építkezés időtartama hónapokban. Azokra a házakra, amelyekhez pince vagy mélygarázs is épül, javasolt kiegészítő számításokat végezni, hiszen ezeknek a kialakítása további földmozgatási munkálatokkal jár. Egy nagyobb családi ház esetén $f = 1/4$, tehát egy negyedhold nagyságú ház, nagyjából 0,1 hektárnyi építkezési területtel jár.

A nem lakáscélú építkezéseknél a következő képlet használatát ajánlják:

$$E(PM_{10}) = 0,19t (PM_{10}) / (\text{hold} \times \text{hónap}) \times D \times f \times m \quad (5)$$

A képletben a D az építkezés dollárban számított értékét jelenti, az f pedig a dollárból az építkezés alapterület kiszámítására használt együttható, az m ugyanúgy a hónapokban kifejezett időtartamot jelöli, mint az előző esetben. Amennyiben a munka során több földmozgatással-járó folyamat zajlik, ezekre 0,42 t az emissziós faktor. A dollárból való átszámításra példát adhat, hogy a 2004-es adatok alapján minden elköltött millió dollárból 1,5 hold, azaz nagyjából 0,6 hektár területnyi földterületen volt építkezési munkálat az USA-ban.

Az útépitések során a kibocsátásban még nagyobb szerepe van a földmozgatással járó munkálatok mennyiségének.

$$E(PM_{10}) = 0,42 PM_{10} / (\text{hold} \times \text{hónap}) \times M \times f \times d \quad (6)$$

Itt az M az újonnan épített út hossza angol mérföldben kifejezve, ami nagyjából 1609 m-nek felel meg. Az f a megépített útszakasz átalakítása az építkezési munkálatok által érintett területre, ami függ az út típusától, attól, hogy hány sávós és attól is, hogy milyen munkálatokkal lett megépítve. (*Wrap*, 2006)

A Magyarországon is használatos 2016-os irányelvek az alábbiakat tartalmazzák:

Megkülönböztetésre kerül a lakáscélú építkezés, a családi házak (egy és két családosok), külön kategóriaként szerepelnek a lakások, a nem lakáscélú építkezések, és az útépités is. Az irányelvek következő porkibocsátáshoz hozzájáruló tevékenységeket sorolják az építkezésekhez:

- tereprendezési és bontási munkálatok,
- földmunkák, földkiemelés és talajjavítási folyamatok,
- gépek és eszközök mozgása,
- törmelékprító eszközök alkalmazása,
- szállítás gépjárművel (anyagok fel- és lerakodása, vontatása, sárnyom hagyása betonutakon, majd ezt követően annak újabb felkavarása),
- terület előkészítő munkálatok,
- építkezési munkálatok, mint beton, malter és gipsz keverése, fúrás, aprítás, csiszolás, hegesztés stb.,
- változatos befejező munkálatok,
- szabadon maradt építkezési területek és burkolatlan földutakról szél által felkavart por.

A kibocsátott por mennyiségének megbecsülésére a következő algoritmus használatát javasolják:

$$EM_{PM_{10}} = EF_{PM_{10}} \times A \times d \times (1 - CE) \times \left(\frac{24}{PE}\right) \times \left(\frac{s}{9\%}\right) \quad (7)$$

A képletben a jelölések: $EM_{PM_{10}}$, a PM_{10} kibocsátás [kg], $EF_{PM_{10}}$, az adott anyag emissziós faktora [kg (PM_{10}) /($m^2 \cdot év$)], A : az építkezési munkálatok során érintett terület nagysága [m^2], d : az építkezés időtartama [év], CE : a kibocsátás csökkentésére alkalmazott módszerek hatékonysága, PE : a Thornthwaite-féle csapadék-párolgás index, s : a talaj iszaptartalma [%]. Az iszap talaj felső rétegében található 0,002–0,063 mm közötti szemcseméretű talajalkotók összessége.

A geológiai eredetű por, amely az építkezési munkafolyamatok során kerül a légkörbe, meglehetősen alacsony $PM_{2,5}$ -re nézve, és kb. 10%-a a PM_{10} kibocsátásnak. A TSP kibocsátás nagyjából a háromszorosa a PM_{10} mennyiségének.

1. táblázat: Emissziós faktorok értékei adott építkezési típusoknál (Coenen et al., 2016).

EF értéke	TSP [kg/(m ² ·év)]	PM ₁₀ [kg/(m ² ·év)]	PM _{2,5} [kg/(m ² ·év)]
családi házak	0,29	0,086	0,0086
lakások	1	0,3	0,03
nem lakáscélú építkezések	3,3	1	0,1
útépítés	7,7	2,3	0,23

A d , a CE , a PE , és az s értékek minden ország esetében egyéni értékeket vehetnek fel, és a számítás pontosításának érdekében ezeket a lehető legpontosabban kell meghatározni.

Az építkezés idejének kiszámításához átlagos értékek szerepelnek kiindulásképpen az irányelvben. A családi ház építése fél év ($d=0,5$), az apartmanok építése 9 hónap ($d=0,75$), a nem lakáscélú építkezések hossza 10 hónap ($d=0,83$), az útépítés 1 évig ($d=1$) tart. Ezeket az értékeket csak akkor javasolt használni, ha semmilyen más forrásból származó adat nem áll rendelkezésre a leltár elkészítésekor.

A CE , tehát a kibocsátást csökkentő tevékenységek hatékonysága különösen változatos értékeket adhat. Alapvetően a vízzel felocsolás a leginkább elterjedt módszer kibocsátást csökkentő tevékenység, azonban ezekre a módszerekre részletesebben egy későbbi fejezetben térek majd ki. A porkibocsátás szempontjából a talaj nedvességtartalma kiemelten fontos tényező. Erre a Thornthwaite-féle klíma osztályozás alapján a PE index (csapadék-párolgás), a csapadékösszegekből és az átlaghőmérsékletből a következő összefüggés alapján állapítható meg

$$3,16 \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i}{1,8T_i + 22} \right)^{\frac{10}{9}} \quad (8)$$

A képletben a P_i a mm-ben kifejezett havi csapadékösszeg, a T_i pedig a °C-ban megadott havi átlag hőmérsékletet jelenti. A kísérletek, amelyek alapján ez az algoritmus készült Észak-Amerika keleti részén zajlottak, ennek ellenére ez a képlet terjedt el Európában is, ahol a PE átlagos értéke 120. (Coenen et al., 2016)

6. Speciális eset vizsgálata: Kína

Az elmúlt évtizedben radikális fejlődés következett be Kína iparában. Ezzel együtt jár viszont az ország légszennyező anyagok kibocsátásában bekövetkező nagy ugrása is. Az elmúlt évtized egyik legnagyobb helyi problémája a szmog. A városi légszennyezés változatos és összetett eredetű probléma. A nagymértékű urbanizáció miatt jelentős mennyiségű porszennyezés származik az építkezésekből. Az Egészségügyi Világszervezet megállapítása szerint 2009-ben Kínában a PM₁₀ éves átlagkoncentrációja 98 µg/m³ volt, még ez az érték globálisan 71 µg/m³-nek adódott. (Wu et. al., 2015)

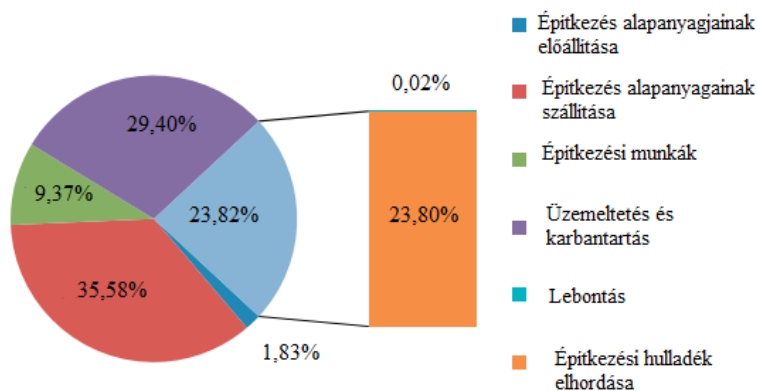
A megavárosokban, azaz a 10 millió főt meghaladó népességű településekben komoly problémákat okoz a légszennyezés. A legnagyobb mértékű szennyezés a szénégetés és a gépjárműforgalomból ered, de nagy szerepet játszik az ipari folyamatokból származó szálló por is, ezért megfelelő figyelmet igényelne az építkezésekből származó porkibocsátás is. Az egyhavi PM₁₀ szennyezés kb. 10%-a eredhet az építőiparból. A 2010-es évek során több rendelkezés is született a porkibocsátás csökkentésének érdekében. 2000-ben olyan törvény került bevezetésre, amelyben olyan javaslatok szerepeltek az építőiparban résztvevők számára a porkibocsátás csökkentésére és elkerülésére, mint például a több burkolt útfelület kiépítése vagy a korszerűbb eszközök és módszerek alkalmazása az építkezés során. Az ezeket súlyosan figyelembe nem vevő építkezőket jelentős összegre megbüntethették, vagy akár a munkálatokat is beszüntethették. A 2007-ben bevezetett Zöld építkezésekre vonatkozó irányelvek (Guidelines for green constructions) már olyan tételekre is kitért, mint hogy porfelfogó eszközöket használjanak por-fújó eszközök helyett egy-egy helyszínen pormentesítésére, illetve, hogy az építkezés során a TSP légköri koncentrációja nem haladhatja meg a 0,08 mg/m³-t. Ezeket a szabályokat csak az új, zöld épületek építése során kötelező betartani, de jó irányba mutat az építkezések jövőjét illetően. A legtöbb rendelet egyelőre a helyszínen dolgozók érdekeit veszi figyelembe egészségügyi és biztonsági szempontokból. Annak ellenére, hogy egyre aggasztóbb a városi levegő minősége, és már elismerték a kapcsolatot a légszennyezés ténye és a levegő minősége között, a légszennyezés csökkentésére még nincs egységes szabályozás. (Wu et al., 2015)

A légszennyezés megadóztatása hatékony módszer a szennyezés mértékének a csökkentésére, és annak a jelentőségének a kiemelésére. Egy 2003-ban bevezetett törvény alapján ugyan létezik egy országos szintű javaslat ennek betartására és határértékeire, viszont a helyi önkormányzatok saját maguk rendelkezhetnek a részletekről. Az adóból származó bevételek a kormányzat környezetvédelmi alapjához kerülnek. A levegő szennyezettségének megállapítására egy egységes és pontos számítási módszerre lenne szükség minden városban, de ennek a létrejötte még várat magára. A következőkben néhány példát szeretnék bemutatni a légszennyezés megadóztatásra. *Santou*, nagy, déli kikötőváros és ipari központ ahol terület alapján számítanak. A felépített alapterület és a munkavégzés területének összege után, kb. 0,1 USD/m² adót kell fizetni. Hasonló elveken alapul a *Dalianban*, egy északi nehézipari központban bevezetett módszer is, azonban az már sokkal jobban kidolgozott. Ugyanúgy négyzetméterenként számít, viszont már figyelembe veszi a tevékenységet is. A bontási munkálatokat, a földmunkákat, a nyersanyagok fel-és lepakolását, és felhalmozását más-más adókulcs szerint számolják. Ezekkel a módszerekkel az a probléma, hogy mivel rögzített áron számolnak, nem veszik figyelembe azt, ha a munkálatok kivitelezése közben már alkalmaznak valamilyen porkibocsátást csökkentő eljárást, ezért nem éri meg különösebben a befektetőknek, hogy így járjanak el. Az anyagi nyereség ösztönzően hatna az építkezőkre, ezért *Senccsen* (Hong Kong melletti kikötő és ipari központ) városban már egy olyan módszer került előterjesztésre, amely alkalmazkodik egy adott építkezés sajátosságaihoz. Kiszámításra kerül az építkezés során levegőbe juttatható por tömege, és az is hogy az mennyire befolyásolható. Itt egy fix alapösszeg kerül kivetésre, de emellett a befolyásolható részt az alkalmazott módszerekre tekintettel csökkentik. Minden módszerhez tartozik egy együtttható. Ha az összes befolyásoló módszer megfelelően alkalmazásra kerül, a befolyásolható portömeg után egyáltalán nem kell adózni. Ilyen, a kibocsátást befolyásoló módszer például az építkezési terület körbekerítése, a gépjárművek takarítása és a nyersanyagok fedett tárolása. A legnagyobb mértékű, és talán legfontosabb szempont az, hogy az építőiparban résztvevő emberek, főleg a vállalkozók, nézőpontja környezetbarátabb legyen, és hogy megérje nekik figyelembe venni a szennyezőanyag-kibocsátást csökkentő módszereket. (*Zhang et al.*, 2016; *Xing et al.*, 2018)

7. Életciklus-értékelés módszere az építőiparban

A következő hongkongi esettanulmány elkészítését az idézte elő, hogy felismerték, hogy a globális CO₂ kibocsátás 1/3-a az építőiparból ered, ez a második legnagyobb kibocsátó forrás, ezért fontos, hogy pontosabban megértsék, milyen módszerekkel lehet csökkenteni a károsanyagkibocsátást ezekenél a forrásoknál. Erre egy hatékony módszer az *életciklus-értékelés*, röviden LCA (Life-Cycle Assessment). Ez egy olyan módszer, amely egy adott termék, vagy folyamat teljes életútján keresztül végigköveti annak a folyamatnak a lehetséges következményeit és a környezetre gyakorolt hatásait. Az 1990-es évektől kezdve terjedt el a módszer használata az építőiparban is. Az esettanulmány nyolc szennyező anyagot vizsgál meg: a szén-dioxidot, a metánt, a dinitrogén-oxidot, a kén-dioxidot, a szén-monoxidot, a nitrogén-oxidokat, a nem-metán illékony szerves anyagokat (NMVOC), és a dolgozatom szempontjából fontos szálló port.

Az esettanulmány helyszíne a hongkongi „One Peking” felhőkarcoló 2001–2003 közötti építése. Az elkészült épület 30 emeletből áll és 160 m magas. Az összesített eredmény alapján megállapításra került, hogy a CO₂, a SO₂, a N₂O, és az NO_x 98%-a az épület üzemeltetéséből származott, miközben a CO₂, a N₂O, a SO₂, a NO_x, és a NMVOC más folyamatok során történő kibocsátása egyáltalán nem volt jelentős (kisebb mint 2%). Az épület PM kibocsátása a következőképpen alakul: az épület alapanyagának előállítására 23,82%, az alapanyag szállítása: 35,58%, az építkezési munkálatok: 9,37%, az épület üzemeltetése: 29,4%, a bontási munkálatok: 1,83%-ban járul hozzá az összértékhez. Ezek az értékek láthatók a 9. ábrán. Az építkezés során összesen 1748 tonna por került kibocsátásra. (Li et al., 2009)



9. ábra: Életciklus elemzés a hongkongi felhőkarcolóra a PM₁₀ kibocsátási adatok százalékos eloszlása. (Li et al., 2009)

Összehasonlításként egy európai és egy amerikai egyesült államokbeli épület adatait is megvizsgáltam (Seppo *et al.*, 2006). Az első eset egy dél-finnországi irodaépület, a 2003-ban épült *Junnila* életciklus elemzése. Ez a 4400 m² összesített alapterületű épület 7390 kg PM₁₀-kibocsátást fog produkálni a feltételezett 50 éves „élete” során. Ebből az össz kibocsátási értékből 2100 kg az alapanyagok előállítása, 400 kg az építkezési munkálatok, 3700 kg a használata során keletkezik, 1100 kg a karbantartási munkálatok és 90 kg pedig a végső, bontási fázisból fog származni.

A második, az amerikai egyesült államokbeli, szintén 4400 m² alapterületű irodaépület esete. Itt összesen 9300 kg PM₁₀ kibocsátás történik, szintén 50 évre vizsgálva a folyamatokat. Ebből 2700 kg az építkezési alapanyagok előállításánál, 700 kg az építkezési munkálatok, 3400 kg a használat és 2100 kg a karbantartás, valamint 400 kg a lebontás során kerül kibocsátásra.

A fenti adatokból azt a következtetést lehet levonni, hogy egy épület élete során a szálló por-kibocsátás jelentős része nem az építkezés vagy a bontás során történik, hanem sokkal inkább annak használata alatt, az áramtermelés és fűtés következtében. A kibocsátott pormennyiség ezekben a fázisokban egyáltalán nem elhanyagolható mennyiséget jelent.

8. Porkibocsátás mérése

Az EPA irányelvek első kiadása 1975-ben jelent meg, amely az építkezésekből származó porkibocsátás emisszió számítására vonatkozott, viszont utána közel 20 évig nem változott a benne leírt módszer, mivel nem történtek újabb helyszíni mérések. Az elméleti értékek alátámasztásához és fejlesztéséhez elengedhetetlen a terepi mérés, valamint az idő múlásával az építkezéseken végzett munkavégzés módja is fejlődhet, ezért az emissziós faktorok frissítése is szükséges lehet. (*MRI*, 1999)

8.1 Helyszíni mérések

Az egyik első mérést az EPA National Risk Management Research Laboratory végezte 1998–2000 között. A mérések során a porkoncentrációt és a légáramlást is mérték az érintett területek felett, valamint a szélességet 2 magasságban. Összesen 49 porkibocsátást profilozó mérés lett elvégezve két kansasi építkezésen, amelyekből arra a megállapításra jutottak, hogy az építkezések során egyedi arányban (0,01–0,1) jut kibocsátásra a $PM_{2,5}$ és a PM_{10} , így a más szektorokból, mint például a bányamunkálatok során végzett mérésekből átvett kibocsátási faktorok és mennyiségek alkalmazásával hibás becslések történnek.

A porkibocsátás legnagyobb mennyisége a gépek áthaladás közben jön létre. Legtöbbször a 300–600 m nagyságú megtett útvonal során tízszerannyi PM_{10} -t kibocsátás történik, mint az ásás és feltöltési munkálatok alkalmával. A földnyesővel végzett talajmunkák során változatos mennyiségű PM_{10} juthat a légkörbe, körülbelül 0,5–500 kg/800 m³ közötti mennyiség, a talaj tulajdonságai és a végzett munka minőségétől függően. A kibocsátott $PM_{2,5}$: PM_{10} aránya is nagyban változik. Az arányszám értéke átlagosan 0,48 a végzett munka során, azonban haladás közben inkább 0,25 ez az arány. Fellocsolás után 75%-os csökkenés figyelhető meg 2 órán keresztül a teljes kibocsátásban.

A teherautók megpakolása és kiürítése alkalmával is nagy a különbség a porkibocsátásban. A megpakolás során százszor nagyobb kibocsátási értékeket mértek, mint kiürítéskor. A föld és a sár tovább hordozásának vizsgálatok azt figyelték meg, hogy nagyjából 10%-os talajnedvesség mellett a locsolás már kontraproduktív. Átlagosan az érintett területen áthaladó járművenként 6 g PM_{10} -kibocsátás történik, 430 m-es út megtétele során. Ugyanekkora megtett út során, amennyiben nem sáros az út és nem kerül továbbhordozásra a föld, ennek csupán a tizede kerülne kibocsátásra. (*Muleski et al.*, 2005)

Latin Amerikában is jelentősen megnövekedett az urbanizáció, 2010-ben a lakosság 80%-a már városokban élt. Brazíliában 2014-ben az építőiparból származott a GDP 10%-a. Ezzel együtt megjelentek az építkezésekkel járó környezeti problémák, a természetes erőforrások túlhasználása, az építéssel járó hulladék és zajszennyezés. A munkálatok során kibocsátott gázok, porok és a festésekből eredő VOC-ok jelentősen rontják a levegőminőséget és az életszínvonalat (*Borja et al.*, 2018). A latin-amerikai helyzet miatt itt egy komolyabb helyszíni végzést végeztek el. *Araújo et al.* (2014) munkájukban egy Brazíliában, Salvadorban 2013–2014 között épített lakóépület építésén vizsgálták a porkibocsátást. A vizsgálatokhoz alkalmazott műszer egy MiniVol hordozható levegő mintavételező eszköz volt, amely percenként 5 liter levegőt képes átvizsgálni. Különböző méretű szűrők alkalmazásával a PM_{2,5} és a PM₁₀ mérésére is alkalmas, bár alapvetően TSP-t mér a készülék.

Az építkezés során 3 különböző fázisban terveztek mérni:

1. fázis: földmunkák (2013. október 6–19.)
2. fázis: szerkezet felépítése (2014. január. 7–17.)
3. fázis: befejező munkálatok (2014. január 20–30.)

Minden fázist 10 napon keresztül vizsgálták. Az építkezés alapterülete 32780 m² volt, amelyen 464 lakóegység kialakításával összesen 8 darab 16 emeletes lakótornyot építettek fel. A nagy területen végzett építkezésen azonban több, különböző fázisú munkálatokat is végeztek párhuzamosan. Az időjárási helyzet megfigyelésének érdekében az építkezés megkezdése előtt 5 nappal egy meteorológiai állomást is kihelyeztek a helyszínre. Az építkezés bejáratánál volt egy fix mérőpont, továbbá három, az uralkodó szélirányhoz igazított mérőpont párt helyeztek még ki. A mérések során 8 órán keresztül mérték a PM₁₀-t, a PM_{2,5}-t és a TSP-kibocsátást reggel 7 és délután 3 óra között, valamint 22 órán keresztül a PM₁₀-t, délután 5-től másnap délután 3-ig. A begyűjtött mintákat röntgen fluoreszcens spektroszkópiával (XRF) kémiai összetételre is vizsgálták. Csak PM_{2,5} és PM₁₀ mintákat lehetett XRF-fel vizsgálni, mert a TSP-t gyűjtő teflon szűrőt nem lehet kitenni ilyen sugárzásnak. Az építkezési területtől 5, 10, 20, 50 és 100 m-re 3 napra ragasztós papírokat helyeztek ki, hogy így vizsgálják a szomszédos területekre érkező por mennyiségét. A mérés ideje alatt, Salvadorban a szélirány 360°-os változást mutatott, még az uralkodó szélirány északkeleti irányú volt, főleg a 7 és 3 óra közötti időszakban. A 22-órás mérés eredményét nem közölték a tanulmányban, mert túl sok hibás adatot tartalmazott. A hiba a helyszíni

mérések során vagy a laborban keletkezhetett. A 8-órás mérések eredményei azt mutatták, hogy minden esetben a TSP-koncentráció volt a legmagasabb, átlagos értéke $482 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -nek adódott az egyik mérőponton. A levegő páratartalma mindig magasabbnak bizonyult 60%-nál, a légnyomás 1006,58 hPa és 1013,25 hPa között változott, az átlag hőmérséklet az első fázisban $24\text{--}30^\circ\text{C}$, a másodikban $25\text{--}27^\circ\text{C}$ még a harmadikban $27\text{--}29^\circ\text{C}$ között alakult. A csapadék mennyisége a mérés ideje alatt 60%-ban 0 és 0,02 mm közötti volt, kiugróbb eredményeként a második fázisban mért 3,2 mm-t, és a harmadikban fázisban tapasztalt 6,6 mm-t lehet megemlíteni. Ahogy látható, az időjárási tényezők viszonylag állandók voltak, ezért nem volt lehetőség határozott következtetéseket levonni a porkibocsátás és ezen tényezők kapcsolatáról, viszont a szelesebb napokon nagyobb porkibocsátás volt megfigyelhető.

A legmagasabb és a legalacsonyabb porkoncentrációk is ugyanazon a mérőponton lettek mérve. A TSP és a PM_{10} maximális koncentrációját ugyanazon a napon mérték. A 2. táblázat adataiból látszik, hogy minimum értékek olyan napokon fordultak elő, amikor volt csapadék, és magasabb volt a páratartalom.

2. táblázat: A mért szálló porkoncentrációk maximum és minimum értéke (Araújo et al, 2014)

	Maximum értékek			Minimum értékek		
	TSP	PM10	PM2,5	TSP	PM10	PM2,5
mért koncentráció	664,19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	270,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	105,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	307,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	138 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	53,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
időpont	2014.01.13	2014.01.16	2014.01.13	2014.01.09	2014.01.15	2014.01.10
napi átlagos szélesség	1,4m/s	1m/s	1,4m/s	1,1m/s	0	0,9m/s
uralkodó szélirány	nem délkeleti	délkeleti	nem délkeleti	délkeleti	szélcsend	nem délkeleti
páratartalom	78%	73%	78%	82%	83%	89%-
csapadék	nem volt	nem volt	nem volt	0,2 mm	1,8 mm	2 mm

A por kémiai összetétele nem mutatott jelentős különbségeket a különböző mérőpontokon, illetve a különböző építkezési fázisok során. A mintákban kalcium, szilícium, klór és vas volt jelen.

A 2014-es mérésekkel megegyező eljárást alkalmazva mértek még a szálló porkoncentrációt 4 további építkezésen is, ugyanúgy Salvadorban (*De Moraes et al., 2016*). A négy újabb mérési helyszín alapterülete 701,5 m² és 32780 m² között változott, amelyekből egy kereskedelmicélú és 3 lakáscélú építkezés volt. A 4 helyszín mellé még az előbb részletezett mérést is beszámították és a következőket állapították meg:

Az eredmények alapján az eső és a szél erősen befolyásolta a por koncentrációját az építkezéseken. A maximális koncentrációt minden állomáson akkor mérték, amikor a szélirány alig változott nap során, és nem volt csapadék, vagy csak nagyon kevés. Ezzel szemben a minimum értékek mérésekor a szélirány erősen változott, és jelentősebb mennyiségű csapadék is hullott. A szélesség és a páratartalom vizsgálatokor nem volt megállapítható határozott kapcsolat. A hőmérséklet és a légnyomás nem változott annyit a mérések alatt, hogy befolyásolhatta volna az eredményeket. Azokon a napokon is előfordulhatott magas porkoncentráció, amikor nem volt munkavégzés a területen, ilyenkor viszont a kémiai összetételben sok nátrium és klór volt kimutatható, tehát a tengerből odajutó só koncentrációját mérték.

A különböző építkezési munkálatok befolyásolják a szálló por koncentrációját. A 2014-es mérésekből nem lehetett ilyen irányú következtetést levonni, az új mérések során viszont kiderült, hogy a maximális porkibocsátással a betonozási munkálatok, illetve az építkezési anyagok fel- és lepakolása jár.

A MiniVol által mért eredmények és a ragasztós papírokon mért eredmények között felfedezhető kapcsolat: a ragasztós papírok legmagasabb eredményei egybeestek a MiniVol mérések maximumaival, azonban olyankor is magas pormennyiséget fogtak fel, amikor a MiniVol nem mért kimagasló értéket. Ekkor feltételezhetően más forrásokból is került minta a mérőeszközre. Általánosságban kijelenthető, hogy a ragasztós papír módszere nem ad megbízható adatokat.

A legtöbb mérési eredmény erősen különbözött az 5 mérési helyszínen. Az eredményeket befolyásoló tényezők között kell megemlíteni az építkezések sajátosságait, a mérőeszközök pontos elhelyezését és a pontos munkavégzést. Azokon az építkezéseken, ahol magasabb és nagyobb épületek kerültek kialakításra, kisebb értékeket mértek, valószínűleg a szél- és porfogó hatása miatt.

Az átlagos 8-órás TSP koncentráció 108 és 483 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ között alakult, még a PM_{10} koncentrációk 46 és 214 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ között. Mindkét koncentrációnál volt olyan mérési eredmény, amely átlépte a braziliai és a nemzetközi határértékeket.²

8.2 Antropogén kibocsátás műholdas mérések

A globális porkibocsátása esetében nehéz helyszíni vizsgálatok nélkül különválasztani, hogy milyen hányad származik természetes forrásból, és melyik az, amelyik emberi tevékenységek miatt keletkezik. Az antropogén kibocsátás becslése során még gyakran nagy pontatlanságok történhetnek, amennyiben nem veszik figyelembe az egyes tevékenységek rövid idejű változásait, illetve az egyes források elhanyagolását.

A Calipso műhold (CALIPSO = Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) egy francia-amerikai műhold, amely segítségével pontosabb képet lehet kapni a légkörbe bekerülő por sajátosságairól. A műholdat 2006-ban lötték fel az űrbe, feladata a légkör vertikális vizsgálata az aeroszol részecskék és felhők klímabefolyásoló hatásának a jobb megértésének érdekében. A Lidarral felszerelt műhold (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP) infravörös és látható tartományban 563 nm és 1064 nm hullámhosszon dolgozik. A programja a visszaverődés és a depolarizációs arány elemzéséből, a színprofil vizsgálatokból, az 5 km-es aeroszol profilozó mérések, valamint a felszínborítottsági adatokból számolja ki a porkibocsátást. Az antropogén porkibocsátás elkülönítése 4 lépésben történik meg:

1. A teljes porkibocsátás észlelése:

A Calipso mérései alapján a teljes légköri porkoncentráció [g/m^2] számszerűsítése.

2. A por forrásának területének meghatározása:

Az antropogén porkibocsátás jellegzetes forrásai az aratás, a szántás, a túllegeltetés, közlekedés és az építkezések, ezért a kibocsátás forrásterületei a termőföldek, a legelők és a városi területek lehetnek, ezeket kell megkeresni. A MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) felszínborítottsági adatainak felhasználásával elkülöníthetők ezek a területek.

²A PM_{10} WHO szerinti határértéke 24 óra alatt 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2006). A braziliai határérték 24 óra alatt 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ kibocsátást engedélyez. Braziliai határérték létezik TSP-re is: 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ TSP 24 óra alatt. [5]

3. A planetáris határreteg magasságának meghatározása:

Szemben a természetessel, az antropogén kibocsátás az emisszió után ritkán jut a planetáris határreteg felé. A Calipso adatai ezen magasság meghatározására is alkalmasak a planetáris határreteg hőmérsékleti és aeroszol vízpára koncentrációjának megméréseivel.

4. Az antropogén por mennyiségének elkülönítése:

A réteg visszaszórási és depolarizációs értékei alapján elkülöníthető az antropogén por, például azért, mert ez a halmaz szabálytalan, vegyes összetevőkből álló szemcséket tartalmaz, még a természetes por sokkal egységesebb. A depolarizáció alapján elkülöníthetőek a gömb alakú aeroszol részecskék és a szabálytalan alakú légköri por (*Huang et al., 2015*).

A Calipso műhold adataiból évenként átlagosan $0,11 \text{ g/m}^2$ porkibocsátás határozható meg a teljes Földre vonatkoztatva, de bizonyos területek, mint például India esetében, ez az érték $0,87 \text{ g/m}^2$ is lehet. A legmagasabb értékek Kínában, Észak-Amerikában és Észak-Afrikában figyelhetők meg.

Nagy bizonytalanságot okozhat továbbá az egyes területek fejlettségének és a városok elhelyezkedésének a meghatározása. A városi területek elkülönítésére lehet használni a CNLI indexet (Compounded night light index). Ez alapvetően a városi területek nagyságának megállapítására használt adat, amely a városok fényes területeit különíti el éjszakai felvételeken. Az urbanizációs szint számszerűsítésére alkalmazva 0 és 1 közötti értékeket ad meg.

A CNLI indexet a fényes, azaz városi területek teljes területhez képest mért aránya (R), illetve az átlagos éjszakai fény intenzitás (I) szorzata adja:

$$CNL = I \times R, \quad R = \frac{T_{fényes}}{T_{teljes}} \quad (9)$$

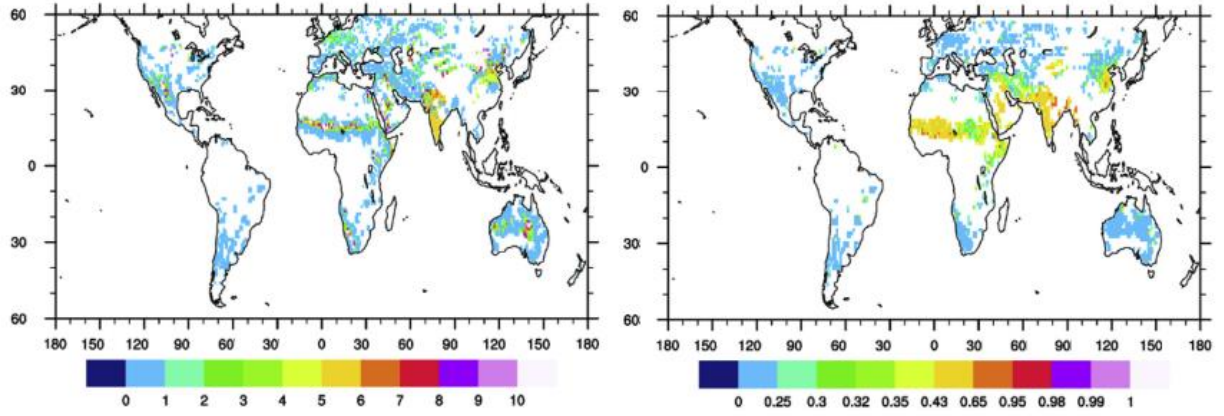
Chen és munkatársai 2018-as tanulmányukban leírtak egy, a Calipso műhold eredményeivel konzisztens módszert a 2007–2010 közötti antropogén porkibocsátás számítására. Ebben külön számítási módszert alkalmaznak a direkt és az indirekt porkibocsátás számítására, valamint részletesen kitérnek a területek gazdasági helyzetének beszámítására is.

$$G_1 = C \times S_{ad} \times u^3 \times \left(1 + \frac{u_t}{u}\right) \times \left(1 - \frac{u_t^2}{u^2}\right), \quad ha \ u > u_t \quad (10)$$

A képletben a G_1 az indirekt antropogén porkibocsátás áram [$\mu\text{g}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$] jele, a C egy konstans [$\mu\text{g}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-5}$], az S_{ad} a dinamikus indirekt, antropogén porkibocsátási állandó [0–100], az u a 10 m-en mért szélesebesség [m/s] amely az ERA-Interim reanalízis adatbázis 10 m magas szélesebességi adataiból származik, az u_t pedig az a határsebesség, amely felett a talajrészecskéket felkapja a szél. Ez a határérték az adott talajtípustól függ, és értéke 6,5 m/s és 13 m/s között alakulhat. A legmagasabb értékek Észak-Amerikában ($1,48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), Indiában ($0,81 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) és Kelet-Kínában ($3,05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) figyelhetők meg.

$$G_2 = \begin{cases} 1,37 \times p^{0,08} \times GDP_{növekedés}^{0,02} \times EC^{1,78}, & ha \ 0 < CNLI \leq 0,1 \\ 1,37 \times p^{0,04} \times GDP_{növekedés}^{0,05} \times EC^{1,56}, & ha \ 0,1 < CNLI \leq 0,3 \\ 1,37 \times p^{0,08} \times GDP_{növekedés}^{0,002} \times EC^{1,35}, & ha \ 0,3 < CNLI \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

Ebben a képletben a G_2 a direkt antropogén porkibocsátás áram [$\mu\text{g}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$], a p a népsűrűség, az EC pedig a GDP-hez hasonlóan a terület gazdasági fejlettségét mutató érték, amely számítása az élelmiszerre költött kiadások és a teljes fogyasztásra költött kiadások arányának a meghatározásával történik. Ha az EC érték 0,3 alatti, az emberek átlagosan jól élnek, ha 0,5–0,6 a napi szükségleteket se fedezi a bevétel. Amerikában az EC értéke 0,08; Angliában 0,13; még Franciaországban 0,18. Összességében a direkt antropogén források háromszor-négyszer nagyobb porkibocsátók, mint az indirekt források, és változatos területi eloszlással rendelkeznek. A fejlődő országoknál Kína esetében 0,22; Indiában pedig 0,26 az EC értéke. A képlet próbálja megfelelően figyelembe venni a népesség mellett az adott terület fejlettségét is. A direkt kibocsátás legnagyobb mennyisége is a fejlődő országokból származik. Indiában $5,58 \pm 0,03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, Kínában $4,55 \pm 0,1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ kibocsátás történik, főleg a még nem teljesen kifejlődött ipar, a városfejlesztések és a még nem teljeskörű környezetvédelmi szabályozások miatt. A fejlett országokban a kibocsátási áram átlagosan $1,21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. (*Chen et al.*, 2018)



10. ábra: A becsült összes antropogén kibocsátási áram [$\mu\text{g}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$] (bal) és a Calipso műhold adataiból számított antropogén kibocsátás [g/m^2] (jobb) 2007–2010 között (Chen et al.)

9. Porkibocsátást csökkentő módszerek

A WRAP (Western Regional Air Partnership) porkibocsátással kapcsolatos kézikönyve a következő módszereket sorolja fel az építkezések során kibocsátásra kerülő por csökkentésére.

a) A felület locsolása:

A víz hatására a talajrészecskék összetapadnak, így kisebb arányban juthatnak ki a légkörbe. A víz az építkezések területén könnyen elérhető és nem juttat szennyező anyagot a talajba, viszont a vízháztartás szempontjából káros nagymennyiségű vizet elloccsolni erre a célra. Ez a módszer csak akkor hatékony, ha a helyszínen megfelelően van alkalmazva. Ez azt jelenti, hogy megfelelő időközönként ismétlés is történik, és nem lesz túllocsolva a terület. A víz alkalmazása után pár órával, az aktuális hőmérséklet és a levegő relatív nedvességtartalmától függően jelentősen csökken a módszer hatékonysága. Amennyiben a területre túl sok víz kerül, a locsolás hatása a munkagépek és a gépjárművek kerekeire ragadó sárral nagyobb területre terjedhet el. A locsolás ismétlése miatt a módszer magas költségeket okozhat az építkezés során, mert munkaerőt vesz igénybe, és az elloccsolt víz is pénzbe kerül.

b) Vegyi stabilizátor anyagok:

- Vízabszorpciós anyagok:

Vízmegkötő tulajdonsággal rendelkező anyagok, például kalcium-klorid, magnézium-klorid vagy nátrium-klorid oldatok alkalmazása, amelyek megnövelik a felületi feszültséget a víz és a talajrészecskék között, így csökkentik a párolgást és növelik a talaj összetartását. Ez a módszer olyan helyeken működik a legjobban, ahol magas a levegő páratartalma. Szárazabb környezetekben gyakran víz hozzáadása mellett kell alkalmazni a módszert. A vízabszorpciós anyagok káros hatással vannak a helyi édesvízkészletre, a növényzetre és a vízminőségre is, továbbá korróziót okoznak a fém és acél eszközökön. A módszer csak azokon a területeken hatásos, ahol van gépjármű közlekedés.

- Kőolaj származékok:
Vízben nem oldódó anyagok, amelyeket a vízben szuszpendálva vagy emulgeálva, majd a felületre permetezve alkalmaznak. Például bitumen, paraffin vagy gyantás anyagok, amelyek a részecskékkel összetapadva szilárd védő felületet alkotnak a kezelt felszínen. Policiklusos aromás vegyületeket tartalmazhatnak, amelyek súlyosan károsíthatják a környezetet, ezért ez a módszer veszélyes a vízi élővilágra.
 - Egyéb szerves vegyületek, pl. lignin-szulfonát:
Vízben oldódó vegyületek, így eső után már csökken a hatásuk.
 - Polimer termékek, polivinil-acetát vagy akril polimerek:
Hosszú szénláncokból álló vegyületek, amelyek ragasztó hatásuk révén megkötik a talajrészecskéket meggátolva azok felporzását. Nem szennyező hatásúak a környezetre nézve, és nem okoznak rozsdásodást sem. Az terület felszínén létrehoznak egy keményebb kérget, így a szél hatása is kevésbé érvényesül a területen.
 - Szintetikus anyagok, pl. izoalkán vegyületek:
Környezetbarát, a porkibocsátást csökkentő folyadékok, amelyek mellett nem kell plusz vizet alkalmazni.
- c) Szélfogó kerítések elhelyezése a területen:
A fizikai gátak megtörik az erős szeleket, így csökkentik a szél által felkavart porkibocsátást.
- d) A gépjárművek kerekeinek letakarítása mielőtt azok elhagyják az építkezési területet:
A tisztításnak köszönhetően nem lesz tovább hordozva a szennyeződés.
- e) A forgalom csökkentése az építkezési területen, illetve a forgalom sebességének korlátozása:
A PM₁₀ kibocsátást és az 56 km/h feletti sebességgel haladó jármű között lineáris kapcsolatot feltételezhetünk; 24 km/h sebesség korlátozás a javasolt.

10. Összefoglalás

Jelen dolgozatomban egy konkrét példán keresztül, az építkezésekből származó porkibocsátás bemutatásán keresztül próbáltam szemléltetni, hogy mennyire összetett és szerteágazó területet fednek le az egyes légszennyező anyagok témakörei.

Az építkezésekből származó porok, mint antropogén aeroszol részecskék befolyásolhatják a klímaváltozást, de az éghajlati tényezők is nagyban hozzájárulnak a kibocsátott pormennyiséghez. Megfelelő ismeretekkel, és az intézkedések betartásával ez a forrás jelentős mértékben csökkenthető, azonban ehhez olyan rendelkezéseket kell hozni, amelyek motiválják a szektor befektetőit is arra, hogy ezeket alkalmazzák. A népesség növekedéssel és az urbanizációs folyamatok hatással vannak az építőiparra, így környezetbarát építési módszerek, és hatékony kibocsátást csökkentő eljárások kialakítása szükséges. Mindezek létrehozásához viszont a források és a mennyiséget befolyásoló tényezők részletes ismeretére van szükség.

A 2000–2016 között vizsgált adatok alapján az építkezési szektorból származó kibocsátás az Európai Unióban és Magyarországon is csökken, viszont a gazdasági fejlődéstől is függ, hogy ez a tendencia a jövőben is így marad-e, sikerül-e betartani továbbra is a Genfi egyezményben leírtakat.

A leltárkészítés során törekedni kell arra, hogy minél pontosabb adatokkal lehessen dolgozni, kevesebb hiba és hiányos adat legyen a számítás során. A pontosításhoz alaposabb helyszíni vizsgálatok is szükségesek, különböző klimatikus viszonyokon véghezvitt mérési eredmények elemzése és az így nyert adatok alapján az irányelvekben szereplő emissziós faktorok fejlesztése.

Az építkezésekből származó porkibocsátás káros egészségügyi hatásai és a klímaváltozásban betöltött szerepe miatt a téma további vizsgálatokat igényel. A jövőbeni pozitív változások elősegítése fontos feladata a kutatói és a politikai szférának, amely feladat számos kutatási lehetőséget biztosít és szorosan összefonódik a meteorológiával.

11. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőnek, dr. Breuer Hajnalkának a munkáját. azt, hogy a szakdolgozatom megírása alatt felmerülő akadályok során mindig a segítségemre sietett, készségesen a rendelkezésemre állt és türelmesen segített a felmerülő kérdésekkel, gondokkal kapcsolatban. Szaktudásával és tapasztalataival nagyban hozzájárult ezen dolgozat megszületéséhez.

12. Irodalomjegyzék

- Araújo, I.P. S., Costa, D.B., De Moraes, R.J.B. (2014). Identification and Characterization of Particulate Matter Concentrations at Construction Jobsites. *Sustainability* (Switzerland). 6. 7666-7688.
- Araújo, I. P. S., Costa, D. B., De Moraes, R. J. B (2016). *Particulate Matter Concentration from Construction Sites: Concrete and Masonry Works*. *Journal of Environmental Engineering*, 142(11), 05016004.
- Borja, L., César, F.S., Cunha, R.D.A., Kiperstok, A. (2018). A Quantitative Method for Prediction of Environmental Aspects in Construction Sites of Residential Buildings. *Sustainability*. 10. 1870.
- Boucher, O. Haigh, J., Hauglustaine, D., Haywood, J., Myhre, G., Nakajima, T, Shi, G.Y., Solomon, S. *Radiative Forcing of Climate Change In: Climate Change* (2001): The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.
- Calvert J.G. *Glossary of Atmospheric Chemistry Terms* (1990) *Pure&App. Chem.*, Vol. 62, No. 11, pp. 2167-2219.
- Chen, S., Jiang, N., Huang, J., Zang, Z., Guan, X., Ma, X., Luo, Y., Li, J., Zhang, X., Zhang, Y. (2018). Estimations of indirect and direct anthropogenic dust emission at the global scale. *Atmospheric Environment*. 200. 50-60.
- Coenen, P., Hausmann, K., Kampffmeyer, T. Kludt, R., Visschedijk, A. (2016) *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016, 2.A.5.b Construction and demolition*, 16 p.
- Cohen, A.J.; Anderson, H.R.; Ostro, B.; Pandey, K.D.; Krzyzanowski, M.; Künzli, N.; Gutschmidt, K.; Pope, A.; Romieu, I.; Samet, J.M.; et al. *The global burden of disease due to outdoor air pollution*. *J. Toxicol. Environ. Health A* 2005, 68, 1301–1307.
- Countess Environmental (2006). *WRAP Fugitive Dust Handbook.*, 244 p.
- Dexter, A.R., Bird, N.R.A., 2001. *Methods for predicting the optimum and the range of soilwater contents for tillage based on the water retention curve*. *Soil Tillage Res.* 57,203–212.
- EPA (1995) *Compilation of Air Pollutant Emissions Factors (AP-42)*, 13. Miscellaneous Sources 13.1.–13.2.3
- European Environment Agency (2018) *European Union emission inventory report 1990-2016 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)* EEA Report No 6/2018, 154 p
- Everard, M. (2015) *Breathing Space: The Natural and Unnatural History of Air*. London: Zed Books. 200 p.
- Frankel, A.A. (1989) *The Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution: Meeting the Challenge of International Cooperation* 30 *Harv. Int'l. L. J.* 447 p.
- Hinds, W.C. (1999) *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons Inc., New York, 53-55.
- Jinding, X., Ye, K., Zuo, J., Jiang, W. (2018). Control Dust Pollution on Construction Sites: What Governments Do in China? *Sustainability*. 10. 2945.
- Johnston, J.R. (2000). Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust. Protection of the Human Environment Occupational Health and Environmental Health Series, Geneva, 1999, World Health Organization WHO/SDE/OEH/99.14: English only. *Annals of Occupational Hygiene*. 44. 405.
- Junnila, S., Horvath, A., Guggemos, A.A. (2006). *Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States*. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(1), 10-17.
- Kok, J.F., Ward, D.S., Mahowald, N.M. & Evan, A.T. (2018). *Global and regional importance of the direct dust-climate feedback*. *Nature Communications*. 9. (1), 241.
- Li, X., Zhu, Y., Zhang, Z. (2010). *An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes*. *Building and Environment*. 45. 766-775.

- MacDougall, C., DeSart, G., Hildreth, T., Thomsen, R., Chamberlain, A. (2001) *Evaluating soil Particulate Emission Potential*. 10th International Emission Inventory Conference - "One Atmosphere, One Inventory, Many Challenges", EPA, 10 p.
- Midwest Research Institute (MRI) (1999) Estimating particulate matter emissions from construction operations: Final Report, Eastern Research Group, Inc., 52 p.
- Mosley, S. (2014) *Environmental History of Air Pollution and Protection*. In: Agnoletti M., Neri Serneri S. (eds) *The Basic Environmental History*. Environmental History, vol 4. Springer, Cham, 143-169.
- Muleski, G.E., Cowherd, C., Kinsey, J. (2005). *Particulate Emissions from Construction Activities*. Journal of the Air & Waste Management Association (1995). 55. 772-783.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H. (2013) *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 659-740.
- National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2016): *The Future of Atmospheric Chemistry Research: Remembering Yesterday, Understanding Today, Anticipating Tomorrow*. Washington DC: The National Academies Press. 226 p.
- Pulles, T., Heslinga, D. (2007). *The Art of Emission Inventorying*, TNO, the Netherlands, 78 p.
- Stefanovits P., Filep Gy., Füleky Gy. (1999). *Talajtan*. Mezőgazda kiadó, Budapest, 270-290.
- Watson, J. G., Chow, J. (2000) *Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research*, Desert Research Institute, DRI Document No. 6110.4F, 240 p.
- Watson, J.G, Chow, J., Pace, T.G. (2000). *Fugitive dust emissions*. Air Pollution Engineering Manual, Second Edition, Chapter: 4, Publisher: John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, Editors: W.T. Davis, pp.117-135.
- WHO, (2006) *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogendioxide and sulfur dioxide*, Global update 2005, Summary of risk assessment, 9-13.
- Wu, Z., Zhang, X., Wu, M. (2015). *Mitigating construction dust pollution: State of the art and the way forward*. Journal of Cleaner Production, Journal of Cleaner Production. 112. 1658-1666.

Internetes források

- [1] - <https://vegianyag.kormany.hu/lrtap>
- [2] - <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4225:ed-2:v1:en>
- [3] - <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A1000306.KOR>
- [4] - http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/status_reporting/2018_submissions/
- [5] - <https://www.transportpolicy.net/standard/brazil-air-quality-standards/>